



UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

**APROVECHAMIENTO DE ESCORIAS BLANCAS
(LFS) Y NEGRAS (EAFS) DE ACERÍA ELÉCTRICA
EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y EN
CAPAS DE FIRMES DE CAMINOS RURALES**

Autora:

VANESA ORTEGA LÓPEZ

Director:

Dr. JUAN MANUEL MANSO VILLALAÍN

BURGOS, DICIEMBRE 2011

*“Ni en la vida ni en la guerra se puede triunfar sin fe.
La fe crea y avasalla. No es posible el éxito en la lucha si
antes de empezar la contienda se está pensando en la
derrota y preparando la retirada.
Las más veces al vencedor lo hace el vencido.”*

AGRADECIMIENTOS

Durante los últimos años me he dedicado a elaborar la presente Tesis Doctoral, con el propósito de avanzar tanto a nivel personal, como profesional y académico. En estas líneas quiero expresar mi más sentido agradecimiento a todos aquellos que han colaborado en la realización de la misma, y muy especialmente:

A mi Director de Tesis D. Juan Manuel Manso Villalaín por su apoyo moral y técnico en todo momento, por sus consejos y su conducta.

A mis compañeros del laboratorio de Grandes Estructuras, del laboratorio de Edificación, del laboratorio de Geotécnica y del laboratorio de Infraestructuras del Transporte de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos.

A Jesús Javier González, catedrático de Ciencias de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao, por sus aportaciones a lo largo del todo el proceso de investigación.

Al departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander por su hospitalidad durante el verano de 2011.

A la empresa Ingema, Investigaciones Geotécnicas y Medioambientales S.L. por haberme orientado en la localización de materia prima, por su amable disposición y por la ayuda técnica prestada.

Por último, a mis seres más cercanos, familia y amigos, por su cariño.

RESUMEN

El trabajo que recoge la presente Tesis Doctoral estudia la idoneidad de un aprovechamiento integral de las escorias blancas de horno de cuchara (LFS), y las escorias negras obtenidas en la fabricación de acero mediante horno eléctrico de arco (EAFS), en la estabilización de suelos arcillosos de mala calidad y en la formación de capas del firme de caminos rurales, respectivamente.

Para conseguir las propiedades resistentes adecuadas en terrenos naturales arcillosos, sobre los que se construyen obras civiles, es preciso mezclarlos con materiales cualificados, como cementos y cales. Asimismo, existen ciertos subproductos que pueden ser empleados con esa finalidad, como las escorias de acería u otros.

En este trabajo se han analizado las propiedades de la escoria de horno cuchara LFS y de varios suelos arcillosos susceptibles de estabilización. Tras la elaboración de las mezclas entre ambos en distintas proporciones, los resultados obtenidos indican que se obtiene un comportamiento similar en las mezclas de suelo con escoria de horno cuchara y las mezclas de suelo con cal, registrándose una mejora de las propiedades del suelo modificado en cuanto a su expansividad y a su capacidad portante.

Por otro lado, se ha estudiado las propiedades de la escoria negra de horno eléctrico de arco EAFS y se ha comprobado que se trata de un subproducto con muchas semejanzas a una zahorra artificial. Se plantean en la Tesis diferentes opciones para que EAFS sean utilizadas con éxito en las formación de capas del firme.

Con este planteamiento se pretende contribuir a la sostenibilidad medioambiental; por un lado se aprovechan un subproducto como las escorias de acería, por otro, se reduce la explotación de canteras y se disminuye la eliminación en vertedero de suelos de mala calidad encontrados en la traza de los caminos.

Las técnicas empleadas han de ser técnicamente viables, sencillas en su desarrollo, durables en el tiempo y sin afección en el entorno. Además, si conseguimos que puedan competir económicamente con las tradicionales, tendríamos suficientes argumentos para defender actuaciones de aprovechamiento y reutilización de los residuos de la industria siderúrgica en los términos propuestos en esta Tesis Doctoral.

La Tesis se estructura en nueve capítulos que desarrollan los diferentes apartados de la misma:

En el Capítulo 1 “Introducción” se recogen los objetivos del trabajo planteado y las referencias precedentes al mismo.

En el Capítulo 2 “La escoria siderúrgica: antecedentes, planteamiento y situación actual” se hace referencia a la problemática de los residuos producidos en la fabricación del acero, a la cantidad de escoria generada en los diferentes proceso de obtención de acero y a las aplicaciones alternativas a su depósito en vertederos.

El Capítulo 3 “Los caminos rurales: antecedentes y problemática actual” contiene los condicionantes de diseño de una red de caminos rurales, la normativa aplicable y los ensayos que se han tenido en cuenta en el desarrollo de la presente Tesis Doctoral.

El Capítulo 4 “Caracterización de la escoria blanca de horno de cuchara (LFS)” contiene una caracterización físico-mecánica y química-mineral exhaustiva de LFS. A lo largo del capítulo se compara la LFS con la cal que habitualmente se emplea en estabilización de tierras blandas.

El Capítulo 5 “Caracterización de la escoria negra de horno eléctrico de horno (EAFS)” contiene una caracterización físico-mecánica y química-mineral exhaustiva de EAFS. Se toma como referencia la zahorra artificial definida en el PG-3 para comparar las propiedades entre ambas.

El Capítulo 6 “Caracterización y clasificación de suelos” contiene una caracterización físico-mecánica y química-mineral de 4 tipos de suelos arcillosos de mala calidad y su correspondiente clasificación, según el PG-3, la ASSHTO y la USCS ó Clasificación de Casagrande. Los suelos proceden de las provincias de Burgos y Palencia. Se trata de suelos no aptos para su directa utilización en la formación de explanadas de caminos rurales, por lo que se procede a su estabilización.

En el Capítulo 7 “Estabilización de suelos” se definen los materiales y proporciones que van a emplearse en las mezclas de estabilización, bien con cal bien con LFS. Se toman los resultados de las mezcla suelo-cal como referencia para los resultados de las mezclas suelo-LFS. Se estudian propiedades geotécnicas, ensayos de estabilidad volumétrica, ensayos de lixiviación y ensayos de durabilidad de las mezclas.

En el Capítulo 8 “Utilización de la EAFS en capas del firme de caminos rurales” se propone el empleo de escoria negra de horno eléctrico de arco EAFS en la elaboración de capas de firme de caminos rurales. Se plantea la mezcla binaria de escoria EAFS con un rechazo calizo de cantera, para alcanzar la granulometría y plasticidad necesaria en bases de caminos rurales sin revestimiento asfáltico.

En el Capítulo 9 “Conclusiones finales de la tesis doctoral y trabajos futuros”, se resume las conclusiones finales y se recoge algunas propuestas para trabajos futuros.

El último apartado enumera las referencias bibliográficas utilizadas, así como la normativa vigente de aplicación.

*AGRADECIMIENTOS**RESUMEN**ÍNDICE TEMÁTICO I**ÍNDICE DE FIGURAS..... V**ÍNDICE DE TABLAS..... XIII***ÍNDICE TEMÁTICO****CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN..... 1****CAPÍTULO 2. LA ESCORIA SIDERÚRGICA: ANTECEDENTES, PLANTEAMIENTO Y SITUACIÓN ACTUAL..... 11**

2.1 INTRODUCCIÓN..... 11

2.2 ESCORIAS SIDERÚRGICAS. PRODUCCIÓN DE ACERO Y ESCORIA EN ESPAÑA Y EN LA UNIÓN EUROPEA 12

2.3 PRODUCCIÓN DE ACERO EN HORNOS ELÉCTRICOS 21

2.4 FACTORES QUE AFECTAN A LA ESTABILIDAD DE LAS ESCORIAS DE ACERÍA 33

2.5 APLICACIONES DE LAS ESCORIAS DE ACERÍA..... 38

CAPÍTULO 3. LOS CAMINOS RURALES: ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA ACTUAL 51

3.1 LOS CAMINOS RURALES 51

3.1.1 El tráfico 53

3.1.2 Intensidad media diaria (IMD) 54

3.1.3 Elementos de la geometría del camino 58

3.1.4 La explanada..... 59

3.1.5 El firme 64

3.2 CLASIFICACIÓN DE SUELOS..... 72

3.3 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE SUELOS..... 78

3.3.1 Parámetros de naturaleza 79

3.3.2 Parámetros de estado 82

3.4	ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS	84
3.4.1	Suelo a estabilizar	87
3.4.2	Ensayos a realizar en suelos estabilizados.....	89
3.4.3	Acción de la cal sobre los suelos arcillosos.....	94
3.5	ZAHORRAS.....	97
CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA BLANCA DE HORNO DE CUCHARA (LFS)		101
4.1	INTRODUCCIÓN.....	101
4.2	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS LFS .	101
4.2.1	Análisis Químico	102
4.2.2	Difracción de rayos X.....	109
4.2.3	Espectroscopía de infrarrojos	117
4.2.4	Análisis termogravimétrico y calorimétrico	119
4.2.5	Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por energía dispersa de rayos-X.	122
4.3	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS LFS	138
4.3.1	Granulometría de las LFS.....	138
4.3.2	Propiedades físicas de las LFS	141
4.3.3	Ensayos de cambio volumétrico de las LFS	146
4.3.4	Resumen de ensayos de las LFS.....	157
4.4	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE LAS LFS CON CALES Y CON SUELOS	158
4.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	159
CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA NEGRA DE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO (EAFS).....		161
5.1	INTRODUCCIÓN.....	161
5.2	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS EAFS	165
5.2.1	Análisis químico	165
5.2.2	Difracción de rayos-X	170
5.2.3	Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por energía dispersa de rayos X.....	183

5.3	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS EAFS	205
5.3.1	Granulometría de las EAFS	205
5.3.2	Propiedades físicas de las EAFS	208
5.3.3	Expansión potencial de las EAFS.....	214
5.3.4	Ensayos de lixiviación de las EAFS	217
5.3.5	Resumen de ensayos de las EAFS	218
5.4	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE LAS EAFS CON LAS ZAHORRAS.....	218
5.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	220
CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS		221
6.1	INTRODUCCIÓN.....	221
6.2	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE SUELOS..	222
6.2.1	Análisis químico	222
6.2.2	Caracterización mineralógica para el suelo S1.....	224
6.2.3	Caracterización mineralógica para el suelo S2.....	230
6.2.4	Caracterización mineralógica para el suelo S3.....	236
6.3	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS SUELOS.....	243
6.3.1	Granulometrías	243
6.3.2	Propiedades geotécnicas	246
6.3.3	Resumen de ensayos geotécnicos de los suelos.....	255
6.4	CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.....	256
6.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	257
CAPÍTULO 7. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....		259
7.1	INTRODUCCIÓN.....	259
7.2	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS MEZCLAS	263
7.2.1	Propiedades geotécnicas de las mezclas	263
7.2.2	Ensayos de cambio volumétrico	279
7.2.3	Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas	295
7.2.4	Ensayos de lixiviación.	299
7.2.5	Ensayos de durabilidad.....	300

7.3	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	307
CAPÍTULO 8. UTILIZACIÓN DE LA EAFS EN CAPAS DEL FIRME DE CAMINOS RURALES.....		309
8.1	INTRODUCCIÓN.....	309
8.2	DETRITUS CALIZO	310
8.3	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL A EMPLEAR EN LAS CAPAS DEL FIRME DE CAMINOS RURALES	316
8.3.1	Granulometrías	316
8.3.2	Propiedades físicas	319
8.3.3	Resumen de características del material a emplear en las capas del firme de caminos rurales	331
8.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	332
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES FINALES DE LA TESIS DOCTORAL Y TRABAJOS FUTUROS.....		333
9.1	CONCLUSIONES FINALES DE LA TESIS DOCTORAL	333
9.2	TRABAJOS FUTUROS.....	335
BIBLIOGRAFÍA		337

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción de escoria siderúrgica en España. Año 2009	14
Figura 2. Producción de escoria siderúrgica en Unión Europea. Año 2009.....	14
Figura 3. Evolución de la producción de acero en los últimos años en España. Fuente: UNESID. Asociación Empresarial de la Siderurgia Española [2].....	15
Figura 4. Distribución de la industria siderúrgica y de primera transformación en España por CCAA. Fuente: UNESID [2].	15
Figura 5. Tipos de escorias BF	17
Figura 6. Proceso de fabricación de acero con hornos EAF-LF.....	23
Figura 7. Sección transversal de un camino	59
Figura 8. Determinación del espesor de firmes flexibles en relación con el CBR de la explanación y con la intensidad de tráfico referida a los vehículos de tránsito.....	67
Figura 9. Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T4 en función de la explanada	68
Figura 10. Plasticidad de los suelos.....	79
Figura 11. Curva del ensayo Próctor	82
Figura 12. Fases S-C-A para 5% MgO.....	108
Figura 13. S-C-M para 10% Al ₂ O ₃	108
Figura 14. Difractómetro	111
Figura 15. Interpretación del difractograma de la fracción en polvo de la escoria E1 .	116
Figura 16. Interpretación del difractograma de la fracción en nódulos de la escoria E1	116
Figura 17. Interpretación del difractograma de la escoria E2.....	116
Figura 18. Análisis de la escoria blanca E1 en polvo mediante infrarrojos.	118
Figura 19. Análisis de la escoria blanca E1 en nódulos mediante infrarrojos.....	118
Figura 20. Gráfica del análisis térmico sobre la fracción en polvo de escoria E1.....	120
Figura 21. Gráfica del análisis térmico sobre la fracción en nódulos de escoria E1	120
Figura 22. Gráfica del análisis térmico sobre la escoria E2.	121
Figura 23. Microscopio electrónico de barrido	123
Figura 24. Curva granulométrica LFS	138
Figura 25. Estudio granulométrico de la escoria blanca mediante Mastersizer X.	141
Figura 26. Próctor Normal de la escoria E1	145
Figura 27. Próctor Normal de la escoria E2	145
Figura 28. Próctor Modificado de la escoria E1	146
Figura 29. Próctor Modificado de la escoria E2.....	146

Figura 30. Expansión potencial los 7 primeros días para E1.....	149
Figura 31. Expansión potencial final para E1.....	149
Figura 32. Expansión potencial los 7 primeros días para E2.....	150
Figura 33. Expansión potencial final para E2.....	150
Figura 34. Hinchamiento tras ensayo de expansión potencial para la E1.	152
Figura 35. Hinchamiento tras ensayo de expansión potencial para la E2.	152
Figura 36. Aspecto del material tras ensayo de expansión potencial para la E1.....	152
Figura 37. Aspecto de material tras ensayo de expansión potencial para la E2.....	153
Figura 38. Análisis térmico de E1 tras el ensayo de expansividad.....	154
Figura 39. Análisis térmico de E2 tras el ensayo de expansividad.....	154
Figura 40. Difracción de rayos X (XRD) de la escoria E1 tras el ensayo de expansividad	155
Figura 41. Difracción de rayos X (XRD) de la escoria E2 tras el ensayo de expansividad	155
Figura 42. Planta de tratamiento y clasificación de escoria EAFS.....	163
Figura 43. Fases S-C-M para 10% Al ₂ O ₃	169
Figura 44. Fases S-C-A para 5% MgO.....	169
Figura 45. Fases S-C-A para 10% MgO.....	169
Figura 46. Difracción rayos X. EAFS muestra 1.....	174
Figura 47. Difracción rayos X. EAFS muestra 2.....	175
Figura 48. Difracción rayos X. EAFS muestra 3.....	176
Figura 49. Difracción rayos X. EAFS muestra 4.....	177
Figura 50. Difracción rayos X. EAFS muestra 5.....	178
Figura 51. Difracción rayos X. EAFS muestra 6.....	179
Figura 52. Difracción rayos X. EAFS muestra 7.....	180
Figura 53. Difracción rayos X. EAFS muestra 8.....	181
Figura 54. Difracción rayos X. EAFS muestra 9.....	182
Figura 55. Escoria EAF estabilizada, aspecto general. X 35.....	185
Figura 56. Escoria EAF estabilizada, detalle. Óxidos de hierro. X 200.....	186
Figura 57. Escoria EAF estabilizada, detalle. Cal y silicatos. X 3500.....	187
Figura 58. Escoria EAF estabilizada, silicatos y óxidos de hierro. X 5000.....	188
Figura 59. Escoria EAF estabilizada, detalle. Periclusa. X 3500.....	189
Figura 60. Escoria EAF estabilizada, detalle. Gelenita. X 3500.....	190
Figura 61. Escoria EAF estabilizada, detalle. Portlandita. X 5000.....	191

Figura 62. Escoria EAF estabilizada, brownmillerita. X 5000.....	192
Figura 63. Escoria EAF estabilizada. Ferrita cálcico-magnésica. X 3500	193
Figura 64. Escoria EAF estabilizada, cal y óxido de hierro. X 2000	194
Figura 65. Escoria EAF nueva, aspecto general. X 35	195
Figura 66. Escoria EAF nueva, detalle. Silicatos. X 100	196
Figura 67. Escoria EAF nueva, brownmillerita. X 200	197
Figura 68. Escoria EAF nueva, magnesio-ferrita. X 150	198
Figura 69. Escoria EAF nueva, pequeña partícula compleja. X 1500.....	199
Figura 70. Escoria EAF nueva, brownmillerita. X100	200
Figura 71. Escoria EAF nueva, gelenita predominante. X 100	201
Figura 72. Escoria EAF nueva, silicatos y ferritos. X 100	202
Figura 73. Escoria EAF nueva, óxidos de hierro. X 200.....	203
Figura 74. Escoria EAF nueva, silicatos y ferritos. X 35	204
Figura 75. Granulometría escoria negra	205
Figura 76. Granulometría escoria negra comparado con ZA25	206
Figura 77. Granulometría escoria negra comparado con ZA20	206
Figura 78. Granulometría escoria negra comparado con ZAD20	207
Figura 79. Detalle de montón de escoria de EAF.....	212
Figura 80. Diferentes fracciones granulométricas de escoria de EAF	212
Figura 81. Detalle de árido grueso de escoria de EAF	213
Figura 82. Expansión potencial de las EAFS	215
Figura 83. Muestra de suelo S1	224
Figura 84. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S1.....	225
Figura 85. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S1. Detalle 1	225
Figura 86. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S1. Detalle 2	226
Figura 87. Difracción de rayos X. Agregado orientado. Suelo S1	226
Figura 88. Difracción de rayos X. Agregado orientado+etilenglicol. Suelo S1	227
Figura 89. Difracción de rayos X. Agregado orientado+calcinado 550°C. Suelo S1... ..	227
Figura 90. Difracción de rayos X. Conjunto (polvo cristalino+agregado orientado+etilenglicol+calcinado). Suelo S1.....	228
Figura 91. Análisis de infrarrojos del suelo S1	229
Figura 92. Análisis TGA-DTA del suelo S1	229
Figura 93. Muestra de suelo S2	230
Figura 94. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S2.....	231

Figura 95. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S2. Detalle 1	232
Figura 96. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S2. Detalle 2	232
Figura 97. Difracción de rayos X. Agregado orientado. Suelo S2	233
Figura 98. Difracción de rayos X. Agregado orientado+etilenglicol. Suelo S2.....	233
Figura 99. Difracción de rayos X. Agregado orientado+calcinado 550°C. Suelo S2...	234
Figura 100. Difracción de rayos X. Conjunto (polvo cristalino+agregado orientado+etilenglicol+calcinación). Suelo S2.....	234
Figura 101. Análisis de infrarrojos del suelo S2	235
Figura 102. Análisis TGA-DTA de suelo S2	236
Figura 103. Muestra de suelo S3	237
Figura 104. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S3.....	238
Figura 105. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S3. Detalle 1	238
Figura 106. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S3. Detalle 2	239
Figura 107. Difracción de rayos X. Agregado orientado. Suelo S3	239
Figura 108. Difracción de rayos X. Agregado orientado+etilenglicol. Suelo S3.....	240
Figura 109. Difracción de rayos X. Agregado orientado+calcinado a 550°C. Suelo S3	240
Figura 110. Difracción de rayos X. Conjunto (Polvo cristalino+Agregado orientado+etilenglicol+calcinado). Suelo S3.....	241
Figura 111. Análisis de infrarrojos del suelo S3	242
Figura 112. Análisis TGA-DTA del suelo S3	242
Figura 113. Granulometría del suelo S0.....	243
Figura 114. Granulometría del suelo S1	244
Figura 115. Granulometría del suelo S2.....	244
Figura 116. Granulometría del suelo S3.....	245
Figura 117. Curvas granulométricas de los suelos: S0, S1, S2 y S3	245
Figura 118. Próctor normal del suelo S2	248
Figura 119. Próctor normal del suelo S3	248
Figura 120. Próctor modificado del suelo S0	249
Figura 121. Próctor modificado del suelo S1	250
Figura 122. Próctor modificado del suelo S2	250
Figura 123. Próctor modificado del suelo S3	250
Figura 124. Índice CBR-densidad seca a PM del suelo S0	253
Figura 125. Índice CBR-densidad seca a PM del suelo S1	253

Figura 126. Índice CBR-densidad seca a PM del suelo S2	253
Figura 127. Índice CBR-densidad seca a PM del suelo S3	254
Figura 128. Próctor Modificado de la mezcla S0C3	265
Figura 129. Próctor Modificado de la mezcla S1C2	265
Figura 130. Próctor Modificado de la mezcla S1E5.....	266
Figura 131. Próctor Modificado de la mezcla S2C2	266
Figura 132. Próctor Modificado de la mezcla S3C2	266
Figura 135. Índice CBR-densidad seca de las mezclas del suelo S2.....	271
Figura 136. Índice CBR-densidad seca de las mezclas del suelo S3.....	272
Figura 137. Evolución de la resistencia a compresión simple con el tiempo de curado. Mezclas de S1.....	274
Figura 138. Evolución de la deformación con el tiempo de curado. Mezclas de S1....	274
Figura 139. Evolución de la resistencia a compresión simple con el tiempo de curado. Mezclas de S3.....	275
Figura 140. Evolución de la deformación con el tiempo de curado. Mezclas de S3....	275
Figura 141. Probeta de suelo S1 con 90 días de curado	277
Figura 142. Probeta de mezcla con cal S1C2 con 90 días de curado	277
Figura 143. Probeta de mezcla con escoria S1E5 con 90 días de curado.....	277
Figura 147. Expansión potencial de la mezcla S0E3 durante los 7 primeros días	282
Figura 148. Expansión potencial final de la mezcla S0E3	282
Figura 149. Expansión potencial de la mezcla S1E5 durante los 7 primeros días	282
Figura 150. Expansión potencial final de la mezcla S1E5	282
Figura 151. Expansión potencial de la mezcla S2E5 durante los 7 primeros días	283
Figura 152. Expansión potencial final de la mezcla S2E5	283
Figura 153. Expansión potencial de la mezcla S3E5 durante los 7 primeros días	283
Figura 154. Expansión potencial final de la mezcla S3E5	283
Figura 155. Baño para probetas en el ensayo de expansión potencial	288
Figura 156. Probeta de S1E5 tras el ensayo de expansión potencial.....	288
Figura 157. Probeta de S2E5 tras el ensayo de expansión potencial.....	289
Figura 158. Probeta de S3E5 tras el ensayo de expansión potencial.....	289
Figura 159. Difracción rayos X de la mezcla S1E5 tras ensayos de expansividad.....	291
Figura 160. Difracción rayos X de la mezcla S2E5 tras ensayos de expansividad.....	291
Figura 161. Difracción rayos X de la mezcla S3E5 tras ensayos de expansividad.....	292
Figura 162. Análisis térmico del la mezcla S1E5 tras el ensayo de expansividad.....	293

Figura 163. Análisis térmico del la mezcla S2E5 tras el ensayo de expansividad	293
Figura 164. Análisis térmico del la mezcla S3E5 tras el ensayo de expansividad	294
Figura 165. Probetas tras ensayo humedad-sequedad de la mezcla S1C2	302
Figura 166. Probetas tras ensayo humedad-sequedad de la mezcla S1E5.....	302
Figura 167. Probetas tras ensayo humedad-sequedad de la mezcla S3C2	303
Figura 168. Probetas tras ensayo humedad-sequedad de la mezcla S3E5.....	303
Figura 169. Probetas tras ensayo hielo-deshielo de la mezcla S1C2	305
Figura 170. Probetas tras ensayo hielo-deshielo de la mezcla S1E5.....	305
Figura 171. Probetas tras ensayo hielo-deshielo de la mezcla S3C2	306
Figura 172. Probetas tras ensayo hielo-deshielo de la mezcla S3E5.....	306
Figura 173. Recogida en cantera de detritus calizo	311
Figura 174. Granulometría del detritus calizo	312
Figura 175. Granulometría del detritus calizo	312
Figura 176. Granulometría detritus calizo comparado con ZA25	313
Figura 177. Granulometría detritus calizo comparado con ZA20	313
Figura 178. Granulometría mezcla 40EN-60D.....	316
Figura 179. Granulometría 60N-40D	317
Figura 180. Granulometría 50N-50D	317
Figura 181. Granulometría 40N-60D	318
Figura 182. Ensayo de equivalente de arena de las mezclas para firmes	320
Figura 183. Próctor modificado de la mezcla 60EN-40D	323
Figura 184. Próctor modificado de la mezcla 50EN-50D	323
Figura 185. Próctor modificado de la mezcla 40EN-60D	323
Figura 186. Compactación de la mezcla 60EN-40D con maza automática	324
Figura 187. Probeta de de la mezcla 60EN-40D	324
Figura 188. Probeta de de la mezcla 50EN-50D	325
Figura 189. Probeta de de la mezcla 40EN-60D	325
Figura 190. Índice CBR de mezclas EAFS-detritus para firmes.....	326
Figura 191. Prensa para pinchar las probetas CBR	327
Figura 192. Medición de hinchamientos CBR	327
Figura 193. Probetas de CBR de la mezcla 60EN-40D.....	328
Figura 194. Probetas de CBR de la mezcla 50EN-50D.....	328
Figura 195. Probetas de CBR de la mezcla 40EN-60D.....	329

Figura 196. Expansión potencial de mezclas EAFS-detrítus para firmes durante las 190 horas iniciales 330

Figura 197. Expansión potencial final de mezclas EAFS-detrítus para firmes 330

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producciones de acero y escoria en España y en la Unión Europea	14
Tabla 2. Características de las escorias de horno alto BF	17
Tabla 3. Características de las escorias BOF.....	19
Tabla 4. Composición química de las escorias de acero de alta aleación	20
Tabla 5. Composición química de las escorias de acero de alta aleación.	20
Tabla 6. Distribución de la producción de HEA por CCAA.....	22
Tabla 7. Producción de escoria HEA y de Horno de Cuchara en la EU	27
Tabla 8. Composición química de las escorias de acero (% peso).....	30
Tabla 9. Concentración de metales pesados en escorias de acero (mg/Kg).....	31
Tabla 10. Composición mineralógica de las escorias y fases minerales (% Peso).....	31
Tabla 11. Propiedades de las escorias EAF Y LF.	32
Tabla 12. Clasificación de tráfico en caminos rurales.....	55
Tabla 13. Clasificación de tráfico según norma 6.1.I.C., secciones de firme [22].....	55
Tabla 14. Velocidad base de proyecto según instrucción de carreteras	57
Tabla 15. Velocidad base de proyecto según AASHO.....	57
Tabla 16. Velocidad base de proyecto según E. del Barrio.....	58
Tabla 17. Módulo de compresibilidad y calidad de la explanada	60
Tabla 18. Categoría de Explanadas según módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga. Equivalencia en CBR según Del Val Melus [87].....	62
Tabla 19. Materiales para la formación de explanadas	63
Tabla 20. Clasificación Unificada de Casagrande. U.S.C.S.....	74
Tabla 21. Clasificación de suelos de la ASSHTO	75
Tabla 22. Clasificación de suelos PG-3 y requisitos adicionales para su empleo en explanada.....	76
Tabla 23. Empleo de materiales por zonas del terraplén según PG-3	77
Tabla 24. Especificaciones del suelo estabilizado in situ.....	85
Tabla 25. Valor mínimo del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga en función del suelo estabilizado	86
Tabla 26. Características que ha de cumplir un suelo para ser susceptible de estabilización según PG-3	88
Tabla 27. Granulometría del suelo en las estabilizaciones con cal según PG-3.....	88
Tabla 28. Granulometría del suelo en las estabilizaciones con cal en caminos rurales .	88
Tabla 29. Composición química del suelo a estabilizar	88

Tabla 30. Plasticidad del suelo en las estabilizaciones con cal	89
Tabla 31. Plasticidad del suelo en las estabilizaciones con cemento	89
Tabla 32. Comparación de los valores límites permitidos en los distintos parámetros cuantificados en un ensayo de lixiviación según varios Decretos de valorización de escorias siderúrgicas.	92
Tabla 33. Características de zahorras según PG-3	99
Tabla 34. Composición química de LFS (% peso).....	102
Tabla 35. Concentración media de los óxidos presentes en E1.....	103
Tabla 36. Cal libre y magnesia total presentes en E1	104
Tabla 37. Variaciones dimensionales de E1. Pérdida de Fuego.....	105
Tabla 38. Sulfuros, sulfatos y sales presentes en E1	106
Tabla 39. Ajustes a cien del diagrama de Rankin	107
Tabla 40. Fases de las escorias según Rankin.	107
Tabla 41. Fases cristalinas presentes en la escoria.	110
Tabla 42. Compuestos de calcio y magnesio de las escorias.	110
Tabla 43. Tablas de difracción de rayos-X de Hannawalt.....	111
Tabla 44. Distancias interplanares de los compuestos cristalinos de la escoria.....	112
Tabla 45. Compuestos presentes en LFS según el análisis XRD.....	115
Tabla 46. Elementos contenidos en la escoria blanca E1 agregada en nódulos.....	128
Tabla 47. Elementos contenidos en la escoria blanca disgregada E1. Muestra 1.....	133
Tabla 48. Elementos contenidos en la escoria blanca disgregada E1. Muestra 2.....	137
Tabla 49. Resumen de elementos contenidos en la escoria blanca E1.....	137
Tabla 50. Densidades y Humedad de LFS	142
Tabla 51. Superficie específica de LFS, cal y cemento.....	143
Tabla 52. Resultados de equivalente de arena de LFS	144
Tabla 53. Resultados del ensayo de expansión potencial sobre LFS	148
Tabla 54. Composición química de LFS tras expansividad	153
Tabla 55. Análisis de C y S de LFS tras expansividad.....	153
Tabla 56. Compuestos presentes en LFS tras ensayo de expansión potencial según el análisis XRD.....	156
Tabla 57. Resumen de ensayos de caracterización física de LFS	157
Tabla 58. Comparativa entre prescripciones de Cales y LFS.....	158
Tabla 59. Comparativa entre prescripciones del PG-3 (clasificación de suelos) y LFS159	
Tabla 60. Proceso de estabilización de las escorias negras EAF.....	162

Tabla 61. Muestras de EAFS	164
Tabla 62. Composición química de EAF	166
Tabla 63. Composición química de óxidos principales de escoria EAF	166
Tabla 64. Cal libre y magnesia total presentes en EAF	167
Tabla 65. Sulfatos totales, Sulfatos Solubles, Cloruros presentes en EAF	168
Tabla 66. Intervalo de Contenido en sulfatos, sulfuros y cloruros de EAF	168
Tabla 67. Fases de las escorias EAF según Rankin	170
Tabla 68. Componentes cristalinos de la escoria EAF	172
Tabla 69. Densidades de EAFS	208
Tabla 70. Porosidad y absorción de agua de EAFS	209
Tabla 71. Ensayo índice de lajas para EAFS	210
Tabla 72. Coeficiente de forma de EAFS	211
Tabla 73. Ensayo de determinación del porcentaje de caras de fractura de EAFS	211
Tabla 74. Ensayo de resistencia al desmoronamiento de EAFS	213
Tabla 75. Grado de envejecimiento de EAFS	214
Tabla 76. Expansión Potencial de EAFS	215
Tabla 77. Resultados de lixiviados de EAFS y límites legales	217
Tabla 78. Resumen de ensayo de caracterización física de EAFS	218
Tabla 79. Comparativa entre prescripciones para zahorras y las EAFS	219
Tabla 80. Composición química de los suelos	223
Tabla 81. Otros ensayos químicos en los suelos	223
Tabla 82. Análisis semicuantitativo del suelo S1	228
Tabla 83. Análisis semicuantitativo del suelo S2	235
Tabla 84. Análisis semicuantitativo del suelo S3	241
Tabla 85. Granulometrías de los suelos	246
Tabla 86. Límites de Atterberg de los suelos	247
Tabla 87. Densidad de las partículas de los suelos	247
Tabla 88. Hinchamiento libre y asiento de colapso de los suelos	251
Tabla 89. Resultados del ensayo CBR en suelos a PM	252
Tabla 90. Compresión simple y deformación de Suelos	254
Tabla 91. Propiedades geotécnicas de los suelos	255
Tabla 92. Clasificación de los suelos según PG-3, USCS y AASHTO	256
Tabla 93. Susceptibilidad de los suelos a ser estabilizados	260

Tabla 94. Propiedades de la cal empleada en las probetas de referencia de suelo estabilizado	261
Tabla 95. Porcentajes en las mezclas de estabilización (% de peso seco).....	262
Tabla 96. Límites de Atterberg de las mezclas de suelo-escoria.....	263
Tabla 97. CBR sobre mezclas de suelo S0	267
Tabla 98. CBR sobre Mezclas S1	269
Tabla 99. CBR sobre las mezclas del suelo S2.....	270
Tabla 100. CBR sobre las mezclas del suelo S3	272
Tabla 101. Compresión simple y deformación de las mezclas del suelo S1	273
Tabla 102. Compresión simple y deformación de las mezclas del suelo S3	274
Tabla 103. Hinchamiento libre y asiento de colapso para las diferentes mezclas de suelo	280
Tabla 104. Expansión potencial para las mezcla suelo-escoria LFS	281
Tabla 105. Composición química de mezclas de suelo-escoria blanca tras expansividad	290
Tabla 106. Análisis de C y S mediante combustión	290
Tabla 107. Compuestos presentes en la mezclas de suelo-escoria blanca tras expansividad según XRD	292
Tabla 108. Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas del suelo S0	295
Tabla 109. Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas del suelo S1	296
Tabla 110. Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas de suelo S2	297
Tabla 111. Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas de suelo S3	298
Tabla 112. Resultados de lixiviados y límites legales sobre la LFS y su mezcla con los suelos S1 y S3.....	299
Tabla 113. Resultados del ensayo humedad-sequedad para mezclas de S1 y S3.....	301
Tabla 114. Resultados ensayo hielo-deshielo para mezclas de suelo S1 y S3	304
Tabla 115. Prescripciones para bases de firmes aplicables a caminos rurales	310
Tabla 116. Módulos granulométricos husos medios	314
Tabla 117. Proporciones de mezcla EAFS-Detritus (% peso).....	315
Tabla 118. Proporciones de mezcla EAFS-Detritus (% volumen).....	315
Tabla 119. Granulometría mezclas EAFS-Detritus.....	316
Tabla 120. Resultados de equivalente de arena de las mezclas para firmes.....	319
Tabla 121. Límites Atterberg de las mezclas para firmes	320
Tabla 122. Desgaste de Los Ángeles de mezclas para firmes	321
Tabla 123. Índice de lajas del detritus calizo.....	321

Tabla 124. Índice de lajas de las mezclas para firmes.....	322
Tabla 125. Próctor Modificado mezclas para firmes.....	322
Tabla 126. Resultados del ensayo CBR de mezclas para firmes.....	326
Tabla 127. Expansión potencial para las mezclas EAFS-detritus	329
Tabla 128. Resumen ensayos mezclas EAFS-Detritus calizo	331

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

Hace aproximadamente 3.000 años comenzó la fabricación del hierro de modo regular en Asia Menor, extendiéndose la misma por Europa y ciertas zonas de África durante el siguiente milenio. Ello supuso el comienzo histórico de lo que posteriormente fue llamado la Edad del Hierro, que sucedió a la Edad del Bronce, ambas posteriores a la Edad de Piedra.

La fabricación de metales, sea el bronce y otras aleaciones de cobre en primer lugar, sea el hierro y el acero en segundo lugar, constituyó un conjunto de conocimientos técnicos y artesanales denominado metalurgia. El fundamento práctico de dicha fabricación consistió en la obtención de estos metales en estado líquido a temperaturas al rojo o cercanas al mismo, por medio de la combustión del carbón, vegetal o mineral, y aprovechando también su capacidad reductora sobre los óxidos metálicos.

La metalurgia del hierro o siderurgia resultó ser, en principio, un poco más compleja que las metalurgias anteriores, requiriendo el empleo de otros minerales no metálicos en el refinado o purificación química del hierro, minerales que durante el proceso siderúrgico sufren transformaciones y al final del mismo constituyen lo que se ha dado en denominar escoria. Este vocablo, empleado en muchas ocasiones con un tono peyorativo o despectivo, representa a un material que posee ciertas cualidades que han sido históricamente aprovechadas, cualidades obviamente inferiores a la excelencia del metal fabricado.

La escoria siderúrgica es un material en el que fijan su atención los estudios arqueológicos y geográficos sobre asentamientos humanos en el mundo. La presencia o ausencia en ellos de escorias férreas y el tipo o calidad de las mismas, constituye un importante indicio histórico en el análisis que se lleva a cabo sobre el grado de avance de la civilización encontrada. Por otro lado, la escoria siderúrgica fue empleada en la época Romana y durante la Edad Media y Edad Moderna en construcción y obra civil y militar. Con ella se realizaron pavimentaciones y acondicionamiento de suelos, y se la encuentra en hormigones primitivos amasados con cal y cementos naturales, colocados en bases y cimentaciones.

La característica más importante de las escorias férreas es, posiblemente, su durabilidad y resistencia al paso del tiempo. Ello da lugar a que hoy sea un elemento arqueológico importante pero también un subproducto industrial incómodo puesto que la fabricación de hierro y acero ha aumentado de forma exponencial desde hace 3.000 años hasta nuestros días, y con ella la producción de escorias.

El comienzo de la producción masiva de aceros en convertidor, a mediados del siglo XIX, dio lugar a una aparición también masiva de escorias de acería, que fueron almacenadas a la intemperie en grandes masas, similares a las escombreras de minería

de aquella misma época. El consumo de escorias, en construcción u otras aplicaciones, ha sido desde entonces y hasta épocas muy recientes inferior a la producción, siendo el vertido la salida más cómoda y socorrida para ellas. Hoy día sigue siendo así en un importante número de plantas de producción y de países, en general en zonas poco desarrolladas del mundo.

En el comienzo del siglo XXI la exigencia social de protección medioambiental y de desarrollo sostenible en los países mas avanzados ha llevado a plantearse el reto de suprimir el vertido y reciclar la totalidad de las escorias siderúrgicas; no obstante, ello es un objetivo difícil y que requiere un importante esfuerzo humano y material. La ausencia histórica, durante los siglos XIX y XX, de dicha obligación tiene como consecuencia que en los últimos años del siglo sea un reto y una tarea pendiente algo que, de otro modo, podría ser una circunstancia normal en la fabricación siderúrgica. Prueba de ello es que existe algún país, como Japón, en el cual las cosas son de esa manera.

La magnitud del reto es importante, puesto que al día de hoy en Europa el criterio general sobre esta cuestión se orienta en el sentido de que el acerista que produce la escoria, se desprenda de ella a coste cero; un transformador industrial intermedio, que en muchos lugares no existe aún, debe transportar la escoria a su planta y acondicionarla para su empleo posterior con un costo económico bastante limitado que de lugar a su puesta en el mercado a un precio competitivo; y, finalmente, un consumidor que hoy en día no la utiliza, comience a utilizar la escoria siderúrgica como sustitutivo de algún otro material, basando esta sustitución en argumentos técnicos y/o económicos. En general, cualquier reutilización debe cumplir varias condiciones o exigencias propias del momento, como son:

- Rentabilidad económica no negativa.
- Compatibilidad con el respeto medioambiental al uso.
- Sencillez suficiente para hacerla atractiva en primera instancia.

Desde 1978 la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (CECA) dispone de un Comité de Estudio destinado a fomentar la reutilización de las escorias siderúrgicas. Este organismo gestiona importantes cantidades de recursos públicos en ayudas y subvenciones a la investigación, canalizados especialmente a través de las Universidades y de los Centros de Investigación, para el desarrollo de métodos de reciclado y reutilización de las escorias. Todo ello supone un desafío científico en el que todos de una forma u otra debemos participar, aportando soluciones a un problema que compromete nuestro desarrollo social y el futuro de nuestra civilización.

El Tratado de Maastricht de 1992 introdujo el concepto de desarrollo sostenible como objetivo fundamental de la política ambiental de la Unión Europea. Desde ese momento, los Estados miembros se comprometieron a incluir de forma integrada los aspectos ambientales en todos los ámbitos políticos, económicos y sociales.

La Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, establece que la Administración General del Estado, mediante la integración de los respectivos planes autonómicos de residuos, elaborará diferentes planes de residuos, en los que se fijarán los objetivos específicos de reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización y eliminación; las

medidas a adoptar para conseguir estos objetivos; los medios de financiación y el procedimiento de revisión.

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre residuos establece, entre otras consideraciones, la perentoriedad de “reducir el uso de recursos y favorecer la aplicación práctica de la jerarquía de residuos”, es decir, el establecimiento del siguiente “orden de prioridades” en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de residuos:

1. Prevención
2. Preparación para la reutilización
3. Reciclado
4. Otro tipo de valorización; por ejemplo, la valorización energética
5. Eliminación

La Directiva de residuos apoya públicamente “ir transformando la Unión Europea en una sociedad del reciclado, que trate de evitar la generación de residuos y que utilice los residuos como un recurso”. En su artículo 11 “Reutilización y reciclado”, apartado 2, establece que los Estados miembros deberán adoptar las medidas necesarias que permitan avanzar hacia una sociedad Europea del reciclado con un alto nivel de eficiencia de los recursos.

La resolución de 20 de enero de 2009, de la secretaría de Estado de Cambio Climático, publica el Acuerdo del consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 [27]. Este Plan incluye entre sus objetivos el tratamiento de los residuos domésticos y similares (urbanos de origen domiciliario), los residuos con legislación específica (peligrosos, vehículos y neumáticos fuera de uso, pilas y acumuladores, aparatos eléctricos y electrónicos, residuos de construcción y demolición, y lodos de depuradoras), suelos contaminados y residuos agrarios e industriales no peligrosos. También contempla la reducción de vertidos de residuos biodegradables, que cumpliendo con una obligación legal, contribuye a alargar la vida de los vertederos, a disminuir su impacto sobre el entorno y de forma especial a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

El Plan prevé su revisión con carácter bianual, en colaboración con las comunidades autónomas, los departamentos ministeriales con competencias en la materia, y tiene en cuenta la posición de los agentes económicos y sociales. La revisión de los objetivos se hará de acuerdo con lo establecido en la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos.

La finalidad del Plan es:

- Promover una política adecuada en la gestión de los residuos, disminuyendo su generación e impulsando un correcto tratamiento de los mismos: prevención, reutilización, reciclaje, valoración y eliminación.
- Conseguir la implicación de todas las Administraciones públicas, consumidores y usuarios, con objeto de que asuman sus respectivas cuotas de responsabilidad, impulsando la creación de infraestructuras que garanticen este correcto tratamiento y gestión de los residuos en los lugares más próximos a su generación.

- Obtener estadísticas fiables en materia de infraestructuras, empresas gestoras y producción y gestión de residuos.
- Evaluar los instrumentos económicos y en particular los fiscales que se han puesto en práctica para promover cambios en los sistemas de gestión existentes. Identificar la conveniencia de su implantación de forma armonizada en todas las Comunidades Autónomas.
- Consolidación de los programas de I+D+i aplicados a los diferentes aspectos de la gestión de los residuos, incluyendo análisis de la eficiencia de los sistemas de recogida, optimización de los tratamientos y evaluación integrada de los procesos completos de gestión, desde la generación hasta la eliminación.
- Reducir la contribución de los residuos al cambio climático fomentando la aplicación de las medidas de mayor potencial de reducción.

La generación y gestión de los residuos constituye un problema ambiental grave de las sociedades modernas, y de ahí la existencia de una política europea y nacional en materia de residuos. El abandono o la gestión inadecuada de los residuos producen impactos notables en los medios receptores, y pueden provocar contaminación en el agua, en el suelo, en el aire, contribuir al cambio climático y afectar a los ecosistemas y a la salud humana. Sin embargo cuando los residuos se gestionan de forma adecuada se convierten en recursos que contribuyen al ahorro de materias primas, a la conservación de los recursos naturales, del clima y al desarrollo sostenible.

Dentro del este Plan Nacional Integrado de Residuos, las escorias de acería están consideradas residuos industriales no peligrosos (RINP), procedentes del sector de la metalurgia (como queda indicado en el cuadro CNAE 93). Los RINP es un sector muy amplio, en el que se incluyen múltiples subsectores, de manera que existe una falta de identificación de los mismos, insuficientes datos sobre su generación y limitado control de generación y gestión de residuos.

Durante muchos años, enmarcados en los siglos XIX y XX, en el País Vasco se empleó mezclas de escorias de acería para su uso en pavimentación de pistas forestales y caminos de acceso a caseríos. Al nulo costo del material y bajo costo de transporte por la proximidad del centro de producción, se le unía la facilidad de puesta en obra, ya que prácticamente sin machacar y mezcladas de forma rudimentarias en el camión, se colocaban y compactaban directamente sobre el terreno extendidas en una única capa de rodadura sobre la plataforma de arcilla natural.

En estos momentos, el Gobierno Vasco, tras la publicación del “Libro Blanco para la minimización de residuos y emisiones. Escorias de acería” [120] de la Sociedad Pública de Gestión Ambiental IHOBE, descarta como posibilidad de uso de las escorias su utilización en aquellos casos en los que se constituya en suelo (pistas forestales, caminos rurales, rellenos, etc.). La razón expuesta es que la comparación de la composición química de las escorias con los suelos de referencia en la Comunidad Autónoma del País Vasco indica que los valores de gran parte de los elementos químicos potencialmente tóxicos de las escorias son superiores a los de los suelos.

Sin embargo, es admitido el uso de las escorias negras en explanadas, subbases y bases de carretera, y como capa de rodadura, siempre y cuando se verifique en cada caso que se cumplen las exigencias técnicas, fundamentalmente de ausencia de expansión, y

medioambientales mediante el cumplimiento de condiciones químicas rigurosas tras un test de lixiviación. El uso en la fabricación de cemento se extiende tanto a las escorias negras como a las escorias blancas.

Para el caso que nos ocupa, las comunidades autónomas con mayores problemas de generación de escorias de acería son las que han desarrollado legislación específica en materia de valorización de escorias. Así tenemos:

- Decreto 34/2003 de 18 de febrero (2003) "Valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco"[9].
- Decreto 104/2006 de 19 de octubre (2006) "Valorización de escorias en la Comunidad Autónoma del Cantabria". [10].
- Decreto 32/2009 de 24 de febrero de la Comunidad de Cataluña (2009) "Valorización de las escorias siderúrgicas" [8].

En dichos decretos se especifican los usos admisibles de las escorias valorizadas, entre otros, nos encontramos la autorización de empleo de escorias negras procedentes de hornos eléctricos de arco en las carreteras y vías públicas o privadas de tráfico rodado en cualquiera de las siguientes capas estructurales: capa de rodadura con mezclas bituminosas, base, subbase y explanada mejorada. Por otra parte el único uso autorizado para las escorias blancas es el de materia prima objeto de una transformación posterior en la fabricación de cemento. A parte de los usos previstos en los puntos anteriores, podrán autorizarse otros por el órgano ambiental correspondiente, con previa justificación por el interesado de la idoneidad del destino propuesto.

Estas aplicaciones autorizadas no son capaces de consumir la cantidad total de subproducto existente, de ahí que nos planteemos nuevas aplicaciones para estos subproductos. Trabajos de este tipo, conducentes a su aprovechamiento serán los que confirmen las posibilidades de uso que tienen.

A modo de conclusión, cabe destacar finalmente tres de las ventajas que presenta el reciclaje de escorias de acería como materia prima secundaria. En primer lugar se reduce el consumo de recursos naturales en las explotaciones de canteras de las calizas naturales, en segundo lugar se gana espacio en los escasos vertederos de inertes existentes y por último, se pone en marcha una dinámica de cambio de mentalidad que permitirá nuevas actuaciones ambientales orientadas a la Producción Limpia en el sector de la fabricación de acero.

Por otro lado, en la construcción de caminos rurales se encuentran habitualmente diversos materiales no aptos para ser utilizados directamente en la traza de los mismos. Dichos suelos deben ser tratados adecuadamente o llevados a vertederos, ubicados generalmente, en zonas cercanas a la traza, generando impactos propios de este tipo de rellenos, disminuyendo así las áreas productivas del sector.

De las ventajas que tiene el aprovechamiento de residuos y las necesidades existentes en la ingeniería civil, desembocamos en el objetivo de la presente Tesis. Esta Tesis Doctoral es un estudio técnico y científico que pretende avanzar en la aplicación de ciertos tipos de escoria siderúrgica, como son la escoria blanca de Horno-Cuchara (HC,

Ladle furnace, LF), y la escoria negra de Horno Eléctrico de Arco (HEA, Electric Arc Furnace, EAF), en el campo de la construcción y de la obra civil. El Capítulo 2 recoge las aplicaciones y resultados hasta ahora obtenidos con diferentes tipos de escorias, que servirá de punto de partida a nuestra investigación.

El caso que nos ocupa pretende resolver el problema que existe en la construcción de caminos rurales sobre tierras blandas, en los que habitualmente la inversión ha de ser pequeña y en algunos casos la intensidad de tráfico y cargas elevadas ocasionan un deterioro prematuro. Para ello se estudiará el comportamiento de explanadas estabilizadas con escoria LFS y firmes construidos con escoria HEA; esta sustitución de materiales tradicionales por residuos procedentes de acería pretende un ahorro económico, así como una mejora medioambiental.

La estabilización de suelos naturales arcillosos es un problema clásico de la ingeniería civil cuando se precisa constituir una plataforma o explanada en terreno natural sobre la cual se construyan cimentaciones u obras de comunicación y transporte. La misión de la plataforma es proporcionar regularidad geométrica, continuidad lineal, durabilidad frente al paso del tiempo y transmisión de esfuerzos adecuada hasta el terreno. Dicha plataforma puede ser realizada de varias maneras, entre las cuales se plantea realizar una capa superficial en la que el propio terreno natural, de pobre calidad, se mezcla con ciertos productos cualificados, como cementos o cales.

La mejora de la capacidad portante de ciertos suelos arcillosos conteniendo o no sulfatos y materia orgánica, así como el logro de su estabilidad volumétrica cuando poseen carácter expansivo, ha sido un problema importante en la ingeniería geotécnica. Para lograr explanadas de calidad superficial adecuada en obras civiles, se han empleado diversos productos industriales cualificados (cemento Pórtland, Quicklime) y caros desde hace un siglo, con un evidente costo económico y medioambiental [196] [173]. Sin embargo, en el momento actual existen disponibles un conjunto de subproductos industriales con capacidad de conferir buenas propiedades al suelo deficiente. Los más destacados de ellos son la escoria granulada de horno alto (ground granulated blast furnace slag) y las cenizas volantes de combustión (fly ashes from coal burning) del carbón [126], y ha sido usual el empleo de pequeñas proporciones de activadores químicos que mejoran su capacidad cementante [132].

Las escorias de fabricación de hierros y aceros en la industria siderúrgica son consideradas desde hace tiempo como materiales útiles en construcción y obra civil. Importantes trabajos publicados en la década de los años 90 [108] y al comienzo de este siglo [163] [128] han mostrado la idoneidad e incluso la excelencia de algunos de ellos.

La producción de escoria de horno cuchara, escoria básica o escoria de afino secundario (denominaciones varias de un mismo producto) en España fue de 0,4 MT en el año 2009; de este montante, aproximadamente el 50% se reutiliza en la fabricación de clinker de cemento Pórtland (Oficemen-Unesid). La otra mitad se encamina a nuevos usos, fundamentalmente por razones económicas relacionadas con su transporte, inviable en distancias largas.

La escoria de horno cuchara LFS tiene un aspecto pulverulento y posee una pequeña reactividad hidráulica [193] debido a la presencia mayoritaria en ella de silicatos y

aluminatos de cal y magnesio. Dicha reactividad ha sido en ocasiones potenciada mediante la adicción de activadores químicos [198, 199]; sin embargo, la heterogeneidad inherente a su condición de subproducto en la industria siderúrgica y a la variedad de tipos de acero fabricados hacen que la activación química no siempre sea inmediata.

La cuestión mas destacada en el uso de la escoria LFS en ingeniería se refiere a su inestabilidad volumétrica [123] [113] derivada de la interacción con los agentes atmosféricos aire y agua. Sin embargo, su empleo en matrices flexibles como es la mezcla con suelo, y en proporciones bajas (en general inferiores al 10%) hacen que esta expansividad tanto a corto como a medio plazo sea irrelevante.

Existen características químicas comunes en la LFS de cualquier procedencia [200] como la presencia de silicato bicálcico (en alguna de sus variedades cristalinas) y de cal libre (originalmente CaO, y tras envejecimiento Ca (OH)₂ y Ca CO₃). Ambas sustancias y otras más que aparecen de modo eventual en la LFS resultan de utilidad cuando se plantea su empleo en construcción [149]; por ejemplo, en el campo de la mejora resistente y estabilización volumétrica de suelos arcillosos de baja calidad, en los que usualmente en ingeniería se propone el uso de cal y cemento. La sustitución de la cal comercial por la escoria de horno cuchara LFS resulta ventajosa desde el punto de vista económico y medioambiental, y en ciertas combinaciones de suelo y escoria los resultados pueden ser excelentes aunque en otros casos esos resultados pueden ser mas pobres, debido a la gran variedad de suelos arcillosos que se pueden presentar [63] y a la variedad de la escoria LFS [178].

Es obvio que cualquier sustancia o material barato capaz de aprovechar el ligero carácter puzolánico de las arcillas, la capacidad reactiva de los sulfatos evitando su disolución por las aguas de lluvia, y la inconsistencia de la materia orgánica o humus, puede ser usado para la mejora de los suelos naturales arcillosos. En este sentido se pueden considerar las escorias de acería de varios tipos, cenizas de quemador de combustión del carbón (bottom ash from coal burning), cenizas de incineración de residuos sólidos urbanos (municipal solid waste incinerator ash), polvo del horno de cemento (cement kiln dust) [204] y otros no esperados como cáscara de arroz (rice husk).

En cuanto a las escorias de acería (LD slag, BOF slag), desde 1991 Akinmusuru propuso el empleo pionero de escorias de acería LD en estabilización de suelos de caminos rurales con un éxito limitado. Posteriormente, los resultados obtenidos por Poh et al. [177] en la estabilización de suelos para bases de carreteras por medio de escorias tipo LD no son alentadores; a pesar del uso de activadores, para conseguir rendimientos aceptables fue necesario emplear proporciones demasiado altas (15-20%), escoria finamente molida y largos periodos de curado, factores todos ellos negativos. Solamente mezclándola con grava caliza se consiguen construir terraplenes estables [110]. En la misma línea, los trabajos de varios autores [108] [145] [163] consideran como poco adecuadas dicha escoria LD, y también la escoria de horno eléctrico de arco, para la misión de estabilización de suelos.

Sin embargo, la Normativa Europea EN 14227-13 [28] y ENV 13282 [29] deja abierta la posibilidad del uso de productos y subproductos industriales adecuados en

estabilización de suelos naturales, si muestran capacidad de mejora suficiente sobre ellos. El trabajo de Kanagawa and Kuwayama [124] empleando escoria de horno cuchara LFS fue un intento exitoso de llevar a cabo una mejora de suelos arcillosos blandos, en el cual los resultados fueron alentadores. El presente trabajo se desarrolla y profundiza en esta misma línea y consiste en mezclar suelos de baja capacidad portante con escoria de horno cuchara LFS en diversas proporciones y con cal, para analizar los resultados en términos absolutos y comparativos.

El objetivo final de esta Tesis Doctoral se concreta en dos puntos:

1. La aplicación de la escoria blanca de horno de cuchara en estabilizaciones in situ de suelos arcillosos de mala calidad para conseguir las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad que la explanada de caminos rurales requiere.
2. El empleo de la escoria negra de horno eléctrico de arco en la construcción de firmes, en sustitución a la zahorra. Todo ello, manteniendo sus propiedades técnicas y de prestación, con una viabilidad económica razonable.

Para conseguir los objetivos se definen las siguientes líneas de trabajo:

1. Estudio y conocimiento de la situación actual de las escorias de acería y sus aplicaciones.
2. Caracterización física y estructural de la escoria blanca de horno de cuchara (LFS). Se parte de escorias procedentes de dos acerías diferentes, la primera de ellas procede de la acería Tubos Reunidos de Álava (E1) y la segunda de Sidenor en Vizcaya (E2).
3. Caracterización física y estructural de la escoria negra de horno eléctrico de arco (HEA) utilizada en este trabajo. La caracterización química se realiza sobre 9 muestras de diferente procedencia y grado de envejecimiento. El estudio completo se realiza sobre muestras de la acería de Orbeago de Zumárraga.
4. Caracterización suelos encontrados en la traza de caminos en construcción. Se trata de tierras blandas con características insuficientes para ser utilizados directamente en la explanada, por tanto deberían ser llevados a vertedero o estabilizados. Se realiza la caracterización de 4 tipos de suelos procedentes de Burgos y Palencia (S0, S1, S2 y S3) y se estudia su susceptibilidad a ser estabilizados.
5. Estabilización de suelos con la escoria caracterizada anteriormente E1 y con un material estabilizador tradicional, como es la cal. Las propiedades físico-químicas de los suelos estabilizados con escoria son comparados con las de los suelos estabilizados con cal, que serán la referencia, a pesar de que las proporciones utilizadas de cada uno de los estabilizadores son diferentes. Asimismo, en cada suelo se estudia la mejora experimentada respecto a las condiciones iniciales que presentaba, obteniéndose resultados muy esperanzadores, empleando proporciones de escoria en torno al 5 %. La proporción no es elevada, lo que nos permite estar realizado un estudio en el camino de la viabilidad, puesto que el transporte de cantidades tales de escoria es asumible.

6. Empleo de la escoria negra en las capas del firme de caminos rurales, en sustitución a la zahorra. Se realiza una comparación exhaustiva entre las características de las escorias HEA y las condiciones requeridas a una zahorra artificial. Se buscan soluciones a la falta de finos y de plasticidad. Para ello se combina con un detritus de cantera caliza que aporta a la escoria las propiedades que necesita para ser colocada en la traza del camino.

Esta Tesis Doctoral es un paso más en los trabajos iniciados por el Dr. Juan Manuel Manso Villalaín, Profesor Titular del Área de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de las Estructuras de la Universidad de Burgos, y continuados por la Dra. Milagros Losáñez González y el Dr. Ángel Rodríguez Sáiz, en sus respectivas Tesis Doctorales. Estos trabajos serán una constante de referencia en la elaboración de esta Tesis Doctoral.

El objetivo de este trabajo es continuar y avanzar en las investigaciones iniciadas en las Tesis Doctorales referidas, complementando y pormenorizando el estudio en las líneas de trabajo de dichos investigadores.

La Tesis Doctoral del Dr. Juan Manuel Manso recoge cuatro líneas de trabajo concretas:

1. Caracterización física y estructural de la escoria negra de acería.
2. Preparación de morteros con escoria negra.
3. Fabricación de hormigones hidráulicos.
4. Durabilidad y comportamiento medioambiental.

En la Tesis Doctoral de la Dra. Milagros Losáñez González se avanza en el estudio y aplicación de las escorias blancas en construcción, desarrollando los trabajos en cuatro grandes líneas:

1. Caracterización física y estructural de la escoria blanca.
2. Fabricación de morteros de albañilería y estudio de sus propiedades.
3. Elaboración de firmes de pavimentación de caminos rurales.
4. Aplicación en hormigones hidráulicos.

Las líneas estudiadas en la Tesis Doctoral del Dr. Ángel Rodríguez Sáiz se pueden resumir en los siguientes apartados:

1. Caracterización física y estructural de la escoria blanca de horno de cuchara.
2. Diseño de dosificaciones comerciales de morteros de albañilería fabricados con escoria blanca.
3. Estudio comparativo de las propiedades de los morteros de albañilería fabricados con escoria blanca y de los morteros fabricados con materiales tradicionales.

El trabajo que recoge esta Tesis Doctoral trata de profundizar en el estudio de una de las aplicaciones referidas en la Tesis de la Dra. Milagros Losáñez González: la elaboración

de explanadas y firmes de caminos rurales. Las líneas que se proponen se pueden resumir en los siguientes apartados:

1. Caracterización física y estructural de la escoria blanca de horno de cuchara utilizada en este trabajo.
2. Caracterización de suelos y estabilización de los mismos con escoria blanca de horno de cuchara y con materiales tradicionales. Comparación del comportamiento de ambos en la formación de explanadas.
3. Caracterización física y estructural de la escoria negra de horno eléctrico de arco y estudio de su aplicación en el firme de caminos rurales.

Las nuevas tendencias sociales, preocupadas cada vez más por la conservación del entorno y el desarrollo sostenible, muestran sensibilidad por la recuperación y reutilización de los residuos y subproductos industriales, y la escoria blanca de horno de cuchara y la escoria negra de horno eléctrico de arco lo son. Este trabajo no pretende resolver el problema definitivamente, pero sí aportar argumentos para afianzar la idea de que el desarrollo sostenible es posible y que las reticencias sociales a los cambios deben ser superadas, favoreciendo políticas que permitan encontrar usos alternativos al de depositar las escorias en vertederos y escombreras, degradando el entorno y convirtiendo nuestros campos y ciudades en espacios inhabitables.

CAPÍTULO 2. LA ESCORIA SIDERÚRGICA: ANTECEDENTES, PLANTEAMIENTO Y SITUACIÓN ACTUAL.

2 LA ESCORIA SIDERÚRGICA: ANTECEDENTES, PLANTEAMIENTO Y SITUACIÓN ACTUAL

2.1 INTRODUCCIÓN

En los procesos de fabricación del hierro y del acero se utilizan un conjunto variado de materias primas y elaboradas que, una vez utilizadas, generan diferentes subproductos, cada uno de ellos con unas características propias que singularizan la problemática de su posterior tratamiento y posible utilización.

Los materiales utilizados como materia prima en la industria siderometalúrgica son los minerales naturales de hierro, como la limonita y el oligisto, o bien hierro prerreducido así como la chatarra de elementos recuperados o reciclados.

Estos productos, bien en los procesos intermedios de fabricación o bien en procesos de conformado y acabado, generan importantes residuos tales como:

- Escorias siderúrgicas.
- Polvos de acería.
- Refractarios.
- Arenas de fundición.
- Cascarilla de laminación

De todos ellos, las escorias siderúrgicas y los polvos de acería son los que aportan un mayor volumen al residuo global del proceso, mientras que los refractarios, las arenas de fundición y las cascarillas de laminación participan en menor orden.

Las cascarillas de laminación son aprovechadas en otros procesos industriales y su reciclado es muy alto, mientras que las escorias siderúrgicas, las arenas de fundición y los polvos de acería presentan problemáticas todavía por resolver en toda su extensión. El caso de los restos de material refractario es también un problema vigente, pero de menor importancia por su pequeña cantidad.

En las escorias siderúrgicas encontramos un primer inconveniente: su falta de homogeneidad al constatarse diferentes tipos de escoria obtenidos en función del proceso de fabricación empleado. No obstante, ha habido intentos de un aprovechamiento de las mismas en otras actividades industriales, a priori asequibles y

teóricamente sencillos, pero que la realidad ha demostrado complejos y con numerosos problemas de carácter técnico.

Esta Tesis Doctoral quiere contribuir a resolver el problema del aprovechamiento de las escorias generadas en la industria siderúrgica mediante su aplicación en la ingeniería civil.

2.2 ESCORIAS SIDERÚRGICAS. PRODUCCIÓN DE ACERO Y ESCORIA EN ESPAÑA Y EN LA UNIÓN EUROPEA

En los procesos de fabricación del hierro y de sus derivados aparecen sobrenadando o flotando en los caldos líquidos de las aleaciones férreas productos que, una vez enfriados y solidificados, constituyen lo que conocemos como “escoria siderúrgica”.

La composición de la escoria siderúrgica es muy variada, participando en su constitución un conjunto de materiales más sencillos que, a las temperaturas de fusión del caldo, permanecen en la superficie suspendidos por la menor densidad que presentan respecto de los densos caldos férricos. El aspecto que muestran es el de una nata que sobrenada y cubre la superficie de la colada de metal fundido.

La participación de la escoria siderúrgica en los procesos de fabricación de los materiales férricos y de sus derivados es la siguiente:

1. Su disposición en la superficie de los caldos propicia la formación de un intercalario entre el propio líquido y la atmósfera próxima de contacto, por lo que su protección frente los gases de ésta está asegurada.
2. Como consecuencia de lo anterior, el caldo está aislado térmicamente del ambiente evitándose así gradientes de temperatura altos en el metal en estado líquido.
3. Participa en el proceso de purificación y afino del metal propiciando reacciones químicas que mejoran sus características.

Las técnicas y los procesos de fabricación de hierro, aceros y fundiciones son diversos y han evolucionado a lo largo de la historia mediante el progreso técnico, por lo que para su fabricación podremos utilizar técnicas y tratamientos diferentes para obtener un mismo producto.

Por otra parte, las diferentes variedades de productos como hierro, acero al carbono, aceros de baja aleación, aceros de alta aleación, fundiciones y otras aleaciones férricas, también determinan variaciones en los tratamientos y en las técnicas, propiciando la formación de escorias siderúrgicas con diferente composición, con características y propiedades distintas.

Las escorias siderúrgicas producidas, tomando como referencia los dos parámetros anteriormente expuestos, es decir, el proceso de fabricación y el tipo de producto férrico

elaborado, constituyen subproductos que, siendo sustancialmente iguales en su composición, determinan variedades dentro de la misma familia las cuales inducen un aprovechamiento distinto en cada caso.

Hecha esta primera consideración a los efectos de situar la problemática de la producción de escorias, vamos a circunscribir el estudio de las escorias siderúrgicas en esta Tesis Doctoral a seis grandes grupos que recogen las más importantes formas de producción, aunque no las únicas.

Las escorias estudiadas son, en función del proceso de obtención de los diferentes tipos de hierros y aceros, las siguientes:

- Escoria de Horno Alto BF.
- Escoria de Convertidor de Oxígeno BOF.
- Escoria de Horno Eléctrico de Arco EAF.
- Escoria de Horno Cuchara LF.
- Escoria de Convertidor AOD, VOD.
- Escoria de Cubilote.

En los siguientes apartados expondremos las características más destacables de cada una de ellas y los procesos de los que proceden, para así conocer su posible aprovechamiento en la fabricación de productos útiles para la industria de la construcción.

La producción de Acero durante el año 2009 fue:

- A nivel mundial, de 1220 millones de toneladas. Cabe señalar las producciones siderúrgicas altas de China o La India en el momento actual.
- En la Unión Europea (27 países), de 140 millones de toneladas, de las cuales aproximadamente el 52% corresponden a acero de hornos eléctricos.
- En España, de 14,3 millones de toneladas, distribuido en 24 plantas de producción de acero. Se sitúa en niveles de 1998 debido a la crisis económica. Aunque hubo una variación positiva del 14% en el año 2010, alcanzando valores de 16,3 MT, quedando el mercado siderúrgico español el tercero en volumen, de la Unión Europea, detrás de Alemania e Italia. Del total de acero producido en 2009, aproximadamente el 80% corresponden a HEA, es decir 11,3 MT. y los 3 MT restantes corresponden a Hornos Altos. Se puede observar la importante apuesta tecnológica por los HEA.

En la Figura 3 se observa la evolución de la producción de acero en España durante los últimos años y la Figura 4 representa el peso relativo de la industria siderúrgica y de primera transformación por Comunidades Autónomas. Se concentra en el norte del país, especialmente en las comunidades de País Vasco, Asturias, Cataluña y Cantabria

El sector de la siderurgia dejó en la UE en 2009 un total de 43 MT de escoria, de las que casi el 50% corresponden a escorias procedentes de horno alto, un 20% a convertidores

de oxígeno, y un 30% de HEA. En España para este mismo periodo de tiempo, el total de escoria generada en la siderurgia fue de 3 MT de escorias, de las cuales el 28% corresponde a los hornos altos, 11% a BOF y mas del 55% a la los HEA. La Tabla 1 recoge la relación entre las producciones en hornos altos y hornos eléctricos y su correspondiente producción de escorias para el año 2005 y 2009.

A pesar de que durante el 2009 hubo una gran caída en el sector siderúrgico, la producción de acero sigue generando importantes cantidades de escoria. Por ello, esta Tesis Doctoral trata de buscar nuevas aplicaciones.

	Año	Producción de Acero (%)		Producción de Escoria (%)	
		Horno Alto	Horno Eléctrico	BFS y BOFS	EAFS y LFS
ESPAÑA	2005	23	77	43	53
	2009	20	80	39	57
U.E. (27)	2005	44	56	60	31
	2009	52	48	71	28

Tabla 1. Producciones de acero y escoria en España y en la Unión Europea

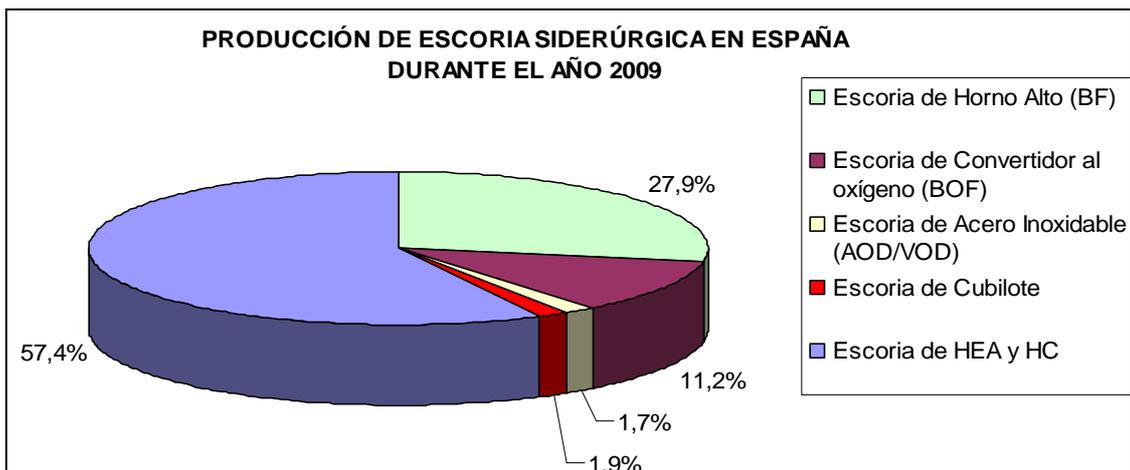


Figura 1. Producción de escoria siderúrgica en España. Año 2009

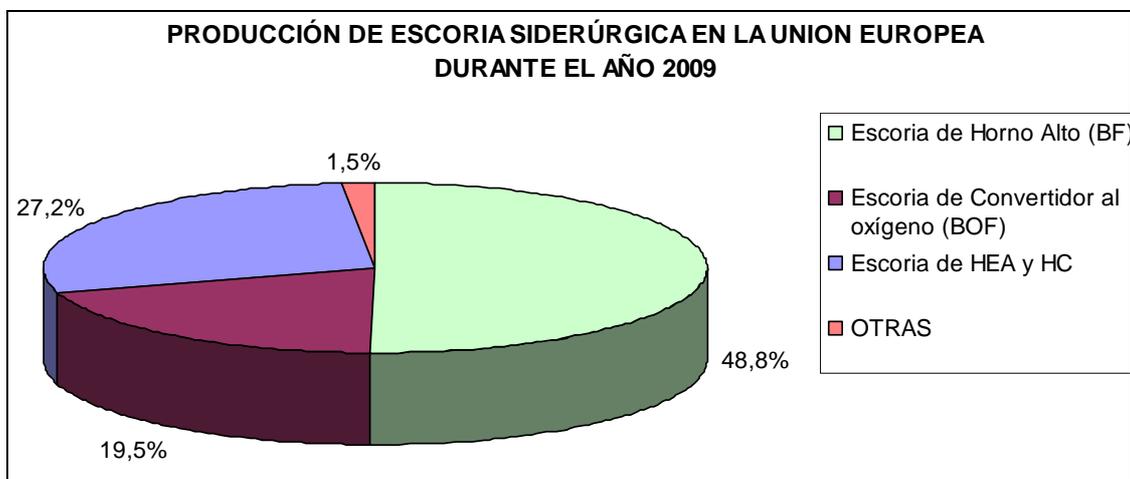


Figura 2. Producción de escoria siderúrgica en Unión Europea. Año 2009

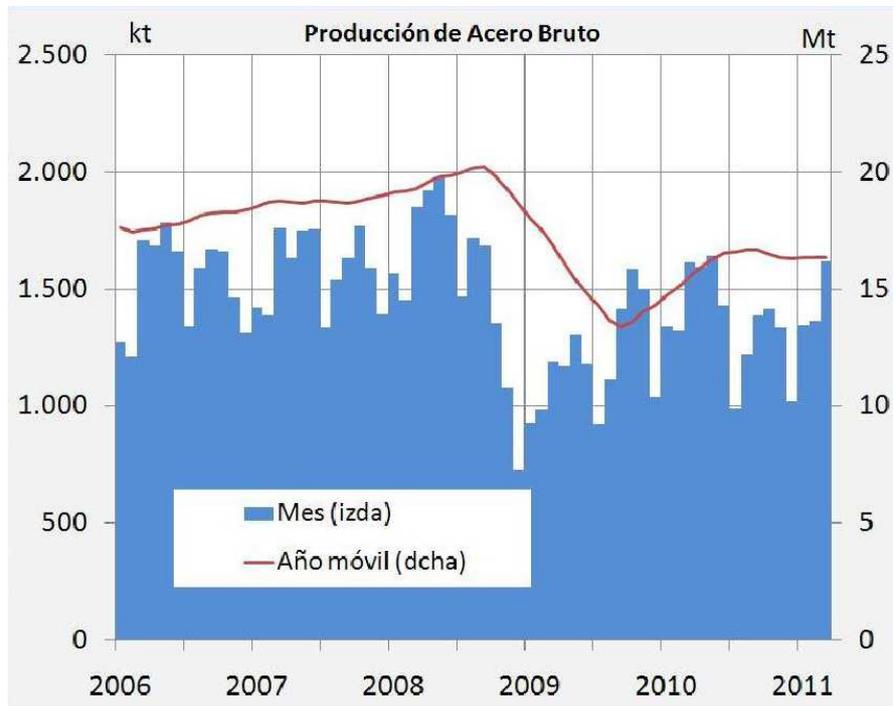


Figura 3. Evolución de la producción de acero en los últimos años en España. Fuente: UNESID. Asociación Empresarial de la Siderurgia Española [2]

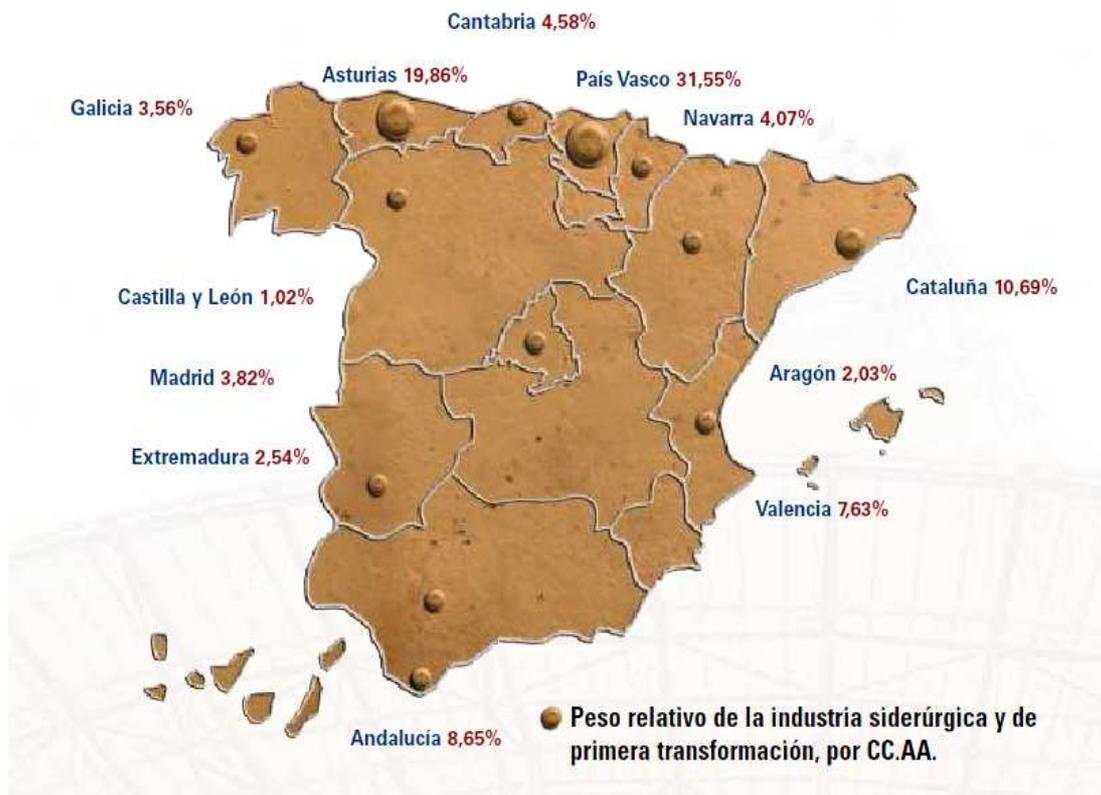


Figura 4. Distribución de la industria siderúrgica y de primera transformación en España por CCAA. Fuente: UNESID [2].

Las Escorias Siderúrgicas de Horno Alto.

El proceso de fabricación de hierro mediante horno alto se desarrolló en Flandes a mediados del siglo XIV. Este sistema de obtención de hierro, con las lógicas modificaciones por la evolución del progreso técnico, se ha venido utilizando hasta nuestros días con gran eficacia y rendimiento de producción.

En los hornos altos (Blast Furnace, BF) se alcanzan las temperaturas de fusión de las materias primas para obtener un caldo de hierro que denominamos “arrabio”, y que en inglés recibe el nombre de “pig iron”. Este caldo se forma a partir de la reducción del mineral de hierro y se caracteriza por presentar impurezas en su composición que hacen imposible su utilización directa, a pesar de estar constituido en su mayor parte por hierro metálico.

El horno alto dispone en su parte inferior de un crisol en el que se contiene el caldo de arrabio a una temperatura que permita mantener su estado líquido. En la parte superior del caldo o del crisol se dispone un sobrenadante que forma una costra flotante denominada escoria (BF slag). Esta escoria es muy uniforme en su composición en las diferentes tongadas que configuran los ciclos de producción del horno alto y suponen de un 25 a un 30% de la producción de acero, a razón de 250 a 300 Kg por tonelada de acero útil producido [1].

La composición mineralógica de la escoria BF es muy uniforme y está constituida principalmente por silicatos cálcicos. Según la temperatura de enfriamiento se obtienen tres tipos de escoria, cada una con diferentes aplicaciones [79] [99] [98] [199] .

En la Figura 5 se puede observar un gráfico, a modo de esquema, en el que se muestra cada tipo de escoria, la estructura cristalina o vitrificada que muestran en función del sistema de enfriamiento utilizado, así como su uso inmediato como material en la construcción.

1. **Escoria BF granulada**, enfriada muy rápidamente utilizando importantes cantidades de agua. Se utiliza como adición activa en la fabricación del cemento Pórtland.
2. **Escoria “foamy”**, de enfriamiento lento mediante pequeñas cantidades de agua. Su estructura está vitrificada, aunque presenta fases parcialmente cristalizadas. Se utiliza como base en la preparación de plataformas de carreteras.
3. **Escoria BF cristalina**, de estructura cristalizada, se enfría mediante aire y también se utiliza en la preparación de bases y subbases de plataformas de carreteras.

La Tabla 2 recoge las características físicas de las escorias BF determinadas mediante los correspondientes ensayos y su comparación con otros materiales de carácter pétreo como el basalto y el granito, rocas que se utilizan habitualmente en la preparación de las bases y subbases de las plataformas de carretera.

La escoria de horno alto BF producida en España a partir de arrabio representa el 28% del total de escoria procedente de los procesos de fabricación de hierros, aceros y

fundiciones, tomando como referencia todos los sistemas de fabricación actualmente en uso. La producción de esta escoria se localiza exclusivamente en las instalaciones que la empresa Arcelor España S. A., tiene en Gijón, en el Principado de Asturias, que en 2009 tuvo una producción de escoria cercana a 1 Mtons.

En la Unión Europea (27 miembros) la producción de escoria BF a partir de arrabio es más importante que en España, alcanzando cotas que superan los 20 Mtons/año.

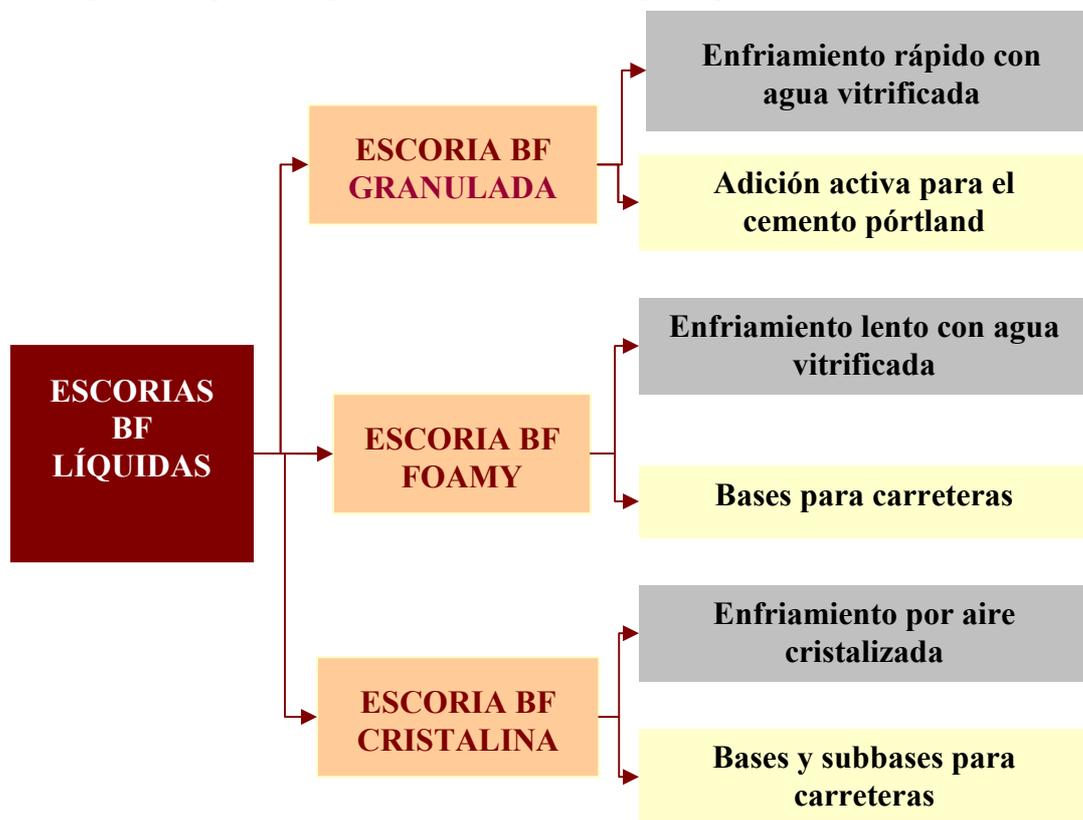


Figura 5. Tipos de escorias BF

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESCORIAS DE HORNO ALTO BF					
Ensayo	Ud.	BFS	Basalto	Granito	Exigencias para carreteras
Desgaste de los ángeles (80-12 mm.)	% PT	25-33	9-20	12-27	< 18 ¹⁾ < 22 ²⁾ < 34 ³⁾
Coefficiente de pulido acelerado	-	48-52	45-56	45-58	- ⁶⁾
Coefficiente de absorción normal	% PT	3-8	< 0,5	0,3-1,2	≤ 0.5
Coefficiente de heladicidad	% PT	< 0,6	<0,8	0,8-2,0	≤ 3.0 ⁴⁾
Incremento por volumen	% V	- ⁶⁾	- ⁶⁾	- ⁶⁾	≤ 5.0 ⁵⁾
Densidad aparente	g/cm ³	~ 2,3	~ 2,95	~ 2,70	- ⁶⁾
Densidad de conjunto	g/cm ³	~ 1,1	- ⁶⁾	- ⁶⁾	- ⁶⁾

1) CAPA SÚBBASE

2) CAPA BASE

3) CAPA RODADURA

4) COMPROBAR SÓLO SI LA ABSORCIÓN DE AGUA > 0,5

5) SOLO ESCORIAS BOF Y EAF.

6) NO DISPONIBLE

Tabla 2. Características de las escorias de horno alto BF

La Escoria de Convertidor al Oxígeno.

El proceso de fabricación de aceros de alta calidad precisa de una tecnología más perfeccionada que la del horno alto. A partir de los arrabios producidos en éstos, se aplica un segundo proceso de afino y purificación mediante un Convertidor de Oxígeno (Basic Oxygen Furnace, BOF) que hace pasar una corriente de oxígeno a través de los caldos de arrabio. A este procedimiento se le denomina Linz-Donawitz (LD), por lo que a las escorias procedentes de este proceso se las llama LD.

Esta técnica permite producir en torno a los 80-120 Kg de escoria por tonelada de acero útil y las variaciones tecnológicas de los diferentes convertidores utilizados no influyen en la cantidad de escoria producida, pero si pueden afectar a la composición mineralógica de éstas.

Las dos acerías de este tipo en nuestro país se localizan en Avilés y Gijón. La producción total de este tipo de escoria durante el año 2009 se estimó en 0,35 MT, un 11% del total de escoria anual. En la Unión Europea la producción de escoria BOF fue de casi 9 MT.

Las escorias obtenidas en los convertidores de oxígeno se componen de una mezcla de silicatos cálcicos y de óxidos de hierro, en la que los primeros están en mayor proporción. La relación de basicidad cal/sílice es de 3-4, presentando concentraciones de cal y magnesia libres en torno al 10-15% [104].

El enfriamiento de las escorias de convertidor de oxígeno se realiza lentamente al aire libre, por lo que su estructura está totalmente cristalizada.

Estas escorias pueden utilizarse también como correctores de suelos agrícolas donde su uso ha sido ocasional [100]. Para su empleo en pavimentación de carreteras, sobre todo en capas de rodadura, proporcionan una buena resistencia al desgaste y presentan una densidad aparente alta.

Es pues un material útil y que ha sido habitualmente empleado en cometidos poco exigentes en el ámbito de la estabilización de suelos, o como soporte en caminos de rodadura.

Por el contrario, su utilización requiere tomar precauciones respecto de posibles comportamientos expansivos del material por la presencia de cal (CaO libre o lima) y magnesia (MgO) sin hidratar (periclase), circunstancia que impide obtener una buena estabilidad a corto plazo de los rellenos. Como se puede observar en las tablas, las características físicas son similares a las de rocas duras y resistentes como el basalto y el granito.

Para garantizar un comportamiento adecuado en el tiempo debe evaluarse la posible expansividad de la escoria mediante los correspondientes ensayos, procediendo en su caso al apagado previo de la lima y de la periclase. En ambos casos, una exposición del material a la intemperie facilita el apagado por la acción de los agentes atmosféricos.

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESCORIAS DEL CONVERTIDOR AL OXÍGENO BOF					
Ensayo	Ud.	BOF	Basalto	Granito	Exigencias para carreteras
Resistencia a compresión	N/mm ²	> 130	> 250	> 160	6)
Desgaste de los ángulos (80-12 mm.)	% PT	15-20	9-20	12-27	< 18 ¹⁾ < 22 ²⁾ < 34 ³⁾
Coefficiente de pulido acelerado	-	50-54	45-56	45-58	≥ 43
Coefficiente de absorción normal	% PT	0,3-0,9	< 0,5	0,3-1,2	≤ 0,5
Coefficiente de heladicidad	% PT	< 0,3	<0,8	0,8-2,0	≤ 3,0 ⁴⁾
Incremento por volumen	% V	1-5	6)	6)	≤ 5,0 ⁵⁾
Densidad aparente	g/cm ³	~ 3,2	~ 2,95	~ 2,70	6)
Densidad de conjunto	g/cm ³	~ 1,5	6)	6)	6)

1) CAPA SÚBBASE 2) CAPA BASE 3) CAPA RODADURA 4) COMPROBAR SÓLO SI LA ABSORCIÓN DE AGUA>0,5
5) SOLO ESCORIAS BOF Y EAF. 6) NO DISPONIBLE.

Tabla 3. Características de las escorias BOF.

La Escoria de fabricación de Acero de Alta Aleación.

Para fabricar aceros de alta aleación, comúnmente denominados aceros inoxidables, se utiliza un proceso más complejo que el empleado en la fabricación de hierro, aceros y fundiciones mediante horno alto o mediante convertidor de oxígeno. La tecnología utilizada es la de la fusión en Horno Eléctrico de Arco (EAF), y afino mediante un convertidor AOD/VOD (Argon oxigen decarburatation-Vacuum oxigen decarburatation) [107].

El componente principal de las escorias de aceros de alta aleación es principalmente el silicato cálcico [82] [166]. El tratamiento de los caldos en un segundo afino con convertidores AOD/VOD, que no utilizan aire, permite obtener concentraciones bajas de óxidos de hierro y de cromo [105], por lo que la contaminación por cromo hexavalente es muy atenuada o inexistente.

En las Tabla 4 y Tabla 5 adjuntas, se indica la composición química de las escorias de acero de alta aleación fabricadas mediante este método.

La presencia de cromo hexavalente limita su uso en otras aplicaciones por la conocida acumulación de este metal en los organismos. Es por ello que debe cuidarse su utilización como corrector de suelos agrícolas. Actualmente, se acumula en grandes acopios sin uso definido.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ESCORIAS DE ALTA ALEACIÓN		
ELEMENTOS	ESCORIAS EAF (% peso)	ESCORIAS AOD (% peso)
SiO ₂	28-40	20-40
Al ₂ O ₃	2-8	1-2,5
CaO	34-48	48-68
MgO	7-13	4-6
Cr ₂ O ₃	0,1-1	0,1-5
Fe _{total}	0,4-3	0,4-2,0
MnO	1,3-2,0	0,6-1,0
CaO/SiO ₂	1,3-1,6	1-3

Tabla 4. Composición química de las escorias de acero de alta aleación

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ESCORIAS DE ALTA ALEACIÓN		
TRAZAS DE ELEMENTOS	ESCORIAS EAF (mg/kg)	ESCORIAS AOD (mg/kg)
As	3	< 7
Cd	< 1	< 1
Cu	<100	110
Hg	< 0,5	< 0,5
Ni	< 200	200-700
Pb	< 30	< 100
Zn	< 30	< 30

Tabla 5. Composición química de las escorias de acero de alta aleación.

La producción de escoria mediante el método descrito es de unos 75 Kg/Tm. de acero inoxidable fabricado, por lo que la cantidad anual obtenida en España se sitúa en torno a las 0,05 MT, para una producción de acero inoxidable en el año 2009 de 0,69 MT. Los mayores productores de acero inoxidable en la Unión Europea son Alemania y Francia. En tercer lugar se encuentra España.

La Escoria de Cubilote.

En la fabricación de fundiciones de hierro también se ha utilizado tradicionalmente el denominado Horno de Cubilote. Las características de las escorias producidas mediante esta técnica de producción no difieren respecto de las obtenidas en Hornos de Arco Eléctrico o de Convertidor de Oxígeno.

Un aspecto destacable en el estudio de las instalaciones con Horno de Cubilote es su dispersión, ya que existe un importante número de pequeñas empresas distribuidas por todo el territorio nacional. La característica común a todas ellas es su reducido tamaño y su especialización en la fabricación de bienes de equipo muy específicos (componentes para maquinaria agrícola, piezas especiales para maquinaria semiartesanal, máquina herramienta manual, etc.).

La producción de escoria mediante Horno de Cubilote es del orden de las 60.000-70.000 Tm. y, dada la singularidad de los procesos que la originan, se observa también una heterogeneidad en su composición química y propiedades, pero que no difieren

sustancialmente del resto de escorias estudiadas obtenidas mediante otras técnicas de producción.

2.3 PRODUCCIÓN DE ACERO EN HORNOS ELÉCTRICOS

Los procesos de fabricación de aceros al carbono y de baja aleación han evolucionado de tal forma que a día de hoy la tecnología que se utiliza es muy diferente a la instalada hace tan solo cuatro décadas.

El primer cambio importante ha sido la sustitución del horno Martin-Siemens por el Horno Eléctrico de Arco. En España este cambio ha sido importante ya que prácticamente todas las plantas de producción han incorporado esta tecnología. En la mayor parte de Europa también se emplea el Horno Eléctrico de Arco, aunque todavía hay instalaciones que conservan procesos de fabricación de horno alto y posterior tratamiento con convertidor de oxígeno.

Consecuencia de este cambio tecnológico es el aumento espectacular de producción de acero utilizando hornos eléctricos, circunstancia que ha permitido superar en muchos países, como es el caso de España, la producción de aceros mediante métodos tradicionales.

Este cambio tecnológico ha sido motivado fundamentalmente por dos razones suficientemente plausibles como para optar por los nuevos métodos de producción:

1. El proceso de fabricación con este método reduce considerablemente el tiempo empleado, de modo que el ciclo de producción de una colada está en torno a los sesenta minutos de duración frente a las ocho horas que tarda en horno Martin-Siemens.
2. El segundo factor de decisión es el coste energético de explotación. La fabricación de aceros mediante el horno Martin-Siemens determina costes de producción totales tres veces mayores que los obtenidos utilizando la tecnología del horno eléctrico de arco.

Aunque tanto el horno Martin-Siemens como el Horno Eléctrico de Arco permiten obtener aceros de alta calidad, es evidente la decisión de adoptar el sistema fabricación de Horno Eléctrico de Arco [208], ya que la demanda de acero mundial es elevada y el coste de la energía, particularmente del gas natural y del petróleo, se incrementó de manera preocupante a partir del año 2004.

La industria siderúrgica no ha sido ajena a la evolución tecnológica y al perfeccionamiento de los procesos de fabricación, incorporando tratamientos que mejoran sustancialmente la calidad de los aceros obtenidos.

Una mejora sustancial del proceso de afino y purificación del caldo de acero ha sido la aplicación de la metalurgia en las cucharas de transporte a las acerías que utilizan tanto

los Hornos Eléctricos (HEA) como los Convertidores de Oxígeno (BOF), denominándose a este proceso “metalurgia secundaria”.

Este nuevo tratamiento en horno de cuchara (HC) incorpora también una instalación adicional de vacío, en muchos casos donde se produce la desulfuración del caldo. Este sistema de afino es utilizado en casi todas las plantas de fabricación de acero y alcanza al 96.6% de la producción actual en España.

Estos procesos permiten obtener aceros de alta calidad a precio muy competitivo, rentabilizando las inversiones necesarias para instalar las cucharas en acerías con producciones inferiores a 1 MT/año. Este ha sido uno de los procesos de transformación más importantes de las plantas de producción españolas llevados a cabo en las dos últimas décadas del siglo XX.

Del total de acero producido en 2009 en España, aproximadamente el 80% corresponden a HEA y HC, es decir 11,3 MT. Se puede observar la importante apuesta tecnológica por los HEA y HC, solamente superada por Italia y Alemania.

En España funcionan actualmente 24 acerías de horno eléctrico de arco (14 de ellas en el País Vasco). La producción total de acero de horno de arco eléctrico se reparte por comunidades según la Tabla 6.

PRODUCCIÓN DE ACEROS EN HORNOS DE ARCO	
COMUNIDAD AUTÓNOMA	% PRODUCCIÓN sobre el TOTAL EN HEA
PAÍS VASCO	45,6%
CATALUÑA-ARAGÓN	17,6%
ANDALUCÍA	11,9%
GALICIA-CASTILLA Y LEÓN-EXTREMADURA	10,1%
CANTABRIA	8,6%
MADRID	6,3%

Tabla 6. Distribución de la producción de HEA por CCAA

Sucintamente, el proceso de obtención de aceros mediante el sistema EAF-LF determina dos fases perfectamente diferenciadas:

1. HORNO EAF: Fase de fusión de la carga y desfosforación.
2. HORNO LF: Fase de desulfuración y afino.

Ambos procesos determinan escorias de diferente tipología. El primer tratamiento en el horno EAF produce la “escoria negra” y el segundo, en horno LF, la “escoria blanca”.

A continuación, se detallan los dos procesos del sistema de fabricación EAF-LF y las características de las escorias producidas en cada caso.

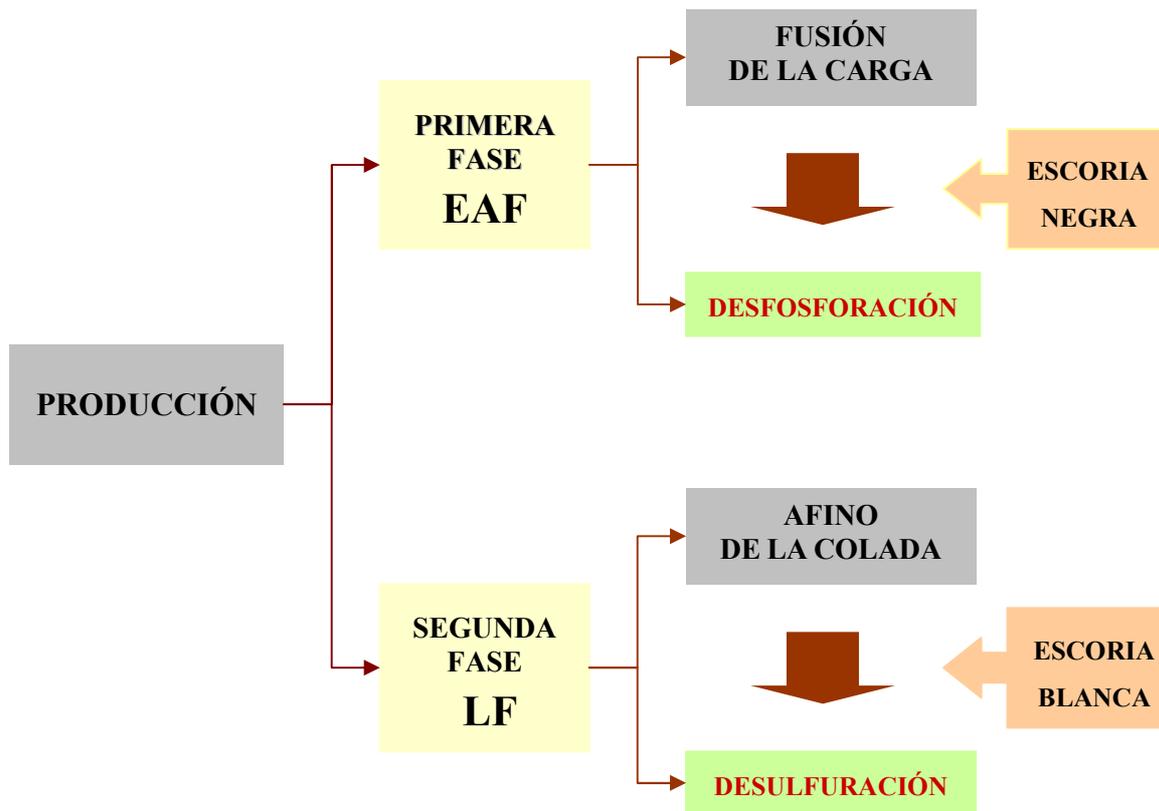


Figura 6. Proceso de fabricación de acero con hornos EAF-LF.

La fabricación de acero en el Horno de Arco Eléctrico EAF se realiza preparando en primer lugar los materiales que servirán como materia prima y que están constituidos como componente mayoritario por chatarra reciclada (en torno al 50-90%), y de prerreducidos de hierro como componentes minoritarios. También se añaden materiales formadores de escoria, que protegen el revestimiento refractario del horno y que están constituidos en su mayor parte por cal, sílice, magnesia y alúmina.

Una vez precalentados se colocan en el crisol refractario del horno, se tapa éste y se activa el arco eléctrico entre tres electrodos de grafito. El consumo de energía es importante, obteniéndose una gran intensidad de corriente a un voltaje bajo, lo que posibilita que en poco tiempo los materiales se fundan en pocos minutos.

El resultado del proceso es la obtención de dos fases perfectamente diferenciadas de material:

- Un sobrenadante de las escorias protectoras en estado líquido.
- Una segunda fase, también licuada, de caldo de acero.

Una vez concluida la fase de fusión de la materias primas, se elimina el fósforo oxidando del caldo de acero con un soplado mediante lanza de oxígeno. Este proceso, además de eliminar el fósforo combinado, produce la oxidación de otros metales que impurifican la mezcla, formándose óxidos metálicos que se mezclan con los

componentes de la escoria que sobrenada en la superficie. La composición de estos óxidos metálicos es variada, desde óxidos de silicio, carbono, manganeso y cromo, hasta pequeñas cantidades de óxidos de hierro que de forma inevitable también se combinan con la escoria.

Como el proceso de desfosforación y oxidación de los metales se realiza a altas temperaturas y genera mucho calor, los óxidos formados y mezclados con las escorias se combinan con los componentes de éstas, determinado así la composición final del residuo resultante.

La escoria formada tiene como componentes mayoritarios óxidos de cal, sílice, magnesia, alúmina y de hierro y en ella predominan los óxidos de carácter “ácido”, como la sílice, la alúmina y el óxido de hierro, frente a los óxidos de carácter “básicos” como la cal y la magnesia. Como componentes minoritarios contiene óxidos de cromo, manganeso y fósforo. Una vez solidificada la escoria obtenida presenta un color negro, debido principalmente a los óxidos de hierro formados en el proceso de oxidación.

El tratamiento de acero mediante Hornos de Cuchara puede aplicarse tanto a caldos obtenidos en Hornos Eléctricos de Arco EAF, como en Hornos de Convertidor de Oxígeno BOF.

El objetivo que perseguimos en el tratamiento de los caldos mediante Hornos de Cuchara LF es conseguir un caldo de acero de mejor calidad, con una composición más ajustada y purificada, eliminando los productos que puedan dañar al acero. El afino con Horno Cuchara mejora la composición química del acero proveniente de la fase primaria mediante la desoxidación, desulfuración y eliminación de gases incluidos en el seno del caldo, mientras éste se encuentra localizado en la cuchara de transporte [76].

Para facilitar este proceso se introducen en el Horno Cuchara junto a los caldos materiales formadores de una escoria de carácter básico, con un fuerte contenido en cal, que denominamos “escoria blanca” y que se forma a razón de 80-90 Kg. de escoria por tonelada de acero producido.

La composición mineralógica de la escoria blanca está compuesta fundamentalmente por silicatos cálcicos y aluminatos cálcicos. Presenta también entre un 5 y un 15 % de cantidades de cal y magnesia no combinadas.

El tratamiento de ajuste y afino de la composición de los caldos se consigue en dos fases diferenciadas:

1. Primero se somete a un proceso de desoxidado mediante la adición de metales reactivos con el oxígeno, como el ferrosilicio. Posteriormente se desulfura utilizando calcio y se desgasifica al vacío.
2. Los procesos descritos son posibles al formarse en la superficie del caldo una costra de escoria básica con alta concentración de cal y magnesia, así como menores proporciones de sílice y alúmina. Los compuestos de sílice, alúmina y sulfuro de calcio desprendidos del caldo en el momento de la eliminación del oxígeno y del azufre se acumulan también en este sobrenadante combinándose con sus componentes.

3. En una segunda fase se procede al ajuste de la composición química del acero en función de las características que se precisen del mismo, para pasar posteriormente a la colada continua.

Una vez concluido los procesos de desoxidado y desulfuración del caldo de acero y ajustada su composición, se purga el caldo por el fondo de la cuchara, por lo que la escoria sobrenadante desciende de nivel hasta el fondo de la misma.

Una vez extraído el caldo de la cuchara, la escoria se retira en recipientes que la vierten en un acopio, junto con tongadas de procesos anteriores. Al entrar en contacto con la temperatura del ambiente exterior la escoria se disgrega y desintegra por dos procesos internos diferenciados:

1. Al depositarse la escoria en el acopio o vertedero a temperatura ambiente se produce un enfriamiento de los silicatos bicálcicos que cambian de forma alotrópica. Este fenómeno se produce en torno a 400-500° C y el color de la escoria toma un tono gris blanquecino.
2. La cal y magnesia libres en forma de óxido entran en contacto con la humedad ambiental o con el agua de lluvia y se hidratan parcialmente; la magnesia en realidad lo hace muy despacio. Ambos compuestos pasan respectivamente a la forma de hidróxido de cal y de magnesia, lo que produce un incremento de volumen, con las consiguientes tensiones que a su vez va a cuartear más aun la escoria. El color es cada vez más claro y su aspecto pulverulento.

Los restos de acero que salen junto con la escoria son retirados mediante electroimanes que los recogen y devuelven al proceso de fabricación como materia prima. Las escorias blancas se vierten en una explanada o piscina de regado.

Es aquí donde se plantea el reto de conseguir el aprovechamiento y utilización de las escorias. En esta línea, las Tesis Doctorales del profesor Juan Manuel Manso Villalaín [146], de la doctora Milagros Losáñez González [142] y el doctor Ángel Rodríguez Saiz [184] han aportado valiosas sugerencias prácticas para la reutilización tanto de la escoria negra como de la blanca de horno cuchara. Con esta Tesis Doctoral se quiere afianzar la idea de que este material es aprovechable, no sólo como algo deseable que surge del razonamiento positivo y del propio instinto conservacionista, sino como una realidad demostrable justificada en estudios científicos.

Como se ha indicado anteriormente, la escoria blanca es un material que en contacto con el ambiente sigue un proceso de transformación hasta alcanzar el aspecto final de fino polvo blanquecino disgregado. La estabilización volumétrica de las escorias es un requisito previo a cualquier posible utilización de las mismas en otros procesos industriales, ya que las variaciones de volumen que pudieran sufrir de no estar completamente equilibradas afectarían a los procesos industriales en los que se aplique, y al resultado final de éstos.

Si bien la escoria negra ha encontrado suficientes aplicaciones en la fabricación de otros materiales (hormigones, morteros, cementos, prefabricados, etc.), o directamente utilizada en procesos de construcción (bases y subbases de plataformas, caminos de

rodadura, lechos bacterianos, etc.), la escoria blanca precisa de un estudio específico para buscar una utilidad que garantice su viabilidad como material de construcción o en procesos afines.

Para ello, la escoria blanca debe ser tratada previamente para uniformizar sus propiedades en aras a conseguir un comportamiento homogéneo y estable. Tal como propone la doctora Losáñez González en su Tesis Doctoral [142] y el doctor Ángel Rodríguez Saiz [184] los procesos de tratamiento previos a su utilización podrían ser:

- Removido y volteo de los acopios con el fin de conseguir una meteorización completa de todos los componentes mineralógicos de la escoria y un comportamiento uniforme de los mismos.
- Para favorecer el proceso de hidratación del óxido cálcico y magnésico, se puede proceder al regado de las escorias mediante aspersores que distribuyan el agua suficiente para asegurar la formación de los hidróxidos correspondientes.
- Para evitar la dispersión de la escoria por el viento, dado su aspecto pulverulento y disgregado, se puede proteger con lonas que aseguren y fijen el material o bien depositarlo directamente en naves antes de su utilización. Este proceso se podría simultanear con el regado uniforme del producto.

Producción de Escorias de acería eléctrica

La fabricación de aceros mediante la tecnología del Horno Eléctrico de Arco y posterior afino en Horno Cuchara produce dos tipos de escorias con diferentes características organolépticas, físicas y químicas.

1. En la fase de fabricación en el Horno Eléctrico de Arco se obtiene la “escoria negra” a razón de 110-150 Kg. por tonelada de acero producido.
2. En la fase de afino en el Horno de Cuchara -metalurgia secundaria- se recogen la “escoria blanca”, obteniéndose en torno a los 30-60 Kg. por tonelada de acero [1].

En el primer caso, como la producción de acero en Horno Eléctrico de Arco en España en 2009 fue de 11,3 MT., la escoria negra obtenida en el conjunto de las plantas que tienen instalada esta tecnología fue de 1,4 MT.

Los Hornos de Cuchara se instalan tanto junto a los Hornos Eléctricos de Arco como junto a los Convertidores de Oxígeno, por lo que la producción de escoria blanca afecta a los dos tipos de instalaciones. Para el cálculo de esta escoria tomaremos como referencia los 14,3 MT de acero producido en España mediante ambos procesos durante el año 2009, por lo que podemos estimar en 0,4 MT la cantidad de escoria blanca anual resultante de la metalurgia secundaria.

De igual manera que sucede de manera general para la siderurgia española, la mayor concentración de HEA se concentra en el norte del país, entre el País Vasco y Cantabria. Durante el año 2009 se generaron 650.000 toneladas de escoria negra en el País Vasco y 130.000 tn de escoria negra en Cantabria. La producción de escoria blanca fue de 150.000 tn y 30.000 tn en cada comunidad, respectivamente.

En un primer momento, estas elevadas cantidades de escoria producida podrían parecernos preocupantes, de ahí la necesidad que ha existido siempre de buscar alternativas a su acumulación en vertederos con el consiguiente impacto ambiental. El empleo de la escoria negra está bastante avanzado y actualmente no genera un problema importante. Se está utilizando en la fabricación de hormigones, en capas de rodadura, de manera que el impacto queda relativamente amortiguado. Diferente es la escoria blanca, para la cual se han hecho estudios pero aún genera un problema su almacenamiento.

En los países que integran la Unión Europea la producción de aceros mediante el Horno de Arco Eléctrico (EAF) no está tan extendida como en España. La mayor parte del acero producido, en torno a un 48 %, se obtiene mediante Hornos Altos (BF) y Hornos de Acero al Oxígeno (BOF).

Las escorias producidas en los hornos EAF en la UE durante 2009 ascendieron a 12 MT, repartidas según la Tabla 7. A la cabeza se sitúa Alemania e Italia, seguidas de España y Francia.

PRODUCCIÓN APROXIMADA DE ESCORIA DE HEA Y ESCORIA DE HC EN LA U.E. (2009)		
País Miembro de la UE	ESCORIA HEA (MT/AÑO)	ESCORIA HC (MT/AÑO)
Alemania	1,65	1,32
Italia	1,99	0,65
España	1,46	0,43
Francia	0,96	0,51
Gran Bretaña	0,38	0,30
Bélgica	0,38	0,29
Suecia	0,26	0,15
Luxemburgo	0,35	0,07
Austria	0,09	0,16
Holanda	0,02	0,16
Finlandia	0,12	0,10
Irlanda	0,08	0,02
Grecia	0,13	0,03
Portugal	0,11	0,02
Dinamarca	0,05	0,01
Total Unión Europea	8,03	4,20

Tabla 7. Producción de escoria HEA y de Horno de Cuchara en la EU

Es evidente que en el ámbito de la Unión Europea, al ser mayor la producción de escoria de Convertidor de Acero al Oxígeno, los problemas que genera su manipulación tiene mayor incidencia que los originados por las escorias de Horno de Arco Eléctrico, por lo que los estudios tendentes a reducir su impacto se realizan fundamentalmente sobre las primeras. También se han realizado estudios sobre las escorias negras procedentes de EAF [209], siendo escasos los trabajos de investigación dedicados a las escorias de Hornos de Cuchara LF [91] [107].

Otra razón por la que casi todas las investigaciones se orientan más al estudio de las escorias de Convertidor de Acero al Oxígeno BOF [78] [93] [100] [127] [175] [176] es debido a la mayor dificultad de su aplicación como material reciclado en la fabricación de otros materiales, particularmente en el ámbito de la construcción, y por presentar problemas de estabilidad importantes debido a su composición.

La mayor parte de estos estudios son consecuencia de programas de investigación subvencionados con dinero público, que contribuyen a posibilitar un desarrollo sostenible y un mejor aprovechamiento de los recursos mediante la reutilización y reciclado de los residuos de la actividad industrial.

Entre los criterios que seguimos para la elección de un material de construcción además de la aptitud, su durabilidad o su respeto con el entorno, tenemos muy en cuenta su coste. Hay materiales que resultan poco rentables si la componente del transporte hace que su coste sea excesivo, lo que determina que no se considere su utilización en el momento de establecer la valoración económica de una obra. Este es el caso de los áridos.

Los áridos, tanto los naturales obtenidos en un yacimiento como los fabricados mediante técnicas de machaqueo o los reciclados, para que sean rentables deben tener un ámbito de influencia geográfica no mayor de 50 o 60 Km. Esta misma consideración debemos hacer respecto de las escorias siderúrgicas.

Para que una escoria siderúrgica pueda ser rentable debemos considerar también la componente del transporte. Es por ello que la distancia ideal en un primer planteamiento teórico, tendría que ser de 120 Km. entre plantas de producción de acero. De esta forma, podremos estimar su uso con una implicación del factor transporte en el precio final del producto de forma razonable.

La consideración teórica puede extenderse al razonamiento de que en la zona de influencia deba existir una demanda suficiente para garantizar su reciclado. Esto es algo que se escapa a la realidad, ya que la distribución de las factorías de producción de acero en el territorio español no es uniforme, ni tampoco la demanda, porque aunque la construcción ha tenido un desarrollo importante en todo el estado español, no es uniforme el crecimiento, localizándose en unas zonas mayor actividad que en otras.

La distribución de las 24 acerías instaladas en España tampoco es uniforme y se concentra en unas zonas más que en otras.

La fabricación de hormigones puede absorber una importante cantidad de escorias. No obstante, sería absurdo pensar que toda la producción de escorias podría ser absorbida por la industria del cemento y del hormigón, por lo que se plantean soluciones alternativas que diversifiquen su aplicación. A este respecto, este doctorando encuentra especialmente interesantes las propuestas que la Dra. Losáñez González [142] hace en este sentido, proponiendo su aplicación en la preparación de pavimentos en caminos rurales con poco tráfico rodado.

Por todo ello, se hace necesaria una política de reciclado que considere la reutilización de las escorias como una necesidad social de carácter medioambiental, por lo que los costes de transporte y procesado previo deben considerarse como una retribución para

las empresas y una carga social asumida por todos. Esta consideración será objeto de estudio en diferentes capítulos de esta Tesis Doctoral.

Características relevantes de la Escoria Negra y Escoria Blanca

Composición química de la escoria negra EAF y escoria blanca LFS.

Como puede observarse en Tabla 8, la presencia de CaO libre (lima) no combinada en la escoria negra EAF es pequeña, mientras que en la escoria negra BOF su contenido es algo mayor [71] [99] [105] [106].

El contenido de magnesia en la escoria negra EAF es del orden del uno al diez por ciento y su distribución es desigual:

- Una parte está combinada con otros elementos presentes en la escoria como componentes de carácter férrico, silicatos o aluminatos.
- Otra parte queda sin combinar a modo de magnesia libre amorfa que no se hidrata, o bien en forma de magnesia libre cristalina que recibe el nombre de periclusa hidratable.

La magnesia combinada y la magnesia amorfa no hidratable son más estables que la magnesia libre cristalina, que sí se puede hidratar y que lo hace de forma lenta y progresiva. La hidratación de la magnesia cristalina o periclusa hidratable da lugar a brucita, que induce una posible expansión potencial de los bloques de escoria negra con el consiguiente peligro de inestabilidad volumétrica por incremento dimensional de la misma.

Por otra parte, la magnesia libre es capaz de fijar metales pesados, tan peligrosos para el medio ambiente por su capacidad de acumulación en los seres vivos, en forma de espinelas en combinación con la alúmina, por lo que no es del todo deseable la posibilidad de su utilización por presentar ventajas en este campo [93].

El hierro es el componente que, junto a la cal, tiene una presencia más acusada en la composición química de la escoria negra. La concentración de hierro está en torno al 20-30% y se encuentra en todos los estados de oxidación posibles, en forma de Wustita (Fe^{+2}), Hematites (Fe^{+3}) y Magnetita ($\text{Fe}^{+8/3}$).

La alta concentración de hierro determina una importante influencia de éste en las propiedades finales de la escoria negra como su alta densidad, su resistencia a la abrasión y al desgaste. La presencia de hierro metálico o acero en las escorias negras es escasa, ya que en la acería se someten a tratamientos de barrido magnético para su separación. No obstante, los análisis químicos determinan trazas de hierro metálico que indican la presencia de pequeñas cantidades no eliminadas.

El índice de basicidad cal/ sílice de la escoria negra EAF está en torno a 2,5 a 3 unidades estando, como se ha indicado anteriormente, toda la cal prácticamente combinada.

COMPOSICIÓN	TIPO DE ESCORIA		
	BOF	EAF	Metalurgia Secundaria
% PESO			
CaO	45-54	25-35	30-52
CaO libre	1-10	0-4	1-10
SiO ₂	11-18	8-18	8-23
Al ₂ O ₃	1-5	3-10	3-20
MgO	1-6	2-9	6-12
Fe _{total}	14-22	20-30	0,5-2
Mn _{total}	1-5	2-8	0,5-3
CaO/SiO ₂	2,8-4,4	1,7-4,0	1,4-5,5

Tabla 8. Composición química de las escorias de acero (% peso).

Como se ha descrito en apartados anteriores, la escoria blanca procede del tratamiento de los caldos de acero, provenientes tanto de Horno de Arco Eléctrico EAF como de Convertidor de Oxígeno BOF, en Hornos de Cuchara LF, no existiendo diferencias apreciables entre las escorias blancas obtenidas por la procedencia del caldo de un sistema o del otro. A diferencia de la escoria negra, la escoria blanca presenta importantes concentraciones de cal libre y magnesia libre, así como también de silicato bicálcico SC₂ [143] [144] [203] [200].

Como las escorias, una vez finalizado el proceso de afino en el Horno Cuchara LF, se depositan en vertederos de acopio para su enfriamiento, quedan expuestas a la meteorización por los agentes atmosféricos. Esta circunstancia determina importantes procesos de expansión de la cal y magnesia libres, así como de los silicatos bicálcicos, lo que produce su disgregación y desintegración. El aspecto final de la escoria es el de un material fino y semipulverulento. Este es el material del que debemos partir para el estudio de su utilidad y consideración como material reciclable y aprovechable.

También, a diferencia de lo que ocurre con las escorias negras, el contenido en hierro en cualquiera de sus combinaciones es prácticamente nulo y está en torno al 0,5-2 %.

Por el contrario, la composición química porcentual de la escoria obtenida en el Horno Cuchara muestra concentraciones de cal superiores al 50%, la mayor parte combinada junto con la sílice en forma de silicato bicálcico SC₂ y silicato tricálcico SC₃, junto con otros compuestos como la alúmina y la magnesia.

El índice de basicidad cal/ sílice de la escoria blanca LF está en torno a 3 y 4 unidades, con presencia, tal y como se ha indicado en párrafos anteriores, de cal y magnesia libres en concentraciones apreciables.

En cuanto a los metales pesados presentes en la escoria negra podemos observar, tal y como se explica en la tabla, que su presencia es baja en general. La presencia de cromo en concentraciones del orden del 2,2 % se debe a la utilización de chatarra con alto contenido en cromo.

Aunque en el proceso de fabricación de aceros al carbono la presencia de cromo en la escoria generada es mucho menor, en torno al 0,3 %, se hace necesario considerar su

posible impacto en el ambiente por la presencia de cromo hexavalente en los lixiviados y aguas de esorrentía de los depósitos de acopio de la escoria.

Las concertaciones de metales pesados en estas escorias LFS son, como en el caso de las escorias negras, muy bajos. La presencia de cromo es algo mayor que en las escorias negras BOF, pero inferior a la concentración de este metal en las escorias EAF.

COMPOSICIÓN	TIPO DE ESCORIA		
	BOF	EAF	Metalurgia Secundaria
mg / Kg.			
As	< 1	< 15	< 25
Cd	< 1	< 30	< 0,5-2,0
Cr _{total}	1000-3000	5000-22000	100-5000
Cu	< 50	< 300	5-100
Hg	< 0,5	< 0,5	< 0,01
Ni	< 10	< 70	5-100
Pb	< 10	< 90	5-100
Zn	< 150	< 900	5-100

Tabla 9. Concentración de metales pesados en escorias de acero (mg/Kg).

Composición mineralógica de las escorias EAF y LF.

La composición mineralógica de las escorias de acería negras EAF y blancas LF se muestra en Tabla 10 adjunta donde se indican las fases minerales más importantes, así como los elementos que las constituyen.

Los silicatos bicálcicos SC₂ presentes en la escoria constituyen el elemento que está en mayor proporción. Su formación se debe principalmente a la combinación de la sílice con la cal a altas temperaturas, o bien como consecuencia de un enfriamiento brusco del silicato tricálcico SC₃, que propicia la formación del silicato bicálcico y cal libre, al igual que ocurre en la fabricación de los cementos Portland [144].

La cal libre formada por el enfriamiento del silicato tricálcico se distribuye uniformemente en la matriz compacta de la escoria cristalina y no tiene comportamientos expansivos a corto plazo [70], por lo que es estable. No obstante, si la cal no está completamente disuelta en la matriz compacta de la escorias o se dispone en zonas porosas de fácil acceso, pueden aparecer expansividades al meteorizarse.

Fase Mineral	Peso %	Principales Componentes, molar %
Silicato bicálcico	30-60	CaO (64), SiO ₂ (32), P ₂ O ₅ (1-3)
Silicato tricálcico	0-30	CaO (70-73), SiO ₂ (23-25)
Cal libre	0-10	CaO (75-90), MnO (2-10), FeO (5-15)
Wustita	10-40 (*)	FeO (45-55), MnO (10-20), CaO (10-30), MgO (5-20)
Espinela	10-30 (**)	Al ₂ O ₃ (50-55), MgO (25-30), Ca O(10-20), SiO ₂ (0-10)
Ferrita dicálcica	5-20 (*)	CaO (60-65), Fe ₂ O ₃ (15-45)
Fase magnética	0-20 (*)	Fe ₃ O ₄ (50-80), Fe ₂ O ₃ (10-40)

(*) Escoria negra.

(**) Escoria blanca.

Tabla 10. Composición mineralógica de las escorias y fases minerales (% Peso).

La fase magnética proviene del enfriamiento del Fe_3O_4 , que se produce en estado líquido a una temperatura de 1600 °C, y que se forma al enfriarse el Fe_2O_3 cuando desciende la temperatura del caldo. De esta forma, se favorece la formación de una fase sólida única para ambos óxidos, pudiendo aparecer combinados otros óxidos metálicos.

Comportamiento mecánico de las escorias EAF y LF.

En comparación con otros materiales utilizados habitualmente en construcción, las escorias presentan propiedades mecánicas tales que pueden justificar su uso como material en edificación e ingeniería civil. La Tabla 11 muestra un comparativo de propiedades entre las escorias EAF y LF, y algunas rocas naturales como los granitos y basaltos, muy utilizados en construcción y en particular en la preparación de bases de plataformas en calzadas.

Como se puede observar, los coeficientes de resistencia al pulimento acelerado de la escoria negra superan al de las rocas referidas y justifican su aplicación en capas de rodadura de las plataformas de carreteras.

Como ya se ha indicado anteriormente, las propiedades de la escoria blanca del Horno de Cuchara no se puede analizar con las de los granitos y basaltos o con las de la propia escoria negra. En el Capítulo 4 de esta Tesis Doctoral se recogen, de forma más precisa y pormenorizada, las características físicas y químicas más importantes de las escorias blancas utilizadas.

Ensayo	UD	Escoria EAF	Escoria LF	Basalto	Granito	Exigencias para carreteras
Resistencia a Compresión	N/m ³	>130	-	> 250	> 160	- ⁶⁾
Desgaste de los Ángeles (80-12 mm.)	% PT	12-20	Polvo	9-20	12-27	< 18 ¹⁾ < 22 ²⁾ <34 ³⁾
Coefficiente de Pulido Acelerado	-	54-57		45-56	45-58	≥ 43
Coefficiente de Absorción normal	% PT	1-6		< 0,5	0,30-1,20	≤ 0,50
Coefficiente de Heladicidad	% PT	<0,30		<0,80	0,80-2,00	≤ 3,0 ⁴⁾
Incremento por Volumen	% V	1-5	5-25	N.D.	N.D	≤ 5,0 ⁵⁾
Densidad aparente	g/cm ³	~ 3,50	~ 2,70	~ 2,95	~ 2,70	- ⁶⁾
Densidad de conjunto	g/cm ³	~ 1,80	~ 1,40	~ 2,95	~ 2,70	- ⁶⁾

¹⁾ CAPA SUBBASE

²⁾ CAPA BASE

³⁾ CAPA RODADURA

⁴⁾ COMPROBAR SÓLO SI LA ABSORCIÓN DE AGUA > 0,5

⁵⁾ SOLO ESCORIAS BOF Y EAF.

⁶⁾ NO DISPONIBLE.

Tabla 11. Propiedades de las escorias EAF Y LF.

2.4 FACTORES QUE AFECTAN A LA ESTABILIDAD DE LAS ESCORIAS DE ACERÍA

Las escorias de acería, cualquiera que sea el proceso de fabricación considerado (Convertidor BOF, Horno de Eléctrico de Arco EAF y Horno Cuchara LF), presentan importantes variaciones volumétricas.

No existe una causa única que justifique la falta de estabilidad de las escorias, sino múltiples factores que, bien de forma conjunta o por separado, dan lugar a este comportamiento inestable. Unas veces son las características físicas de sus componentes, como el tamaño de grano de la escoria, el grado de cierre que presentan los nódulos de cal en la matriz de la propia escoria o su porosidad y red capilar, las que ocasionan este fenómeno. En otras ocasiones son sus caracteres químicos, como los nódulos de cal y magnesia libres que al hidratarse aumentan de volumen, o la oxidación de los iones de hierro que, aunque en pequeñas proporciones, se encuentran presentes en su composición.

Para conocer con exactitud el alcance de esta inestabilidad volumétrica se hace necesario analizar cada una de estas causas mediante los correspondientes ensayos de caracterización, estableciendo el grado de afección producido y considerar la conveniencia o no de su uso como material de construcción.

Si bien todas las escorias presentan una cierta inestabilidad volumétrica, ésta es más acusada en las escorias BOF que en las escorias EAF, lo que hace que éstas se puedan aplicar con mayores garantías de uso como material de construcción. El caso de las escorias LF es muy diferente al de las escorias del proceso primario, lo que condiciona su uso en la fabricación de otros materiales.

Los factores que perturban la estabilidad de las escorias y que condicionan su estabilidad dimensional son los siguientes:

- La hidratación de la cal libre.
- La hidratación de la magnesia libre.
- Conversión de las fases del silicato bicálcico.
- Oxidación de Fe^{+2} a Fe^{+3} .

A continuación se estudian cada uno de los factores y su participación en la falta de estabilidad de las escorias de acería.

Hidratación de la cal libre presente en la escoria.

Para la producción de aceros de alta calidad se precisa la utilización de importantes cantidades de cal que se añaden junto con las materias primas. Como consecuencia, las escorias presentan una concentración de cal importante en forma de CaO y, por ende, una elevada basicidad CaO/SiO₂

Una escoria fría tiene una composición mineralógica definida que se caracteriza por la presencia de silicatos bicálcicos (C_2S) y silicatos tricálcicos (C_3S), además de aluminatos y ferritos cálcicos. Dependiendo del proceso de fabricación utilizado, el contenido de cal en la escoria final puede alcanzar hasta el 20% como cal libre o lima (CaO_{libre}) no combinada a otros elementos

La cal libre puede ser, como ocurre en la fabricación del clinker de cemento Portland, de origen primario o cal no combinada o no disuelta en el proceso de fabricación del acero, o de carácter secundario por el enfriamiento rápido y brusco por contraste térmico del silicato tricálcico (C_3S), que se disocia en silicato bicálcico (C_2S) y cal libre (CaO_{libre}) [175].

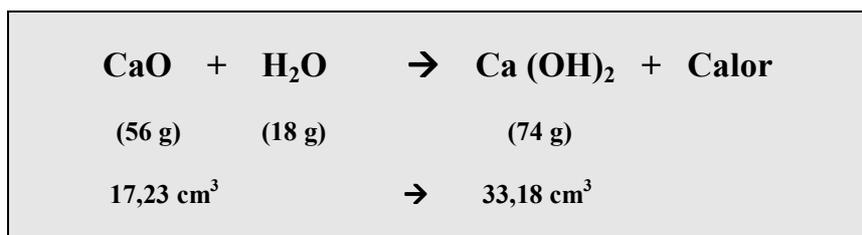
Esta cal libre o lima puede hidratarse al meteorizarse por el agua de lluvia o por la propia humedad ambiental, desarrollando un incremento de volumen importante [175] [70]. Es evidente que la presencia de poros o intersticios capilares en la escoria facilita la entrada del agua a su interior, por lo que el proceso de hidratación se desarrollará con mayor rapidez y el incremento de volumen o hinchamiento será más acusado.

De forma experimental se demuestra que escorias de acería con un 6% de volumen de poros sobre el volumen total de la muestra pueden contener hasta un 4% de CaO_{libre} sin alteraciones significativas en su volumen final una vez hidratadas, y un contenido de poros del 2% del volumen de escoria admite hasta un 8 % de cal libre (CaO_{libre}) en su composición. Esto permite afirmar que la porosidad es un factor importante para valorar los procesos de hinchamiento de las escorias por meteorización del óxido de cal presente sin combinar en su composición.

Los fenómenos de expansión o hinchamiento por meteorización de la cal libre son procesos de hidratación que dan lugar a la formación de hidróxido cálcico o cal apagada $Ca(OH)_2$. Posteriormente, el contacto del hidróxido cálcico con el CO_2 atmosférico da lugar a la formación de carbonato cálcico $CaCO_3$, que, en la reacción teórica, se explican por los siguientes ajustes estequiométricos:

1. Proceso de meteorización por hidratación del óxido de cal.

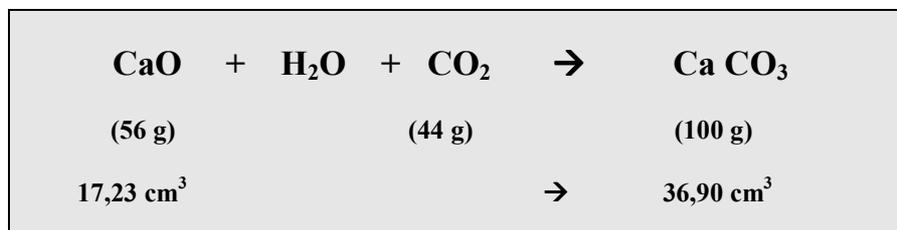
La reacción de hidratación del óxido de cal libre presente en la escoria es la siguiente:



Esta reacción muestra que el proceso de hidratación de 1 cm³ de óxido de cal (CaO) produce 1,926 cm³ de hidróxido cálcico ($Ca(OH)_2$)

2. Proceso de carbonatación del hidróxido cálcico.

La reacción de carbonatación del óxido de cal libre presente en la escoria es la siguiente:



Observamos como la hidratación y carbonatación de 1 cm³ de óxido de cal (CaO) produce 2,14 cm³ de carbonato cálcico (CaCO₃).

Mediante observaciones microscópicas se puede observar cómo la cal que se encuentra dispuesta en la matriz interna de la escoria, fuera del alcance de la red intersticial de poros o de los huecos abiertos del material, permanece inalterable al no alcanzarla fácilmente a corto plazo el agua externa o la humedad ambiental. Sólo se hidrata la cal dispuesta en la superficie de los granos o de los poros, que es impregnada por el agua con cierta facilidad.

Las consecuencias derivadas del proceso de hinchamiento por hidratación del óxido de cal presente en las escorias ha llevado a establecer valores límites de concentración de CaO_{libre} para evitar que afecten negativamente a las construcciones y a otros materiales de los que forman parte [175] [127]. Así, la normativa alemana que regula las condiciones de los materiales utilizados en la construcción de plataformas para carreteras determina un contenido no superior al 7% de CaO_{libre}, siempre y cuando las escorias no lleven capas bituminosas aglutinantes que puedan protegerlas de la humedad o del agua de lluvia [93]. En el caso de capas portantes de asfalto y de cobertura superficial los contenidos se limitan al 4% de CaO_{libre}. Una cuestión no bien resuelta es el modo de determinar ese contenido de cal libre; solamente ensayos de difracción muy meticulosos o ensayos largos de hinchamiento acelerado y posterior termogravimetría, consiguen proporcionar valores precisos.

El test de expansividad es un método de estudio previo a la utilización de las escorias en capas de rodadura, que en las Normas Alemanas es de obligado cumplimiento, y que limita el hinchamiento máximo, frente a la corriente de vapor de agua a 100 °C, que puede presentar una escoria por hidratación de la cal viva. En el caso de capas rodantes sin aglutinante, la estabilidad se garantiza cuando el hinchamiento producido en el ensayo de vapor de agua es menor o igual a un 5% del volumen inicial de referencia. Para capas portantes con asfaltos o betunes el incremento de volumen está limitado al 2,5% y para capas de cobertura el límite se establece en el 1% [93].

A diferencia de las escorias negras, las escorias blancas del Horno de Cuchara presentan características físicas y organolépticas propias de un cuerpo pulverulento totalmente disgregado y desintegrado.

La desintegración de las escorias blancas se produce como consecuencia del enfriamiento brusco a temperatura ambiente por la conversión de fases del silicato bicálcico (C_2S) [175].

La cal libre no combinada se meteoriza mayoritariamente en contacto con la humedad ambiental o por el agua de lluvia, produciéndose su hidratación en un plazo de dos a tres días en zonas húmedas, como puede ser el caso de los acopios y vertederos de las acerías del norte de España. El propio proceso de hidratación propicia la desintegración paulatina de las escorias la retroalimentación del proceso, completándose éste en un corto espacio de tiempo [91].

Hidratación del óxido de magnesio libre de la escoria.

La magnesia libre presente en las escorias de acería puede encontrarse de diferentes formas y estados. Las principales son:

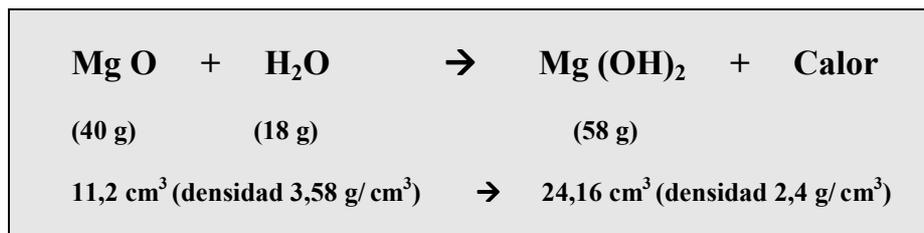
- a) Magnesia libre no combinada (MgO_{libre}) cristalizada en forma de periclasa.
- b) Magnesia (MgO) presente en la composición mineralógica de las Wüstitas de magnesio y de hierro (Fe_2Mg)O, con más de un 70% de contenido en su composición total.
- c) Magnesia no combinada químicamente presente en la fase vítrea de la escoria.

Los procesos de hidratación del óxido de magnesio se producen de forma parecida a los del óxido de cal, pero de manera más lenta. La transformación del óxido de magnesio (MgO) en hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) provoca un hinchamiento que afecta a la estabilidad de las escorias y obliga a limitar la concentración de este elemento para las escorias utilizadas en la fabricación de otros materiales [142].

En el caso de las escorias utilizadas en plataformas de carreteras, las limitaciones de la Norma Alemana son similares a las referidas para óxido de cal (CaO) descritas en el apartado anterior. No obstante, la presencia de magnesio (MgO) sólo afecta a la estabilidad de las escorias si su contenido excede del 4%.

Las distintas formas de óxido de magnesio (MgO) presentes en las escorias se comportan de diferente manera frente al agua o a la humedad ambiental. La magnesia en forma de periclasa es la que muestra una actividad más reactiva frente a la hidratación, siendo menor en el caso de la wüstita de magnesio y casi nula en el caso de la magnesia presente en la fase vítrea de la escoria [102].

Cuando la periclasa (MgO) se hidrata, en una primera aproximación teórica se transforma en brucita ($Mg(OH)_2$) según la siguiente reacción estequiométrica:



Es decir, la hidratación de 1 cm³ de magnesia en forma de óxido MgO se producen 2,16 cm³ de hidróxido de magnesio Mg (OH)₂.

En realidad el proceso de hidratación de la periclasa suele ir acompañado de una carbonatación y produce hidromagnesita, que es una sustancia mineral semejante al carbonato magnésico hidratado. La expansión volumétrica que se produce es superior a la que propone en la formulación teórica anterior.

Las reacciones de hidratación son también diferentes dependiendo del tipo de escoria estudiada. Las escorias negras EAF y BOF presentan hidrataciones muy atenuadas que, en el caso de producirse, lo hacen de forma lenta y sostenida. Por el contrario, las escorias blancas LF se disgregan fácilmente por la hidratación de la cal libre, circunstancia que propicia la posterior hidratación de la magnesia libre favorecida por la mayor superficie específica de la escoria desintegrada, ya que su granulometría es muy fina.

Transformación de los silicatos bicálcicos de la escoria.

Cuando la escoria extraída de los hornos se enfría se producen cambios mineralógicos en su composición propiciados por el contraste térmico entre el ambiente del horno y el de los acopios en que se dispone.

Los silicatos bicálcicos (C₂S) presentan una alotropía en función de la temperatura a la que se encuentren. En torno a los 400°C-500°C la forma cristalina en equilibrio del silicato bicálcico beta (β) desaparece y se transforma en forma de silicato bicálcico gamma (γ), produciéndose un incremento de volumen del 10 a 12% en este proceso para dicha fase (γ). La consecuencia inmediata de esta transformación es la formación de bloques de escoria durante el enfriamiento, totalmente cuarteados y divididos en tamaños menores, que facilitan su posterior manipulación en los procesos de molienda.

Esta transformación alotrópica del silicato bicálcico no afecta por igual a todos los tipos de escoria. Por otra parte, la transformación alotrópica del silicato bicálcico no es completa y pueden aparecer en las escorias enfriadas concentraciones de silicato beta (β) inalterados [121] [127].

Las escorias negras EAF y BOF no se ven afectadas por estos procesos ya que a temperatura ambiente no se producen transformaciones añadidas que puedan alterar su estabilidad. La presencia de fósforo procedente del tratamiento de desfosforación del

acero estabiliza el silicato beta (β) e inhibe su descomposición, por lo podemos encontrar concentraciones de ambos silicatos gamma (γ) y beta (β) en las escorias a temperatura ambiente.

En las escorias LF el proceso se sucede de diferente forma. La transformación del silicato beta (β) en su forma alotrópica gamma (γ) se produce en el gradiente de temperaturas comprendido entre los 400°C y la temperatura ambiente. La ausencia de fósforo impide que se inhiba a temperatura ambiente la descomposición del silicato beta (β) [91]. El aspecto de la escoria es el de un material fino con tamaño de grano entre 0 y 6 mm., en el que se pueden producir expansiones e hinchamientos debido a la hidratación tanto del óxido de cal como de la magnesia.

Proceso de oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} .

Como se ha indicado en apartados anteriores, las escorias negras de acería EAF Y BOF presentan en su composición concentraciones de hierro no extraídas o en combinación con los componentes mineralógicos.

El efecto que producen sobre las escorias depositadas en acopios y almacenes es una rotura de su estructura que, como se puede comprobar, no se puede atribuir a la hidratación de CaO y MgO libres, o a la transformación alotrópica del silicato bicálcico Si_2O_3 (β) [157].

La analítica realizada en estas escorias cuarteadas muestra un contenido alto de concentraciones de Fe^{3+} , observándose contenidos uniformes de Fe total en las muestras ensayadas.

Cabe pues pensar que la transformación por oxidación del Fe^{2+} contenido en la escoria a Fe^{3+} induce un hinchamiento en la misma que facilita su cuarteo y división en forma de escamas o granulados de pequeño tamaño.

Este fenómeno de cuarteo no se produce por igual en todos los tipos de escoria, ya que la mayor parte de los óxidos de hierro que poseen son estables y no se alteran. La utilización de escorias con este aspecto granulado o escamoso dificulta su utilización como material de construcción y se hace necesario establecer su utilidad mediante los correspondientes ensayos.

2.5 APLICACIONES DE LAS ESCORIAS DE ACERÍA

Las escorias procedentes del proceso de fabricación de aceros en hornos de convertidor de oxígeno (BOF) o de arco eléctrico (EAF), o en hornos de cuchara en la metalurgia secundaria (LF), pueden aprovecharse en la fabricación de otros materiales, circunstancia que motiva los objetivos de estudio y consideración de esta Tesis Doctoral.

A continuación se exponen de forma sucinta algunas aplicaciones de las escorias según su procedencia, es decir, escorias negras de convertidor de oxígeno BOF, de horno de arco eléctrico EAF o de metalurgia secundaria LF.

Aplicaciones directas de las escorias negras BOF y EAF.

Las escorias negras son las que encuentran una aplicación más inmediata y directa, participando en la ejecución de otros materiales para la construcción y u otras actividades de tipo industrial [81] [90] [104] [108] [188].

Las alternativas de uso que se plantean son dos y están perfectamente diferenciadas en función de la necesidad o no de realizar algún tipo de procesado previo a su uso, es decir:

- Escorias negras utilizadas directamente sin procesado previo de transformación.
- Escorias sometidas a procesos de transformación para obtener materiales estables.

La aplicación directa de las escorias, o indirecta después de un proceso de transformación previo, es función de las propiedades y características que presente el material y de su estabilidad dimensional en el tiempo.

Las escorias negras EAF son más estables a priori que las escorias negras BOF, de modo que son más adecuadas para una utilización posterior sin necesidad de procesos de transformación añadidos.

Las escorias BOF presentan problemas de carácter técnico, ya que no cumplen con las determinaciones de la Instrucción para la Ejecución de Obras de Hormigón Estructural EHE [11] en lo referido a su estabilidad dimensional una vez puestas en obra. En el caso de las escorias negras EAF, aunque a priori sí cumplen con las prescripciones de la Instrucción EHE, es una cautela necesaria con este tipo de materiales la realización de ensayos de comprobación para estar seguros de su comportamiento posterior, una vez dispuesta en la unidad de obra [148].

Las escorias negras BOF y EAF se han empleado tradicionalmente en la preparación de bases y subbases para plataformas de carreteras y calzadas en caminos, para tráfico rodado e incluso en vías férreas [163] [187] [205].

En el caso de las carreteras y vías de comunicación, la escoria se agregaba con ligantes de naturaleza bituminosa y constituía unidades bastante estables y duraderas en el tiempo. La consolidación de los suelos también se hacía utilizando la escoria directamente sin ningún producto añadido. Las cualidades de la escoria como material en soportes y plataformas de calzadas y carreteras se justifica también por la excelente

resistencia a fuerzas de abrasión, por lo que su desgaste es bajo y su durabilidad está garantizada [122] [175] [171].

Esta es la aplicación más recurrida en el ámbito de la Unión Europea, indicando además que en España hay referencias normativas de su utilización en Obras de Carretera, como así se explicita en la normativa de aplicación específica como la Norma del Laboratorio de Transportes NLT-361 en la que se establece el grado de envejecimiento de las escorias de acería utilizadas en carreteras [21].

Existen varios trabajos sobre la utilización de escoria EAF en la fabricación de hormigones hidráulicos, como árido grueso o fino, adición de refuerzo y/o conglomerantes, donde se estudia la durabilidad de los mismos [66] [69] [74] [77] [85] [95] [109] [115] [116] [150] [162] [170] [172] [181] [194] [195] [211] [214].

Existen trabajos recientes en los que se emplea subproductos de la industria del acero en la estabilización de suelos, principalmente tierras blandas o arcillas [124] [177] [136] [65], comprobándose que producen mejoras en la resistencia y durabilidad, así como la reducción en la expansión de suelos. Para lograr mejoras significativas en resistencia de suelos se requiere un alto porcentaje (15-20%) de escoria fina de BOF ó EAF, y un largo periodo de curado, dependiendo de la mineralógica de las escorias y de las características físicas-químicas de suelo.

Aunque de forma anecdótica, otra experiencia de uso de las escorias es su aplicación en escolleras como material fino de relleno acompañando a rocas de mayor tamaño. En este caso, la falta de uniformidad en las características del producto implica un control muy riguroso de su comportamiento dimensional, lo que hace que su empleo no haya sido generalizado en este tipo de obras [104].

También existen referencias respecto de la aplicación de escorias negras en actividades medioambientales. Como corrector de suelos se ha utilizado mezclada junto con residuos urbanos al objeto de obtener un sustrato más inocuo y estabilizado. La escoria contribuye a fijar los componentes orgánicos y a estabilizar éstos una vez sucedidos los fenómenos de reducción de la materia orgánica [73].

La necesidad de eliminar contaminantes de las aguas residuales vertidas a cursos fluviales o lagos, para amortiguar los fenómenos de eutrofización por exceso de nutrientes y conseguir así evitar el consumo de oxígeno por la excesiva proliferación de plantas, ha sido otra de las aplicaciones de las escorias negras. La escoria granulada fija el fósforo del agua depurada mediante tratamientos terciarios, una vez sometida a los procesos de digestión aerobia y decantación secundaria. El fósforo aportado por los detergentes y otros subproductos residuales de la industria se neutraliza mediante lechos bacterianos de escoria negra, en los que el agua es filtrada antes de su vertido una vez depurada [210].

En cualquier caso, las escorias negras BOF y EAF deben someterse a diversos tratamientos previos para asegurar su estabilidad propiciando, con anterioridad a su utilización, los fenómenos de expansividad mediante una exposición inducida a la intemperie que asegure posteriormente su comportamiento inerte [114].

Los primeros estudios sobre los fenómenos de hinchamiento e inestabilidad volumétrica de las escorias BOF fueron realizados en 1988 por Piret y otros autores en el trabajo de título “Recherche pour une meilleure valorisation du laitier de Haut Fourneau et de la escorie LD” [176]. Este trabajo es muy descriptivo y en él analizan la expansión de las escorias estableciendo en su estudio la necesidad de realizar ensayos acelerados de estabilidad dimensional para conocer los fenómenos de expansión de las escorias negras. Para su caracterización se utilizaron varias escorias negras BOF de diferentes acerías, de modo que el resultado final fuera una referencia válida del producto. Son varios los autores que estudian las características físico químicas de las escorias y su proceso de expansividad [102] [113] [123] [140] [144] [212].

Los resultados muestran un producto con concentraciones de cal total, sílice, óxido de hierro y de manganeso muy estable y propio del producto, junto con contenidos medios del 4% de alúmina y 2% de magnesia. De la cal total presente en la escoria, la cal libre meteorizable se presentaba en concentraciones variables que oscilaban entre el 0,5% y el 12%, por lo que se hacía necesario un estudio previo de expansión para determinar su alcance.

Fija también el envejecimiento a la intemperie como una variable a considerar en el comportamiento final del producto. El volteo de las escorias en los depósitos y acopios se determina como un remedio eficaz para su estabilización, ya que se propician los fenómenos de expansión mediante la hidratación de la cal y magnesia libres, antes de ser utilizadas en la fabricación de otros materiales. La simple disposición de las escorias en vertedero sin volteos añadidos sólo se estima útil en los primeros 20 cm. de profundidad, por lo que la práctica de moverlas periódicamente es muy adecuada para conseguir un producto homogéneo y adecuado para usos posteriores.

Actualmente los tratamientos más utilizados para conseguir escorias negras EAF y/o BOF estables con características y propiedades invariables en el tiempo y preparadas para su reutilización posterior son los siguientes:

1. Granulado de la escoria mediante machaqueo, trituración y molienda a tamaño adecuado en función de su uso.
2. Depósito posterior de la escoria granulada en campas y acopios para favorecer su exposición al agua de lluvia, nieve o a la propia humedad relativa ambiental para propiciar su meteorización.

Estos dos tratamientos, simples y fáciles de realizar con un coste muy bajo, garantizaban la estabilización de las escorias negras y aseguraban un uso posterior sin mayores problemas de expansión o hinchamiento.

Hay diversos estudios que tratan el empleo de las escorias negras directamente sin tratamientos añadidos al proceso descrito anteriormente. Cabe destacar los trabajos realizados en los últimos años en nuestro país referidos al empleo de las escorias negras de acería.

El primero de ellos es el estudio desarrollado por el Doctor D. Juan Manuel Manso Villalaín respecto del empleo de las escorias EAF en la fabricación de hormigones

hidráulicos. El título de su Tesis Doctoral es “Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco” [146].

En su análisis, el Profesor Manso establece que la expansividad de las escorias se debe sobre todo a la hidratación lenta de la periclasa, afectando en menor medida al hinchamiento la presencia de cal libre, que se meteoriza con el agua o la humedad ambiental. Los ensayos realizados mediante difracción de Rayos X muestran la presencia de periclasa cristalina, que sometida al ensayo de expansividad acelerada determina un incremento dimensional, lento pero progresivo, con la hidratación.

Analiza en su Tesis Doctoral tres factores que intervienen en el comportamiento posterior de las escorias y su influencia en la expansividad potencial [146]:

1. Aconseja la necesidad de mover periódicamente las escorias EAF, removiendo los acopios del material molturado para uniformizar el conjunto del vertido y conseguir caracteres isotrópicos en toda la masa.
2. Demuestra que los ciclos noche-día, en los que la humedad pasa de un ambiente más seco a otro más húmedo como consecuencia de las condiciones ambientales del entorno por diferencia de temperatura, influyen en el posterior comportamiento y estabilidad de las escoria.
3. También muestra la influencia del peso de las escorias sobre los estratos inferiores, de modo que la escoria de la parte baja se comporta de diferente manera que la escoria no sometida a las tensiones diferidas de los estratos superiores.

El Profesor Manso concluye que las escorias negras EAF sometidas al tratamiento anteriormente descrito, a los 90 días presentan expansividades potenciales inferiores al 0,5%, que resulta ser admisible para todas las aplicaciones posteriores planteables para dicho material, en especial para su uso en la fabricación de hormigones, tal como demuestra con sus trabajos.

Este trabajo supone una primera referencia para el desarrollo de esta Tesis Doctoral, por lo que su cita será constante en los diferentes capítulos de que consta.

Otro trabajo que podemos considerar como referencia es la Tesis Doctoral de la Dra. Luciana Amaral de Lima de título “Hormigones de escoria de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental” [67], que recoge un exhaustivo estudio del comportamiento de las escorias negras como árido en la fabricación de hormigones. Esta Tesis realiza un pormenorizado análisis de la interacción entre la escoria negra y el resto de componentes del hormigón. Como conclusiones más destacadas del trabajo realizado podemos señalar las siguientes:

1. Aporta criterios para la preparación de la escoria negra previos a su utilización para garantizar su estabilidad volumétrica.
2. Realiza un profundo análisis de la interacción de los componentes mineralógicos de los componentes de la escoria y de los del cemento.

3. Estudia dosificaciones que permiten alcanzar resistencias en el hormigón fabricados con escoria negra superiores a las de los hormigones tradicionales.
4. Analiza la durabilidad de los hormigones fabricados con escoria negra y estudia su comportamiento en situaciones límite de prestación.

Es un excelente trabajo que muestra con claridad la componente mineralógica de las escorias que forman parte de los conglomerados hidráulicos y su interacción con el resto de componentes del hormigón.

Más lejana en el tiempo encontramos la Tesis Doctoral de A. Sawaddee de título “A study of properties of Portland cement containing electric furnace slag microsilica and superplasticizer” [191]. Este trabajo combina el microsílíce o humo de sílice con aditivos plastificantes, encontrando soluciones a la demanda de agua de los componentes finos de las mezclas de hormigón.

También podemos citar un estudio de título “Enhancement of the cementitious propertier of steelmaking slag” en el que se muestran interesantes conclusiones respecto de la utilización de las escorias negras BOF en la preparación de cementos como componentes principal en forma de adición activa [164]. Aunque está contemplada la posibilidad de utilizar escorias de horno alto en la preparación de cementos Portland, las escorias cuentan con una regulación estricta en el ámbito de la Unión Europea y su interés se limita por esta circunstancia.

Podemos ver que las aplicaciones de la escoria negra procedente de HEA son numerosas, habiendo conseguido en muchos casos el objetivo de reciclaje y utilización. Es por esto, que la presente investigación no trata de introducir novedades en este sentido, pero sí en la forma de combinar esta escoria negra con otros materiales para conseguir las condiciones adecuadas de una zahorra artificial.

Aplicaciones de las escorias previa transformación.

Para garantizar la estabilidad de las escorias negras BOF y asegurar una aplicación de las mismas en la preparación de otros materiales, permitiendo su reciclado y reutilización una vez extraídas de los hornos y solidificadas a la intemperie, se hace necesario someterlas a tratamientos adicionales de transformación.

Podemos considerar las escorias como residuos, que lo son, pero su composición potencial es en principio un buen indicio para su reutilización y empleo en la obtención de otros materiales, al contener compuestos que presentan propiedades hidráulicas semejantes a la de los cementos, o tener las características de un material pétreo artificial, semejantes a las que presentan las rocas naturales.

Esta primera aproximación a la utilización de escorias por las cualidades de su composición nos obliga a considerar su tratamiento mediante procesos que amortigüen o anulen los problemas que difieren algunos componentes no deseados.

Todos los trabajos y estudios de procesado de las escorias con el objetivo de eliminar los compuestos inestables y obtener un material inocuo y aprovechable pasan por dos fases perfectamente diferenciables [147]:

1. Tratamientos que transformen la escoria en un material inerte que no produzca interacciones con otras sustancias, bien presentes en el medio en el que se acopia o deposita.
2. Tratamientos que permitan obtener materiales útiles y reutilizables de modo que el proceso de transformación de las materias primas en acero se cierre de modo sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Para el estudio de un tratamiento adecuado e idóneo en la consecución de ambos objetivos es necesario caracterizar convenientemente la materia prima de partida y establecer las premisas de composición e interacción, que en nuestro caso están perfectamente definidas ya que los procesos de transformación en los Hornos de Arco, en los Convertidores de Oxígeno, en los Hornos Eléctricos de Arco y en los Hornos Cuchara, son perfectamente conocidos.

Habida cuenta que los problemas que producen la cal y magnesia libre, tanto en las escorias negras como en las blancas y las dificultades de utilización por su inestabilidad volumétrica en presencia de agua, debemos diseñar un tratamiento idóneo que evite su presencia. Al mismo tiempo, la necesidad de transformar la escoria en un producto útil e inocuo a un coste razonable es un condicionante añadido a la hora de elegir el proceso final.

Partiendo de estas consideraciones se recogen algunas referencias que actualmente se están utilizando y que compatibilizan la solución técnica con la viabilidad económica de los tratamientos, anteriormente comentadas, y establecen el empleo de los productos resultantes en aplicaciones reales alternativas de reutilización en aras a conseguir el deseado desarrollo sostenible [74].

Las experiencias más interesantes proceden del Japón [125]. Este país cuenta con una industria importante que hace que represente la tercera economía a nivel mundial en producción y en capitalización de proyectos industriales. Al mismo tiempo, es un país localizado en un territorio muy limitado, constituido por un conjunto de islas con escasos recursos naturales en materias primas y energía.

Para conseguir una rentabilización de los procesos industriales, evitando la producción de residuos y su impacto en el medio ambiente a la vez que tratando de conseguir una rentabilidad del proceso en su conjunto, se han aplicado con éxito tratamientos en las escorias de acería, tanto negras como blancas, de modo que el producto resultante resulte atractivo para otras aplicaciones.

La comercial Daido Steel, una de las empresas más importantes en producción de acero, ha estudiado la reutilización de las escorias negras BOF y las blancas LF junto con los polvos de acería [125]. El proceso consiste en una sinterización de las escorias y los polvos de acería en un horno eléctrico a una temperatura superior a 1800°C. Las reacciones de combinación e interacción entre los componentes primarios permiten la obtención de un producto de carácter cerámico, inerte y con excelentes prestaciones

como árido en la construcción de plataformas de carreteras, ferrocarriles y en terraplenados de obra pública.

Como proceso innovador en el reciclado de escorias BOF y LF la citada Daido Steel ha diseñado con éxito un tratamiento selectivo de las escorias negras y blancas en un proceso de sinterización conjunto de ambos residuos, con un templado posterior e inmediato mediante enfriamiento rápido del producto, seguido de una molienda del vidriado obtenido.

El resultado es un producto granulado de estructura vítrea, debido al templado del líquido formado por las escorias negras y blancas fundidas, con una excelente estabilidad dimensional y resistencia mecánica y buenas cualidades como materia prima para su aplicación en la fabricación de otros materiales.

En Europa también se han desarrollado algunos proyectos para el tratamiento de las escorias BOF. La comercial Thyssen-Krupp utiliza esta escoria para su tratamiento y reutilización posterior en un proceso innovador [131]. La escoria se funde en un horno eléctrico y sobre el producto en estado líquido se insufla microsilíce y oxígeno obteniendo un producto muy estable y con buenas cualidades físicas y químicas, muy adecuado para su uso posterior.

La misma empresa desarrolla en la actualidad una tecnología similar para tratar con el mismo procedimiento la escoria negra EAF y la escoria blanca LF. Los resultados se aventuran prometedores, ya que por su naturaleza y composición ambas escorias resultan adecuadas para su tratamiento con sílice y oxígeno inyectado.

No existen referencias estadísticas generalizadas del uso de las escorias negras en el ámbito de la Unión Europea. Las más recientes señalan un uso cada vez mayor como material reciclado debido a las Directivas Europeas sobre desarrollo sostenible y respeto al medio ambiente.

En Alemania las escorias que generan los procesos de obtención del acero se reciclan en un 70 % en aplicaciones de construcción, sobre todo de obra civil, siendo el 30% restante depositado en vertederos [121]. Bélgica y Francia son las referencias en estudios de reutilización de escorias de acerías en caminos de rodadura de plataformas de caminos y carreteras [175, 176].

Aplicaciones de las escorias blancas LF.

Aunque el uso de la escoria blanca abre un amplio campo de expectativas de uso, sólo los estudios y trabajos conducentes a reutilización serán los que confirmen el alcance de su empleo en la fabricación de otros materiales.

No debemos olvidar que la composición de las escorias dependerá de la fábrica de procedencia, así como de las prácticas empleadas en ellas, por ello hemos de conocerlo para poderlo aplicar a cada uso concreto [91] [178] [186] [193] [200] [201].

Como referencias de aplicación de las escorias blancas de acería, los diferentes campos de estudio que hoy se plantean en el ámbito de la construcción, tanto de edificación como de obra civil, son los siguientes:

- Participación como componente fino en la preparación de líneas granulométricas para zahorras utilizadas en la fabricación de áridos para conglomerados, como hormigones, morteros, o agregados bituminosos y para el relleno de suelos y la preparación de plataformas de calzadas y carreteras.
- Participación en la elaboración de firmes de carreteras junto con otros áridos o mediante su mezcla con los componentes del terreno natural [124] [134] [149].
- Empleo como componente principal en forma de adición activa o inerte en la preparación de cementos Portland [64] [199] [207] [182] .
- Uso como materia prima aportadora de óxidos al horno tubular de fabricación de Clinker de cemento Portland, con especial atención al hecho ventajoso de que su uso no genera desprendimiento de gases con efecto invernadero a la atmósfera (dióxido de carbono).
- Disposición en lechos bacterianos para el filtrado de aguas residuales en tratamientos terciarios, sirviendo como soporte de las bacterias aerobias en reactores biológicos de baja y media carga [210]. También para el filtrado de las aguas en tratamientos terciarios previos a su vertido a cursos fluviales o a lagos.
- Uso en agricultura, para la corrección de la acidez del suelo o en ingeniería ambiental en la fijación de iones en la depuración de aguas [180].
- Elemento de aporte fino para lechos de asentado de balsas construidas mediante membrana o en la impermeabilización de obras hidráulicas y fluviales.
- Uso en construcción y edificación, como su empleo en la fabricación de hormigones y morteros de albañilería [149] [185] [96].

Una de las líneas de investigación de esta Tesis Doctoral es el estudio profundo de las escorias blancas para su empleo en la estabilización de suelos para la formación de explanadas de caminos rurales. Para ellos se estudia en detalle los trabajos de desarrollo propuestos por la Doctora Dña. Milagros Losáñez González en su Tesis Doctoral de título “Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil”. En dicha tesis la Doctora Losáñez continúa con los trabajos iniciados por el Profesor Manso Villalaín con las escorias negras y establece tres grandes líneas de investigación [142] :

1. Aplicación de las escorias blancas en morteros de albañilería, estudiando las propiedades de las mezclas mediante una referencia tipo, correspondiente al mortero normalizado para el estudio de los cementos.
2. Estudio para la aplicación de las escorias en la preparación de firmes en pavimentos de caminos rurales, especialmente en los suelos-cemento.
3. La utilización de las escorias en la fabricación de hormigones hidráulicos de carácter resistente.

Las conclusiones del trabajo permiten aventurar un aprovechamiento adecuado de las escorias blancas en la preparación de otros materiales que, a modo de resumen, referimos de forma sucinta en los siguientes apartados:

- Las escorias blancas pueden utilizarse en la fabricación de morteros de albañilería ya que pueden participar en la preparación de las mezclas, ya sea como sustituto del cemento o como material inerte en forma de árido, si bien es cierto la demanda de agua es alta ya que la componente fina de la escoria es importante.
- También puede emplearse en la elaboración de suelo-cemento artificial, mediante la mezcla de escoria negra y escoria blanca, participando ésta última de la componente fina del suelo. El cemento de unión es una mezcla de escoria blanca con cemento Portland con capacidad suficiente para proporcionar resistencias mecánicas al conjunto del suelo.
- Las escorias blancas se pueden utilizar en la fabricación de hormigones de resistencias medias y pueden participar junto con las escorias negras en la composición de los áridos utilizados en su preparación.
- Como conclusión común a los estudios realizados indica también un ahorro en la fabricación de las tres unidades referidas, morteros, suelo-cemento y hormigones. No obstante, aunque los trabajos no concretan ni cuantifican la ventaja económica de su utilización, sí se refieren sustituciones parciales de materiales como el cemento y el árido que justifican su interés y utilización.

Siguiendo la segunda línea de investigación de la Tesis anterior, en la presente Tesis se pretende demostrar la posibilidad de utilizar la escoria LFS en la estabilización de suelos, directamente mezclando ambos materiales. Por otro lado la escoria negra EAF se emplearía para formar la base y rodadura, en lugar de formar un suelo-cemento, puesto que las exigencias para caminos rurales son menores que en el caso de carreteras.

El Doctor Ángel Rodríguez Saiz en su Tesis Doctoral “Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno de cuchara y su utilización en construcción” [184], continua con los trabajos iniciados por la Doctora Losañez. Dicho trabajo trata de pormenorizar una de las aplicaciones de la escoria: la fabricación de morteros de albañilería. Las líneas que se proponen se pueden resumir en los siguientes apartados:

- Diseño de dosificaciones comerciales de morteros de albañilería fabricados con escoria blanca.
- Estudio comparativo de las propiedades de los morteros de albañilería fabricados con escoria blanca y de los morteros fabricados con materiales tradicionales. [185]
- Estudio económico de la utilización de la escoria blanca en la fabricación de morteros y ventajas competitivas.

El objetivo final es el diseño de dosificaciones comerciales de morteros de albañilería que sean competitivos desde un punto de vista técnico y de prestaciones, además de estudiar su viabilidad económica. Se trata de buscar una aplicación práctica de la escoria blanca de horno de cuchara como material sustitutivo del conglomerante y del árido, de forma que, manteniendo sus propiedades técnicas y de prestación, podamos encontrar un producto alternativo con una viabilidad económica razonable.

Las conclusiones obtenidas, a modo de resumen, en la Tesis del Dr. Ángel Rodríguez fueron las siguientes:

- La escoria blanca de horno cuchara generada en los procesos de afino de la metalurgia secundaria puede ser utilizada para la fabricación de morteros de albañilería de forma sistemática y eficiente.
- Para su utilización, la escoria blanca debe ser acondicionada mediante procesos de selección y estabilización.
- Los morteros fabricados con escoria blanca presentan buenas aptitudes tanto en estado fresco como en estado endurecido.
- Los morteros dosificados muestran un buen comportamiento a los ensayos de durabilidad, ya que los resultados obtenidos son correctos respecto de los de los morteros convencionales.
- Las dosificaciones diseñadas permiten sustituir parte del cemento y de la arena por escoria blanca sin detrimento de las propiedades del mortero obtenido.
- El precio de los morteros fabricados con escoria es inferior al de los morteros convencionales (interés económico).
- Existen barreras de entrada, como el transporte que pueden hacer no atractivo el producto (cercanía de los centros de producción). Necesidad de actuación de los poderes públicos para favorecer las políticas de reutilización de residuos.

De aquí se deduce que la escoria blanca puede sustituir exitosamente al cemento, como conglomerante hidráulico en la mezcla.

Otros estudios referidos a la utilidad de las escorias blancas para la fabricación de otros materiales conglomerados es el realizado por Caijun Shi de título “Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production” [200], en el se estudia la mejora de las propiedades cementicias de las escorias blancas mediante un método de potenciación de su hidraulicidad mediante un activador químico alcalino compuesto por silicato sódico. El producto obtenido presenta cualidades que lo hacen adecuado para formar parte como adición activa en la fabricación de cementos Portland y, por ende, en la preparación de conglomerados hidráulicos como morteros y hormigones. Caijun Shi cuenta con otros estudios de gran interés relacionados con las características y propiedades de este tipo de escoria [199] [201] [198] [202].

En la presente investigación se pretende estudiar si en la escoria blanca de acería eléctrica, mezclada siempre con suelo, se desarrollan reacciones de cementación de algunos de sus minerales e incluso reacciones de tipo puzolánico. En este sentido, para Shi Caijun [197] [199] [200] [201] ciertas escorias pueden denominarse como “cementos débiles”, debido a sus bajas propiedades cementantes.

De los minerales detectados por Shi [200] en la escoria blanca, sólo presentan propiedades débiles de cementación en condiciones normales de hidratación los siguientes minerales: silicato tricálcico (C_3S), β -silicato dicálcico ($\beta-C_2S$) y el silicato óxido de calcio, aluminio y magnesio ($54CaO, MgO, Al_2O_3, 16SiO_2$).

El bajo poder de cementación de la escoria blanca, que manifiesta Shi, no es un problema cuando la finalidad de la investigación es mezclarla con suelo y construir con el producto resultante explanadas para viales. Hay que señalar al respecto que el autor antes citado, está comparando las propiedades cementantes de la escoria blanca con las prestaciones de un cemento Portland, mientras que la “cementación débil” que él mismo autor señala como característica de esta escoria, es suficiente para mejorar las propiedades geotécnicas de un suelo marginal o inadecuado.

Otros autores, como Kanagawa y Kuwayama [124], encontraron que la presencia de mayenita ($12 CaO 7Al_2O_3$) en estas escorias, también le proporcionan propiedades cementantes. Los citados autores estudiaron las mezclas de esta escoria con suelos no aptos para su utilización en obras viales, llegando a la conclusión de que la mejora producida añadiendo un 20% de escoria blanca era comparable con el incremento de las propiedades resistentes conseguidas empleando como estabilizador un 5% de cemento, porcentaje habitualmente empleado en la estabilización de suelos.

Importante es también señalar aquellas situaciones en las que, aunque se generen minerales cementantes, haya también algunos minerales que actúen como inhibidores de esos procesos. Ése es el caso de la akermanita (AK), encontrada en algunas escorias de acería al oxígeno a la que se imputa, en ocasiones, la escasa evolución temporal de resistencias encontradas en estabilizaciones de suelos efectuadas con escoria de horno básico [177].

Ya en España, la problemática que genera la producción de escorias en el norte del país ha motivado que desde sus instituciones se motiven estudios que analicen el posible reciclado y reutilización de las escorias blancas de acería. La Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco ha editado el trabajo de título “Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Escorias de acería” [120] que muestra una especial preocupación de los Poderes Públicos por buscar respuestas a esta problemática y por garantizar el desarrollo sostenible de nuestras industrias.

También en el entorno del País Vasco encontramos otro trabajo de título “La escoria blanca de acería como material utilizable en la construcción” realizado por Purificación Landa Lazcano [134] en el que se buscan alternativas a la reutilización y reciclado de las escorias blancas en la preparación de otros materiales para su empleo en las obras de construcción.

Como se puede observar en los apartados anteriores, la preocupación por reutilizar las escorias de acería, LFS o EAFS, es tanto a nivel nacional como mundial; de ahí, los

numerosos trabajos de investigación realizados con este fin. La constante que se aprecia en todos los trabajos de reciclado y reutilización de las escorias de acería se refiere a proyectos y estudios orientados al sector de la construcción, tanto en obra civil o en edificación, o a industrias directamente implicadas con este sector como es el caso de la industria cementera. Es evidente que las características físicas y químicas de las escorias acomodan mejor las investigaciones en éste tipo de industrias, pero no debemos olvidar que la innovación debe llegar a todos los ámbitos y el de la construcción sólo es uno de ellos, por lo que se deberían potenciar estudios más diversificados y que abran expectativas de aplicación de estos residuos en otros campos industriales y tecnológicos.

En el caso de la escoria negra de HEA podemos decir que las investigaciones son muy amplias y han dado su fruto, en muchos casos se ha conseguido la reutilización y la problemática medio ambiental ha quedado reducida. En este sentido la presente Tesis Doctoral, en la segunda línea de investigación donde se trata del empleo de la escoria negra HEA no aporta grandes novedades a la investigación de este tipo de residuo, si no que lo que se pretende es encontrar la manera de poder incorporarla como base o subbase en caminos rurales, en sustitución a la zahorra; buscando el material adecuado para mezclarlo con las escorias EAF y que funcione correctamente.

Por otro lado sí que podemos encontrar soluciones nuevas e innovadores en el empleo de las escorias blancas LFS como material estabilizador de tierras. Como hemos visto en el apartado correspondiente, pocos son los trabajos que se han hecho en este sentido, pero con resultados esperanzadores.

El contenido de los siguientes capítulos se refiere al estudio profundo y sistemático del empleo de escorias blancas en la estabilización de suelos para la formación de explanadas y de escoria negra en la formación de firmes de caminos rurales, tomando como referencia la normativa vigente y de aplicación en el espacio de la Unión Europea. La utilización de estos subproductos permitirá la reducción de costes, así como ventajas desde el punto de vista ambiental; reduciendo la explotación de recursos naturales y eliminando acopios de escoria.

CAPÍTULO 3. LOS CAMINOS RURALES: ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA ACTUAL

3 LOS CAMINOS RURALES: ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA ACTUAL

3.1 LOS CAMINOS RURALES

Los caminos son una infraestructura fundamental en el desarrollo del medio rural, tanto por su función como sistema de comunicación de sus habitantes, como medio de producción en la actividad agraria y forestal, y más recientemente, como elemento imprescindible en la actividad recreativa y de turismo rural.

Por otra parte, son vías de escasa utilización, que soportan unas intensidades medias diarias de tráfico pequeñas, y por lo que son consideradas genéricamente como "vías de baja intensidad de tráfico".

Los caminos de bajo volumen de tránsito, se estructuran como caminos de bajo costo. Consecuentemente tienen planteamientos de diseño que evitan movimientos de tierras mayores; con estructuras y obras, por lo general diseñadas para periodos de corto y mediano plazo de vida útil; con capas de revestimiento granular afirmados y en general, con características que disturben lo menos posible la naturaleza del terreno.

Para clasificar los caminos rurales es posible seguir diversos criterios, todos ellos válidos, según la hipótesis de partida que se fijen.

Es frecuente establecer clasificaciones basadas en sus características más singulares, como la heterogeneidad de su tráfico. En efecto, su utilización es casi siempre marcadamente estacional, con una gran incidencia de los factores meteorológicos, y con grandes fluctuaciones en su intensidad media diaria (IMD); asimismo, la gran variedad de tipos de vehículos que circulan por ellos: camiones, tractores, maquinaria agrícola, automóviles, etc., les confieren un carácter especial que no se puede ignorar.

Por otro lado, la función principal que deben desempeñar también influye en su concepción y diseño. Todas estas consideraciones pueden constituir bases sólidas para establecer cualquier tipo de clasificación aceptable.

Alguna de las clasificaciones posibles se detalla a continuación [86]:

a) Por su función principal:

- Caminos de servicio a poblados
- Caminos de servicio a zonas de cultivo (agrícolas)
- Caminos de servicio a zonas de bosque (forestales)

a.1) Entre los caminos agrícolas, cabe distinguir:

- Caminos principales, o de primer orden, que constituyen los ejes del transporte, dentro de las zonas a las que sirven, y a los que inciden otros de categoría inferior. Parten de los núcleos urbanos, radialmente, o de otras vías de categoría superior. Con frecuencia enlazan entre sí a núcleos urbanos, o éstos con carreteras del sistema vial existente.
- Caminos secundarios, de servicio o de segundo orden, que inciden en los principales y completan la red viaria agrícola municipal o zonal.
- Caminos terminales, o de tercer orden, que dan acceso a una o varias parcelas de cultivo.

a.2) Por las características de aprovechamiento agrícola:

- Caminos de zonas regables, que sirven casi en exclusiva a grandes zonas de riego. Dentro de esta clase de caminos hay que destacar los llamados “de sector”, que son los que sirven a uno de los sectores de riego en los que está dividida la gran zona regable, y como tal serían principales dentro del propio sector, aunque pudieran ser considerados secundarios en cuanto integrados en la red general. Su tratamiento técnico será siempre el de caminos principales.
- Caminos de zonas de secano, que dan servicio casi en exclusiva a amplias zonas no transformadas en regadío.

b) Por el número de carriles de su calzada:

- De doble circulación, que tiene dos carriles para utilización simultánea de sentidos opuestos de tráfico.
- De un solo carril, que solamente permiten el cruce de vehículos en los sobrecanchos especiales establecidos al efecto en su trazado.

c) Por sus características constructivas:

c.1) Con superficie de rodadura No pavimentada

- Caminos de tierra, constituido por suelo natural y mejorado con grava seleccionada.
- Caminos constituidos por una capa de revestimiento con material natural pétreo sin procesar, seleccionado manualmente o por zarandeo, de tamaño máximo menor a 75 mm. Caminos enripiados: está formado por materiales granulares, piedra menuda, arena y pequeños porcentajes de arcilla o limo, siendo el tamaño máximo menor a 20mm.
- Caminos afirmados, constituidos por una capa de revestimiento con material de cantera, dosificadas naturalmente o por medios mecánicos, con una dosificación especificada, compuesta por una combinación apropiada de tres tamaños o tipos de material: piedra, arena y finos o arcilla, siendo el tamaños máximo menos de 50 mm.
- Afirmados con gravas naturales
- Afirmados con gravas homogeneizadas
- Caminos con superficie de rodadura estabilizada con materiales industriales:

- Afirmados con grava con superficie estabilizada con materiales como: asfalto (imprimación reforzada), cemento, cal, aditivos químicos y otros.
- Suelos naturales estabilizados con: material granular y finos ligantes, asfalto (imprimación reforzada), cemento, cal, aditivos químicos y otros.

c.2) Con superficie de rodadura pavimentada

- Pavimentos de adoquines de cemento.
- Pavimentos flexibles:
 - Con capas granulares (subbase y base drenantes) y una superficie bituminosa de espesor hasta 25mm (tratamiento superficial bicapa)
 - Con capas granulares (subbase y base drenantes) y una superficie bituminosa de espesor variable mayor a 25mm (tratamiento asfálticos)
- Pavimentos rígidos: conformados por losa de hormigón hidráulico de cemento Portland.

3.1.1 El tráfico

Una de las características de los caminos rurales es la heterogeneidad de su tráfico: resumiremos las importantes:

- Composición del tráfico: material agrícola remolcado o autopropulsado, de dimensiones transversales diferentes y frecuentemente mayores que las de los vehículos de turismo y transporte convencionales y de las tipificadas para carreteras; simultaneidad con vehículos de dimensiones normalizadas; ocasionalmente, circulación de ganado.
- Intensidad del tráfico: variable estacionalmente; de ligera a media; menor en puntos alejados de los núcleos de actividad y mucho mayor en la proximidad de ellos.
- Cargas. Como quiera que se utilizan indistintamente para el transporte remolques agrícolas (con una carga por eje del orden de tres toneladas) y camiones de mayor capacidad y tonelaje (con cargas por eje hasta unas ocho toneladas, rara vez mayores), la fijación de la carga tipo por eje dependerá de la clase de camino que se trate de construir.
- Velocidad media. Al igual que en el apartado anterior, depende del tipo de tracción empleado: los tractores y otros vehículos autopropulsados agrícolas limitan su velocidad a 20 km/hora, en tanto que los camiones pueden llegar a 70 km/hora, velocidad que se estima límite en los caminos agrícolas.
- Carriles en caminos de doble circulación: los que permiten el sentido centrípeto (de las zonas periféricas a los centros de actividad, como núcleos urbanos) presentan habitualmente mayor desgaste que los de sentidos contrario (centrífugo), por los que circulan vehículos en vacío y ligeramente cargados (inputs).

3.1.2 Intensidad media diaria (IMD)

La intensidad más frecuente en la vialidad rural, se sitúa entre ligera y media. No obstante, cuando se trata de proyectar un camino o una red zonal o municipal, es menester precisar la intensidad media diaria de la circulación de los vehículos para poder dimensionar los elementos constitutivos de la vía correspondiente. Se utilizan para ello tres métodos de cálculo:

- Analógico
- Analítico
- Empírico

El método analógico consiste en emplear la información procedente del tráfico que se produce en caminos cuyas condiciones de uso, situación, topografía, etc., sean semejantes a las del que se pretende proyectar. Se comprende que este método será aplicable en un número reducido de casos en zonas de ordenación de explotaciones o concentración parcelaria, pero en cambio es más útil en sectores de riegos en grandes zonas regables. En cualquier caso, no es fácil obtener este tipo de información.

El método analítico consiste en hacer un inventario valorado de todos los factores que determinan el tráfico a lo largo del primer año de utilización del camino en proyecto: área afectada, parcelación existente, aprovechamientos del suelo, intensidad del cultivo, inputs totales utilizados y producciones brutas anuales, mecanización del área afectada, tráfico inducido por absorción de vehículos procedentes de caminos que incidirán en el que se estudia, etc.

El método empírico. Cuando se trata de una red de caminos en una zona en la que se va a modificar sustancialmente la existente por una reordenación de la propiedad, el método analítico resulta tedioso y poco preciso en sus resultados. El profesor Rafael Heras propone en su “Manual de Ingeniería de regadíos” [117] la siguiente fórmula empírica aplicable a cada camino en particular:

$$IMD = \frac{Q \times S \times E^{\frac{1}{2}}}{500} \times K$$

En la que,

Q = Producción anual bruta en la zona (toneladas/ha)

S = Superficie total servida (ha)

E = número de explotaciones diferentes servidas

K = Coeficiente, con los siguientes valores

K = 1,0 camino de cola o terminal cuyo final no enlaza con otro camino.

K = 1,3 caminos que enlazan otros dos entre sí.

K = 1,5 caminos que enlazan con un núcleo de población.

Una vez determinada la Intensidad Media Diaria, puede clasificarse el tráfico de la siguiente manera, atendiendo al número de vehículos industriales de tara superior a 1,5 toneladas.

Clase	IMD: Número de vehículos industriales de tara superior a 1,5 toneladas
A	0-15
B	15-45
C	45-150
D	150-450

Tabla 12. Clasificación de tráfico en caminos rurales

Esta clasificación incluye los tipos de tráfico más comunes en los caminos rurales, y se utiliza muy frecuentemente para calcular el espesor de los firmes, de acuerdo con las características geotécnicas de la explanación.

Norma 6.1. I.C., Secciones de Firme

En la vigente norma 6.1.I.C. sobre secciones de firme [25], aprobada por Orden FOM/4360/2003, de 28 de Noviembre, se utiliza el concepto de intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp), con cuyo criterio clasifica el tráfico de las carreteras en las siguientes categorías:

Categoría de Tráfico pesado	IMDp (vehículos pesados/día)
T00	≥ 4000
T0	< 4000 ≥ 2000
T1	< 2000 ≥ 800
T2	< 800 ≥ 200
T31	< 200 ≥ 100
T32	< 100 ≥ 50
T41	< 50 ≥ 25
T42	< 25

Tabla 13. Clasificación de tráfico según norma 6.1.I.C., secciones de firme [22]

Como vehículo pesado se incluyen los camiones de carga útil superior a 3 toneladas de más de cuatro ruedas y sin remolque, los camiones con uno o varios remolques; los vehículos articulados y los vehículos especiales; y los vehículos dedicados al transporte de personas con más de nueve plazas.

Puede ocurrir que en algún camino rural circulen diariamente uno o dos vehículos pesados, de los de menor categoría entre los así definidos, como es el caso de la salida de producciones de explotaciones ganaderas; esto nos llevaría a tener que considerar ese camino privado como una carretera, cosa a todas luces desproporcionada a la vista de los tipos de secciones que la norma establece para categorías T41 y T42.

Pudiera ser de utilidad esta norma en circunstancias concretas, como en los accesos a centros de intensa actividad agroindustrial (fábricas de azúcar, silos comarcales de cereales, bodegas, fábricas de conservas, etc.), en los que sea de preveer un tráfico

estacional más intenso, o también en algún camino principal de una determinada zona regable.

Carga por eje. Método de LIDDLE-AASHO.

Este método utiliza para el cálculo la estimación probable de carga por eje y el número de ejes equivalentes de 18000 libras (8200 kg) que fueran a transitar por el carril, estableciendo la relación “n” entre la carga por eje P(t) real y la teórica de 8200 kg de acuerdo con la expresión:

$n = \left(\frac{P_t}{P}\right)^4$, que para cargas por eje hasta 8200 kg, da el siguiente resultado:

Carga por eje Pt (kg)	Número de ejes equivalentes estándar de 8200 kg
910	0,0002
1810	0,0025
2710	0,01
3630	0,04
4540	0,08
5440	0,2
6340	0,3
7260	0,6
8160	1,0

Las cargas por eje más frecuentes en caminos rurales, son de 3 y 8 toneladas.

Datos imprescindibles para fijar el número de ejes equivalentes son:

- Periodo de proyecto del camino (vida probable), generalmente entre 10 y 15 años.
- Tasa de crecimiento anual acumulado del tráfico, que suele establecerse entre el 1 y el 3%, según las expectativas de los incrementos de la producción y la actividad, en general.
- Superficie servida por el camino.
- Producciones de la zona servida e inputs precisos para obtenerlas, así como circulación estimada de otros vehículos agrícolas.
- El número de vehículos acumulados (T) en el periodo de proyecto “n” es la suma de los “n” términos de una progresión geométrica de razón $r=(1+c)$, siendo c el crecimiento anual en tanto por uno, por lo que:

$$T = (A_n \times r - A_1) / (r - 1)$$

Siendo,

A_1 = vehículos totales durante el primer año

A_n = vehículos totales en el año n = $A_1 \times (1+c)^n$

n = periodo de años de proyecto

T = vehículos totales acumulados durante n años

c = tasa de crecimiento anual en tanto por uno.

Velocidad base de proyecto

La velocidad base de proyecto es un valor convencional que se fija con el fin de determinar y coordinar entre sí los elementos geométricos del camino que influyen en el movimiento de los vehículos. Además, es la velocidad máxima que puede ser mantenida por un vehículo aislado de forma continuada, en condiciones de seguridad, en cada tramo del camino, cuando las circunstancias meteorológicas y de tráfico son tan favorables que las únicas limitaciones vienen impuestas por las características geométricas del mismo.

La velocidad base de proyecto es función de la morfología de la zona a la que sirve el camino y del tráfico previsto y está ligada al tipo de firme que se haya de adoptar; influye en el diseño de la traza (curvas horizontales) y de las secciones transversales (peraltes y sobreechamientos).

Se comprende fácilmente que las condiciones topográficas serán determinantes en la elección de la velocidad base. En efecto, una topografía muy suave permitirá velocidades más elevadas, con movimientos de tierra reducidos y curvas amplias; en tanto que una topografía menos favorable exigirá limitar la velocidad, e impondrá radios más reducidos en las curvas.

Por otro lado, si la Intensidad Media Diaria (IMD) es elevada, con objeto de reducir el tiempo de transporte, se procurará elegir, siempre que las condiciones geográficas lo permitan, una velocidad base más alta.

La antigua instrucción de carreteras fijaba el tráfico ligero para $IMD < 500$, lo que es habitual en los caminos rurales, con las siguientes velocidades base de proyecto:

Tipo de terreno	Velocidad (km/h)
Llano	70
Ondulado	60
Accidentado	50
Muy accidentado	30

Tabla 14. Velocidad base de proyecto según instrucción de carreteras

La AASHO (American Association of State Highway Officials) para calcular las características geométricas de las carreteras clasificadas como “secundarias”, con $IMD < 1000$, establece normas más concretas y fija velocidades mínimas y máximas, cuyos valores se recogen en la siguiente tabla:

Terreno	Velocidad (km/h)	IMD		
		<100	100-400	400-1000
Llano	máxima	-	80	90
	mínima	60	70	75
Ondulado	máxima	-	70	75
	mínima	45	55	60
Montañoso	máxima	-	55	60
	mínima	30	40	45

Tabla 15. Velocidad base de proyecto según AASHO

Para E. del Barrio [88], en caminos de zonas regables, son recomendables las velocidades base que ser recogen en la siguiente tabla:

IMD	Velocidad base km/h	
	mínima (1)	deseable (2)
<50	30	50
50-150	40	60
150-450	50	70
>450	60	80

(1) condiciones topográficas desfavorables

(2) condiciones topográficas favorables

Tabla 16. Velocidad base de proyecto según E. del Barrio

Como resumen de lo expuesto, puede decirse que el autor del proyecto deberá elegir la velocidad base de proyecto teniendo en cuenta la morfología del terreno y la IMD; para caminos rurales los valores estarán comprendidos habitualmente entre 30 y 50 km/h.

3.1.3 Elementos de la geometría del camino

Se incluyen como elementos fundamentales de la geometría del camino los siguientes:

- Sección transversal
- Firme y arcenes. Dimensiones
- Caminos de dos carriles
- Caminos de un solo carril
- Pendiente transversal
- Cunetas
- Curvas horizontales
- Radios
- Peraltes
- Sobreanchos
- Pendientes máximas
- Cambios de rasante
- Entronques
- Traza. Perfiles.

Teniendo en cuenta el objetivo de la Tesis Doctoral, pasaremos a definir únicamente la sección transversal de un camino rural.

En la figura siguiente, la calzada o zona del camino destinada a la circulación, arcenes o guarda firmes, que en conjunto forman la plataforma; el bombeo o pendiente transversal de la plataforma desde el centro hacia sus bordes; cunetas, con sus correspondientes taludes, interior y exterior. La calzada puede tener uno o dos carriles. El firme es el conjunto de capas colocadas sobre la explanada o explanación para permitir la circulación en condiciones de comodidad y seguridad. Las capas que pueden constituir el firme son: la capa de rodadura (revestimiento asfáltico), la base y la subbase, pudiendo apoyarse ésta en la explanación mejorada o en una capa anticontaminante. No siempre el firme está formado por las tres capas descritas, ya que

como se verá más adelante, su definición y espesores dependerá del tipo de camino (tráfico) y de las características geotécnicas de la explanada.

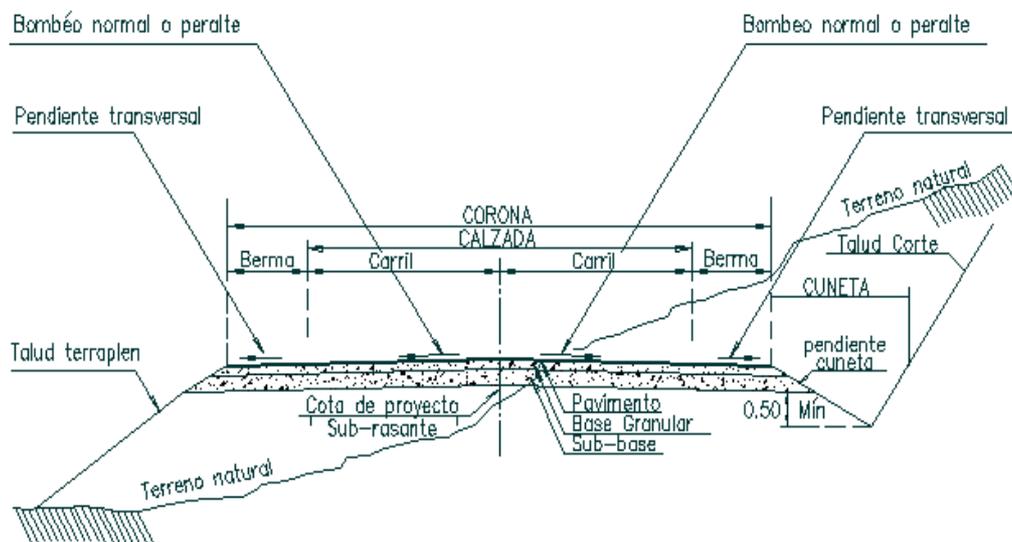


Figura 7. Sección transversal de un camino

3.1.4 La explanada

La explanada es la parte de la obra de un camino, definida geométricamente por el perfil longitudinal y los perfiles transversales, sobre cuya superficie se asienta el firme. Está formada por los desmontes y terraplenes necesarios para alcanzar las rasantes y demás cotas que figuran en los planos. Sus características geotécnicas y constructivas deben garantizar su estabilidad, de modo que las eventuales deformaciones no impidan el normal uso del camino.

Dos de las funciones principales de la explanación:

- Soportar las acciones que le son transmitidas por el firme.
- Defender el firme de la influencia no deseada de la humedad.

Se denomina capacidad de soporte de una explanada a su resistencia a la deformación bajo las cargas que le impone el tráfico y depende de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo que la constituye. Esto significa que no será sólo función del tipo de suelo utilizado sino de su densidad y humedad. Normalmente el camino rural se proyecta y construye de forma que el firme sea relativamente impermeable o bien que el agua que pueda penetrar tenga salida a través de una capa permeable del propio firme, mientras que en otros casos habrá que asegurar que la explanada sea poco sensible al agua con los tratamientos físicos y/o químicos necesarios. Asimismo, es necesario evitar los aportes de agua subterránea a través de una capa freática elevada, por ascensión capilar, filtraciones, etc. En cualquier caso cabe esperar que la humedad del suelo de la

explanada no se mantenga constante en el tiempo y que fluctúe correlativamente con la pluviometría [112].

En resumen, la capacidad de soporte de un tramo de la explanada será variable en el espacio y en el tiempo debido a la variabilidad de los suelos, de su grado de compactación y de contenido en agua.

Por otra parte las cargas del tráfico actúan sobre la explanada a través del firme que es el encargado de la distribución tensional y de la acomodación a la capacidad soporte supuestas.

Así, para un tráfico dado, a una menor capacidad de soporte de la explanada corresponderá un firme más resistente capaz de reducir las tensiones producidas y transmitidas a la explanada a un nivel que sea soportable para ésta de forma que no sufra deformaciones permanentes incompatibles con el uso del camino rural, pretendiendo siempre que la explanada trabaje dentro de sus límites elásticos, es decir, que las deformaciones producidas por los esfuerzos se recuperen después de que estos cesen.

La clasificación de un suelo determinado nos permitirá hacernos una primera idea de la capacidad de soporte de la explanada, mientras que una evaluación cuantitativa requiere la realización de ensayos. En casos muy especiales, donde el coste lo permita y sea justificable, se empleará el ensayo de compresión triaxial y otros que estimen la resistencia al esfuerzo cortante y, por tanto, determinen el valor de soporte del mismo con toda exactitud.

En caminos rurales, para la caracterización mecánica de los suelos y explanadas se utiliza el ensayo para determinar el índice CBR y los ensayos de carga con placa, al ser más económicos y con mayor facilidad de su ejecución.

E=Módulo de compresibilidad (kp/cm ²)	Calidad de la explanada
150-250	Mediocre: aceptable con reparos
250-350	Aceptable
350-550	Buena
>550	Extraordinaria

Tabla 17. Módulo de compresibilidad y calidad de la explanada

Los ensayo de carga con placa consisten en aplicar un esfuerzo sobre el terreno a través de una placa circular, de tal manera que cuanto mayor sea la relación entre la presión aplicadas y la deformación producida (módulo de reacción), mayor será la capacidad de soporte. El valor que se suele utilizar como medida de la capacidad de soporte es el módulo de compresibilidad (E) obtenido como el producto entre el módulo de reacción y el diámetro de la placa. En la Tabla 17 se indican los módulos de compresibilidad y su relación con respecto a la calidad de la explanada.

Según Del Val Melus, M.A. y otros [87], existe una relación empírica entre el módulo de compresibilidad y el índice CBR que es la dada en la siguiente ecuación, donde ν es el coeficiente de Poisson del suelo. Esta equivalencia queda indicada en la Tabla 18.

$$E*(1-v^2)=65*CBR^{0,65}$$

El diseño de caminos rurales debe basarse siempre en el máximo aprovechamiento de los materiales de la zona, sin que esté reñido con el hecho de que la calidad de la explanada sea la máxima posible, acudiendo a la estabilización del plano de fundación en los casos que fuese necesario.

Cuando la explanada haya de construirse con suelo poco estable y de baja calidad resistente, por carecer de materiales más adecuados, el estrato superior se tratará, en un espesor comprendido entre 10 y 20 cm, según la técnica que es emplee, mediante una estabilización mecánica o química que, en cualquier caso, deberá conseguir que el CBR alcance un valor siempre superior a 8 en el estrato tratado. En caminos de escaso tráfico se puede evitar de esta forma la construcción de alguna de las capas del firme [86].

Para construir una explanación mejorada con estabilización química se utiliza, en caminos rurales, casi con exclusividad la cal, aunque limitando su empleo a los suelos arcillosos de alta plasticidad. El estrato tratado tendrá un espesor de 20 cm, aunque excepcionalmente podrá reducirse a 15 cm para caminos de bajo tráfico.

La dosificación de cal no superará el 15%, pero siempre se fijará de manera que se tenga, para el estrato tratado [86]:

$$IP < 10$$

$$CBR \geq 8$$

La explanación mejorada con cemento sólo se empleará en vías rurales para los suelos A-3, con espesores de 10 cm.

En nuestro caso tratamos de conseguir una explanada mejorada químicamente con la escoria de acería LFS a partir de suelos con elevada plasticidad. Presentimos que LFS tiene propiedades hidráulicas semejantes a las de la cal. Por ello los parámetros a alcanzar serán como mínimo los requeridos para una explanada tratada con otro material tradicional.

Norma 6.1. I.C. Secciones de firme, de la Instrucción de Carreteras (BOE de 12 de Diciembre de 2003). [25]

El caso que nos ocupa es para una intensidad media de vehículos menor a cualquiera de las que esta norma tiene en cuenta, ya que el peso de vehículos será menor en un camino rural, pero sí nos puede servir de referencia a la hora de los usos que podemos dar a los suelos estabilizados en la formación de explanadas, y características de los materiales empleados en los firmes.

A los efectos de definir la estructura del firme en cada caso, se establecen tres categorías de explanada, denominadas respectivamente E1, E2 y E3. Estas categorías se determinan según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}), obtenido de acuerdo con la NLT-357 “ensayo de carga con placa” cuyos valores se recogen en la siguiente tabla. Una explanada con un CBR entre 3 y 5 se considera mediocre.

Categoría de Explanada	E1	E2	E3
E_{v2} (Mpa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300
CBR	$5 \leq \text{CBR} \leq 10$	$10 \leq \text{CBR} \leq 20$	$\text{CBR} \geq 20$
Calidad	Aceptable	Buena	Extraordinaria

Tabla 18. Categoría de Explanadas según módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga. Equivalencia en CBR según Del Val Melus [87]

En la Norma 6.1. IC secciones de firme, de la Instrucción de Carreteras [25] se define la manera de construir las diferentes categorías de explanada en función de la calidad de suelo de la explanación (desmote) o de la obra de tierra subyacente (terraplenes, pedraplenes o rellenos todo-uno) y de las características y espesores de los materiales disponibles.

Para la correcta aplicación de la norma se deberán tener en cuenta los siguientes criterios:

- a) Todos los espesores que se indican son los mínimos especificados para cualquier punto de la sección transversal de la explanada.
- b) Los materiales empleados han de cumplir las prescripciones contenidas en los correspondientes artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3), además de las complementarias recogidas en la Tabla 19. Materiales para la formación de explanadas

A la vista de todo lo anteriormente expuesto, el caso que nos ocupa sería la estabilización con cal y/o escoria blanca de suelos marginales o inadecuados, en algunos casos tolerables, todos ellos con elevada plasticidad. Como mínimas condiciones la explanada ha de tener un CBR de 8, un espesor de 20 cm y los requisitos de un suelo estabilizado S-EST1 o S-EST2, que más adelante veremos.

- c) Se consideran los siguientes tipos: inadecuados y marginales (IN), tolerables (0), adecuados (1), seleccionados (2), seleccionados con $\text{CBR} \geq 20$ en las condiciones de puesta en obra (3) y roca (R). A los efectos de aplicación de esta norma, los pedraplenes (artículo 331 del PG-3) y los rellenos todo-uno (artículo 333 del PG-3), salvo que se proyecten con materiales marginales de los definidos en el artículo 330 del PG-3, serán asimilables a los suelos tipo 3.

- d) Para poder asignar a los suelos de la explanación o de la obra de tierra subyacente una determinada clasificación deberán tener un espesor mínimo de un metro (1 m) del material indicado en la figura 1. En caso contrario, se asignará la clasificación inmediatamente inferior.

- e) Salvo justificación en contrario, será preceptivo proyectar una capa de separación (estabilización in situ con cal en 15 cm de espesor, geotextil, membrana plástica, etc.) entre los suelos inadecuados o marginales con finos plásticos y las capas de suelo adecuado o seleccionado, para la formación de explanadas del tipo E2 y E3 en las categorías de tráfico pesado T00 a T2.

- f) Los espesores prescritos en la norma no podrán ser reducidos aunque se recurra al empleo de materiales de calidad superior a la especificada en cada una de las secciones.

Con carácter general, para la capa superior utilizada en la formación de las explanadas, por razones de durabilidad y uniformidad de la capacidad estructural en toda la traza, se recomienda al ingeniero proyectista la consideración preferente de los suelos estabilizados *in situ*, con cal o con cemento, frente a una aportación directa de suelos sin tratar.

Como hemos indicado, esta norma es demasiado exigente para el caso que nos ocupa de caminos rurales, pero si podemos tenerla en cuenta en el caso de caminos muy transitados. En nuestro caso los suelos que vamos a tratar son generalmente suelos marginales, en algunos casos tolerables, por lo que si nos basáramos en esta norma, habría de colocar mínimo 25-30 cm de suelo estabilizado S-EST1 para alcanzar las características de una explanada E1. Vemos que son datos superiores a los que anteriormente dábamos (15-20 cm).

Materiales para la formación de la Explanada

En la Tabla 19 se relacionan los materiales utilizables en la formación de la explanada, para los que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares deberá incluir las prescripciones complementarias que se indican. Las explanadas construidas con materiales diferentes de los considerados (residuos, subproductos, etc.) serán clasificadas, cuando sea posible, por analogía y, en otro caso, mediante un estudio específico.

Símbolo	Definición del Material	Artículo del PG-3	Prescripciones complementarias
IN	Suelo Inadecuado o Marginal	330	Su empleo sólo será posible si se estabiliza con cal o con cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2
0	Suelo Tolerable	330	CBR \geq 3 (*) Contenido en materia orgánica <1% Contenido en sulfatos solubles (SO ₃) <1% Hinchamiento libre <1%
1	Suelo Adecuado	330	CBR \geq 5 (*) (**)
2	Suelo Seleccionado	330	CBR \geq 10 (*) (**)
3	Suelo Seleccionado	330	CBR \geq 20 (*) (**)
S-EST1 S-EST2 S-EST3	Suelo estabilizado <i>in situ</i> con cemento o con cal	512	Espesor mínimo 25 cm Espesor máximo 30 cm

(*) El CBR se determinará de acuerdo con las condiciones especificadas de puesta en obra, y su valor se empleará exclusivamente para la aceptación o rechazo de los materiales utilizables en las diferentes capas.

(**) En la capa superior de las empleadas para la formación de la explanada, el suelo adecuado definido como tipo 1 deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, un CBR \geq 6 y el suelo seleccionado definido como tipo 2 un CBR \geq 12. Asimismo, se exigirán esos valores mínimos de CBR cuando, respectivamente, se forme una explanada de categoría E1 sobre suelos tipo 1, o una explanada de categoría E2 sobre suelos tipo 2.

Tabla 19. Materiales para la formación de explanadas

A la vista de todo lo anteriormente expuesto, el caso que nos ocupa sería la estabilización con cal y/o escoria blanca de suelos marginales o inadecuados, en algunos casos tolerables, todos ellos con elevada plasticidad. Como mínimas condiciones la

explanada ha de tener un CBR de 8, un espesor de 20 cm y los requisitos de un suelo estabilizado S-EST1 o S-EST2, que más adelante veremos.

3.1.5 El firme

El firme es la estructura superior del camino situada sobre la explanación y que recibe directamente los efectos del tráfico. Tiene como función esencial repartir las cargas transmitidas por las ruedas para que no se rebase la capacidad portante o de carga de la explanación.

Otras funciones del firme son: proteger de la humedad el cuerpo del camino y facilitar la circulación de los vehículos, haciéndola lo más cómoda y segura posible, dentro del marco económico que corresponda según la categoría del camino.

Los firmes pueden ser rígidos y flexibles. Los firmes rígidos en los caminos rurales, de escasa utilidad en este tipo de vías son los que tiene alguna cama (en general de base-rodadura), dotada de gran rigidez por estar construida de hormigón en masa o armado muy ligeramente.

Las losas suelen tener entre 5 y 6 metros de largo y 3 metros de ancho. Cada cinco o seis losas se permite una junta de dilatación. Se construyen sobre una capa de zahorra natural o artificial, no plástica, de espesor variable, nunca menor de 20 cm, y muy bien compactada (subbase), que hace de amortiguador de los posibles movimientos de la explanación y así evita que la estructura rígida (la base) se sustente directamente sobre otra más deformable, aunque sea poco (la explanación).

Los caminos con firmes rígidos, como los descritos, tienen un solo carril debido al elevado coste por metro cuadrado, y se construyen solamente en zonas con una productividad elevada que justifique la gran inversión por hectárea.

Los firmes flexibles son aquellos cuya resistencia a la flexión es reducida, siendo los más adecuados para la construcción de caminos rurales, pues en ellos pueden emplearse al máximo los materiales naturales locales, seleccionados o tratados, con lo que el coste de la obra es mucho más económico y su conservación más fácil.

El firme flexible no es un todo homogéneo ni tampoco isorresistente. La elasticidad es variable no sólo en las distintas capas que lo componen, sino en cada una de ellas, según su estado de humedad. Por otro lado como descansa en la explanación, de naturaleza diferente y sujeta a mayores alternativas de humedad y más sensible a ellas que el propio firme, éste se ha de calcular no ya en función exclusiva de sus propios elementos constitutivos, sino en los que se soporta; de nada serviría un excelente firme sobre una explanación defectuosa.

Esta investigación tiene como objetivo emplear la escoria negra EAF como material de un firme flexible sobre una explanada mejorada químicamente, es por esto que vamos a profundizar en los requisitos necesarios para un firme flexible de un camino rural.

Las diferentes capas que constituyen el firme flexible tipo se describen a continuación, si bien hay que hacer notar que, en los caminos rurales y debido a las características de

su tráfico, en gran número de ocasiones desaparece alguna de sus capas, abaratando su construcción, pero sin desmerecer la calidad precisa.

a) Subbase: es el estrato inferior del firme, que descansa directamente sobre la explanación o, en su caso, sobre la explanación mejorada. Nunca está en contacto con los vehículos que circulan por el camino. Tiene como funciones específicas, las siguientes:

Sirve de capa aislante entre la explanación y la capa superior, evitando la posible contaminación de ésta y disminuyendo la ascensión capilar del agua procedente de la explanación.

Reduce, por su espesor, las tensiones transmitidas por la base, con objeto de que las que lleguen a la explanación puedan ser fácilmente resistidas por ésta.

Abarata el coste del firme, ya que los materiales en ella empleados, aun exigiendo determinadas condiciones, son de menos calidad que los de la capa superior o base, y por ellos más económicos.

Esta subbase en algunos casos puede desaparecer, ante explanadas de buena calidad.

b) Base: es la capa fundamental del firme, sobre la que circulan los vehículos cuando no existe capa de rodadura, convirtiéndose en estas circunstancias en capa de base-rodadura, lo que le lleva a tener que soportar también los efectos de los agente meteorológicos. Los materiales a emplear en este estrato son de mejor calidad que los de la subbase.

c) Capa de Rodadura: cuando existe, está sobre la capa de base, soporta directamente las acciones del tráfico, y su función específica es la de facilitar la circulación. En general, es de material bituminoso y gravilla seleccionada. Su construcción sólo es aconsejable en caminos rurales de tráfico alto. Su espesor esta comprendido generalmente entre los 3 y 6 cm.

La presente investigación estudia un firme formado por la capa base compuesta por escoria negra EAF. Se plantean dos posibilidades, por un lado, el no poner capa de rodadura, para lo que tendremos que buscar un material para mezclar (detritus calizo) con la escoria EAF que aporte la componente fina de la granulometría y la cohesión suficiente entre partículas y por otro lado, colocar un riego bituminoso con gravilla a modo de capa de rodadura sobre la escoria negra con características semejantes a una zahorra artificial.

Dimensionado del espesor de los firmes flexibles

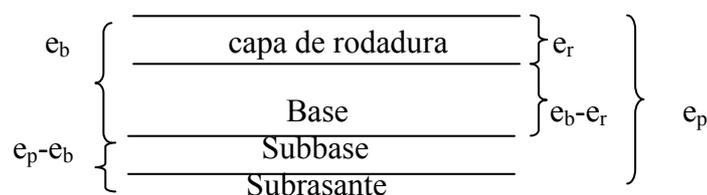
El dimensionado del espesor del firme es función del tráfico que debe soportar el camino, de las condiciones geotécnicas de la explanada y de la naturaleza de los materiales que han de componer las distintas capas.

Mas adelante se hace referencia a la Norma 6.1.I.C. [25] y se incluyen algunos tipos de secciones que figuran en la misma para la construcción de firmes de carreteras. Esta norma no es de aplicación a caminos rurales, ya que solo en algunos caminos de

actividad muy importante (azucareras, fábricas de conservas, silos de almacenamiento, etc.) podría alcanzarse la categoría T4. Se muestra por si pudiera ser de utilidad al proyectista.

Todos los métodos que se emplean hoy en el cálculo de los espesores del firme de caminos rurales, se basan en la aplicación del CBR de la explanada que lo soporta “Método del índice de CBR”.

El método empírico del CBR proporciona el espesor de cada capa del firme, en función del tráfico que ha de soportar el camino y de la resistencia a la penetración del estrato subyacente. Este procedimiento de dimensionado está basado en un sinnúmero de trabajos de laboratorio y de obra, razón por la cual ha alcanzado su actual difusión. Se trata de método diferencial, es decir para establecer el espesor total del firme e_p ; se tienen en cuenta los valores del CBR de la explanación pero si consideramos la capa de subbase, obtendremos para la capa de base y de rodadura un espesor e_b , con lo que el espesor de la capa de subbase será la diferencia, $e_s=e_p-e_b$.



Para el dimensionado de los firmes en caminos rurales, se han obtenido excelentes resultados con la aplicación del ábaco de la Figura 8, reproducción parcial del ábaco general de Road Research Laboratory de Gran Bretaña, limitado a intensidades medias diarias de 450 vehículos/día de más de 1,5 tn de tara. Entrando con el CBR de la explanada que proceda (abscisas superiores), en su intersección con la curva representativa del tráfico previsto al final de la vida del proyecto, se obtiene en ordenadas el espesor total del firme.

El espesor así calculado se refiere a la utilización de un suelo tipo, lo que significa que con cualquier otro suelo que se emplee en la formación del firme que no sea el suelo tipo, se podrá obtener un espesor diferente, en función de su “coeficiente de calidad”. Éste coeficiente de calidad, expresa la calidad de las distintas capas de un firme mediante un coeficiente, obtenido experimentalmente, que relaciona la respuesta de esas capas a la transmisión en profundidad de las tensiones originadas por el tráfico y la duración probable del firme bajo la acción de un régimen de cargas. Se puede aceptar que el coeficiente de calidad C_i de un material no viscoelástico, siendo E_i su módulo de deformación, viene expresado por la fórmula:

$$C_i=(E_i/5000)^{1/3}$$

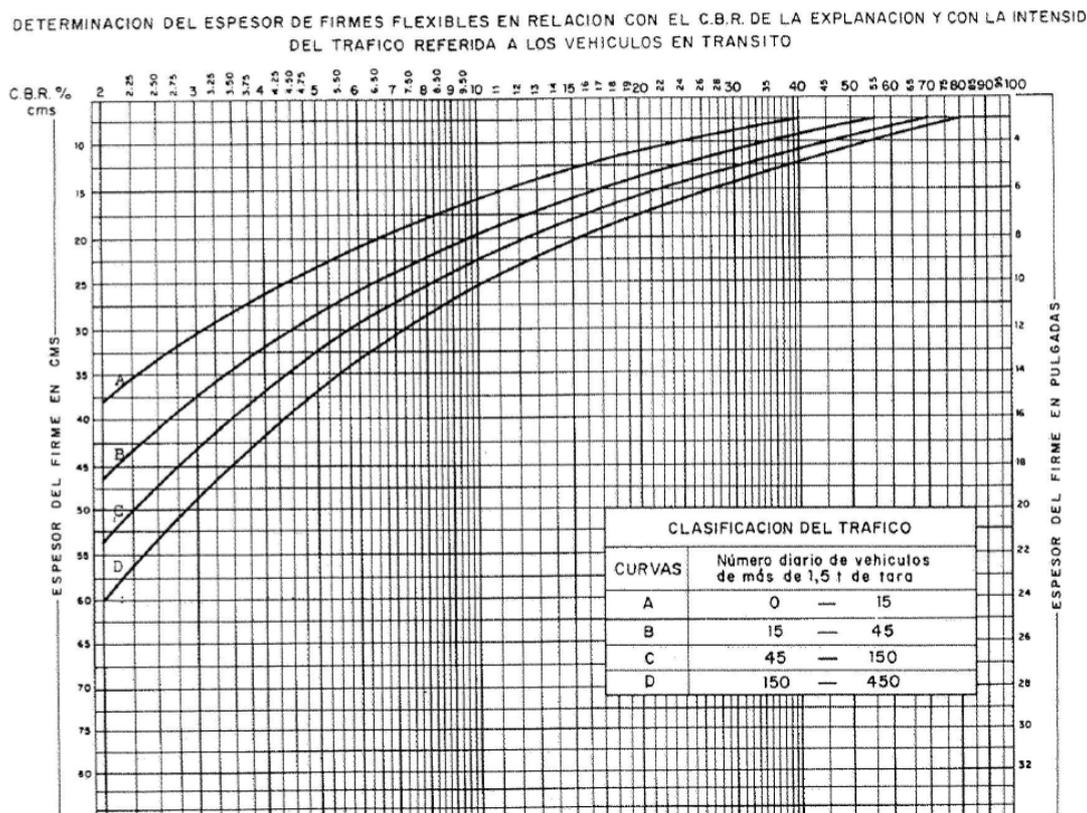
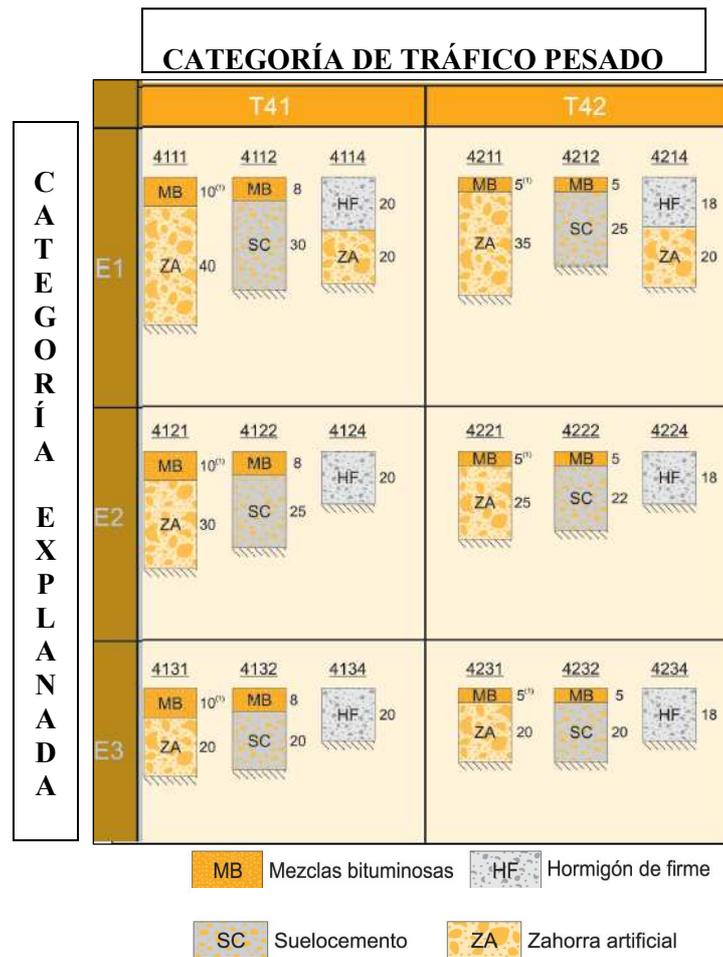


Figura 8. Determinación del espesor de firmes flexibles en relación con el CBR de la explanación y con la intensidad de tráfico referida a los vehículos de tránsito.

Por otro lado la **Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1. IC “secciones de firme, de la instrucción de carreteras”** [25] establece la relación de firmes para carreteras en función la explanada y la intensidad media diaria de vehículos pesados. Como ya se ha dicho anteriormente, no podemos ajustarnos estrictamente a estas indicaciones, puesto que las exigencias para caminos rurales son mucho menores. Consideramos aquí la categoría T4 (IMPP<50) que es la más próxima a la situación en caminos rurales.



(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravaemulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

Nota: en la categoría de tráfico pesado T42 con tráficos de intensidad reducida (menor a 100 vehículos/carril/día, podrá disponerse riego con gravilla bicapa como sustitución a los 5 cm de mezcla bituminosa).

Figura 9. Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T4 en función de la explanada

En el artículo 7.3. Arcenes: categorías de tráfico pesado T32 y T4 (T41 y T42) de la misma norma, dice: El arcén, enrasado siempre con la calzada, podrá **no estar pavimentado**, o tener un pavimento constituido por un riego con gravilla. El firme del arcén estará constituido por zahorra artificial, procurando enrasar con una de las capas del firme de la calzada; y el resto, hasta la explanada, podrá ser de zahorra artificial o de suelo seleccionado. Si no se pavimentase se proyectarán arcenes con zahorras cuyos **finos tengan un índice de plasticidad (IP) entre 6 y 10**.

En vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías el arcén tendrá un pavimento constituido por un tratamiento superficial, el cual podrá no disponerse en los demás casos. La capa de base estará constituida por zahorra artificial, procurando enrasar con una de las capas del firme de la calzada; el resto, hasta llegar a la explanada, será de zahorra, o de suelo seleccionado con un **CBR ≥ 20**, en las condiciones especificadas de puesta en obra.

La orden circular 306/89 PyP. sobre calzadas de servicio y accesos a zonas de servicio (corregida en noviembre de 1989) [23] dice:

- Dentro de calzadas de servicio enmarca:
 - Caminos agrícolas, destinados fundamentalmente para acceso a fincas rústicas y cuyo tráfico predominante es el de tractores y maquinaria agrícola.
 - Vías de servicio, que sirven de acceso a zonas de servicio, instalaciones auxiliares de carretera, edificios o pequeños núcleos de poblaciones. Su tráfico predominante es de coches y furgonetas.
- En el apartado 2.4. Firme, dice:
 - Los caminos agrícolas de nueva construcción no irán pavimentados y su afirmado se compondrá de 15 cm (mínimo) de suelos estabilizados “in situ” o de 30 cm (mínimo) de zahorras naturales sobre 30 cm (mínimo) de suelo adecuado.
 - Las vías de servicio de nueva construcción se afirmarán de acuerdo con la Instrucción 6.1 y 6.1. IC. Se recomienda el empleo de pavimentos a base de tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla sobre capas granulares para las categorías de tráfico pesado T4 y T3, justificando para esta última el dimensionado adoptado.

La Norma para el Dimensionado de firmes de la red de carreteras del País Vasco [22], cercana a las prescripciones descritas en la norma 6.1.I.C., incluye ciertas características concretas del uso de áridos siderúrgicos EAFS. En concreto, el anejo 4, indica las características y ensayos a realizar sobre áridos EAFS empleados como zahorras:

- Han de cumplir las condiciones del PG-3.
- Han de tener un envejecimiento de 3 meses.
- Han de tener un IGE (Grado de envejecimiento de las escorias de Acería) según la norma NLT-361 [21] < 1%
- Expansividad < 5 %
- Expansividad de la granulometría combinada < 0,5% según ASTM D 4792.
- Cal libre < 0,5%

Otra bibliografía que puede servirnos de referencia a la hora de encontrar los requisitos exigibles al firme de un camino son las **prescripciones sobre estabilización granulométrica de las Normas AASHTO** (American Association of State Highway and Transportation Officials). En nuestro caso en concreto la norma AASHTO M 147-70 “Aggregate and soil-aggregate subbase, base and surface courses” [3] cuenta con criterios a seguir a la hora de establecer las diferentes capas del firme.

Este tipo de estabilización está basada en la mezcla de suelos naturales, pero solamente en combinaciones binarias, es decir, de dos suelos. La proporción de materiales granulares y limo-arcillosos en mezclas debe ser la precisa, ya que un exceso de los primeros desembocaría en falta relativa de cohesión, es decir, de cementación, en tanto que una proporción excesiva de los segundos desembocaría en fenómenos de inestabilidad por entumecimiento ante un aumento de humedad.

La compactación del suelo es básica para conseguir una estabilización adecuada, debido a que, además de aumentar la densidad seca, disminuye el índice de huecos y, con ello, la permeabilidad, algo trascendental para favorecer la insensibilidad al agua. Pero es que, al estar más compactado el suelo, las diferentes partículas que lo constituyen están más próximas entre sí y presentan más puntos de contacto y fricción, incrementándose el rozamiento total de la masa de terreno. Más aún, las partículas de arcilla intercaladas entre las de mayor tamaño, teniendo contacto con ellas, actúan más eficazmente desde el punto de vista de su valor “cementante” por efecto de la cohesión que aportan.

Para conseguir la máxima compactación, y siguiendo la teoría de Fuller (1907) se han establecido unos husos granulométricos de Talbot que podemos emplear en caminos.

La formación de los husos es el resultado de la comprobación experimental que las tolerancias en los tantos por ciento que pasan por cada tamiz no desvirtúan la capacidad del poder estabilizante del suelo cuya granulometría esté comprendida entre los máximos y los mínimos.

Como recomendación general, se evitará que el tamaño máximo D sea superior a la tercera parte del espesor de la capa del camino que se vaya a estabilizar. Por otro lado, se aconseja que el material retenido en el tamiz 1/2" (12,5 UNE) tenga más del 50% de material procedente de machaqueo, con un mínimo de caras de fractura.

Las normas AASHTO establecen para estabilizaciones granulométricas de caminos las siguientes granulometrías y tolerancias:

Tamiz ASTM	Tamiz UNE	% que pasa, en peso				
		HUSO B (2")	HUSO C (1 1/2")	HUSO A (1")	HUSO D (1")	(3/4")
2"	50	100	-	-	-	-
1 1/2 "	40	70-100	100	-	-	-
1"	25	55-85	70-100	100	100	-
3/4"	20	50-80	60-90	85-100	70-100	100
1/2"	12,5	-	-	-	-	80-100
3/8"	10	40-70	45-75	65-100	50-80	70-90
nº 4	5	20-60	30-60	55-85	35-65	55-75
nº 10	2	20-50	20-50	40-70	25-50	40-60
nº 40	0,4	10-30	10-30	25-45	15-30	25-40
n 200	0,08	5-15	5-15	10-25	5-15	15-25

No es estrictamente necesario que el suelo que ha de formar la base u otro capa granular se ajuste a los husos de tolerancia exigidos de acuerdo con el tamaño máximo del árido, bastará que el módulo granulométrico del árido utilizado en la capa granular sea el mismo que el correspondiente al de los valores medios de huso de tolerancia respectivo.

Se denomina módulo granulométrico el resultado de dividir por 100 la suma de cantidades retenidas acumuladas en los distintos tamices en un tamizado de una muestra de suelo.

La estabilización granulométrica más adecuada para formar capas de base es la estabilización a 1" (**Huso A**-para capas sin cubierta y **Huso D**-capas con o sin revestimiento asfáltico). La cantidad de material que pase por el tamiz nº200 (0,080 UNE) será menor que las dos terceras partes de lo que pase por el tamiz nº40 (0,40

UNE). Tanto si se reviste con tratamiento asfáltico como si va a servir de capa de base-rodadura. El material que pasa por el tamiz 0,4 UNE cumplirá las siguientes condiciones:

Si lleva revestimiento asfáltico:

Límite líquido: $LL < 25$

Índice de plasticidad: $IP \leq 6$

Equivalente de Arena: $EA \geq 30$

Si no lleva revestimiento asfáltico:

Límite líquido: $LL < 35$

Equivalente de Arena: $EA \geq 30$

$8 \leq IP \leq 10$; en regiones secas

$6 \leq IP \leq 9$; en regiones húmedas.

Además el material ha de cumplir:

Próctor modificado: $PM \geq 2$ kg/litro

Coefficiente de desgaste de los Ángeles: $LA < 40$

$CBR \geq 70$

Hinchamiento $< 0,5\%$

El espesor de la base debe ser como mínimo de 15 cm y podrá ser mayor, si el dimensionado del firme así lo exige.

La estabilización a **1 ½” (huso C-** con o sin revestimiento asfáltico) también puede emplearse como capa base-rodadura con revestimiento asfáltico, y tiene unas características parecidas a las de la estabilización 1”, aunque por la mayor dimensión del tamaño máximo de los áridos, la plasticidad requerida es diferente. El espesor será igual o mayor que 15 cm.

Si lleva revestimiento asfáltico ha de cumplir:

Límite líquido: $LL < 25$

Índice de plasticidad: $IP \leq 6$

Equivalente de Arena: $EA \geq 25$

Si no lleva revestimiento asfáltico:

Índice de plasticidad: $LL < 35$

Equivalente de Arena: $EA \geq 25$

$6 \leq IP \leq 12$; regiones secas

$4 \leq IP \leq 9$; en regiones húmedas.

El índice CBR post-saturación y compacto a la humedad óptima, será igual o mayor que 20 y el hinchamiento inferior a 0,5%. El coeficiente de desgaste de Los Ángeles será inferior al 50% si va a llevar revestimiento asfáltico y al 40% si va a carecer de él, es decir, que ha de resistir mejor el desgaste para poder soportar el producido por la acción directa de los vehículo

La estabilización a **3/4”** requiere siempre **revestimiento** asfáltico. El menor tamaño de los áridos que en el caso de la estabilización a 1”, implica una disminución del

rozamientos interno total de la masa que constituye la capa de base y a fin de evitar los movimientos relativos de los granos que la componen, se debe confinar entre la subbase, los guardafirmes y la capa asfáltica de rodadura.

La estabilización a **2” (huso B)**, también puede emplearse en capa de base, si bien se recomienda que lleve un **revestimiento** asfáltico como capa de rodadura. Espesor mínimo de 20 cm.

Para la estabilización $\frac{3}{4}$ ” y **2”**, serán aplicables las condiciones de de la estabilización $1\frac{1}{2}$ ” cuando lleva revestimiento asfáltico. $CBR \geq 20$, desgaste de los ángeles $< 50\%$, LL, IP y EA de la estabilización $1\frac{1}{2}$ ”. El espesor a adoptar será igual o superior a 15 cm.

Límite líquido: $LL < 25$

Índice de plasticidad: $IP \leq 6$

Equivalente de Arena: $EA \geq 25$

$CBR \geq 20$

Desgaste de los Ángeles (LA) $< 50\%$

Hinchamiento $< 0,5\%$

Las normas ASSHTO, para el caso de zahorras naturales, exigen una plasticidad entre $4 \leq IP < 9$, $EA > 30$, $CBR \geq 20$, estables frente a humedad y resistente ante heladas. Para caminos de bajo/medio tráfico pueden emplearse sin revestimiento asfáltico.

Las zahorras artificiales definidas en el PG-3, pueden considerarse estabilizadas granulométricamente, pero al carecer de plasticidad, deben ir con un tratamiento superficial. Por eso si conseguimos el huso de una zahorra artificial o su módulo granulométrico combinándolo con un material que aporte plasticidad podríamos emplearlo sin revestimiento asfáltico.

Con toda la información recabada para la segunda línea de investigación que recoge la presente Tesis, vemos que el firme de un camino rural se construye en función de la calidad de la explanada (en nuestro caso mejorada con LFS) y de la intensidad de tráfico media. El material que queremos utilizar es la escoria negra EAF por lo que tendremos que caracterizarla para ver si puede asemejarse a una zahorra artificial tradicionalmente empleada en la construcción firmes de caminos. Si fuera así, tendremos que calcular el espesor de firme necesario y comprobar que cumple los requisitos de capacidad portante. Los requisitos de las zahorras especificadas en el PG-3 [26] quedan recogidas en el apartado 3.5 de la presente Tesis Doctoral.

3.2 CLASIFICACIÓN DE SUELOS.

Una vez realizada la investigación de los suelos, es muy útil establecer una clasificación, por familias de materiales con comportamiento conocido, para establecer las condiciones de su empleo o utilización mediante tratamiento. Esta clasificación distinguirá los materiales rocosos de los suelos propiamente dichos y tendrá en cuenta el comportamiento de estos materiales a la hora de definir sus condiciones de empleo,

utilización o tratamiento más adecuado para ello tanto en rellenos y terraplenes como en explanadas.

Existen diferentes clasificaciones de suelos, siendo las más utilizadas las siguientes:

U.S.C.S. – Unified Soil Classification System ó clasificación de CASAGRANDE Elaborada por Arthur Casagrande [83]. Es la más conocida y adoptada por diversos organismos.

Clasificación de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Fue originalmente desarrollada por los ilustres geotécnicos Terzaghi y Hogentogler para la U.S.P.R.A. (United States Public Road Administration). También se la conoce como clasificación H.R.B.- Highway Research Board (índice de grupo).

Clasificación Española del PG-3. Artículo 330 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes, PG-3, del Ministerio de Fomento.[26]

Clasificación Francesa de Suelos. Elaborada por los organismos franceses L.C.P.C. – SETRA en los años setenta, viene contenida en la norma francesa NFP 11300. Introduce componentes de consistencia del suelo en el momento de utilización.

Clasificación Alemana de Suelos. Debida a F. Floss en 1977. Tiene la peculiaridad de basarse en la susceptibilidad de los suelos a las heladas. Viene contenida en la norma DIN 18196.

Estas clasificaciones generalmente adoptan como criterios principales los basados en la granulometría y plasticidad de los suelos, añadiéndose en algunos otros parámetros. Las distintas clasificaciones presentan zonas que son susceptibles de correlacionarse entre sí. En nuestra investigación se estudiará a fondo los suelos según las tres primeras clasificaciones mencionadas.

Clasificación Unificada de Casagrande

Fue A. Casagrande quien en 1942 ideó este sistema genérico de clasificación de suelos, que fue empleado por el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los EE.UU. para la construcción de pistas de aterrizaje durante la II Guerra Mundial.

Diez años mas tarde y a vista de la gran utilidad de ésta sistema en Ingeniería Civil, fue ligeramente modificado por el Bureau of Reclamation, naciendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); este sistema fue adoptado por la ASTM (American Society of Testing Materials) como parte de sus métodos normalizados.

Dicha clasificación se vale de unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades. En el siguiente esquema se muestran dichos símbolos y sus significados.

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos de grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACION DE LABORATORIO		
SUELOS DE GRANO GRUESO	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas limpias	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue:	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3
		(sin o con pocos finos)	GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.
		Gravas con finos	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Límites de Atterberg debajo de la línea A con $IP < 4$. Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.	
		(apreciable cantidad de finos)	GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.		
	ARENAS Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	Arenas limpias	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	$< 5\%$ - >GW,GP,SW,SP. $> 12\%$ - >GM,GC,SM,SC. 5 al 12% -> casos límite que requieren usar doble símbolo.	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3
			(pocos o sin finos)	SP		Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.
		Arenas con finos	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A con $IP < 4$. Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.
			(apreciable cantidad de finos)	SC		Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.
	SUELOS DE GRANO FINO	Limos y arcillas:		ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.	
		Límite líquido menor de 50		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.	
			OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.		
Limos y arcillas:			MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.		
Límite líquido mayor de 50			CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.		
			OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.		
				PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.	

Tabla 20. Clasificación Unificada de Casagrande. U.S.C.S.

Clasificación de la AASHTO ó H.R.B.

Ha sido en Estados Unidos donde se han desarrollado la mayor parte de las clasificaciones empíricas de suelos. Una de las más populares en carreteras es la empleada por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y que fue originalmente desarrollada por los ilustres geotécnicos Terzaghi y Hogentogler para la U.S.P.R.A. También se la conoce como clasificación H.R.B.-Highway Research Board (índice de grupo). Inspirada en el modelo de Casagrande, considera siete grupos básicos de suelos, numerados desde el A-1 hasta el A-7. A su vez, algunos de estos grupos presentan subdivisiones; así el A-1 y el A-7 tiene dos subgrupos y el A-2, cuatro.

Los únicos ensayos necesarios para encuadrar un suelo dentro de un grupo u otro son el análisis granulométrico y los límites de Atterberg. Si queremos determinar su posición relativa dentro del grupo, es necesario introducir el concepto de índice de grupo (IG), expresado como un número entero en función del porcentaje de suelo que pasa a través del tamiz #200 (0,080 UNE):

$$IG = (F-35)*(0,2+0,005 (LL-40))+0,01.(F-15)(IP-10)$$

Siendo:

F: % que pasa por el tamiz ASTM N°200 (0,080 UNE).

LL: límite líquido

IP: índice de plasticidad

El índice de grupo para los suelos de los subgrupos A-2-6 y A-2-7 se calcula usando sólo:

$$IG = 0,01*(F-15)*(IP-10)$$

A continuación se muestra la tabla de clasificación de suelos AASHTO, en la que se recogen todas las características exigibles a cada grupo y subgrupo, en el caso de que exista, de suelo.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
	A-1		A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo:	A-1-a	A-1-b									A-7-5
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0,425mm) N° 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - 35 máx			- - 36 mín				
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40 Límite líquido Índice de plasticidad	- 6 máx		- NP (1)	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín (2) 11 mín
Constituyentes principales	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Características como subgrupo	Excelente a bueno						Pobre a malo				

(1): No plástico

(2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

Tabla 21. Clasificación de suelos de la ASSHTO

Clasificación Española. Pliego PG-3.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes [26], en su artículo 330 establece una clasificación de suelos, donde diferencia entre suelos inadecuados, marginales, tolerables, adecuados y seleccionados, en función de sus características químicas y sus características físicas, como granulometría, plasticidad e hinchamiento. La Tabla 22 muestra las características principales de cada uno de estos suelos, así como las exigencias adicionales indicadas en la norma 6.1. I.C. “secciones de firme”, cuando éstos suelos forman parte de la explanada. Por otra parte la Tabla 23, muestra una escueta clasificación basada en la idoneidad del suelo para formar parte de las diversas zonas del terraplén (coronación, cimiento, núcleo), así como características mínimas de capacidad portante del mismo.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. PG-3. artículo 330				
A los efectos del presente artículo, los rellenos tipo terraplén estarán constituidos por materiales que cumplan alguna de las dos condiciones granulométricas siguientes:				
* cernido o material que pasa por el tamiz 20mm UNE mayor del 70% ($\#>70\%$), según UNE 103101				
* cernido por el tamiz 0,08 mm UNE mayor o igual del 35% ($\#\geq 35\%$) según UNE 103101				
CARACTERÍSTICAS	SUELOS SELECCIONADOS	SUELOS ADECUADOS	SUELOS TOLERABLES	SUELOS MARGINALES
preparación de la muestra UNE 103100:1995				
MATERIA ORGÁNICA UNE 103204	M.O.<0,2%	M.O.<1%	M.O.<2% M.O.<1% (**)	M.O.<5%
SALES SOLUBLES INCLUIDO EL YESO NLT 114	SS<0,2%	SS<0,2%	-	-
SALES SOLUBLES DISTINTAS AL YESO NLT 114	-	-	SS<1% SO ₃ <1%(**)	-
CONTENIDO EN YESO NLT 115	-	-	YESO<5%	-
GRANULOMETRÍ UNE 103101	TAMAÑOS MÁXIMO	$D_{max} < 100 \text{ mm}$	$D_{max} < 100 \text{ mm}$	-
	CERNIDO UNE 0,40	$\# 0,40 < 15\%$	-	-
		$(*)\#0,40 < 75\%$		
	CERNIDO UNE 2	$(*)\#2 < 80\%$	$\#2 < 80\%$	-
CERNIDO UNE 0,080	$(*)\#0,080 < 25\%$	$\#0,080 < 35\%$	-	-
LÍMITE LÍQUIDO UNE 103103	$(*) LL < 30$	$LL < 40$	$LL < 65$	-
INDICE PLASTICIDAD UNE 103104	$(*) IP < 10$	si $LL > 30$ será el $IP > 4$	si $LL > 40$ será el $IP > 0,73(LL-20)$	si $LL > 90$ será el $IP > 0,73(LL-20)$
ASIENTO DE COLAPSO NLT 254	-	-	< 1%	-
HINCHAMIENTO LIBRE UNE 103601	-	-	< 3% < 1% (**)	< 5%
C.B.R. si se emplean en explanadas	≥ 10 (**) ≥ 12 (***) ≥ 20 (***)	≥ 5 (**) ≥ 6 (***)	≥ 3 (**)	su empleo en explanadas solo es posible si se estabiliza con cal o cemento para conseguir: S-EST1 o S-EST2
* condiciones que deben cumplir si el cernido que pasa por el tamiz 0,40 UNE es superior al 15%				
Según norma 6.1.1.C.	** Exigencia adicional para los suelos que se empleen en la formación de explanadas			
	*** exigencia adicional para los suelos empleados en la capa superior en la formación de explanadas			
	****suelos tipo 3			

Tabla 22. Clasificación de suelos PG-3 y requisitos adicionales para su empleo en explanada

EMPLEO Y COMPACTACIÓN								
USO POR ZONAS	CORONACION		CIMIENTO			NÚCLEO		
TIPO DE SUELO	ADECUADO	SELECCIONADO	TOLERABLE	ADECUADO	SELECCIONADO	TOLERABLE	ADECUADO	SELECCIONADO
C.B.R.	C.B.R.≥5		C.B.R.≥3			C.B.R.≥3		
PROCTOR REFERENCIA	≥ 100%		≥ 95%					
CARGA CON PLACA (MPa) NLT 357	$E_{v2}>60$	$E_{v2}>100$	$E_{v2}>30$	$E_{v2}>30$	$E_{v2}>50$	$E_{v2}>30$	$E_{v2}>30$	$E_{v2}>50$
RELACIÓN DE MÓDULOS	$K=(E_{v2}/E_{v1})<2,2$							

Tabla 23. Empleo de materiales por zonas del terraplén según PG-3

La utilización de suelos marginales o de suelos con índice **CBR menor de 3** puede venir condicionada por problemas de resistencia, deformabilidad y puesta en obra, por lo que su empleo queda desaconsejado y en todo caso habrá de justificarse mediante un estudio especial, aprobado por el Director de Obras. Este estudio de usos de materiales marginales debe contemplar los aspectos detallados en el artículo 330 PG-3 [26], que son:

- Suelos colapsables. Son aquellos que tienen un asiento superior al **1%** según la norma NLT 254, con una presión de ensayo de dos décimas de megapascal (0,2 MPa). Su uso se encuentra limitado, únicamente, en el núcleo y en el cimiento del terraplén, debiendo justificarse su uso mediante un estudio especial.
- Suelos expansivos. Son los que presentan un porcentaje de hinchamiento libre en edómetro, según norma UNE 103601 con densidad y humedad de próctor de referencia, por encima del **3%**. Este tipo de suelos no deben emplearse ni en coronación ni en los espaldones. Su uso se encuentra permitido en el núcleo únicamente si su hinchamiento, según la norma antes señalada, es inferior a 5% y se ha realizado un estudio especial que fundamente su utilización.
- Suelos con yesos. Los suelos que contienen menos del **0,2%** de yeso se pueden utilizar en cualquier parte del terraplén. El Pliego establece las precauciones que se deben tomar con contenidos mayores de yesos: con porcentajes comprendidos entre el 0,2 y el 2% pueden emplearse en el núcleo sin que sea preciso adoptar precauciones especiales en coronación y en espaldones. Con porcentajes de yeso comprendidos entre el 2 y el 5% se podrán utilizar en el núcleo únicamente si se adoptan medidas especiales de impermeabilización tanto en coronación como en los espaldones del mismo. Cuando el contenido de yeso se encuentra comprendido entre un 5 y un 20%, sólo se podrá emplear los suelos que contengan tales porcentajes en el núcleo de terraplén y siempre que se base en un estudio especial. Con porcentajes mayores de yesos, no debe usarse en ninguna parte del terraplén. Su uso, en esta última eventualidad, quedará limitado sólo en caso de que no existan más suelos disponibles y siempre que se haya realizado un estudio especial que contemple soluciones para el nivel de problemáticas a producirse.
- Suelos con otras sales solubles. Son aquellos que contienen un porcentaje de sales solubles –distintas al yeso– mayores al 0,2%. Entre **0,2 y 1%** se puede utilizar en núcleo, coronación y espaldones sin necesidad de tomar precauciones. Si su porcentaje es mayor a un **1%** se debe efectuar también un estudio especial que justifique su uso.

- Suelos con materia orgánica. Siempre que el suelo contenga un contenido superior a 2%, según la norma UNE 103204, se debe ejecutar un estudio especial. En coronación el contenido de materia orgánica será inferior al **1%**.

En resumen, el “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes” [26] exige, para el empleo de materiales marginales y otros tipos de suelos especiales en la construcción de terraplenes, la ejecución de un estudio especial que, como mínimo, debe fundamentar su utilización.

El estudio especial exigido por el artículo 330 del “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes” debe contemplar al menos los siguientes aspectos:

- Determinar claramente el motivo de marginalidad del suelo.
- Influencia de la marginalidad en la obra de construcción.
- Características resistentes y deformacionales.
- Conclusión justificada de su uso.
- Disposiciones constructivas.

Además de permitir el uso de suelos naturales, el “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes” autoriza el empleo de *“productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana siempre que cumpla con las especificaciones exigidas a los suelos naturales, y conjuntamente, que sus características físico-químicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto”*. Adicionalmente a lo anterior se debe cumplir a lo dispuesto por la normativa de carácter medio ambiental. Más adelante se profundizará en este tema.

No obstante lo anterior, la realización del “estudio especial” para el empleo de las mezclas de suelo-escoria debe considerar el PG-3 sólo como un documento de referencia, ya que en la presente investigación no se trata de utilizar un suelo marginal sino que se pretende estudiar la viabilidad de utilizar la mezcla de un suelo de esas características con un residuo industrial. La mezcla resultante presentará un comportamiento diferente al de un suelo natural. Ejemplo de esto último es el estudio de las propiedades expansivas de las escorias de acería, exigido para el empleo de estos materiales en obras de tierra para carreteras viales.

3.3 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

La caracterización de un suelo se lleva a cabo por medio de dos tipos de parámetros, conocidos como parámetros de naturaleza y parámetros de estado. La toma de muestras in situ se realizará de acuerdo con la norma UNE 7371:1975 [32] “toma de muestras superficiales de suelo de tipo inalterado” y la preparación de la muestra en laboratorio, almacenamiento y selección de una muestra de tamaño adecuado a cada ensayo a partir de la muestra de campo, según UNE 103100:1995 [34] “Preparación de muestras para ensayos de suelos”.

3.3.1 Parámetros de naturaleza

Se caracterizan porque no varían ni con el tiempo ni a lo largo de las manipulaciones que puedan realizarse a los suelos durante los trabajos, los más importantes son:

La granulometría

Es importante conocer:

- El tamaño máximo de las partículas del suelo, que determinará la elección de la maquinaria más conveniente a utilizar así como el método de trabajo a emplear. Se puede afirmar que la operación de mezclado de suelos con tamaño máximo de diámetro 50 mm se puede realizar con garantías suficientes de calidad y homogeneidad.
- La cantidad o proporción de partículas que pasa por el tamiz UNE 80 μm permite, en cierta medida, evaluar el grado de su sensibilidad al agua.

Desde el punto de vista del tamaño de las partículas que componen un suelo se han hecho diversas clasificaciones, más o menos arbitrarias. Adoptaremos la siguiente:

- Gravas (mayor o igual a 2 mm)
- Arenas (menor que 2 mm y mayor o igual que 0,06 mm)
- Limos (menor que 0,06 mm y mayor o igual que 0,002 mm)
- Arcillas (menor que 0,002 mm)

La plasticidad

Indica a la vez la cantidad y el grado de actividad de la fracción arcillosa que contiene un suelo. Se puede medir con la ayuda de los siguientes parámetros:

- El índice de plasticidad (IP): Es el parámetro más utilizado y representa, de alguna forma, la susceptibilidad de un suelo al agua y su comportamiento plástico. Se trata en realidad de dos ensayos de laboratorio, el de “Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande” según UNE 103103:94 [36] y el de “Determinación del límite plástico de un suelo” según UNE 103104:94 [37]. Mediante estos dos ensayos se determinarán las propiedades plásticas del terreno permitiendo conocer su límite líquido (LL), su límite plástico (LP) y su índice de plasticidad (IP). Estos ensayos se solicitan al laboratorio como uno solo bajo el nombre de “límites de Atterberg”, llevándose a cabo la realización de los dos. En general un $IP < 12$ indica un suelo poco plástico y un $IP > 40$ indica un suelo muy plástico. Un suelo no plástico ($IP=0$), se representa como NP.

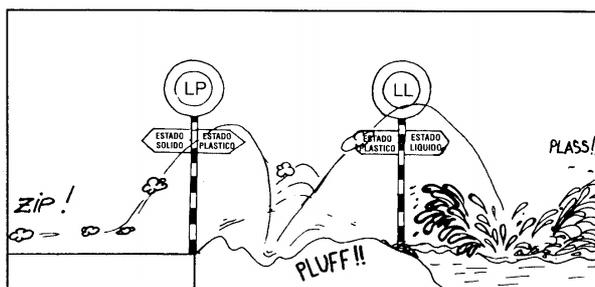


Figura 10. Plasticidad de los suelos

- El valor del azul de metileno (VA): Ensayo realizado la norma UNE EN 933-9 [57], que consiste en medir la cantidad de azul de metileno que es capaz de absorber la superficie de cada una de las partículas del suelo, y que indica la proporción de material arcilloso presente. El VA se expresa en gramos de azul de metileno por 100 gramos de suelo. En general un $VA < 2,5$ indica un suelo poco plástico y un $VA > 8$ indica un suelo muy plástico.

Equivalente de arena

Se trata de una determinación del exceso de material fino (que pasa por el tamiz 0,08 mm UNE), en un material granular. La norma empleada es la UNE 103109:95 [62] y da una idea aproximada de la calidad del material granular que se va a emplear, ya que si tiene excesiva cantidad de finos podrá ser inadecuado. Se utiliza en suelos granulares de baja plasticidad, por lo que presentarán ciertas dificultades para determinar los índices de Atterberg. Consiste el ensayo en introducir una muestra del suelo en una probeta de dimensiones dadas, que antes se ha llenado con una solución tipo. Se agita el conjunto del suelo y solución, dejándolo reposar durante veinte minutos, transcurridos los cuales, la arena se habrá depositado abajo, en la zona media estará la arcilla y más arriba, sobre la arcilla, el límite en exceso.

Leyendo en la probeta las alturas de arena y la arcilla, el equivalente de arena (EA) será:

$$EA = h_2/h_1 * 100$$

Siendo h_2 , altura de sedimentación de la fracción arenosa

h_1 , altura de sedimentación de floculado arcilloso

Se adoptará como valor, el número entero más aproximado, con valores entre 0 y 100. Valores altos de EA indican la existencia de pocos finos, pero para $EA < 25$ se puede interpretar como un suelo plástico bastante poco adecuado. Insistimos en el valor aproximado de este ensayo.

El hinchamiento

Es una característica propia de cada tipo de suelo: ciertos suelos arcillosos son susceptibles de hinchamiento en presencia de humedad. Se valora conforme a la Norma UNE 103601:96 [47] “Ensayo de hinchamiento libre de un suelo en edómetro”. Se trata de un ensayo de 3 días de duración, a temperatura ambiente, midiendo lo que el suelo se hincha bajo presión vertical débil de 10 kPa al entrar en él el agua por capilaridad. La muestra se introducirá en el edómetro en su estado de humedad natural.

Una estabilización efectiva con cal de las arcillas reducirá el hinchamiento del suelo expansivo a valores prácticamente nulos.

Ensayo de colapso en suelos

La realización de este ensayo viene regulada por la norma NLT 254:99 [17] “Ensayo de colapso en suelos” este ensayo tiene por objeto determinar la magnitud del colapso unidimensional que se produce cuando se inunda un suelo semisaturado. Mediante este

ensayo también se puede evaluar la magnitud del colapso que se produce para una tensión vertical determinada y el potencial porcentual de colapso del suelo. Se define colapso como la disminución de altura que experimenta una probeta de suelo, en unas determinadas condiciones de estado (densidad y humedad) confinada lateralmente y sometida a una presión vertical constante, al ser inundado.

Índice de colapso (I) es el valor del colapso determinado, para una presión vertical cualquiera, como el porcentaje de disminución de altura que experimenta la probeta al ser inundada, una vez alcanzado el equilibrio bajo la acción de la presión vertical seleccionada con respecto a la altura de la probeta en el momento de proceder a la inundación.

I>1 Colapsable

I<1 No colapsable

El asiento en ensayo de colapso ha de ser inferior al uno por ciento (1%), según NLT 254:99 [17], para muestra moldeada según el ensayo Próctor Normal UNE 103500:94 [44], y presión de ensayo de dos décimas de mega pascal (0,2 MPa). Este ensayo se realizará sobre la muestra de suelo, provista de su humedad natural, en el edómetro a continuación del ensayo anteriormente citado (hinchamiento libre).

Humedad natural

La realización de este ensayo viene regulada por la norma UNE 103300:93 “Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa” [41]. Consiste en hallar el cociente entre la masa de agua que pierde el suelo, al desecarlo en una estufa entre 105°C y 110°C, y la masa del suelo seco.

Densidad de las partículas sólidas

La realización de este ensayo viene regulada por la norma UNE 103302:94 [42] “Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo” (picnómetro), según la cual, tiene por objeto la determinación de la densidad relativa de las partículas menores de 5 mm de un suelo, definida como el cociente entre la masa de un determinado volumen de suelo exento de poros, a una temperatura y la masa del mismo volumen de agua destilada exenta de aire, a la misma temperatura.

Composición química

Para caracterizar el suelo químicamente, se realizarán análisis químicos, análisis térmicos y termogravimétricos. Así mismo se valorarán los siguientes parámetros según la normativa indicada a continuación:

- El contenido en sulfatos solubles, medido por las normas: 103201:96 [38] (cuantitativo) y la 103202:95 [39] (cualitativo) .
- Materia orgánica UNE 103204:93 [40] (materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico)
- Sales solubles en agua, incluida yeso: NLT 114:99 [13]
- Sales solubles distintas de yeso: NLT 114:99 [13]
- Contenido en Yeso de un suelo: NLT 115:99 [14]

3.3.2 Parámetros de estado

Estos parámetros no son propios de las características del suelo sino de las condiciones ambientales en que se encuentran. Para los suelos sensibles al agua, el parámetro de estado que determina todas las condiciones de los rellenos, terraplenes y explanadas de los viales es el estado hídrico. Su determinación no puede hacerse exclusivamente con el cálculo del contenido en agua natural, sino que es necesario relacionarlo con el contenido de agua específico de suelo al que le corresponde un comportamiento particular. El método más corriente para indicar el estado hídrico de un suelo es referirse a los valores de los ensayos Próctor y CBR, realizados sobre cada suelo o clase de suelo a estudiar.

La compactación en el ensayo Próctor Normal y Próctor Modificado

Cuando se compacta un suelo con una energía de compactación dada, se comprueba que su densidad seca (D), referida al suelo en estado seco, varía en función del contenido en agua (H) hasta alcanzar un máximo de densidad correspondiente a un contenido de humedad que se denomina óptimo. Para alcanzar igual densidad con una humedad distinta a la óptima hay que emplear mayor energía de compactación.

La gráfica de la Figura 11 representa la evolución de la densidad seca (D) en función de la humedad H . Los valores de D y H correspondientes al punto alto de la curva son los valores característicos del suelo para la energía de compactación empleada, y suelen servir de referencia en los pliegos de prescripciones.

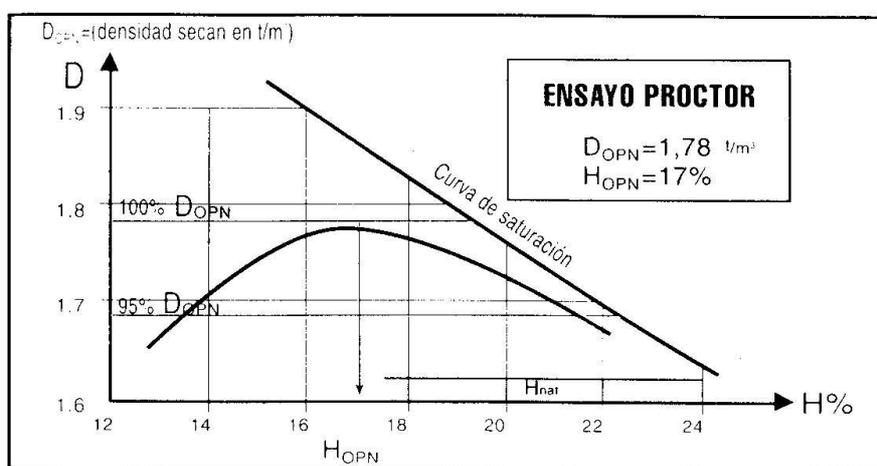


Figura 11. Curva del ensayo Próctor

En terraplenes se utiliza el ensayo Próctor Normal según la Norma UNE 103500:94 [44] y se les designa a estos valores como D_{OPN} y H_{OPN} . En las explanadas se utiliza el ensayo del Próctor Modificado según UNE 103501:94 [45], superior en energía al Próctor normal y se obtiene los valores de D_{OPM} y H_{OPM} . Algunos materiales poco sensibles al contenido en agua de compactación presentan una curva Próctor aplanada, otros al contrario, son más sensibles y presentan una marcada curva en campana.

La densidad seca máxima sirve de referencia en la obra para calcular el grado de compactación según la fórmula $T\% = D \times 100/DOPN$ o $DOPM$ donde D es la densidad seca alcanzada en obra. Como indicación, éste índice deberá ser:

$T > 95\%$ en terraplenes.

$T > 100\%$ en explanadas.

Se aprecia la importancia a nivel práctico y económico de conocer la curva Próctor ya que permite determinar el estado hídrico del suelo por comparación de la humedad natural (H) con la humedad óptima ($HOPN$).

La capacidad portante. El ensayo CBR.

El ensayo CBR (California Bearing Ratio), de origen americano, se realiza conforme a la Norma UNE 103502:95 [46] y consiste en medir la resistencia al punzonamiento de un suelo sobre las probetas confeccionadas por el procedimiento del ensayo Próctor y comparar los valores obtenidos con un valor de referencia patrón. Se trata de un ensayo ideado por la Dirección de Carreteras de California para evaluar las posibilidades de sustentación de un cimiento con objeto de determinar el espesor conveniente para firme de una carretera que se apoye sobre aquél.

En este ensayo se mide la presión necesaria para que un émbolo de 4,96 cm de diámetro penetre cierto número de milímetros en el cimiento, a la velocidad de 1,27 mm por minuto. Y medir la carga necesaria para que penetre hasta 2,54 mm y 5,08 mm. Hallada la presión, se relaciona con la que sería precisa emplear para lograr la misma penetración en un cimiento preparado para servir de patrón. Se mide así la capacidad portante del suelo o lo que es lo mismo su capacidad de soportar una carga para cada pareja de valores de densidad-humedad. Se expresa por el índice portante CBR en % del valor de referencia. Cuando más elevado es el CBR más capacidad portante tiene el suelo.

Ensayo de compresión simple

La realización de este ensayo viene regulada por la norma UNE 103400:93 [43] “Ensayo de rotura a compresión simple de probetas de suelo”. Este ensayo consiste en colocar una muestra de suelo, normalmente cilíndrica de esbeltez 2:1, aunque también se puede efectuar sobre un bloque tallado de forma apropiada y con las correcciones adecuadas, en una prensa ordinaria y romperla a compresión. Durante la realización del ensayo, se determina la relación carga-deformación. Al ser un ensayo en el que no existe ningún tipo de confinamiento lateral de la muestra que pueda evitar su desmoronamiento, el ensayo está pensado para suelos cohesivos.

Durante la aplicación de la carga, dada la rapidez con que se alcanza la rotura, y como consecuencia de la impermeabilidad de las muestras, no hay tiempo para la disipación de las presiones intersticiales generadas en la probeta, por lo que los valores de rotura y de cohesión de la muestra son siempre sin drenaje. La realización de este ensayo lleva implícito el cálculo de humedad y densidad aparente de la muestra.

3.4 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS.

Como indica la norma 6.1. IC: 2003 “Secciones de firme de la Instrucción de Carreteras” [25], los suelos marginales o inadecuados solo podrán emplearse en la formación de explanadas si se estabilizan con cal o con cemento para conseguir explanadas de tipo S-EST-1 ó S-EST-2. La misma norma recomienda espesores mínimos de 25 cm y máximos de 30 cm en capas de suelo estabilizado.

Las prescripciones técnicas aplicables respecto a la estabilización de suelos se indican en el artículo 512 del Pliego PG-3 “suelos estabilizados in situ” [26]. Se definen como suelo estabilizado in situ la mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal o con cemento, y eventualmente agua, en la propia traza de la carretera, la cual convenientemente compactada, tiene por objeto disminuir la susceptibilidad al agua del suelo o aumentar su resistencia, para su uso en la formación de explanadas.

Es recomendable recurrir a la estabilización de los suelos frente a su eventual sustitución por motivos técnicos (obtención de una explanada más uniforme y resistente a agentes externos), ambientales (ausencia de extracciones y de vertederos) y, habitualmente, incluso económicos. El incremento del espesor de la estabilización mejora notablemente el comportamiento de las capas del firme, especialmente a largo plazo, lo que es tanto más importante cuanto mayor sea la categoría de tráfico pesado.

Es indispensable antes de comenzar cualquier trabajo con un suelo, tener el conocimiento más preciso posible sobre las características de los materiales que lo componen, de los problemas que estos materiales van a generar y de las soluciones que pueden adoptarse (por ejemplo el tratamiento de estabilización con cal o con cemento).

Como norma general, se puede señalar que, para que la estabilización con cal sea eficaz, los suelos deben ser plásticos, ya que esto es indicador de una apreciable proporción de fracción arcillosa, la cual es sensible a las reacciones químicas con la cal que proporcionan mejoras en las propiedades del suelo de forma inmediata y a largo plazo.

En el extremo opuesto, los suelos adecuados para su estabilización con cemento son los suelos arenosos, de baja o nula plasticidad y sin ninguna actividad química a temperatura ambiente (inertes). Las reacciones químicas tras su estabilización se asocian casi exclusivamente a la capacidad hidráulica del conglomerante. Forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo agua.

En la presente investigación se pretende estudiar si la escoria blanca de acería eléctrica, mezclada con suelos arcillosos, desarrollan reacciones de cementación de algunos de sus minerales e incluso reacciones de tipo puzolánicas. En este sentido, para Shi Caijun [197] [199] [200] [201] ciertas escorias pueden denominarse como “cementos débiles”, debido a sus bajas propiedades cementantes.

Las reacciones de hidratación producidas en las escorias de acería generan, además de propiedades cementantes, problemas de expansión; por este motivo tendremos que tener en cuenta esta posible expansión en las mezclas.

La ejecución de un suelo estabilizado in situ incluye las siguientes operaciones:

- Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.
- Preparación de la superficie existente.
- Disgregación del suelo.
- Humectación o desecación del suelo.
- Distribución de la cal o del cemento.
- Ejecución de la mezcla.
- Compactación.
- Terminación de la superficie.
- Curado y protección superficial.

Se pueden definir tres tipos de suelos estabilizados, cumpliendo todos ellos lo indicado en cada caso. Los dos primeros son propiamente suelos mejorados:

- S-EST 1: CBR de la mezcla a 7 días no inferior a 6. Contenido de conglomerante (cal o cemento) no inferior al 2% si se incorpora en polvo, ni inferior al 2% si se incorpora en forma de lechada.
- S-EST 2: CBR de la mezcla a 7 días no inferior a 12. Contenido de conglomerante (cal o cemento) no inferior al 3%.
- S-EST 3: Resistencia compresión a 7 días no inferior a 1,5 MPa. Contenido de cemento no inferior al 3%.

Características	Unidad	Norma	Tipo de suelo estabilizado		
			S-EST1	S-EST2	S-EST3
Contenido de cal o de cemento	% en masa del suelo seco		≥2	≥3	
Índice CBR a 7 días	-	UNE 103502	≥6	≥12	
Compresión Simple, a 7 días*	MPa	NLT-305	-	-	≥1,5
Densidad (Próctor Modificado)	% de la densidad máxima	UNE 103501	>95**	>97	>98
* Para la realización de estos ensayos, las probetas se compactarán, según la NLT-310, con la densidad especificada en la fórmula de trabajo					
**Para la capa de coronación de la categoría de explanada E1 definida en la norma 6.1. IC de Secciones de firme, este valor será del noventa y siete por ciento (97%)					

Tabla 24. Especificaciones del suelo estabilizado in situ

Adicionalmente, en la capa superior de las empleadas en la formación de las explanadas, el valor del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga del ensayo de carga con placa (E_{v2}), según NLT-357, será superior al valor especificado en la Tabla 25. La determinación deberá llevarse a cabo transcurridos entre catorce días (14d) y veintiocho días (28d) desde la ejecución.

Tipo de Suelo Estabilizado	S-EST1	S-EST2	S-EST3
E_{v2} (MPa)	60	120	300

Tabla 25. Valor mínimo del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga en función del suelo estabilizado

Además de las especificaciones de capacidad portante y densidad de la Tabla 24, el suelo estabilizado no presentará asiento en el ensayo de colapso realizado según la NLT-254, ni hinchamiento en el ensayo de expansión según la UNE 103601 (hinchamiento libre en edómetro). Si el suelo que se vaya a estabilizar presentara hinchamiento o colapso en los ensayos mencionados, se comprobará que este desaparece en el suelo estabilizado en ensayos realizados a las veinticuatro horas (24h) de su mezcla con el conglomerante. Si a esta edad siguiera presentando hinchamiento o colapso se repetirán los ensayos a los tres días (3d) o a los siete días (7d).

La reducción de la plasticidad que se conseguirá tras el tratamiento, será [111]:

- En los suelos con índice de plasticidad inferior a 35, esta se reducirá a menos de 15.
- En los suelos con índice de plasticidad superior a 35, esta se reducirá al menos a la mitad.

Los suelos estabilizados no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o de alteración física o química apreciables bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en el lugar de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras o a otras capas del firme, o contaminar los suelos o corrientes de agua.

Para determinar la inalterabilidad del material. Si se considera conveniente, para caracterizar los componentes del suelo que puedan ser lixiviados y que puedan significar un riesgo potencial para el medio ambiente o para los elementos de construcción situados en las proximidades, se aplicará la NLT-326 [20].

En el caso de los suelos estabilizados con cal, en la fabricación de las probetas para la realización del ensayo Próctor modificado según la UNE 103501, entre la mezcla del suelo con cal y la compactación deberá transcurrir un tiempo semejante al previsto entre esas mismas operaciones en el proceso de ejecución de las obras.

Uno de los problemas principales de este tipo de estabilización de suelos es el escaso margen de tiempo existente entre el inicio de fraguado (prácticamente con la aportación del agua a la mezcla) y el acabado de los trabajos de compactación, unas dos horas; este problema, aunque no se solucione totalmente, se mejora con la adición de un 2-4% más de agua de la deducida por el ensayo Próctor, que además mejora los resultados, aunque no exista retraso en la finalización del compactado. Algunos autores recomiendan el uso de retardadores de fraguado, pero la experiencia en caminos rurales no avala este procedimiento para alargar el tiempo disponible para la obra.

Como he indicado en ocasiones anteriores, vamos a centrar la investigación en estabilizaciones de suelos con elevada plasticidad por lo que quedan expuestas en este documento las prescripciones relativas a la estabilización de suelos con cal.

Existen diversas fuentes [68, 72, 86] donde se indica que la resistencia de una explanada estará asegurada si tras el tratamiento del suelo con cal, en los ensayos en LABORATORIO hasta conseguir, a la humedad óptima y densidad máxima, se cumple:

- CBR (con inmersión de 4 días) ≥ 20
- IP ≤ 12

Una vez fijada la dosificación se deben romper probetas cilíndricas normalizadas, comprobando que la resistencia media a compresión después de 7 días de curado, alcanza 800 kPa.

La proporción de cal no debe superar el 8%. Un exceso de cal en la mezcla con el suelo no sólo no mejora, sino que la hacer perder calidad, dando lugar aun conjunto excesivamente “graso”.

Otra condición, dentro de este ámbito es la verificación del comportamiento de la mezcla ante el riesgo de heladas, en caso de que este sea previsible en obra. Si bien no existen normas generales para evaluar esta incidencia y se suele recomendar que no se aplique el tratamiento si existe el riesgo de que la capa sea afectada por el fenómeno del hielo, la guía técnica del LCPC-SETRA, establece como recomendación que este se prevea no aparezca antes de que la capa tenga una edad mínima de tres meses y que, a dicha edad, tenga una resistencia a compresión simple (sobre probeta de dimensiones $h=10\text{cm}$ y $d=5\text{ cm}$ compactada al 98,5 PN) que cumpla: $RC \geq 2,5\text{ MPa}$.

3.4.1 Suelo a estabilizar

Los materiales que se vayan a estabilizarse in situ con cal o con cemento serán suelos de la traza u otros materiales locales que no contengan en ningún caso materia orgánica, sulfatos, sulfuros, fosfatos, nitratos, cloruros u otros compuestos químicos en cantidades perjudiciales (en especial para el fraguado, en el caso de que se emplee cemento). Los materiales que se vayan a estabilizar con cemento no presentarán reactividad potencial con los álcalis de éste. En materiales sobre los que no exista suficiente experiencia en su comportamiento en mezclas con cemento, realizado el análisis químico de la concentración de SiO_2 y de la reducción de la alcalinidad R, según la UNE 146507-1, el material será considerado potencialmente reactivo si:

- $\text{SiO}_2 > R$ cuando $R \geq 70$
- $\text{SiO}_2 > 35 + 0,5R$ cuando $R < 70$

La Tabla 26 resume las características que han de tener los suelos según el PG-3 [26] para que sean susceptibles de estabilización para obtener cada uno de los tipos de suelos estabilizados. Estas propiedades se explican en los apartados siguientes de forma detallada.

CARACTERÍSTICA		S-EST1	S-EST2	S-EST3
Granulometría UNE -EN 933-2 [51]	Cernido UNE 80	100		100
	Cernido UNE 2	-		>20
	Cernido UNE 0,063	≥15		<35
Materia Orgánica UNE 103204 [40]		<2	<1	
Sulfatos solubles (SO ₃) UNE 103201 [38]		<1 *		
IP. UNE 103104 [37]		≥12	≥12 y ≤40**	≤15
LL. UNE 103103 [36]		-	≤40	
* Si, SO ₃ >0,5%, se incrementa el control				
** Si IP>40, mezcla suelo-cal en dos etapas				

Tabla 26. Características que ha de cumplir un suelo para ser susceptible de estabilización según PG-3

Granulometría

Según PG-3 [26], los suelos que se vayan a estabilizar in situ con cal, no deberán contener partículas de tamaño superior a ochenta milímetros (80 mm) o a la mitad del espesor de la tongada compactada. El rechazo del tamiz 0,063 UNE será inferior al ochenta y cinco por ciento (85%), en peso, según indica Tabla 27.

Tipo de suelo estabilizado	cernido acumulado (%en masa)	
	Abertura de los tamices UNE-EN 933-2 (mm)	
	80	0,063
S-EST1 y S-EST2	100	≥15

Tabla 27. Granulometría del suelo en las estabilizaciones con cal según PG-3

Para caminos rurales, con aproximadamente 15 cm de suelo estabilizado, y considerando que la granulometría del árido no sea superior a 1/3 del espesor de la tongada, deberá ser inferior a 50 mm, y tal y como se indica en la tabla siguiente [86]:

Tipo de suelo estabilizado	% en masa que pasa		
	Abertura de los tamices UNE-EN 933-2 (mm)		
	50	0,4	0,08
S-EST1 y S-EST2	100	≤75	≥35

Tabla 28. Granulometría del suelo en las estabilizaciones con cal en caminos rurales

Composición Química

Los suelos que se vayan a estabilizar in situ con cal o con cemento cumplirán lo indicado en la Tabla 29.

Características	Norma	Tipo de suelos estabilizado		
		S-EST1	S-EST2	S-EST3
Materia orgánica (MO)(%en masa)	UNE 103204	<2	<1	
Sulfatos solubles (SO ₃)(%en masa)	UNE 103201	<1		

Tabla 29. Composición química del suelo a estabilizar

En el caso de ser el contenido de sulfatos solubles expresados como SO_3 , superior al medio por ciento (0,5%) en peso sobre muestra total, se incrementará el control de producción, para delimitar y asegurar que no se utilizan suelos que superen los valores permitidos. Adicionalmente en el proceso de ejecución se procurará que estos sulfatos se distribuyan homogéneamente en la capa, para disminuir su potencial efecto.

La materia orgánica, retrasa los efectos de la cal en los suelos e inhibe las reacciones puzolánicas de cementación a largo plazo

Plasticidad

Los suelos que se vayan a estabilizar in situ con cal cumplirán lo indicado en la Tabla 30. Si el índice de plasticidad fuera superior a cuarenta (40), el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá ordenar que la mezcla del suelo con la cal se realice en dos (2) etapas.

Tipo de Suelo Estabilizado	Índice de Plasticidad (IP)
	UNE 103104
S-EST1	≥ 12
S-EST2	≥ 12 y ≤ 40

Tabla 30. Plasticidad del suelo en las estabilizaciones con cal

Por su parte, los suelos que se vayan a estabilizar in situ con cemento cumplirán lo indicado en la Tabla 31. Cuando interese utilizar suelos con un índice de plasticidad superior al indicado, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá ordenar un tratamiento previo con cal, con una dotación mínima del uno por ciento (1%) en masa del suelo seco, de manera que el índice de plasticidad satisfaga las exigencias de la Tabla 31.

Características	Norma	Tipo de suelos estabilizado		
		S-EST1	S-EST2	S-EST3
Límite Líquido (LL)	UNE 103103	-	≤ 40	
Índice de Plasticidad (IP)	UNE 103104	≤ 15		

Tabla 31. Plasticidad del suelo en las estabilizaciones con cemento

3.4.2 Ensayos a realizar en suelos estabilizados

Los ensayos a realizar sobre una muestra de suelo estabilizado, comprenden los ensayos que ya fueron expuestos en el apartado 3.3 sobre los ensayos precisos para caracterizar un suelo, mas otros específicos para comprobar que cumple todas las prescripciones técnicas aplicables.

Un dato a tener en cuenta es que es preciso emplear el menor tiempo posible en el ensayo hasta terminar la compactación (Próctor normal o modificado), para que ésta se haya logrado antes de que la hidratación del conglomerante se halle muy avanzada; así casi toda el agua se hallará disponible para la compactación. A veces, la humedad óptima resulta insuficiente para la completa hidratación del conglomerante empleado. La humedad óptima para una muestra de suelo-cal o suelo-escoria es superior a la que

corresponde al mismo suelo sin mezcla alguna; en cambio, la densidad máxima para la mezcla resulta inferior que para el suelo simple.

Otros ensayos que hemos de realizar sobre las probetas de suelo estabilizado en laboratorio son los siguientes:

Resistencia a compresión de muestras cilíndricas

Se realiza conforme a la norma UNE 103400[43] “Ensayo de ruptura a compresión simple en probetas de suelo”. Las probetas se fabrican mediante el impacto de la maza Army en un molde Harvard ($\varnothing = 38,1$ mm y $h = 76,2$ mm) con la energía y humedad del Próctor Modificado. Las probetas se almacenan dentro de la cámara húmeda con las siguientes condiciones: temperatura de 20°C y una humedad relativa del aire del interior de 95%. Se mantienen en una cámara húmeda durante diferentes periodos de tiempo a los que van a ser ensayadas. En nuestro caso a 0, 3, 7, 28 y 90 días.

Después se colocan las probetas sucesivamente sobre el plato inferior de la máquina de ensayos a compresión de modo que queden bien centradas y que al apoyar el plato superior sobre ellas, el asiento sea uniforme. Se hace descender el plato superior a velocidad constante de carga (1,5 mm/min) y se hace la lectura de la presión en el momento de la rotura. En el caso de estabilizaciones suelo-cemento, está demostrado que la resistencia a compresión aumenta aproximadamente linealmente con la cantidad de cemento en la mezcla. Además la reducción de la porosidad en la mezcla compactada mejora la resistencia del suelo-cemento. No se ha encontrado una relación entre la resistencia a compresión y la relación agua/cemento, pero sí está íntimamente relacionado con la relación poros (agua+aire)/cemento [84].

Estabilidad dimensional

La evolución de la estabilidad dimensional puede ser llevada a cabo con arreglo a diferentes Normas. No obstante, la norma ASTM D-4792 [67] ha sido considerada en esta Tesis como la más útil e interesante, con alta aceptación en el sector de la construcción y obra civil.

Para ello, y según prescribe la misma, en un recipiente cilíndrico plástico de pared gruesa, sumergido en agua hasta el nivel adecuado, se introduce la muestra de suelo a ensayar, compactada con su humedad y densidad del Próctor empleado en obra. Se dispone el sistema de medida de desplazamientos verticales a base de relojes comparadores o captadores de desplazamiento inductivos LVDT que permita tomar datos cada 6 horas; finalmente, se calienta el baño hasta el nivel de temperatura previsto de $70 \pm 2^\circ\text{C}$ y se mantiene así durante toda la duración del ensayo, que es de siete días. Los resultados de hinchamiento del material, se expresan como el cociente adimensional en porcentaje entre la dilatación absoluta medida, y la dimensión vertical original.

Como complemento a estos resultados, cabe considerar que la especificación americana ASTM-D-2940:98 [4], contempla las características a exigir a los materiales granulares que se usen como bases o subbases en Carreteras o Aeropuertos. Dicha Norma admite la

posibilidad de utilizar escorias, siempre y cuando su hinchamiento analizado con el método anteriormente descrito, no supere el valor de 0,5%.

Ensayo de lixiviación.

A continuación se revisará la normativa actual vigente, en materia medio ambiental, para la gestión y valorización de residuos en España.

La ley 10/1998, del 21 de abril, de Residuos [12], establece que “Las operaciones de gestión de residuos se llevarán a cabo sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar procedimientos ni métodos que puedan perjudicar al medio ambiente y, en particular, sin crear riesgos para el agua, el aire o el suelo, ni para la fauna o flora, sin provocar incomodidades por el ruido o los olores y sin atentar contra los paisajes y lugares de especial interés”.

Además, una de las obligaciones de los generadores de residuos, según la ley antes citada, es que “...favorezcan la prevención en la generación de residuos y faciliten su reutilización o el reciclado o valorización de sus residuos, o permitan su eliminación de la forma menos perjudicial para la salud humana y el medio ambiente.”

En este sentido, el órgano competente en dar la Autorización Administrativa para las actividades de valorización son las propias Comunidades Autónomas.

En relación con las escorias de acería hay actualmente al menos tres regulaciones diferentes, de distintas Comunidades Autónomas: el Decreto 34/2003 del 18 de febrero [9], de la Comunidad Autónoma del País Vasco, el Decreto 104/2006 del 19 de octubre de la Comunidad Autónoma de Cantabria [10] y el Decreto 32/2009 de 24 de febrero de la Comunidad de Cataluña [8], que regulan el régimen jurídico aplicable a la gestión de escorias en cada una de las comunidades con el objeto de fomentar su valorización, asegurando, asimismo, una adecuada protección del medio ambiente y la salud de las personas. La caracterización medio ambiental se realiza mediante un ensayo de lixiviación.

En particular, el Decreto 104/2006 de Cantabria, menciona diferentes instrucciones que recogen distintos empleos para las escorias, donde destaca lo estipulado por el “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes” en relación en este caso, como árido en obras viales, en distintas zonas de la sección transversal de la carretera.

La Tabla 32 recoge los parámetros y sus valores máximos permitidos para la valorización de escorias como material constituyente de la explanada de obras viales requeridos por los Decretos de las comunidades autónomas del País Vasco, Cantabria y Cataluña.

El Decreto 34/2003 exige, para la caracterización medio ambiental de las escorias, seguir la metodología descrita en la norma UNE EN 12457-3 [61], mientras que el Decreto 104/2006 de Cantabria y el Decreto 32/2009 de la Comunidad de Cataluña, especifica la norma UNE EN 12457-4 [61]. La diferencia entre ambas normas señaladas

anteriormente reside en que, en la primera de ellas, la extracción de algunos de sus constituyentes se realiza en dos fases, mientras que, en la segunda norma mencionada, se ejecuta en una única etapa.

	Unidades	Decreto 34/2003 [9]	Decreto 104/2006 [10]	Decreto 32/2009 [8]
Ba	mg/kg	17	20	20
As	mg/kg	-	0,5	0,5
Cd	mg/kg	0,009	0,04	0,04
Cu	mg/kg	-	2	2
Cr	mg/kg	2,6	0,5	0,5
Hg	mg/kg	-	0,01	0,01
Ni	mg/kg	0,8	0,4	0,4
Pb	mg/kg	0,8	0,5	0,5
Zn	mg/kg	1,2	4	4
Mo	mg/kg	1,3	0,5	0,5
Se	mg/kg	0,007	0,1	0,1
Sb	mg/kg	-	0,06	0,06
V	mg/kg	1,3	-	-
Cloruro	mg/kg	-	800	800
Fluoruro	mg/kg	18	10	18
Sulfato	mg/kg	377	1.000	1.000
Índice de fenol	mg/kg	-	1	-
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/kg	-	4.000	-

Tabla 32. Comparación de los valores límites permitidos en los distintos parámetros cuantificados en un ensayo de lixiviación según varios Decretos de valorización de escorias siderúrgicas.

Existen diferentes normas para realizar el ensayo de lixiviación:

- Orden de 13 de octubre de 1989 del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo donde se exponen diferentes métodos de caracterización de los residuos tóxicos y peligrosos (BOE nº 270, de noviembre de 1989) [24]
- NLT-326:00 “Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras”. [20]
- UNE EN 12457-3 ó 4:2003 “Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 3: ensayo por lotes de dos etapas con una relación líquido-sólido de 2l/kg y 8l/kg con un tamaño de partícula inferior a 4 mm ó Parte 4: ensayo por lotes de dos etapas con una relación líquido-sólido de 10 l/kg con un tamaño de partícula inferior a 10 mm” [61]. En la presente Tesis emplearemos la norma UNE EN 12457-3.

Durabilidad

Para tener una idea del comportamiento de nuestro suelo estabilizado con escoria a largo plazo, establecemos dos ensayos: humedad-sequedad y congelación-deshielo de probetas de la mezclas suelo-escoria y de la mezcla suelo-cal, que nos servirá de

referencia. Para cada uno de los ensayos seguimos las normas NLT 302-72 [18] y NLT 303-72 [19], respectivamente. Son normas para probetas de suelo-cemento, por lo que no se adaptan exactamente a nuestro material, pero son las más cercanas al mismo.

Según la Asociación del Cemento Portland, la dosificación adecuada de cemento es la mínima que cumple las siguientes condiciones:

1) Las pérdidas de material desagregado durante los doce ciclos no deben ser mayores de:

Tipo de Suelo	% Pérdidas de peso
Arenosos: A-1-a; A-1-b; A-3; A-2-4; A-2-5	14
Limosos: A-2-6; A-2-7; A-4; A-5	10
Arcillosos: A-6; A-7; A-7-5; A-7-6	7

2) El aumento de volumen durante los ensayos no debe exceder en más de 2% de la probeta recién terminada.

3) El máximo contenido de humedad no debe sobrepasar al necesario para llenar los huecos de la probeta en el momento de ser fabricada.

Como la medida de la resistencia es relativamente rápida, mucho más que la de ciclos de Humedad-Sequedad, Hielo-Deshielo, es el procedimiento recomendable en casos normales para establecer la dosificación de probetas suelo-cemento. Si se dispone del tiempo suficiente para estudiar la dosificación y la obra lo merece es aconsejable el empleo de ambos métodos.

Las proporciones de cemento suelen oscilar entre las siguientes cifras:

Tipo de suelo	% en peso de cemento	Proporciones que se deben ensayar
A-1-a	3 a 5	3-5-7
A-1-b	5 a 8	4-6-8
A-2	5 a 7	5-7-9
A-3	7 a 11	7-9-11
A-4	7 a 12	8-10-12
A-5	8 a 13	8-10-12
A-6	9 a 15	10-12-14
A-7	10 a 16	11-13-15

Resistencia al desgaste es una propiedad no evaluada en el suelo-cemento cuando se utiliza en estructuras de pavimentos, ya que tal como lo ha demostrado la experiencia y diversas investigaciones, es un material excelente para soportar esfuerzos perpendiculares a la superficie, pero muy deficiente para resistir las fuerzas abrasivas del tránsito circulando directamente sobre el. En este tipo de aplicaciones se recurre a proteger las capas de suelo-cemento colocando sobre ella una **capa de rodadura** de tratamientos superficiales asfálticos. Se ha observado una mejora en la resistencia al desgaste cuando se incrementa el contenido de cemento y se utilizan suelos granulares no plásticos. El suelo-cemento presenta una mayor resistencia al desgaste provocado por la acción erosiva de las lluvias, que por la acción erosiva del tráfico vehicular. Es

importante mencionar que un material resistente al desgaste bajo una capa de rodadura ayuda a reducir problemas de bombeo de finos y escalonamiento.

3.4.3 Acción de la cal sobre los suelos arcillosos

Reacciones químicas producidas por la cal en las arcillas

Los efectos de la cal sobre los suelos arcillosos pueden ser divididos en dos grupos principales de reacciones [137] [167] [72]:

- Debido a reacciones rápidas (minutos/horas): estabilización por modificación.
- Provenientes de reacciones a largo plazo (semanas/meses); pueden asimilarse a una estabilización por cementación.

Las partículas de arcilla se encuentran cargadas negativamente en la superficie de cada una de sus láminas. Esto provoca que tanto los cationes libres presentes en el suelo como las moléculas de agua halladas en la cercanía sean atraídos por la superficie de las láminas de arcilla. Por tanto, se forma alrededor de cada una de las láminas de arcilla una capa doble que produce una separación entre las partículas. Esta separación produce que dicha arcilla sea muy inestable químicamente y, por tanto, muy susceptible a los cambios volumétricos producidos cuando ésta entra en contacto con el agua.

Al añadir cal a las arcillas, los cationes de cal (Ca^{++}) producen un intercambio iónico con los elementos más inestables, típicamente en arcillas el potasio, el sodio y el litio, entre otros, dando lugar a lo que se llama floculación. La consecuencia química de este intercambio iónico es que alrededor de las partículas de arcilla se produce una disminución del espesor de la capa doble. Además de lo anteriormente señalado, la estructura de una arcilla no estabilizada es diferente a la que se le ha añadido cal. En el primer caso ésta se encuentra ordenada, mientras que en el segundo y como consecuencia de la disminución de la capa doble cambia su estructura por otra de tipo dispersa. Este último fenómeno hace que las mezclas de suelo y cal tengan una contextura más granular lo que facilita su puesta en obra. Como consecuencia de las dos reacciones señaladas anteriormente los suelos estabilizados con cal incrementan la resistencia inicial –producida a corto plazo debido a la mayor densidad originada por el acercamiento de sus partículas- y además la disminución del módulo de deformación de dicha mezcla por la misma razón anterior.

Por otro lado, las reacciones a largo plazo que se producen en suelos estabilizados con cal, son de tipo puzolánicas. Según Lea [135], las puzolanas son un material que, por sí solo, no presenta propiedades cementantes. No obstante al ser mezclado éstos con cal, y lógicamente también con agua, presentan propiedades cementantes que generan enlaces físicos entre las partículas siendo esta última unión más resistente y fuerte que la conseguida sólo por la atracción eléctrica [72]. Como toda reacción química, su desarrollo se encuentra condicionado a varios factores. El principal de estos, es que las reacciones se producen en un ambiente de pH básico. La cal, al ser una base fuerte, eleva el pH del suelo por encima de 12 lo que produce un incremento en la solubilidad de sus componentes silíceos y aluminosos de la arcilla, que reaccionan con el calcio

para formar silicatos cálcicos hidratados y aluminados cálcicos hidratados similares a los formados en la pasta del cemento.

Esta reacción de tipo “Puzolánico” o de fijación química de cal libre, es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas. La duración de esta reacción depende de la temperatura ambiente y de la naturaleza de la arcilla. Se sitúa normalmente entre algunos meses y dos años.

En este sentido EADES y GRIM [94] especifican un procedimiento experimental para determinar el porcentaje óptimo de cal requerido para estabilizar un suelo. Este método se basa en buscar el porcentaje mínimo de cal que produzca un pH en las mezclas estudiadas de 12,4. El menor porcentaje correspondiente será el óptimo a emplear. Este procedimiento es recogido por la norma ASTM D 6275 [6].

En la presente investigación, se han realizado los trabajos de manera, que puedan ejecutarse en la realidad, por eso, lo que se hizo fue utilizar de 1 a 3 proporciones habituales de cal en la estabilización de arcillas y quedarse con la que proporciona mejores resultados. A partir de esa proporción de cal elegida, se tomó una proporción similar algo superior de escoria, y se compararon los resultados con las muestra patrón de cal.

Ya producidas todas las reacciones descritas anteriormente, por último, se produce la carbonatación de la cal. El dióxido de carbono (CO_2) presente en el aire comienza a combinarse lentamente con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formando calcita CaCO_3 . Éste último fenómeno, también produce la cementación de las partículas de arcilla aunque, a diferencia de los anteriores, se produce de forma tardía y lenta.

Modificaciones observadas en el laboratorio tras la estabilización con cal:

1. Disminución de la humedad natural del suelo. Este efecto solo se produce cuando la cal se aplica en forma de cal viva en polvo. El proceso se basa en que para la hidratación de los óxidos de calcio existentes en la adición y su conversión en hidróxidos cálcicos, se toma el agua precisa de la presente en la masa de suelo.
2. Modificación de la granulometría. Este hecho se justifica en los mecanismos de floculación y aglomeración de las partículas que se originan por el intercambio iónico en la superficie de las mismas.
3. Aumento de la permeabilidad. El efecto anterior de modificación de la granulometría sí puede ser apreciado de forma indirecta en otros cambios de propiedades físicas asociadas a la distribución granulometría de un suelo: es el caso de la permeabilidad.
4. Mayor trabajabilidad. Las consecuencias del posible secado de la masa del suelo, de la reducción del volumen de partículas pequeñas, de la pérdida de las fuerzas de unión entre partículas de arcilla y de la alteración de la disposición ordenada y laminar de la misma suele ser un aumento de la trabajabilidad de los suelos arcillosos por la aplicación de la cal. El efecto que se logra es la

conversión de un suelo típicamente cohesivo en otro de comportamiento característico tipo granular, más arenoso.

5. Una disminución del índice de plasticidad (IP) o del valor del azul de metileno (VA). La aplicación de la cal provoca de manera generalizada un aumento del límite plástico sin afectar al límite líquido. Como consecuencia de ello se identifica una reducción en el índice de plasticidad. Otra característica de este efecto es que es progresivo, es decir, se incrementa con la cantidad de cal aplicada. Sin embargo, esta reducción no es lineal sino regresiva o asintótica, teniendo un límite a partir del cual el aumento de cal no produce reducciones sustanciales ni mucho menos proporcionales de la plasticidad del suelo.
6. Reducción del potencial de cambios volumétricos. Otra consecuencia de los fenómenos de reducción de la capa doble y el agua entre las partículas de las arcillas lograda con la aplicación de la cal es la disminución de la susceptibilidad de las mismas al agua, entendida principalmente ésta como la propensión a los cambios de volumen ante modificaciones del nivel de humedad del suelo.
7. Modificación de las características de compactación: Disminución de la densidad máxima Próctor y aplanamiento de la curva Próctor. Otra consecuencia en las propiedades de compactación de la aplicación de la cal es el aumento de la humedad necesaria para conseguir la densidad máxima asociada a un nivel de energía dado, o lo que se conoce como “humedad óptima”.
8. Un aumento del CBR. La reordenación de las partículas provocada por la ruptura de la distribución laminar y la reducción de la capa doble también tiene una manifestación en las propiedades mecánicas de los suelos. El aumento es muy rápido para pequeños porcentajes de cal y la progresión aunque en ocasiones reduce la velocidad de aumento con la cantidad de cal, aparece con una tendencia creciente casi indefinida.
9. Mayor resistencia a largo plazo. El efecto en el que interviene la reacción puzolánica se plasma en un incremento muy importante de la resistencia de un suelo a medio o largo plazo. Esta mejora requiere un plazo que va desde varios días a incluso meses. En comparación con el fraguado y endurecimiento del cemento, el tratamiento con cal suele precisar bastante tiempo para alcanzar un mismo nivel de eficacia en sus resultados.

Como consecuencia de los anteriores efectos, la acción de la cal produce un notable incremento de la resistencia y rigidez del suelo que pierde plasticidad y ductilidad. En obra se constata que los materiales húmedos pierden su carácter pegajoso y toman un aspecto arenoso. Su manipulación es más fácil y tanto su capacidad portante como su comportamiento en el extendido son netamente mejorados. En general una dosificación del orden del 1% de cal viva es suficiente en algunos casos para conseguir éstas modificaciones.

Otros estabilizadores basados en cal

Se trata de materiales especiales que comportan en su composición una cantidad importante de cal libre, convenientemente fabricados para responder a las necesidades específicas de las técnicas de construcción de carreteras. Es recomendable proceder a

una identificación exhaustiva de estos productos, conforme a las normas o documentos técnicos, antes de su utilización en la obra.

Generalmente, se tratan de mezclas formadas por:

- Escoria granulada de horno alto + cal + áridos.
- Cenizas volantes sílico – aluminosas + cal + áridos.
- Cenizas volantes sulfo – cálcicas + áridos.
- Puzolanas molidas + cal + áridos.
- Escorias cálcicas + áridos

En cualquier caso se recomienda identificar perfectamente estos tipos de materiales siguiendo los procedimientos en vigor.

3.5 ZAHORRAS

Uno de los objetivos de la presente Tesis es la utilización de las escorias negras como zahorras artificiales en la construcción de firmes de caminos rurales, por lo que tendremos que ajustarnos a lo especificado en el artículo 510 zahorras del PG-3[26].

Definiciones y características generales del árido y especificaciones de la unidad terminada.

El Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes en su artículo 510 [26], define como zahorra el material granular, de granulometría continua, utilizado como capa de firme. La zahorra artificial es un material granular de granulometría continua formado por árido triturado total o parcialmente, en la proporción mínima que se especifique en cada caso. La zahorra natural es el material formado básicamente por partículas no trituradas. En la Tabla 33 se muestran las características de zahorras según el PG-3.

Para las categorías de tráfico pesado T2 a T4 se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho, en cumplimiento del Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 [27], siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en el PG-3, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá fijar especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear materiales cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.

Las zahorras artificiales se emplean para la formación de capas de base o subbase con cualquier categoría de tráfico pesado.

Las zahorras artificiales son materiales sin cohesión que resisten por rozamiento interno. Por tanto, la aportación estructural de una capa de zahorra artificial dependerá de su espesor, de su coeficiente de rozamiento interno y de la capacidad resistente de la capa sobre la que se apoya.

El pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras (PG-3) en su artículo 510. Zahorras, dispone una serie de granulometrías recomendadas y características que los áridos han de cumplir para su utilización como zahorras.

La granulometría del material, según la UNE-EN 933-1 [51], deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados en la Tabla 33 para las zahorras.

En todos los casos, el cernido por el tamiz 0,063 mm de la UNE-EN 933-2 [52] será menor que los dos tercios (2/3) del cernido por el tamiz 0,250 mm de la UNE-EN 933-2.

Los materiales para las capas de zahorra no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o de alteración física o química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en el lugar de empleo.

Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras o a otras capas del firme, o contaminar el suelo o corrientes de agua.

Una vez obtenida la fórmula de trabajo, preparación del material, extensión y compactación de la zahorra se procederá a comprobar las especificaciones sobre la unidad terminada indicadas en la Tabla 33.

El **árido siderúrgico** de acería deberá presentar una **expansividad** inferior al cinco por mil (**0,5%**), según la UNE-EN 1744-1 [59] (en nuestro caso aplicaremos las normas ASTM D-4792 [67] y ASTM D 2940 [4]). La duración del ensayo será de veinticuatro horas (24 h) cuando el contenido de óxido de magnesio, según la UNE-EN 196-2 [48], sea menor o igual al cinco por ciento (5%) y de ciento sesenta y ocho horas (168 h) en los demás casos.

El árido siderúrgico procedente de horno alto no presentará desintegración por el silicato bicálcico ni por el hierro, según la UNE-EN 1744-1 [59].

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares deberá fijar los ensayos para determinar la inalterabilidad del material granular. Si se considera conveniente, para caracterizar los componentes que puedan ser **lixiviados** y que puedan significar un riesgo potencial para el medio ambiente o para los elementos de construcción situados en sus proximidades se empleará la NLT-326 [20].

GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO UNE EN 933-1	TAMICES UNE	ZAHORRAS NATURALES			ZAHORRAS ARTIFICIALES		
		ZN 40	ZN 25	ZN 20	ZA 25	ZA 20	ZAD 20
	50	100	-	-	-	-	-
	40	80-95	100	-	100	-	-
	25	65-90	75-95	100	75-100	100	100
	20	54-84	65-90	80-100	65-90	75-100	65-100
	8	35-63	40-68	45-75	40-63	45-73	30-58
	4	22-46	27-51	32-61	26-45	31-54	14-37
	2	15-35	20-40	25-50	15-32	20-40	0-15
	0,5	7-23	7-26	10-32	7-21	9-24	0-6
0,25	4-18	4-20	5-24	4-16	5-18	0-4	
0,063	0-9	0-11	0-11	0-9	0-9	0-2	
CARACTERÍSTICAS GENERALES		ZAHORRAS NATURALES			ZAHORRAS ARTIFICIALES		
Química y Limpieza		SO ₃ (UNE 1744-1) < 0,5% para materiales en contacto con capas tratadas con cemento. <1%, en los demás casos Exentos de terrones de arcilla, marga y materia orgánica					
Coef. Limpieza (NLT-172) o anejo C (UNE 146130)					<2%		
Equivalente de Arena (UNE EN 933-8)		T00-T1	T2-T4 Arcén T0-T2	Arcén T3-T4	T00-T1	T2 a T4 Arcén T00-T2	Arcén T3-T4
		EA>35	EA>30	EA>25	EA>40	EA>35	EA>30
Plasticidad (UNE 103104)		T00 a T2	T4	Arcenes T32 y T4 no pavimentados	T00 a T4 y arcenes		Arcenes T32 y T4 no pavimentados
		NP	LL<25 e IP<6	LL<30 e IP<10	NO PLASTICO		LL<30 e IP<10
Desgaste de los Ángeles (UNE EN 1097-2) (*)		T00 A T2	T3, T4 y Arcenes		T00 A T2	T3, T4 y Arcenes	
		LA<35	LA<40		LA<30	LA<35	
		* En el caso de áridos siderúrgicos, el coef. de desgaste de los ángeles podrá ser superior en 5 unidades a lo indicado siempre que la composición granulométrica sea la del huso ZAD20. Si van a emplearse como zahorras naturales podrá ser superior hasta en 10 unidades					
Índice de Lajas (UNE EN 933-3)					IL<35		
Partículas Tritura (Angulosidad) (UNE EN 933-5)					T00-T0	T1 y T2 Arcén T00 a T0	T3 y T4 Resto Arcenes
					100%	75%	50%
ESPECIFICACIONES DE LA UNIDAD TERMINADA							
CARACTERÍSTICA	ZAHORRAS NATURALES			ZAHORRAS ARTIFICIALES			
Densidad de Referencia (UNE 103501)	98% PROCTOR MODIFICADO			T00 y T0	T3, T4 y Arcenes		
				≥100% PM	≥98% PM		
Capacidad Portante. Carga con placa (MPa) (NLT-357)	T3	T4 y Arcenes		T00 a T1	T2	T3	
	E _{v2} >80	E _{v2} >60		E _{v2} >180	E _{v2} >150	E _{v2} >100	
				T4 y arcenes	E _{v2} >80		
Relación Módulos	K=(E _{v2} /E _{v1}) < 2,2						

Tabla 33. Características de zahorras según PG-3

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA BLANCA DE HORNO DE CUCHARA (LFS)

4 CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA BLANCA DE HORNO DE CUCHARA (LFS)

4.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de esta Tesis Doctoral es el estudio del aprovechamiento de escorias blancas de horno cuchara LFS en la estabilización de suelos utilizados en construcción de caminos rurales, por lo que, en primer lugar, es necesario conocer el producto, sus características y propiedades antes de su utilización.

Las escorias blancas presentan desde un punto de vista meramente organoléptico un color blanquecino cenizo y un aspecto pulverulento, con inclusiones de pequeñas partículas de acero metálico de tamaño en torno a las décimas de milímetro. Esta primera impresión nos permite dirimir una primera cuestión: la escoria blanca de horno cuchara por su tamaño y composición, podría emplearse como sustituto de la cal o del cemento en estabilizaciones, aprovechando las reacciones de hidratación y carbonatación de algunos de sus componentes.

En éste capítulo se estudian tanto las características físicas y químicas, como las mineralógicas y microestructurales de dos tipos de escoria (**E1** y **E2**) que nos van a permitir conocer el material y comprobar su comportamiento en las mezclas de las que participa. La escoria **E1** procede de la Acería Tubos Reunidos de Amurrio (Álava) y **E2** procede de la Acería Sidenor en Basauri (Vizcaya). Será **E1** la que estudiemos en profundidad y la que empleemos con posterioridad en los siguientes estudios de estabilización suelo-escoria.

En el capítulo 2 quedó descrito el proceso de obtención de LFS y el tratamiento previo que han de sufrir antes de su utilización.

4.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS LFS

Para el estudio de las escorias blancas se han utilizado diferentes procedimientos de examen, aplicando técnicas analíticas específicas que han permitido caracterizar su microestructura interna y establecer su composición química detallada. Estas técnicas ya han sido utilizadas con éxito en otras Tesis Doctorales [142] [146] [184], circunstancia que permite estimar este método de estudio para la caracterización de las escorias blancas utilizadas en esta Tesis. Las técnicas y ensayos utilizados han sido los siguientes:

1. Espectrofotometría de absorción atómica, fluorescencia de rayos-X y combustión y análisis de gases, para el análisis químico.
2. Difracción de rayos-X: XRD
3. Espectroscopía de infrarrojos.
4. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial. TGA-DTA
5. Microscopía electrónica de barrido.
6. Microanálisis por energía dispersa de rayos-X.

4.2.1 Análisis Químico

El estudio de la composición química de las escorias resulta especialmente interesante desde el punto de vista de su caracterización como material. Es esencial el conocimiento de los componentes que forman la escoria para establecer cómo va a ser su estructura interna y cómo van a interactuar los diferentes elementos que la forman, de cara a configurar su composición mineralógica y su estructura cristalina.

Los componentes esenciales que encontramos en la escoria LFS, tanto de carácter principal como minoritario, se recogen en la Tabla 34 junto con sus concentraciones. Se muestran los resultados para dos muestras de **E1** (muestra en polvo y muestra aglomerada) y una muestra de **E2**.

Componente	E1		E2
	Fracción Polvo	Fracción Aglomerada	
Fe ₂ O ₃	2,21	4,16	2,57
SiO ₂	17,72	15,43	15,00
CaO	56,75	52,48	51,20
Al ₂ O ₃	6,65	7,83	11,90
MgO	9,56	7,85	8,40
TiO ₂	0,34	0,32	0,39
Na ₂ O	0,07	0,06	-
K ₂ O	0,02	0,02	-
P ₂ O ₅	0,04	0,07	-
MnO	0,29	0,68	0,56
SO ₃	0,86	1,09	1,93
ZnO	-	-	0,110
Cr ₂ O ₃	-	-	0,260
CO ₂	-	-	7,590
C	0,350	1,600	-
Cu	0,003	0,003	-
Pb	0,001	0,001	-
Zn	0,004	0,003	-
Cr	0,301	0,265	-
Ni	0,002	0,003	-
S	0,770	0,750	-
As	0,002	0,003	-
Cd	< 10 ⁻⁴	< 10 ⁻⁴	-
Hg	< 10 ⁻⁴	< 10 ⁻⁴	-
Pérdida Fuego	4%	9,4%	15,6%

Tabla 34. Composición química de LFS (% peso)

Los resultados se refieren tanto a los componentes principales, constituidos fundamentalmente por óxidos, como a otros componentes minoritarios, de interés adicional por su posible influencia en el medio ambiente como metales contaminantes. Se puede observar que las concentraciones de la muestra en polvo y muestra aglomerada de E1, y la muestra E2, no difieren sustancialmente.

A modo de referencia, los elementos más abundantes son los componentes formados por sílice, cal, alúmina y magnesita. Aparecen también concentraciones de hierro, titanio y manganeso en forma de óxidos. Junto con los componentes descritos aparecen trazas de otros como sosa, potasa, fósforo, cromo, níquel, plomo, cobre, zinc, cadmio, mercurio o arsénico que deben ser controlados por su naturaleza contaminante mediante los correspondientes ensayos de lixiviados en los acopios y depósitos, aunque las concentraciones resultantes no son preocupantes al respecto.

De los resultados obtenidos cabe destacar la presencia de óxidos de carácter ácido y básico, de especial importancia en la determinación del potencial hidráulico de la escoria, cuya concentración media se recoge en la Tabla 35.

Tipo de óxido	Concentración Media
CaO	55.0 %
SiO ₂	17.0 %
Al ₂ O ₃	7.0 %
MgO	9.0 %
Otros	5.0 %
TOTAL	93.0 %

Tabla 35. Concentración media de los óxidos presentes en E1.

Estos resultados permiten establecer algunas conclusiones respecto de las características de la escoria blanca LFS:

- Ambas escorias LFS analizadas presenta una alta concentración de silicatos y aluminatos de calcio y magnesita. Estos óxidos son los componentes que determinan más del 90,0% de su composición.
- La concentración de óxidos de soplado, especialmente los de hierro, es muy baja, circunstancia que se estima coherente con las características básicas del proceso de obtención de acero mediante el Horno de Cuchara. La mayor parte del hierro de la Tabla 34 es hierro metálico.
- Los componentes minoritarios no se encuentran en la escoria en concentraciones significativas y no resultan determinantes en los objetivos de estudio propuestos en esta Tesis.
- Las concentraciones de oxígeno están en torno al 35 % del peso total de la muestra, especialmente combinado en forma de sales. Éste dato se corroborará más adelante.

- Las concentraciones de metales pesados perjudiciales para el medio ambiente no son significativas, existiendo trazas de algunos productos metálicos críticos como el plomo, níquel, cadmio, zinc, cobre, arsénico o mercurio. Para descartar cualquier interacción de estos productos en animales o plantas podrá determinarse un estudio más profundo de lixiviados en los acopios, depósitos de escorias o durante su empleo en la formación de otros materiales.
- Se asume que el carbono básicamente estará combinado en forma de calcita, mientras que el azufre forma parte de los sulfatos y sulfuros de calcio presentes en la muestra.

Junto con los componentes descritos se acompañan los contenidos de cal libre, sulfatos solubles, sulfatos totales, sales solubles, sulfuros y cloruros de **E1**, tal y como determina el PG-3 [26] y normas sobre cales, que más adelante tendremos en cuenta cuando utilicemos E1 para la estabilización de suelos.

Valoración de la Cal Libre y de la Magnesia.

La determinación de la presencia de cal libre y magnesia total en la escoria blanca es un factor de especial relevancia para conocer el comportamiento que van a tener desde el punto de vista de su estabilidad volumétrica y dimensional, como ya estudiaron otros autores [108] [163] [101].

La Norma Europea UNE-EN 1744-1 [59] recoge tres formas de determinación de la cal libre en las escorias de fundición de acero. El método de análisis que se ha seguido es el de la solubilización de las escorias con etanodiol en caliente, su filtración posterior una vez disgregadas a nivel molecular y, por último, la valoración de la disolución mediante ácido clorhídrico. La valoración de la magnesia total no está regulada, por lo que para su cuantificación podremos siempre acudir al análisis de la composición química global de la escoria. Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Muestra	E1	
	Fracción Polvo	Fracción Aglomerada
Cal libre	13,00	16,00
Magnesia Total	9,56	7,85

Tabla 36. Cal libre y magnesia total presentes en E1

La valoración que nos propone este ensayo sirve de referencia para determinar la presencia de cal libre en la escoria, a pesar de que en el resultado final vamos a contabilizar una cierta cantidad de óxido de cal combinado con los silicatos y aluminatos, que al entrar en contacto con el etanodiol en caliente va a reaccionar.

Los valores de magnesia total permiten afirmar que las concentraciones de magnesia libre (Periclusa, MgO) o hidratada (Brucita, Mg (OH)₂) van a ser apreciables. Sólo una parte de la magnesia se encuentra combinada con los silicatos o aluminatos en el proceso de sinterización de los componentes que participan en el proceso de fabricación del acero (temperaturas del orden de los 1600° C). La difracción de rayos-X permitirá corroborar esta circunstancia.

Determinación de la Pérdida al Fuego.

El ensayo de pérdida al fuego se realiza de forma semejante a como se hace con el clinker de cemento Pórtland. La pérdida al fuego valora la presencia principalmente tanto de H₂O como de CO₂. Esta circunstancia denota la carbonatación de la cal y de la magnesia en contacto con el CO₂ atmosférico, una vez que se han estabilizado mediante su hidratación. De igual forma, la presencia de H₂O combinada con alguno de los componentes determina fases de hidratación entre los compuestos de la escoria.

Los resultados obtenidos en los ensayos para E1 se recogen en la Tabla 37, donde se observa una mayor pérdida al fuego de la muestra agregada frente a la muestra en polvo, circunstancia que nos hace pensar en un proceso avanzado de agregación y es razonable suponer que la fracción en nódulos debe estar más carbonatada; este extremo se confirma con los resultados de las determinaciones independientes del contenido en carbono, que resulta ser de 1,60 para la fracción en nódulos y tan sólo 0,35 para la fracción en polvo.

Muestra	E1	
	Fracción Polvo	Fracción Aglomerada
Pérdida de Fuego	5,35%	10,56%

Tabla 37. Variaciones dimensionales de E1. Pérdida de Fuego

Si se corrigen algunos de los datos porcentuales de los análisis de la fracción en nódulos por el factor “diferencia de pérdida al fuego entre ambas fracciones” ($10,56\% - 5,35\% = 5,21$), es decir, si se reparte este valor proporcionalmente entre todos los restantes y se suma, se comprobará fácilmente que los valores de la cal, sílice, magnesia y rutilo de ambas fracciones tienden a ser coincidentes; por su parte, los valores de potasio, sodio, cromo y fósforo son pequeños en ambas fracciones y coinciden bien. Por último, cabe decir que los valores medidos para el azufre también son muy similares en las dos fracciones analizadas, entendiéndose que dicho elemento estará en la forma tanto de sulfuros de calcio procedentes de la metalurgia secundaria, como de trazas de anhídrita de yeso.

Una especial consideración debe darse a los resultados obtenidos para la alúmina, el hierro y el manganeso. Sobre estos dos últimos, hay que decir que van juntos en la escoria negra, pues forman un eutéctico, y que posiblemente provengan de restos de esta escoria que suelen aparecer mezclados con la propia escoria blanca, pero en atención a su carácter inerte no deben suponer un inconveniente de cara a la estabilización. Con respecto a la alúmina, se puede decir que los contenidos registrados (en torno al 7% para las dos fracciones de E1 y en torno al 12% para E2) son correctos y esperables.

Determinación de sales solubles, sulfuros, sulfatos y cloruros.

Es importante determinar las concentraciones de sales solubles, cloruros, sulfatos solubles y sulfuros, ya que de su presencia podremos deducir la conveniencia o no de la utilización de estas escorias.

En la Tabla 38 se recogen los resultados de los análisis de las dos muestras de escoria E1.

Componente	E1	
	Fracción Polvo	Fracción Aglomerada
Azufre total en SO_3^-	0,86	1,09
Sulfatos solubles en ácido en SO_3^-	0,32	0,41
Cloruros en ión cloro	< 0,01	< 0,02
Sales solubles en agua	0,92	1,10
Sales solubles sin yeso	0,80	0,92
Contenido en yeso en finos	0,11	0,17

Tabla 38. Sulfuros, sulfatos y sales presentes en E1

La mayor parte del azufre total corresponderá a los sulfuros presentes como consecuencia del proceso de desulfuración del acero. Puede ser pues sulfuro de calcio, producto habitualmente utilizado en el proceso de desulfuración del acero en los hornos de cuchara de la metalurgia secundaria. Estos resultados también les tendremos en cuenta más adelante para establecer la semejanza entre LFS y las cales empleadas en estabilización de suelos.

También podemos destacar que las concentraciones de sulfatos solubles en ácido son en ambos casos muy bajas. En efecto, los resultados obtenidos, 0,32% para la escoria en polvo y 0,41% para la escoria en nódulos. Por último, podemos concluir indicando que la concentración de cloruros, el contenido en sales solubles y en yeso también son muy bajas en ambos casos.

Diagrama de Rankin

Una vez realizados los análisis químicos en las dos muestras de escoria podemos afirmar que la presencia de aluminatos y silicatos va a ser la referencia en la composición de las escorias blancas. Para conocer con más exactitud esta circunstancia, procedemos a estudiar las escorias tomando como referencia el Diagrama de Rankin A-C-M-S, o diagrama de las fases (Al_2O_3 -CaO-MgO-SiO₂), muy utilizado en este tipo de caracterizaciones.

Para conocer la composición química de las escorias objeto de estudio acudimos a los gráficos recogidos en el Slag Atlas, de modo que podamos establecer las posibles fases presentes en su composición con suficiente exactitud.

Para obtener los resultados correspondientes partimos de las siguientes premisas de cálculo:

1. La cal y la magnesia libres no deben ser consideradas en el cálculo por estar libres, no combinadas, evitando así la distorsión de los porcentajes del resto de componentes. Por eso los porcentajes de cal y magnesia libre serán restados de los valores totales (correcciones).

2. La cal libre que sustraemos a la cal total es el porcentaje estimado mediante el procedimiento de ensayo desarrollado en el apartado anterior prescrito por la Norma Europea UNE-EN 1744-1 [59].
3. La magnesia libre debemos deducirla de la total, estimando para ello el porcentaje que nos ha aportado el análisis químico general de la escoria blanca.
4. Para los cálculos finales recogidos en la Tabla 39 y los cierres a cien correspondientes, estimaremos como referencia las siguientes cantidades de cal y magnesia libres:
 - Contenido de cal libre medio: 15,0%.
 - Contenido de magnesia libre medio: 8,0%

De los cálculos realizados en los ajustes podemos observar que el segundo cierre a cien nos permite acudir al gráfico S-C-A con magnesia 5%, mientras que el tercer cierre a cien nos dirige al gráfico S-C-M con alúmina 10%. En ambos casos podemos situar los componentes en los diagramas de Rankin que se recogen a continuación.

Los cálculos de cierre a cien en la primera, segunda y tercera fase, de acuerdo con las concentraciones medias de los análisis de las escorias, son los que a continuación se recogen en la Tabla 39:

CORRECCIONES	ÓXIDOS en E1			
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
Concentración media	17.0 %	55.0 %	7.0 %	9.0 %
Corrección	-	15.0 %	-	8.0 %
Valores de referencia	17.0 %	40.0 %	7.0 %	1.0 %
Primer cierre a 100,0%	26.0 %	62.0 %	11.0 %	2.0 %
Segundo cierre a 100,0%	26.5 %	62.5 %	11.0 %	-
Tercer cierre a 100,0%	29.0 %	69.0 %	-	2.0 %

Tabla 39. Ajustes a cien del diagrama de Rankin

Los componentes mineralógicos que constituyen la estructura interna de la escoria que estamos estudiando, de acuerdo con las referencias que recogen los Diagramas de Rankin son los siguientes:

FASES DE LAS ESCORIAS SEGÚN RANKIN	
Silicato bicálcico SC ₂	Silicato tricálcico SC ₃
Rankinita S ₂ C ₃	Wollastonita SC
Melilita S ₂ MC ₂	Merwinita S ₂ MC ₃
Monticellita SMC	Enstatita SM
Forsterita SM ₂	Anortita S ₂ AC
Piroxeno S ₂ MC	Espinela AM
Aluminato tricálcico AC ₃	Periclase M
Aluminato cálcico AC	Lima o Cal libre C
Mayenita A ₇ C ₁₂	Sílice S

Tabla 40. Fases de las escorias según Rankin.

A continuación se representan los dos diagramas ternarios de Rankin que más fácilmente se ajustan al estudio de la escoria blanca.

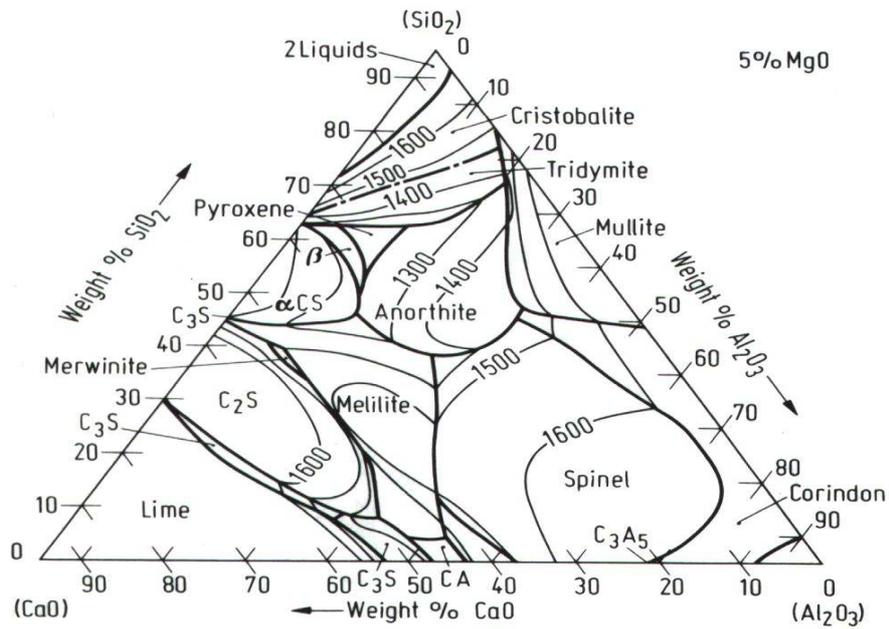


Figura 12. Fases S-C-A para 5% MgO.

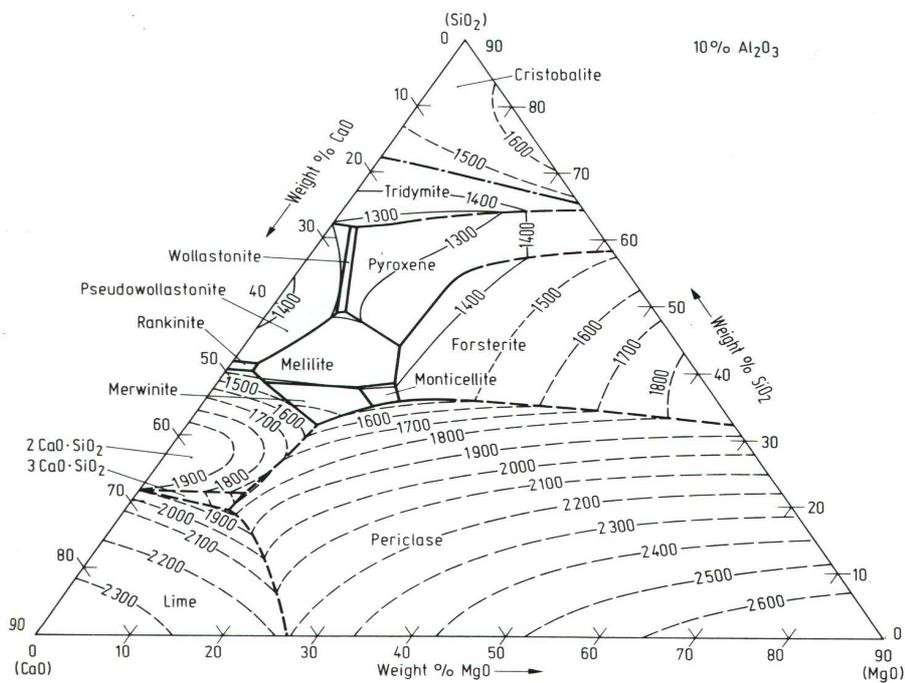


Figura 13. S-C-M para 10% Al2O3.

4.2.2 Difracción de rayos X

Para realizar los análisis cristalinos de la escoria blanca se utilizó la técnica de análisis de difracción por rayos-X.

Es conocido que las escorias siderúrgicas poseen componentes con estructuras cristalinas perfectamente formadas acompañadas de otros compuestos en estado vítreo, como consecuencia de enfriamientos bruscos producidos en la masa. La fracción cristalina se manifiesta con mayor intensidad cuanto más lenta es la velocidad de enfriamiento, ya que permite la estructuración de los compuestos en un ambiente más estable, llegando en la mayoría de los casos al 100% de la muestra. Por otra parte, un enfriamiento brusco de la escoria determina la aparición de materia vítrea sin estructurar, que en muchos casos puede representar el 50% de la materia que la compone. Este enfriamiento brusco inducido, después del vertido de la escoria en los acopios, se justifica para facilitar su cuarteo y poder retirarla posteriormente con facilidad.

La experiencia muestra que, aunque el enfriamiento de la escoria blanca se produce más rápidamente que el de la escoria negra, ya que las cantidades vertidas son menores, el tiempo de vertido de la escoria blanca de horno cuchara en su foso es lo suficientemente lento como para que la mayor parte de la materia esté cristalizada, coexistiendo con una fracción vítrea minoritaria.

El estudio que se pretende realizar en este apartado tiene como finalidad la determinación de los compuestos cristalinos de las muestras de escoria **E1**, tanto en polvo como en nódulos, y de la muestra de escoria **E2**, de modo que no se pretende entrar en un análisis exhaustivo de las fases vítreas, circunstancia que corresponde a un estudio más pormenorizado del que se quiere conseguir en esta Tesis Doctoral.

Determinación de las estructuras cristalinas de LFS

Si nos atenemos a los estudios previos realizados con escorias blancas, recogidos en la bibliografía especializada de interpretación de los difractogramas, los componentes cristalinos presentes en ellas, se pueden agrupar en dos grandes bloques: los aluminatos y los silicatos.

a) Grupo de los aluminatos:

En este grupo está incluido el Aluminato Tricálcico (AC_3), al combinarse la alúmina con cantidades importantes de cal. Forma parte de la composición mineralógica de los cementos Portland y difiere comportamientos expansivos cuando entra en contacto con sulfatos formando Sal de Candlot o Etringita.

Además del Aluminato Tricálcico, están presentes también la Espinela (AM), formada por Al_2O_4Mg , la Mayenita ($C_{12}A_7$) formada por $Al_{14}O_{33}Ca_{12}$ y los aluminatos cálcicos monocálcico (AC) y bicálcico (A2C).

b) Grupo de los silicatos:

En este grupo encontramos moderadas concentraciones de γ -SC₂ o belita, de α -SC₂, de β -SC₂ o larnita y de SC₃ o alita.

Otros silicatos cálcicos mas complejos que deben ser considerados en las muestras son la gelenita (SC₂A₂), la merwinita (S₂C₃M), la melilita (S₂C₂M), la rankinita (S₂C₃), la wollastonita (SC) o el calcio olivino (SC₂). Asimismo, son posibles otros silicatos como la bredigita o la jasmundita, formada ésta última en presencia de azufre.

A medida que envejecen las muestras, las concentraciones de óxidos hidratados aumentan. Debe hacerse notar que este fenómeno es debido al grado de meteorización ambiental de las escorias en los acopios conforme pasa el tiempo, y a las variaciones climáticas que se suceden en el tiempo.

A continuación se recogen algunos de estos compuestos agrupados en sus respectivas familias:

ALUMINATOS	SILICATOS
Aluminato monocálcico Al ₂ O ₄ Ca	Silicatos bicálcicos : β (larnita), γ (belita) SiOCa ₂
Espinel Al ₂ O ₄ Mg	Melilita o Akermanita Si ₂ Ca ₂ MgO ₇
Mayenita Al ₁₄ O ₃₃ Ca ₁₂	Bregidita SiO ₄ Ca ₂
Aluminato tricálcico Al ₂ O ₆ Ca ₃	Merwinita Si ₂ O ₈ Ca ₃ Mg
Aluminato bicálcico Al ₂ O ₅ Ca ₂	Gelenita SiCa ₂ Al ₂ O ₇
	Rankinita Si ₂ O ₇ Ca ₃
	Wollastonita Si O ₃ Ca

Tabla 41. Fases cristalinas presentes en la escoria.

De igual forma, aparecen también en las muestras compuestos de calcio y magnesio en sus diferentes fases: totalmente carbonatados, meteorizados con agua o completamente anhidros.

COMPUESTOS DE MAGNESIO		COMPUESTOS DE CALCIO	
Periclasa	MgO	Lima (Cal libre)	CaO
Brucita	Mg(OH) ₂	Portlandita	Ca(OH) ₂

Tabla 42. Compuestos de calcio y magnesio de las escorias.

A continuación se exponen en las siguientes tablas los valores de las distancias interplanares de los componentes cristalinos, tomadas de las referencias de identificación del índice de Hannawalt para los picos del ensayo de difracción de rayos-X.

La tabla refiere los valores de los ocho picos principales de identificación de las muestras y el número de la ficha que se corresponde con cada compuesto cristalino.

Distancias interplanares de compuestos cristalinos de la escoria (tablas de difracción de rayos-X de Hannawalt)			
Whitlockita	$(P O_4)_2 Ca_3$	Monticellita	$Si O_4 Mg Ca$
Tromelita	$P_6 O_{19} Ca_4$	Enstatita	$Si O_3 Mg$
Forsterita	$Si O_4 Mg$	Etringita	$Ca_6 Al_2 (SO_4)_3 (OH)_{12}$
Wollastonita	$Si O_3 Ca$	Anortita	$Ca Al_2 Si_2 O_8$
Calcita	$CO_3 Ca$	Olivino	$Si O_4 Ca_2$
Sílice	$Si O_2$	Hyd S3C5	$Si_3 O_{11} Ca_5 \quad 3 H_2 O$
Aluminato tricálcico	$Ca_3 Al_2 O_6$	Mayenita	$Ca_{12} Al_{14} O_{33}$
Aluminato monocálcico	$Ca Al_2 O_4$	A_2C	$Ca Al_4 O_7$
Bregidita	$SiO_4 Ca_2$	Bregidita syn	$Si_8 O_{32} Ca_{14} Mg_2$
S4C7M	$Si_4 O_{16} Mg Ca_7$		

Tabla 43. Tablas de difracción de rayos-X de Hannawalt.



Figura 14. Difractómetro

Distancias interplanares de compuestos cristalinos de la escoria (tablas de difracción de rayos-X de Hannawalt)									
α -Fe	2.03	1.17	1.43	0.91	1.01	0.83	0	0	6-696
γ -Fe ₃ C	2,08	1,80	1,27	1,08	1,04	0,90	0	0	23-298
Wustita	2.15	2.49	1.52	1.30	1.24	1.08	0.96	0.99	6-615
Wustita - Mg	2.13	2.46	1.51	1.29	1.23				
Wustita - Mn	2.17	2.51	1.53	1.31	1.25				
Maghemita- γ	2.52	1.48	2.95	1.61	2.08	2.78	1.09	1.70	4-755
Magnetita	2.53	1.49	2.97	1.62	2.10	1.09	1.72	1.28	19-629
Hematites	2.69	1.69	2.51	1.84	1.48	1.45	2.20	3.66	13-534
Magnesio-Ferrita	2.53	2.96	1.48	1.61	2.09	1.71	1.09	0.86	17-464
Jacobsita	2.56	1.50	3.01	1.64	1.11	2.12	4.91	1.73	10-319
Ferrit cálc-mag	2.67	1.93	2.78	2.08	1.84	1.59	1.55	1.52	2-938
Ferrito dicálcico	2.69	2.80	2.72	1.95	7.37	2.08	2.06	1.85	19-222
Brownmillerita	2.63	2.77	1.92	2.67	2.04	7.24	1.81	1.57	11-124
SC ₂ α	2.71	2.81	1.95	2.22	1.58	3.90	1.56	0.90	23-1042
SC ₂ α , β (larnita)	2.75	2.72	2.79	2.61	2.19	2.73	2.28	2.04	24-37
SC ₂ γ (belita)	2.74	3.04	2.77	1.92	3.83	4.36	2.48	1.65	24-34
SC ₃ (alita)	2.76	2.74	2.59	2.18	1.76	1.49	3.02	1.62	11-593
Bregidita	2,73	2,66	2,26	1,92	2,07	1,57	1,55	1,36	14-12
Bregidita syn	2,67	2,72	2,74	1,92	2,23	2,83	2,07	1,56	36-399
Rankinita	3.02	2.72	3.18	3.20	2.91	3.84	3.79	4.49	23-124
Merwinita	2.67	2.75	2.21	1.91	4.63	3.31	3.13	2.65	25-161
Melilita	2.87	3.09	1.76	2.04	2.49	3.73	5.55	4.22	10-391
Gelenita	2.85	1.75	3.07	2.40	3.71	2.44	2.04	1.52	20-199
Gelenita	2,86	1,93	1,82	1,76	3,72	2,44	2,41	3,07	25-123
Gelenita	2,84	1,75	3,06	2,43	3,70	2,39	2,29	1,38	35-755
Forsterita	2.46	3.88	2.51	2.77	5.10	2.27	1.75	2.25	7-74
Wollastonita	2.98	3.31	3.51	3.08	2.18	1.83	3.84	2.97	19-249
Whitlockita	2.88	2.61	3.21	3.45	1.73	5.21	2.76	1.93	23-871
Tromelita	3.09	2.96	4.77	3.02	2.75	2.59	2.53	4.08	15-177
Calcita	3.02	2.81	3.57	2.37	4.22	2.53	2.28	1.81	17-763
Sílice Q- β	3.40	4.34	1.84	2.17	2.01	1.57	2.50	2.31	11-252
Sílice Q-low	3.34	4.26	1.82	1.54	2.46	2.28	1.38	2.13	5-490
Hyd S3C5	2,32	3,37	2,94	2,82	2,16	1,75	9,7	8	3-929
Periclasa	2.11	1.49	1.22	0.94	0.86	2.43	1.05	1.27	4-829
Lima (Cal)	2.41	1.70	2.78	1.45	1.08	1.98	0.80	1.39	4-777
Brucita	2.37	4.77	1.79	1.57	1.49	1.37	1.31	1.18	7-239
Portlandita	2.63	4.90	1.93	1.80	3.11	1.69	1.48	1.45	4-733
Diópsido	2,99	2,53	2,89	2,52	3,23	2,95	1,63	2,57	11-654
Monticellita	3,62	2,66	2,58	1,81	4,18	2,93	2,39	5,54	19-240
S4C7M	2,73	2,72	2,67	1,92	2,83	2,23	2,21	2,07	27-1060
Enstatita	2,87	3,17	3,15	1,47	4,41	1,48	2,53	1,52	19-768
Espinela	2,44	2,02	1,43	1,56	2,86	4,66	0,83	1,05	21-1152
Espinela ferr	2,47	1,45	2,05	2,90	1,58	4,73	1,07	1,67	21-540
Etringita	9,73	5,61	3,88	2,56	2,20	2,76	4,68	3,48	9-414
Anortita	3,19	3,18	3,21	3,26	4,04	3,12	3,62	3,78	20-20
Olivino	2,73	1,91	3,01	1,80	4,32	3,82	2,75	1,88	9-369
Mayenita	2,68	4,89	2,45	3,00	2,19	1,95	1,66	1,60	9-413
Alumin tricálc	2,70	1,91	1,56	4,08	2,74	2,20	4,24	1,35	8-5
Alum monocál	2,97	2,52	2,51	4,67	2,53	2,40	3,71	2,42	23-1036
A ₂ C	3,50	2,60	4,44	3,08	2,75	2,71	3,60	2,88	23-1037
Anhydr SO ₄ Ca	3,5	2,85	2,33	2,21	1,87	1,65	1,75	2,09	6-266

Tabla 44. Distancias interplanares de los compuestos cristalinos de la escoria

Resultados del ensayo de difracción de rayos X.

Realizado el ensayo mediante la técnica de difracción de rayos-X, utilizando un equipo PHILIPS PW1729/40, con un tubo emisor con anticátodo de cobre de longitud de onda $\lambda=1,542 \text{ \AA}$.

En el análisis se realizó un barrido de ángulos 2θ desde 10° a 80° a un ritmo de 1 grado por minuto, registrándose la intensidad de la radiación emergente y procesando ésta mediante un programa informático que permite la representación con abscisas de la distancia interplanar según la Ley de Bragg, donde n es un número entero, λ es la longitud de onda de los rayos X, d es la distancia entre los planos de la red cristalina y θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión. Ley de Bragg:

$$n\lambda = 2 d \text{ sen } \theta$$

Las Figura 15, Figura 16 y Figura 17 muestran los difractogramas de rayos-X de las escorias E1 (en polvo y en nódulos) y de E2, respectivamente. Por otro lado, la Tabla 45 contiene la proporción de cada mineral en cada una de las muestras.

Los resultados se muestran a continuación, indicando en cada caso los componentes más significativos que integran las muestras ensayadas:

1. Muestra de la fracción de E1 en polvo:

La muestra de escoria E1 pulverizada analizada presenta la siguiente composición:

- a) Se mantienen las concentraciones de calcio-olivino Ca_2SiO_4 , en forma de silicato semejantes a las de la muestra en nódulos.
- b) Presencia de trazas de trialuminato pentacálcico A_3C_5 , junto con aluminatos reactivos con el agua, como la Mayenita.
- c) Importante concentraciones de Calcita en forma de carbonatos, CO_3Ca , y presencia de Periclasa, MgO .
- d) Concentraciones en todo el barrido de Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Como conclusión podemos indicar importante presencia de cal hidratada y muy apreciable presencia de Periclasa. Otros autores también han encontrado elevados contenidos de periclasa en las LFS [149] [206]. Existe presencia de silicatos y aluminatos en concentraciones muy compensadas.

2. Muestra de la fracción de E1 en nódulos:

La muestra de escoria E1 en nódulos contiene los siguientes compuestos, tomando como referencia la intensidad de la radiación:

- a) Concentraciones de aluminatos bicálcicos AC_2 y presencia en todo el barrido de concentraciones de Mayenita $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$.
- b) Concentraciones de silicatos magnésico férricos hidratados en combinación con calcita (compuestos de calcio-olivino) y presencia de silicatos cálcicos con azufre como la Jasmundita $Ca_{11}(SiO_4)_4O_2S$.
- c) No hay trazas de cal libre o lima pero si importantes cantidades de Periclusa MgO , calcita $CaCO_3$, y algo de Fluorita CaF_2 .

Como conclusión general podemos indicar que predominan los silicatos frente a los aluminatos, con importantes concentraciones de calcita y trazas de Fluorita con presencia de Periclusa.

La fluorita CaF_2 es un producto de minería (fluoride, espathefluor) usualmente añadido en baja cantidad (<5%) a la escoria para disminuir la viscosidad en el líquido a 1600 °C, haciendo más fácil fluir la escoria de la cuchara de transporte. En estado sólido puede ser combinado con un silicato complejo (cuspidine) o estar libre, dando lugar a una leve hidratación expansiva.

3. Muestra E2:

La muestra de escoria E2 contiene los siguientes compuestos, tomando como referencia la intensidad de la radiación:

- a) Presencia en todo el barrido de concentraciones de aluminatos cálcicos, como Mayenita $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$, de silicatos cálcicos como calcio-olivino e Ingenosita y de ferritos cálcicos.
- b) Presencia de cal libre o lima, de periclusa MgO y de calcita $CaCO_3$.
- c) Presencia en todo el barrido de Portlandita, $Ca(OH)_2$.

Como conclusión podemos indicar importante presencia de periclusa y lima, elementos potencialmente hidratables. Presencia de silicatos y aluminatos en concentraciones muy compensadas.

Teniendo en cuenta la bibliografía existente, podemos afirmar que los silicatos de calcio anhidro y especialmente, los aluminatos de calcio anhidro son potencialmente reactivos con el agua y en consecuencia con el medio ambiente [199].

También la cal libre e hidratada y el magnesio libre (periclusa) pueden eventualmente reaccionar con el agua atmosférica y el CO_2 , obteniendo compuestos hidratados y carbonatados, como observamos en los resultados del análisis TGA-DTA.

El silicato bicálcico puede desarrollar características hidráulicas bajo condiciones adecuadas. Sin embargo, esas condiciones de temperatura, humedad y catálisis

necesarias para activar la reactividad de larnita, bredigite, ingenosite o calcio-olivino con agua son difíciles de conseguir en un medio natural [193].

Por otro lado, los aluminatos de calcio de la escoria pueden fácilmente reaccionar con el agua a temperatura ambiente, dando aluminatos hidratado después de varios periodos cortos de exposición a humedad.

En cualquier caso la formación de productos hidratados de aluminatos de calcio provoca pequeños-moderados desarrollos de la resistencia mecánica.

Se espera que durante la exposición de la escoria, la cal libre y la magnesia (lima y periclasa) se hidraten y carbonaten. En caso de no ser así, esa escoria corre riesgo de inestabilidad volumétrica

El paso de cal libre (CaO) a calcita (CaCO₃) se espera sin significativos cambios de volumen en el producto final, siempre y cuando la reacción de hidratación expansiva de cal libre a portlandita haya sido completada, en caso contrario (como en E2, que existe cal libre) existiría un importante incremento de volumen.

El proceso de carbonatación de la periclasa (MgO) da lugar a un aumento significativo de volumen, debido a una carencia de estabilidad volumétrica.

De cara a la estabilización de suelos es prometedora la presencia de cal y magnesia (al igual que en la cal dolomítica) y también la presencia de aluminatos y tal vez ligeras proporciones de algún silicato reactivo (al igual que en el cemento). Por otra parte, si existen sulfatos, yesos, en los suelos es previsible la aparición en las mezclas con escoria de pequeñas cantidades de etringita y otros compuestos sulfatados, con fijación de cal y magnesia libres.

Mineral	Fórmula	Proporción		
		E1 polvo	E1 nódulos	E2
Calcita	CaCO ₃	medium	mayor	minor
Periclasa	MgO	medium	medium	medium
Portlandita	Ca(OH) ₂	medium	-	minor
Mayenita	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	medium	medium	medium
Calcio-Olivino	Ca ₂ SiO ₄	mayor	medium	mayor
Aluminatos	A ₃ C ₅	minor	-	-
Jasmundita	Ca ₁₁ (SiO ₄) ₄ O ₂ S	-	medium	-
Aluminato-bicalcico	Al ₂ O ₃ 2CaO	-	minor	-
Fluorita	CaF ₂	-	minor	-
Ingenosita	Ca ₂ SiO ₄	-	-	medium
Ferrito cálcico	CaFe ₄ O ₇	-	-	minor
Cal	CaO	-	-	medium

Tabla 45. Compuestos presentes en LFS según el análisis XRD

- 1. Calcita: CaCO_3 ; 2. Periclasa: MgO ; 3. Portlandita: $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- 4. Mayenita: $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$; 5. Calcio - Olivino: Ca_2SiO_4
- 6. Al_2O_3 ; Trazas

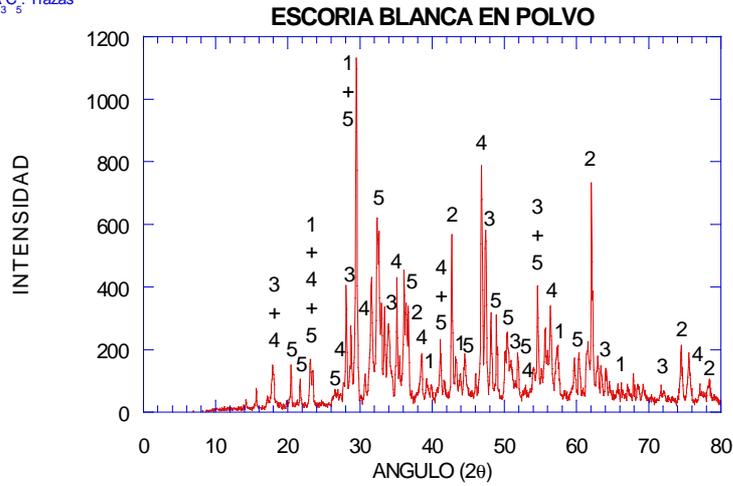


Figura 15. Interpretación del difractograma de la fracción en polvo de la escoria E1

- 1. Periclasa: MgO ; 2. Mayenita: $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$; 3. Fluorita: CaF_2 ; 4. Calcita: CaCO_3 ;
- 5. Jasmundita: $\text{Ca}_{11}(\text{SiO}_4)_2\text{O}_2\text{S}$; 6. Calcio - Olivino: Ca_2SiO_4 ; 7. $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{CaO}$

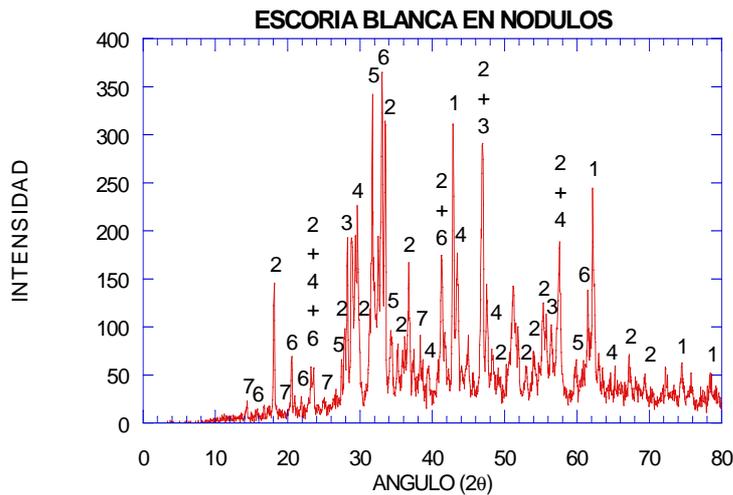


Figura 16. Interpretación del difractograma de la fracción en nódulos de la escoria E1

- 1.- Periclasa: MgO ; 2.- Calcita: CaCO_3 ; 3.- Portlandita: $\text{Ca}(\text{OH})_2$; 4.- Ingesonita: Ca_2SiO_4 ;
- 5.- Cal: CaO ; 6.- Calcio - Olivino: Ca_2SiO_4 ; 7.- Ferrito cálcico: CaFe_2O_7 ; Mayenita: $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$

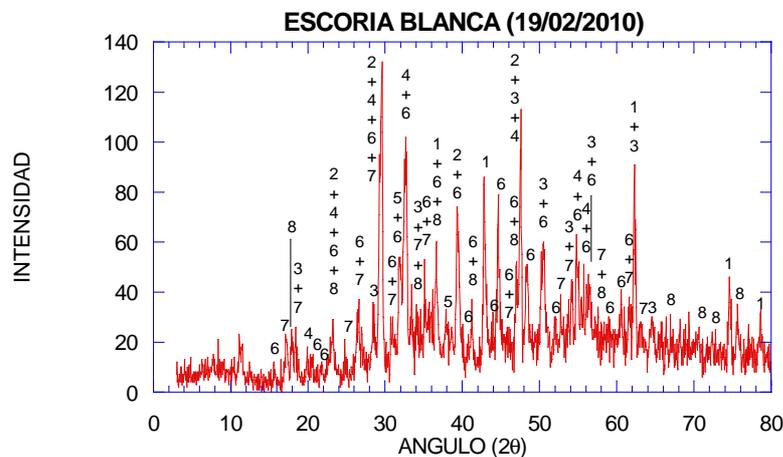


Figura 17. Interpretación del difractograma de la escoria E2

4.2.3 Espectroscopía de infrarrojos

Las muestras se analizan también mediante el espectroscopio de infrarrojos, mostrando los espectros de absorción característicos de la fracción de muestra en polvo y de la fracción de muestra en nódulos de **E1**. Los espectros obtenidos del análisis de ambas muestras de escoria se recogen a continuación en las Figura 18 y Figura 19, respectivamente.

La interpretación de estos espectros requiere un conocimiento y experiencia contrastados, ya que para ello se recurre a la comparación del resultado con patrones recogidos en bases de datos. Esta técnica es muy adecuada como complemento de los análisis realizados mediante difracción de rayos X, ya que en los resultados obtenidos podemos buscar compuestos, o fases específicas de los mismos, que se sospecha puedan estar presentes entre los componentes de las muestras analizadas.

Según se puede observar, los diagramas de transmitancia de infrarrojos mediante transformada de Fourier coinciden con los determinados mediante las técnicas de estudio precedentes:

- a) En la muestra de escoria en polvo se aprecia una menor presencia de calcita que en la muestra en nódulos, determinándose para la portlandita los picos de 3640 y 1638 cm^{-1} , quedando los picos 3415 y 1477 cm^{-1} enmascarados.
- b) En la muestra de escoria en nódulos la presencia de calcita es importante, y enmascara una parte del resto de componentes que se corresponden con las bandas en $3400 - 3500\text{ cm}^{-1}$ y $1400 - 1500\text{ cm}^{-1}$, y los picos en 721 , 878 , 925 , 1800 y 2520 cm^{-1} .

Los picos correspondientes a los silicatos cálcicos de 523 , 878 y 925 cm^{-1} son levemente visibles, y la mayenita, con $400 - 450$, 644 y $826 - 877$, es también ligeramente perceptible. De igual forma, la periclasa, con banda entre $3500 - 4000\text{ cm}^{-1}$, queda también enmascarada con la calcita.

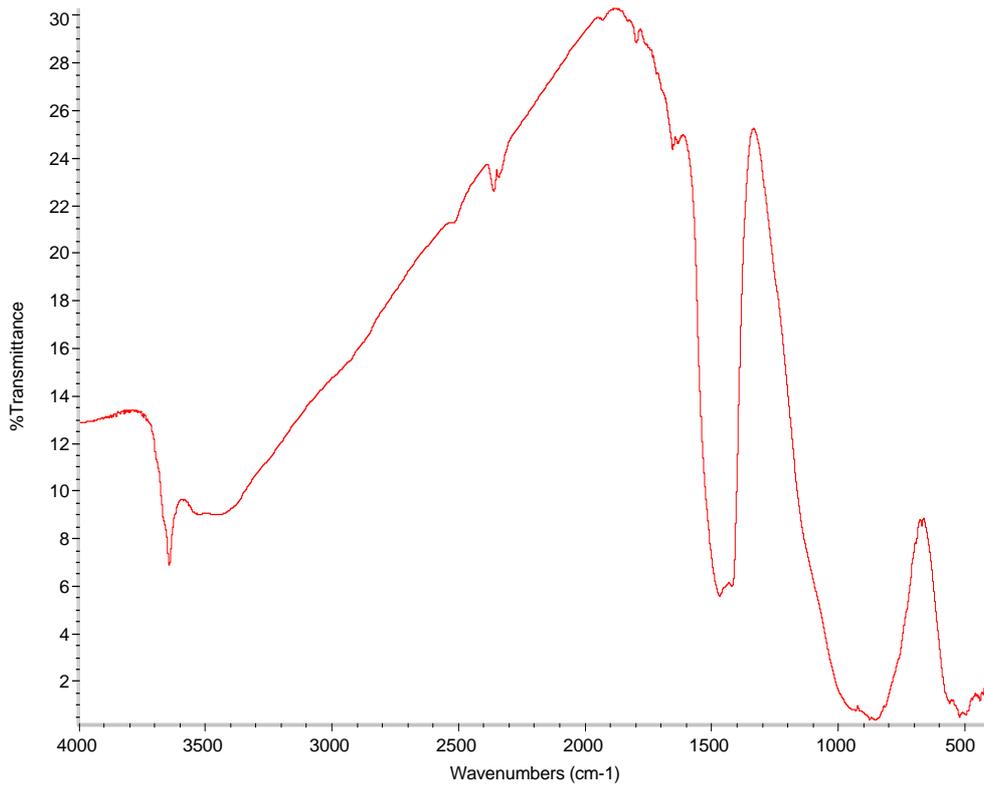


Figura 18. Análisis de la escoria blanca E1 en polvo mediante infrarrojos.

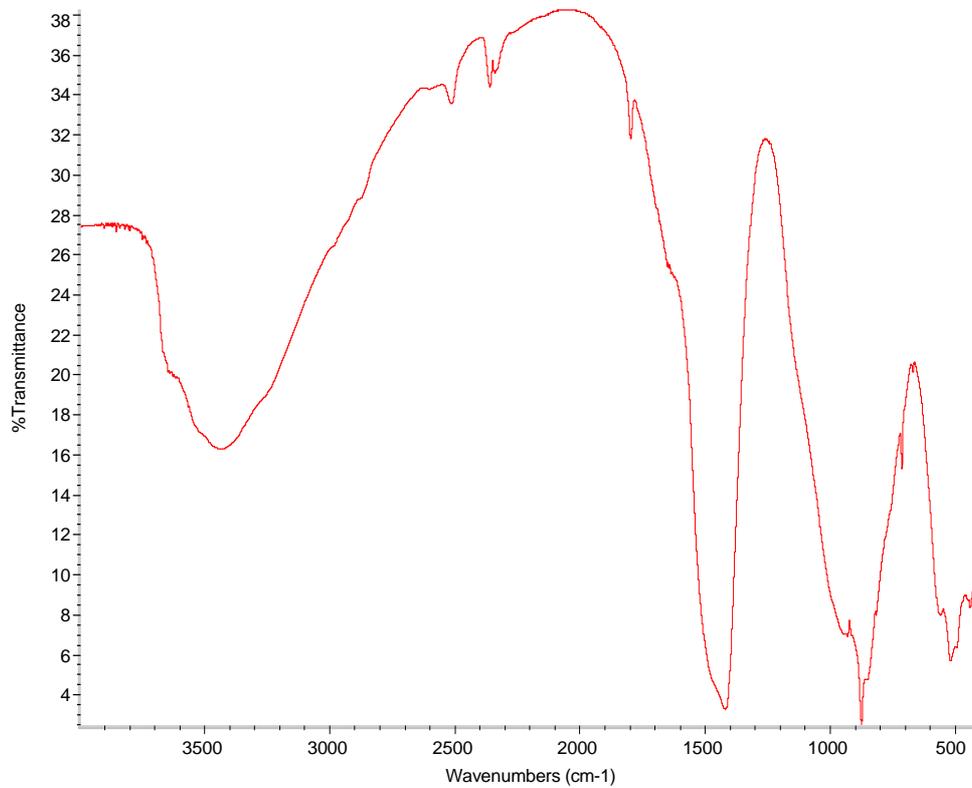


Figura 19. Análisis de la escoria blanca E1 en nódulos mediante infrarrojos.

4.2.4 Análisis termogravimétrico y calorimétrico

Tanto el estudio termogravimétrico como el análisis térmico son adecuados para conocer las reacciones químicas y las transformaciones que se suceden en el proceso de calentamiento entre los componentes mineralógicos de la escoria blanca de horno de cuchara.

Su aspecto físico, parecido al del cemento, su finura y aspecto pulverulento y su reacción en contacto con el agua hacen de la escoria un material idóneo para ser estudiado mediante esta técnica analíticas TGA (Termogravimetría) y DTA (Análisis Térmico Diferencial).

Para el análisis recogemos una muestra significativa de **E1** (una en polvo y otra en nódulos) y otra de **E2**, que tenemos almacenada tan sólo en estado pulverulento, sin agregaciones ni nódulos. Las depositamos en un crisol cilíndrico de alúmina. El conjunto se suspende sobre un brazo de la balanza junto con otro crisol vacío, que servirá para valorar, por referencia, el valor ganado o cedido por las muestras. Todo ello se introduce en un horno vertical con atmósfera controlada para evitar reacciones no deseadas, evitando así registros que falseen tanto la variación de masa como de entalpía.

Según se va elevando la temperatura del horno, de forma controlada y acompasada, se realiza un registro sistemático periódico de tres parámetros de referencia:

- La temperatura del horno, para conocer y controlar su ritmo de crecimiento.
- La evolución de la masa, que permitirá conocer las diversas transformaciones cristalinas alotrópicas o polimórficas que se suceden entre los componentes de la escoria blanca.
- El intercambio de calor de la muestra con el exterior como resultado de las transformaciones producidas, ya sean reacciones químicas de descomposición o de oxidación, mostrando así el balance energético de transferencia.

Para una correcta interpretación de los gráficos, las variaciones de masa se representan mediante la línea de color verde y las de entalpía de color azul, siendo la línea roja la evolución de la temperatura en el proceso de calentamiento secuenciado del horno.

Las gráficas resultantes del ensayo para E1-polvo y E1-nódulos se muestran en la Figura 20 y Figura 21. Para la muestra E2 los resultados gráficos se muestran en la Figura 22.

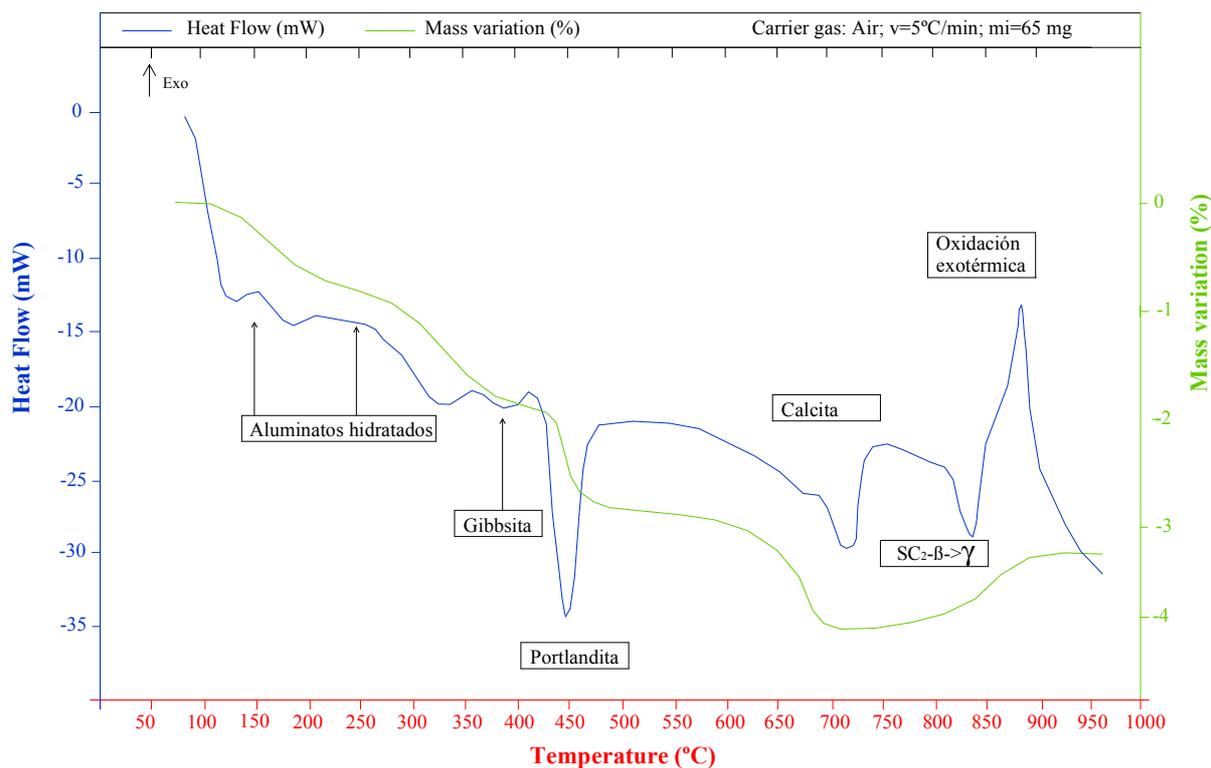


Figura 20. Gráfica del análisis térmico sobre la fracción en polvo de escoria E1

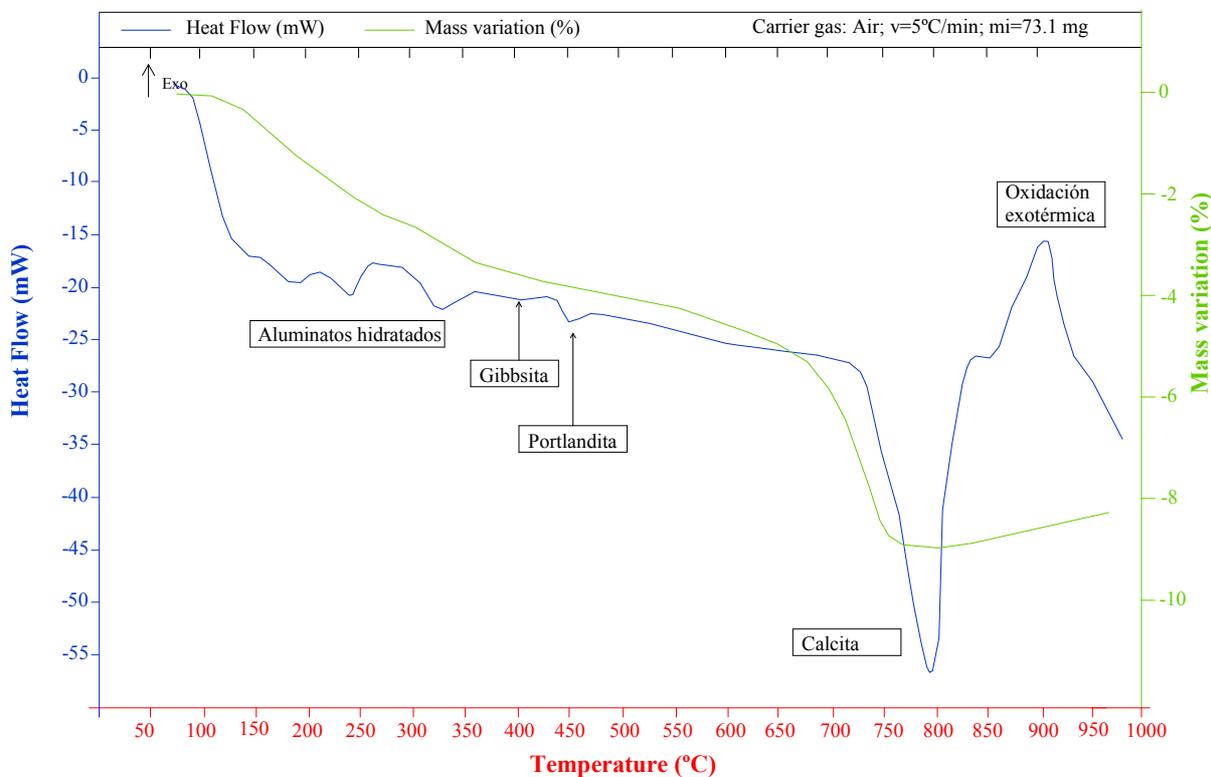


Figura 21. Gráfica del análisis térmico sobre la fracción en nódulos de escoria E1

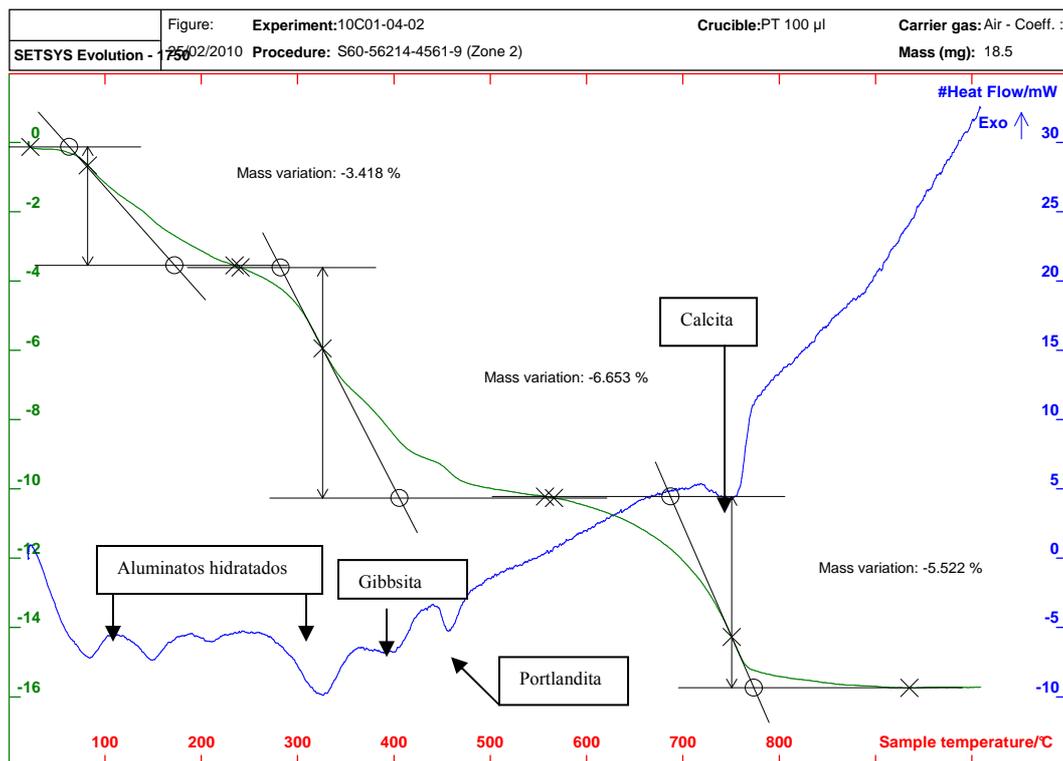


Figura 22. Gráfica del análisis térmico sobre la escoria E2.

Como se observa en las gráficas, el calentamiento se ha realizado hasta la temperatura de 1000° C, a un ritmo de 5° C/minuto. Una vez concluido el proceso podemos destacar las siguientes transformaciones en los componentes de las muestras:

1. Por debajo de 100°C se pierde la humedad capilar natural del material
2. Hasta los 350°C se produce la deshidratación de varios tipos de aluminatos (katoita) que hayan reaccionado con el agua de modo espontáneo desde la producción de la escoria.
3. En torno a 380°C hay descomposición del Hidróxido de Aluminio o gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$ en alúmina, por la pérdida de agua de la molécula
4. Descomposición del Hidróxido de Magnesita o Brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) a 420°C en magnesita (MgO), por la pérdida de agua de la molécula.
5. Deshidratación del Hidróxido Cálculo o Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a 450°C por pérdida de agua hasta su transformación en óxido de cal (CaO) o lima.
6. A partir de 600°C descomposición de la magnesita por pérdida de anhídrido carbónico (CO_2) y transformación en magnesita MgO .
7. A partir de 750°C descomposición de la calcita por pérdida de anhídrido carbónico (CO_2) y transformación en cal viva (CaO) o lima.
8. En los 870°C, cambio de cristalización del silicato bicálcico (C_2S) entre las fases β (beta) y γ (gamma), larnita y belita, respectivamente

9. Cerca de los 1000°C, oxidación de los sulfuros presentes en la escoria a sulfitos o sulfatos, con ganancia de oxígeno.
10. En torno a los 1000°C, oxidación del hierro metálico o de hierro +2 a hierro +3, si existe en las muestras.

Los análisis termogravimétricos y calorimétricos efectuados sobre la escoria E1 permiten observar una pérdida de masa en la muestra aglomerada del **9,4%**, mientras que la muestra pulverulenta presenta un **4%**, siendo estos resultados más exactos que los hallados con los análisis químico y de pérdida al fuego.

Se pueden observar reacciones endotérmicas con pérdida de masa a niveles de temperatura de 150, 220 y 320°C, correspondientes a deshidrataciones de diversos tipos de aluminatos cálcicos hidratables de pequeña entidad. Por encima de estos niveles de temperatura se produce la deshidratación de los compuestos de hidratación del óxido de magnesio, lo cual proporciona una cota inferior de la cantidad de magnesia libre inicial de la escoria. La **magnesia libre** en forma de periclasa que determina la difracción de rayos X alcanzará así un valor del orden del **9%** casi el total de la escoria.

Al nivel de 480°C y 750 – 800°C se producen, respectivamente, la deshidratación de la portlandita y descarbonatación del carbonato cálcico. En la escoria en polvo predomina la portlandita (pico a 480°C), mientras que en la escoria en nódulos predomina la calcita (pico a 800°C). El contenido total en cal libre en la escoria inicial puede ser así evaluado en torno al 15%.

Finalmente, se constata en ambos casos un pico exotérmico a nivel de 860°C, acompañado de un aumento de masa que debe ser asociado a una captación de oxígeno por parte de alguno de los compuestos presentes, presumiblemente una transformación de sulfuros de calcio de la escoria a sulfatos.

En cuanto a la escoria E2, se aprecian los picos de deshidratación de aluminatos cálcicos hidratados, a 150, 220 y 320°C. Asimismo, se descompone la gibbsita a 380°C. El hidróxido y el carbonato cálcico nos dan los picos a 480 y a partir de 760°C; la pérdida de masa es del 15,6%.

4.2.5 Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por energía dispersa de rayos-X.

Las muestras de escoria E1 se han analizado también mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB, SEM) para observar su aspecto morfológico superficial. Este análisis resulta especialmente interesante si se completa con el de Microanálisis por Energía Dispersa de Rayos-X que permite conocer la composición química de zonas especialmente representativas de la escoria, elegidas de forma aleatoria.

Los análisis se realizaron sobre los dos tipos de escoria E1, agregada y disgregada, de modo que mediante las imágenes y la composición química aleatoria de diferentes puntos elegidos al azar podamos establecer con la mayor exactitud posible la presencia de los diferentes componentes.



Figura 23. Microscopio electrónico de barrido

Estudio morfológico y análisis de la escoria E1 agregada en nódulos.

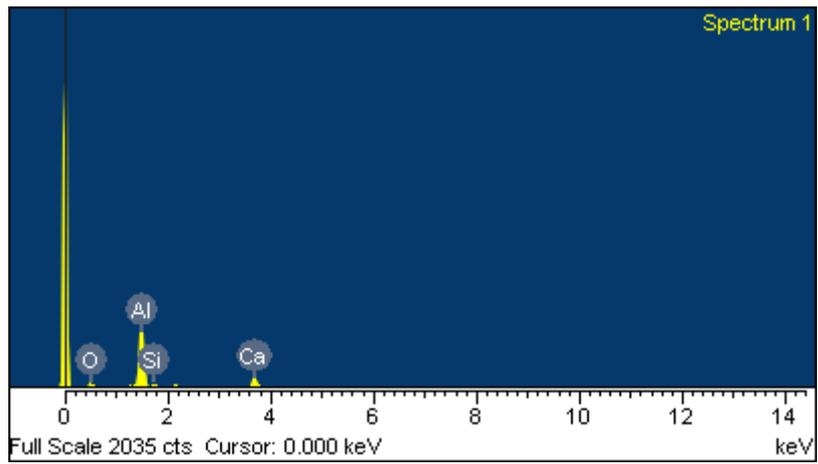
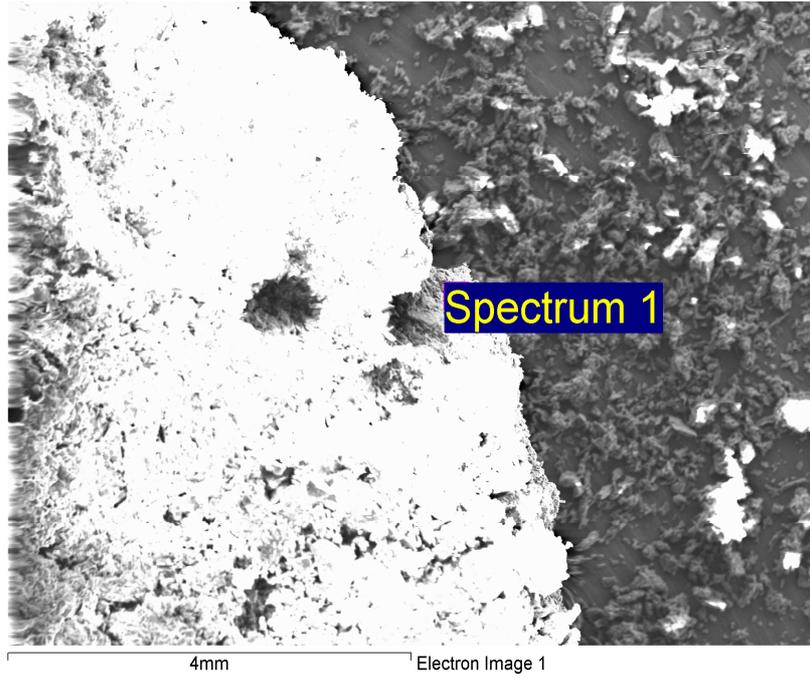
La escoria blanca, recién extraída del horno y depositada en los acopios de almacenamiento, presenta un aspecto de conglomerado agregado de partículas de un tamaño medio en torno a los 25 mm.

Para conocer su micromorfología se recubrieron con una capa metálica que facilita la conducción y la observación de su superficie. El aspecto de esta escoria bruta es el de un cuerpo solidificado por un enfriamiento brusco por el contraste de temperaturas, con zonas de solidificación plana y zonas dendríticas, fácilmente observables en las imágenes obtenidas.

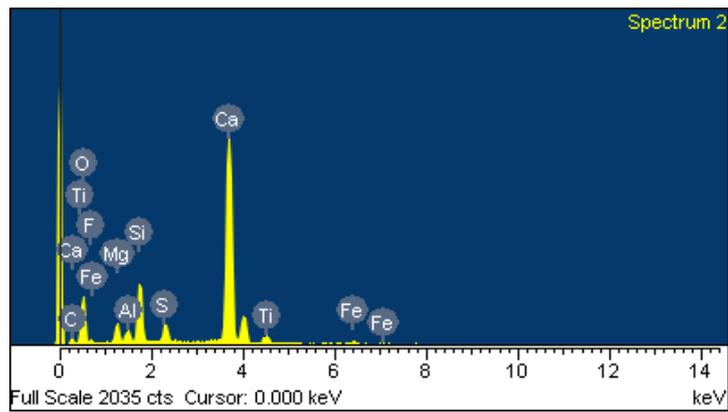
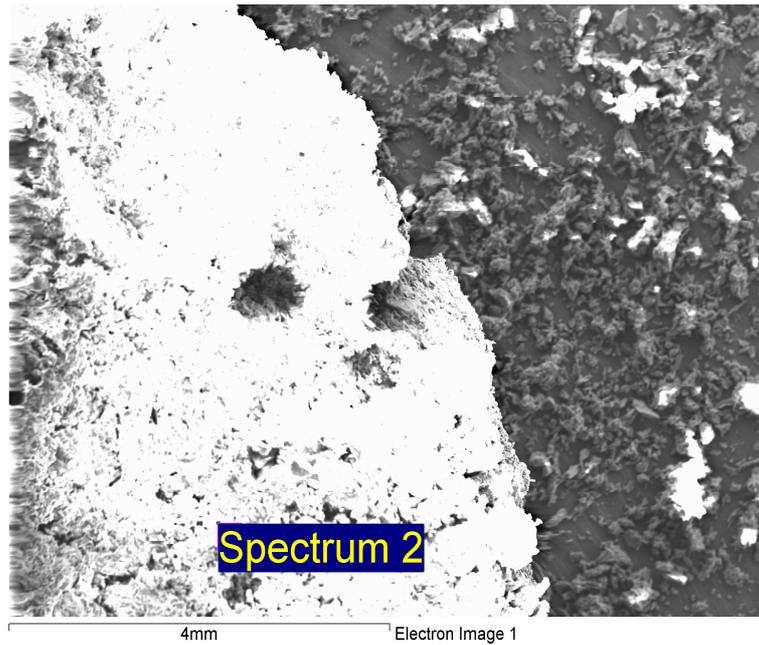
De la muestra de escoria agregada se han realizado tres espectros en tres zonas diferentes de la imagen principal elegidas según la superficie observada.

Los análisis químicos realizados al principio del capítulo coinciden sustancialmente con los obtenidos mediante esta técnica de estudio, de tal forma que las concentraciones obtenidas para el aluminio, el magnesio, el silicio o el calcio son semejantes en ambos casos. Las concentraciones de oxígeno valoradas en porcentaje atómico presentan una media del 37,5%, promedio de las concentraciones de oxígeno en los óxidos principales. Los óxidos de calcio y magnesio presentan en torno al 50% oxígeno en combinación, la alúmina un 60% y la sílice el 67%. En nuestro caso se produce un desplazamiento del oxígeno por debajo del 50%, por lo que puede estimarse que alguno de los óxidos que contiene la escoria puede encontrarse en estado libre, de aquí el interés por conocer el potencial hidráulico de la escoria, circunstancias que se consideran más adelante.

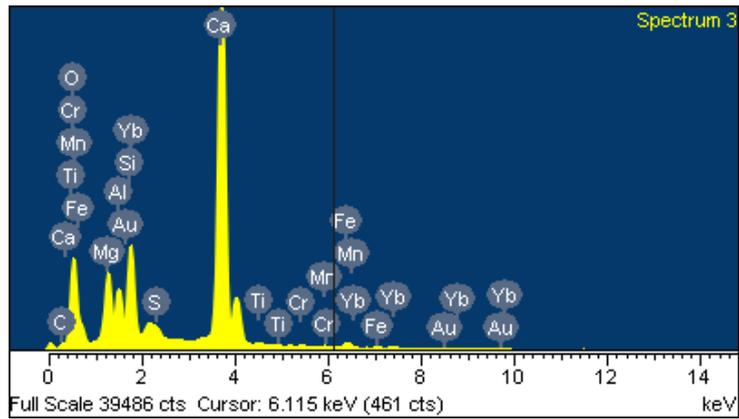
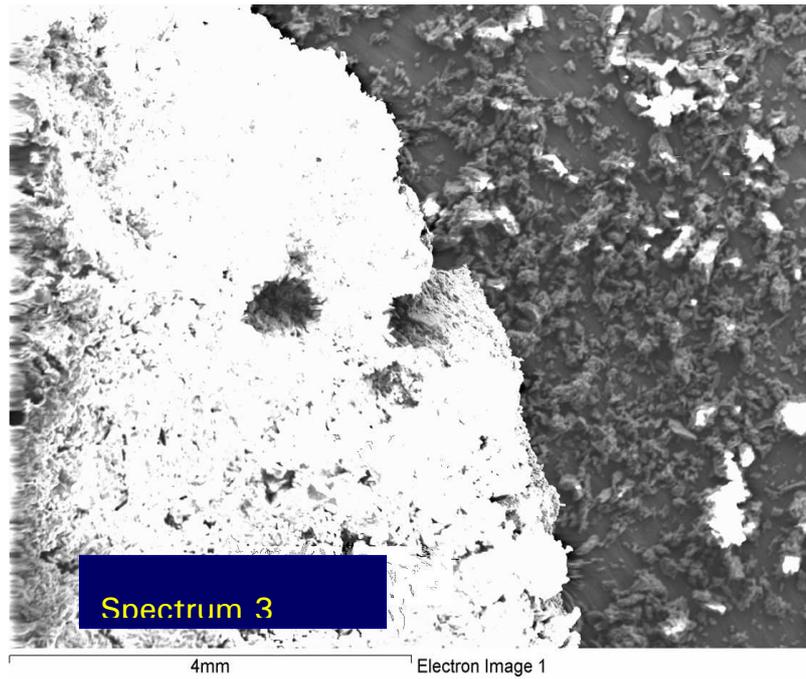
A continuación, se muestran los análisis realizados a una muestra de escoria en nódulos en cuatro puntos distintos de su superficie, diferenciando las zonas dendríticas y las de solidificación plana.



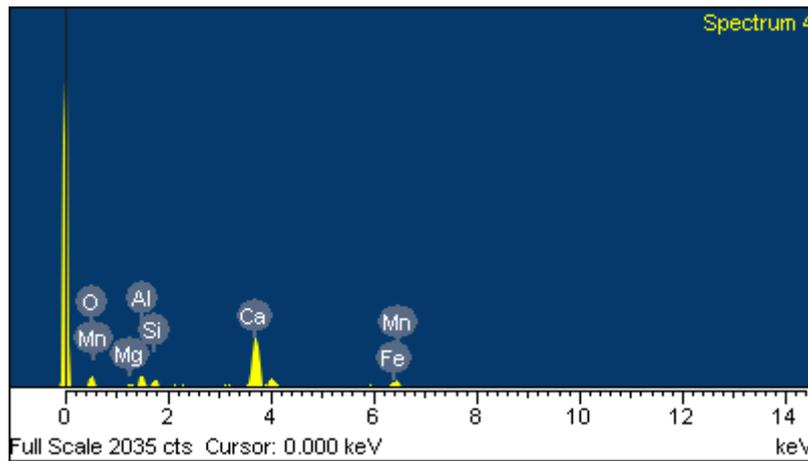
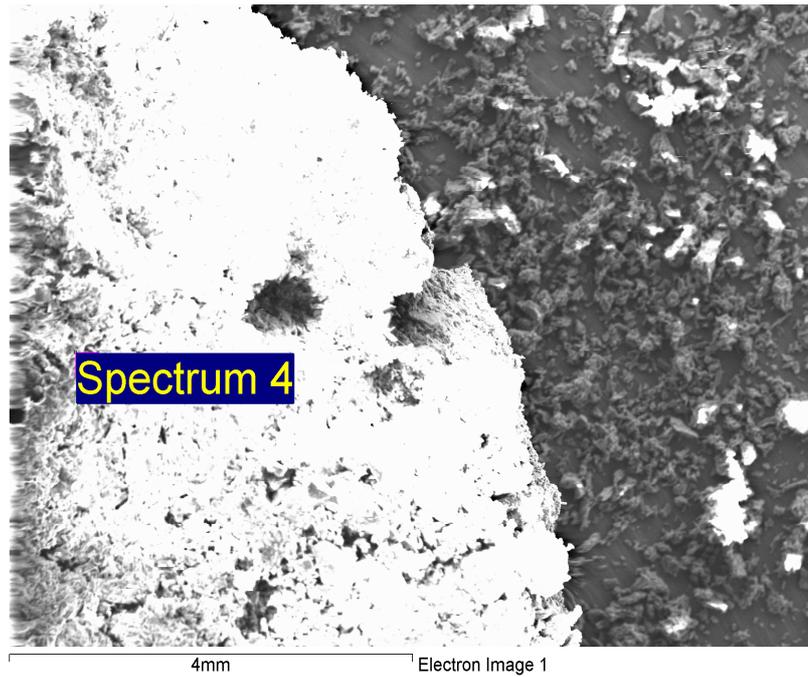
ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	12.78	22.60
O K	23.03	30.56
Al K	45.38	35.71
Si K	5.15	3.89
Ca K	13.66	7.24
TOTAL	100.00%	



ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	3.48	6.54
O K	40.02	56.38
F K	4.12	4.89
Mg K	2.77	2.57
Al K	1.26	1.05
Si K	6.34	5.09
S K	2.01	1.41
Ca K	36.34	20.44
Ti K	2.35	1.11
Fe K	1.31	0.53
TOTAL	100.00%	



ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	3.67	6.42
O K	50.65	66.47
Mg K	4.87	4.20
Al K	3.21	2.51
Si K	5.51	4.12
S K	0.56	0.37
Ca K	29.08	15.23
Ti K	0.25	0.11
Cr K	0.12	0.05
Mn K	0.15	0.06
Fe K	0.95	0.35
Yb L	0.98	0.12
TOTAL	100.00%	



ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	1.33	2.80
O K	36.32	57.30
Mg K	1.66	1.72
Al K	5.63	5.27
Si K	3.63	3.26
Ca K	35.87	22.59
Mn K	2.98	1.37
Fe K	12.57	5.68
TOTAL	100.00%	

ELEMENT	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4	MEDIA	MÁX.	MÍN.
C	12.78	3.48	3.67	1.33	5.32	12.78	1.34
O	23.03	40.02	50.65	36.32	37.51	50.65	23.03
Mg		2.77	4.87	1.66	2.33	4.87	1.66
Al	45.38	1.26	3.21	5.63	13.87	45.38	1.26
Si	5.15	6.34	5.51	3.63	5.16	6.34	3.63
Ca	13.66	36.34	29.08	35.87	28.74	36.34	13.66
Mn			0.15	2.98	0.78	2.98	0.15
Fe		1.31	0.95	12.57	3.71	12.57	0.95
S		2.01	0.56		0.64	2.01	0.56
Ti		2.35	0.25		0.65	2.35	0.25
Cr			0.12		0.03	0.12	0.12
Yb			0.98		0.25	0.98	0.98
F		4.12			1.03	4.12	4.12
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00		

Tabla 46. Elementos contenidos en la escoria blanca E1 agregada en nódulos.

Morfología y análisis de la escoria blanca E1 disgregada.

La muestra de escoria blanca disgregada, estabiliza y en estado pulverulento se analiza también en el microscopio electrónico de barrido. Dado su comportamiento dieléctrico, fue necesario recubrirla con oro para facilitar la observación y determinar la distribución de las partículas que la componen.

La observación de la muestra analizada permite indicar que la escoria estabilizada está formada principalmente por partículas entre 2 y 120 μm ., que presentan diferentes propiedades en función del tamaño y grado de estabilización.

Como conclusión al estudio podemos establecer las siguientes reflexiones a las observaciones realizadas:

1. Las partículas observadas con tamaño comprendido entre 5 y 60 μm . se encuentran disgregadas, sin formación cristalina entre ellas.

Se observa la presencia de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados en proporción variable, estando la cal libre y la periclase totalmente hidratadas.

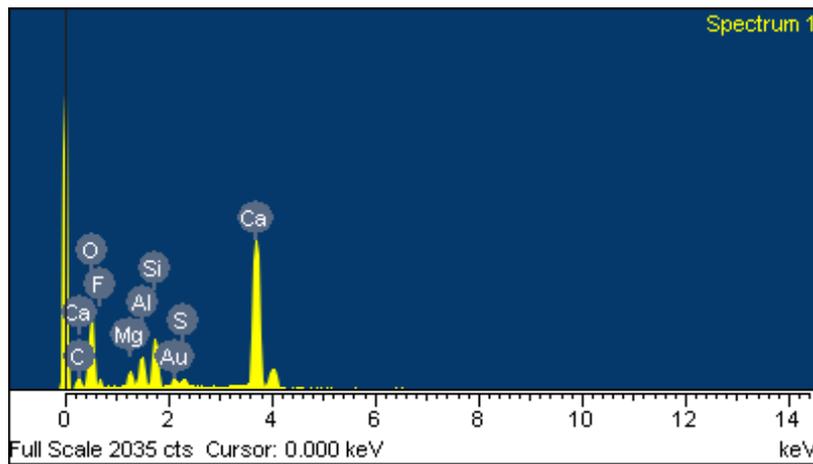
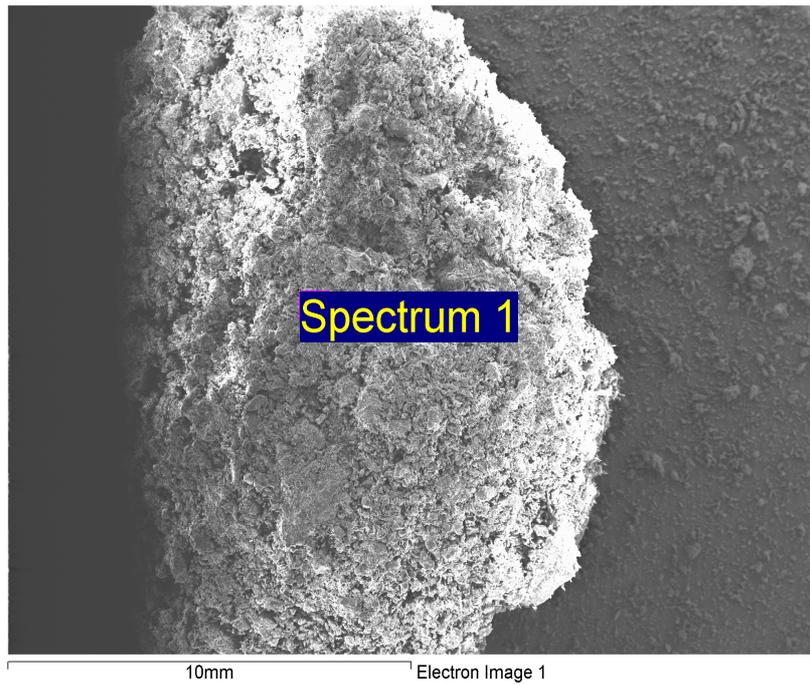
2. Las partículas comprendidas entre las 30 y 80 μm . presentan un aspecto rugoso y contienen formaciones cristalinas. La muestra puede ser susceptible de ser disgregada todavía más por la hidratación de la periclase.

La presencia de portlandita es muy acusada, confirmando así el grado de hidratación de la cal libre. Se observan también concentraciones de silicatos cálcicos en mayor proporción que de aluminatos.

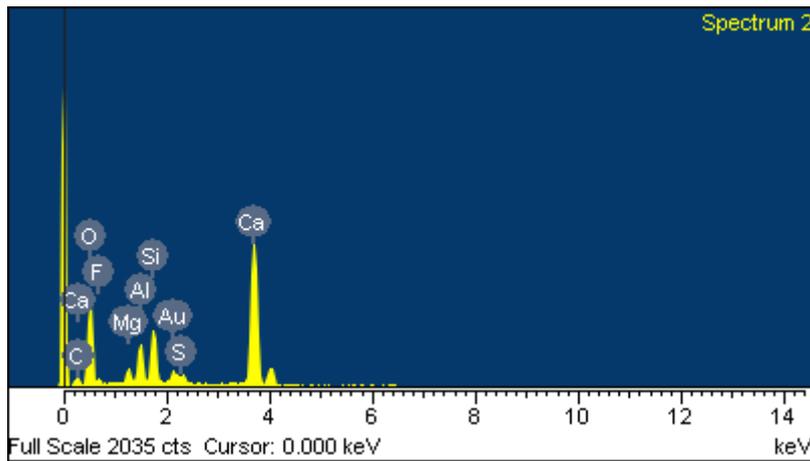
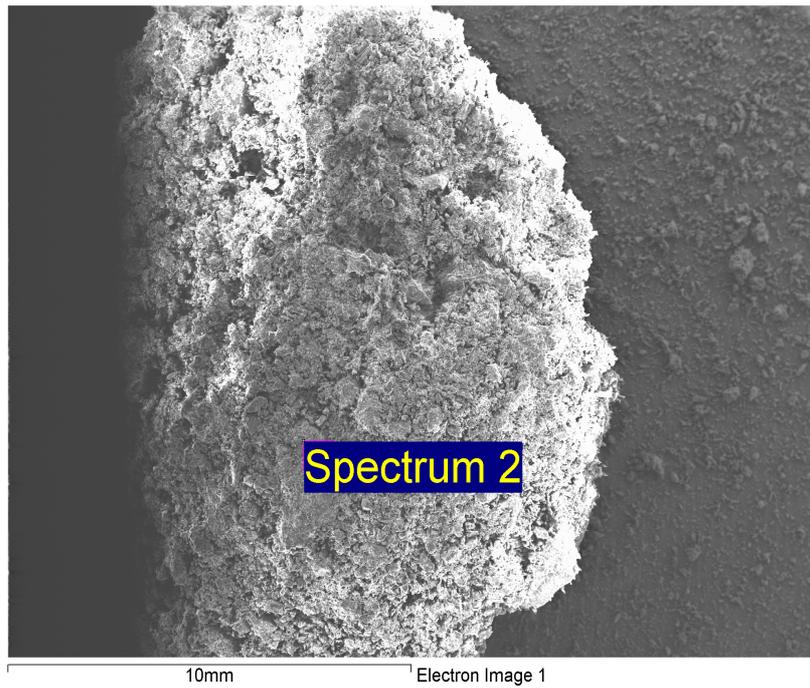
3. Las partículas de tamaño comprendido entre 2 y 120 μm . presentan una distribución no uniforme. Aunque algunas se encuentran disgregadas, especialmente las más finas, se constata la presencia de agregados de partículas menores. La posibilidad de poder ser disgregadas de nuevo hace pensar que su formación se produjo después de hidratarse la cal libre y la periclasa, por lo que es posible que la hidratación que presentan los aluminatos y silicatos haya diferido su formación.

A continuación se muestran algunas de las mediciones realizadas a diferentes tamaños en las que se pueden observar las concentraciones de los elementos que forman la escoria, así como un aspecto somero de las mismas.

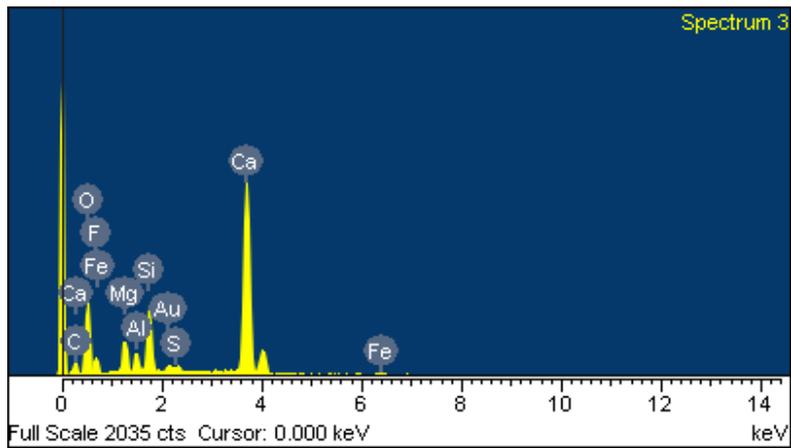
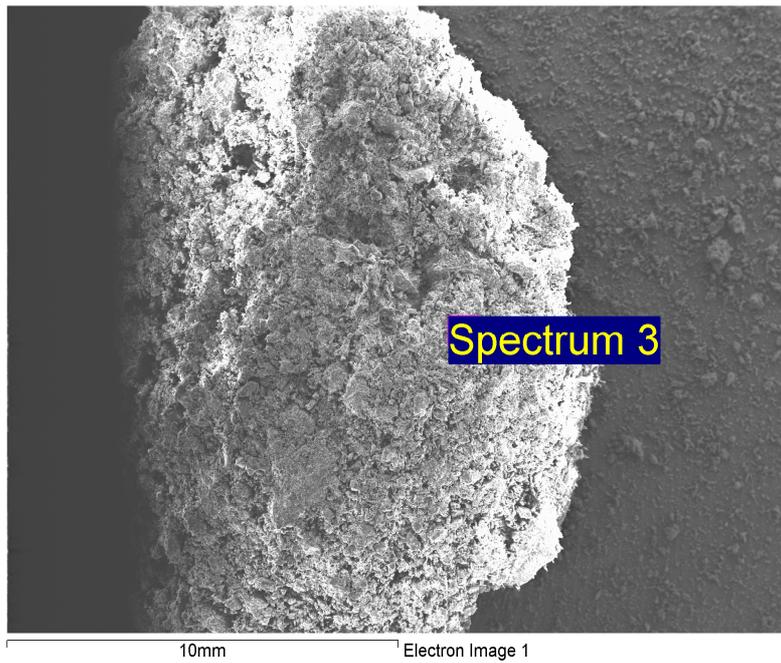
Se han realizado dos ensayos con dos muestras de escoria tamizada, registrando tres observaciones diferentes en cada una de ellas.



ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	6.48	10.86
O K	47.03	59.23
F K	6.76	7.16
Mg K	1.88	1.56
Al K	3.36	2.51
Si K	5.55	3.98
S K	1.08	0.68
Ca K	27.86	14.00
TOTAL	100.00%	



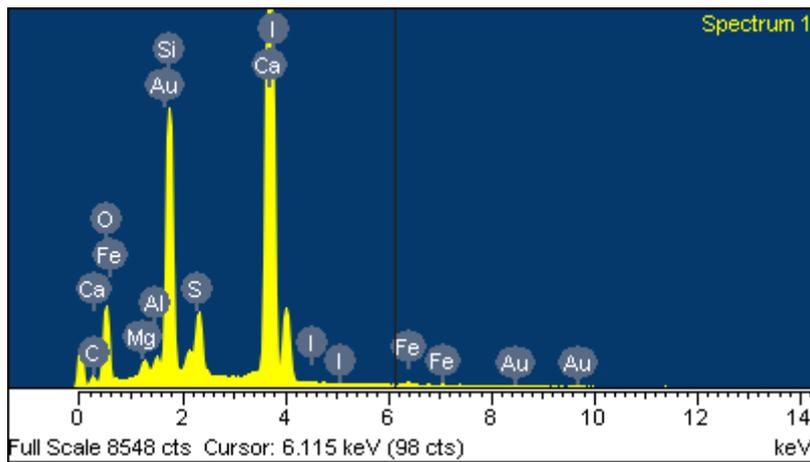
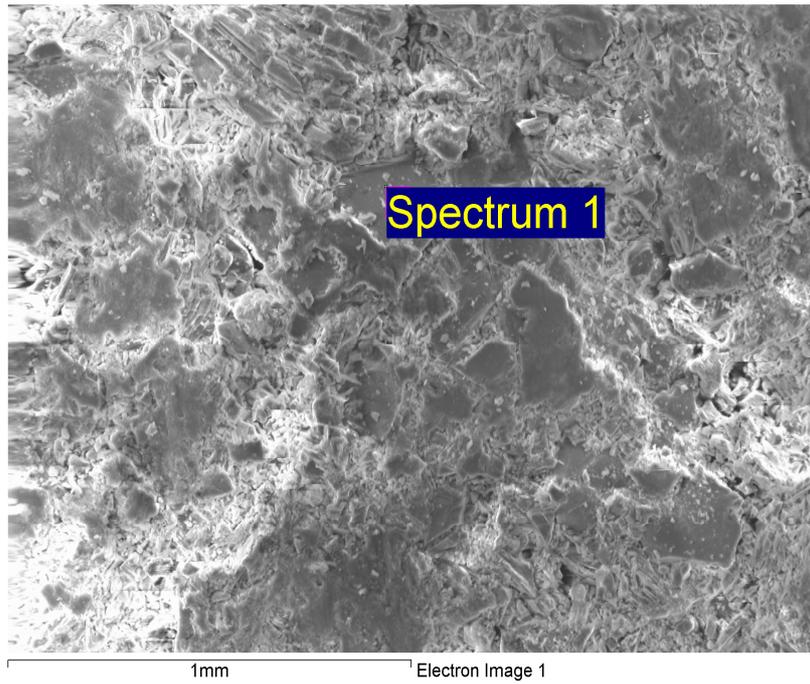
ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	4.58	7.68
O K	49.40	62.09
F K	7.25	7.67
Mg K	1.88	1.56
Al K	4.24	3.16
Si K	6.15	4.40
S K	1.08	0.68
Ca K	25.43	12.75
TOTAL	100.00%	



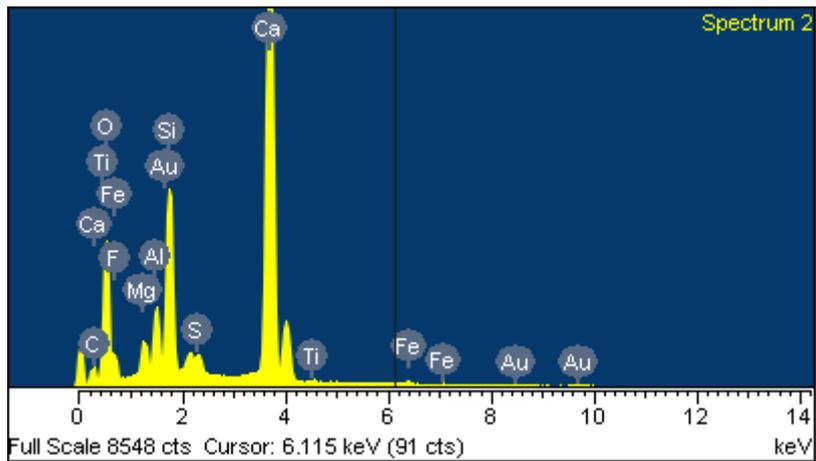
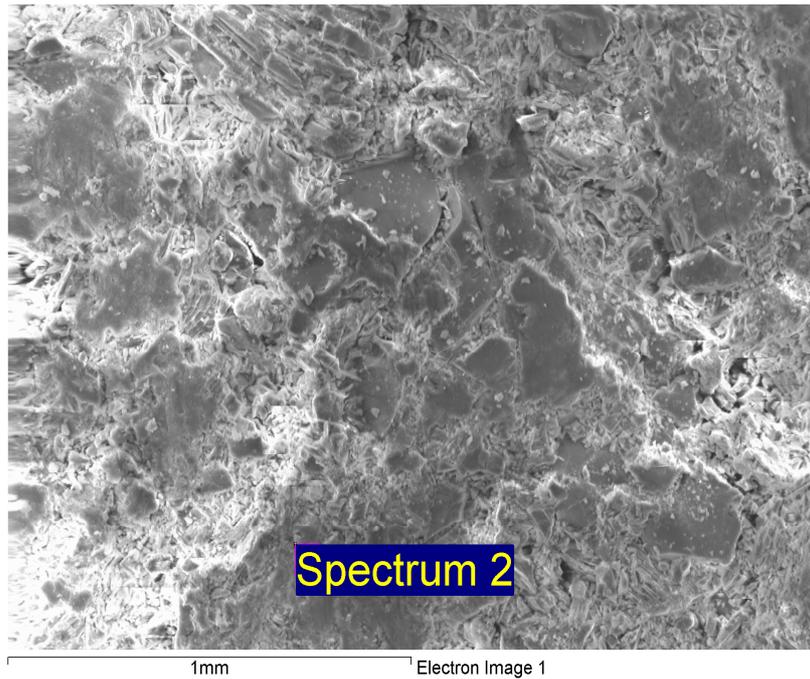
ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	5.55	9.57
O K	40.23	52.09
F K	12.68	13.83
Mg K	3.81	3.25
Al K	1.89	1.45
Si K	5.92	4.36
S K	0.65	0.42
Ca K	28.58	14.77
Fe K	0.70	0.26
TOTAL	100.00%	

ELEMEN T	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	MEDIA	MÁX.	MÍN.
C	6.48	4.58	5.55	5.54	6.48	4,58
O	47.03	49.4	40.23	45.55	49.4	40,23
Mg	1.88	1.88	3.81	2.52	3.81	1,88
Al	3.36	4.24	1.89	3.16	4.24	1,89
Si	5.55	6.15	5.92	5.87	6.15	5,55
Ca	27.86	25.43	28.58	27.29	28.58	25,43
Mn				0.00	0	0
Fe			0.7	0.23	0.7	0.7
S	1.08	1.08	0.65	0.94	1.08	0.65
Ti				0.00	0	0
Cr				0.00	0	0
Yb				0.00	0	0
F	6.76	7.25	12.68	8.90	12.68	6.76
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00		

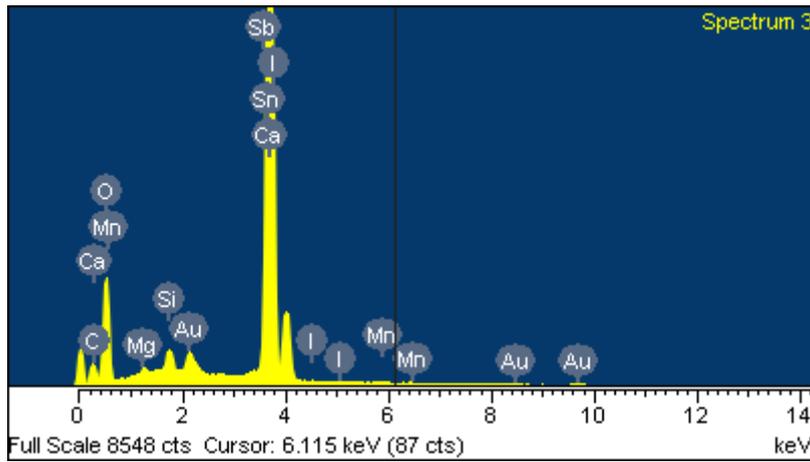
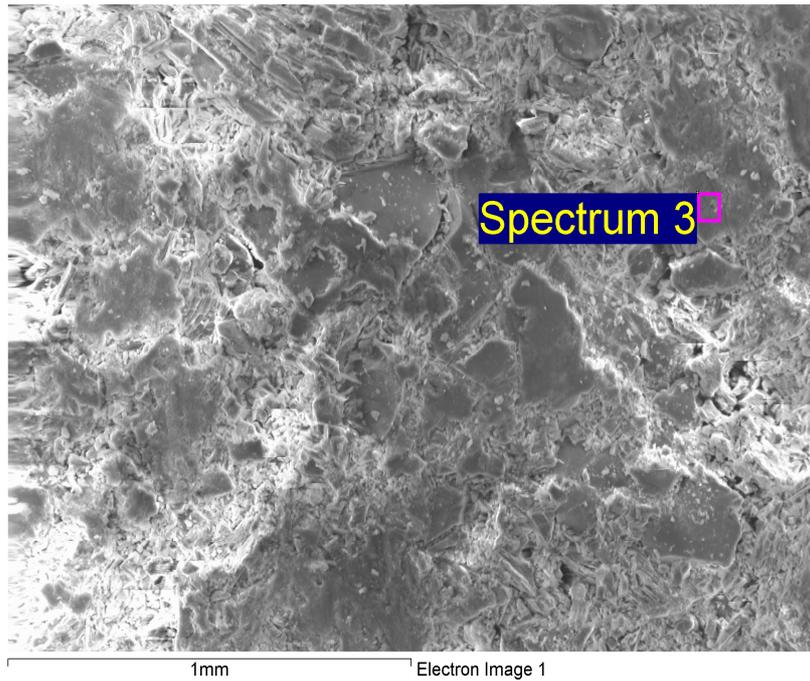
Tabla 47. Elementos contenidos en la escoria blanca disgregada E1. Muestra 1.



ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	4.05	9.57
O K	35.79	52.09
IL	0.98	13.83
Mg K	0.85	3.25
Al K	0.67	1.45
Si K	12.32	4.36
S K	3.36	0.42
Ca K	41.35	14.77
Fe K	0.63	0.26
TOTAL	100.00%	



ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	5.69	9.83
O K	40.83	52.98
F K	11.38	12.43
Mg K	1.70	1.45
Al K	2.70	2.08
Si K	7.55	5.58
S K	0.90	0.58
Ca K	28.63	14.83
Ti K	0.22	0.09
Fe K	0.40	0.15
TOTAL	100.00%	



ELEMENT	WEIGHT%	ATOMIC%
C K	4.45	8.36
O K	46.23	65.18
Mg K	0.42	0.39
Si K	1.06	0.85
Ca K	43.21	24.32
Mn K	0.17	0.07
Sn L	1.03	0.19
Sb L	2.05	0.38
I L	1.38	0.24
TOTAL	100.00%	

ELEMENT	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	MEDIA	MÁX.	MÍN.
C	4.05	5.69	4.45	4.73	569	4.05
O	35.79	40.83	46.23	40.95	46.23	35.79
Mg	0.85	1.7	0.42	0.99	1.7	0.42
Al	0.67	2.7		1.12	2.7	0.67
Si	12.32	7.55	1.06	6.98	12.32	1.06
Ca	41.35	28.63	43.21	37.73	43.21	28.63
Mn			0.17	0.06	0.17	0.17
Fe	0.63	0.4		0.34	0.63	0.4
S	3.36	0.9		1.42	3.36	0.9
Ti		0.22		0.07	0.22	0.22
Cr						
Yb						
IL	0.98		1.38	0.79		
Sn			1.03	0.34		
Sb			2.05	0.68		
F		11.38		3.79	11.38	11.38
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00		

Tabla 48. Elementos contenidos en la escoria blanca disgregada E1. Muestra 2.

En conclusión de lo anterior se expone,

ELEMENT	E1 disgregada muestra1	E1 disgregada muestra2	MEDIA E1 disragrada	MEDIA E1 aglomerada
C	5,54	4,73	5,14	5,32
O	45,55	40,95	43,25	37,51
Mg	2,52	0,99	1,76	2,33
Al	3,16	1,12	2,14	13,87
Si	5,87	6,98	6,43	5,16
Ca	27,29	37,73	32,51	28,74
Mn	0,00	0,06	0,03	0,78
Fe	0,23	0,34	0,29	3,71
S	0,94	1,42	1,18	0,64
Ti	0,00	0,07	0,04	0,65
Cr	0,00	0,00	0,00	0,03
Yb	0,00	0,00	0,00	0,25
IL	0,00	0,79	0,40	0,00
Sn	0,00	0,34	0,17	0,00
Sb	0,00	0,68	0,34	0,00
F	8,90	3,79	6,35	1,03
TOTAL	100,00	100,0	100,00	100,0

Tabla 49. Resumen de elementos contenidos en la escoria blanca E1.

4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS LFS

Ya indicamos que los estudios de caracterización se van a realizar sobre dos escorias diferentes procedentes de acerías distintas:

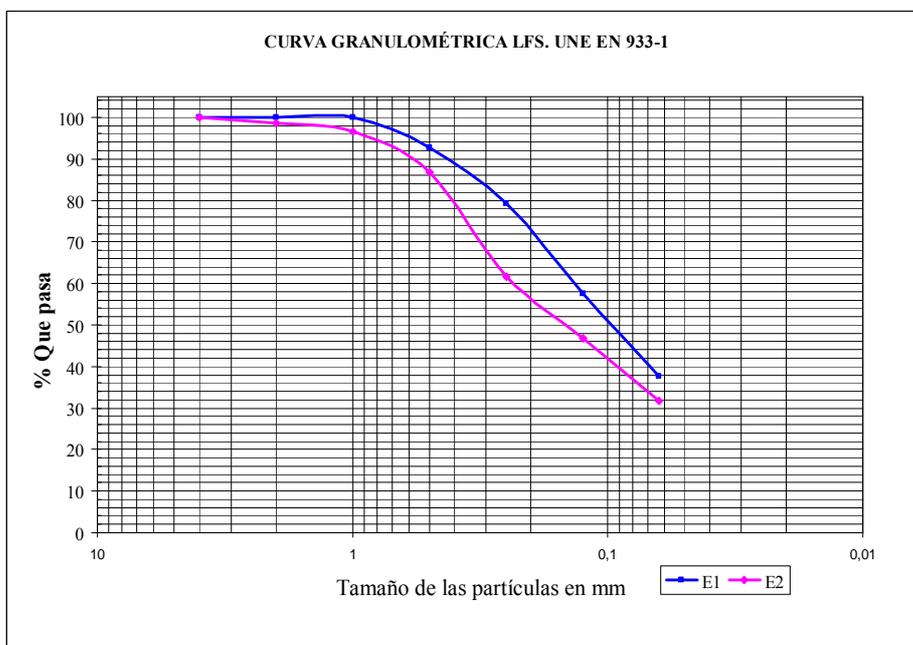
- **E1** procede de la Acería Tubos Reunidos de Álava.
- **E2** procede de la Acería Sidenor en Basauri-Vizcaya.

Ambas escorias fueron recibidas en el Laboratorio de Grandes Estructuras de Obra Civil de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos, donde han permanecido durante 6 años, tiempo que estimamos más que suficiente para garantizar su envejecimiento y estabilización.

Ambas escorias tienen color blanco, con tonalidades grisáceas, y de textura pulverulenta, semejante a la de la cal o del cemento, y presumiblemente estable. E2 tiene una textura algo más grosera. Sometida a tamizado se observan pequeños granos de acero integrados homogéneamente en la escoria y que pueden ser separados con facilidad mediante un captador electromagnético.

4.3.1 Granulometría de las LFS

Los ensayos granulométricos se realizaron sobre tres muestras representativas envejecidas y estabilizadas para cada uno de los dos tipos de escoria LFS, utilizando para ello la serie granulométrica que determina la Norma Europea UNE-EN 933-1 [51]. Los resultados medios del análisis se recogen a continuación:



Tamiz UNE (mm)	% PASA	
	E1	E2
4	100,0	100,0
2	100,0	98,7
1	100,0	96,5
0,5	92,7	86,8
0,25	79,2	61,6
0,125	57,6	46,7
0,063	37,6	31,7

Figura 24. Curva granulométrica LFS

La escoria es un material que presenta las siguientes características granulométricas:

1. El tamiz que deja pasar el 90% o más de la muestra E1 es el de 0,5 mm (%P del 92.7%). Es este el tamiz que podemos considerar como tamaño máximo para la designación. Para E2 será el tamiz 2 UNE.
2. Tanto para E1 como para E2, el tamiz que deja pasar el 10% o menos de la muestra de escoria ensayada está por debajo del de 0,063, por lo que, a falta de un estudio específico con tamices de menor luz de malla, el diámetro menor de designación podemos considerarle en 0 mm.

La designación de la escoria E1, de acuerdo con el estudio granulométrico realizado es de un material 0/0,5, o incluso 0/1, evitando así cualquier variación puntual del % de paso en el tamiz de 0,5 mm. Y la designación de E2 es 0/2. Ambas, con una componente importante de tamaños inferiores a 0,063 mm.

Como consecuencia de la distribución más acusada en los tamices inferiores de la secuencia recogida en la Norma Europea UNE-EN 933-2 [52] podemos establecer las siguientes consideraciones:

- a) En cuanto a la clasificación de la escoria como suelo, no se acoge a las condiciones de granulometría para suelos seleccionados ni para suelos adecuados, puesto que no cumplen el cernido para los tamices indicados en las prescripciones del PG-3, de suelo adecuados, que son las siguientes:
 - $D_{m\acute{a}x} < 100$. El tamaño máximo es de 1 ó 2 mm, por tanto cumple esta condición
 - Cernido que pasa por el tamiz #2 < 80%, pasa el 79% ó 60%, para E1 y E2, por tanto cumple la condición
 - Cernido que pasa por el tamiz #0,08 < 35%. Para las escorias no usamos este tamiz, pero por el tamiz 0,063 el porcentaje es de 38% y 32%, por lo que para un tamiz superior el porcentaje de paso será incluso mayor, no cumpliendo ésta condición. Por tanto estaremos ante un suelo marginal o un suelo tolerable, dependiendo del resto de características.
- b) Por su aspecto pulverulento, la escoria presenta propiedades organolépticas propias de un cemento ó una cal. Como se especifica en la norma UNE 80502 [33], la cal ha de cumplir ciertas propiedades granulométricas para su empleo en construcción, por ello vamos a comparar las características de la escoria con estos requisitos:
 - Retenido por el tamiz de 3 mm: 0%
 - Retenido por el tamiz de 2 mm \leq 5%. En el caso de E1 pasa el 100% y para E2 para el 98,7%, por tanto apenas queda retenido un 1%, cumpliendo la condición.

- Retenido por el tamiz de $0,2 \text{ mm} \leq 2\%$. Esta condición no la cumple, queda retenido aproximadamente un 20% para E1 y un 40% para E2.
- c) El módulo de finura de E1 es de 4,2. Se trata de un material con una finura media algo menos acusada, un poco más grosera, pero próxima a la de los cementos Portland normalizados, cuyo módulo de finura es superior a 4. Así mismo para las cales cálcicas aéreas el límite superior para finura es de 7 sobre el porcentaje de rechazo en masa de $0,09 \text{ mm}$. Será pues, previsible para esta escoria blanca una gama de aplicaciones propias de los materiales muy finos, incluso sustitutiva del cemento/cal en algunas ocasiones.

Para conocer de forma detallada la composición de la escoria según el criterio del tamaño de grano hemos acudido a una técnica más precisa y apropiada a las características de este material: la difracción de haz láser basada en la dispersión de ondas electromagnéticas para las partículas materiales.

El equipo utilizado ha sido el Mastersizer X de la firma comercial Malvern Instruments, del que hemos elegido una lente de distancia focal 300 mm con el objeto de captar la gama de tamaños de una muestra seca de material en un único ensayo.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 25, en la que se recogen los tamaños dentro del intervalo estudiado, refiriendo los datos a la frecuencia ponderal y acumulada, que equivale al tanto por ciento de paso en la granulometría convencional. Junto con la tabla de resultados ponderados se muestra una gráfica de distribución de partículas y el área de la **superficie específica** que resulta ser de **$3091 \text{ cm}^2/\text{g}$** para **E1**.

El intervalo de tamaños se encuentra comprendido entre las $0,2$ y las 400 micras, con predominio de los tamaños de entre 20 y 300 micras. Es evidente que estos tamaños pueden proceder de la agregación de tamaños más pequeños no disgregados o apelmazados que podremos caracterizar posteriormente mediante la microscopía de barrido electrónico.

La granulometría final de LFS es el resultado de un proceso dinámico en el que la hidratación expansiva de ciertos componentes produce un crecimiento cristalino de las partículas y en varios casos, consecuentemente hay una disgregación y agrietamiento que produce agregados más pequeños del cristal

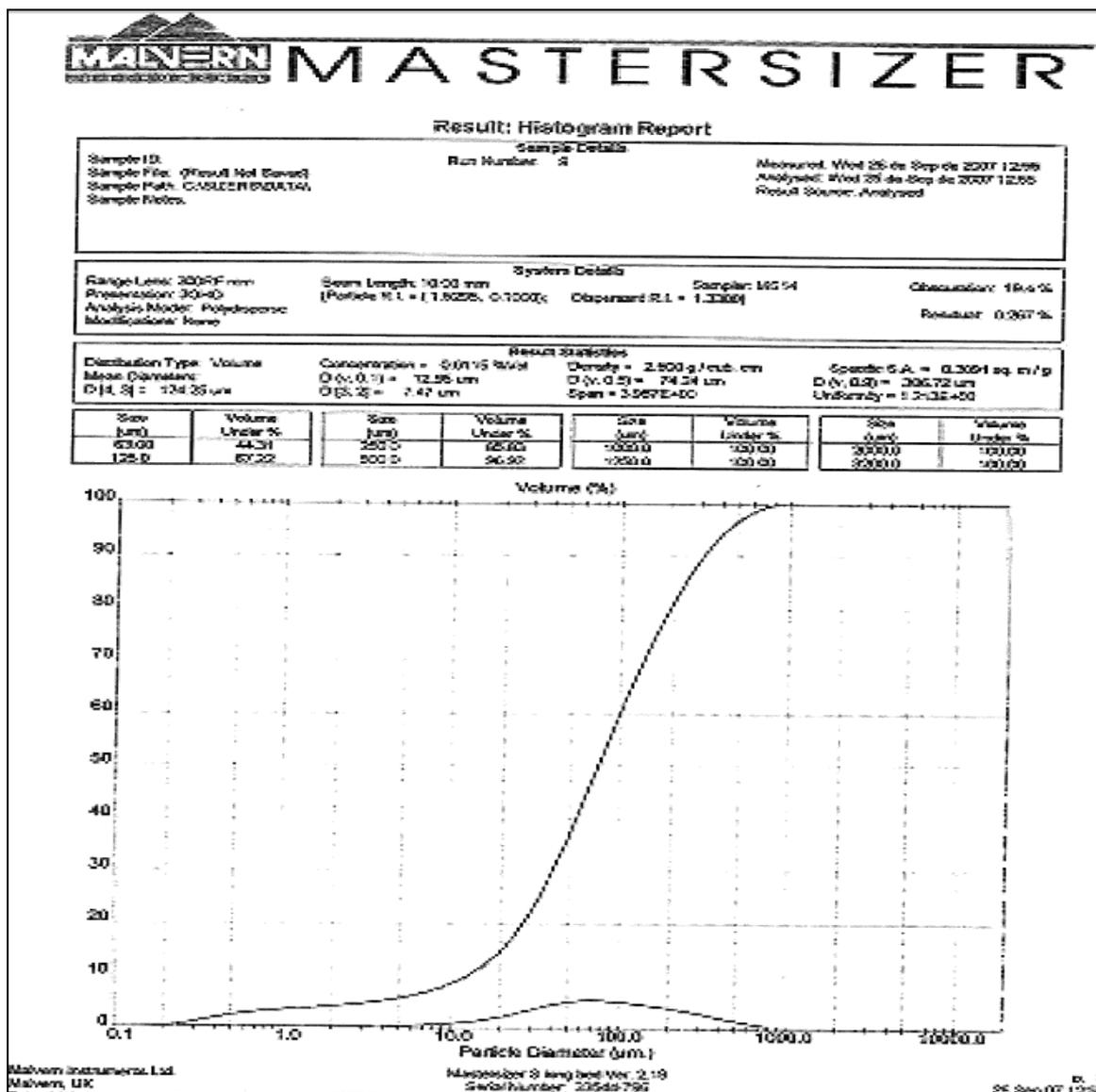


Figura 25. Estudio granulométrico de la escoria blanca mediante Mastersizer X.

4.3.2 Propiedades físicas de las LFS

Densidades y Humedad

Para el estudio de la densidad real de la escoria como material se han seguido las referencias de la Norma Europea UNE-EN 1097-6 [58], utilizando el método del Picnómetro. También se ha calculado la densidad aparente y la densidad de conjunto siguiendo la misma norma.

También se ha determinado la humedad natural de la escoria en las muestras recogidas mediante un molde de capacidad conocida, rellenándolo con escoria sin compactar. Posteriormente se ha desecado el material contenido en el molde en la estufa de secado y se ha determinado la humedad natural de las tres muestras según la Norma Europea

UNE-EN 1097-5 [58]. Los ensayos se realizaron sobre tres muestras de E1 y tres muestras de E2.

Los datos obtenidos se recogen en la Tabla 50 y de su estudio podemos establecer las siguientes conclusiones:

	E1				E2			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	MEDIA	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	MEDIA
Densidad Real (g/cm^3)	2,86	2,86	2,86	2,86	2,71	2,70	2,70	2,70
Densidad Aparente (g/cm^3)	2,82	2,83	2,83	2,83	2,66	2,65	2,66	2,66
Densidad de Conjunto (g/cm^3)	1,25	1,24	1,25	1,25	1,20	1,20	1,19	1,20
% Humedad	0,40	0,30	0,35	0,35	0,45	0,40	0,43	0,43

Tabla 50. Densidades y Humedad de LFS

1. La densidad real media de la escoria como material, $2,86 \text{ g/cm}^3$ y $2,70 \text{ g/cm}^3$, para E1 y E2 respectivamente, se encuentra entre la densidad real media de los cementos (entorno a 3 g/cm^3) y a la densidad real media de la cal (cal aérea entorno a $2,25 \text{ g/cm}^3$ y cal hidráulica entre $2,5$ y $2,8 \text{ g/cm}^3$).
2. La densidad aparente media de la escoria como material, $2,83 \text{ g/cm}^3$ y $2,66 \text{ g/cm}^3$, para E1 y E2 respectivamente, se aproxima a la densidad real media, lo que indica una práctica ausencia de huecos, muy propia de un material fino como el que estamos estudiando. La densidad aparente de la cal aérea está entre $1,5$ y $2,3 \text{ g/cm}^3$.
3. La densidad media de conjunto, $1,25 \text{ g/cm}^3$ y $1,20 \text{ g/cm}^3$, para E1 y E2 respectivamente, es muy parecida a la del cemento, que podemos convenir en torno a los $1,2$ - $1,25 \text{ g/cm}^3$. Para el caso de una cal aérea la densidad del conjunto esta entorno a 1 g/cm^3 .
4. Por los resultados obtenidos en el estudio podemos clasificar el material como un árido medio con densidad inferior a 3 g/cm^3 , tomando como referencia el Código Modelo CEB-FIP 1990 [7] para el hormigón estructural.
5. La humedad natural es pequeña, $0,35\%$ y $0,43\%$, para E1 y E2 respectivamente, dado su almacenamiento en un lugar seco y protegido de variaciones ambientales. Este valor cumple la condición de la norma UNE 80502 [33] y UNE EN 459-1 [49], donde se establece un valor máximo del 2% de humedad para cales de estabilización.

Superficie Específica de Blaine

La superficie específica Blaine se determina mediante el ensayo contemplado en la Norma Europea UNE-EN 7144 [60]. Para ello utilizamos un permeabilímetro Blaine con constante $K = 2,641$.

Los tiempos de flujo han sido medidos a los 15,68 y 15,60 segundos, obteniendo un valor de superficie específica Blaine de 2654 cm²/gramo para E1. Como se puede observar, esta referencia de superficie específica es algo inferior a la determinada mediante el método láser, si bien es cierto que este último sistema de medición es más exacto y siempre determina valores superiores a los obtenidos mediante la técnica del permeabilímetro Blaine.

Si establecemos una comparación entre el tamaño medio de las LFS y el de los ligantes tradicionales, como cementos y cales, podemos observar que las primeras son algo más gruesas que los segundos. La superficie específica media de un cemento se encuentra en torno a los 3000-4000 cm²/g y el de las cales entre 6000-7000 cm²/g, dependiendo del tipo de cal.

La Tabla 51 recoge la comparativa entre la superficie específica de E1 y la de un cemento y una cal, determinadas ambas mediante el método descrito.

Superficie Específica Blaine	
Cal	7000- 8000 cm ² /g
Cementos	3000-4000 cm ² /g
LFS	2664-3091 cm ² /g

Tabla 51. Superficie específica de LFS, cal y cemento

Equivalente de Arena

El ensayo de equivalente de arena se corresponde con el de determinación “a vista” (EAV) que se recoge en la Norma Europea UNE-EN 933-8:2000 [56].

Se realiza introduciendo la muestra de material a ensayar en una probeta cilíndrica y graduada de dimensiones normalizadas que previamente se llena con una solución tipo. Se mezcla bien el suelo con la solución agitándolo, se deja reposar veinte minutos, transcurridos los cuales la arena se habrá depositado abajo, en la zona media estará la arcilla y en la parte superior la solución en exceso.

Leyendo en la probeta los niveles de arena y arcilla, el equivalente de arena (EA) será:

$$EA = \text{Lectura superficie arena} / \text{Lectura superficie arcilla} * 100$$

De esta fracción se toma como valor el número entero más aproximado, con valores entre 0 y 100. Valores altos de la EA indican que existen pocos finos; por el contrario, los valores bajos significan la existencia de proporciones fuertes de finos. Por ejemplo, EA > 75 indica un material granular propio para hormigones; EA < 25 indica un suelo plástico no utilizable por peligroso. Tiene especial utilidad en el caso de suelos granulares con pequeña proporción de material plástico. En ellos, la determinación de los límites de Atterberg es muy difícil hacerla con exactitud. Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 52, para tres muestras de cada una de las escorias.

Equivalente de arena “a vista” (%)		
Tipo de escoria	Muestra	EA
E1	Muestra 1	49
	Muestra 2	50
	Muestra 3	51
	MEDIA	50
E2	Muestra 1	55
	Muestra 2	58
	Muestra 3	57
	MEDIA	57

Tabla 52. Resultados de equivalente de arena de LFS

Aunque la arcilla contenida en las muestras es prácticamente nula, y en todo caso procedente del suelo del acopio en el que se han depositado, la zona superior correspondiente a la fracción fina es una nebulosa de difícil diferenciación. Es lógico este comportamiento por el alto contenido de componentes finos presentes en la escoria, que quedan en suspensión en el líquido patrón, en relación a la fracción más gruesa o arenosa con capacidad de sedimentación en el fondo de la probeta. Existe una gran acumulación de elementos finos en la parte superior de la probeta que no permiten una diferenciación nítida entre el componente grueso y el fino; es por esto que a pesar de que LFS no contiene arcillas, tiene un valor de equivalente de arena que pudiera parecer que las tuviera.

Por otro lado E2 tiene unos resultados en los que el EA expresa una granulometría algo más grosera, como también observábamos en su curva granulométrica. Éstos resultados, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, junto con los de Límites de Atterberg, tenemos que LFS se trata de un material No Plástico.

Plasticidad

Aplicando el ensayo de la cuchara de Casagrande, según UNE 103103 [36] y UNE 103104 [37] se obtuvo que E1 y E2 es un material **no plástico (NP)**.

Próctor Normal

Se determina la densidad máxima y humedad óptima de compactación, según la norma UNE 103500:94 [44]. Con esta energía de compactación realizaremos los ensayos de hinchamiento libre y colapso, con el fin de poder clasificar la escoria como si de un suelo se tratara.

Próctor Normal	Densidad Máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)
E1	1,69	19,0
E2	1,55	19,9

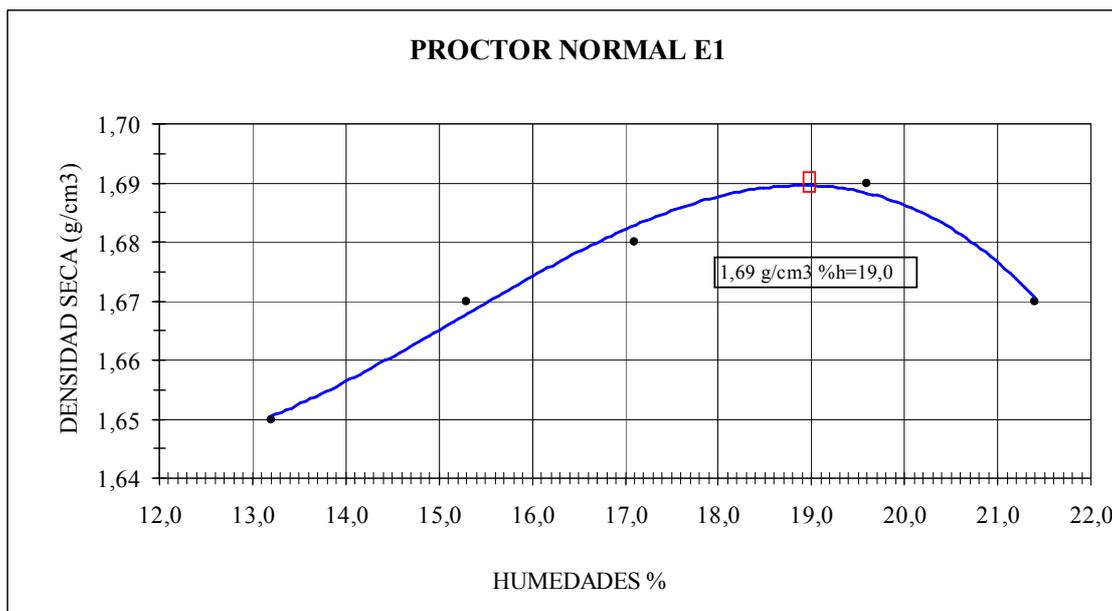


Figura 26. Próctor Normal de la escoria E1

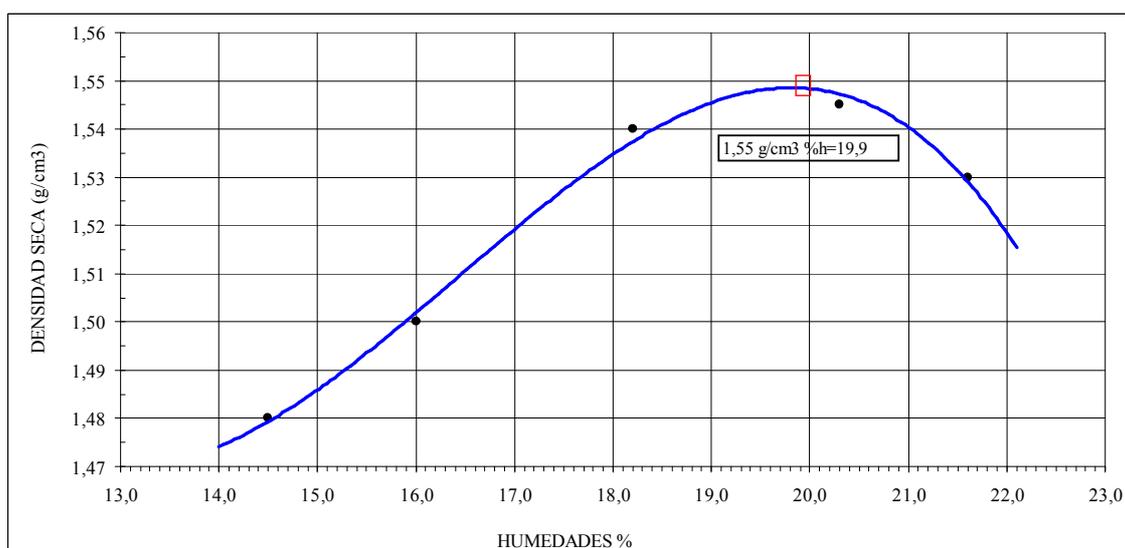


Figura 27. Próctor Normal de la escoria E2

Para obtener el índice CBR compactamos tres probetas de escoria E1 con un contenido de humedad igual al óptimo determinado en el ensayo Próctor Normal. El ensayo de PN no es el más adecuado para el estudio de las propiedades de compactación de LFS, debido a la nula plasticidad de la escoria, por ello, se han obtenido resultados de CBR bastante dispersos en éste material, comprendidos entre 50 y 70. Aún así, estos valores son suficientes para poder compararlo con las condiciones del PG-3 [26] y la norma 6.1.IC de sección de firmes [25].

Próctor Modificado

Se determina la densidad máxima y humedad óptima de compactación del Próctor Modificado para E1 y E2, según la norma UNE 103501:94 [45]. Los resultados se muestran en las figuras siguientes.

LFS	Densidad Máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)
E1	1,83	14,6
E2	1,66	14,9

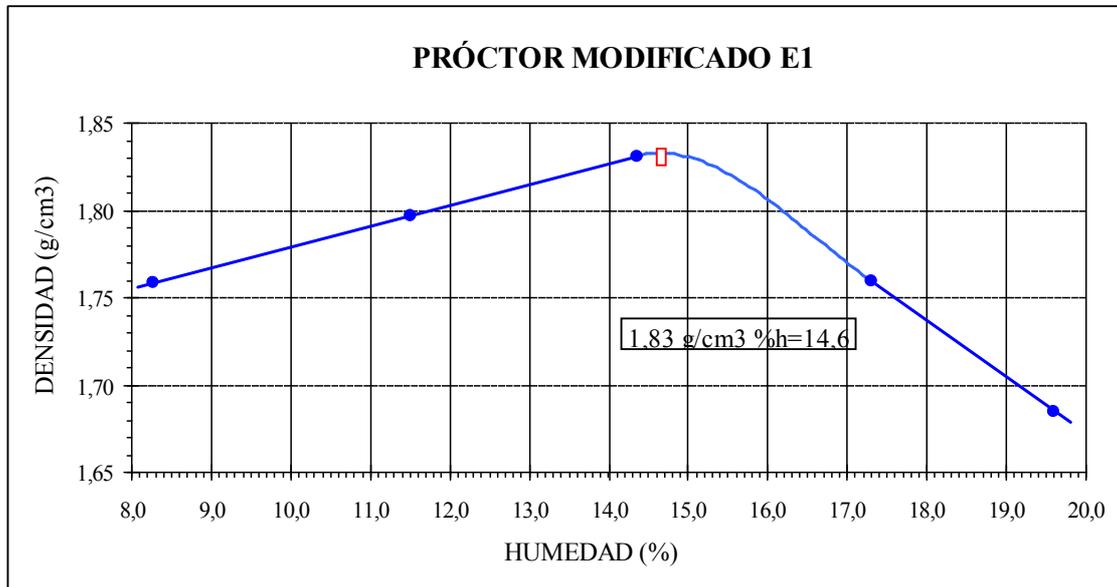


Figura 28. Próctor Modificado de la escoria E1

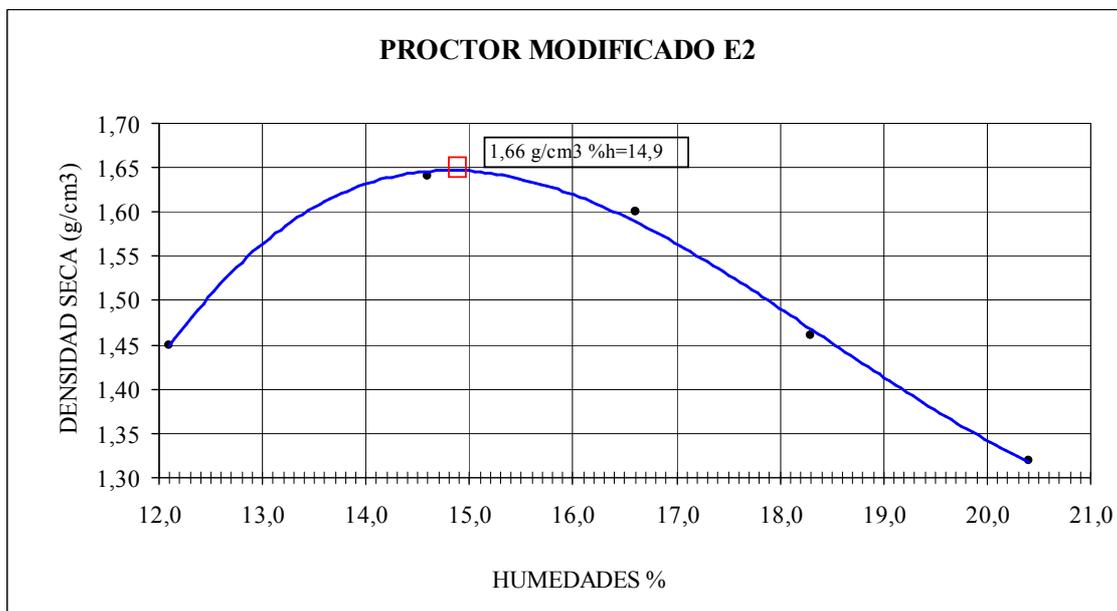


Figura 29. Próctor Modificado de la escoria E2

4.3.3 Ensayos de cambio volumétrico de las LFS

Hinchamiento libre y Asiento de Colapso

Hinchamiento libre en edómetro según UNE 103601 [47]. Se trata de un ensayo de 3 días de duración, a temperatura ambiente, midiendo lo que el suelo se hincha bajo

presión vertical débil al entrar en él el agua por capilaridad. Para poder clasificar la escoria blanca como un suelo, lo hacemos con las condiciones del Próctor Normal. Al cabo de tres días se obtuvo un resultado **del 0,02%** para **E1** y **0,1** para **E2**.

Realizado el ensayo según NLT 254 [17], el material resultó **no colapsable**, con unos asientos verticales siempre inferiores al 1% tanto para E1 como para E2. Este ensayo se realizó en el edómetro a continuación del ensayo anteriormente citado de hinchamiento libre.

Expansión Potencial

Como quedó expuesto en el capítulo 2, las escorias blancas LFS contienen una gran cantidad de sustancias potencialmente expansivas en las primeras edades, una vez extraídas del horno y depositadas en los acopios de almacenamiento. La presencia de cal libre (lima) y magnesia libre (periclasa) hacen posible con su hidratación progresiva un incremento importante de la masa de escoria, que en algunos casos puede pasar del 30%, siendo habituales los valores en torno al 10%. Concentraciones de portlandita y brucita también pueden producir hidrataciones más a largo plazo.

Al ser extraída del horno, la expansividad de la escoria es elevada, y es por ello que es necesario que permanezca depositada el tiempo suficiente para garantizar su estabilización mediante la hidratación tanto de la cal libre como de la periclasa.

Una vez hidratados los componentes expansivos, y realizadas las transformaciones alotrópicas del silicato bicálcico, el aspecto de la escoria es el de un árido disgregado y desintegrado. Es en este estado en el que utilizamos la escoria y, en consecuencia, será en esta fase en la que debemos comprobar el comportamiento expansivo del material.

La expansividad será baja si el proceso de hidratación de los componentes expansivos de la escoria se ha completado, y media o alta si este proceso no se ha producido totalmente o no se ha iniciado. Es por ello evidente que la durabilidad y estabilidad de los materiales en los que intervenga la escoria se garantiza si éstas están perfectamente estabilizadas, circunstancia que debemos prevenir en los ensayos de la fase experimental.

Las referencias bibliográficas para el estudio de la expansión de escorias blancas son prácticamente inexistentes. El profesor Manso Villalaín recoge en su Tesis estudios de expansividad de escorias negras siguiendo las prescripciones de la Norma Americana ASTM D-4792 [67]. De igual forma, los trabajos recogidos en la Tesis Doctoral de la Doctora Losáñez González [142] y el Doctor Rodríguez Sáiz [184] refieren el estudio de la valoración de la expansividad de la escoria blanca de horno de cuchara una vez meteorizada, tomando como referencia también el procedimiento de la citada norma. La Norma Americana ASTM D-4792 [67] es una referencia muy recurrida en el estudio de materiales utilizados en construcción y obra civil, por lo que es la que se ha tomado también como modelo de ensayo en esta Tesis.

En las citadas Tesis Doctorales se hace referencia también al procedimiento prescrito en la Norma del Laboratorio de Transportes NLT-361 [21], que mide el grado de hidratación de la cal y magnesia libres en los áridos que tengan en composición escorias

de acería, mediante la hidratación de las mismas en un autoclave y su posterior valoración por técnicas granulométricas previas y posteriores al ensayo. Si bien en el caso de las escorias negras sí fue posible su análisis, en el caso de los estudios de la Doctora Losáñez González se descarta este método de ensayo dada la finura de la escoria blanca disgregada utilizada.

El desarrollo del proceso de análisis de la Norma Americana ASTM D-4792 [67] es muy simple: la muestra se introduce en un recipiente cilíndrico de pared gruesa (molde de CBR) compactada con su humedad en nuestro caso de Próctor Modificado. Éste se introduce a su vez en agua hasta un nivel adecuado, junto con unos captadores de desplazamiento inductivos LVDT o bien relojes comparadores que midan el posible desplazamiento vertical de la superficie de la muestra. La toma de datos se hace cada 6 horas. Posteriormente se calienta el agua hasta los $70 \pm 2^\circ \text{C}$, intentando mantener esta temperatura durante los siete días que dura el ensayo.

El resultado del ensayo se expresa como cociente entre % de dilatación absoluta medida y la dimensión vertical original de 127 mm. En el caso de la escoria blanca la valoración del hinchamiento es un indicativo del grado de meteorización de la cal y magnesitas libres, por lo que los valores se corresponden con las muestras menos hidratadas y los más bajos con las más estabilizadas.

Realizamos éste ensayo para las escorias E1 y E2; presentimos que pueden comportarse de manera diferente debido a la diferente procedencia, al distinto proceso de fabricación de acero y diferente composición química. Tras éste ensayo se estudiarán las características químicas de los materiales resultantes.

Con la humedad y densidad del PM en cada caso, se realiza por triplicado el ensayo de la norma ASTM D-4792 sobre E1 y E2, obteniéndose los siguientes valores.

Ensayo		E1				E2			
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	MEDIA	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	MEDIA
Próctor Modificado	Densidad Máxima (g/cm^3)	1,83				1,66			
	Humedad óptima (%)	14,6				14,9			
Expansión potencial	Absorción (%)	19,1	18,8	20,0	19,3	2,5	5,1	5,1	4,2
	Trascurridas 20 h (%)	0,06	0,03	0,06	0,05	0,14	0,20	0,16	0,17
	Trascurridas 7 días (%)	0,11	0,11	0,11	0,11	2,29	2,80	2,50	2,53
	Final (%)	18,72	17,38	18,66	18,26	35,80	39,16	39,52	38,16
	Tiempo requerido (h)	5060	5060	5060	5060	3885	3885	3885	3885

Tabla 53. Resultados del ensayo de expansión potencial sobre LFS

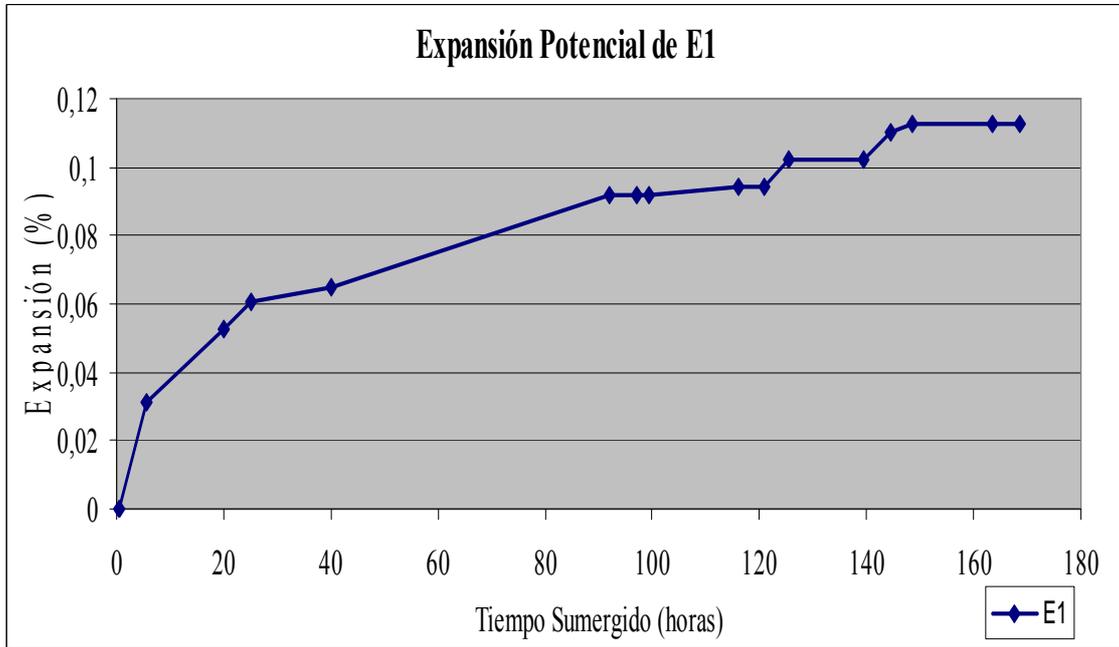


Figura 30. Expansión potencial los 7 primeros días para E1

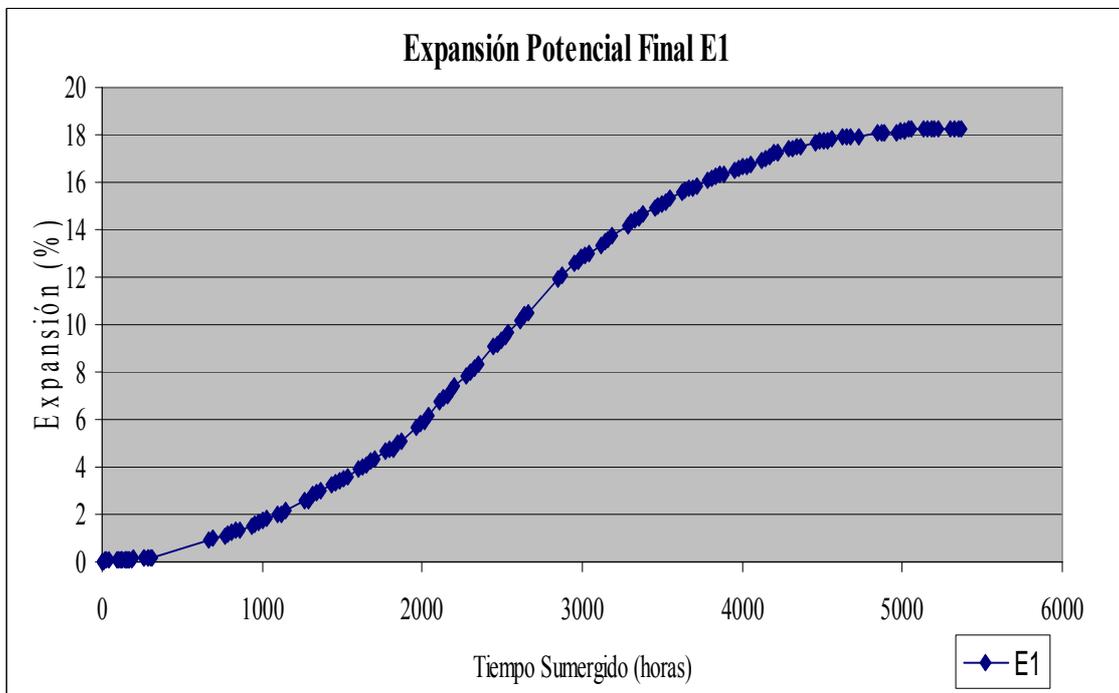


Figura 31. Expansión potencial final para E1

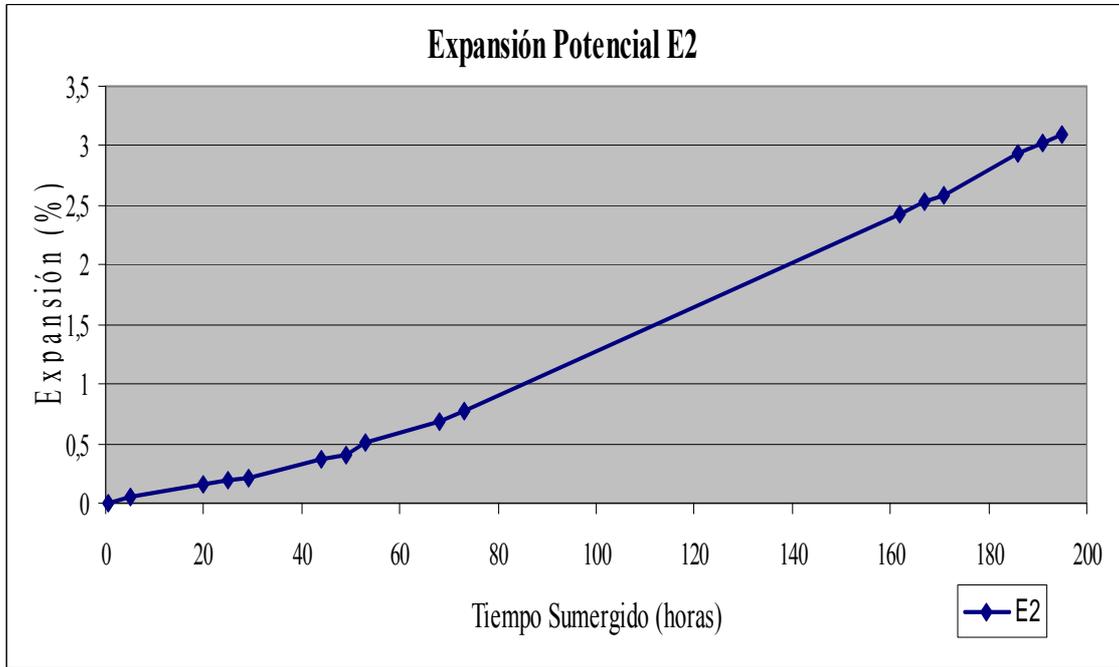


Figura 32. Expansión potencial los 7 primeros días para E2

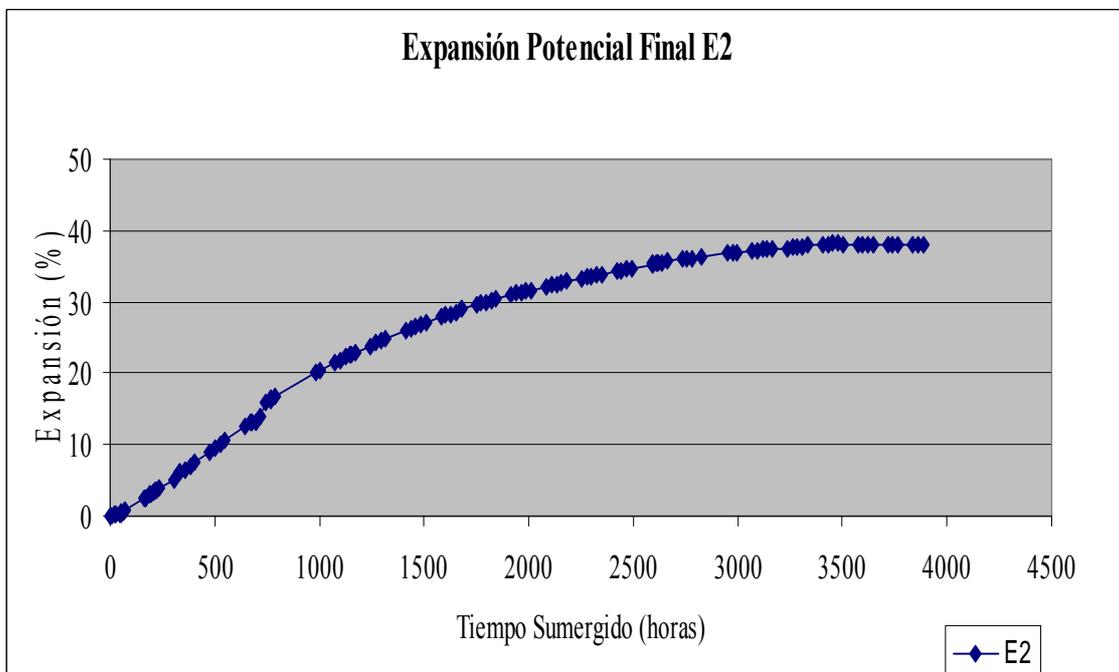


Figura 33. Expansión potencial final para E2

La expansión inicial, durante las 20 primeras horas, es del 0,05% y 0,17% para E1 y E2, respectivamente. Entre las 20 y 40 horas de ensayo, la expansión redujo su velocidad de crecimiento, tal y como decía Manso et al. en 2005 [149] en su artículo, donde las escorias LFS entre las 25 y las 40 horas no experimentaban considerables cambios de volumen, pero sí después, y a gran velocidad.

Trascurridos los 7 primeros días de ensayo (como recomienda la norma ASTM D 4797), la expansión alcanzada por E1 y E2 fue del 0,11% y 2,53%, respectivamente. Pero, la inestabilidad dimensional de LFS continuó, prolongándose el ensayo durante meses (7 y 5,4 meses) y alcanzándose valores de expansión final superiores al 18% y 38% para E1 y E2, respectivamente.

Como referencia para contrastar esta magnitud del hinchamiento acelerado, cabe señalar que la norma ASTM D 2940 [4]: “Graded aggregate materials for bases or subbases for highways or airports” admite una expansión máxima del 0,5% en el ensayo de hinchamiento acelerado según ASTM D 4792 [67]. Por tanto, ni E1 ni E2 cumplirían como material para emplearse por sí sólo en bases o subbases de carreteras y aeropuertos. Habrá que ver si su mezcla con suelos, que es nuestro objetivo, empleando pequeñas proporciones, sobrepasa esta limitación.

Por otro lado, la expansión alcanzada por E2 es muy superior a la de E1, resultado que ha de deberse a la diferente composición química de ambas. En la caracterización química de E1 y E2 vemos que los componentes no difieren demasiado, la mayor diferencia está en que E2 tiene mayor concentración de alúmina y de sulfatos. Por otro lado, de la difracción de rayos X, se obtiene que E2 contiene cal libre, periclusa y portlandita, mientras que E1 no presenta cal libre en ninguna de sus dos fracciones. Se analizó el material resultante tras este ensayo, mostrando los resultados en el apartado siguiente. De esta manera, se observan los componentes que se han formado tras el ensayo de expansión potencial.

De éstos resultados, también podemos concluir que, para cuantificar el potencial expansivo de escorias LFS mediante ensayos acelerados de hidratación, y debido a la lentitud con la que ésta tiene lugar, se requiere un tiempo muy superior a los 7 días recomendados por la norma ASTM D 4792 [67]. El problema es que, en general, se utiliza dicho tiempo para estudiar la expansión en las escorias, pudiéndose llegar a conclusiones de bajo o nulo potencial de hinchamiento, cuando en realidad puede ser bastante elevado. Por ejemplo, Manso et al. (2005) [149] consideraron dicho periodo de tiempo para estudiar la expansión de un tipo de escoria LFS, llegando a la conclusión de que no era expansiva. Las curvas “potencial de expansión-tiempo sumergido” obtenidas en la presente investigación son de aspecto similar a las del artículo de Manso et al., (2005). Sin embargo, la duración de la expansión lenta, posiblemente debido a la hidratación de la periclusa, es de mucha mayor importancia que la cuantificada en dicho artículo.

En relación a la expansión diferida producida en las LFS, Iguchi et al. (2001) [119] llegaron a atribuir el lento desarrollo de la hidratación a la ocasionada por el C₃A (aluminato tricálcico).

Como ya se ha señalado, la hidratación de la cal libre y la periclusa son los principales responsables de la lenta y diferida expansión de las escorias. Varios autores coinciden

en que la hidratación en ensayos acelerados, de la periclasa requiere mayor tiempo que la lima (Motz y Geiseler, 2001 [163] y Manso et al, 2005 [149]). Por tanto la expansión inicial de las primeras 25 horas de ensayo se debe principalmente a la hidratación de la cal libre y por consecuencia al incremento de portlandita.

Otro resultado que llama la atención, es la absorción, para E1 la absorción es del 19%, mientras que para E2 está entorno al 4%. Es una diferencia importante, asociable a la finura de molido, mayor en E1, y a la higroscopía de las partículas de cada una de ellas.



Probeta 1 Probeta 2 Probeta 3
Figura 34. Hinchamiento tras ensayo de expansión potencial para la E1.



Probeta 1 Probeta 2 Probeta 3
Figura 35. Hinchamiento tras ensayo de expansión potencial para la E2.

Caracterización química de las LFS sometidas a ensayo de expansión potencial

Para conocer a qué se debe la expansividad de LFS recurrimos a su análisis químico, termogravimétrico, calorimétrico y mineralógico por difracción de rayos X, para ver los componentes que han aparecido y las transformaciones sucedidas.

En las figuras siguientes podemos ver como ha quedado el material tras el ensayo de expansión potencial.



Probeta 1 Probeta 2 Probeta 3
Figura 36. Aspecto del material tras ensayo de expansión potencial para la E1



Probeta 1

Probeta 2

Probeta 3

Figura 37. Aspecto de material tras ensayo de expansión potencial para la E2.

Análisis mediante espectrometría por fluorescencia de rayos X

Muestra Tras Expansividad	%SiO ₂	%CaO	%Al ₂ O ₃	%SO ₃	%MgO	%Fe ₂ O ₃	%K ₂ O	LOI*
E1	13,3	54,5	6,04	<1.00	10,2	1,46	<1.00	13,1
E2	11,3	34,2	8,08	1,04	21,9	2,22	<1.00	20,1

* Calculado a partir de la pérdida de masa obtenida del análisis TGA-DTA

Tabla 54. Composición química de LFS tras expansividad

Análisis de carbono y azufre mediante combustión

Muestra Tras Expansividad	%C	%S
E1	0,51	0,56
E2	1,47	0,40

Tabla 55. Análisis de C y S de LFS tras expansividad

La mayoría de los componentes no varía sustancialmente su proporción. Estas variaciones, pueden hacernos pensar en la formación de nuevos compuestos, como son la portlandita (por hidratación de la cal), brucita (por hidratación de la periclase) o incluso compuestos muy expansivos como la hidromagnesita en la muestra E2 o incluso etringita o thaumasita.

Análisis termogravimétrico y calorimétrico

En las figuras siguientes se muestra el análisis TGA-DTA, termogravimétrico y calorimétrico realizado sobre las escorias E1 y E2 tras el ensayo de expansividad. Utilizamos estos ensayos para conocer la pérdida de peso y las reacciones químicas y transformaciones que se suceden en el proceso de calentamiento entre los componentes mineralógicos de la escoria LFS.

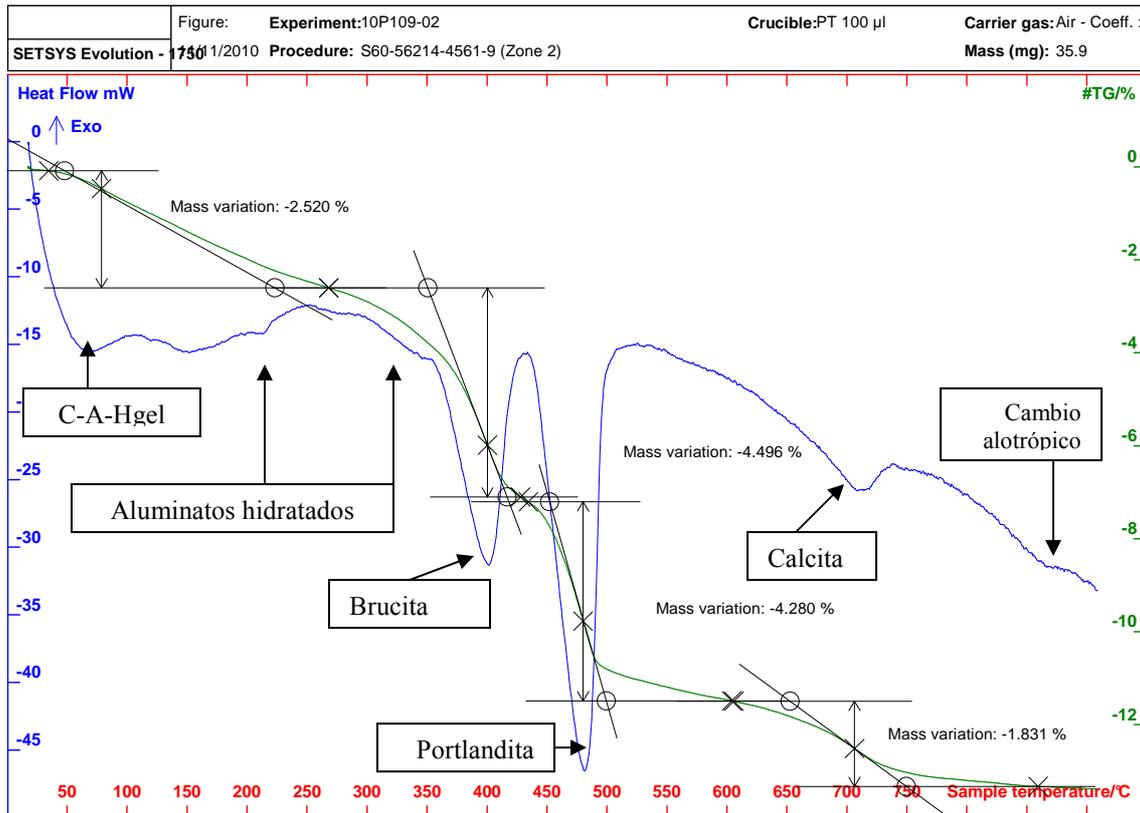


Figura 38. Análisis térmico de E1 tras el ensayo de expansividad.

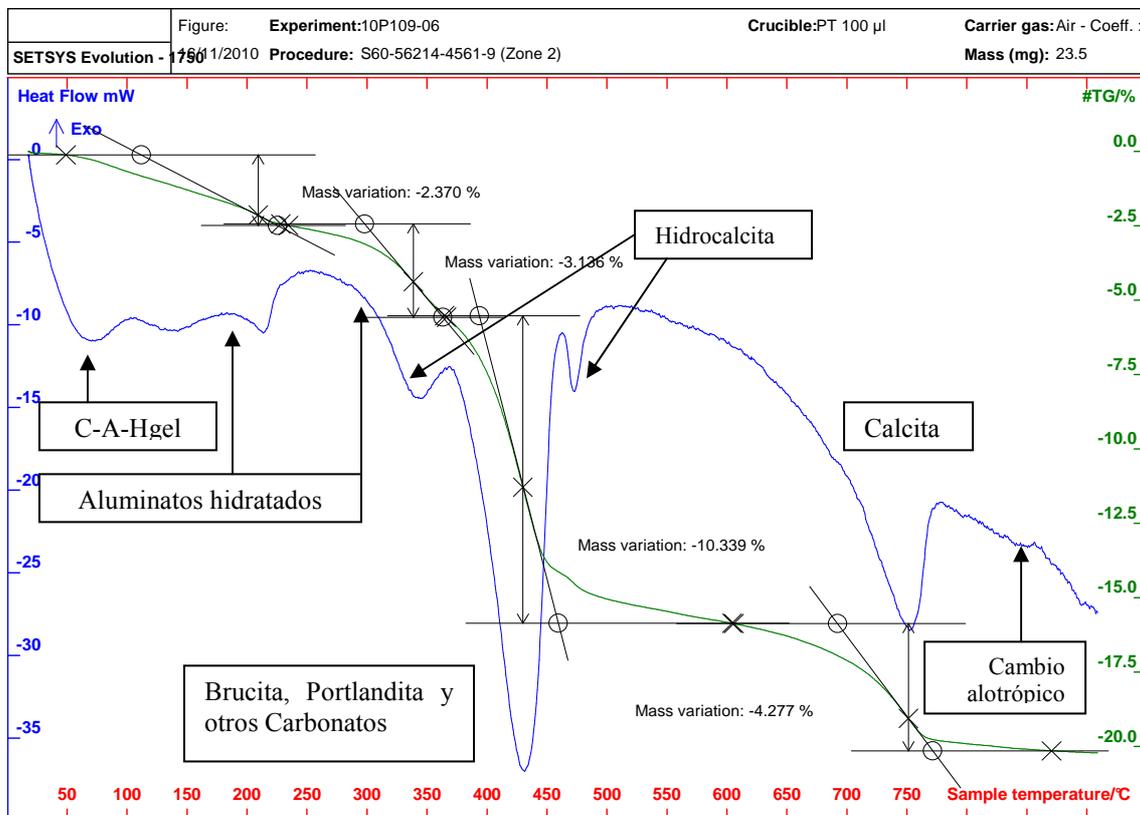


Figura 39. Análisis térmico de E2 tras el ensayo de expansividad

Análisis mineralógico por difracción de rayos X.

Se muestra a continuación el análisis mineralógico realizado por difracción de rayos X (XRD) para las escorias E1 y E2 tras el ensayo de expansión potencial.

1.- Ingesonita: Ca_2SiO_4 ; 2.- Periclasa: MgO ; 3.- Fluorita: CaF_2 ; 4.- Portlandita: $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
 5.- Calcio-Olivino: Ca_2SiO_4 ; 6.- Brucita: $\text{Mg}(\text{OH})_2$

E1 tras expansión

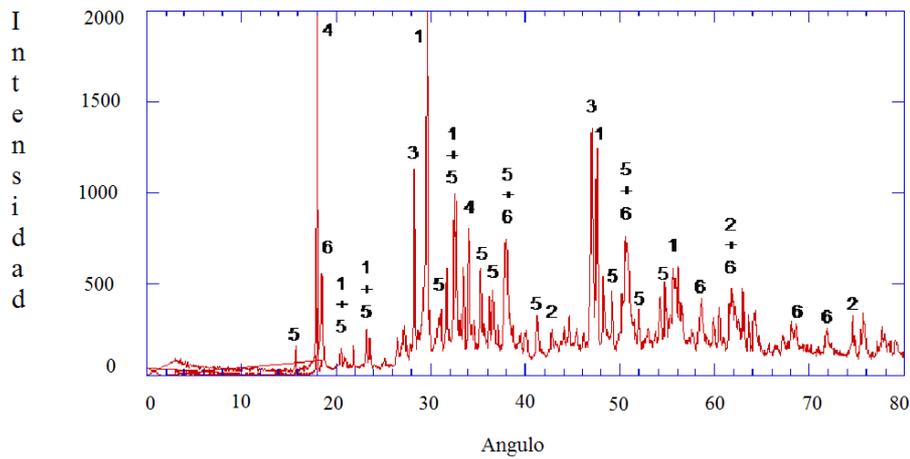


Figura 40. Difracción de rayos X (XRD) de la escoria E1 tras el ensayo de expansividad

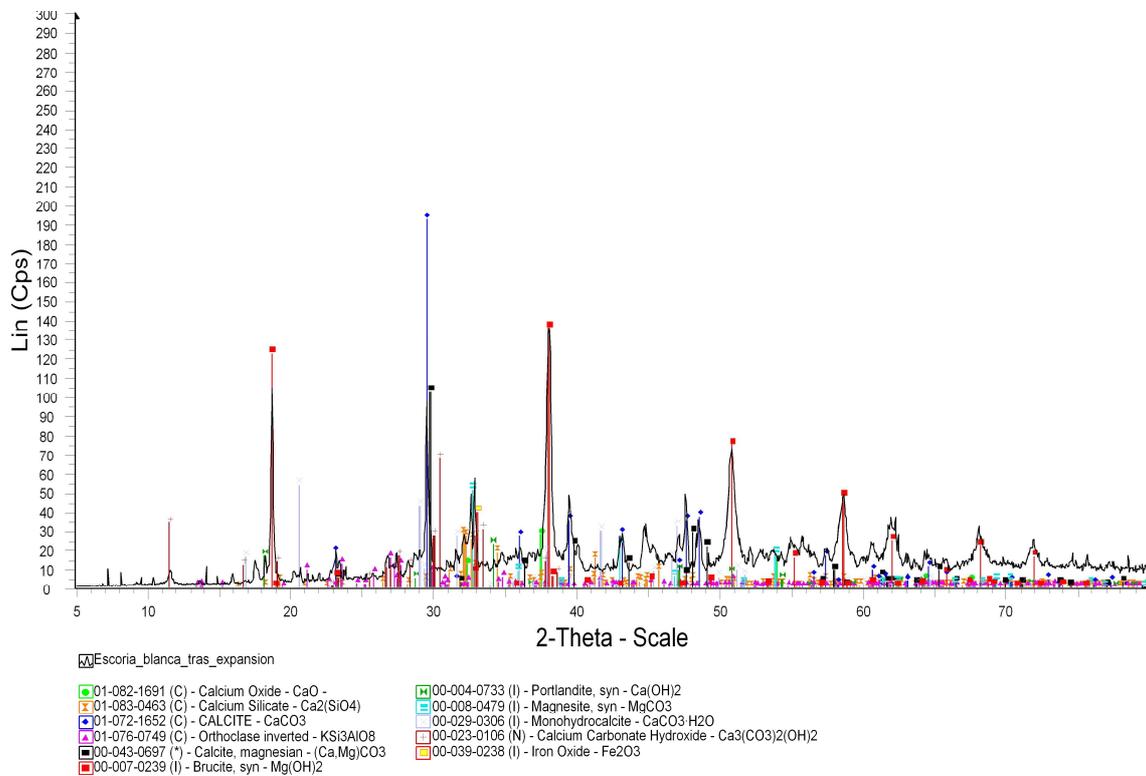


Figura 41. Difracción de rayos X (XRD) de la escoria E2 tras el ensayo de expansividad

Mineral	Fórmula	Proporción	
		E1	E2
Ingesonita	Ca ₂ SiO ₄	medium	-
Periclasa	MgO	minor	-
Fluorita	CaF ₂	minor	-
Portlandita	Ca(OH) ₂	mayor	-
Calcio-Olivino	Ca ₂ SiO ₄	medium	-
Brucita	Mg(OH) ₂	medium	-
Silicato cálcico	Ca ₂ (SiO ₄)	-	medium
Calcita	CaCO ₃	-	medium
Ortoclasa invertida	KS ₃ AlO ₈	-	minor
Calcita, magnesita	(Ca, Mg)CO ₃	-	medium
Brucita	Mg(OH) ₂	-	medium
Portlandita	Ca(OH) ₂	-	minor
Magnesita	MgCO ₃	-	minor
Hidrocalcita	CaCO ₃ .H ₂ O	-	minor
Hidróxido de carbonato cálcico	Ca ₃ (CO ₃) ₂ .(OH) ₃	-	minor
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	-	minor

Tabla 56. Compuestos presentes en LFS tras ensayo de expansión potencial según el análisis XRD

E1

Con respecto a las probetas de la escoria blanca E1 sometidas a ensayo de hinchamiento, son particularmente destacables las pérdidas asociadas a las descomposiciones de la brucita y la portlandita. Aparece asimismo una pequeña pérdida (760 °C) asociada a la descarbonatación de la caliza formada en la meteorización de la escoria. Se observan también la descomposición de los aluminatos hidratados (100 – 300 °C) y un pico endotérmico en torno a 850 °C que no registra pérdida de masa asociada por lo cual previsiblemente responderá a una transformación de tipo alotrópico.

Como en anteriores ocasiones, las muestras de escoria blanca sometidas a ensayo de hinchamiento revelan presencias muy destacadas de portlandita y brucita, resultados sin duda de la hidratación de la cal y la periclasa libres presentes en la escoria de partida. Estas transformaciones expansivas justifican los cambios de volumen registrados durante el ensayo de hinchamiento, coincidiendo con otros estudios. Por lo demás, son reseñables también la presencia de silicatos bicálcicos (ingesonita y calcio – olivino) en cantidades importantes, así como la notoria presencia de fluorita en esta escoria. Por último, se registra residualmente la presencia de periclasa sin transformar.

E2

Con respecto a las probetas de la escoria blanca E2 sometidas a ensayo de hinchamiento, son particularmente destacables las pérdidas asociadas a las descomposiciones de la brucita y la portlandita, así como otros carbonatos y carbohidratos. Aparece asimismo una importante pérdida (760 °C) asociada a la descarbonatación de la caliza. Se observan también la descomposición de los aluminatos hidratados (100 – 300 °C) y el pico endotérmico en torno a 850 °C, relacionado con transformaciones de tipo alotrópico.

Las muestras de escoria blanca sometidas a ensayo de hinchamiento revelan presencias muy destacadas de brucita, carbonatos de magnesio y calcio, y de hidrocalcita, resultados sin duda de la hidratación y carbonatación de la cal y carbonatación de la periclasa libres presentes en la escoria de partida. Estas transformaciones son expansivas, y en especial es acusadamente expansiva la formación de hidrocalcita, ausente en la escoria E1 sometida a este ensayo. Ello justifica el resultado final de hinchamiento a largo plazo, que en la muestra E2 (38%) es claramente superior a la muestra E1 (18%).

4.3.4 Resumen de ensayos de las LFS

En la Tabla 57 se muestra el resumen de los principales ensayos de caracterización física de LFS, que han sido desarrollados en los apartados anteriores.

Ensayo	E1				E2				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	MEDIA	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	MEDIA	
Densidad Real (g/cm ³)	2,86	2,86	2,86	2,86	2,71	2,70	2,70	2,70	
Densidad Aparente (g/cm ³)	2,82	2,83	2,83	2,83	2,66	2,65	2,66	2,66	
Densidad de Conjunto (g/cm ³)	1,25	1,24	1,25	1,25	1,20	1,20	1,19	1,20	
% Humedad	0,40	0,30	0,35	0,35	0,45	0,40	0,43	0,43	
Módulo de Finura	4,2				-				
Superficie Específica Blaine (cm ² /g)	2654-3091				-				
Equivalente de Arena (%)	50	49	51	50	55	58	57	57	
Índice Plasticidad	NP				NP				
Materia Orgánica (%)	0				0				
Hinchamiento libre (%)	0,02				0,10				
Asiento de Colapso (%)	<1%				<1%				
Próctor Normal	Densidad Máxima (g/cm ³)	1,69			1,55				
	Humedad óptima (%)	19,0			19,9				
Próctor Modificado	Densidad Máxima (g/cm ³)	1,83			1,66				
	Humedad óptima (%)	14,6			14,9				
Expansión potencial	Trascurridas 20 h (%)	0,06	0,03	0,06	0,05	0,14	0,20	0,16	0,17
	Trascurridas 7 días (%)	0,11	0,11	0,11	0,11	2,29	2,80	2,50	2,53
	Final (%)	18,72	17,38	18,66	18,26	35,80	39,16	39,52	38,16
	Tiempo requerido (h)	5060	5060	5060	5060	3453	3453	3453	3453

Tabla 57. Resumen de ensayos de caracterización física de LFS

Para conocer el contenido en **materia orgánica** habría que utilizar el método del permanganato potásico, según UNE 103204 [40]. El ensayo no fue realizado, puesto que no resulta aventurado afirmar que, en principio, en un árido artificial como la escoria blanca LFS no existe vestigio alguno de materia orgánica. Sin embargo, también en este caso es admisible la posibilidad de poder haber sido contaminado en su exposición a la intemperie o bien que una exposición excesivamente larga a la misma dé lugar a una colonización de los acopios por parte de musgos u otros vegetales.

4.4 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE LAS LFS CON CALES Y CON SUELOS

A lo largo de éste capítulo, se ha hecho hincapié en las condiciones que cumplían LFS respecto a la normativa de cales y a la normativa de suelos. Exponemos en éste apartado un resumen de todas ellas.

En la Tabla 58 se expone las principales prescripciones existentes en la normativa de cales para estabilización y su comparación con las características de las LFS. Nos aporta una idea clara sobre la semejanza entre la escoria blanca caracterizada y los materiales empleados en la estabilización de suelo, de ahí el posterior uso que se desarrolla en la presente Tesis Doctoral.

NORMA					LFS	Comportamiento LFS	
Prescripción	UNE EN 459-1 y UNE 80502					PG-3. Art.200. Cales para estabilización	Cumple
	CL 90Q	CL 90S	CL 80Q	CL 80S			No cumple
Contenido CaO+MgO	≥90%		≥80%		-	55+9=64%	No cumple
MgO	≤5% (hasta 7% si es estable)				≤10%	9%	cumple
CO ₂	≤4%		≤7%		-	6%	cumple
SO ₃	≤2%				-	0,98 %	cumple
Humedad	≤2%					0,35%	cumple
Finura	≤7%					4,2	cumple
Estabilidad	Estable				Si MgO>7%, estable	no estable	No cumple
Retenido en tamiz de 3 mm	0%	-	0%	-	-	0%	cumple
Retenido en tamiz de 2 mm	≤5%	-	≤5%	-	-	0-1%	cumple
Retenido en tamiz de 0,2 mm	-	2%	-	2%	-	20-40%	No cumple

Tabla 58. Comparativa entre prescripciones de Cales y LFS

En la Tabla 59 se exponen las propiedades de LFS y los requisitos que el PG-3 establece en su artículo 330 “terraplenes” para caracterizar los suelos. Como a lo largo del capítulo se ha ido explicando los motivos por lo que quedaba descartado LFS como suelo seleccionado y adecuado, indicamos aquí directamente las condiciones requeridas a un suelo tolerable. Queda pues E1 (por semejanza E2) caracterizada como suelo TOLERABLE.

Característica PG-3	Valor de LFS	Límite para Suelo Tolerable
Materia Orgánica	0%	MO<2%; MO<1% (*)
Sales solubles incluido el yeso	0,86%	-
Sales solubles distintas al yeso	0,72%	<1%
Contenido en Yeso	0,14%	<5%
SO ₃ solubles	<0,975%	<1% (*)
Dmáximo	1 mm	-
Cernido UNE 0,40	90%	-
Cernido UNE 2	79%	-
Cernido UNE 0,08	38%	-
IP	NP	-
Asiento Colapso	<1%	<1%
Hinchamiento Libre	0,02%	<3%; <1%(*)
(*) Exigencia adicional para los suelos que se empleen en la formación de explanadas		

Tabla 59. Comparativa entre prescripciones del PG-3 (clasificación de suelos) y LFS

4.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Como conclusiones del presente capítulo pueden señalarse las siguientes:

- Los componentes mayoritarios de las escorias LFS son los silicatos y aluminatos de calcio y magnesio, que presentan propiedades hidráulicas. Éstas pueden ser útiles en aplicaciones de construcción e ingeniería civil, contribuyendo a un desarrollo sostenible y eficiente del medio ambiente.
- Las escorias LFS estudiadas contienen presencia de calcita, portlandita y periclasa. Otros autores también han encontrado elevados contenidos de periclasa en las LFS [21, 31]. La presencia de silicatos y aluminatos se encuentra en concentraciones muy compensadas. Existen aluminatos reactivos con el agua, como la Mayenita y otros. De cara a la estabilización de suelos es prometedora la presencia de cal y magnesia (al igual que en la cal dolomítica) y también la presencia de aluminatos y ligeras proporciones de algún silicato reactivo (al igual que en el cemento). Por otra parte, si existen sulfatos, yesos, en los suelos es previsible la aparición en las mezclas con escoria de pequeñas cantidades de etringita y otros compuestos sulfatados, con fijación de cal y magnesia libres.
- Las LFS puede clasificarse como un suelo Tolerable según la clasificación del PG-3.
- Las LFS estudiadas en la presente Tesis Doctoral no fueron volumétricamente estables en condiciones del ensayo de expansión potencial. La expansión potencial de E1 y E2 alcanzó valores entorno al 18% y 38%, respectivamente.
- El tiempo necesario para alcanzar la expansión final fue de 5060 horas (7 meses aproximadamente) y 3885 horas (5 meses y 12 días), respectivamente, a una temperatura de 70°C. Tiempo muy superiora a los 7 días de ensayos indicados en la norma ASTM 4792-00.

- La expansión fue debida a las reacciones de hidratación, carbonatación y/o oxidación de los componentes presentes en las escorias LFS, como cal libre, magnesia, aluminatos, silicatos, sulfuros y hierro. Algunas de estas reacciones es lenta y diferida en el tiempo.
- La diferencia entre la absorción de la escoria E1 (19%) y la escoria E2 (4%) se asocia a la finura de molido, mayor en E1, y a la higroscopía de las partículas de cada una de ellas.
- Las propiedades de las LFS, indican el uso de la misma especialmente en matrices no rígidas y porosas como puede ser la estabilización de suelos y terraplenes.

CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA NEGRA DE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO (EAFS)

5 CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA NEGRA DE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO (EAFS)

5.1 INTRODUCCIÓN

Se plantean en éste capítulo como línea de trabajo de investigación, la caracterización física y estructural de la escoria negra, para su posterior utilización en las capas del firme de caminos rurales, en sustitución de zahorras. Por ello, a lo largo del capítulo se compararán las características de EAFS con las de las zahorras artificiales. Las prescripciones para zahorras se encuentran recogidas en el PG-3 y fueron resumidas en el capítulo 3 de la presente Tesis. Además se tienen en cuenta otras consideración indicadas en la norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco [22].

El completo conocimiento de las propiedades químicas, físicas y de estructura, nos permitirá abordar con éxito los trabajos para cuyos fines queremos destinarlo. Para ello, se tuvo en cuenta el proceso de producción de acero en horno eléctrico de arco y el procesado posterior de la escoria HEA.

Procesado de la escoria

Al finalizar la etapa de fusión y oxidación de la carga en el horno eléctrico de arco, etapa de duración entorno a una hora, se produce el colado o vaciado del mismo, el cual queda libre para fundir una nueva carga. En ese momento, el caldo de acero pasa al horno-cuchara donde será desoxidado, desulfurado y ajustada su composición al requerimiento final del acero, mientras la escoria del horno eléctrico de arco (EAF) es vertida en estado pastoso a un contenedor del tamaño adecuado para la cantidad producida en cada colada, el cual sirve para su transporte hasta el foso de almacenamiento, donde es vertida de modo ordenado.

Las escorias utilizadas en este estudio se caracterizan por proceder del siguiente proceso de fabricación del acero:

- La carga se compone de 140 T de chatarra más 120 T. de prerreducido.
- Contiene 1600 kg de Cal Dolomítica por colada (0,62 %).
- Contiene 6000 kg de Cal normal por colada (2,31 %).
- El enfriamiento de la escoria se produce al aire libre por riego.
- La escoria permanece entre 5 y 10 días en parque de acería

Una vez que la escoria está en el foso a una temperatura de unos 1200 °C, el propio enfriamiento espontáneo, y el efecto adicional de regado energético con agua, hacen que

ésta pase al cabo de cinco días al estado sólido a temperatura ambiente cuarteada en trozos de un tamaño irregular (en torno a 20 kg).

Dichos trozos se manejan con palas cargadoras mecánicas que los cargan en camiones convencionales tipo bañera de transporte de áridos. Estos vehículos transportan la escoria, ya de un color negro bien visible, hasta la planta de tratamiento de las escorias.

En la planta de tratamiento, la escoria negra se somete a los siguientes procesos:

- a) Trituración o molienda hasta tamaños clásicos propios de los áridos convencionales (hasta 50 mm de tamaño máximo).
- b) Separación magnética de la máxima proporción posible de partículas de hierro metálico, las cuales son recuperadas como carga nueva del horno eléctrico de arco. Por lo demás, son partículas no deseadas en el empleo como árido de las escorias.
- c) Tamizado y separación de diferentes tamaños.
- d) Envejecimiento espontáneo por exposición de la escoria a la intemperie.

Tras dichos procesos, la escoria queda preparada para su uso posterior, estando éste en función de sus características propias como material y de las posibilidades del mercado del entorno geográfico.

La planta de clasificación y estabilización de la escoria lleva a cabo las siguientes operaciones con la misma:

Primeramente las escorias se llevarán a la planta de clasificación y tratamiento de camiones procedentes de la acería.

Una vez en la planta primeramente se realiza un precibado para separar áridos, donde se separan los áridos de tamaños mayores a 50 mm., los cuales pasan a machaqueo posterior.

El resto del material se conduce al cribado en 3 tamices. Los usos obtenidos son: 0/6, 6/13, 13/23, 23/50. Posteriormente, cada huso granulométrico es conducido a la zona de humectación-volteado en ciclos sucesivos.

Para el proceso de estabilización, las escorias serán sometidas a una aspersión suave por agua corriente desde las 9 de la noche hasta las 8 de la mañana, es decir 11 horas de humedecimiento de las escorias. Entre las 8 de la mañana y las 9 de la noche la escoria estará simplemente expuesta al aire. Entre las 12 y las 12,30 de la mañana se voltearán todos los gaviones.

Estabilización de las Escorias			
Hito	Aspersión	Exposición aire	Volteo-aireación
Inicio	21:00 h	8:00 h	12:00 h
Fin	8:00 h	21:00 h	12:30 h

Tabla 60. Proceso de estabilización de las escorias negras EAF

Con este proceso de estabilización, la escoria negra queda prácticamente estable si se extienden estos ciclos en una duración de 90 días. Al final de estos ciclos se estima con ensayos según Norma ASTM D-4792 [67] la variación de volumen de la escoria, al objeto de establecer su idoneidad.

Algunos autores [103] han puesto de manifiesto recientemente que 45 días de tratamiento de envejecimiento es suficiente para disminuir los contenidos de compuestos expansivos en éste tipo de escoria. Periodos más largos no aportan más efectividad, con los consiguientes inconvenientes técnicos y económicos para las empresas que lleven a cabo el proceso de envejecimiento.

La Figura 42 presenta unas vistas generales de la planta de tratamiento y clasificación de escorias EAF.

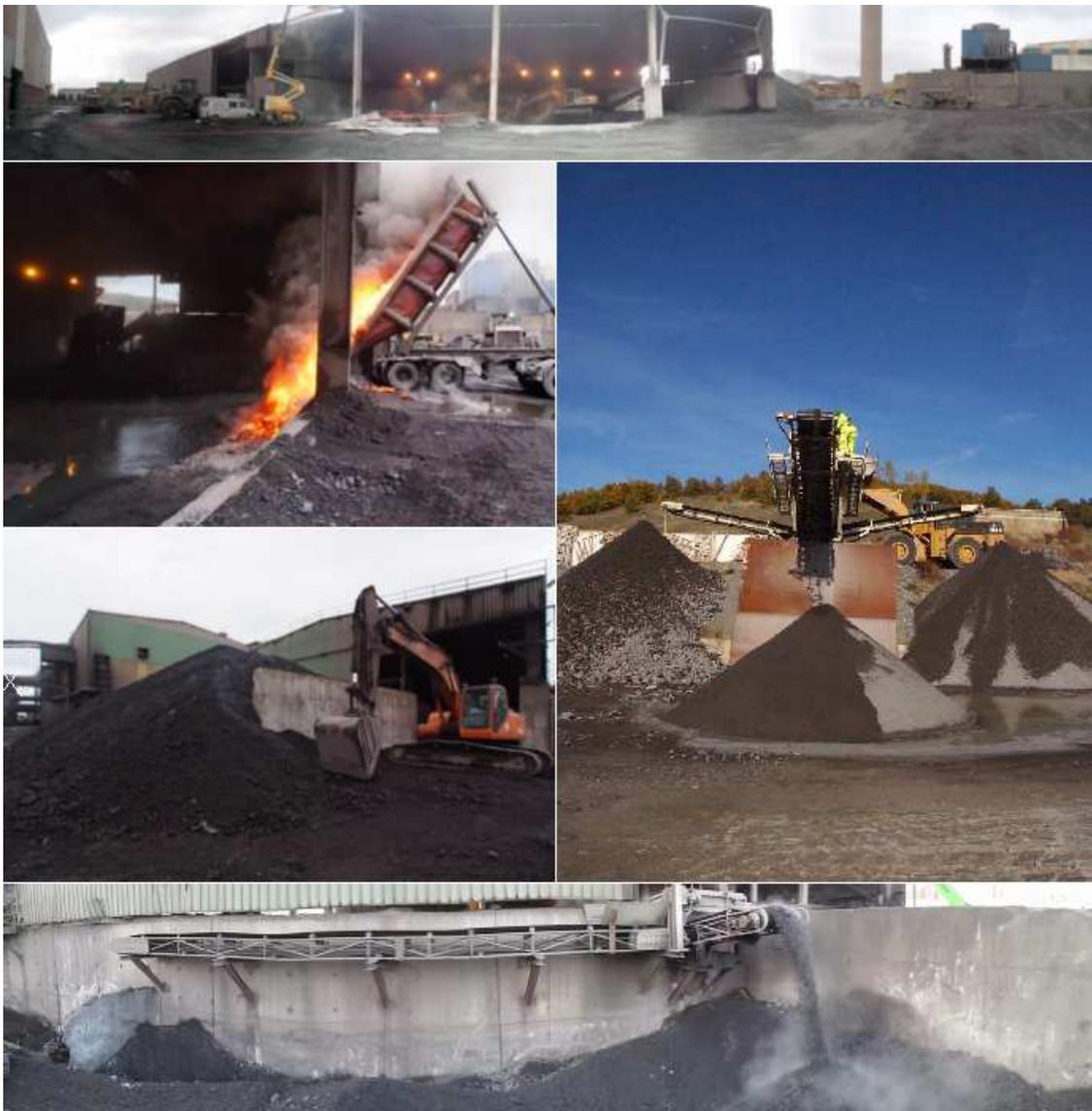


Figura 42. Planta de tratamiento y clasificación de escoria EAFS

Toma de muestras

Las muestras fueron tomadas, según UNE EN 932-1:97 [50], en el parque de almacenamiento a la intemperie de una empresa constructora, donde la escoria convenientemente preparada es almacenada para su uso posterior.

Dichas muestras proceden de tres acerías diferentes, de modo que las nominadas OR proceden de la acería de Orbeago de Zumárraga, en tanto que las denominadas B proceden de la acería de Bergara de Aristrain y las denominadas ACB proceden de la Acería Compacta de Bizkaia de Sestao.

Tras las labores de preparación y manipulación, se pudo disponer de los siguientes tipos de escoria, según su procedencia y grado de envejecimiento:

Nº de Muestra	Escoria	Envejecimiento
Muestra Nº 1	OR	No
Muestra Nº 2	OR	Variable
Muestra Nº 3	OR	Variable
Muestra Nº 4	B	Si
Muestra Nº 5	ACB	No
Muestra Nº 6	ACB	No
Muestra Nº 7	ACB Balsa	No
Muestra Nº 8	ACB Nueva	No
Muestra Nº 9	ACB Vieja	Si

Tabla 61. Muestras de EAFS

Las muestras cualificadas en su envejecimiento como NO, fueron tomadas tras permanecer una semana en balsa o piscina en periodo de enfriamiento y cuarteo, tras ello fueron transportadas a planta de machaqueo, donde fueron machacadas y clasificadas en el plazo de otra semana, y en ese momento fueron tomadas.

Las muestras cualificadas como SI, en su envejecimiento sufrieron el proceso anterior y tras ello permanecieron en estado de envejecimiento controlado a la intemperie con regado periódico y volteo durante 90 días.

Las muestras cualificadas como Variable, fueron tomadas de acopios en los que existía mezcla de escorias situadas en los casos extremos anteriores y otros intermedios.

Ensayos sobre las EAFS

Las prescripciones de referencia para llevar a cabo la caracterización de EAFS son las indicadas en el artículo 510 “Zahorras” del PG-3, que fueron descritas en el capítulo 3 de la presente Tesis. Los ensayos llevados a cabo se recogen a continuación:

- Caracterización química de la escoria negra (EAF). Se llevaron a cabo análisis químicos y mineralógicos sobre las 9 muestras de EAFS antes mencionadas.
- Caracterización física de la escoria negra (EAF). Se tomó como representación de las 9 muestras, la muestra nº2 de Orbeago de Zumárraga y se realizaron ensayos de:

a) Ensayos generales para Zahorras:

- Granulometría por tamizado, según la UNE-EN 933-1 [51].
- Contenido en sulfatos (SO_3), según UNE EN 1744-1 [59].
- Coeficiente de limpieza según NLT-172 [15].
- Equivalente de arena, según la UNE-EN 933-8 [56] y, en su caso, azul de metileno, según la UNE-EN 933-9 [57].
- Límite líquido e índice de plasticidad, según las UNE 103103 [36] y UNE 103104 [37], respectivamente.
- Coeficiente de Los Ángeles, según la UNE-EN 1097-2 [58].
- Índice de lajas, según la UNE-EN 933-3 (sólo para zahorras artificiales) [53].
- Partículas trituradas, según la UNE-EN 933-5 (sólo para zahorras artificiales) [55].

b) Ensayos específicos para árido siderúrgico:

- Expansividad o estabilidad dimensional según ASTM D-4792 [67], ha de ser inferior a 0,5% según ASTM D 2940 [4].
- IGE (Grado de envejecimiento de las escorias de Acería) según la norma NLT-361; ha de ser inferior a <1%.
- Análisis de lixiviados según UNE EN 12457-3 [61].

A lo largo de los siguientes apartados se describen tanto los ensayos realizados como los resultados obtenidos.

5.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LAS EAFS

A partir de los datos de composición química se clasifica el material, se analizan sus fases posibles y se llevan a cabo estudios mineralógicos y cristalinos.

Las técnicas y ensayos utilizados han sido los siguientes:

1. Espectrofotometría de absorción atómica, fluorescencia de rayos-X y combustión y análisis de gases, para el análisis químico.
2. Difracción de rayos-X.
3. Microscopía electrónica de Barrido.
4. Microanálisis por energía dispersa de rayos-X.

5.2.1 Análisis químico

La caracterización química de la escoria negra se constituye en el conjunto de datos más importante y de mayor valor referentes a ella, de cara a su caracterización como material. A partir de los datos de composición química se clasifica el material, se analizan sus fases posibles y se llevan a cabo estudios mineralógicos y cristalinos.

En el caso de nuestra escoria negra, han sido realizados análisis químicos para determinar tanto sus componentes (elementos químicos y óxidos) principales tales como hierro, calcio, silicio, aluminio, magnesio, manganeso, oxígeno, así como otros componentes secundarios, entre los que destacan aquellos cuyas proporciones en los áridos se encuentran limitadas según EHE (sulfatos totales, sulfatos solubles, sulfuros, cloruros) y otros de interés adicional (C, P, Na, Ti, Cr, Ni, Pb, Cu, Zn, Cd, Hg) junto a la cal libre.

Sobre las nueve muestras de escoria disponibles en la presente Tesis Doctoral se han llevado a cabo análisis químicos completos en los laboratorios de análisis químico de las acerías productoras, cuyos resultados se muestran en la Tabla 62.

Muestra N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fe°	1,34	0,89	1,21	3,25	3,57	3,37	6,29	2,34	4,41
FeO	15,62	7,74	6,32	21,82	33,6	27,51	36,52	34,47	28,60
Fe ₂ O ₃	30,75	34,91	39,96	16,29	12,22	14,54	11,08	17,39	17,91
SiO ₂	11,48	11,16	10,22	15,27	7,88	8,97	8,52	9,43	8,69
CaO	24,83	31,91	28,78	23,88	26,1	27,27	22,9	25,48	27,16
Al ₂ O ₃	4,25	3,60	3,65	7,38	4,21	5,39	3,45	4,30	4,93
TiO ₂	0,39	0,34	0,32	0,616	0,44	0,50	0,43	0,459	0,40
MgO	4,90	5,30	5,00	5,00	6,45	6,65	5,60	5,30	6,00
Na ₂ O	0,067	0,059	0,055	0,048	0,04	0,061	0,033	0,024	0,031
K ₂ O	0,036	0,024	0,029	0,029	0,007	0,011	0,012	0,049	0,019
P	0,142	0,163	0,133	0,19	0,20	0,236	0,232	0,205	0,206
Mn	2,92	2,14	1,97	4,51	3,27	3,40	3,001	2,67	2,49
S	0,186	0,220	0,234	0,098	0,08	0,112	0,108	0,147	0,136
Cu	0,005	0,008	0,009	0,006	0,007	0,007	0,009	0,009	0,014
Pb	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Zn	0,010	0,009	0,006	0,014	0,007	0,007	0,007	0,015	0,021
Cr	0,415	0,497	0,330	0,261	0,371	0,304	0,317	0,300	0,436
Ni	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
C	0,47	0,14	0,34	0,44	0,19	0,46	0,22	0,27	0,11
Cd	<10 ⁻⁴								
Hg	<10 ⁻⁴								

Tabla 62. Composición química de EAF

La determinación de la composición química se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica y fluorescencia de rayos-X. El intervalo de valores de composición química de las muestras de escorias en lo referente a los óxidos principales, y su valor medio son detallados seguidamente:

Óxido	Intervalo	Valor medio
FeO	7-35%	25%
Fe ₂ O ₃	11-40%	25%
CaO	23-32%	25%
SiO ₂	8-15%	11%
Al ₂ O ₃	3,5-7%	5%
MgO	4,8-6,6%	5%
MnO	2,5-4,5%	4%
Total		100%

Tabla 63. Composición química de óxidos principales de escoria EAF

De acuerdo con estos valores podemos destacar:

- Por término medio el 50 % de la composición de la escoria negra son óxidos de hierro en tanto que en el 50 % restante destaca especialmente la cal, que supone la mitad de esta fracción. Cabe, por tanto, suponer que estas escorias negras poseen dos fracciones minerales principales: óxidos de hierro y silicatos y aluminatos de cal, acompañada ésta de magnesia y MnO.
- El contenido de oxígeno es del orden del 33 % del total. Prácticamente todo el material de la escoria negra son óxidos simples o combinados.
- Existe un pequeño contenido de carbono en estado grafitico y de óxidos de sodio, potasio, titanio, manganeso y fósforo procedentes del soplado con oxígeno del caldo fundido de chatarra y prerreducidos.
- El contenido en cromo, superior a 3 milésimas (0,3 %) es elevado bajo el punto de vista medioambiental, sería necesario llevar a cabo ensayos de lixiviación si EAF son empleadas en construcción.

Valoración de la cal libre y la magnesia

Por su especial importancia en la estabilidad volumétrica y dimensional de la escoria negra, se analizan los contenidos en cal libre y magnesia total. Para la primera de ellas existe un ensayo específico que a continuación se describe, en tanto que para la segunda, a falta de ensayo específico, nos atendremos al análisis químico global.

La Norma Europea UNE-EN 1744-1 [59] recoge tres formas de determinación de la cal libre en las escorias de fundición de acero. El método de análisis que se ha seguido es el de la solubilización de las escorias con etanodiol en caliente, su filtración posterior una vez disgregadas a nivel molecular y, por último, la valoración de la disolución mediante ácido clorhídrico. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 64.

Nº Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cal Libre	0,80	1,20	0,20	0,40	0,80	0,92	1,01	0,87	0,75
Magnesia	4,90	5,30	5,00	5,00	6,45	6,65	5,60	5,30	6,0

Tabla 64. Cal libre y magnesia total presentes en EAF

De acuerdo con la experiencia acumulada en este ensayo según UNE 1744-1 [59], se obtiene una cota superior del contenido en el conjunto de cal libre (lima, CaO) más portlandita (Ca(OH)₂). El resultado final es siempre por exceso puesto que es inevitable una ligera solubilización adicional de CaO procedente de los silicatos o aluminatos más sensibles al ataque en caliente del etilenglicol. Esta estimación está siempre, por tanto, del lado de la seguridad. El contenido medio de **Cal libre** de las muestras estudiadas está en un intervalo entre **0,20 y 1,2 %**. La norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco [22] establece que el contenido de cal libre del árido EAFS ha de ser inferior a 0,5%.

El contenido en **magnesia total** está entre el **5 % y el 6,6 %**, valores que hacen prever una fracción de magnesia libre (periclasa, MgO) o hidratada (brucita Mg(OH)₂) bastante baja, puesto que la mayor parte de ella se encontrará combinada en forma de silicatos o

con el óxido de hierro, al provenir de un estado fundido a unas temperaturas del caldo de acero del orden de 1600°C.

Determinación de sulfatos, sulfuros y cloruros

Aunque no es previsible que en la escoria negra EAF existan compuestos del tipo cloruro, y los sulfuros de escorias siderúrgicas puedan estar presentes solamente en la escoria blanca procedente de la metalurgia secundaria (desulfuración y formación de sulfuro de calcio), no obstante se han llevado a cabo los análisis correspondientes según lo prescrito en los tres casos por la norma UNE-EN 1744-Parte 1 [59].

Los resultados, recogidos en la Tabla 65 (en %) nos muestran un contenido en sulfatos dentro del rango admisible limitado para zahorras (<0,5% para materiales en contacto con capas tratadas con cemento y <1% para el resto de casos, según PG-3 y la norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco [22]) y casi ausencia de sulfuros y cloruros, lo que es coherente con la previsiones hechas.

Nº Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Azufre total en SO ₃ ⁻	0,47	0,55	0,59	0,25	0,20	0,28	0,27	0,37	0,34
Sulfatos solubles en SO ₃ ⁻	0,44	0,48	0,52	0,21	0,18	0,22	0,25	0,32	0,31
Cloruros	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Tabla 65. Sulfatos totales, Sulfatos Solubles, Cloruros presentes en EAF

El intervalo de valores para las diferentes muestras se indica en la tabla siguiente.

Escoria Negra EAF	Intervalo
Azufre total en SO ₃ ⁻	0,2-0,5
Sulfatos solubles en SO ₃ ⁻	0,18-0,5
Cloruros Cl ⁻	<0,01

Tabla 66. Intervalo de Contenido en sulfatos, sulfuros y cloruros de EAF

Diagrama de Rankin

De acuerdo con los resultados de los análisis químicos obtenidos, y de la conclusión derivada de ellos referente a la existencia de dos grupos principales de compuestos, de un lado óxidos de hierro y de otro lado silicatos y aluminatos, parece adecuado plantear en este punto un estudio sobre los posibles compuestos presentes en el diagrama de Rankin o diagrama de fases Al₂O₃-CaO-MgO-SiO₂ (o equivalentemente A-C-M-S).

Tomando del Slag Atlas [39] los gráficos pertinentes, tenemos las figuras adjuntas donde debemos prever los rangos de composición química de nuestras escorias con estos valores cerrando a cien: CaO= 55%, SiO₂=25%, Al₂O₃=MgO=10%

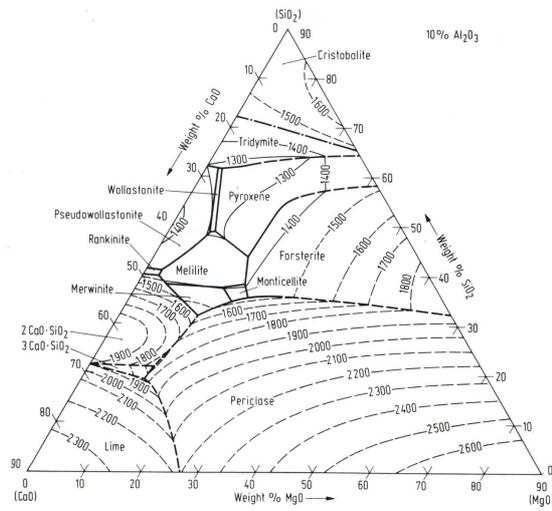


Figura 43. Fases S-C-M para 10% Al₂O₃

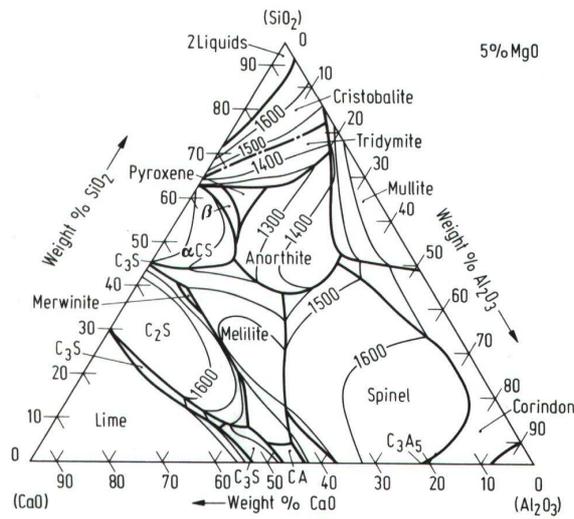


Figura 44. Fases S-C-A para 5% MgO

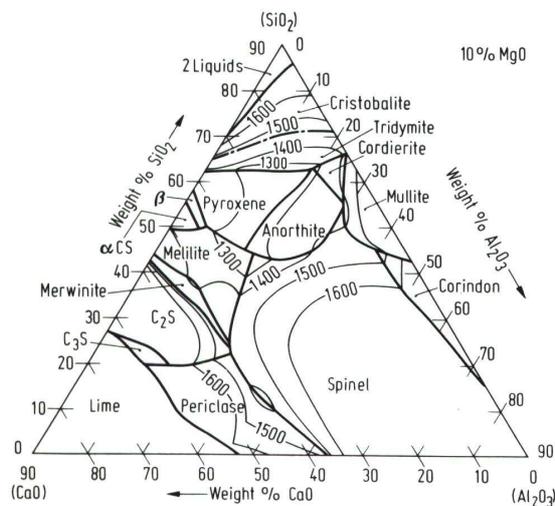


Figura 45. Fases S-C-A para 10% MgO

Los posibles componentes mineralógicos que constituyen la estructura interna de la escoria EAF que estamos estudiando, de acuerdo con las referencias que recogen los Diagramas de Rankin son los siguientes:

Fases de la escoria de EAF según rankin	
Silicato bicálcico SC_2	Wollastonita SC
Rankinita S_2C_3	Merwinita S_2MC_3
Melilita S_2MC_2	Enstatita SM
Monticellita SMC	Anortita S_2AC
Forsterita SM_2	Espinela AM
Piroxeno S_2MC	Periclasa M
Sílice S	Lima o Cal libre C

Tabla 67. Fases de las escorias EAF según Rankin.

5.2.2 Difracción de rayos-X

El análisis cristalino de la escoria negra se llevó a cabo a través de la técnica de Difracción de Rayos-X sobre muestra de polvo del material. El difractor empleado marca PHILIPS, modelo PW1729/40, utilizando un tubo emisor con anticátodo de cobre de longitud de onda $\lambda=1,542 \text{ \AA}$.

Es bien sabido que este tipo de materiales, como son las escorias siderúrgicas, poseen una parte o fracción cristalina y otra fracción no cristalina o vítrea. La fracción cristalina crece a medida que disminuye la velocidad de enfriamiento, de modo que en un enfriamiento idealmente lento, dicha fracción cristalina es del 100 %, en tanto que un enfriamiento y solidificación frente a chorro de agua produce una fracción vítrea mayoritaria, superior al 50%, en la escoria de horno alto.

El ritmo real de enfriamiento de la escoria negra de horno eléctrico en las acerías visitadas es bastante lento en el foso o balsa de escorias. Las masas de escoria vertidas son altas, y lo son en pilas de gran volumen, por lo que el enfriamiento tarda varios días en producirse, a pesar de estar en marcha un regado por aspersión permanente que provoca el cuarteo de la masa pétreo para poder retirarla. La fracción cristalina es pues mayoritaria, estando las fracciones vítreas notablemente por debajo del 50%.

La dificultad de determinar el porcentaje de fracción vítrea es muy alta, realizándose aproximaciones a ello por análisis semi-cuantitativo sobre diagramas de difracción de Rayos-X de escorias puras y mezcladas con sustancias cristalinas, con resultados muchas veces decepcionantes.

En todo caso, en los trabajos de esta Tesis Doctoral no se ha intentado dicha cuantificación de fase vítrea, determinando solamente la presencia y proporción relativa grosera de las fases cristalinas sobre los diagramas de difracción o difractogramas de las muestras N° 1 a 9, todas incluidas, que se adjuntan a continuación en las páginas siguientes.

Las distancias interplanares de estos componentes cristalinos fueron recogidos en el Capítulo 4, donde se mostraba la difracción de rayos X para las escorias blancas. La tabla está extraída del índice Hannawalt de identificación de picos de difracción de Rayos-X.

El resultado del análisis de los difractogramas a continuación mostrados de las nueve muestras de escoria es:

Muestra n° 1: Predominan los óxidos de hierro sobre los silicatos. Dentro de los óxidos de hierro la fase magnética es mayoritaria, y junto a ella existen Wustita y Ferrita cálcico-magnésica. Entre los silicatos predominan Belita y Qelenita. Se aprecia presencia menor de Lima, Portlandita y Periclasa.

Muestra n° 2: Predominan los óxidos de hierro sobre los silicatos. Dentro de los óxidos de hierro la fase magnética es mayoritaria, y junto a ella existen Wustita, Ferrita cálcico-magnésica y Brownmillerita. Entre los silicatos predomina la alita, siendo menor la proporción de Larnita, Belita y Gelenita. Hay trazas de lima, Portlandita y Periclasa.

Muestra n° 3: Predominan los óxidos de hierro sobre los silicatos. Destaca la presencia de hierro metálico, junto con los óxidos de hierro entre los que la fase magnética es mayoritaria, y junto a ella existen Wustita y Ferrita cálcico-magnésica. Entre los silicatos predominan el Silicato Bicálcico Alfa y la Alita. También hay trazas de hidratación en silicatos. No hay trazas de lima, Portlandita y Periclasa.

Muestra n° 4: Equilibrio entre óxidos de hierro y silicatos. Dentro de los óxidos de hierro la fase Wustita es mayoritaria, y junto a ella existen la fase Magnética y la Ferrita cálcico-magnésica. Entre los silicatos predominan Gelenita y Melilita, siendo menor la proporción de Alita y Bicálcico Alfa. Se aprecian pequeñas proporciones de Portlandita y Calcita.

Muestra n° 5: Predominan ampliamente los óxidos de hierro sobre los silicatos. El componente principal es la Wustita de Hierro, que también aparece con Manganeso. Hay presencia de magnetita y Maghemita - γ en proporción baja. Entre los silicatos, se observan las tres variedades de silicatos bicálcicos. Existe presencia de Periclasa y Portlandita.

Muestra n° 6: Predominio de los óxidos de hierro sobre los silicatos. Dentro de los óxidos de hierro existen proporciones similares de Hematites, Maghemita - γ , magnetita y una proporción ligeramente mayor de Wustita. Entre los silicatos destacan Rankinita y SC_3 (alita), existiendo también SC_2 . Aparece asimismo la Brownmillerita. Inapreciable presencia de Lima, Periclasa y Portlandita.

Muestra n° 7: Predominio de óxidos de hierro sobre silicatos. El óxido principal es Wustita de hierro existiendo también Wustita de Manganeso. También hay presencia de Magnetita y Maghemita - γ en pequeña proporción. Entre los silicatos existen Rankinita, Forsterita, SC_2 y SC_3 . Trazas de Jacobsita y Magnesio Ferrita. También aparecen trazas de cal libre (Lima) y de Periclasa.

Muestra n° 8: Predominan ampliamente los óxidos de hierro sobre los demás compuestos. El óxido principal es la Wustita de hierro y existe Wustita con manganeso.

También entre los silicatos existen Forsterita, Rankinita, SC_2 y SC_3 . Asimismo aparece Sílice sin combinar y Ferrito Dicalcico. Se aprecia presencia de Portlandita y de Periclasa en proporciones muy bajas.

Muestra nº 9: Predominio ligero de óxidos de hierro sobre los silicatos. El óxido principal es la Magnetita, con presencia de Hematites y Wustita de Hierro y Manganeseo. Existen silicatos Rankinita, Forsterita, SC_2 y SC_3 y Sílice libre sin combinar. Aparece Brownmillerita y Ferrita dicalcica. Trazas de Periclasa y Portlandita.

Los resultados de identificación de fases cristalinas sobre los difractogramas, nos indican que los componentes presentes en estas escorias EAF son los indicados en la Tabla 68.

Wustita FeO Wustita (Fe,Mg)O (Fe,Mn)O	Silicatos bicálcicos: α , β (larnita), γ (belita) SiO_4Ca_2
Maghemita- γ Fe_2O_3	Silicato tricálcico (alita) SiO_5Ca_3
Hematites Fe_2O_3	Rankinita $Si_2O_7Ca_3$
Magnetita Fe_3O_4	Diopsido o Piroxeno Si_2O_6CaMg
Magnesio-ferrita Fe_2O_4Mg	Merwinita $Si_2O_8Ca_3Mg$
Jacobsita Fe_2O_4Mn	Gelenita $SiCa_2Al_2O_7$
Ferrita dicalcica $Fe_2Ca_2O_5$	Melilita o Alemanita $Si_2Ca_2MgO_7$
Ferrito cálcico magnésico $Fe_2O_6Ca_2Mg$	Brownmillerita $Fe_2Al_2Ca_4O_{10}$
Periclasa MgO	Brucita $Mg(OH)_2$
Lima (Cal) CaO	Portlandita $Ca(OH)_2$

Tabla 68. Componentes cristalinos de la escoria EAF

Los componentes cristalinos anteriormente citados, pueden ser agrupados en dos apartados denominados óxidos de hierro y silicatos, tal y como se postuló en el apartado análisis químicos tras observar los resultados obtenidos.

- Óxidos de hierro: Como compuesto destacable de ellos está la Wustita, óxido FeO con una fracción minoritaria de CaO (adicionalmente puede poseer también o bien MgO, o bien MnO), que representa del 15 al 35% de la muestra. Junto a ella también destacables con el hierro en forma de Fe^{+3} varios óxidos mezclados en una fase magnética, cuya suma resulta ser entre el 12% y el 40% del total. Dichos óxidos son la Magnetita (Fe_3O_4), Hematites (Fe_2O_3), Maghemita- γ (Fe_2O_3). Adicionalmente, en proporciones menores aparecen también las combinaciones cristalinas siguientes: Magnesio-ferrita ($MgFe_2O_4$), Magnesio-calcio ferrita ($MgCa_2Fe_2O_6$), Jacobsita (MnO_4Fe_2), Brownmillerita ($Fe_2Al_2Ca_4O_{10}$) y Ferrita dicalcica ($Ca_2Fe_2O_5$).
- Silicatos: En esta familia aparece el silicato bicálcico- γ o Belita (SiO_4Ca_2), con una ligera proporción de P_2O_5 , y otros silicatos como los siguientes: Silicato bicálcico α ,

Silicato bicálcico β o larnita, Silicato tricálcico o alita (SiO_5Ca_3), Gelenita o silicato de calcio y aluminio ($\text{SiCa}_2\text{Al}_2\text{O}_7$), Merwinita ($\text{Si}_2\text{O}_8\text{Ca}_3\text{Mg}$), Melilita ($\text{Si}_2\text{O}_7\text{Ca}_2\text{Mg}$), Rankinita o Wollastonita. A medida que aumenta el nivel de envejecimiento de las muestras, se acusa cada vez más la presencia de los silicatos hidratados y otros productos de hidratación de óxidos.

El contenido de cal libre (lima) es muy bajo en la escoria original y hay poca presencia del producto hidratado (Portlandita) en la escoria envejecida.

El contenido de magnesia libre (Periclasa) es muy bajo, el efecto sobre la masa de escoria tras su hidratación (Brucita) es casi despreciable en lo que se refiere al hinchamiento, debido a su escasa presencia.

El resto de los compuestos cristalinos se muestran, en general, estables a lo largo del tiempo, con unos óxidos de hierro que se hidratan muy débilmente y cuya estabilidad es alta; y junto a ellos, unos silicatos cálcicos de los cuales alguna variedad de ellos (alita, belita, etc.) es susceptible de hidratación, pero sin variación apreciable en volumen, y dando lugar dicha hidratación a una mejora en las resistencias mecánicas y al desprendimiento de muy pequeñas cantidades de portlandita. No se ha observado tampoco variación importante asociada a la descomposición del silicato tricálcico.

La **escoria envejecida** o estabilizada durante tres meses posee como característica general que está formada por partículas de tamaño entre 2 y 20 μm . no disgregadas, uniéndose entre ellas por formaciones cristalinas que provienen de la hidratación espontánea a la intemperie de alguno de los compuestos de la escoria nueva (silicatos bicálcicos y tricálcicos).

La **escoria nueva**, como característica general de la escoria nueva cabe citar que está formada por partículas de tamaño entre 2 y 20 μm con una apreciable porosidad entre ellas, y sin cristales o formaciones cristalinas de unión entre las mismas, pudiendo ser consideradas como partículas disgregadas

En ambos casos, escoria estabilizada y escoria nueva, las partículas cuyo tamaño sobrepasa 10 μm , están formadas por la mezcla de casi todos los componentes cristalinos identificados en ellas, de modo que su espectro de emisión de rayos X, dado por el microanálisis, coincide en sus picos y en el tamaño de los mismos con el análisis medio de la escoria tomado de modo general a pocos aumentos. Sin embargo cuando se llevan a cabo observaciones y análisis sobre las partículas de menor tamaño o zonas concretas de las partículas grandes, comienza a apreciarse un predominio de ciertos compuestos cristalinos sobre otros en ellas. En primera instancia encontramos mayor o menor presencia de óxidos de hierro frente a silicatos, y en segunda instancia, dentro de estos últimos, predominio de cationes de calcio, aluminio o magnesio.

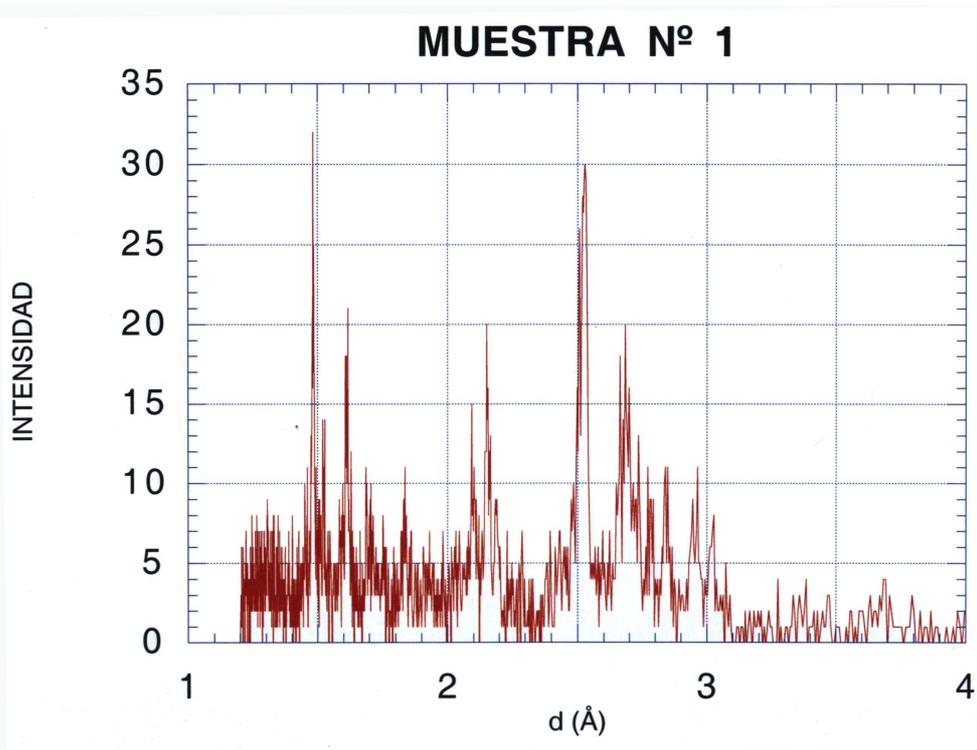
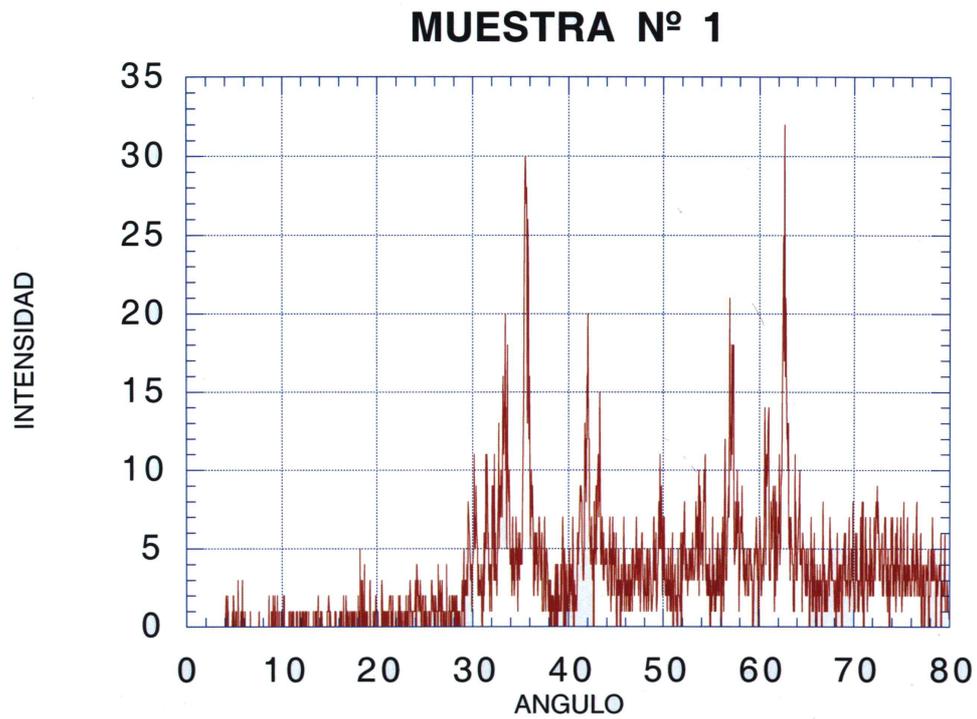


Figura 46. Difracción rayos X. EAFS muestra 1

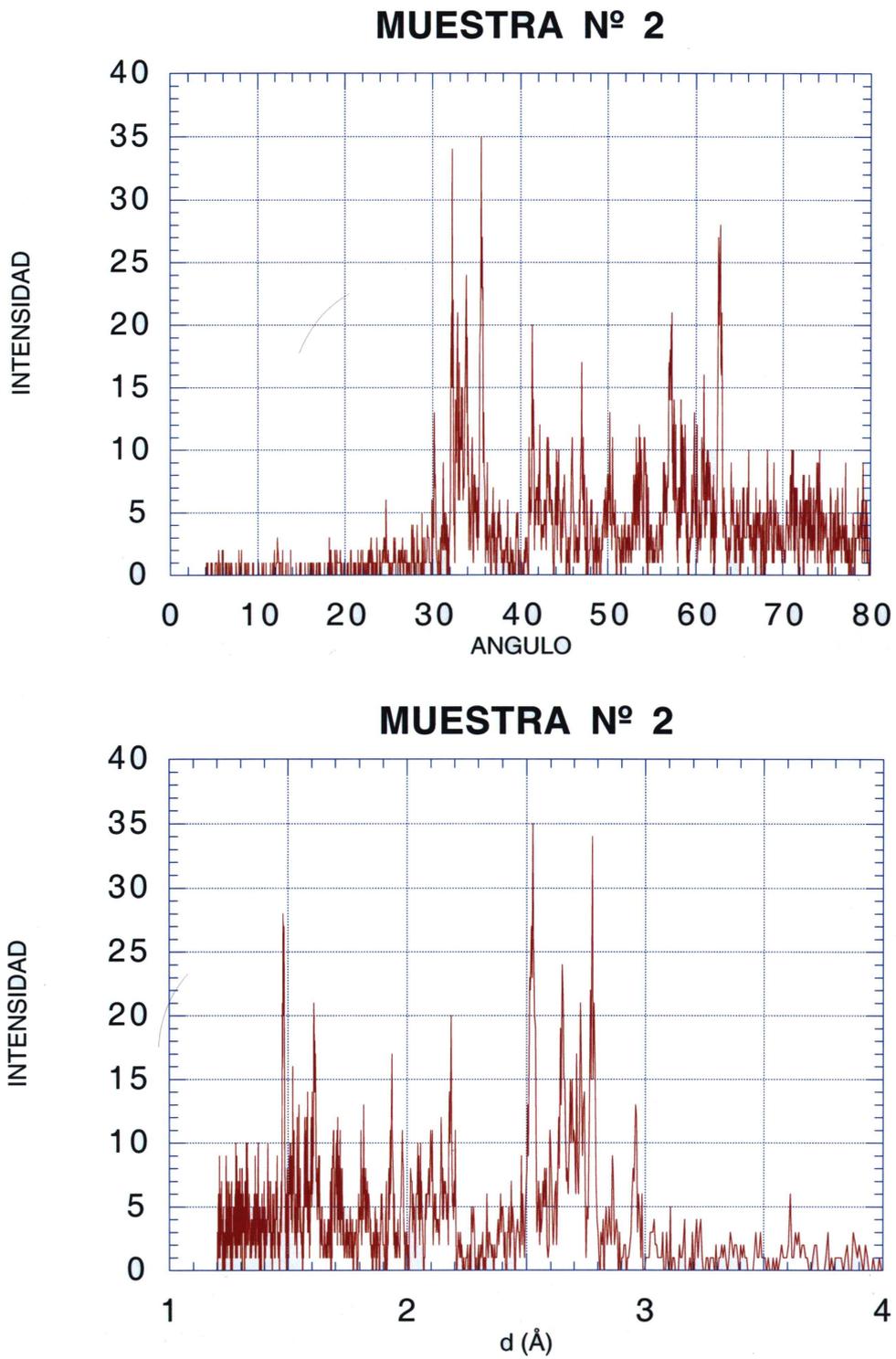


Figura 47. Difracción rayos X. EAFS muestra 2

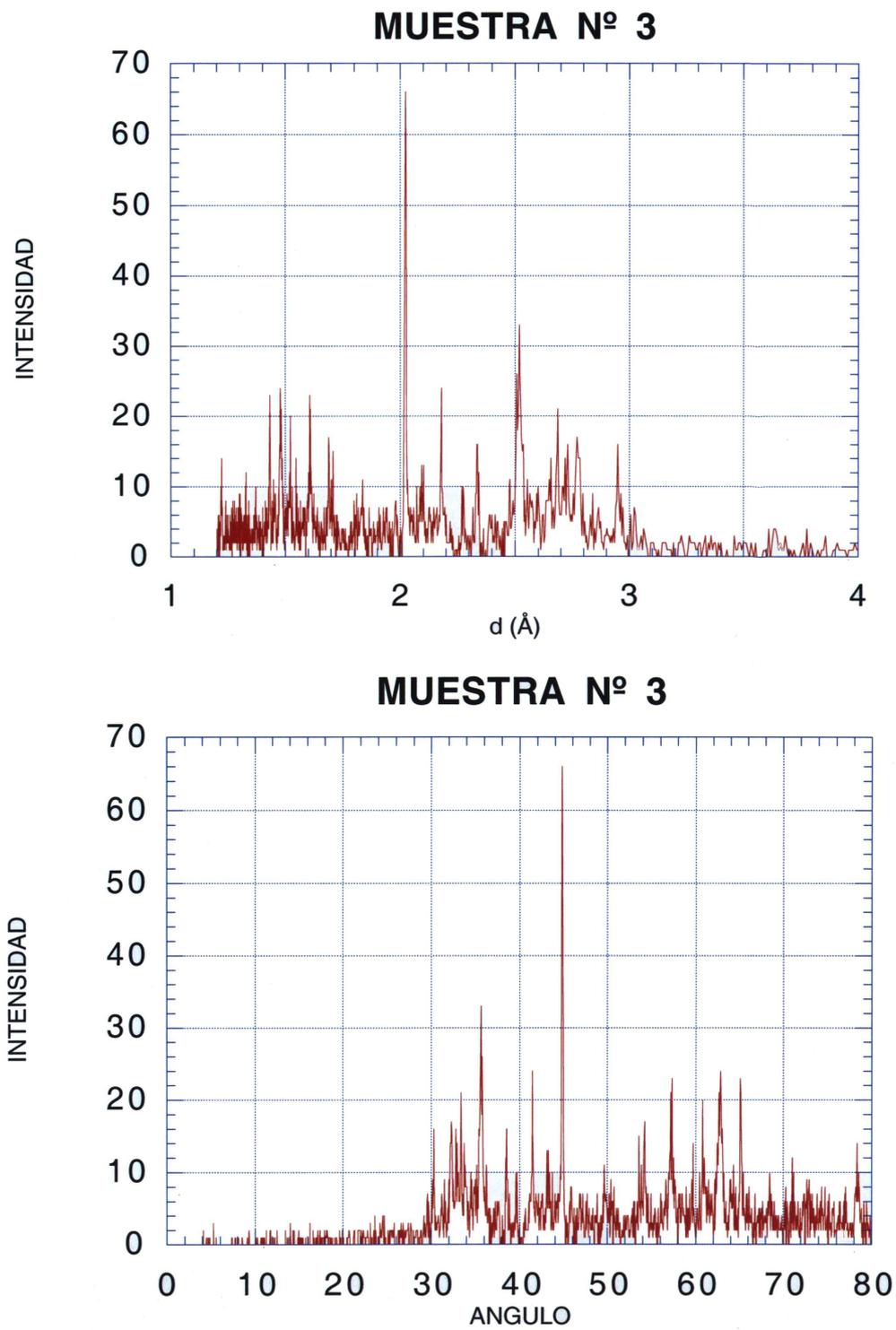


Figura 48. Difracción rayos X. EAFS muestra 3

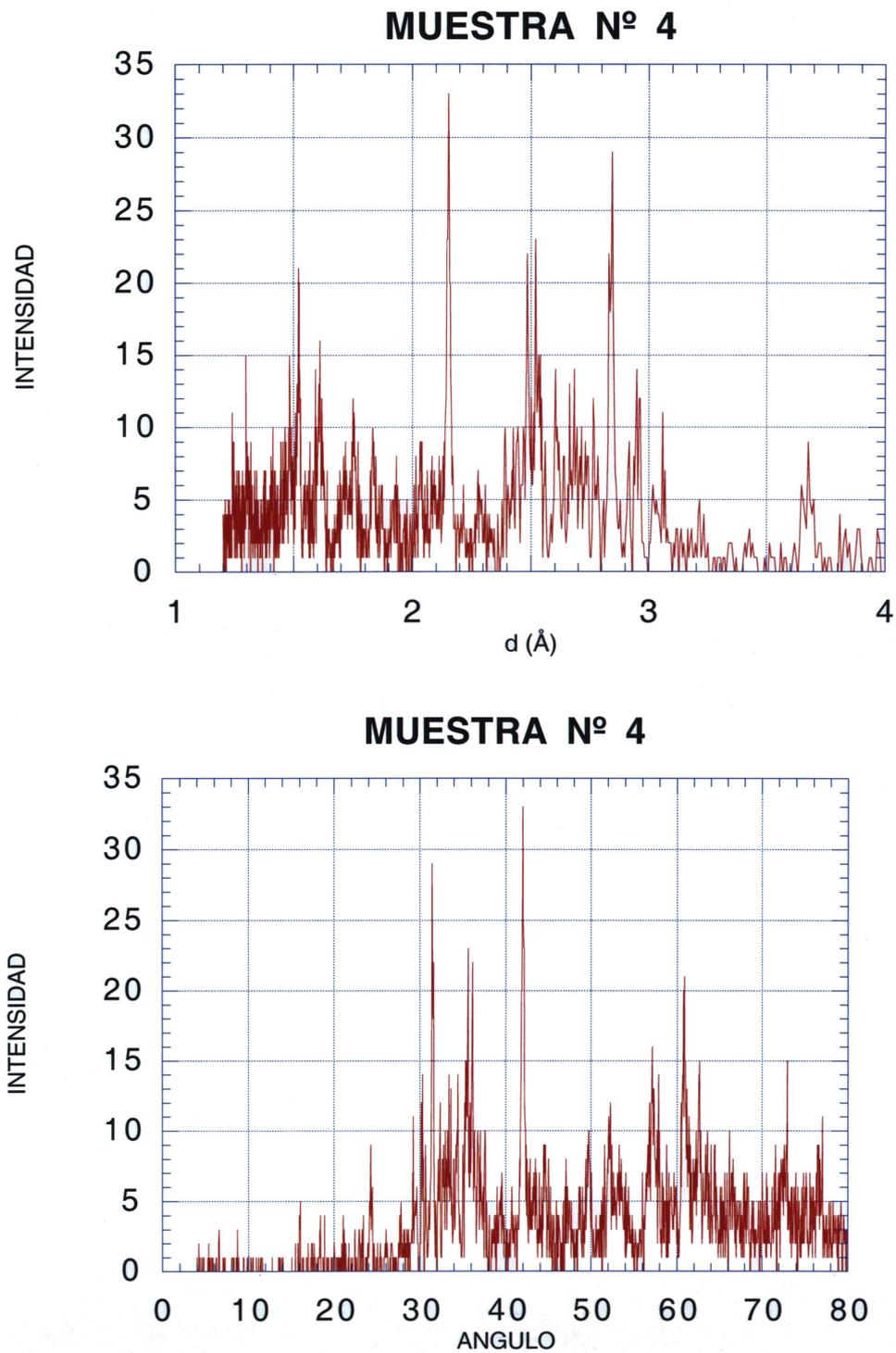


Figura 49. Difracción rayos X. EAFS muestra 4

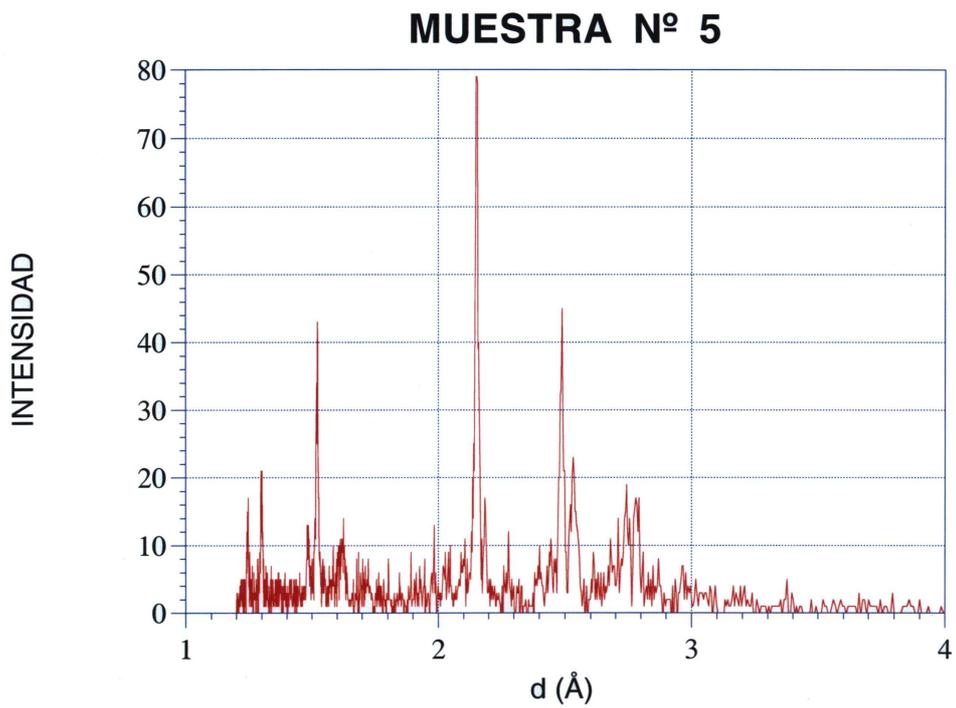
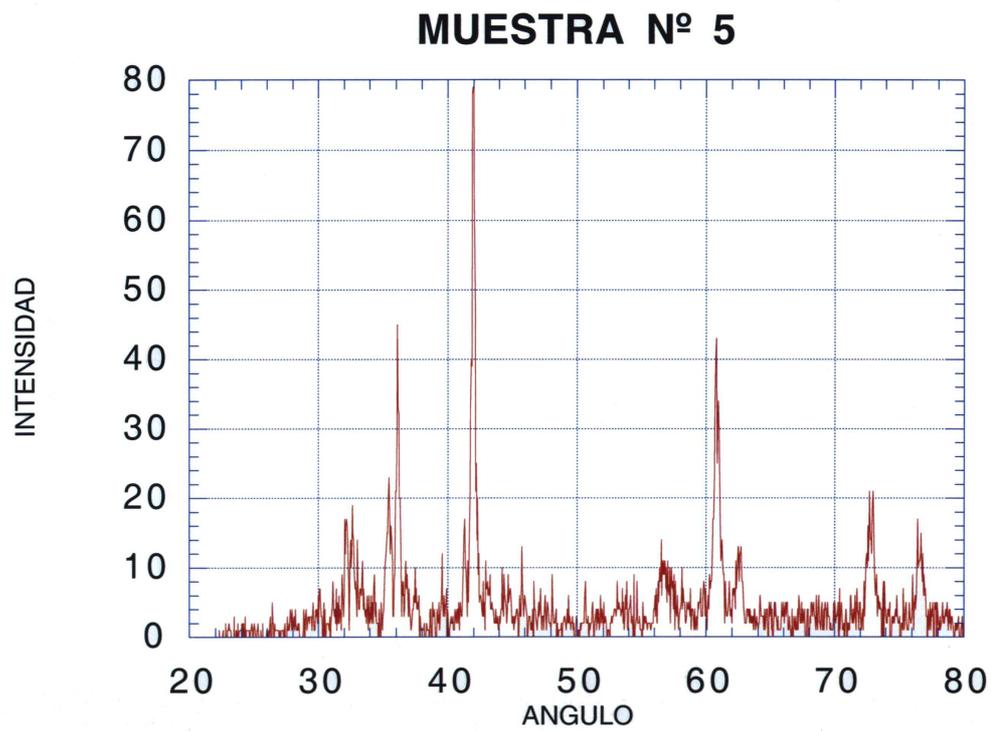


Figura 50. Difracción rayos X. EAFS muestra 5

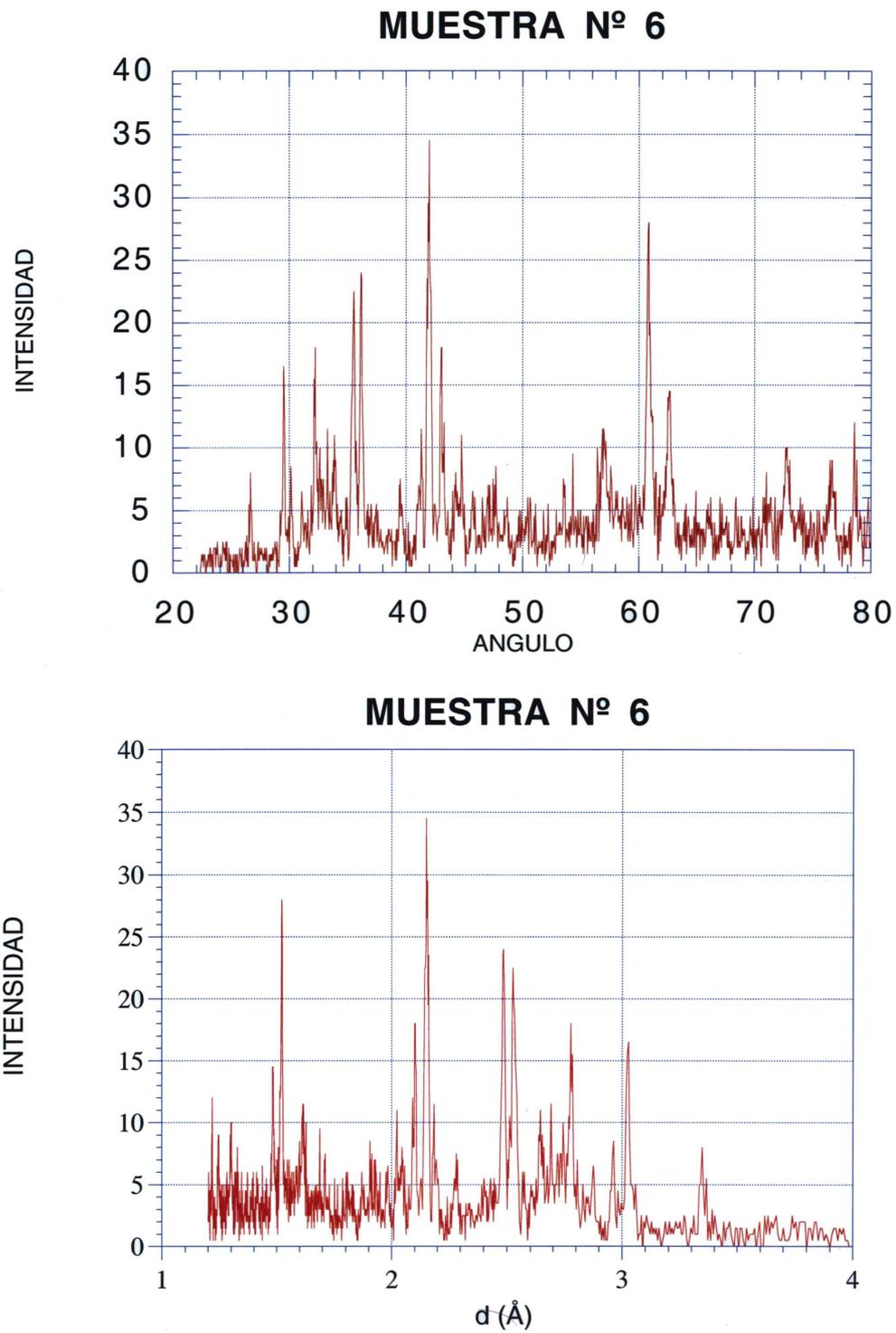


Figura 51. Difracción rayos X. EAFS muestra 6

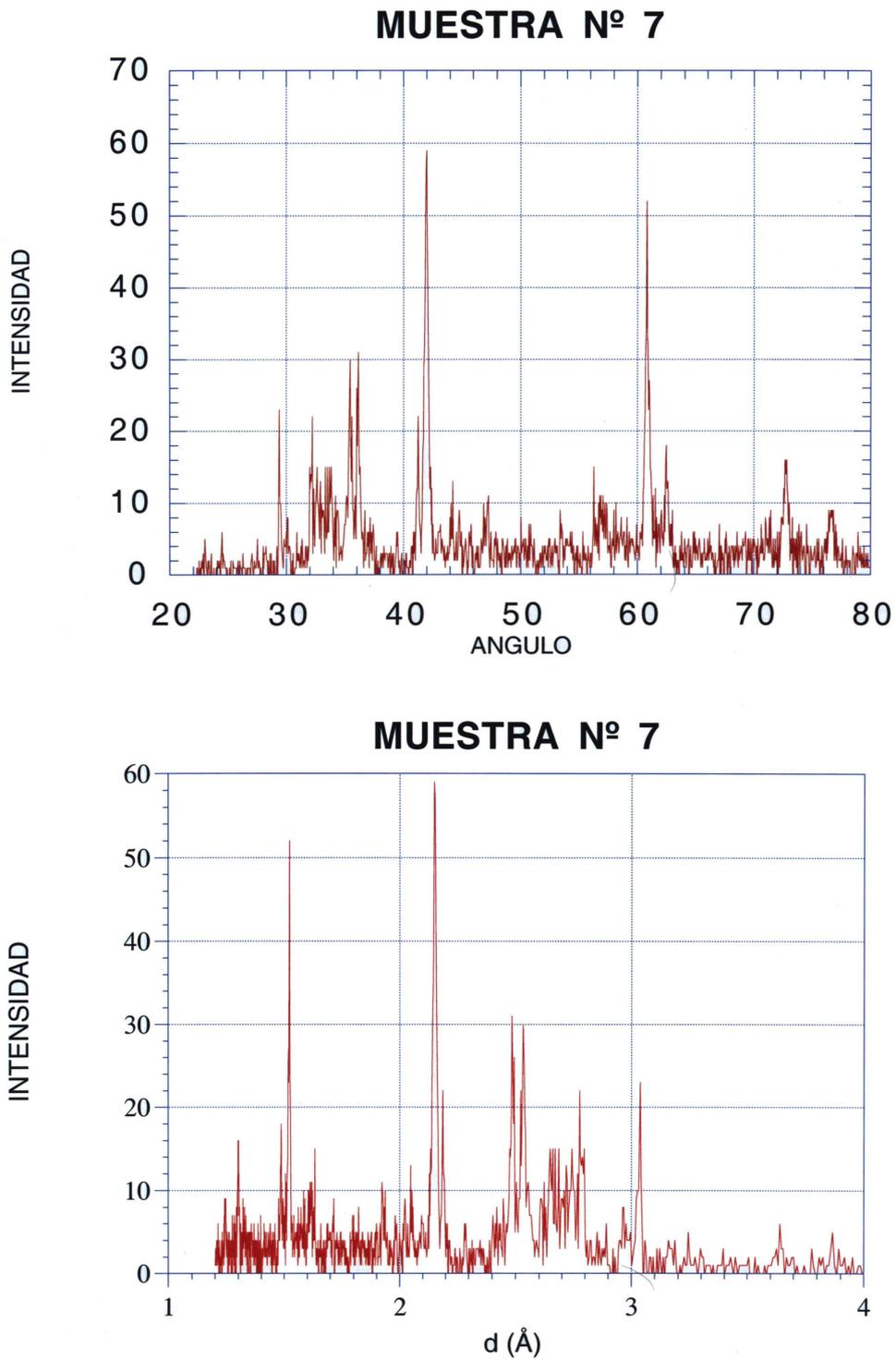


Figura 52. Difracción rayos X. EAFS muestra 7

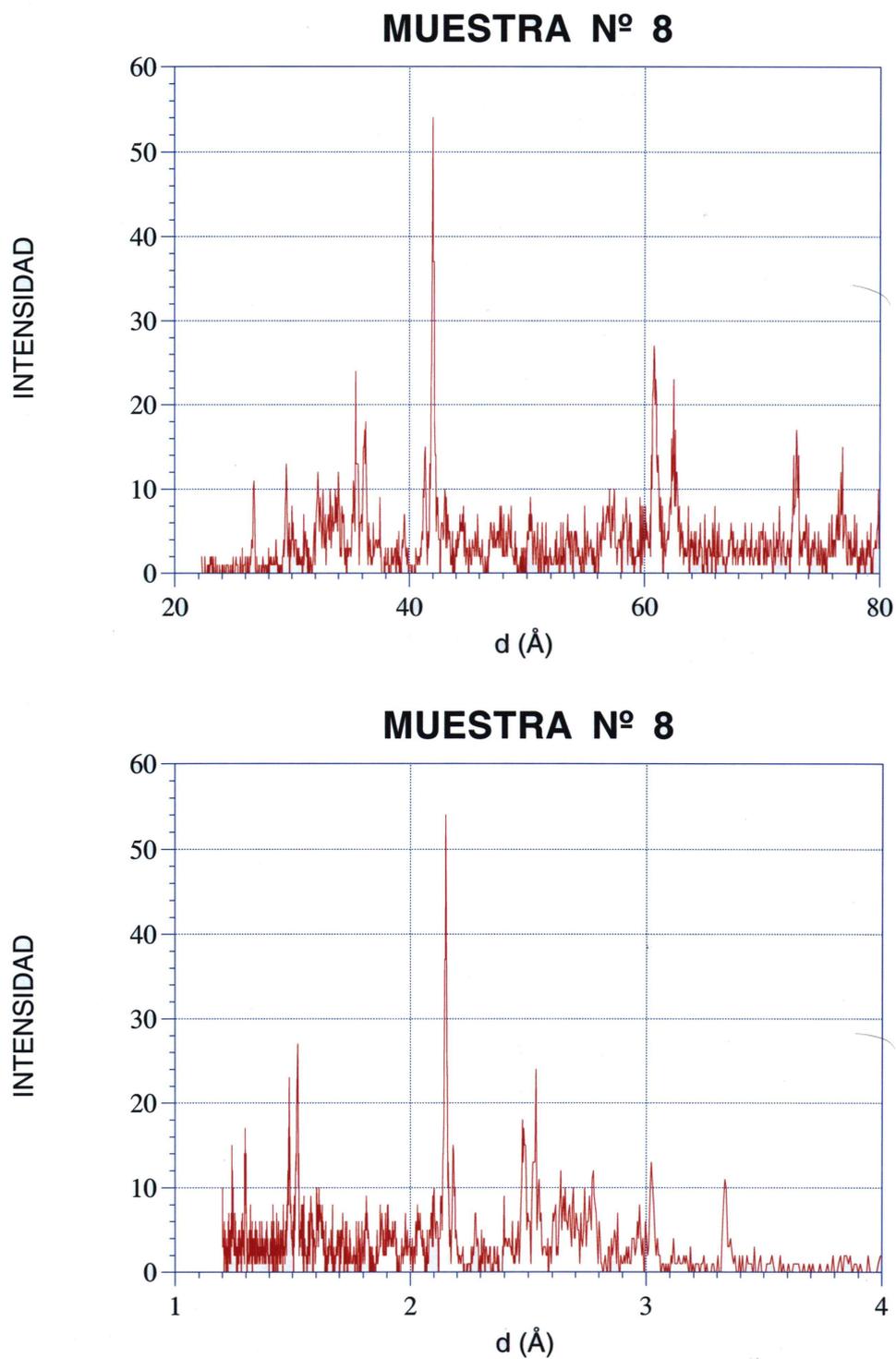


Figura 53. Difracción rayos X. EAFS muestra 8

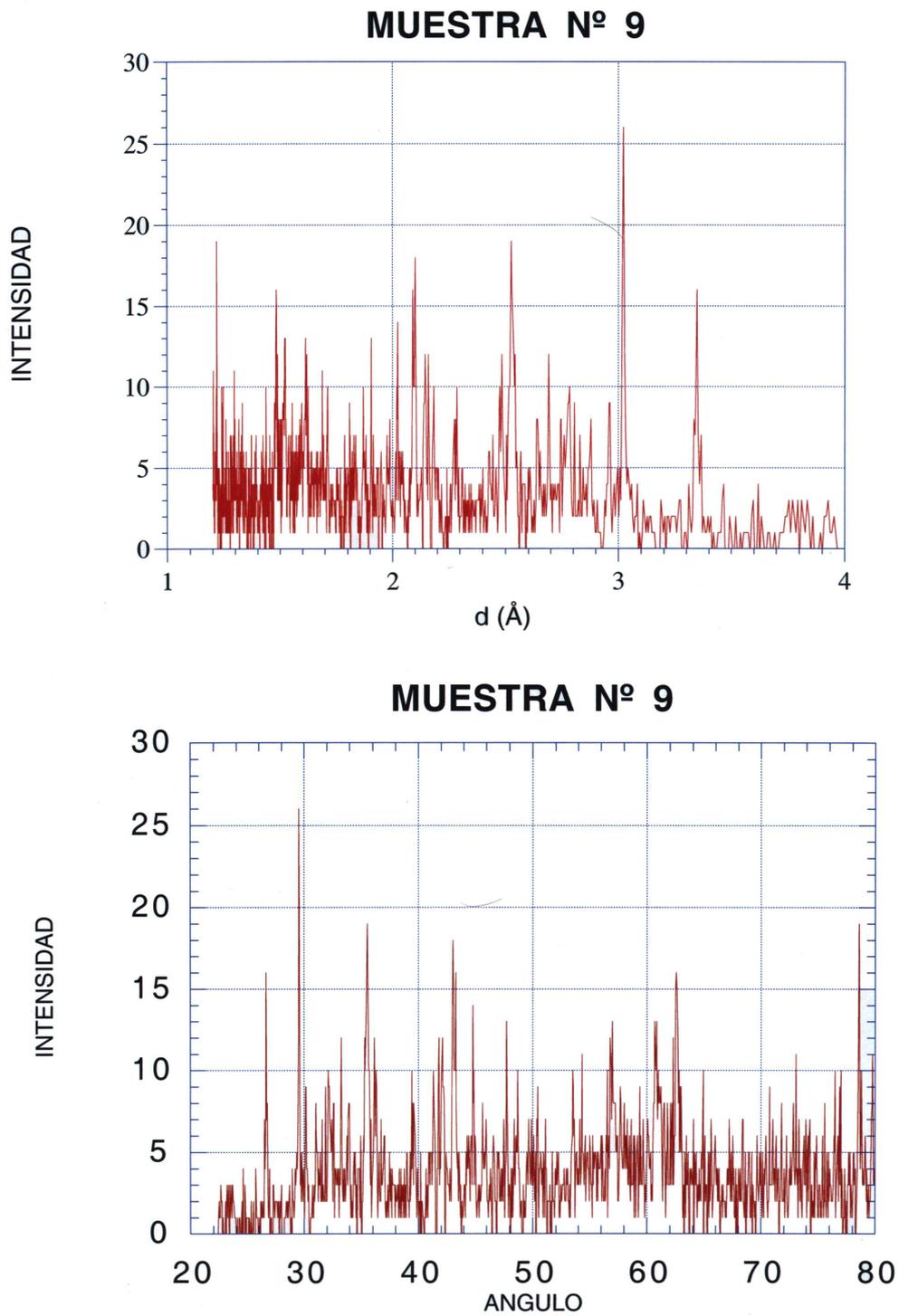


Figura 54. Difracción rayos X. EAFS muestra 9

5.2.3 Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por energía dispersa de rayos X.

Las observaciones realizadas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB, SEM) sobre las escorias negras fueron completadas con microanálisis por energía dispersiva de rayos X realizados sobre las zonas más significativas de la imagen de las muestras. Por ello, los resultados de análisis de la morfología y de la composición química elemental de las escorias van totalmente emparejados.

Estas observaciones y análisis se llevaron a cabo tanto sobre la escoria nueva o recién producida en el horno eléctrico (muestra nº 8), como sobre la escoria triturada y depositada a la intemperie en el parque (muestra nº 2), el cual, por ser invernal, fue un periodo de abundantes precipitaciones lluviosas naturales.

Morfología y Análisis de la Escoria Estabilizada

La escoria envejecida o estabilizada durante tres meses (muestra nº 2) posee como característica general que está formada por partículas de tamaño entre 2 y 20 μm . no disgregadas, uniéndose entre ellas por formaciones cristalinas que provienen de la hidratación espontánea a la intemperie de alguno de los compuestos de la escoria nueva (silicatos bicálcicos y tricálcicos). Las partículas de escoria estabilizada, cuyo tamaño sobrepasa 10 μm , están formadas por la mezcla de casi todos los componentes cristalinos identificados en ellas, de modo que su espectro de emisión de rayos X, dado por el microanálisis, coincide en sus picos y en el tamaño de los mismos con el análisis medio de la escoria tomado de modo general a pocos aumentos. Sin embargo cuando se llevan a cabo observaciones y análisis sobre las partículas de menor tamaño o zonas concretas de las partículas grandes, comienza a apreciarse un predominio de ciertos compuestos cristalinos sobre otros en ellas. En primera instancia encontramos mayor o menor presencia de óxidos de hierro frente a silicatos, y en segunda instancia, dentro de estos últimos, predominio de cationes de calcio, aluminio o magnesio.

Los resultados de imágenes y análisis se adjuntan a continuación con los comentarios pertinentes en cada caso, desde la Figura 55 hasta la Figura 64.

Morfología y Análisis de la Escoria Nueva

La escoria nueva (muestra nº 8) fue introducida machacada en el microscopio electrónico de barrido hasta llegar a partículas de tamaño no superior a 2 mm, y no fue necesario su recubrimiento con oro o carbono para poder llevar a cabo la observación, aunque su carácter eléctrico, en general no conductor, podría hacer suponer que sería necesario recubrirlas. La presencia de una pequeña fracción de hierro metálico, junto al carácter dieléctrico no demasiado severo de los óxidos de hierro dio lugar a la posibilidad de observación directa, preferible también para la realización del microanálisis por energía dispersiva de rayos X.

Como característica general de la escoria nueva cabe citar que está formada por partículas de tamaño entre 2 y 20 μm con una apreciable porosidad entre ellas, y sin cristales o formaciones cristalinas de unión entre las mismas, pudiendo ser consideradas como partículas disgregadas.

Las partículas de escoria nueva cuyo tamaño sobrepasa 10 μm están formadas por la mezcla de casi todos los componentes cristalinos identificados en ellas, de modo que su espectro de emisión de rayos X, dado por el microanálisis, coincide en sus picos y en el tamaño de los mismos con el análisis medio de la escoria tomado de modo general a pocos aumentos. Sin embargo cuando se llevan a cabo observaciones y análisis sobre las partículas de menor tamaño o zonas concretas de las partículas grandes, comienza a apreciarse un predominio de ciertos compuestos cristalinos sobre otros en ellas. En primera instancia encontramos mayor o menor presencia de óxidos de hierro frente a silicatos, y en segunda instancia, dentro de estos últimos, predominio de cationes de calcio, aluminio o magnesio.

Los resultados de imágenes y análisis se adjuntan a continuación con los comentarios pertinentes en cada caso, desde la Figura 65 hasta la Figura 74.

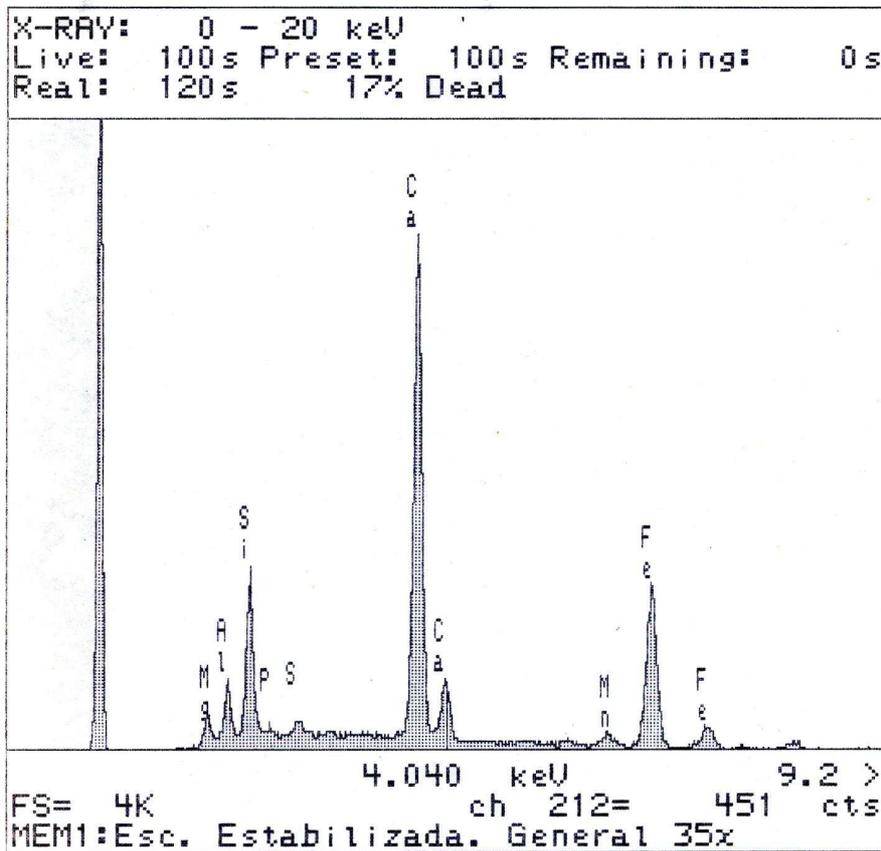
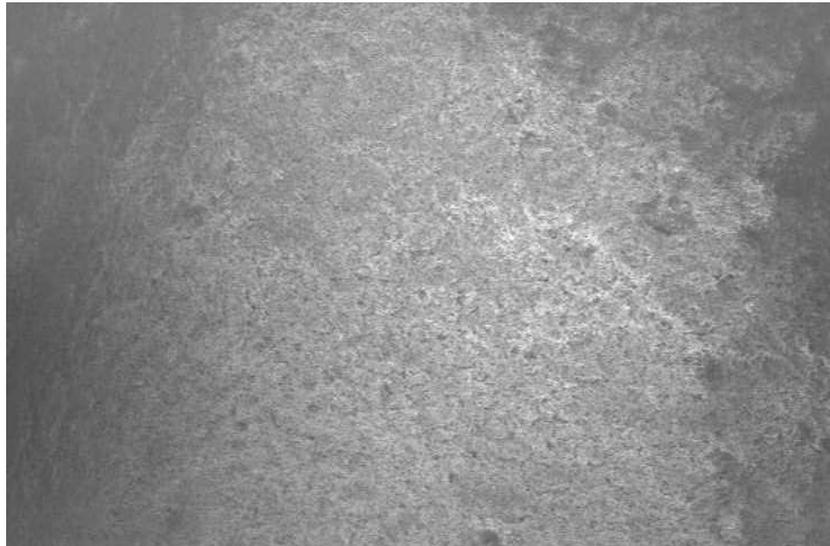


Figura 55. Escoria EAF estabilizada, aspecto general. X 35

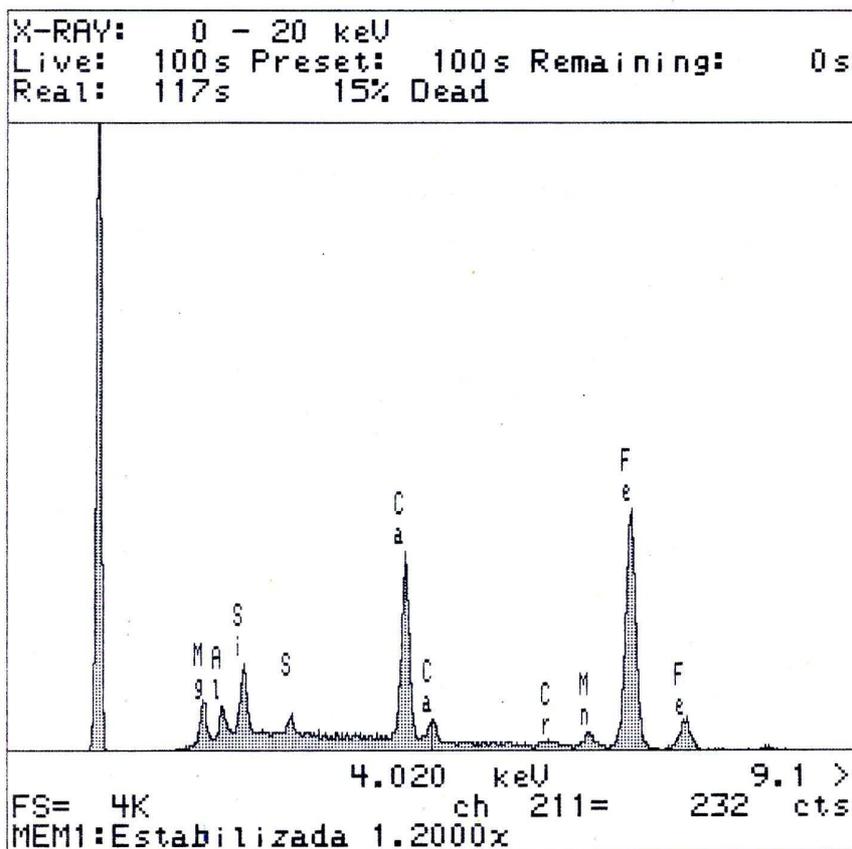
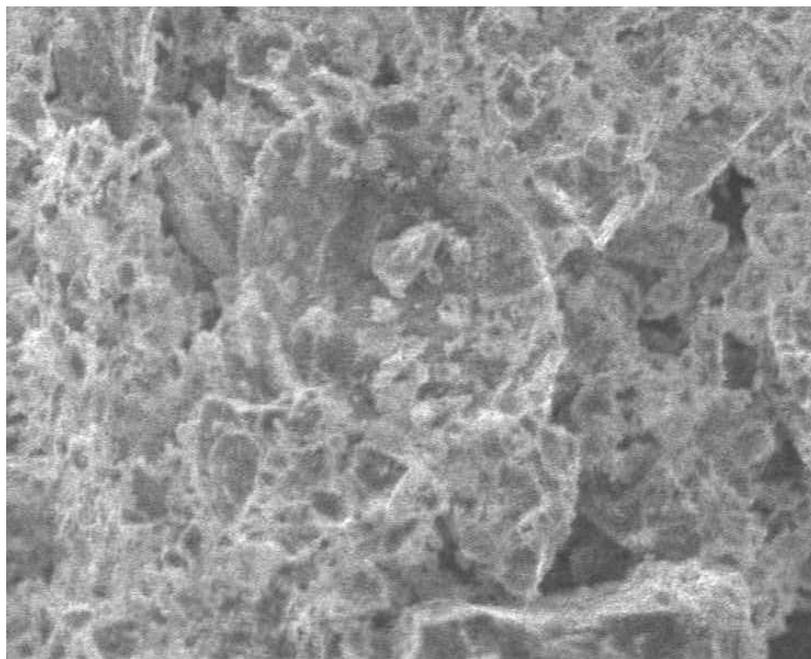


Figura 56. Escoria EAF estabilizada, detalle. Óxidos de hierro. X 200

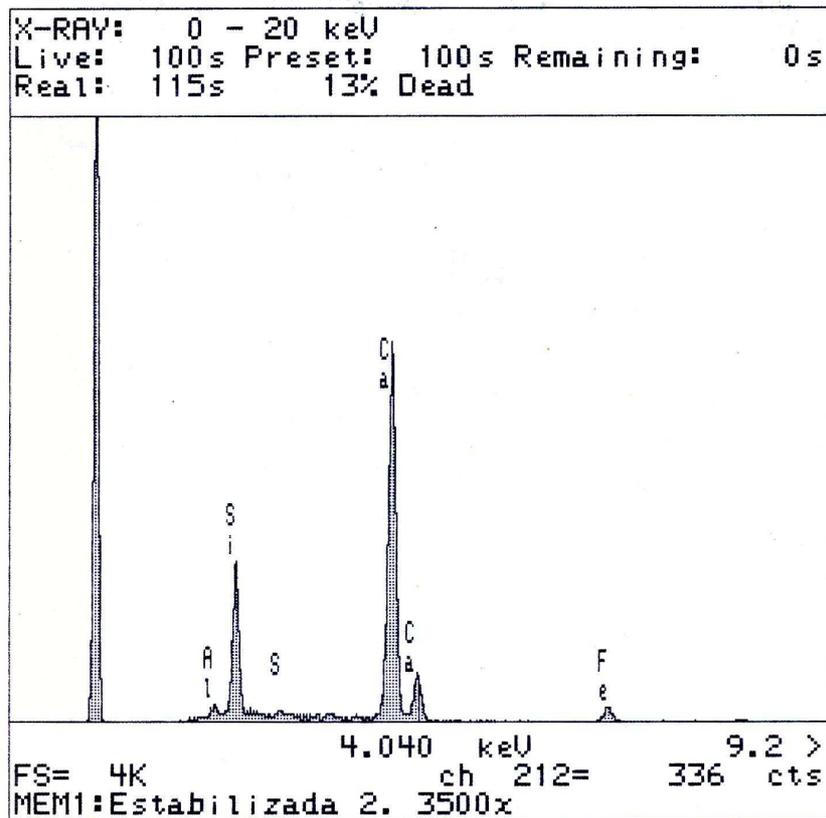
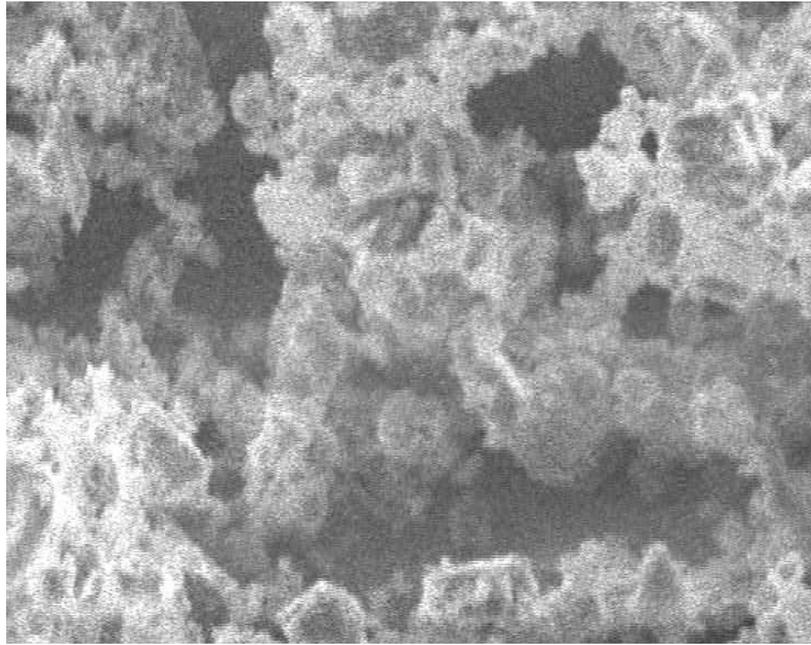


Figura 57. Escoria EAF estabilizada, detalle. Cal y silicatos. X 3500

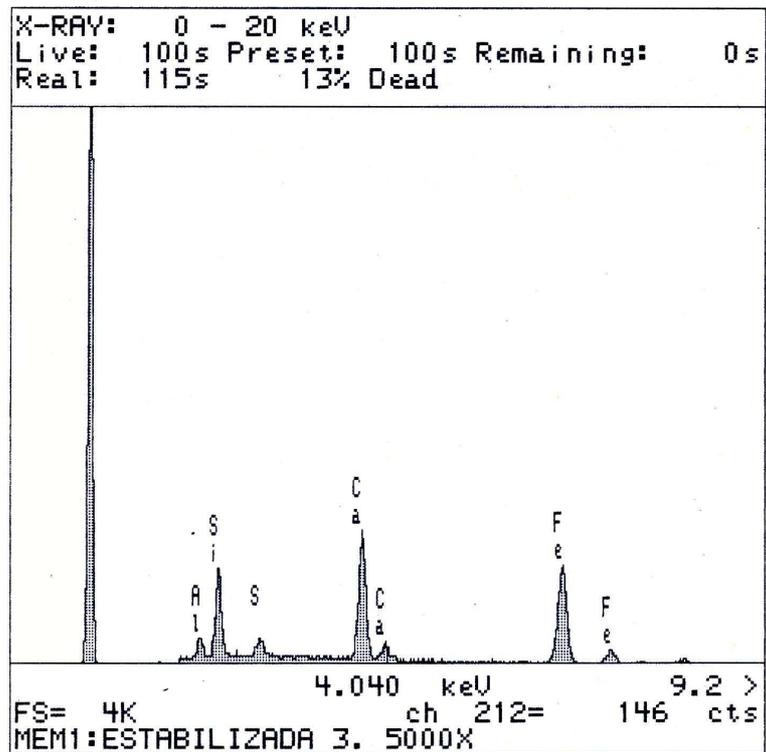
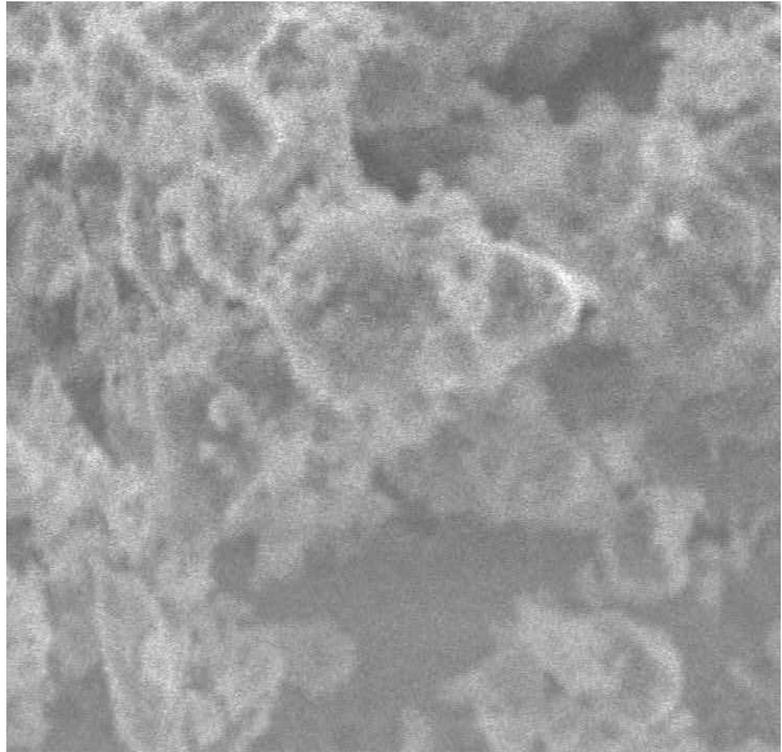


Figura 58. Escoria EAF estabilizada, silicatos y óxidos de hierro. X 5000

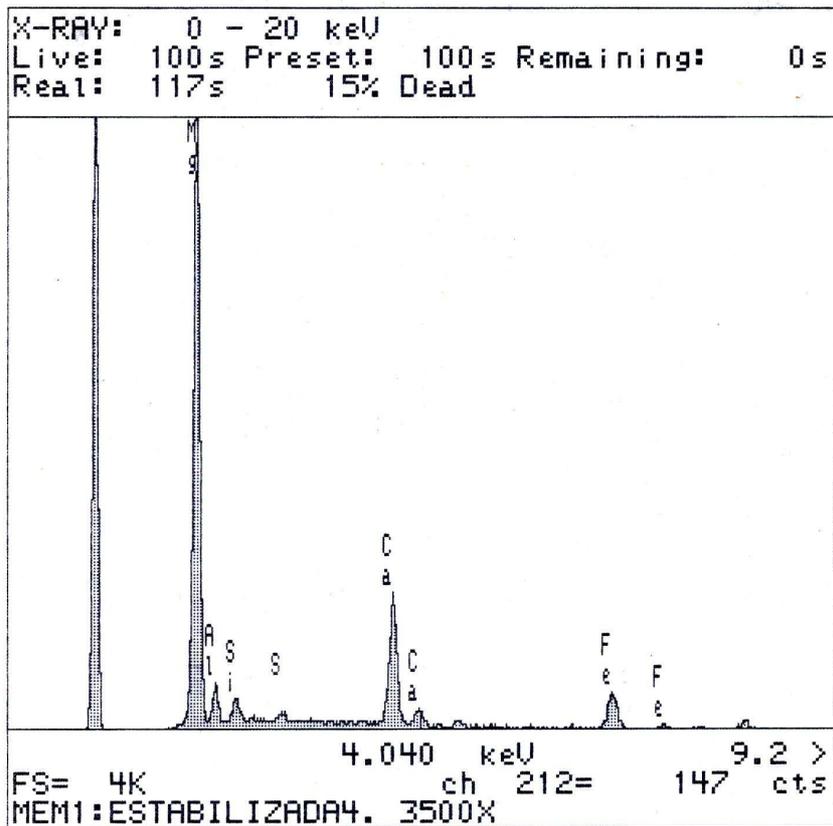
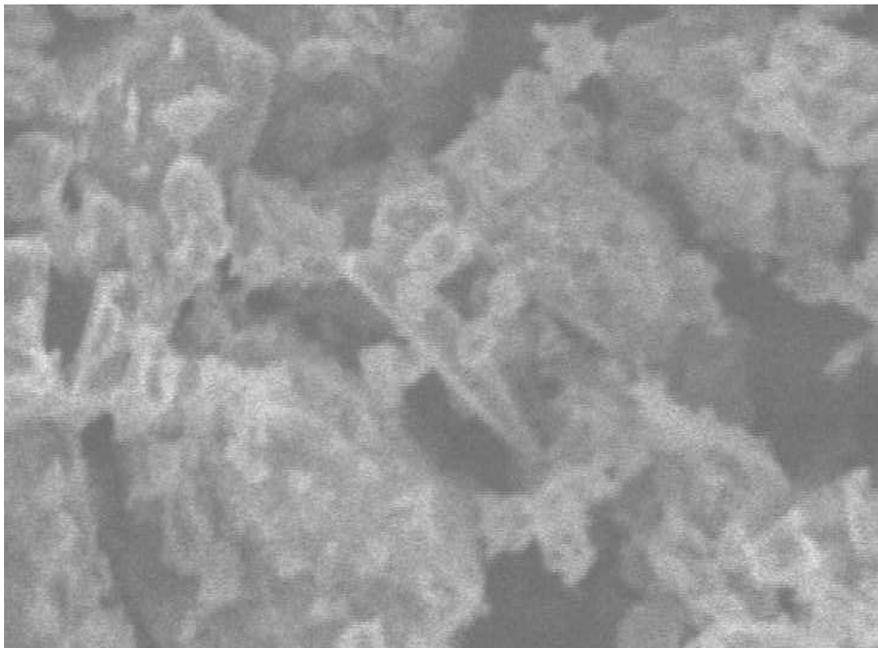


Figura 59. Escoria EAF estabilizada, detalle. Periclase. X 3500

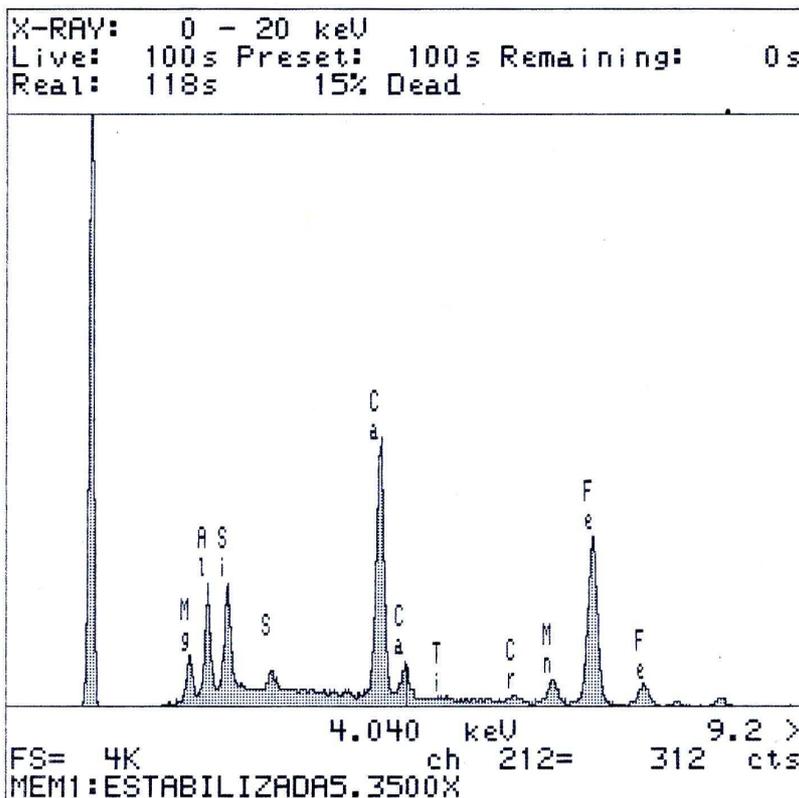
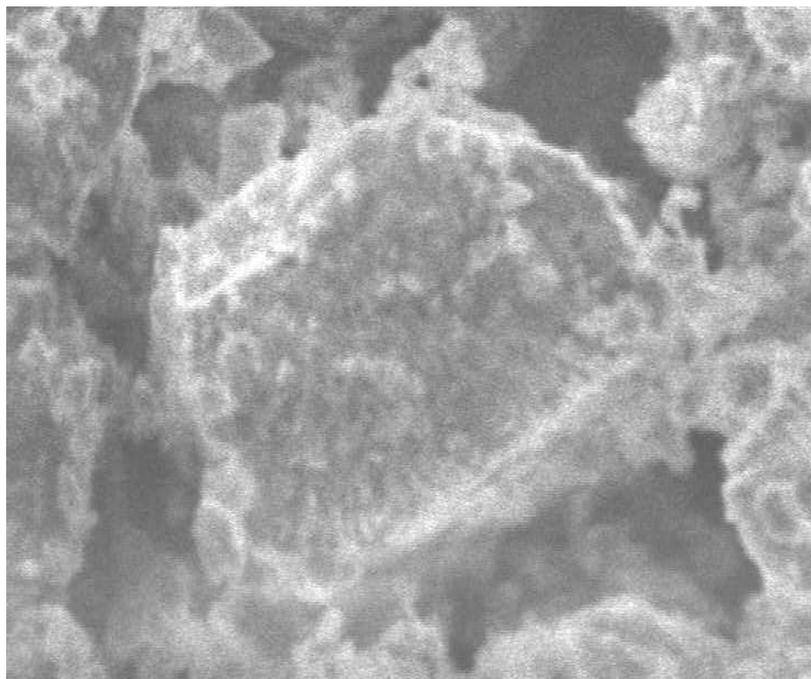


Figura 60. Escoria EAF estabilizada, detalle. Gelenita. X 3500

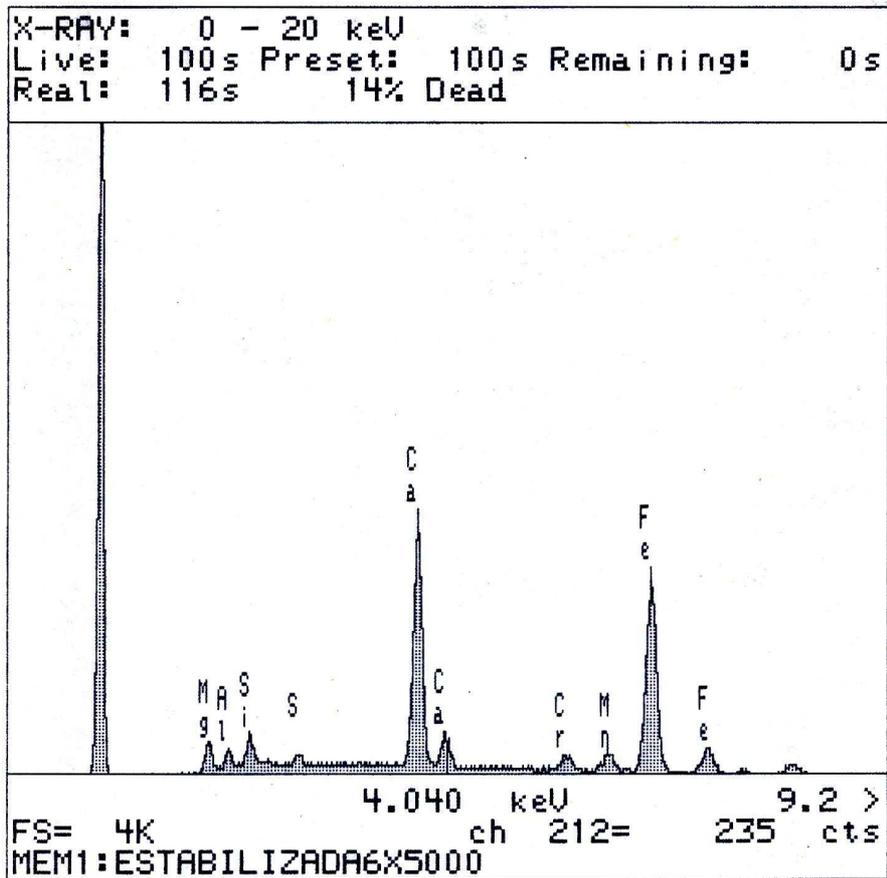
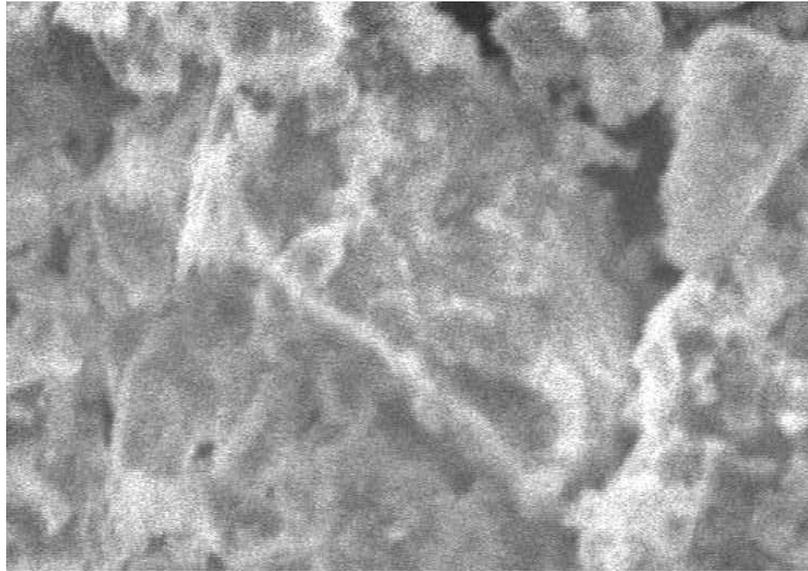


Figura 61. Escoria EAF estabilizada, detalle. Portlandita. X 5000

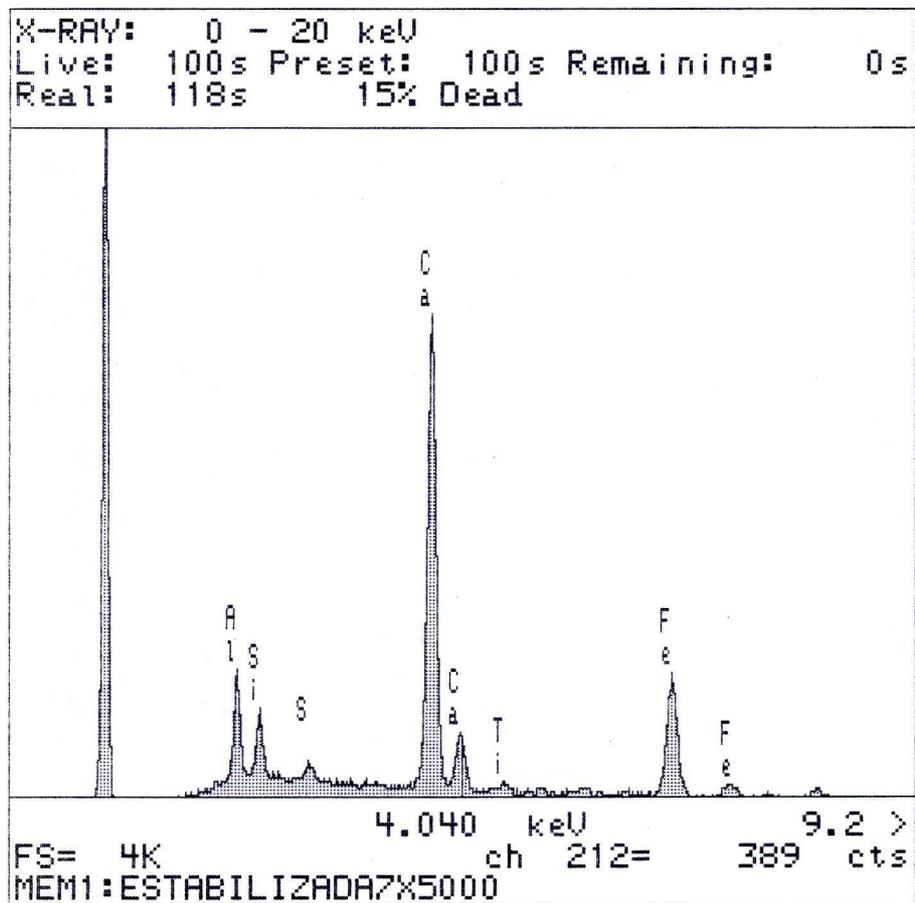
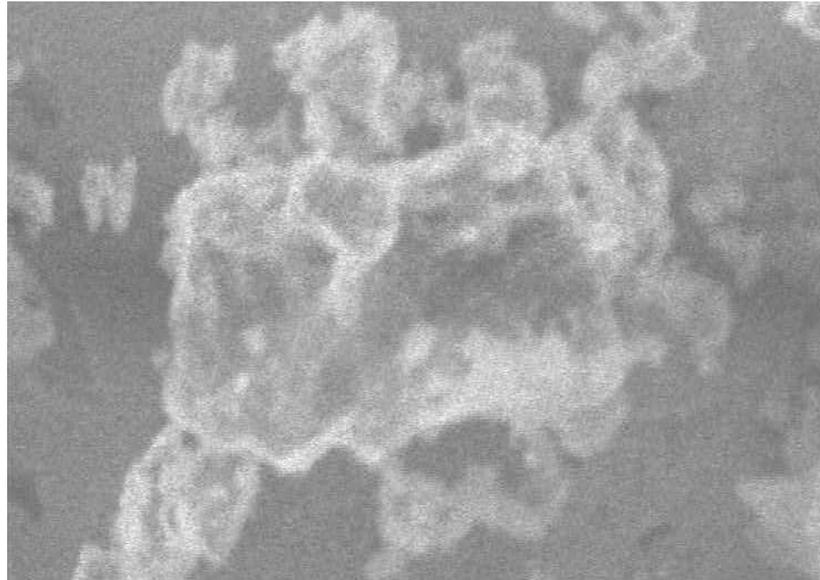


Figura 62. Escoria EAF estabilizada, brownmillerita. X 5000

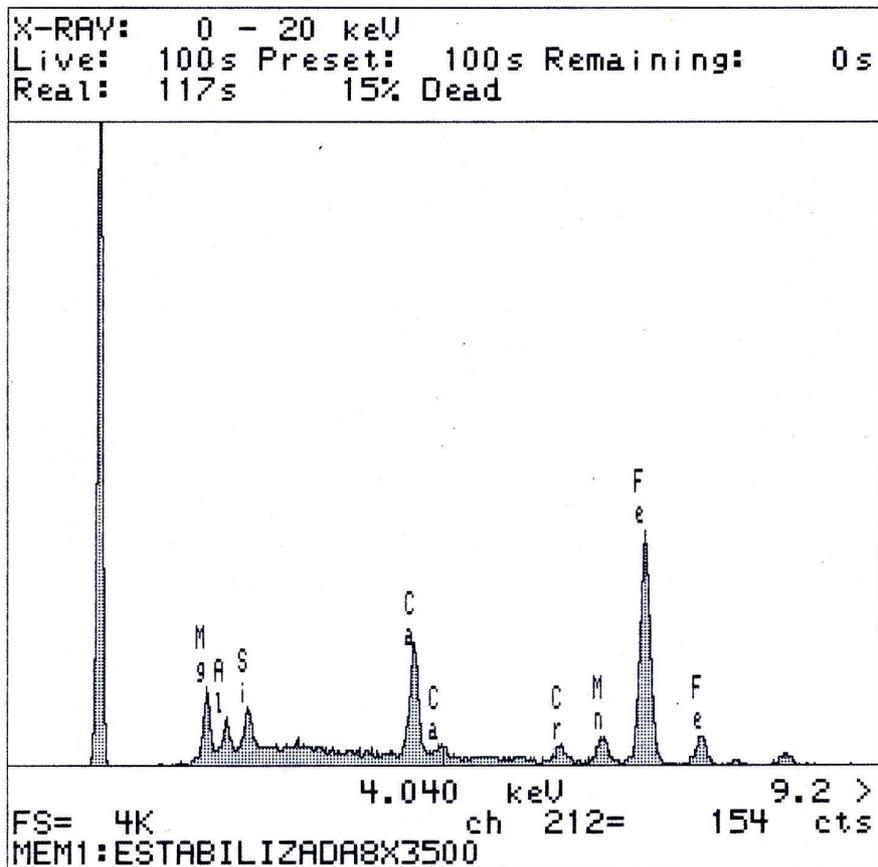
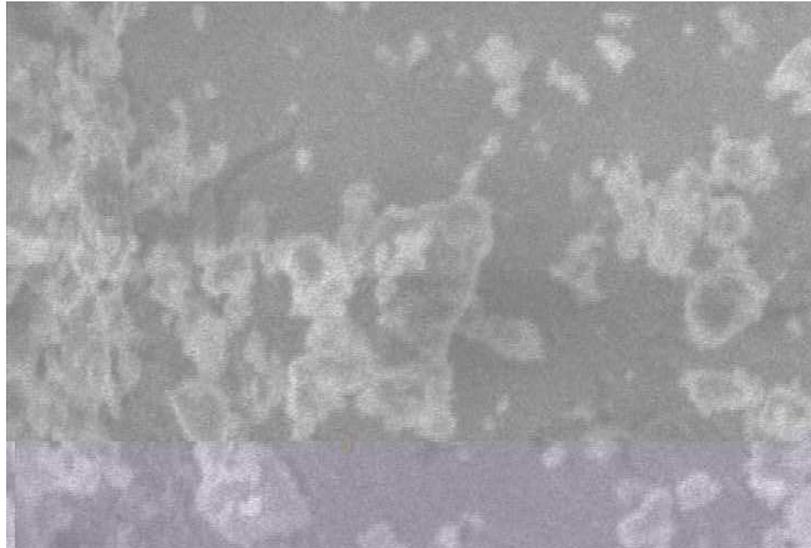


Figura 63. Escoria EAF estabilizada. Ferrita cálcico-magnésica. X 3500

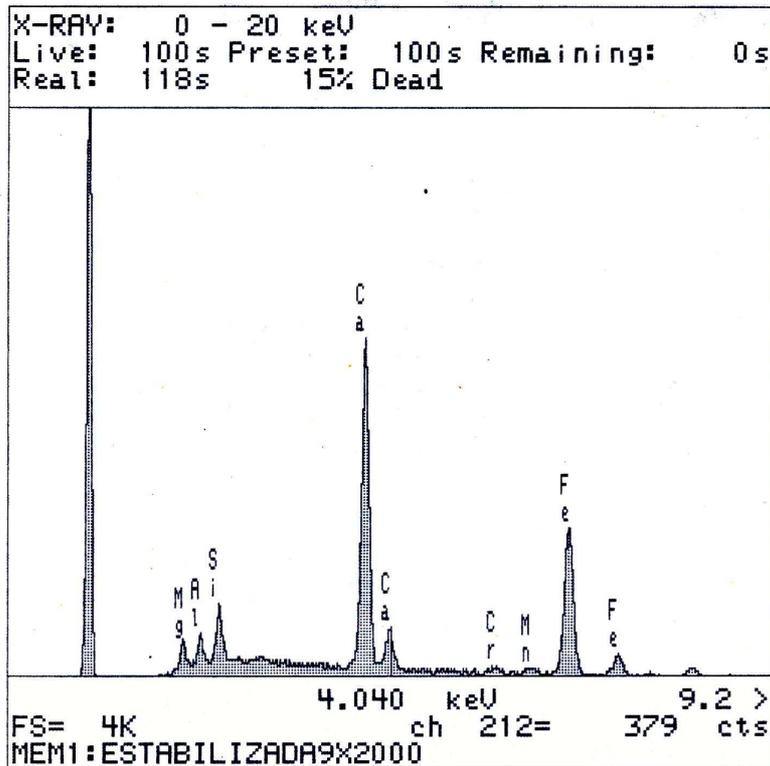
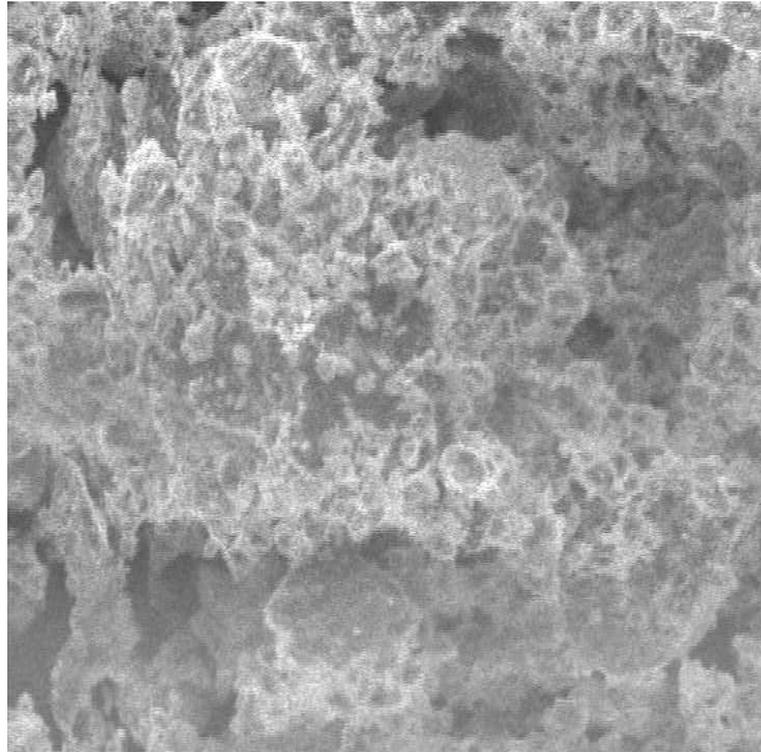


Figura 64. Escoria EAF estabilizada, cal y óxido de hierro. X 2000

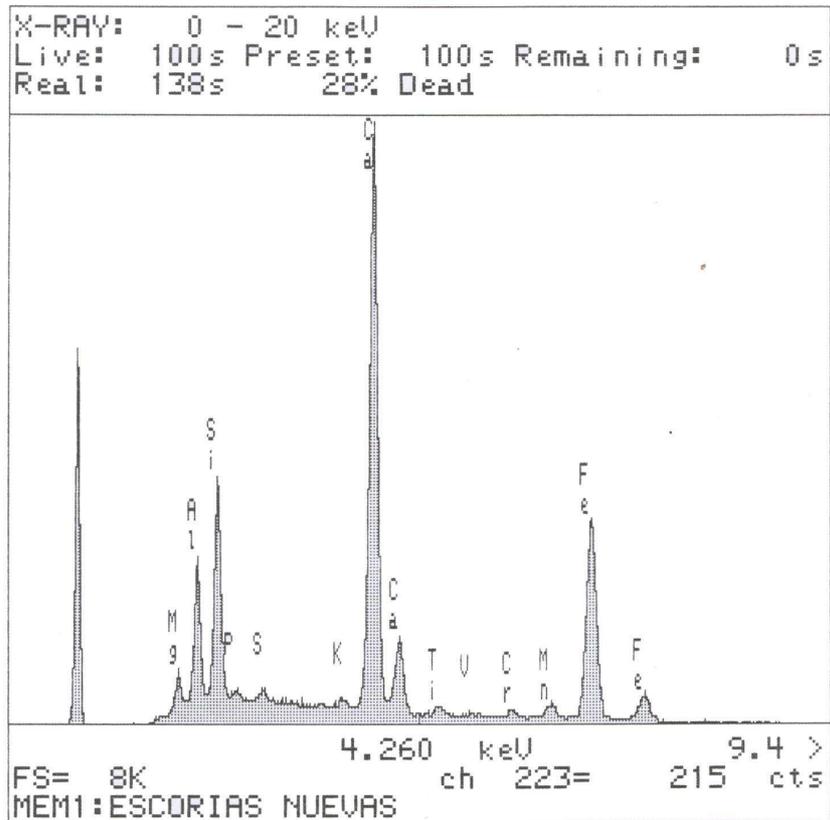
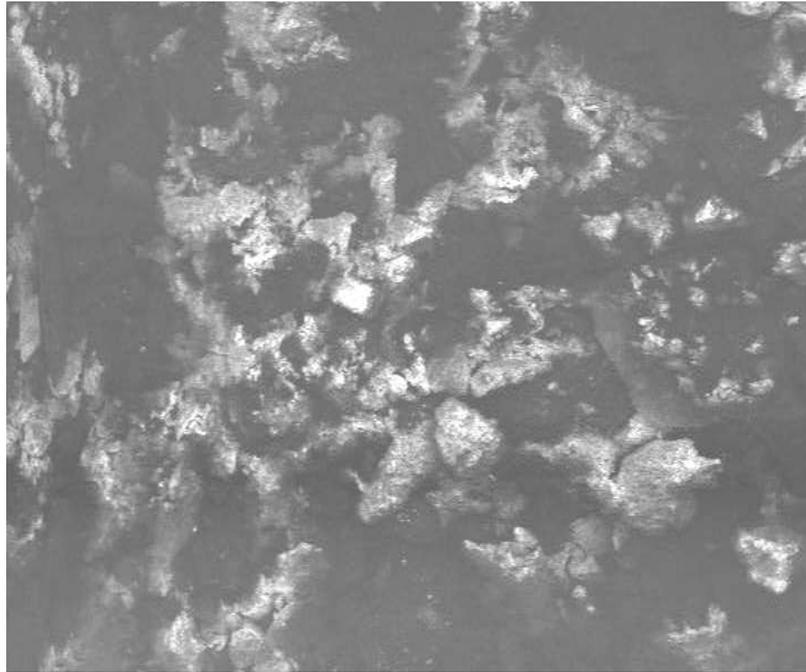


Figura 65. Escoria EAF nueva, aspecto general. X 35

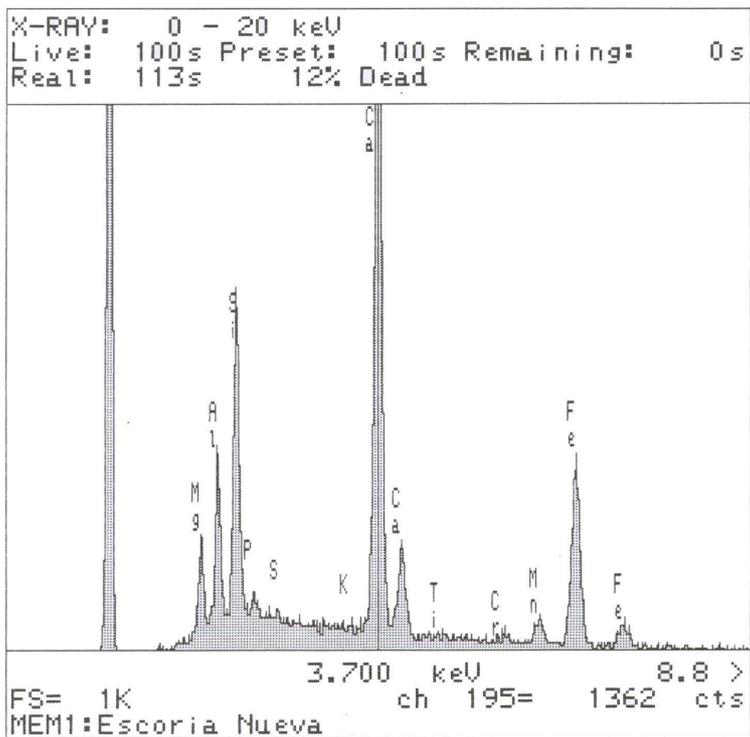
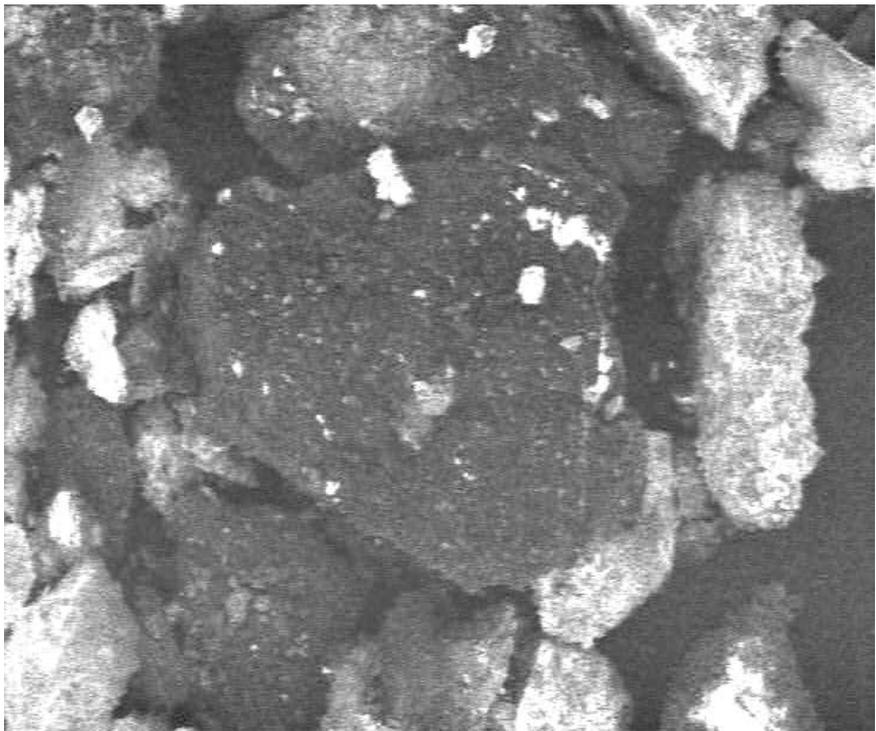


Figura 66. Escoria EAF nueva, detalle. Silicatos. X 100

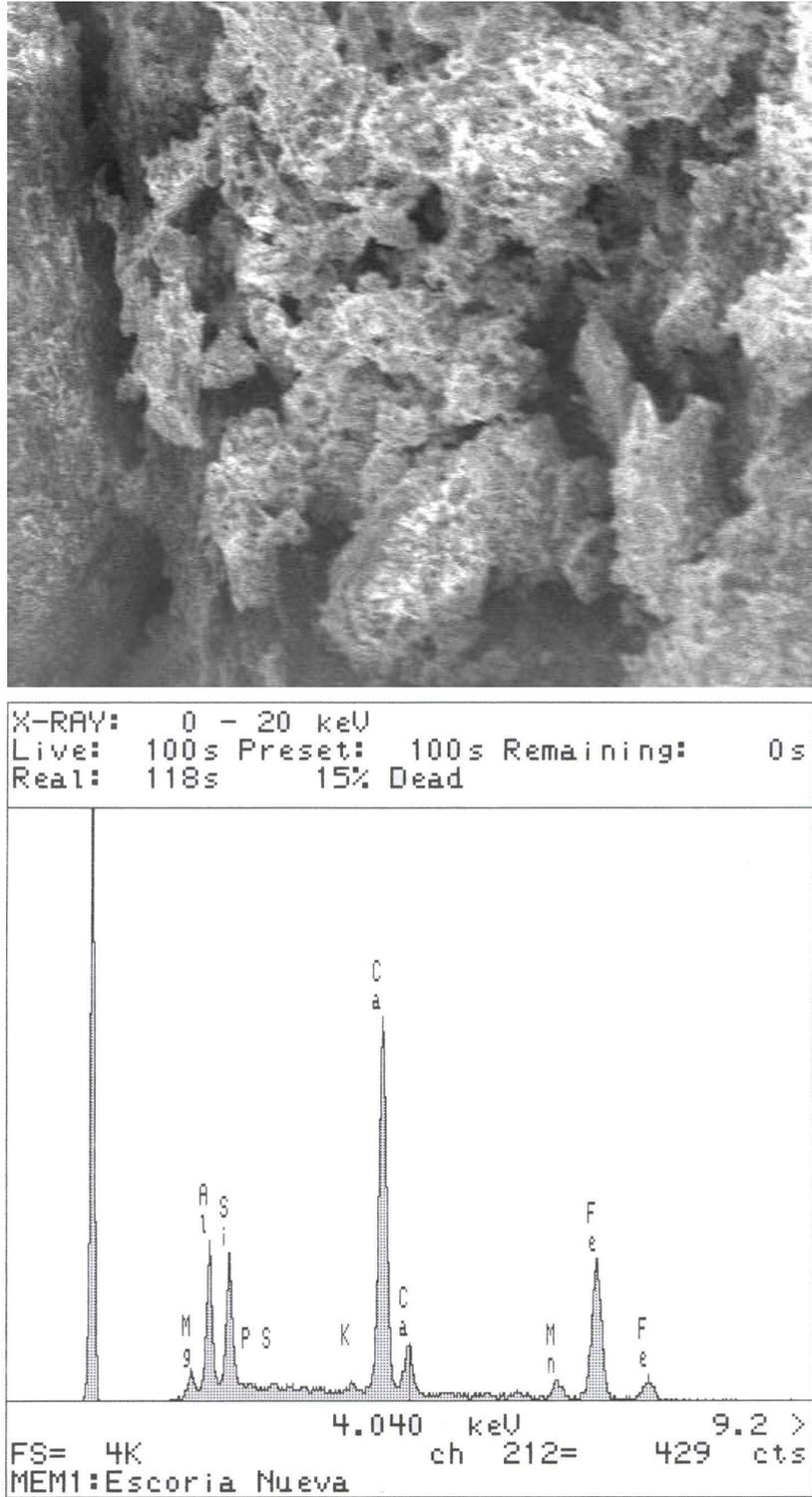


Figura 67. Escoria EAF nueva, brownmillerita. X 200

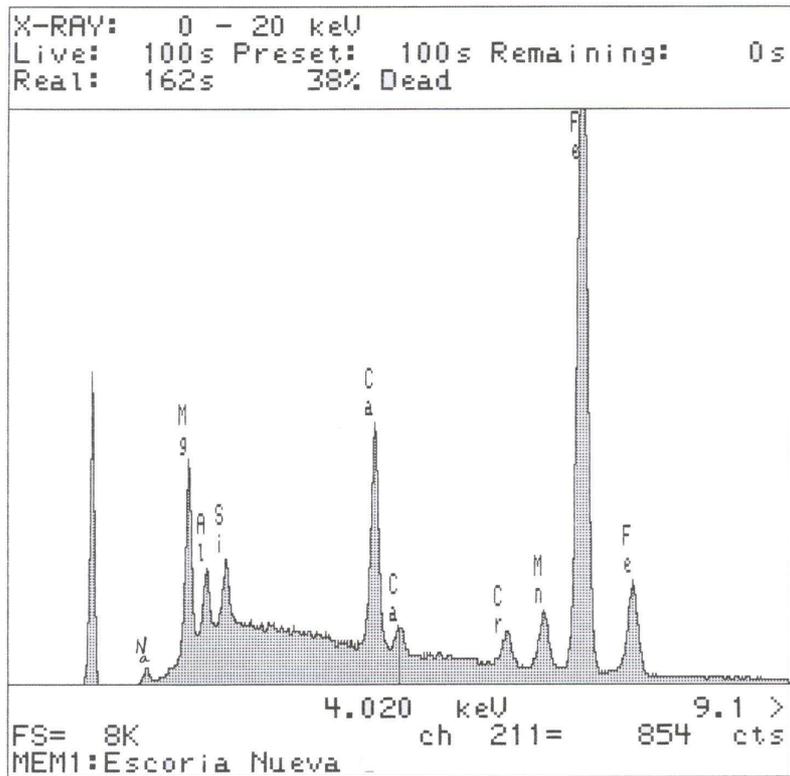
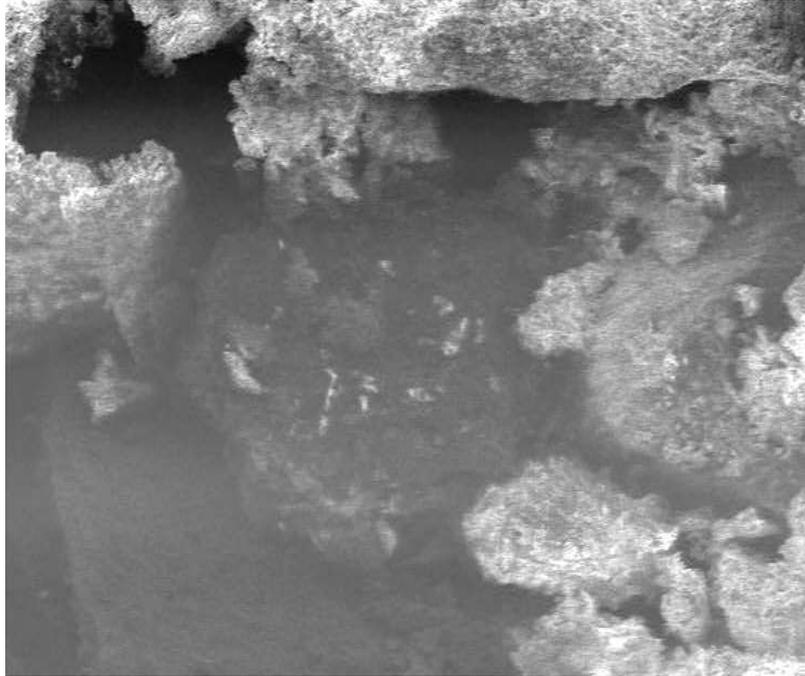


Figura 68. Escoria EAF nueva, magnesio-ferrita. X 150

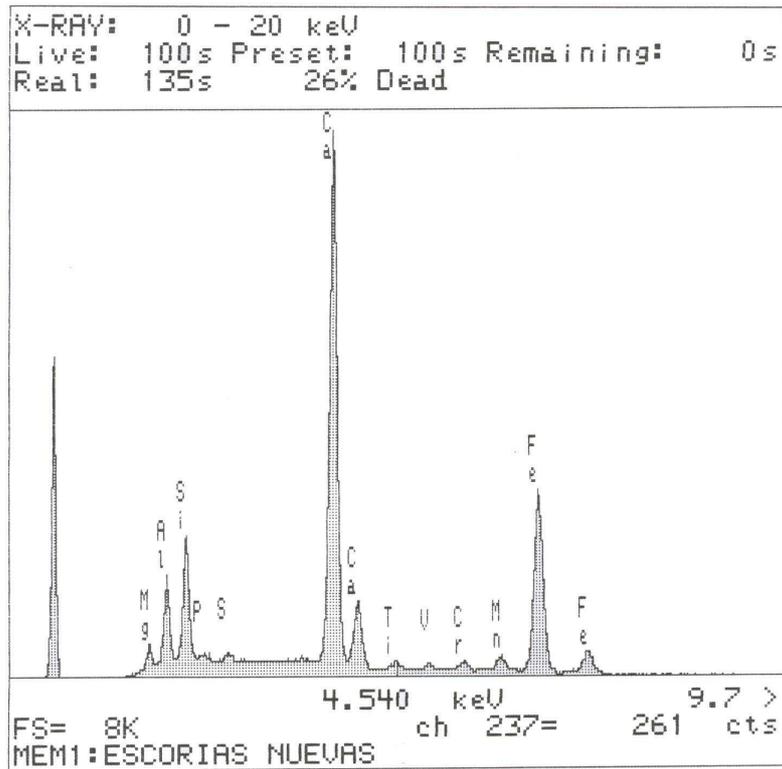
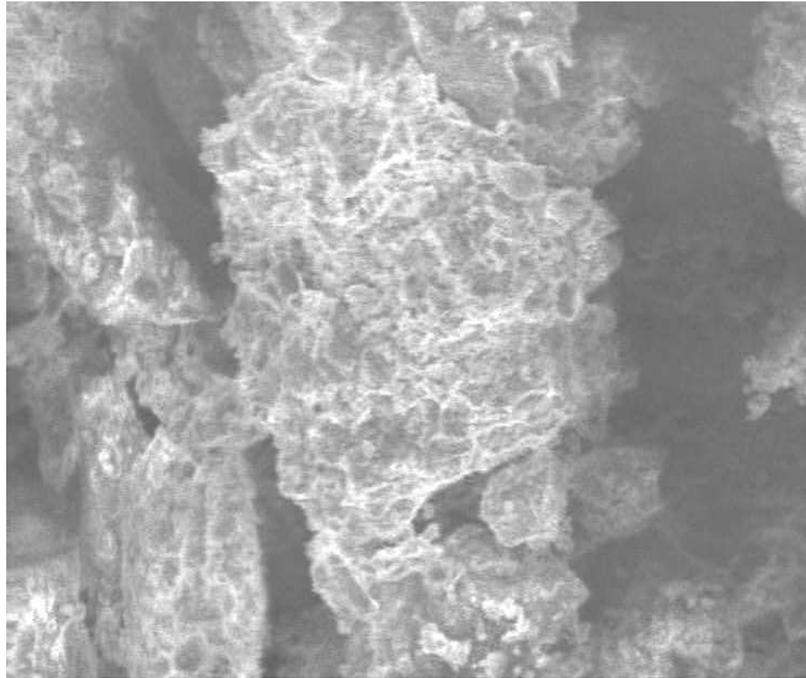


Figura 69. Escoria EAF nueva, pequeña partícula compleja. X 1500

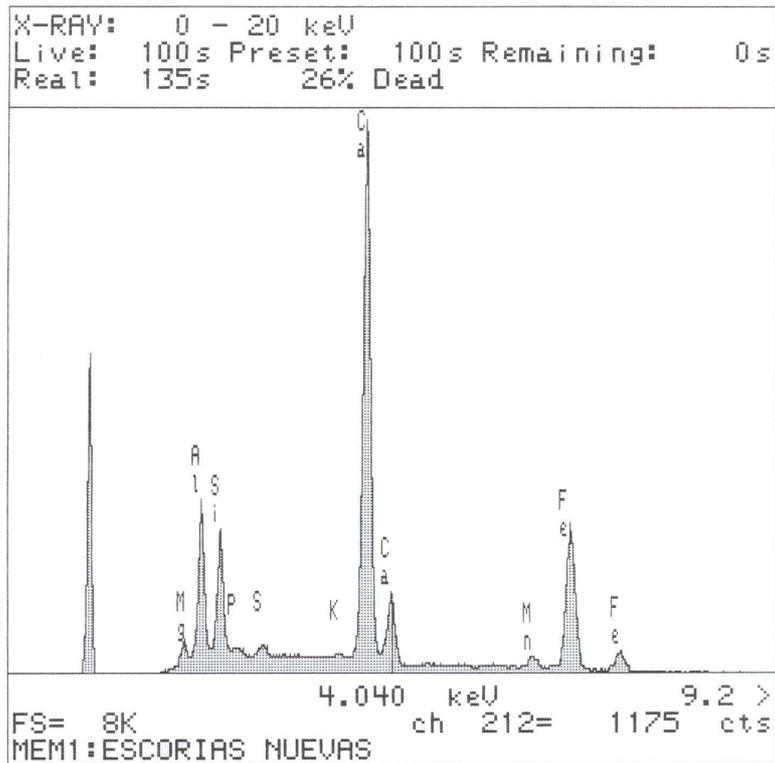
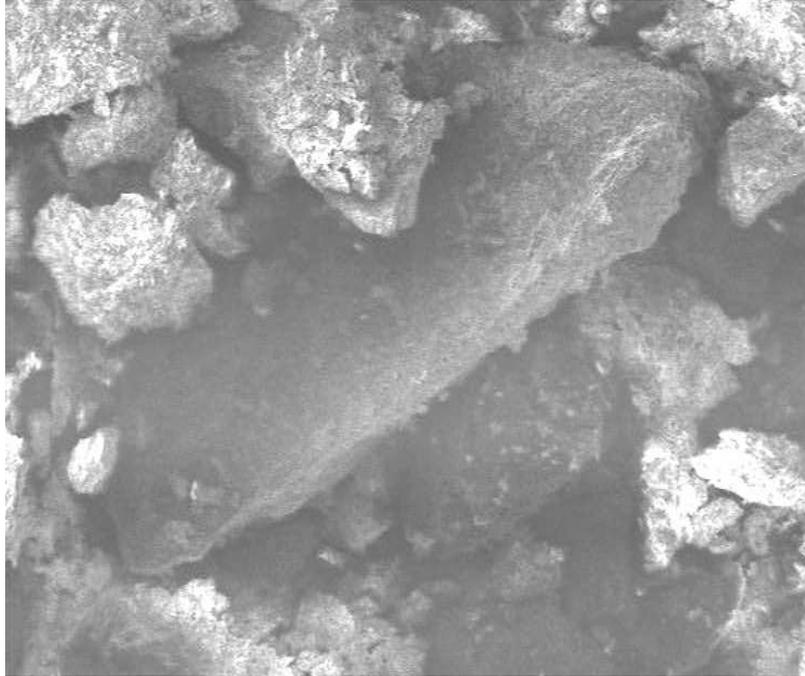


Figura 70. Escoria EAF nueva, brownmillerita. X100

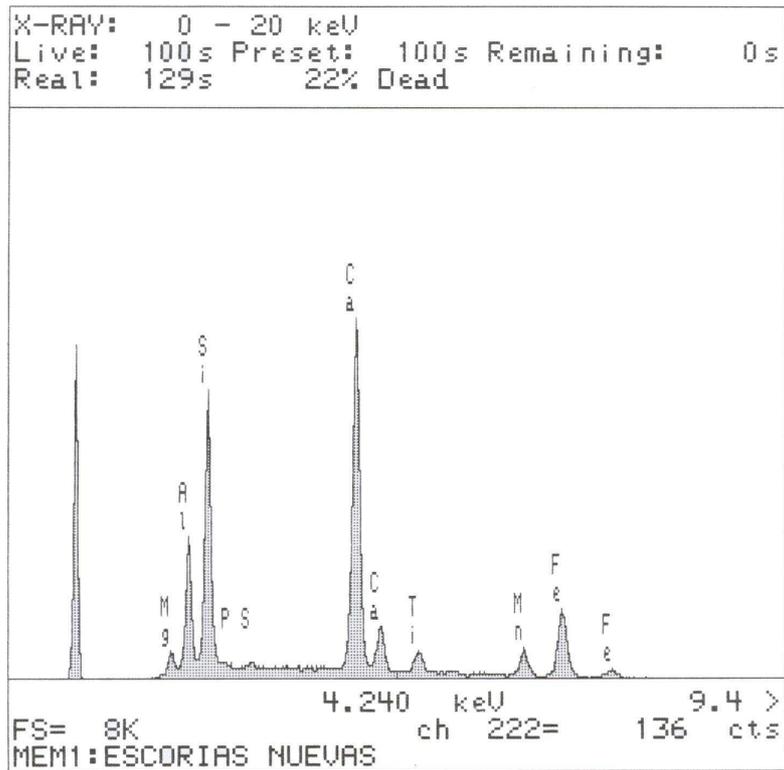


Figura 71. Escoria EAF nueva, gelenita predominante. X 100

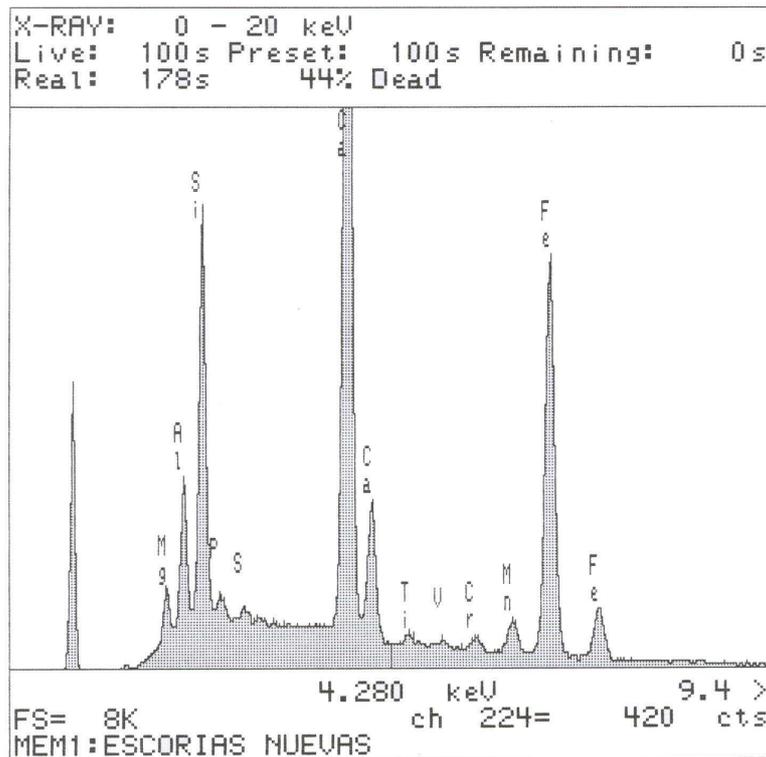
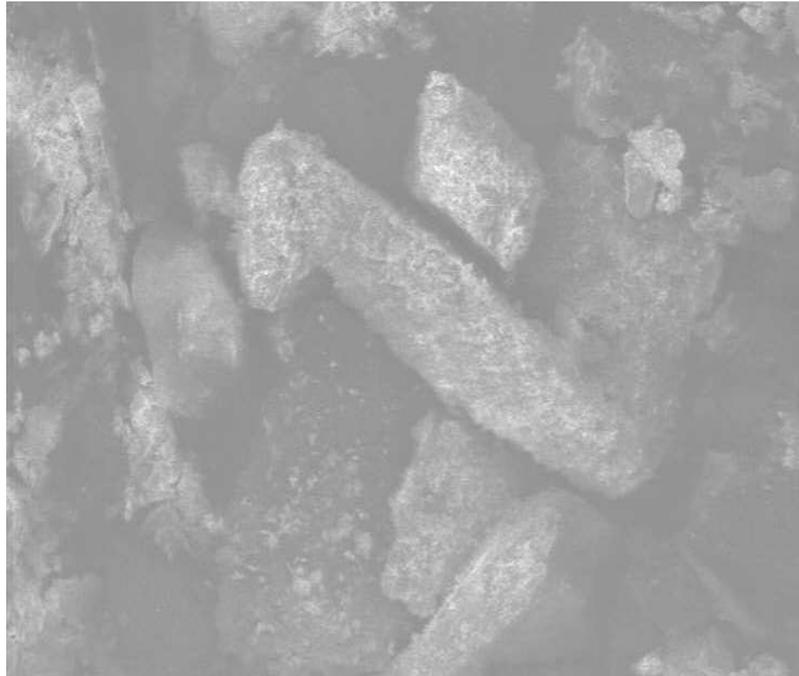


Figura 72. Escoria EAF nueva, silicatos y ferritos. X 100

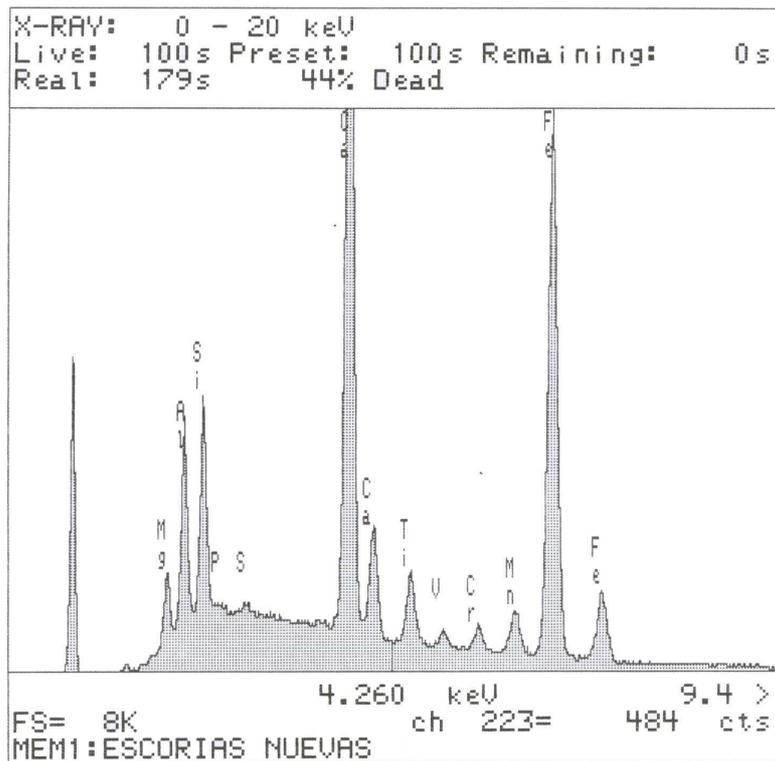
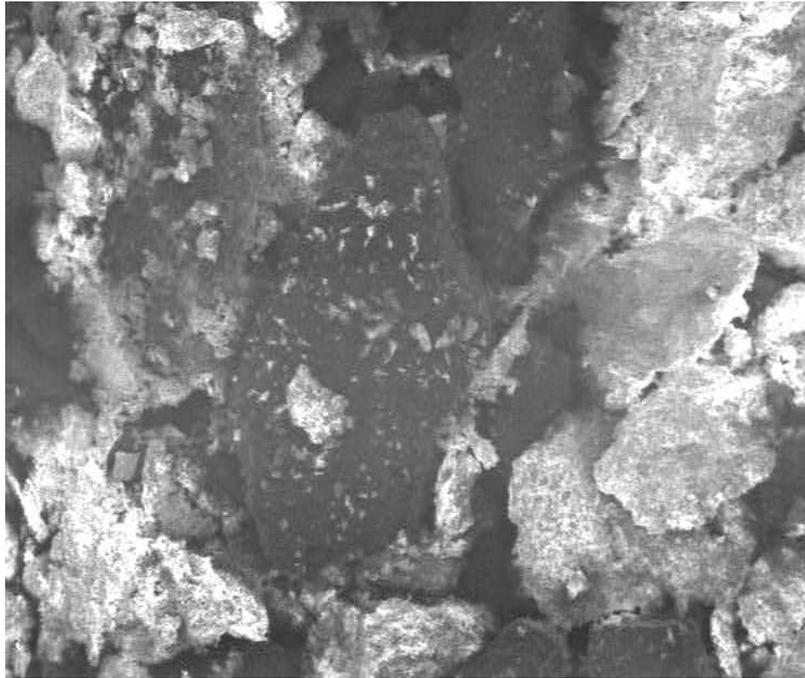


Figura 73. Escoria EAF nueva, óxidos de hierro. X 200

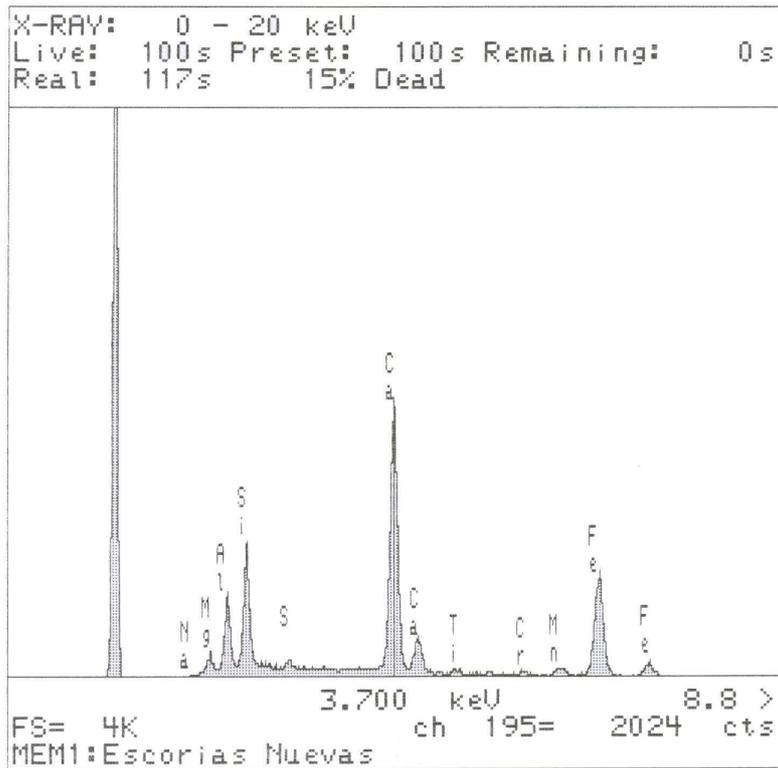
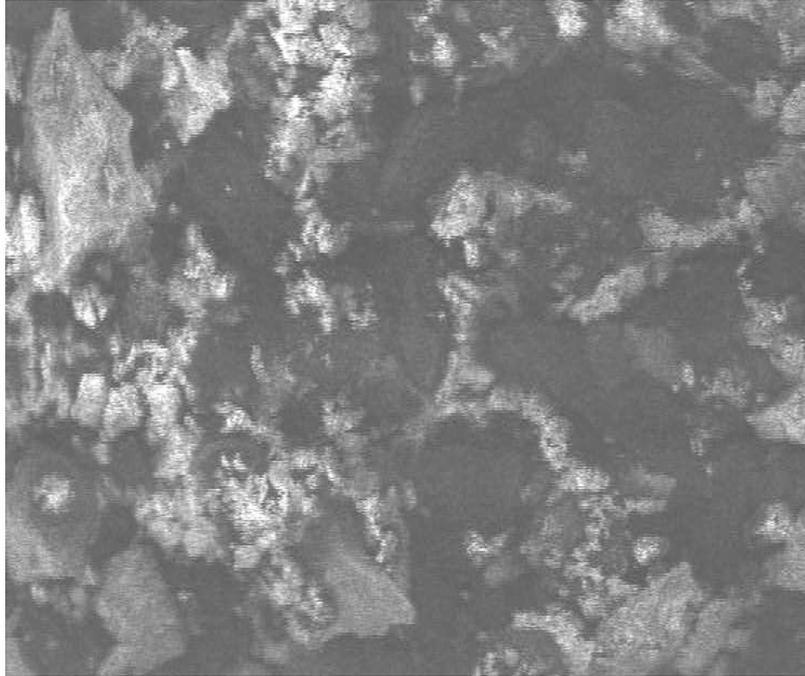


Figura 74. Escoria EAF nueva, silicatos y ferritos. X 35

5.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS EAFS

5.3.1 Granulometría de las EAFS

Los ensayos granulométricos se realizan sobre tres muestras según UNE-EN 933-1 [51] de la escoria n.º 2 utilizando tamices de ensayo según UNE-EN 933-2 [52]. La media se muestra a continuación en la Figura 75.

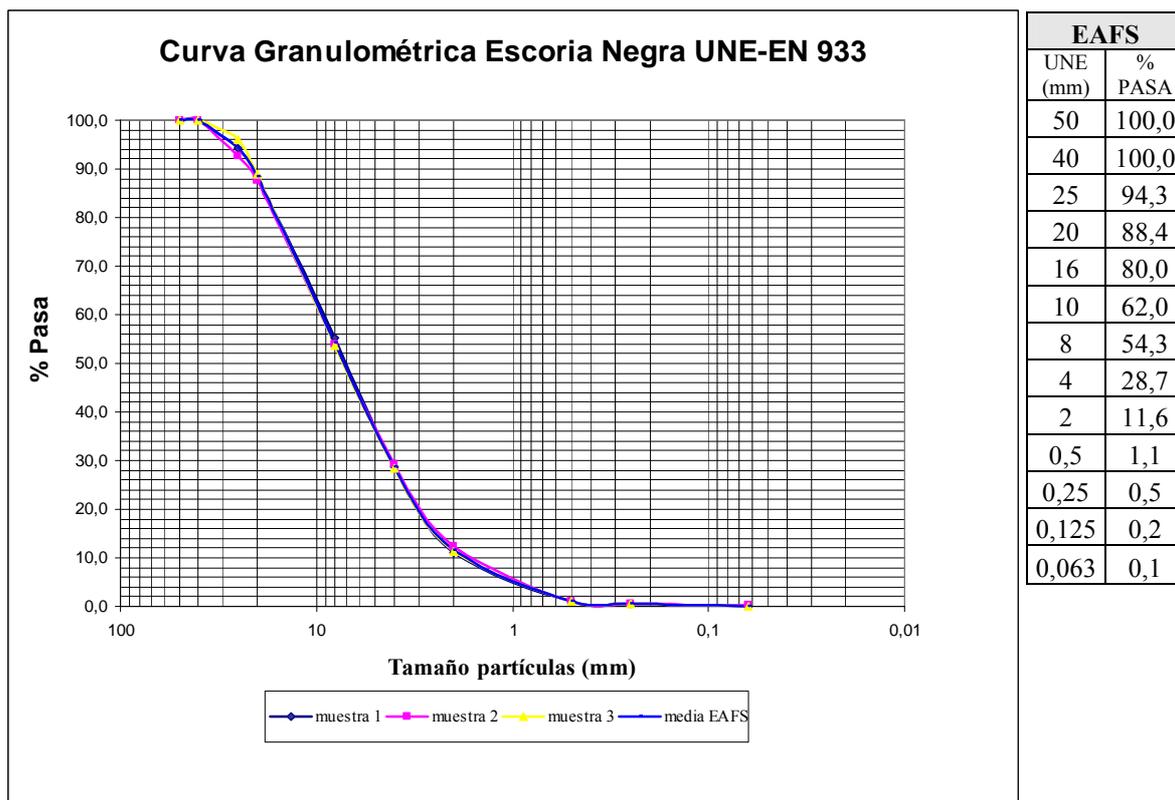


Figura 75. Granulometría escoria negra

De acuerdo con los datos obtenidos para la muestra n.º 2 de EAFS, la cual es totalmente representativa de las nueve muestras de escoria analizadas en la presente Tesis en cuanto a estudio granulométrico, se puede deducir que la proporción de árido grueso es alta, mientras que se observa una escasez en la fracción fina.

A continuación se presenta la curva granulométrica de la escoria (media de tres muestras representativas) frente a los husos indicados por el PG-3 para una zahorra de tamaño máximo 25 mm (ZA25), zahorra de tamaño máximo 20 mm (ZA20) y una zahorra drenante de tamaño máximo 20 mm (ZAD20).

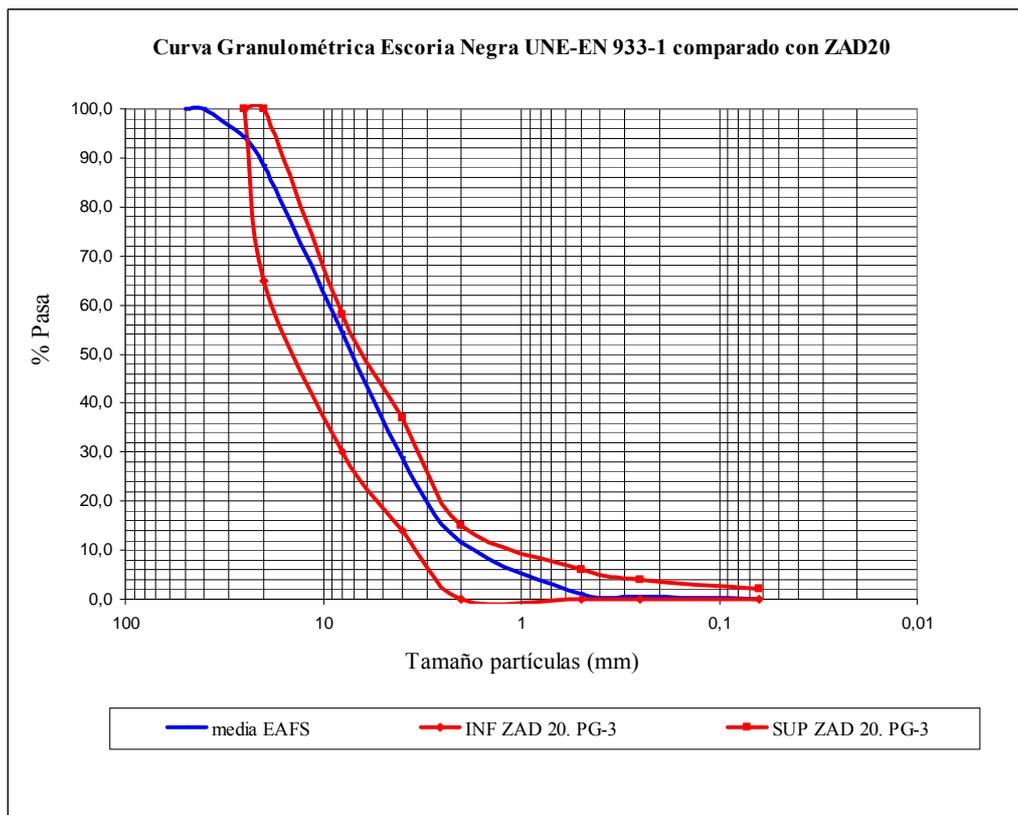


Figura 78. Granulometría escoria negra comparado con ZAD20

De acuerdo con los datos obtenidos para la muestra de escoria en cuanto a estudio granulométrico, se puede deducir lo siguiente:

- En lo referente al árido grueso se puede afirmar que no existe ninguna dificultad para conseguir granulometría adecuada (ajustada a lo prescrito por la Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes). Tiene tamaños superiores a 20 mm, que en caso de no interesar podrían ser eliminados.
- Se observa con toda claridad una falta de fracciones finas tanto si se compara con una ZA25 como si es comparado con una ZA20 (falta de tamaños inferiores a 3-4 mm). A partir de este resultado comienza a plantearse la necesidad de aumentar estas fracciones finas por medio de la mezcla del árido fino procedente del machaqueo de las escorias o con otros áridos finos, preferentemente de machaqueo de áridos naturales calizos o dolomíticos (con cierta plasticidad). En principio tal condición resulta positiva y esperanzadora puesto que es bien sabido en el mundo de la ingeniería civil que, las canteras de árido calizo son excedentarias en finos tras el machaqueo.
- Frente a una zavorra artificial drenante (ZAD20) la curva granulométrica de la escoria negra se ajusta casi perfectamente. Existiría la posibilidad de emplear EAFS en la formación de firmes de caminos rurales en sustitución a una zavorra no plástica, aplicando sobre la capa base un riego con gravilla bicapa.

5.3.2 Propiedades físicas de las EAFS

Densidades y humedad

La densidad de los áridos no es única, sino que clásicamente se han venido considerando cuatro valores teniendo o no en cuenta la porosidad accesible, la porosidad total y el relleno del espacio:

- densidad absoluta
- densidad relativa real
- densidad saturada superficie seca
- densidad de conjunto

De cara a su empleo en firmes de caminos se considera el segundo, debido a la falta de utilidad de los otros dos. Para ello se ha empleado la norma UNE 1097-6 [31].

Ensayo	Fracción granulométrica de EAFS. UNE (mm)			
	23/50	13/23	6/13	0/6
Densidad Real (g/cm ³)	3,70	3,72	3,74	3,68
Densidad Saturada sup. seca (g/cm ³)	3,95	3,80	3,81	3,74
Densidad de Conjunto (g/cm ³)	2,3			

Tabla 69. Densidades de EAFS

De acuerdo con los resultados obtenidos, la escoria negra EAF debe considerarse dentro de la categoría de árido pesado (densidad > 3 g/cm³) según la valoración del Código Modelo CEB-FIP (densidad normal: 2-3 g/cm³ y ligero < 2 g/cm³).

Con relación a los áridos calizos o dolomíticos de machaqueo como posibles alternativas a la escoria negra EAF, la densidad de esta última está entre un 30% y un 40% por encima de aquellos.

Finalmente se puede considerar de modo aproximado que la densidad de conjunto de la escoria negra, es decir la que posee un material granular en un acopio o durante su manipulación y transporte es, para una mezcla de varios tamaños, del orden de 2,3 T/m³, frente a los aproximadamente 1,9 T/m³ del árido calizo de machaqueo habitual.

Porosidad y absorción de agua

Los resultados de los ensayos de porosidad y absorción de agua de los áridos son complementarios a los de densidad, y se encuentran regulados por la norma UNE 1097-3 [30] y norma UNE 1097-6 [31].

Ambas magnitudes, porosidad y absorción de agua, dan una medida de la porosidad accesible o cantidad de huecos ocupables por el agua capilar, con relación al volumen o peso total de la muestra. No obstante, para áridos finos no se prevé estimación de la porosidad en la norma, y no ha sido por ello considerada ni estudiada. Poseen, por tanto, un interés alto como magnitudes a considerar para su empleo en capas del firme, relacionado con la capacidad drenante del mismo.

Ensayo	Fracción granulométrica de EAFS. UNE (mm)			
	23/50	13/23	6/13	0/6
Absorción de Agua (%)	1,68	1,91	2,88	3,65
Porosidad (%)	6,95	8,43	10,68	-

Tabla 70. Porosidad y absorción de agua de EAFS

En general las escorias negras no sobrepasan el límite del 5% de absorción de agua, pero los valores obtenidos en las fracciones finas (arena y gravilla fina) se aproximan mucho en algunos casos. Este fenómeno, observable en todas las escorias negras, está asociado al enfriamiento de la misma a la salida del horno eléctrico y a su disgregación natural durante dicho enfriamiento, en el cual el material se cuarteo y rompe por las zonas más porosas y por lo tanto más débiles. Del mismo modo sucede en el machaqueo mecánico posterior, de modo que finalmente las piezas que subsisten con mayor tamaño son las más compactas.

Limpieza

No resulta aventurado afirmar que en principio, en un árido artificial como la escoria negra no existe vestigio alguno de terrones de arcilla, margas o materia orgánica a su salida del horno eléctrico. Ahora bien, siempre es admisible la posibilidad de una contaminación posterior si los acopios machacados, en periodo de envejecimiento y estabilización a la intemperie, son manipulados de modo indebido sobre suelos arcillosos o con elementos cargadores (palas, cucharas mecánicas, etc.) sucios. Debe exigirse sin duda una manipulación adecuada y cuidadosa de los acopios de la escoria en los parques y plantas de machaqueo. También es admisible la posibilidad de que este árido fino sea contaminado por musgos u otros vegetales.

Coefficiente de limpieza superficial según NLT-172 [15] es del **1,8%**, inferior al 2% indicado en el PG-3 [26], en el caso de zahorras artificiales.

Equivalente de arena

Los ensayos se llevaron a cabo tal y como se describe en la norma UNE EN 933-8 [56] sobre la fracción granulométrica de dicho árido fino que pasa por el tamiz de 2 mm.

El resultado obtenido, tal y como cabía esperar al ensayar unas arenas con muy baja proporción de finos, fue del **89%**.

Plasticidad

La escoria negra se trata de un material **no plástico (NP)**, cumpliendo con ellos cualquiera de las prescripciones del PG-3 [26] en su artículo de zahorras.

Resistencia al desgaste de los Ángeles

Las fracciones de árido grueso de la escoria negra fueron sometidas al ensayo de resistencia al desgaste de Los Ángeles prescrito por el PG-3 [26], y tal y como se describe en la norma UNE EN 1097-2 [58].

El resultado del coeficiente de desgaste de los ángeles obtenido para la muestra fue:

LA = 18.

Habida cuenta que el pliego PG-3 [26] prescribe un valor máximo de 30 para estimar como adecuado el árido grueso como zahorra artificial en todo tipo de tránsito, los valores obtenidos, muy por debajo de este límite, nos revelan que la escoria negra constituye, desde el prisma de su resistencia mecánica, un excelente árido grueso.

Es sabido que el resultado de este ensayo de disgregación y fragmentación de los áridos por impacto de bolas de acero posee una buena correlación con su resistencia mecánica a tracción y a compresión. Cabe esperar unas buenas resistencias mecánicas en los firmes correctamente consolidados.

Índice de lajas y agujas

La caracterización de la forma geométrica que poseen los áridos gruesos de escoria negra tras el machaqueo, ha sido llevada a cabo mediante la evaluación del índice de lajas y agujas según se contempla en la norma UNE-EN 933-3 [53].

Seguidamente se resumen los resultados de índice de lajas obtenidos para cada una de las fracciones granulométricas indicadas por la norma, así como el índice de lajas global de la muestra ($IL=3,27$), donde se observan en todos los casos unos valores muy inferiores al valor máximo de 35 prescrito para zahorras artificiales en el PG-3 [26]:

Fracción Granulométrica d_i/D_i (mm)	Masa (R_i) de la fracción granulométrica d_i/D_i (gramos)	Anchura nominal de las ranura de los tamices de barras (mm)	Masa que pasa por el tamiz de barras (m_i) (gramos)	IL de cada fracción $IL_i=(m_i/R_i)*100$ (%)
40/50	0	25	0	-
31,5/40	569	20	0	0
25/31,5	526	16	27	5
20/25	511	12,5	0	0
16/20	640	10	6	1
12,5/16	968	8	28	3
10/12,5	637	6,3	9	1
8/10	1129	5	73	7
6,3/8	1083	4	29	3
5/6,3	647	3,15	12	2
4/5	943	2,5	66	7
$M_1=\sum R_i=$	7653	$M_2=\sum m_i=$	250	
$IL=(M_2/M_1)*100=$				3

Tabla 71. Ensayo índice de lajas para EAFS

Coefficiente de forma

Se determinó el coeficiente de forma según el método de ensayo de UNE EN 933-4:2008 [54]. El coeficiente de forma es la relación entre la forma del árido con la forma ideal de un árido esférico.

Coeficiente de forma	Fracción granulométrica de EAFS. UNE (mm)			
	23/50	13/23	6/13	0/6
Absorción de Agua (%)	0,50	0,55	0,56	-

Tabla 72. Coeficiente de forma de EAFS

Diremos que la forma geométrica de las piezas de árido tiende a la esfera o al ovoide de baja excentricidad, lo cual favorece la compacidad en sus mezclas como árido grueso. Los resultados son coherentes con el ensayo de índice de lajas. La escoria negra proporcionó texturas superficiales rugosa y cavernosa en todo caso.

Partículas trituradas

Se determina el porcentaje de caras de fractura de las partículas de la escoria negra según UNE EN 933-5 [55] obteniéndose los siguientes valores:

Porcentajes redondeados al entero mas próximo %	
Cc	Cr
50	50
Ctc	Ctr
5	22

Tabla 73. Ensayo de determinación del porcentaje de caras de fractura de EAFS

Siendo,

Cc=Porcentaje de partículas trituradas (incluye totalmente trituradas: Ctc) sobre el total de la muestra

Cr=Porcentaje de partículas redondeadas (incluye totalmente redondeadas: Ctr) sobre el total de la muestra

Ctc= Porcentaje de partículas totalmente trituradas sobre el total de la muestra

Ctr= Porcentaje de partículas totalmente redondeadas sobre el total de la muestra

Según PG3 [26], para zahorras artificiales, se debe de cumplir:

- Para calzadas T00-T0: $Cc \geq 100\%$
- Para calzadas T1 y T2 y arcenes de T00 a T0: $Cc \geq 75\%$
- Para calzadas T3 y T4 y resto de arcenes: $Cc \geq 50\%$

En el caso de caminos rurales, estaríamos en el último de los puntos y habría que cumplir $Cc \geq 50\%$. Nuestro valor es justo 50%, por lo que cumple la condición. Hay que tener en cuenta que se trata de un ensayo muy subjetivo, además de tratarse de un ensayo para árido natural.

En las figuras siguientes se pueden observar las propiedades indicadas en los apartados anteriores.



Figura 79. Detalle de montón de escoria de EAF



Figura 80. Diferentes fracciones granulométricas de escoria de EAF



Figura 81. Detalle de árido grueso de escoria de EAF

Resistencia al desmoronamiento

La resistencia al desmoronamiento o a la disgregabilidad en presencia de agua de la escoria negra empleada como zahorra, es importante para su propia durabilidad así como para la durabilidad de los firmes construidos con escorias negras.

El pliego PG-3 [26] indica que los materiales para las capas de zahorra no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o de alteración física o química apreciable bajo las condiciones más desfavorables. Tampoco podrán dar origen, con el agua a disoluciones que puedan causar daños a estructuras u otras capas del firme, o contaminar el suelo o corrientes del agua.

Sobre la muestra de escoria negra se ha llevado a cabo el Ensayo de Durabilidad al Desmoronamiento (Slake Durability Test) previsto en la norma NLT- 251/91 [16], que nos da una idea similar a la de la pérdida de peso en sulfatos.

Los resultados de someter a las muestras a dos ciclos normalizados de humedad-sequedad, expresados en peso final de la muestra con respecto al peso inicial en porcentaje se expresan en la siguiente tabla.

Escoria Negra EAFS	Resistencia al desmoronamiento (%)	
	1 ^{er} ciclo	2 ^o ciclo
	98,24	98,10

Tabla 74. Ensayo de resistencia al desmoronamiento de EAFS

Como se aprecia de la observación de los resultados anteriores el árido de escoria negra presenta, hasta el momento actual, una excelente calidad para su uso como zahorra artificial en firmes de caminos rurales.

Grado de envejecimiento

El grado de envejecimiento de las escorias de acería que van a emplearse como árido en construcción de carreteras, se determinan con la norma NLT 361/91 [21]. La norma de dimensionado de la red de carreteras del País Vasco, limita el IGE (índice granulométrico de envejecimiento) por debajo de 1%.

En el método, la muestra de escoria envejecida se somete a la acción del agua a presión en un autoclave durante 4 horas para promover la hidratación acelerada del óxido de cal remanente en la escoria, determinándose, luego, la meteorización producida mediante un índice granulométrico que se correlacionan a su vez con el grado de envejecimiento alcanzado. La cuantía del proceso de hidratación es similar a la que se produciría en la misma muestra durante un año a la intemperie. Los resultados se muestran en la tabla siguiente, donde vemos que cumple la condición de ser menor al 1%.

Grado de envejecimiento de EAFS	
% IGE	0,04

Tabla 75. Grado de envejecimiento de EAFS

5.3.3 Expansión potencial de las EAFS

La estabilidad dimensional de la escoria negra es, con toda probabilidad, el factor a priori más preocupante para su empleo. Ello es consecuencia directa de los problemas que en este sentido plantean otras escorias siderúrgicas, como la escoria de acería LD, la escoria del horno Martín-Siemens, la escoria de metalurgia secundaria o escoria blanca LFS.

Para el empleo de la escoria negra en cualquier aplicación, su estabilidad dimensional debe ser medida, como garantía de la durabilidad y funcionalidad de la obra. La evaluación de la misma puede ser llevada a cabo con arreglo a diferentes normas, de las cuales la norma ASTM D-4792 [67] es la que ha sido considerada en esta Tesis como la más útil e interesante, con alta aceptación en el mundo de la construcción y la edificación. Los resultados obtenidos mediante la aplicación de esta norma, son equivalentes a los ensayos de la norma UNE EN 1744-1 [59].

Para ello, y según prescribe la misma, en un recipiente cilíndrico plástico de pared gruesa, sumergido en agua hasta el nivel adecuado, se introduce la muestra de escoria a ensayar, compactada con su humedad natural. Se dispone el sistema de medida de desplazamientos verticales a base de relojes comparadores o captadores de desplazamiento inductivos LVDT que permita tomar datos cada 6 horas; finalmente, se calienta el baño hasta el nivel de temperatura previsto de $70 \pm 2^\circ\text{C}$ y se mantiene así durante toda la duración del ensayo, que es de siete días (168 horas). Los resultados de hinchamiento de la escoria o cualquier otro material, se expresan como el cociente

adimensional y porcentaje entre la dilatación absoluta medida, y la dimensión vertical original.

El % **hinchamiento** tras 7 días de ensayo obtenidos para la muestra de escoria negra EAF ensayada es el que se muestra en la siguiente tabla:

Expansión Potencial de EAFS	
% hinchamiento	0,25

Tabla 76. Expansión Potencial de EAFS

A la vista de los resultados, el árido siderúrgico HEA de que disponemos presenta una expansividad inferior a 5%, valor límite indicado en el PG-3 [26] cuando se trata de emplear un árido siderúrgico de acería como zahorra.

Como complemento a estos resultados, cabe considerar que la especificación americana ASTM-D-2940:92 [4], contempla las características a exigir a los materiales granulares que se usen como bases o subbases en carreteras o aeropuertos. Dicha norma admite la posibilidad de utilizar escorias, siempre y cuando su hinchamiento analizado con el método anteriormente descrito, no supere el valor de 0,5%.

Por otro lado Norma para el dimensionado de firmes de la red de carreteras del País Vasco, también establece como valor límite para los áridos empleados como zahorra una expansión de granulometría combinada inferior al 0,5% en el ensayo ASTM D 4792.

En el caso presente, las escorias analizadas no presentarían problema de hinchamiento, al estar por debajo del 0,5% indicado anteriormente. En la figura siguiente se presentan los resultados de este ensayo sobre la muestra de escoria negra.

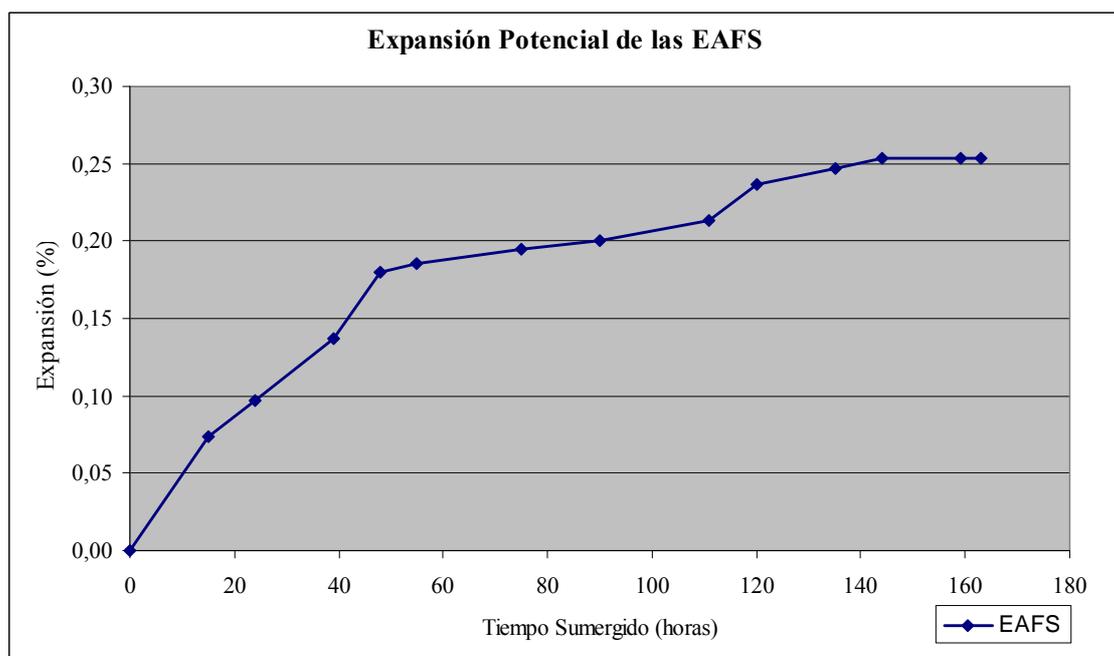


Figura 82. Expansión potencial de las EAFS

Se realizaron tres ensayos en paralelo sobre tres moldes diferentes, y el resultado final lo proporciona la media aritmética de los tres ensayos. En la figura anterior puede observarse el valor medio de hinchamiento, cuyo final alcanza el 0,25%. En cualquier caso en ninguna de las tres muestras se superó el 0,33% de hinchamiento.

Este resultado es lógico y totalmente esperable puesto que los ensayos de análisis químico y de difracción de rayos-X sobre la muestra nos mostrarán poca presencia de cal libre (lima) y de cal hidratada (Portlandita), que es el elemento clave en el hinchamiento a corto plazo, en nuestras escorias. Del mismo modo, mostraron escasa presencia de magnesia libre (Periclasa) y magnesia hidratada (Brucita), que es el componente responsable de hinchamientos menos dramáticos y a más largo plazo.

En general los resultados obtenidos al analizar la estabilidad dimensional de las escorias negras resultan esperanzadores, puesto que los valores obtenidos son bajos. Además, hemos de tener en cuenta, que la muestra n^o2, que es la que hemos utilizado para realizar la caracterización física, era la muestra con mayor contenido en cal libre (1,2%) y por tanto, se espera que sea de las muestras con mayor expansión potencial; aunque, esta correlación no siempre es inmediata.

La recomendación prudente, tal vez excesivamente conservadora, de llevar a cabo una exposición prolongada a la intemperie de la escoria negra tras su machaqueo al tamaño final procede de tres motivos fundamentales (además de algún otro de menor importancia):

- La cal libre se encuentra concentrada en nódulos (no está perfecta y homogéneamente distribuida) que el machaqueo hace aflorar al exterior y a los que una exposición a la intemperie les convierte en inocuos.
- La magnesia libre da lugar a una hidratación lenta (durante meses) de carácter expansivo. Su posible presencia, siempre minoritaria, tendrá unas consecuencias despreciables tras un periodo de envejecimiento a la intemperie.
- La homogeneidad de composición de las escorias de cada colada no está garantizada, y unos acopios de tamaño grande y volteado periódicamente representan una importante garantía de homogeneidad.

El modo de verificar la eficacia o utilidad de una exposición prolongada a la intemperie puede ser conseguido llevando a cabo ensayos de estabilidad dimensional según la norma ASTM D-4792 [67] sobre escorias negras del mismo tipo, que hayan sufrido diferentes periodos de envejecimiento controlado a la intemperie, con riego y volteo periódicos. En la Tesis de Manso [146] se realizaron estudios en donde se estudiaba la estabilidad dimensional de escorias sin envejecimiento y con envejecimiento a 30, 60 y 90 días. Los resultados de estabilidad dimensional a 7 días tras el envejecimiento a adicional muestran la disminución de la expansividad a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento. Por otro lado Frías Rojas [103] somete a dos tipos de escorias negras EAF, cuya concentración en cal libre, magnesia libre, sulfatos y cloruro son bajas, a ensayo acelerado según la norma ASTM D-4792 [67], obteniendo resultados de baja inestabilidad de volumen en las mismas (0,20-0,25%), resultados muy similares a los obtenidos en esta Tesis.

5.3.4 Ensayos de lixiviación de las EAFS

Este material puede en algún caso contener iones o metales problemáticos para la salud, y su empleo como materiales granulares para bases, rellenos u otras aplicaciones exige, sin duda alguna, la realización de ensayos completos de toxicidad por lixiviación ajustándose a las normas correspondientes, y los resultados de éstos pueden dar lugar a la imposibilidad de su utilización por su alta toxicidad. Las escorias negras cuando forman parte de otro material, como por ejemplo el hormigón, existe sin duda un efecto de encapsulamiento de las mismas por parte de la lechada de cemento y finos calizos, que mitigan los posibles efectos nocivos puesto que dificultan la disolución de cualquier sal o ión en el agua lixiviada. El ensayo se desarrolló según UNE EN 12457-3 [61] en dos etapas, con relaciones (líquido/sólido) L/S=2 en primera etapa y L/S=8 en la segunda. Mostramos a continuación los valores obtenidos de sulfuros, fluoruros y cromo total para muestra triturada de escoria, que es en este caso lo que afecta al desarrollo de la presente Tesis doctoral.

La tabla adjunta recoge los resultados obtenidos y los límites máximos establecidos según el Decreto 34/2003 del 18 de febrero [9], de la Comunidad Autónoma del País Vasco, el Decreto 104/2006 del 19 de octubre de la Comunidad Autónoma de Cantabria [10] y el Decreto 32/2009 de 24 de febrero de la Comunidad de Cataluña [8], para los parámetros más representativos de cara a una primera y breve aproximación al comportamiento medio ambiental.

Escoria Negra EAF				
Parámetro	A ₂₋₁₀ (mg/kg)	Decreto 34/2003 (mg/kg)	Decreto 104/2006 (mg/kg)	Decreto 32/2009 (mg/kg)
Sulfatos	115,4	377	1.000	1000
Fluoruro	12,4	18	10	18
Cadmio	<0,001	0,009	0,04	0,04
Cromo total	0,01	2,6	0,5	0,5
Niquel	<0,05	0,8	0,4	0,4
Plomo	0,09	0,8	0,5	0,5
Zinc	0,06	1,2	4	4

Tabla 77. Resultados de lixiviados de EAFS y límites legales

Como se puede observar, los resultados de análisis de lixiviados están muy por debajo de los límites legales establecidos, excepto el contenido de fluoruros si lo comparamos con la normativa más restrictiva, que es en este caso la de Cantabria. Incluso el 0,3% de Cr que obtuvimos en el análisis químico de EAFS que podía ser preocupante, se comprueba que su lixiviado es insignificante.

Los lixiviados de ésta escoria pueden tener un pH superior a 11 y por tanto presentar problemas de corrosión en las tuberías de aluminio y acero que se coloquen en contacto directo con ellas. Se ha registrado casos de obturación de los sistemas de drenaje con los carbonatos precipitados por la reacción del hidróxido de calcio de los lixiviados con el dióxido de carbono de la atmósfera [1].

5.3.5 Resumen de ensayos de las EAFS

A continuación se expone un resumen de resultados de los ensayos de caracterización física de EAFS. Dichos resultados son los explicados y ampliados en los apartados anteriores.

Ensayo	Fracción granulométrica de EAFS. UNE (mm)			
	23/50	13/23	6/13	0/6
Densidad Relativa Real (g/cm^3)	3,7	3,72	3,74	3,68
Densidad Saturada sup. seca (g/cm^3)	3,95	3,8	3,81	3,74
Densidad de Conjunto (g/cm^3)	2,3			
Absorción de Agua (%)	1,68	1,91	2,88	3,65
Porosidad (%)	6,95	8,43	10,68	-
Coefficiente de limpieza superficial (%)	1,8			
Equivalente de Arena (%)	89			
Índice Plasticidad	NP			
Desgaste de los Ángeles (%)	18			
Índice de Lajas y Agujas (%)	3			
Partículas Trituradas (%)	50			
Resistencia al desmoronamiento (%)	Ciclo 1°	98,24		
	Ciclo 2°	98,1		
IGE (%)	0,04			
Expansión Potencial a 7 días (%)	0,25			
Lixiviados	Sin riesgo			

Tabla 78. Resumen de ensayo de caracterización física de EAFS

Si a los resultados de estos ensayos de caracterización física, unimos la caracterización química, en concreto el contenido ponderal de compuestos de azufre totales expresados en sulfatos SO_3 , según UNE 1744-1 [59], que para nuestras muestras de EAFS varía entre **0,2 y 0,5%**, valor inferior al 0,5% delimitado por el PG-3 [26] para materiales en contacto con capas tratadas con cemento e inferior al 1% en los demás de los casos, se observa la semejanza que hay entre EAFS y las zahorras artificiales.

Al igual que dijimos para el caso de la escoria blanca, para el caso de EAFS no resulta aventurado afirmar que, en principio, en un árido artificial como la escoria negra EAFS, después de salida del horno eléctrico, no existe vestigio alguno de **materia orgánica, terrones de arcilla o margas**. Sin embargo, también en este caso es admisible la posibilidad de poder haber sido contaminado en su exposición a la intemperie.

5.4 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE LAS EAFS CON LAS ZAHORRAS

A lo largo de éste capítulo, se ha hecho hincapié en las condiciones que cumplían EAFS respecto al artículo 510 de zahorras del PG-3. Se expone en la Tabla 79 un resumen de los resultados obtenidos en el presente capítulo comparados con las prescripciones exigidas a los tres tipos de zahorras artificiales definidas en el PG-3 (ZA20, ZA25, ZAD20) en función de la intensidad de tráfico que ha de soportar la subbase o base de la que forme parte. Puede observarse que EAFS cumple todas las prescripciones indicadas

en el Pliego, cuando se trata de tráfico de categoría T4, que es el caso más próximo al de los caminos rurales. Incluso podríamos ajustarnos a las prescripciones para arcenes de carreteras de categorías de tráfico T3 y T4. La curva granulométrica y su comparación con los husos indicados en el PG-3 quedaron indicadas en el apartado 5.3.1. del presente capítulo, por lo que no se detallan a continuación.

Normativa: PG-3. Artículo 510					CARACTERÍSTICA DE EAFS	COMPORTAMIENTO DE EAFS	
GRANULOMETRIA POR TAMIZADO UNE EN 933-1	TAMICES UNE	ZAHORRAS ARTIFICIALES					
			ZA 25	ZA 20	ZAD 20	-	Ver curvas granulométricas
	50	-	-	-	100		
	40	100	-	-	100		
	25	75-100	100	100	94,3		
	20	65-90	75-100	65-100	88,4		
	8	40-63	45-73	30-58	54,3		
	4	26-45	31-54	14-37	28,7		
	2	15-32	20-40	0-15	11,6		
	0,5	7-21	9-24	0-6	1,1		
	0,25	4-16	5-18	0-4	0,5		
0,063	0-9	0-9	0-2	0,1			
CARACTERÍSTICAS GENERALES		ZAHORRAS ARTIFICIALES			EAFS		
QUÍMICA Y LIMPIEZA		SO ₃ (UNE 1744-1) < 0,5% para materiales en contacto con capas tratadas con cemento. <1% en los demás casos			0,2-0,5%	Cumple	
		Exentos de terrones de arcilla, marga y materia orgánica			Exento	Cumple	
COEF. LIMPIEZA (NLT-172) o anejo C (UNE 146130)		<2%			1,80%	Cumple	
EQUIVALENTE DE ARENA UNE EN 933-8		T00-T1	T2 a T4 Arcén T00-T2	Alcen T3-T4	89%	Cumple	
		EA>40	EA>35	EA>30			
PLASTICIDAD UNE 103104		T00 a T4 y arcenes		Arcenes T32 y T4 no pavimentados	NP	Cumple	
		NO PLASTICO		LL<30 e IP<10			
DESGASTE DE LOS ANGELES UNE EN 1097-2 (*)		T00 A	T3, T4 y Arcenes		18%	Cumple	
		T2					
		LA<30	LA<35				
		* En el caso de áridos siderúrgicos, el coef. De desgaste de los ángeles podrá ser superior en 5 unidades a lo indicado siempre que la composición granulométrica sea la del huso ZAD20. Si van a emplearse como zahorras naturales puede ser superior hasta en 10 unidades					
INDICE DE LAJAS (UNE EN 933-3)		IL<35			3%	Cumple	
PARTÍCULAS TRITURADAS (ANGULOSIDAD) UNE EN 933-5		T00-T0	T1 y T2 Arcén T00 a T0	T3 y T4 Resto Arcenes	50%	Cumple	
		100%	75%	50%			
ÁRIDO SIDERÚRGICO		EXPANSIVIDAD		<0,5%	0,25%	Cumple	
		LIXIVIADOS		sin riesgo	sin riesgo	Cumple	
		IGE		<1%	0,04 %	Cumple	

Tabla 79. Comparativa entre prescripciones para zahorras y las EAFS

5.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Como conclusiones del presente capítulo pueden señalarse las siguientes:

- Las fracciones minerales principales de las escorias negras son, óxidos de hierro y silicatos de cal, acompañadas de pequeñas cantidades de aluminatos cálcicos, MgO y MnO.
- La toxicidad potencial de la escoria negra por lixiviación debe ser evaluada de modo periódico, sea sobre la propia escoria o sobre la aplicación en la que es empleada.
- Las escorias negras de HEA, son en general, áridos pesados (densidad superior a 3 g/cm^3) y redondeados.
- La escoria negra estudiada presenta una granulometría con deficiencia de finos si la comparamos con las curvas granulométricas de zahorras artificiales ZA20 y ZA25, indicadas en el PG-3 [26].
- La granulometría de la escoria negra estudiada se ajusta casi perfectamente a la curva granulométrica de ZAD20. Por lo que se plantea la posibilidad de formar el firme de caminos rurales con ésta escoria y un riego con gravilla bicapa.
- La escoria negra estudiada presenta una excelente resistencia al desgaste, al desmoronamiento y al envejecimiento.
- La expansividad potencial media de EAFS estudiada fue de 0,25%, valor inferior a 0,5%, indicado en la norma ASTM D 2940. El bajo valor de expansión potencial es acorde con la caracterización química de EAFS donde se observaba que la cantidad de lima, portlandita, magnesia y periclasa están presentes en bajas concentraciones.
- EAFS cumple prácticamente todas las características de una zahorra artificial, pudiendo ser utilizado de modo eficiente y sistemático en la construcción de bases y subbases de firmes de caminos rurales.
- El empleo de EAFS en firmes de caminos rurales que no lleven revestimiento asfáltico requiere la búsqueda de un material que aporte cierta plasticidad y la fracción de material fino en su combinación binaria con EAFS.

CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS

6 CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS

6.1 INTRODUCCIÓN

Se entiende por suelos a los materiales naturales que aparecen sobre la corteza terrestre, constituidos por partículas o granos que pueden separarse fácilmente por simple trituración o eventualmente por la acción de una corriente de agua. Estas partículas o granos han sido generados por alteraciones mecánicas o fisicoquímicas de rocas madre de todas las naturalezas. Sus características pueden ser extremadamente variables según la naturaleza de la roca madre y, sobre todo, según el modo y grado de alteración que se traduce por la presencia de fracción arcillosa más o menos importante y activa (la arcilla es la fracción más fina de los suelos, con partículas de tamaño inferior a 2 μm).

Es indispensable antes de comenzar cualquier trabajo con un suelo, tener el conocimiento más preciso posible sobre las características de los materiales que lo componen, de los problemas que estos materiales van a generar y de las soluciones que pueden adoptarse frente a ellos. Por ello, este capítulo muestra los resultados de la caracterización de 4 muestras de suelo con los que se realizarán los ensayos posteriores de estabilización empleando la escoria blanca de horno de cuchara E1, caracterizada en el capítulo 4.

Se trata de depósitos geológicos naturales de arcillas limosas procedentes de las provincias de Burgos y Palencia, que denominaremos:

- **S0:** Depósito geológico natural de arcillas limosas con algún fragmento calcáreo color gris verdoso procedente del municipio de Quintanilla Vivar (Burgos).
- **S1:** Depósito geológico natural de arcillas limosas con algo de arena color marrón amarillento procedente del municipio de Orbaneja Riopico (Burgos).
- **S2:** Depósito geológico natural de arcillas limo-arenosas con algún fragmento calcáreo color gris verdoso procedente del municipio de Ibeas de Juarros (Burgos).
- **S3:** Depósito geológico natural de arcillas limo-arenosas con alguna gravilla de color marrón claro procedente de Tierra de Campos, del municipio de Paredes de Nava (Palencia).

El suelo S0 fue utilizado para realizar las primeras pruebas de estabilización con escoria blanca; se realizaron algunos ensayos que permitieron caracterizarlo y se ensayaron diferentes proporciones de cal y escoria, que sirvieron para establecer la proporción de

conglomerante a emplear en las mezclas del resto de suelos ensayados; asimismo, permitió corroborar que la escoria blanca, como se esperaba, podía competir con la cal tradicionalmente empleada en este tipo de trabajos, a partir de la caracterización previa de la escoria LFS con la que se contaba.

En relación al suelo S2, se quiere aquí indicar, para que quede constancia al comienzo del primero de los dos capítulos donde se estudia la caracterización y estabilización de suelos, que los primeros resultados de sales, sulfatos solubles y determinación de yesos de S2 proporcionaron resultados incorrectos, obteniéndose valores inferiores a los reales, que hicieron considerar al suelo susceptible de estabilización. Por ello, se llevó a cabo la mezcla de escoria blanca con el suelo S2, realizándose todos los ensayos necesarios. A la vista de la imposibilidad de conseguir la correcta estabilización de dicho suelo, se repitieron ciertos ensayos, obteniendo en estas repeticiones valores superiores a los inicialmente considerados de sales y sulfatos solubles. Como indica el PG-3 en su artículo 512 [26], un contenido elevado en sales solubles, sulfatos y/o yesos, hace que un suelo no sea apropiado para someterlo a estabilización con cal, o como es nuestro caso con escoria blanca. Es por ello que, en los apartados en que corresponda, quedan indicados los resultados del primer ensayo y su repetición, denominados como ensayo número 1 y 2; del mismo modo, quedan reflejados los comentarios y la explicación correspondiente en cada caso.

6.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE SUELOS

A partir de los datos de composición química se clasifican los suelos, se analizan sus fases posibles y se llevan a cabo estudios mineralógicos y cristalinos.

Las técnicas y ensayos utilizados han sido los siguientes:

1. Espectrofotometría de absorción atómica, fluorescencia de rayos-X y combustión y análisis de gases, para el análisis químico.
2. Difracción de rayos-X.
3. Espectroscopía de infrarrojos
4. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial.

6.2.1 Análisis químico

La composición química de los suelos constituye un conjunto de datos muy importante de cara a su caracterización. A partir de estos datos se clasifica el material, se analizan sus fases posibles y se llevan a cabo estudios mineralógicos y cristalinos.

Han sido realizados análisis químicos para determinar tanto sus óxidos principales, como son los óxidos de calcio, silicio, magnesio, aluminio y hierro, como otros componentes secundarios, entre los que destacan óxidos de potasio, titanio, azufre y

carbono. En la Tabla 80 se muestran los resultados del análisis de espectrometría para los cuatro tipos de suelo estudiados en la presente Tesis Doctoral.

Los resultados de contenido en sales solubles, sulfatos solubles, yesos y materia orgánica de los suelos, que son parámetros de caracterización de los mismos indicados en el artículo 330 del PG-3 quedan reflejados en el Tabla 81.

% Peso	S0	S1	S2	S3
CaO	28,4	26,4	23,7	5,1
SiO ₂	26,3	18,8	23,3	49,6
MgO	8,6	11,0	4,8	1,3
Al ₂ O ₃	8,3	8,3	11,1	23,2
Fe ₂ O ₃	4,05	3,1	3,6	6,8
K ₂ O	2,1	1,7	2,2	3,2
TiO ₂	0,4	0,3	0,5	0,8
SO ₃	0,01	0,53	9,6	0,05
CO ₂ *	20,3	27,2	16,5	4,57
SrO	-	-	0,1	-
P ₂ O ₅	-	-	-	0,1
C	5,30	7,42	4,50	1,25
S	0,05	0,16	2,24	0,13
Pérdida Fuego**	-	29%	21%	10%

* Considerando que todo el C está en forma de carbonatos

** Calculado a partir de la pérdida de masa obtenida del análisis TG, correspondiente principalmente a H₂O y a CO₂

Tabla 80. Composición química de los suelos

MUESTRA	S0	S1	S2	S3
Nº Ensayo	1	1	1 2	1
Sales solubles (%) NLT-114	0,068	0,283	0,384 8,150	0,093
Materia Orgánica (%) UNE103204:93	0,043	0,063	0,103 0,120	0,842
Sulfatos solubles (%SO ₃) UNE-103201:	0,002	0,054	0,110 3,700	0,026
Contenido en Yesos (%) NLT-115	0,005	0,117	0,240 7,956	0,056

Tabla 81. Otros ensayos químicos en los suelos

De éstos resultados se desprende que los suelos S0, S1 y S2 son mayoritariamente cálcicos y S3 es mayoritariamente silíceo y arcilloso. Además, se observa lo que quedó plasmado al comienzo de este capítulo; el contenido en sales y sulfatos solubles y yesos del suelo S2 en un primer ensayo, fue bajo, pero sus repeticiones, que fueron realizadas por duplicado (mostrándose en la tabla como nº de ensayo 2 la media de ambas repeticiones) fueron muy similares entre sí pero diferentes al resultado del primer ensayo. Estos resultados del ensayo nº 2, son acordes al resultado de SO₃ para el suelo S2, con un valor de 9,6 %, obtenido en el análisis de fluorescencia de rayos X de la Tabla 80.

Una de las prescripciones que el PG-3 establece, en su artículo 512 “suelos estabilizados”, es que el suelo que vaya a ser estabilizado bien con cal bien con cemento ha de contener menos de un 1% de sulfatos solubles, expresados como SO₃. Por tanto, el suelo S2, a la vista de los resultados obtenidos en las repeticiones (3,7% de SO₃), no tendría las propiedades adecuadas para tratarlo con un conglomerante hidráulico. Los motivos de estas limitaciones serán mostrados a lo largo del capítulo 6 y del capítulo 7.

6.2.2 Caracterización mineralógica para el suelo S1.

El suelo S1, procedente del municipio de Orbaneja Riopico en la provincia de Burgos, es de textura arcillosa, con tamaños de partícula muy pequeños. Sus agregados tienen forma granular, y se forman bloques de tamaño medio. En estado húmedo es un material muy pegajoso, difícilmente manipulable. Su color es beige-amarillento, con una pequeña fracción de partículas de mayor tamaño también de color marrón amarillento. En la Figura 83 se observa el aspecto de la muestra de suelo S1.



Figura 83. Muestra de suelo S1

A continuación se muestran los resultados de los análisis de difracción de rayos X (XRD), la espectroscopía de infrarrojos (IR) y el análisis termogravimétrico y calorimétrico (TGA-DTA), obtenidos para el S1, que nos ayudaran a conocer, caracterizar y comprender el comportamiento del suelo S1.

Difracción de rayos X para el suelo S1

Se muestran a continuación las gráficas de los resultados del análisis por difracción de rayos X que se llevó a cabo sobre el suelo S1:

- Polvo cristalino: Figura 84 y en detalle en las Figura 85 y Figura 86
- Agregado orientado: Figura 87
- Agregado orientado + etilenglicol: Figura 88
- Agregado orientado + calcinado 550°C: Figura 89
- Conjunto de polvo cristalino, agregado orientado, etilenglicol y calcinación: Figura 90
- El resultado del análisis semicuantitativo de los principales minerales encontrados en el suelo S1 se muestra en la Tabla 82.

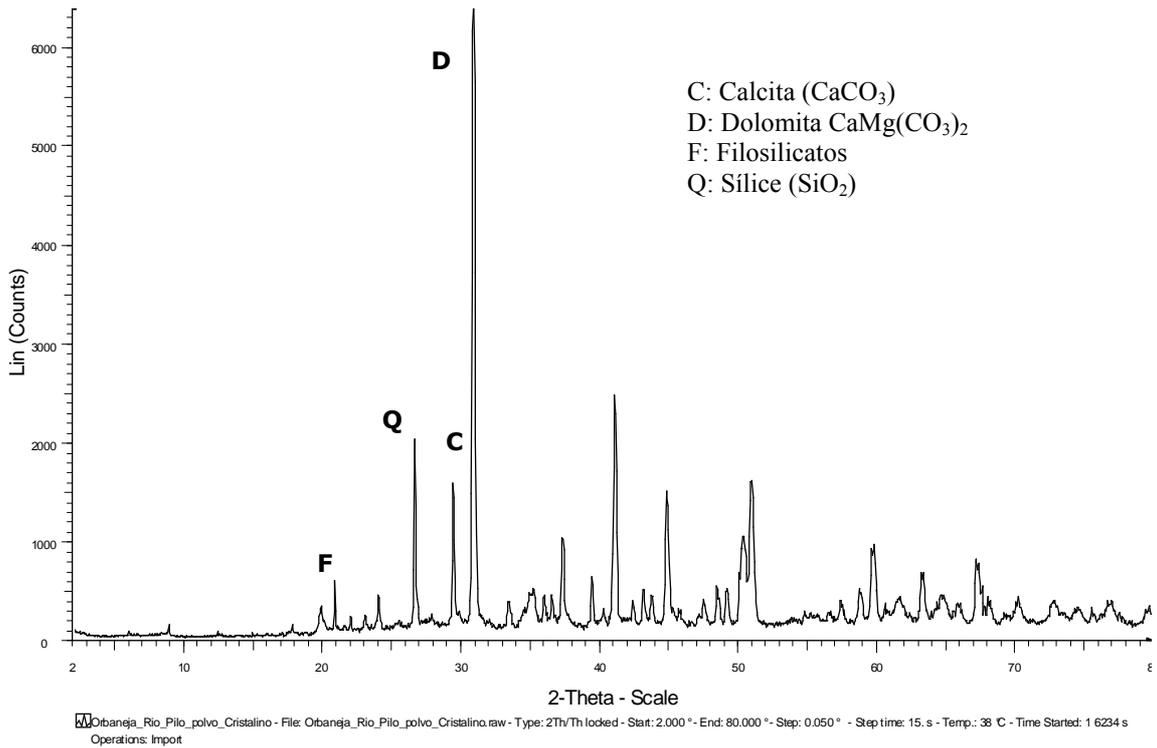


Figura 84. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S1

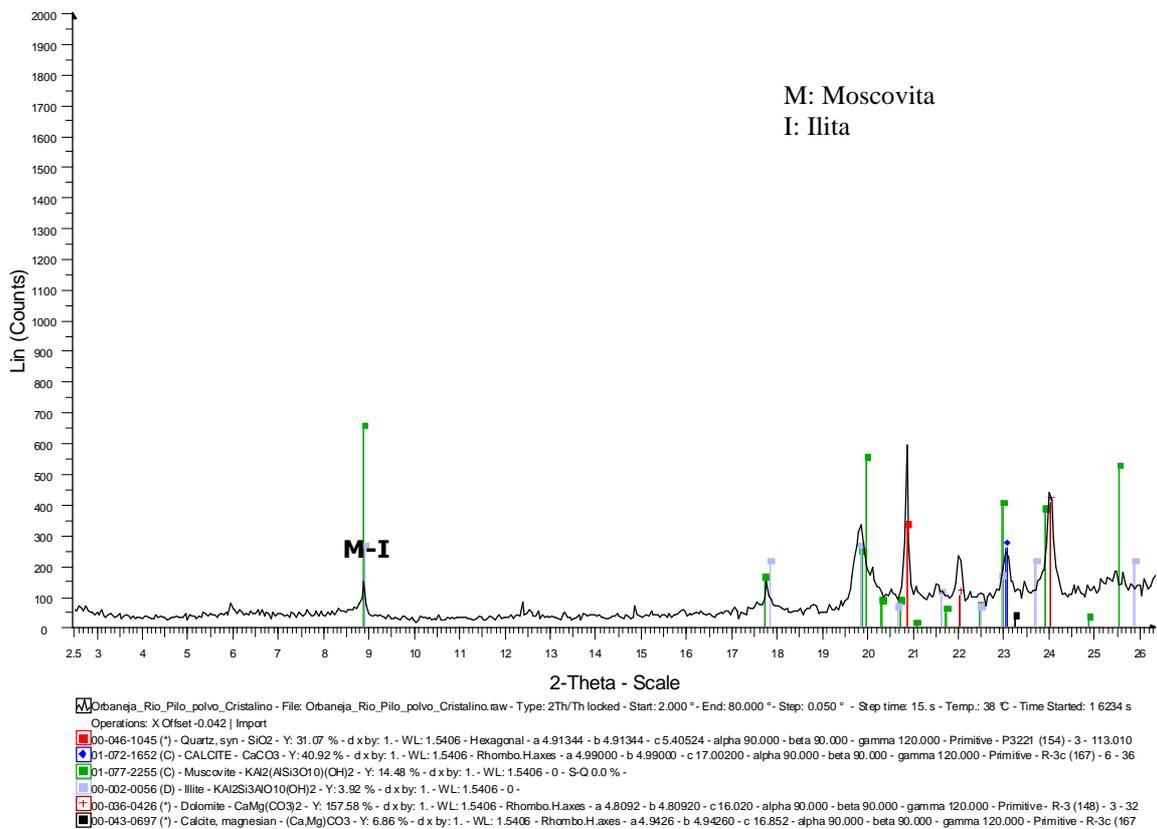


Figura 85. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S1. Detalle 1

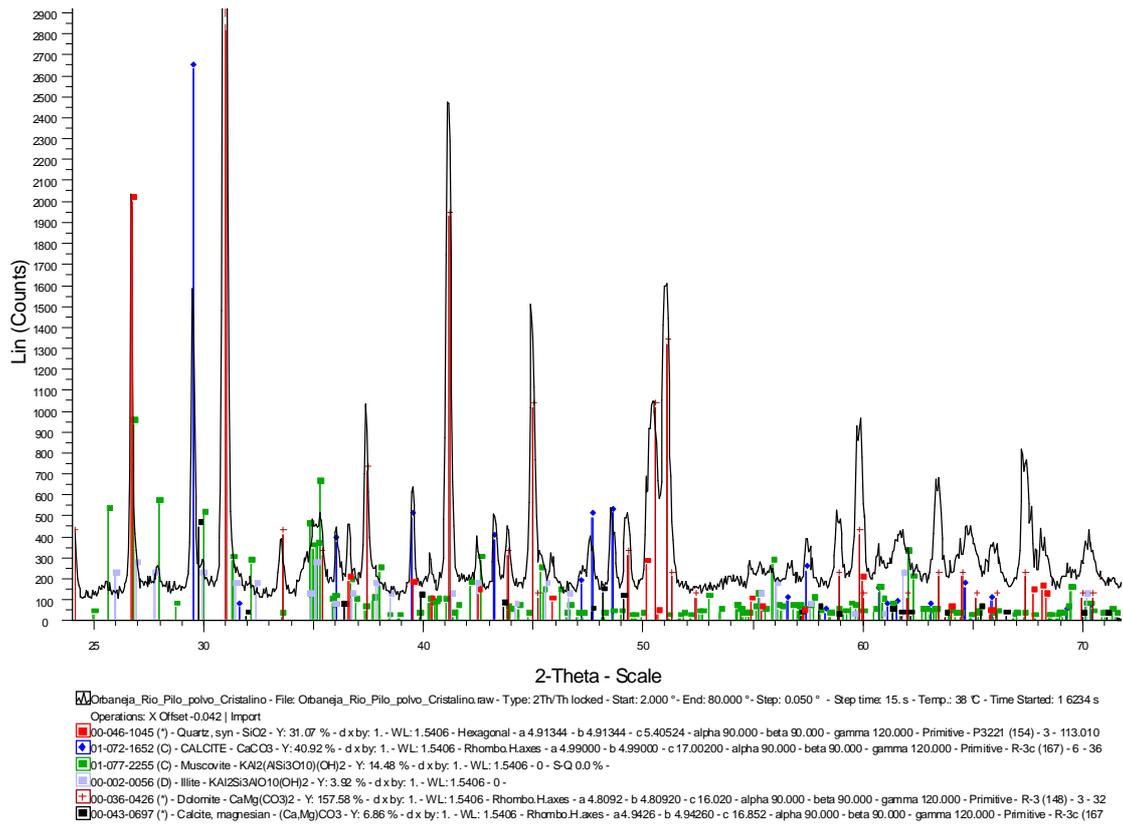


Figura 86. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S1. Detalle 2

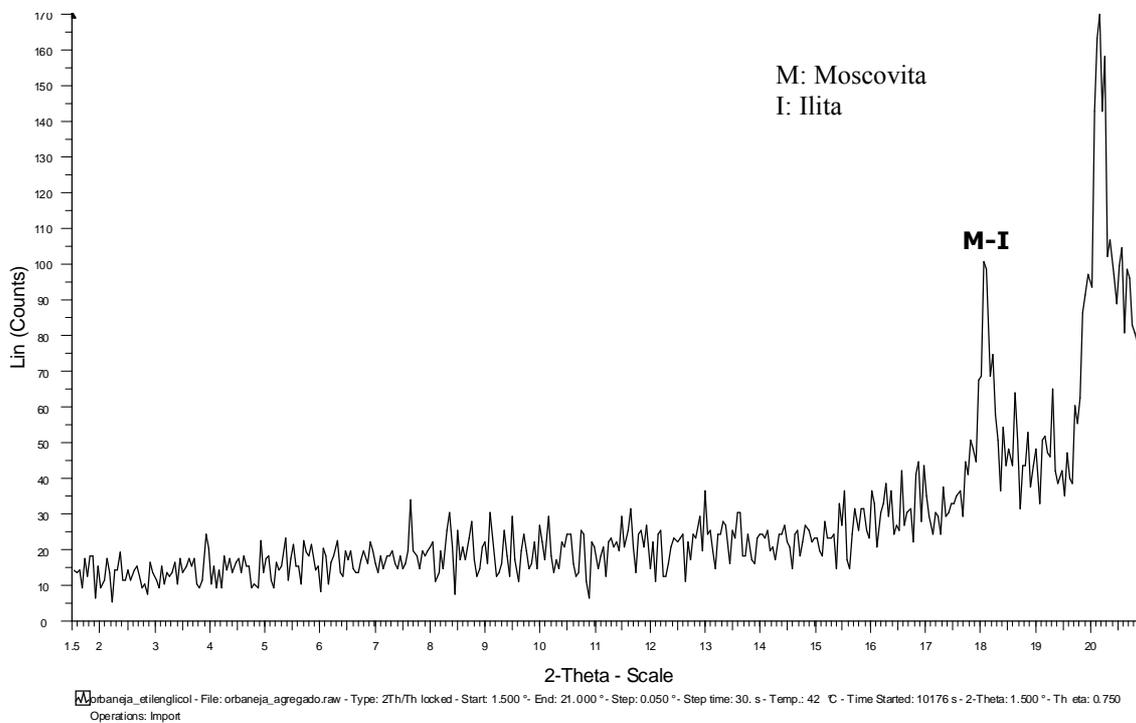


Figura 87. Difracción de rayos X. Agregado orientado. Suelo S1

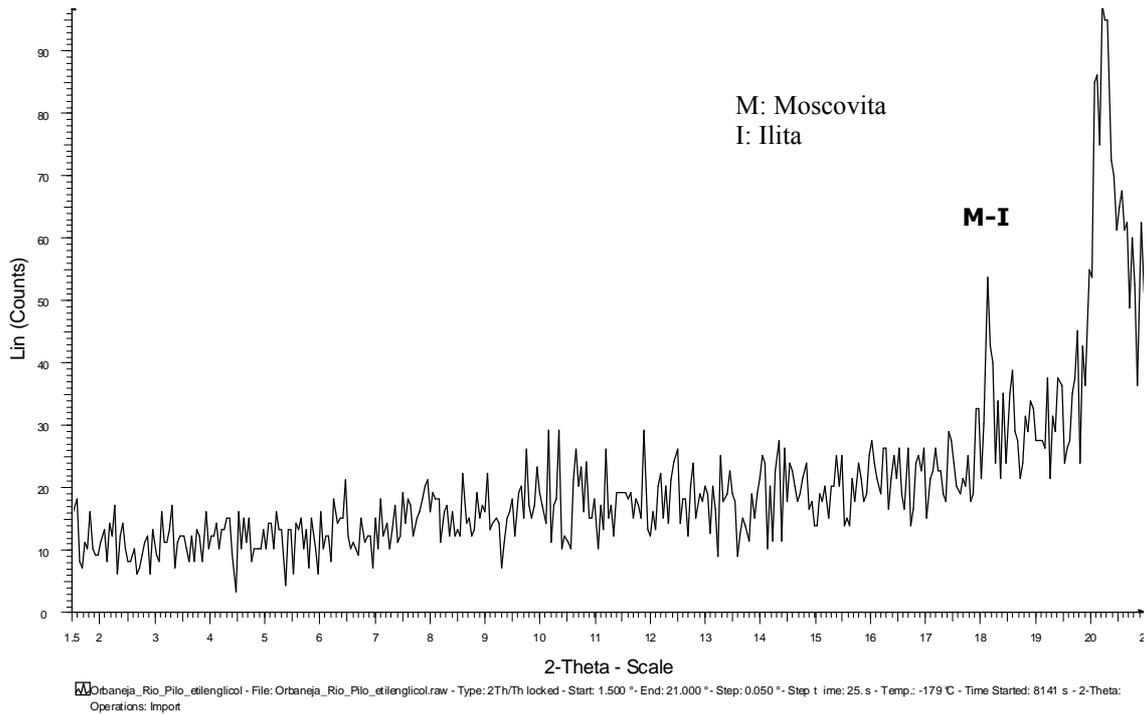


Figura 88. Difracción de rayos X. Agregado orientado+etilenglicol. Suelo S1

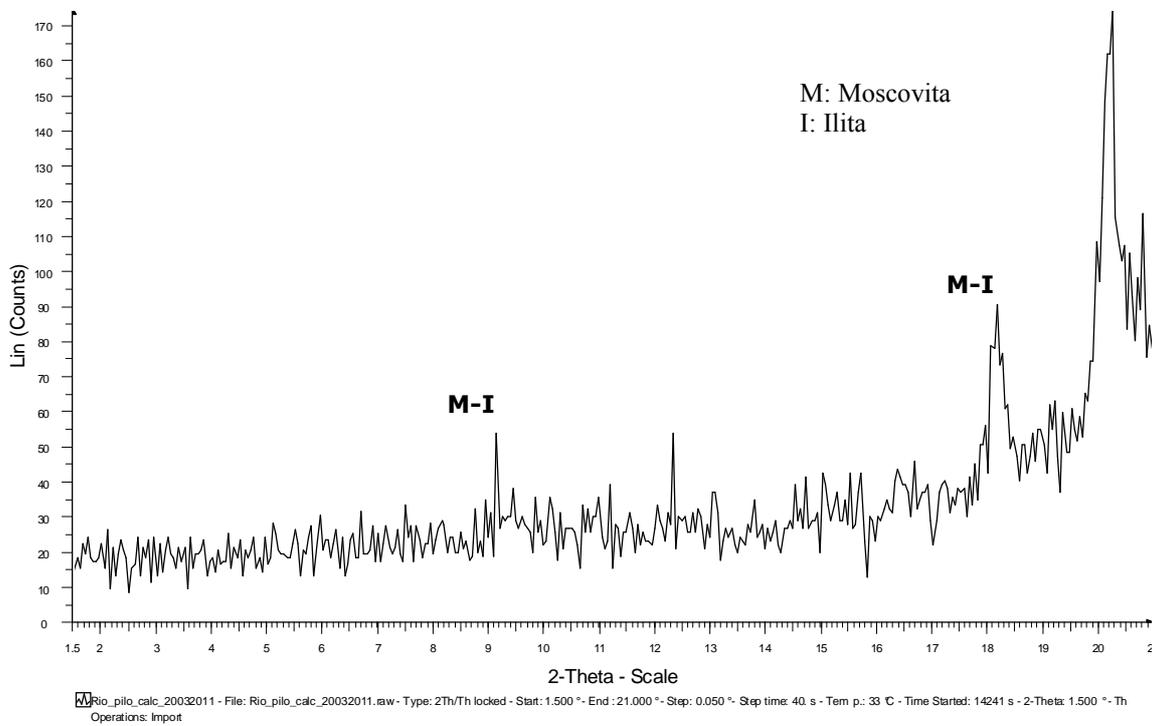


Figura 89. Difracción de rayos X. Agregado orientado+calcinado 550°C. Suelo S1

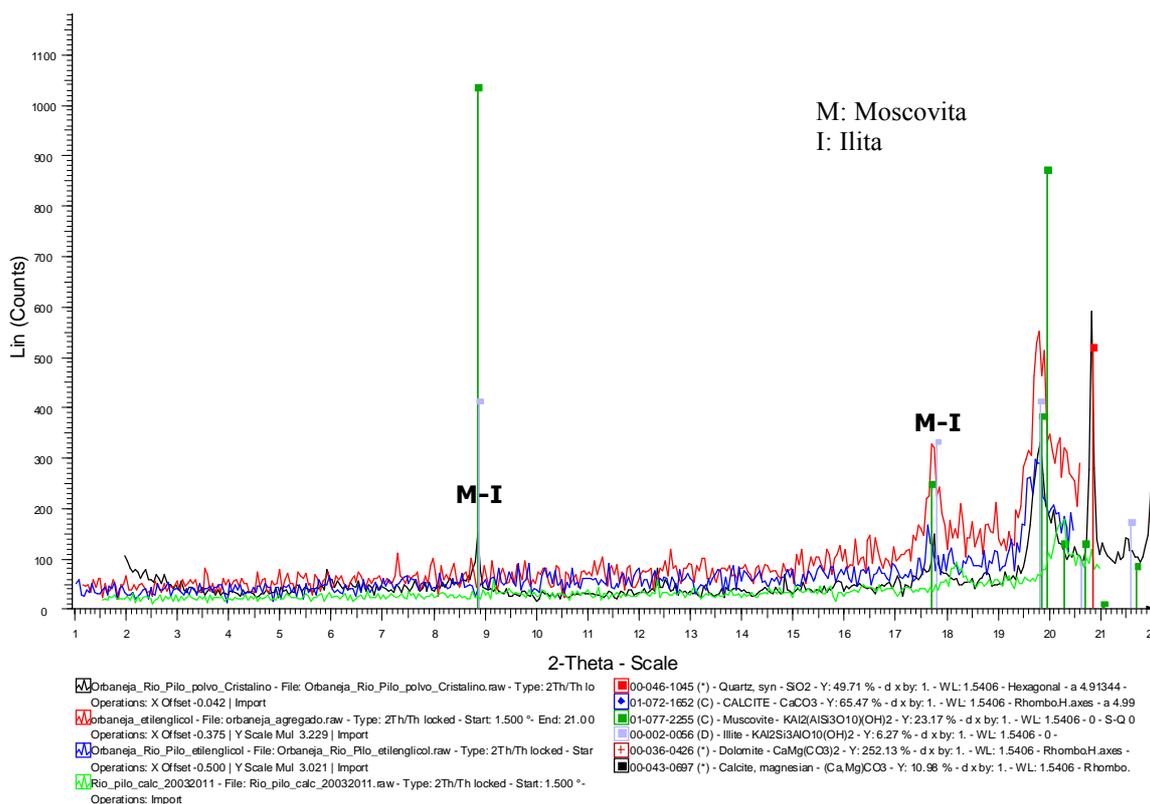


Figura 90. Difracción de rayos X. Conjunto (polvo cristalino+agregado orientado+etilenglicol+calcinado). Suelo S1

Referencia	Mineral	Porcentaje
D	Dolomita CaMg(CO ₃) ₂	42 %
Q	Cuarzo SiO ₂	20 %
C	Calcita CaCO ₃	11 %
F	Filosilicatos	27 %

Tabla 82. Análisis semicuantitativo del suelo S1

Espectroscopía de infrarrojos del suelo S1

La muestra fue analizada también mediante el espectroscopio de infrarrojos, mostrando los espectros de absorción característicos del suelo S1. El espectro obtenido del análisis se muestra en la Figura 91.

La interpretación de estos espectros requiere un conocimiento y experiencia contrastados, ya que para ello se recurre a la comparación del resultado con patrones recogidos en bases de datos. Esta técnica es muy adecuada como complemento de los análisis realizados mediante difracción de rayos X, ya que en los resultados obtenidos podemos buscar compuestos, o fases específicas de los mismos, que se sospecha puedan estar presentes entre los componentes de las muestras analizadas.

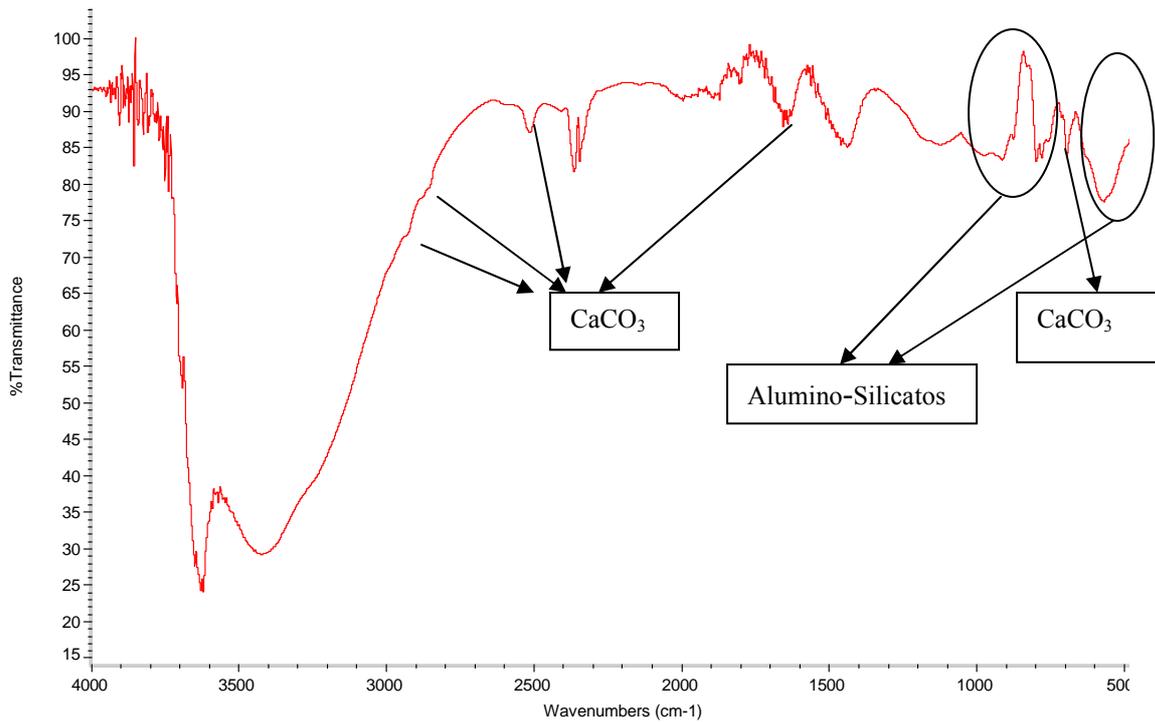


Figura 91. Análisis de infrarrojos del suelo S1

Análisis termogravimétrico y calorimétrico del suelo S1

Al igual que en otros materiales analizados en la presente Tesis, se lleva a cabo sobre las muestras de suelo el análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TGA-DTA), que nos dará a conocer las pérdidas de masa y las reacciones y transformaciones que se suceden al aumentar la temperatura. La gráfica se muestra en la Figura 92.

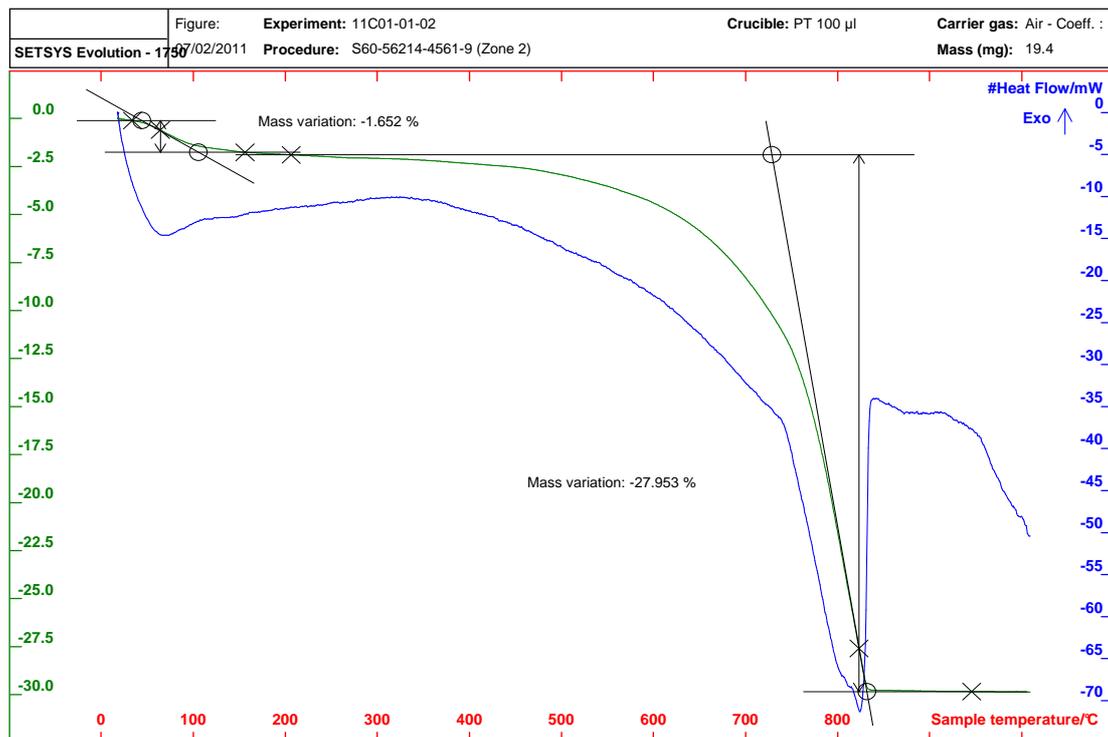


Figura 92. Análisis TGA-DTA del suelo S1

De acuerdo con la difracción, el suelo S1 es mayoritariamente dolomítico y posee entorno al 27% de arcillas del tipo illita $K_{0.7}Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)$ y moscovita, similar a la anterior. El contenido en yeso es bajo, confirmando la baja presencia de azufre (S) detectado en el análisis químico.

El contenido en yeso es bajo, confirmando la baja presencia de azufre (S) detectado en el análisis químico.

En las gráficas obtenidas del análisis térmico del suelo se observa la descomposición del carbonato cálcico-magnésico de la dolomita a partir de los 400° y hasta los 800 ° C, que se superpone con la pérdida de agua interlaminar de la illita y con la descomposición de la calcita, con una pérdida de masa total en torno al 28%.

6.2.3 Caracterización mineralógica para el suelo S2.

El suelo S2, procedente del municipio de Ibeas de Juarros en la provincia de Burgos, se trata de un suelo de textura limo-arcillosa, con tamaños de partícula pequeños, algo mayores a las del suelo S1. Sus agregados tienen forma granular, y se forman bloques de tamaño medio. Su color es beige-amarillento, con algún fragmento calcáreo color gris verdoso, incluso alguna pequeña partícula de material transparente brillante con aspecto de yesos. En la Figura 93 se observa el aspecto de la muestra de suelo S2.



Figura 93. Muestra de suelo S2

A continuación se muestran los resultados de los análisis de difracción de rayos X (XRD), la espectroscopía de infrarrojos (IR) y el análisis termogravimétrico y calorimétrico (TGA-DTA), obtenidos para el suelo S2, que nos ayudaran a conocer y caracterizar al suelo S2, y a comprender su comportamiento.

Difracción de rayos X para el suelo S2

Al igual que en el caso anterior, se analizan:

- Polvo cristalino: Figura 94 y en detalle en las Figura 95 y Figura 96
- Agregado orientado: Figura 97
- Agregado orientado + etilenglicol: Figura 98
- Agregado orientado + calcinado 550°C: Figura 99
- Conjunto de polvo cristalino, agregado orientado, etilenglicol y calcinación: Figura 100
- El resultado del análisis semicuantitativo de los principales minerales encontrados en el suelo S2 se muestra en la Tabla 83.

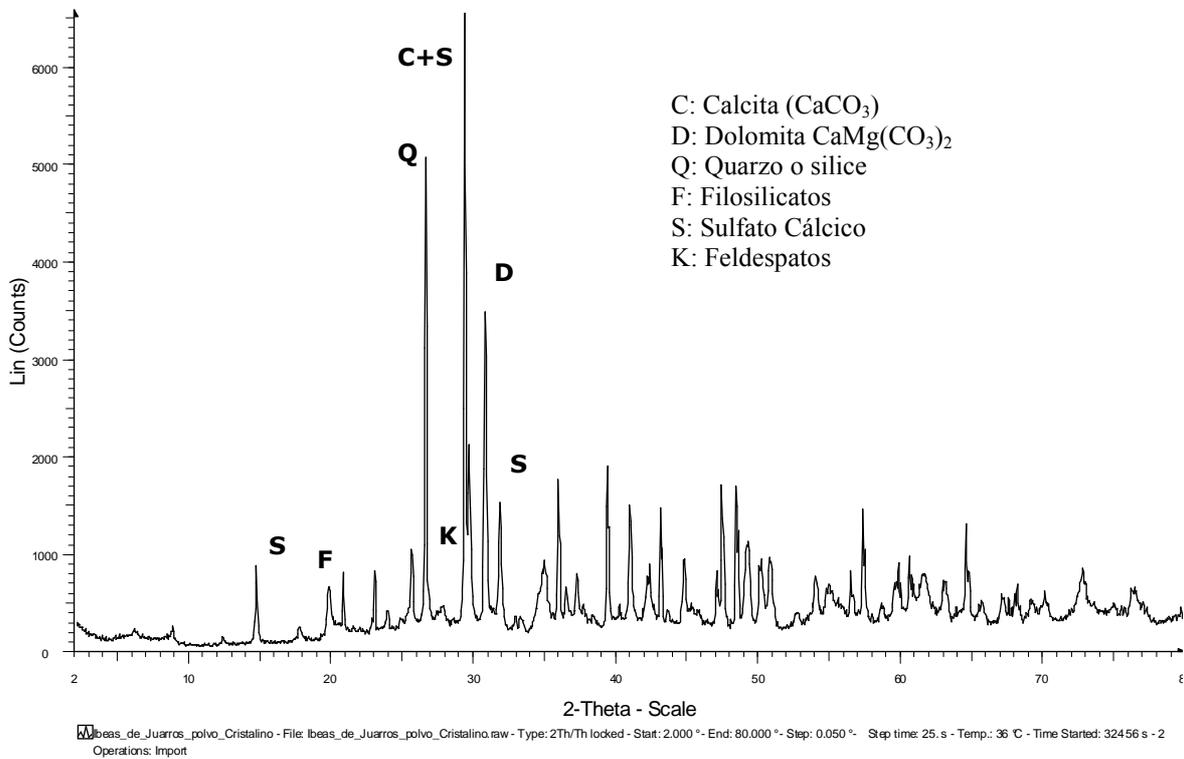


Figura 94. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S2

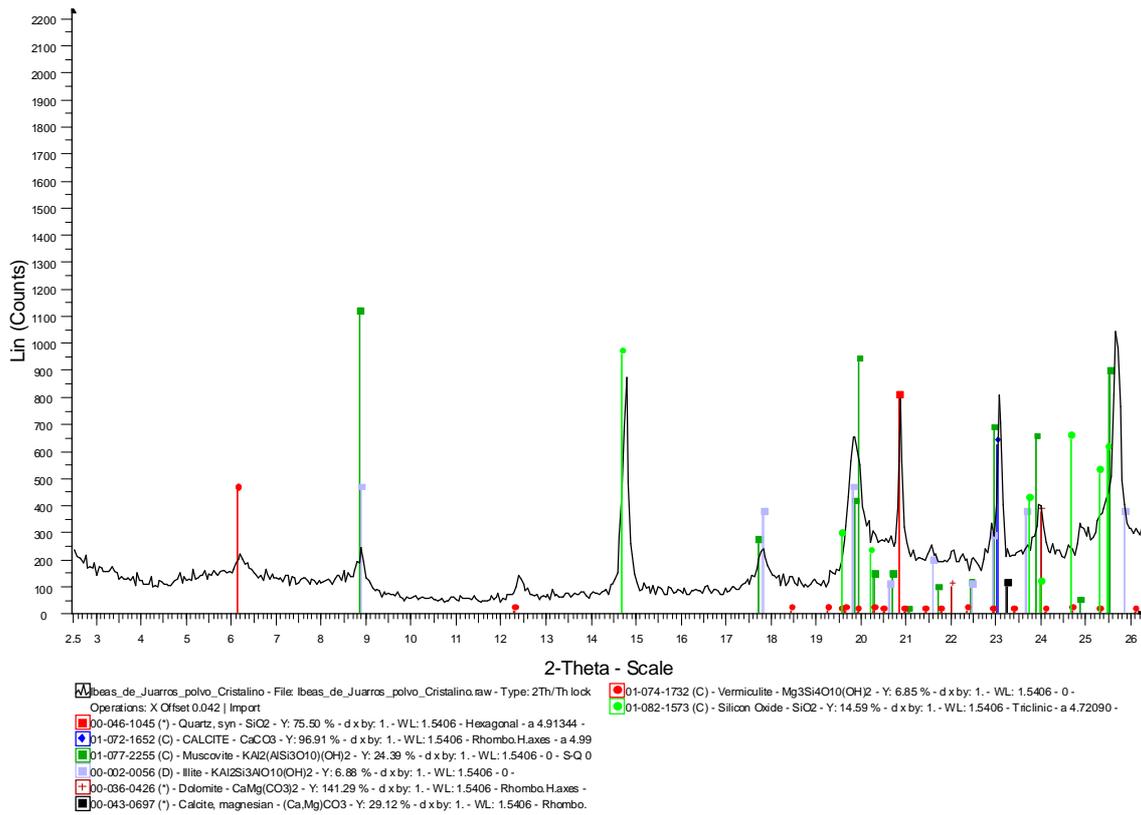


Figura 95. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S2. Detalle 1

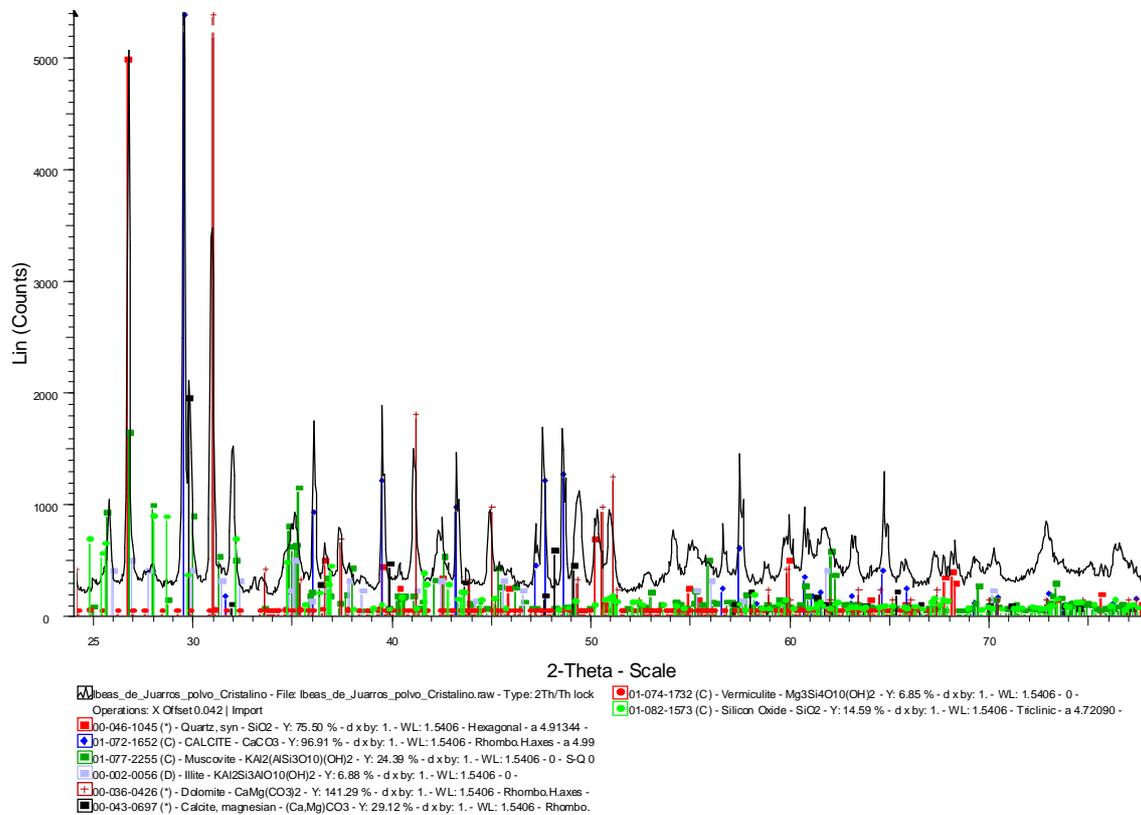


Figura 96. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S2. Detalle 2

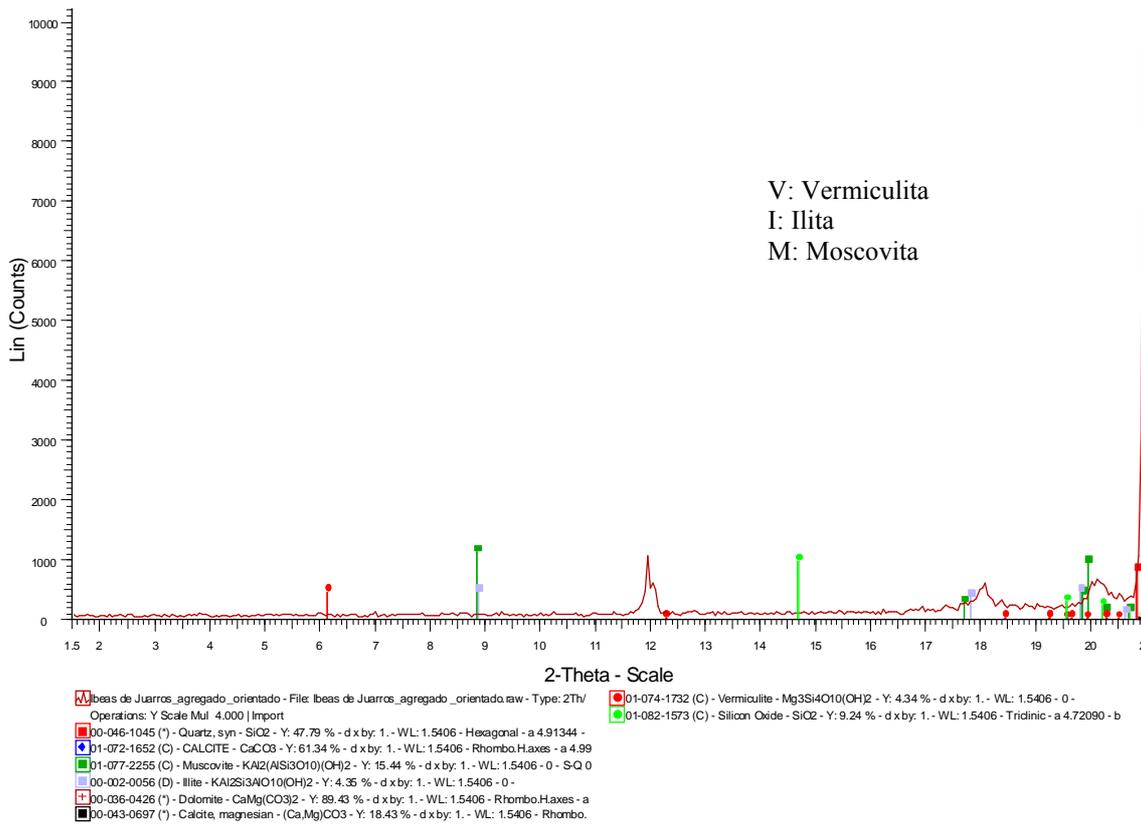


Figura 97. Difracción de rayos X. Agregado orientado. Suelo S2

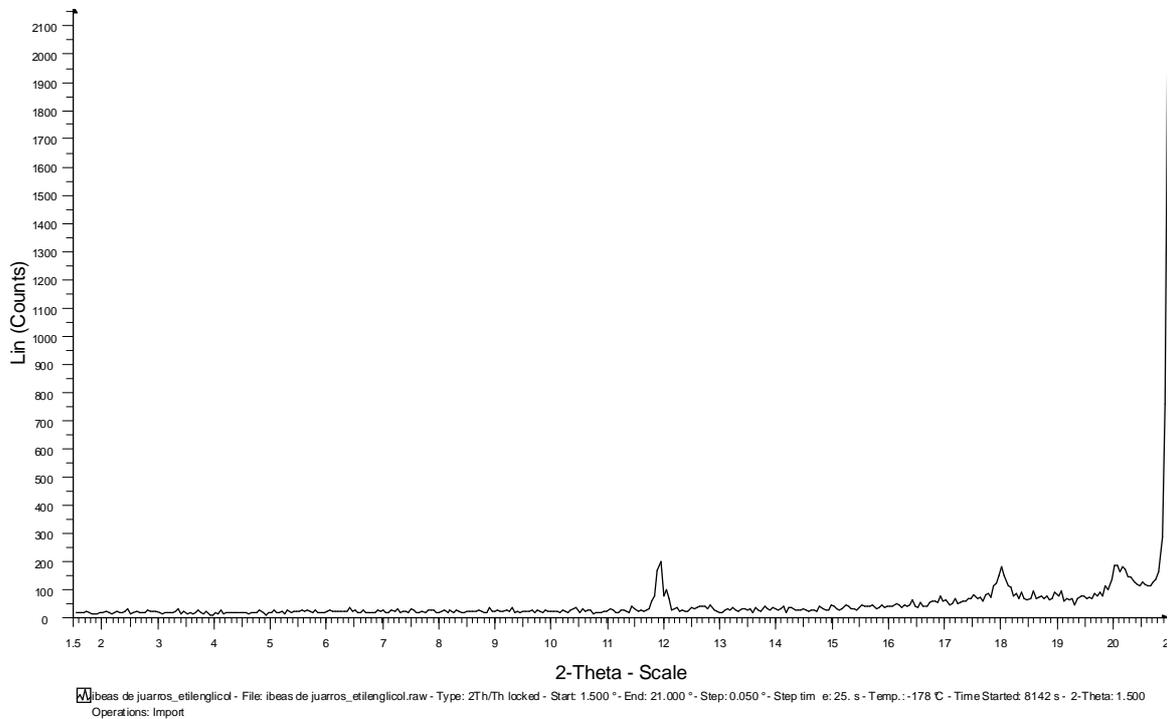


Figura 98. Difracción de rayos X. Agregado orientado+etilenglicol. Suelo S2

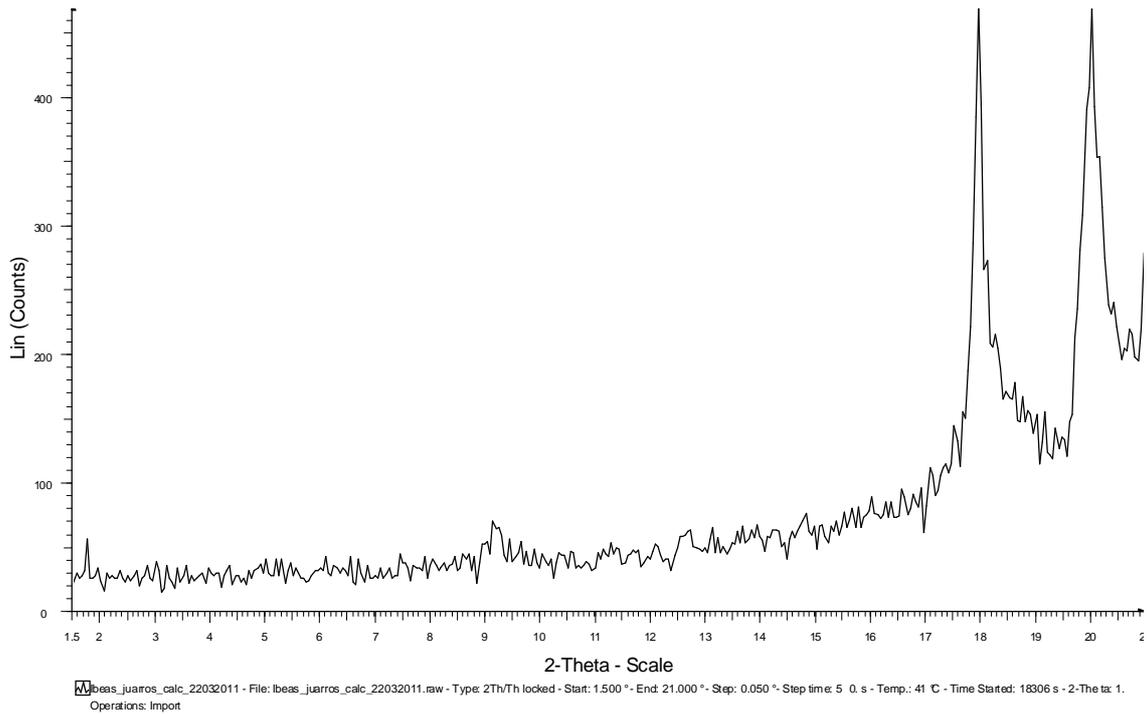


Figura 99. Difracción de rayos X. Agregado orientado+calcinado 550°C. Suelo S2

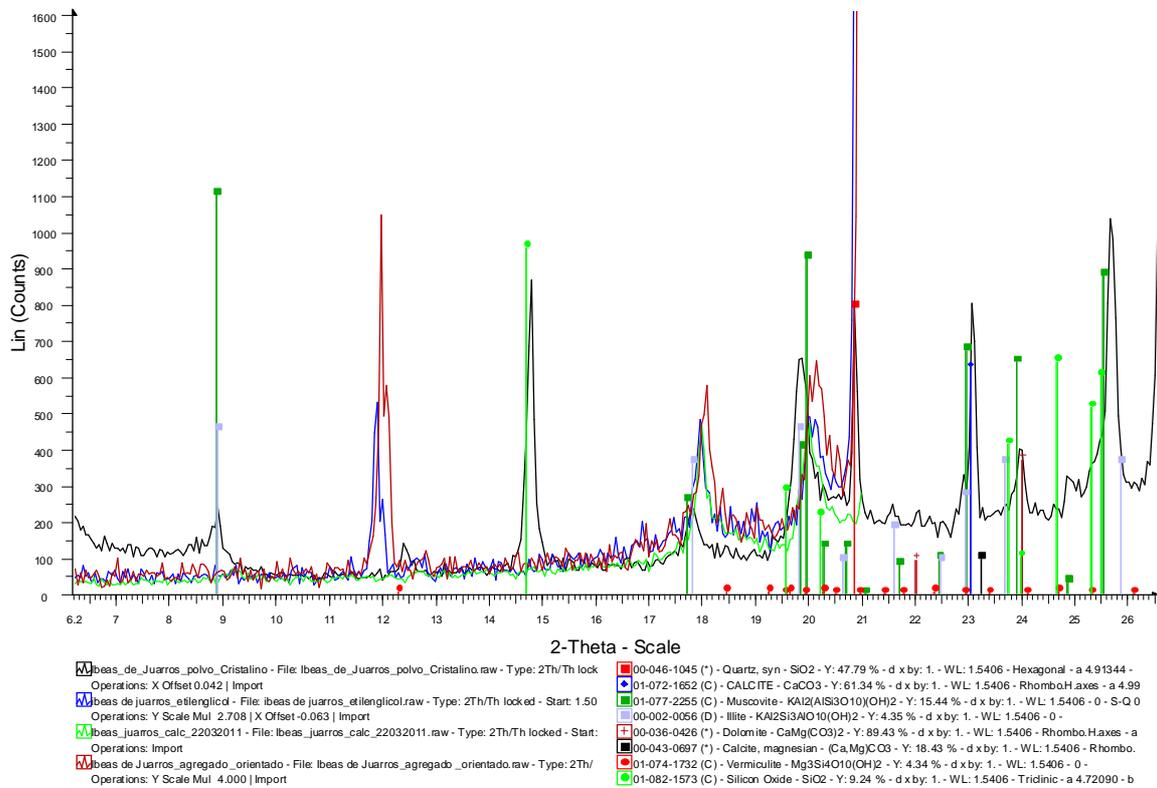


Figura 100. Difracción de rayos X. Conjunto (polvo cristalino+agregado orientado+etilenglicol+calcificación). Suelo S2

Referencia	Mineral	Porcentaje
D	Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	21 %
C	Calcita CaCO_3	23 %
Q	Quarzo=Silice SiO_2	6 %
S	Sulfato cálcico CaSO_4 =Yeso	2 %
K	Feldespatos	3 %
F	Filosilicatos	45 %

Tabla 83. Análisis semicuantitativo del suelo S2

Espectroscopía de infrarrojos del suelo S2

La muestra de suelo S2 fue analizada también mediante el espectroscopio de infrarrojos, mostrando los espectros de absorción característicos del dicho suelo. El espectro obtenido del análisis se muestra en la Figura 101.

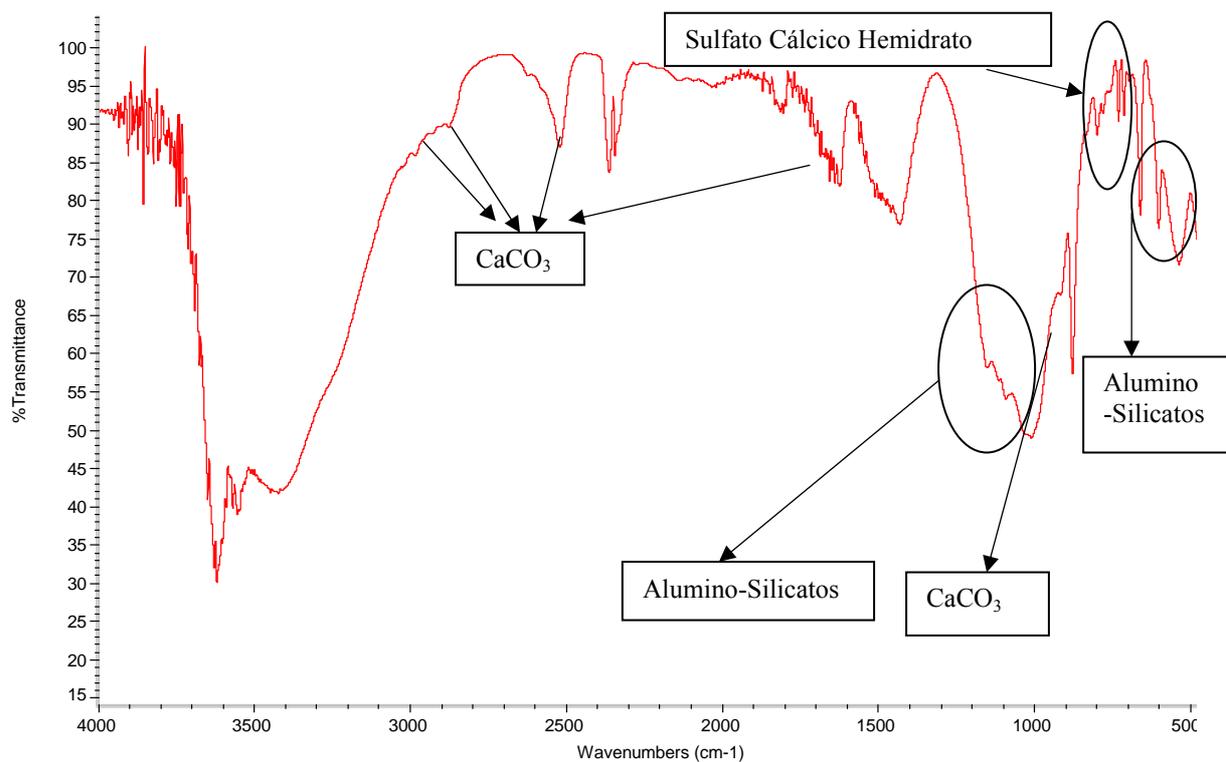


Figura 101. Análisis de infrarrojos del suelo S2

Análisis termogravimétrico y calorimétrico del suelo S2

Se llevó a cabo sobre las muestras de suelo S2 el análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TGA-DTA), que nos dará a conocer las pérdidas de masa y las reacciones y transformaciones que se suceden al elevar la temperatura de horno. La gráfica se muestra en la Figura 102.

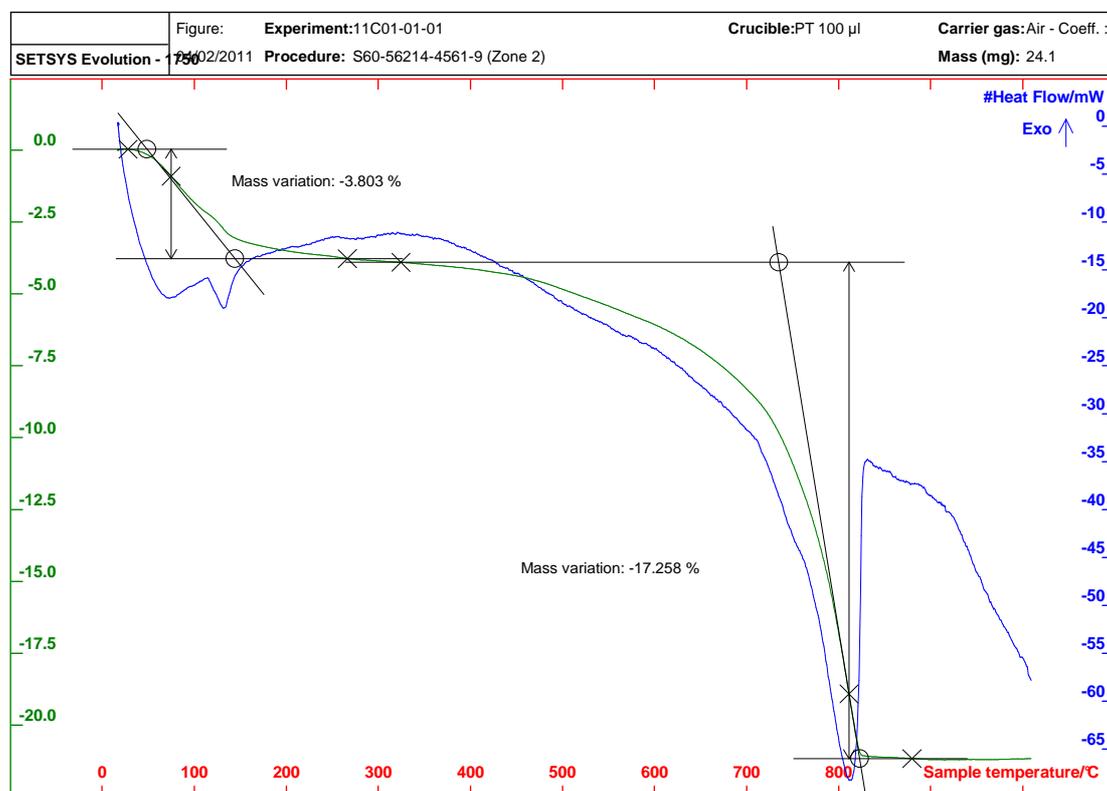


Figura 102. Análisis TGA-DTA de suelo S2

De acuerdo con la difracción, el suelo S2 es principalmente calizo-dolomítico y posee entorno al 45% de filosilicatos. Existe la presencia de sulfato cálcico en forma de yeso, confirmando los resultados del análisis químico de SO_3 . Asimismo, el análisis de infrarrojo permite la detección de sulfato cálcico hemihidratado.

En las gráficas obtenidas del análisis térmico del suelo S2 se observa la deshidratación del yeso entre los 150 °C y los 220°C. La descomposición de la dolomita y la calcita se observa a partir de los 400° y hasta los 800 ° C, superpuesta con el agua interlaminar de las arcillas, con una pérdida de masa en torno al 17%.

6.2.4 Caracterización mineralógica para el suelo S3.

El suelo S3, procedente del municipio de Paredes de Nava en la provincia de Palencia, se trata de una arcilla de textura limo-arcillosa, con tamaños de partícula pequeños, similares a los del suelo S1. Sus agregados tienen forma granular, y se forman bloques de tamaño medio. Su color es marrón rojizo claro, con alguna gravilla del mismo color. En la Figura 103 se observa el aspecto de la muestra de suelo S3.



Figura 103. Muestra de suelo S3

A continuación se muestran los resultados de los análisis de difracción de rayos X (XRD), la espectroscopía de infrarrojos (IR) y el análisis termogravimétrico y calorimétrico (TGA-DTA), obtenidos para el suelo S3, que como en los otros suelos, nos ayudaran a conocer y caracterizar al suelo S3, y a comprender su comportamiento.

Difracción de rayos X para el suelo S3

Procediendo como en los dos casos anteriores, se analiza para el suelo S3:

- Polvo cristalino: Figura 104 y en detalle en las Figura 105 y Figura 106.
- Agregado orientado: Figura 107.
- Agregado orientado + etilenglicol: Figura 108.
- Agregado orientado + calcinado 550°C: Figura 109.
- Conjunto de polvo cristalino, agregado orientado, etilenglicol y calcinación: Figura 110.
- El resultado del análisis semicuantitativo de los principales minerales encontrados en el suelo S3 se muestra en la Tabla 84.

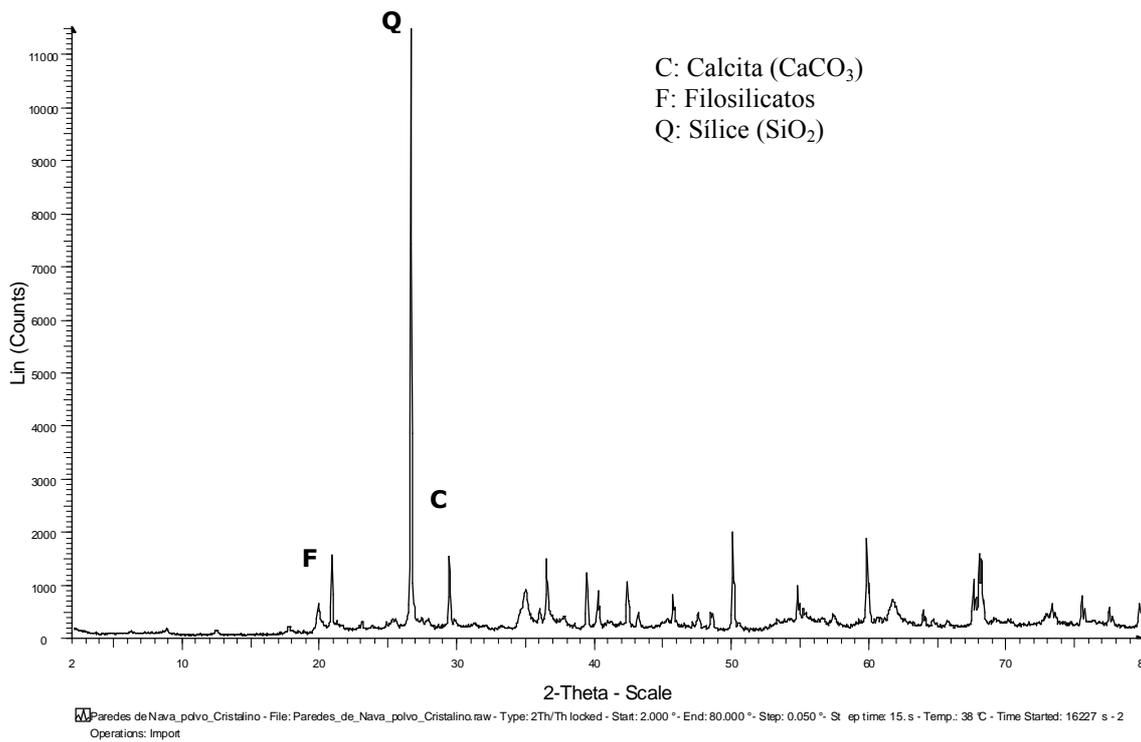


Figura 104. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S3

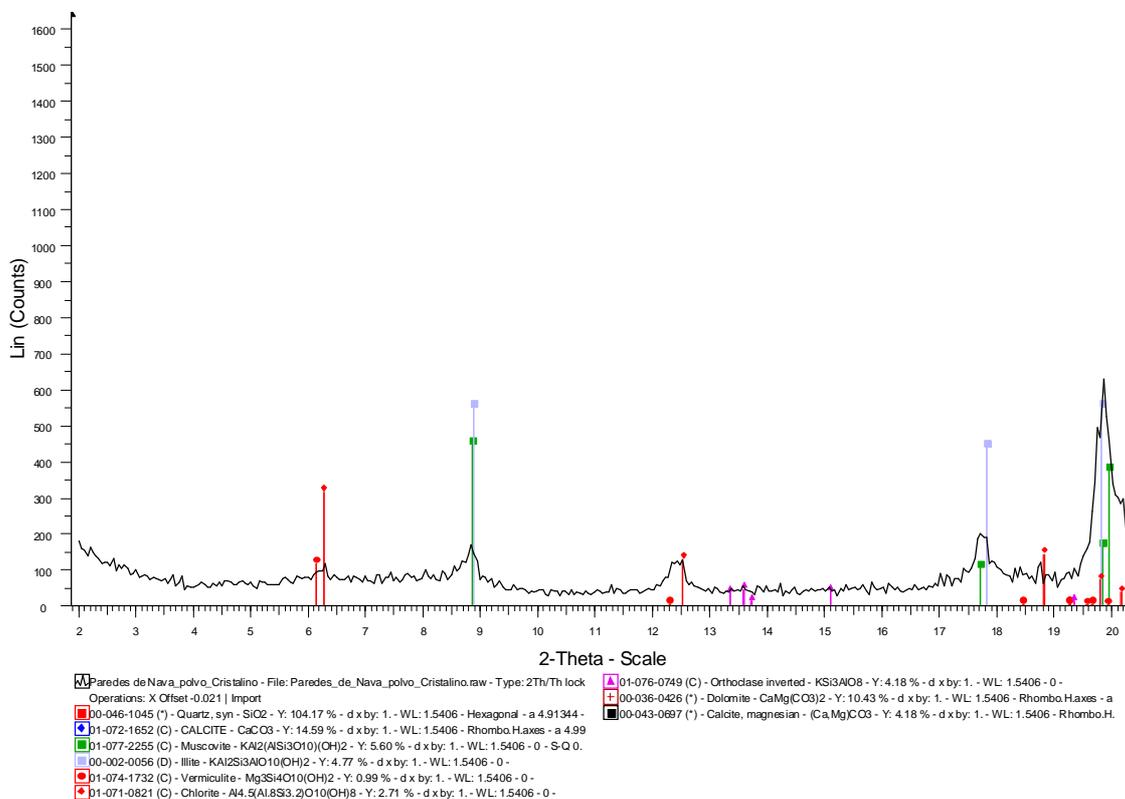


Figura 105. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S3. Detalle 1

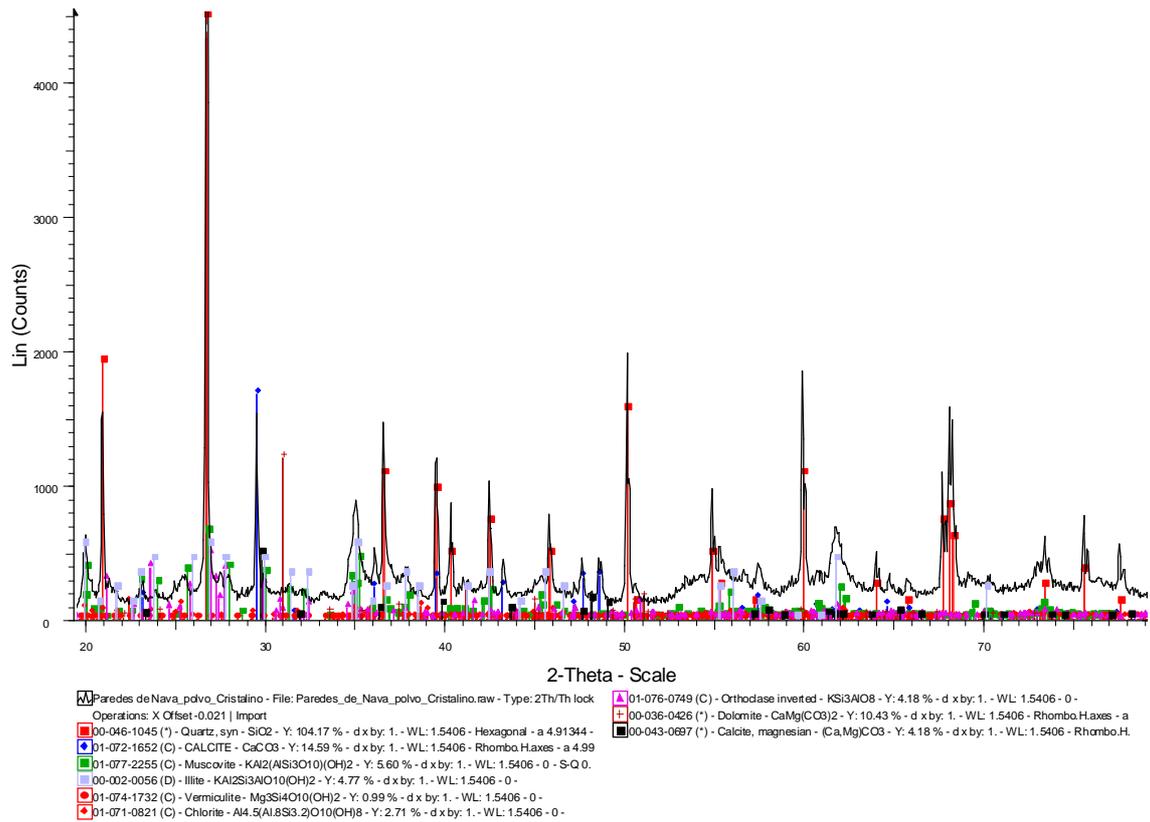


Figura 106. Difracción de rayos X. Polvo cristalino. Suelo S3. Detalle 2

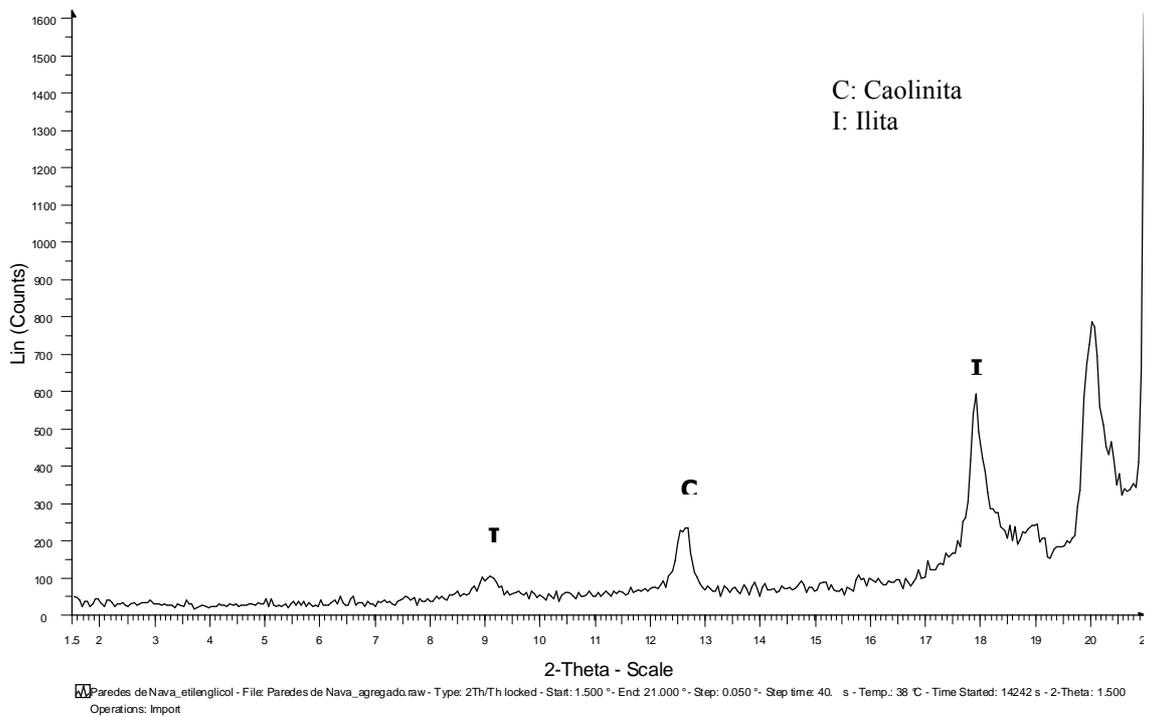


Figura 107. Difracción de rayos X. Agregado orientado. Suelo S3

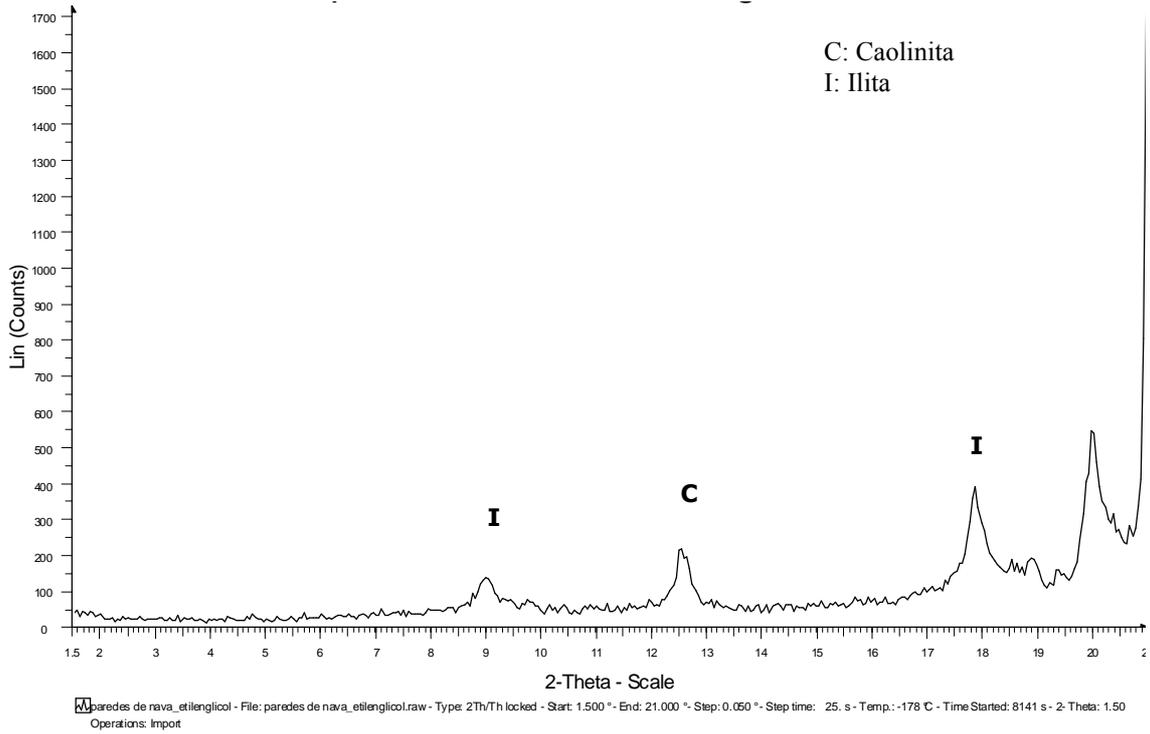


Figura 108. Difracción de rayos X. Agregado orientado+etilenglicol. Suelo S3

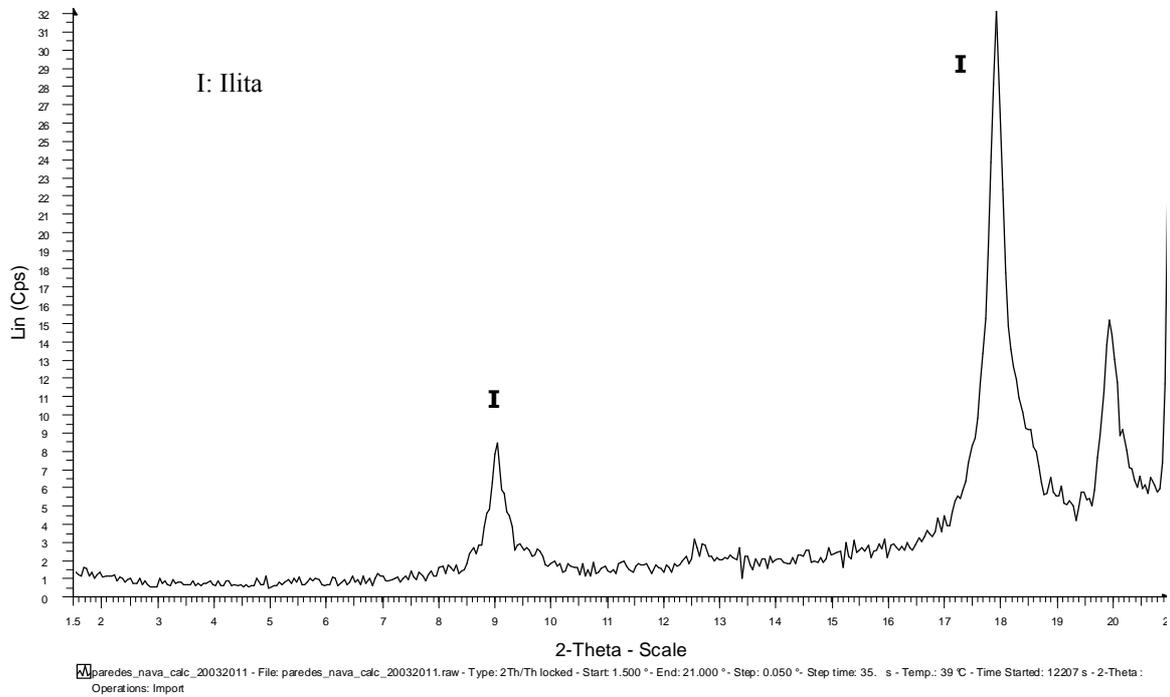


Figura 109. Difracción de rayos X. Agregado orientado+calcinado a 550°C. Suelo S3

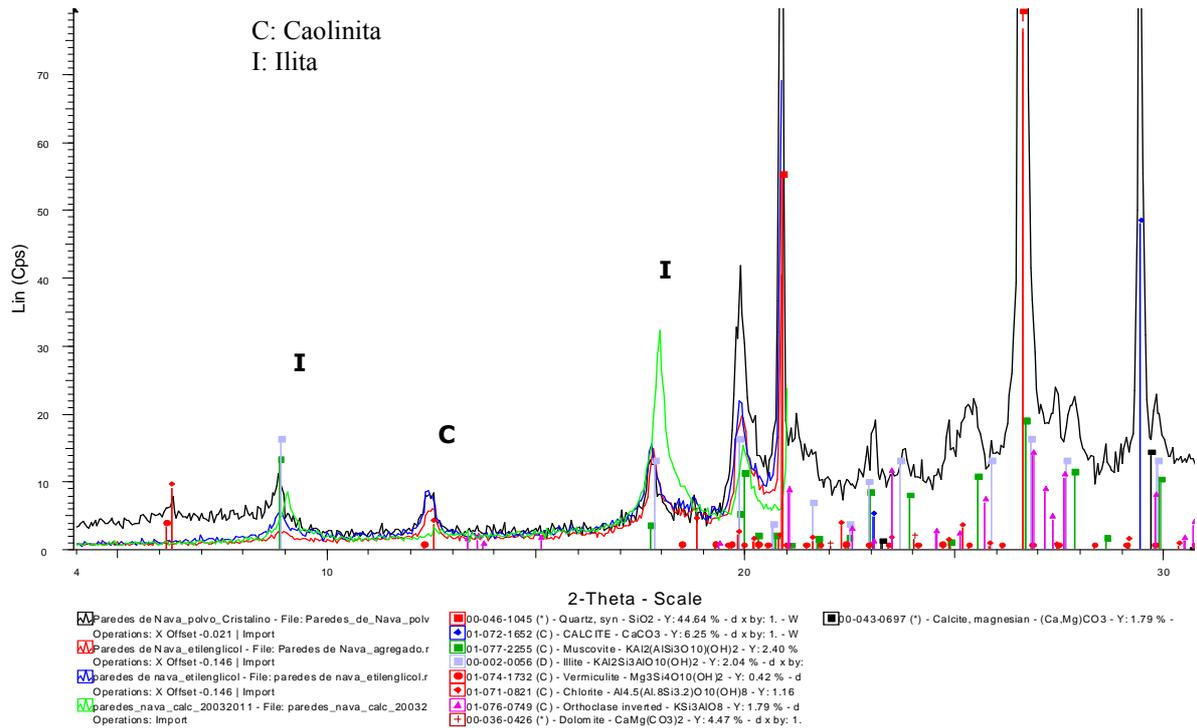


Figura 110. Difracción de rayos X. Conjunto (Polvo cristalino+Agregado orientado+etilenglicol+calcinado). Suelo S3

Referencia	Mineral	Porcentaje
C	Calcita CaCO ₃	6 %
Q	Quarzo=Sílice SiO ₂	69 %
F	Filosilicatos	25 %

Tabla 84. Análisis semicuantitativo del suelo S3

Espectroscopía de infrarrojos del suelo S3

La muestra de suelo S3 fue analizada también mediante el espectroscopio de infrarrojos, mostrando los espectros de absorción característicos del dicho suelo. El espectro obtenido del análisis se muestra en la Figura 111.

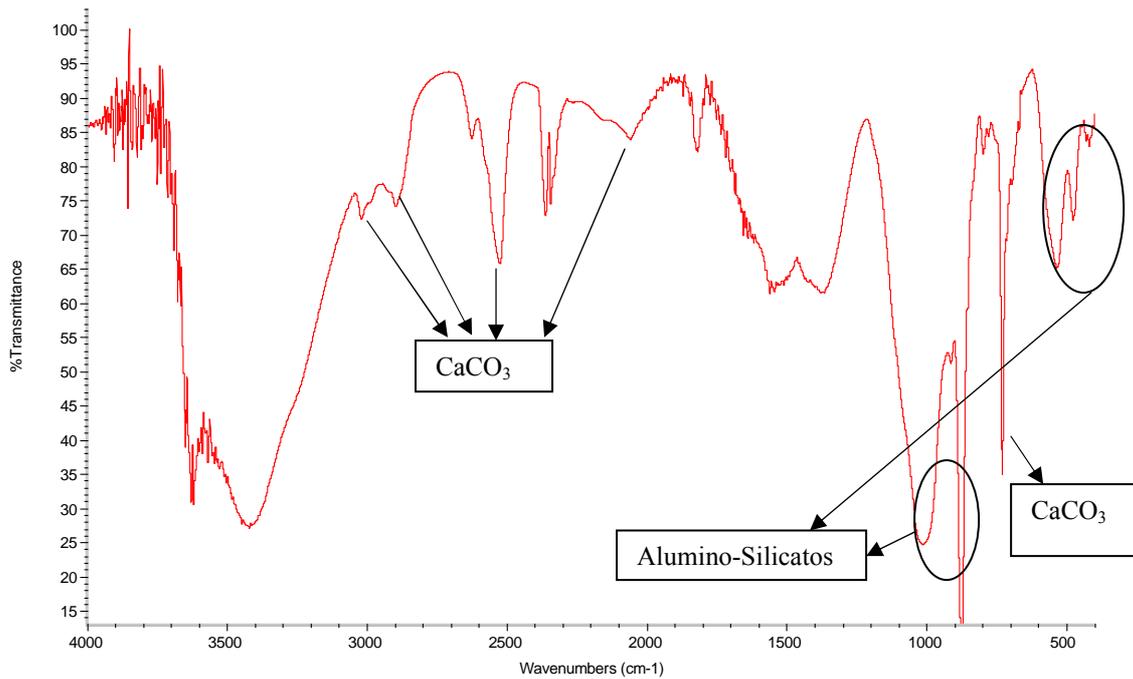


Figura 111. Análisis de infrarrojos del suelo S3

Análisis termogravimétrico y calorimétrico del suelo S3

Se llevó a cabo sobre las muestras de suelo S3 el análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TGA-DTA), que nos dará a conocer las pérdidas de masa y las reacciones y transformaciones que se suceden al elevar la temperatura del horno. La gráfica se muestra en la Figura 112.

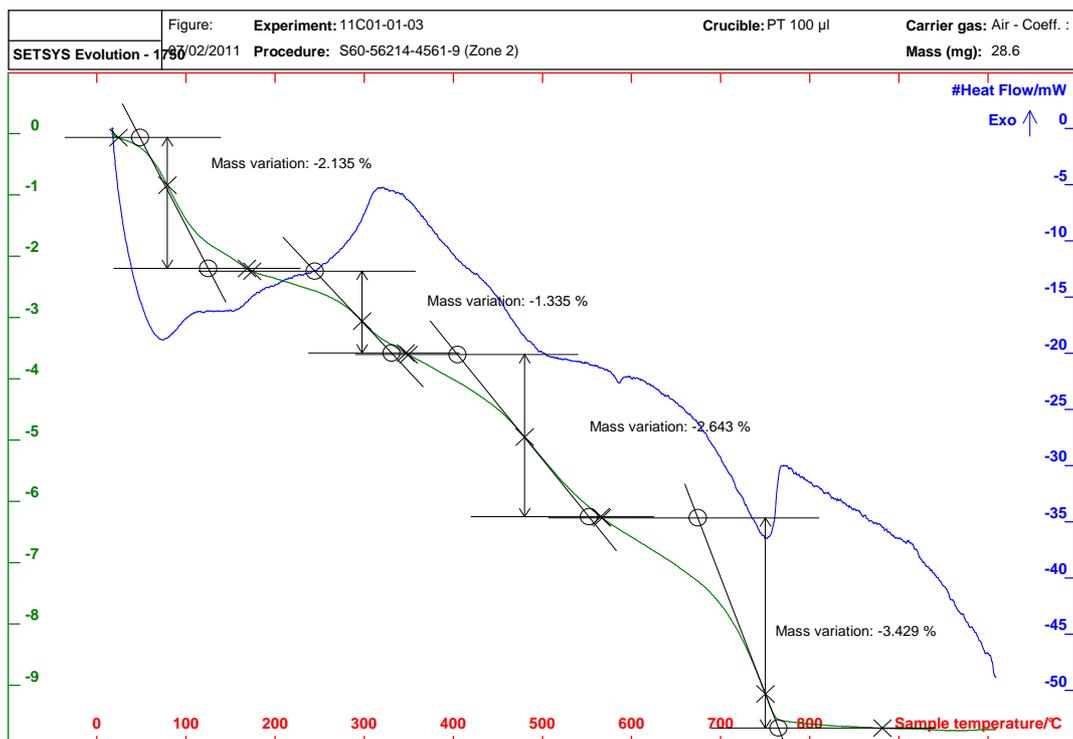


Figura 112. Análisis TGA-DTA del suelo S3

De acuerdo con la difracción, el suelo S2 es principalmente silíceo, con un contenido en cuarzo del 70%, valor que es evidente su exageración si comparamos con el resultado del análisis químico, y posee entorno al 25% de filosilicatos.

La descomposición de la calcita se observa a partir de los 600° y hasta los 800 ° C, con una pérdida de masa en torno al 3,5 %. La pérdida del agua interlamilar de las arcillas supone el 2,6% de la masa y se produce entre 350° y 500°C, y las pérdidas iniciales hasta 150°C pueden ser, en este caso, asociadas a la presencia de materia orgánica. Entre 150° y 350°C existe una pérdida en la zona de los aluminatos hidratados, que nos recuerda el alto contenido de alúmina revelado en el análisis químico de esta muestra.

6.3 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS SUELOS

6.3.1 Granulometrías

Para obtener la granulometría de los suelos en estudio se ha empleado la norma UNE 103101:95 “Análisis granulométrico de suelos por tamizado” [35], empleando los tamices que se muestran a continuación y que se identifican en el artículo 330 y 512 del PG3 [26]. Las figuras siguientes representan las curvas granulométricas de cada uno de los suelos y la comparación entre ellos.

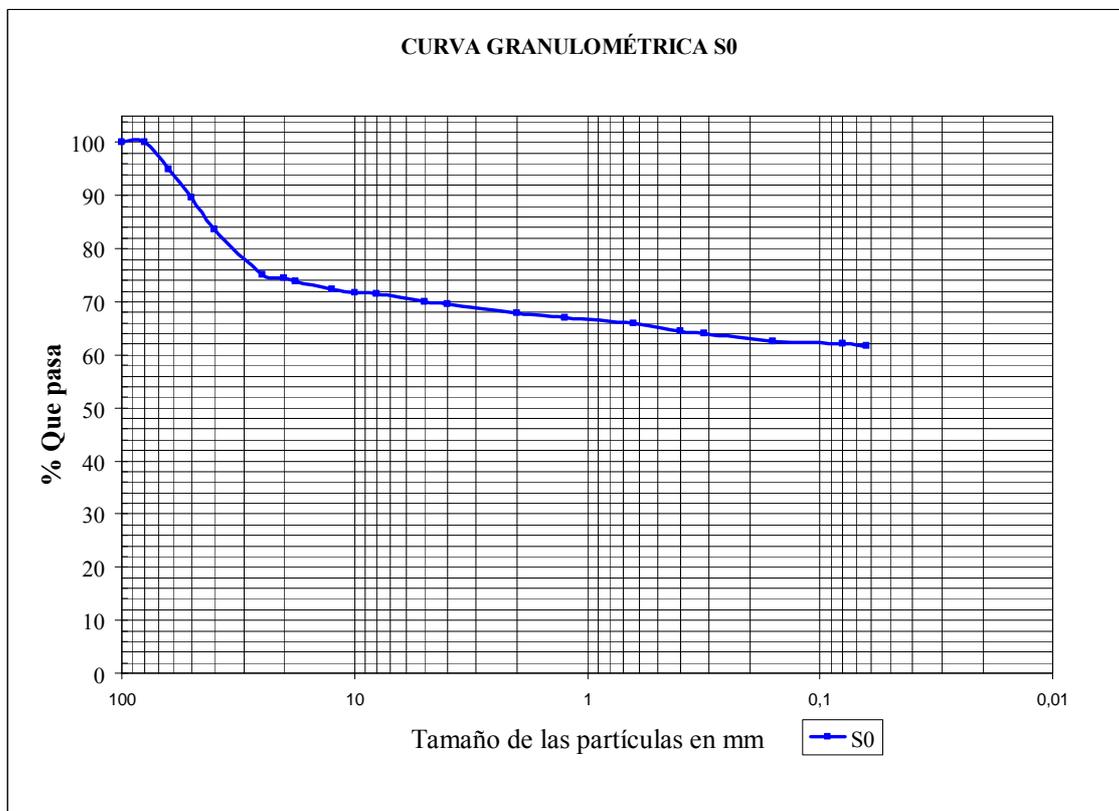


Figura 113. Granulometría del suelo S0

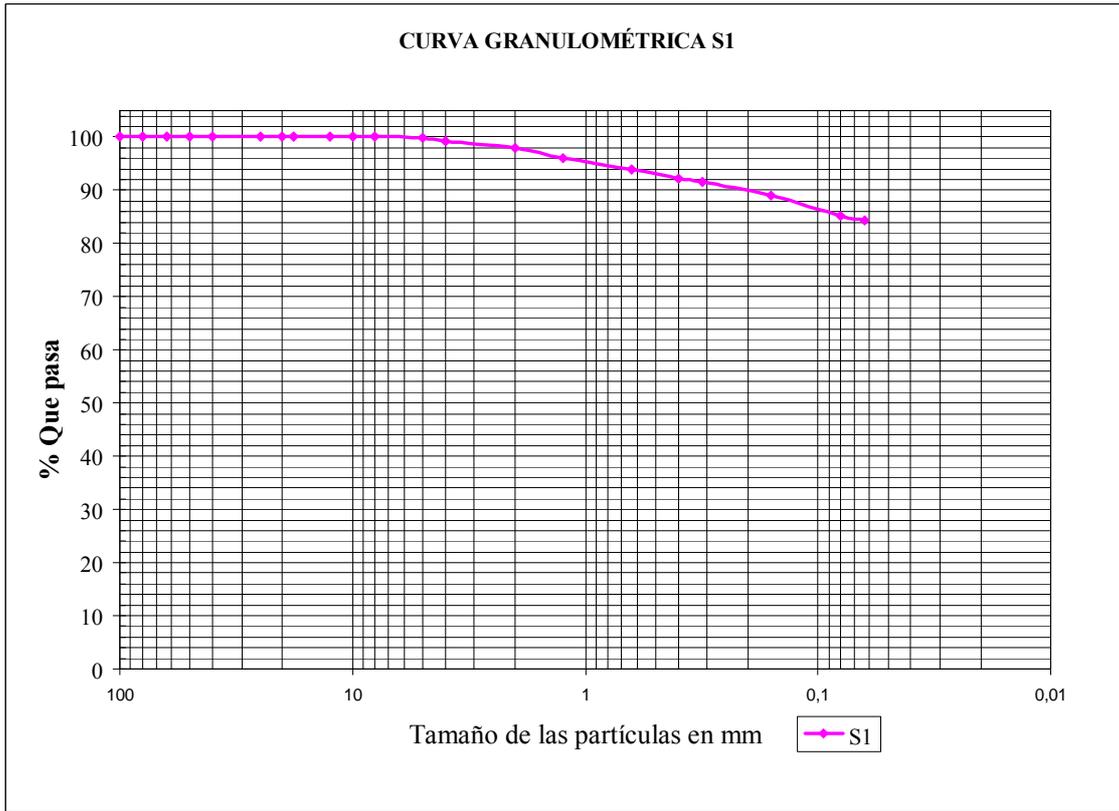


Figura 114. Granulometría del suelo S1

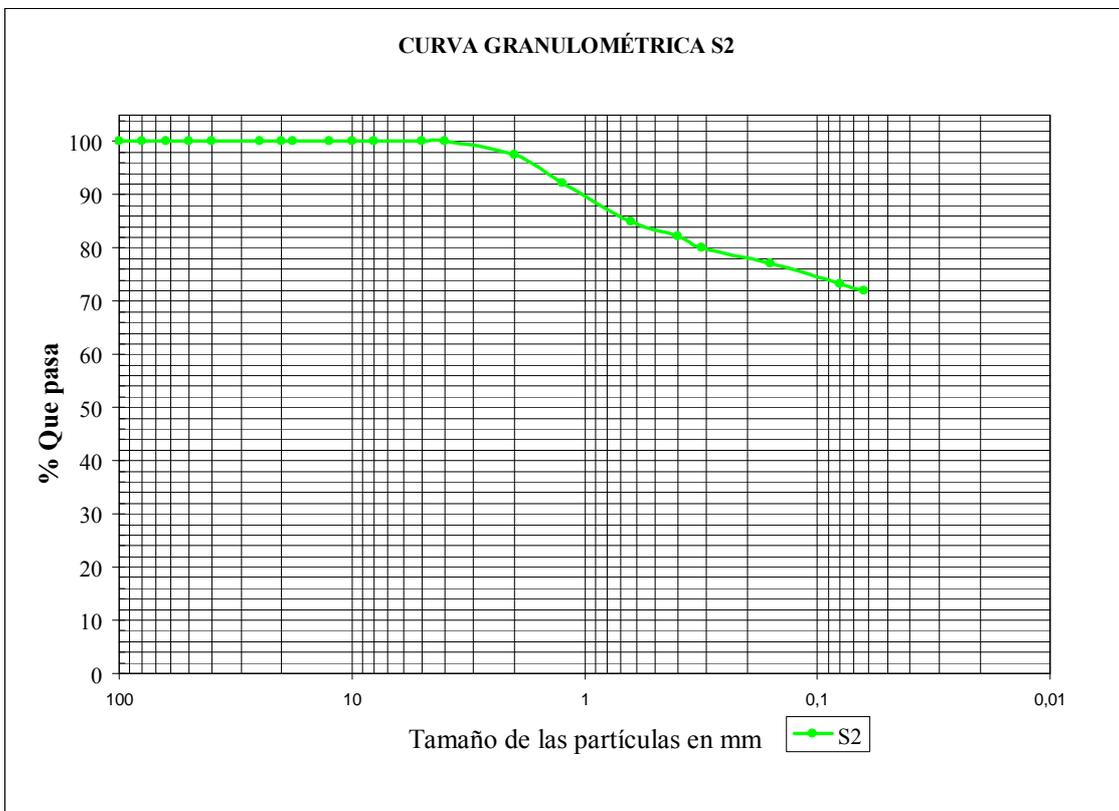


Figura 115. Granulometría del suelo S2

TAMIZ UNE	%PASA			
	S0	S1	S2	S3
100	100	100	100	100
80	100	100	100	100
63	95,0	100	100	100
50	89,6	100	100	100
40	83,7	100	100	100
25	75,2	100	100	100
20	74,4	100	100	100
18	73,8	100	100	100
12,5	72,4	100	100	99,6
10	71,8	100	100	99,4
8	71,5	100	100	99,3
5	70,0	99,8	100	99,2
4	69,6	99,3	100	99,0
2	67,8	98,0	97,6	98,8
1,25	67,0	96,0	92,3	98,2
0,63	66,0	94,0	85,0	96,5
0,4	64,4	92,3	82,2	95,9
0,315	64,0	91,5	80,0	94,1
0,16	62,5	89,1	77,2	90,8
0,08	62,0	85,2	73,3	86,6
0,063	61,6	84,3	72,0	85,7

Tabla 85. Granulometrías de los suelos

Puede observarse que todos ellos tienen un tamaño de partícula muy pequeño, con un porcentaje de finos superior al 60% en todos los casos.

El suelo S0 es el que tiene tamaños de partícula mayores al resto de suelos, con algún árido de tamaño superior a los 63 mm.

Por su parte, S1 y S3 tienen una granulometría muy similar entre sí, donde en torno al 95% de la muestra pasa por el tamiz 0,63 mm UNE y en el 85% pasa por el último tamiz de la serie (0,063 mm).

El suelo S2, se parece bastante al suelo S1 y S3, pero contiene alguna partícula de mayor tamaño que estos; así, para el tamiz 0,63 mm, pasa en torno al 85% de la muestra y el porcentaje de finos es del 72% (pasa por el tamiz 0,063 mm).

6.3.2 Propiedades geotécnicas

Los ensayos llevados a cabo sobre los suelos para conocer su caracterización física y geotécnica, fueron los indicados en el apartado 3.3 del capítulo 3, donde quedaron explicados detalladamente.

Plasticidad

La plasticidad se determinó según las normas UNE 103103 [36] y UNE 103104 [37], obteniéndose los siguientes resultados que se muestran a continuación.

Propiedad		S0	S1	S2	S3
Límites de Atterberg	LL	75,3	67,9	84,9	52,4
	LP	26,9	25,2	28,8	21,4
	IP	48,4	42,7	56,1	31,0

Tabla 86. Límites de Atterberg de los suelos

Todos los suelos estudiados tienen elevado límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. En general un suelo con $IP > 40$ se considera muy plástico, valor que prácticamente alcanzan todos los suelos en estudio, excepto S3.

Según el PG-3, en su artículo 330, los suelos con límite líquido superior a 65, quedan excluidos de estar clasificados en la categoría de suelo tolerable o superior, por tanto para los S0, S1 y S2 bastará comprobar las exigencias de un suelo marginal. El límite líquido de todos ellos es inferior a 90, por tanto en cuanto a límites de Atterberg, estos tres suelos están dentro de la categoría de suelo marginal.

Por contra, en el suelo S3, con un límite líquido inferior a 65 y superior a 40 (valor establecido en la categoría de suelo adecuado), habrá que realizar los ensayos establecidos para comprobar las exigencias de un suelo tolerable, donde hay que comprobar los límites de hinchamiento libre y colapso con la densidad y humedad de compactación del Próctor normal.

Densidad de las partículas sólidas

El ensayo se realizó según la norma UNE 103302:94 [42] “Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo”, método de los picnómetros, obteniéndose los resultados que se detallan a continuación. La densidad de las partículas de todos los suelos tiene valores próximos y típicos de suelos arcillosos.

Propiedad Física	S0	S1	S2	S3
Densidad relativa de partículas	2,66	2,70	2,53	2,41
Peso específico partículas (g/cm^3)	2,66	2,69	2,53	2,41

Tabla 87. Densidad de las partículas de los suelos

Próctor Normal

Para la clasificación de suelos según PG-3, sólo era necesario realizar el ensayo de Próctor normal sobre el suelo S3, puesto que el resto de suelos quedaron clasificados directamente por los Límites de Atterberg; a pesar de ello, también se realizó el ensayo para el suelo S2 para ver la diferencia de hinchamientos en este suelo ante la energía de compactación del PN y el PM.

Además, como el fin propuesto para estos suelos en estudio es la formación de la explanada de caminos rurales, el hinchamiento libre en edómetro y el índice de colapso fueron estudiados con la energía de compactación del Próctor Modificado para todos los suelos.

No hay que olvidar, que el ensayo Próctor es una densidad de referencia, con la que se comparan las densidades que se obtienen in situ, y debe ser representativo. Por lo que si el suelo a ensayar contiene elementos grandes en mayor medida que elementos de pequeño tamaño, la densidad Próctor no es un buen elemento de comparación y se deben realizar otros ensayos que midan directamente la capacidad resistente y la deformabilidad del suelo.

Suelo / PN	Densidad Máxima (g/cm^3)	Humedad óptima (%)
S2	1,42	30,1
S3	1,65	21,1

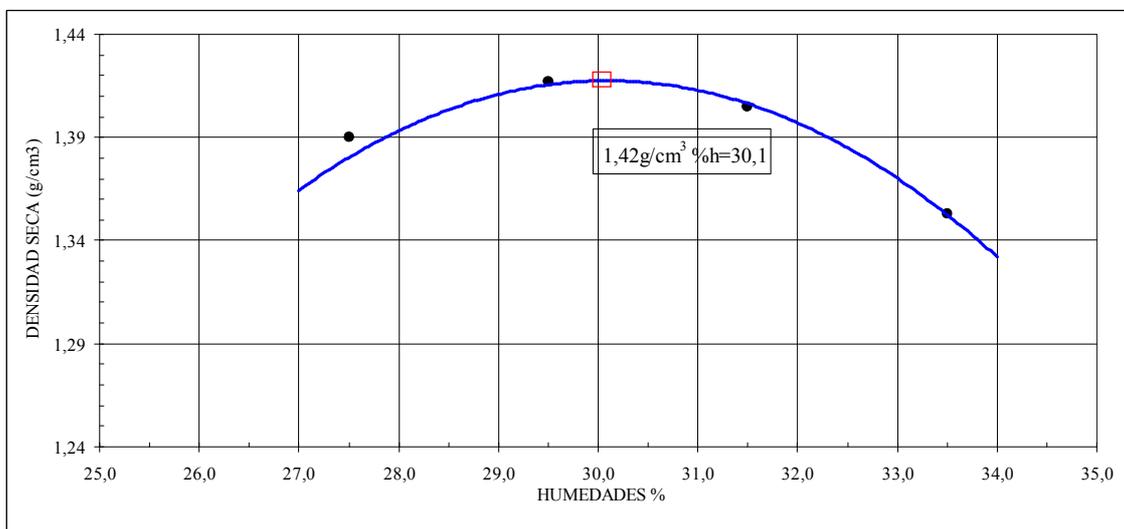


Figura 118. Próctor normal del suelo S2

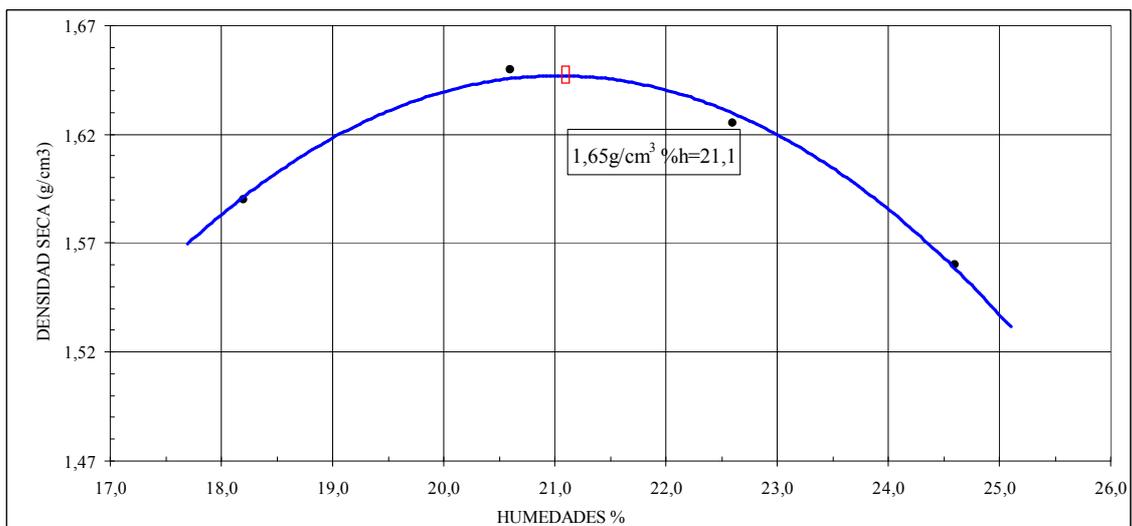


Figura 119. Próctor normal del suelo S3

Próctor Modificado.

En el ensayo Próctor Modificado se aplica mayor energía de compactación por unidad de volumen que en el Próctor Normal, obteniéndose unas densidades secas máximas más elevadas y unas humedades óptimas menores que en el ensayo normal. Se determina la densidad máxima y humedad óptima de compactación, según la norma UNE 103501:94 [45] empleada habitualmente en explanadas. Al igual que en el ensayo normal, si el tamaño máximo del suelo a emplear en obra es superior al que permite el ensayo, es necesario tamizar el suelo previamente y ensayar la fracción fina de este, realizando una corrección posterior.

Si se comparan los resultados obtenidos en diferentes tipos de suelos, compactados según los ensayos Próctor normal y modificado, se comprueba que en los compactados según este último se obtienen unas densidades secas mayores y unas humedades óptimas menores. Estas diferencias son más acusadas en suelos finos muy plásticos y mucho menor en zahorras bien graduadas, ya que estas últimas tienen una compactabilidad mejor y su densidad alcanza ya valores elevados con niveles de energía de compactación del Próctor normal.

La curva de PM para cada una de las muestras se representa en las siguientes figuras.

Suelo / PM	Densidad Máxima (g/cm^3)	Humedad óptima (%)
S0	1,64	21,1
S1	1,61	22,5
S2	1,70	19,3
S3	1,89	14,1

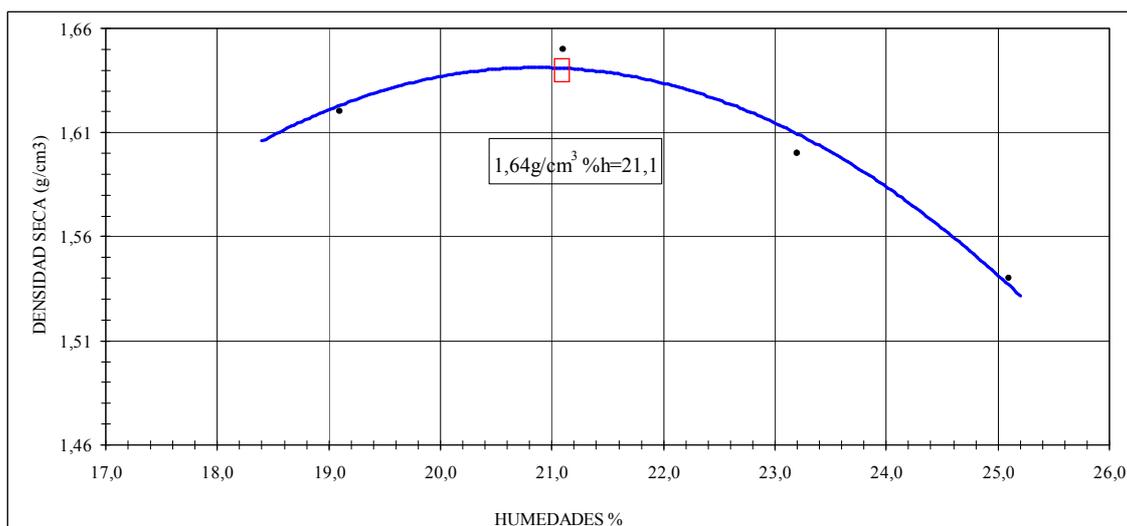


Figura 120. Próctor modificado del suelo S0

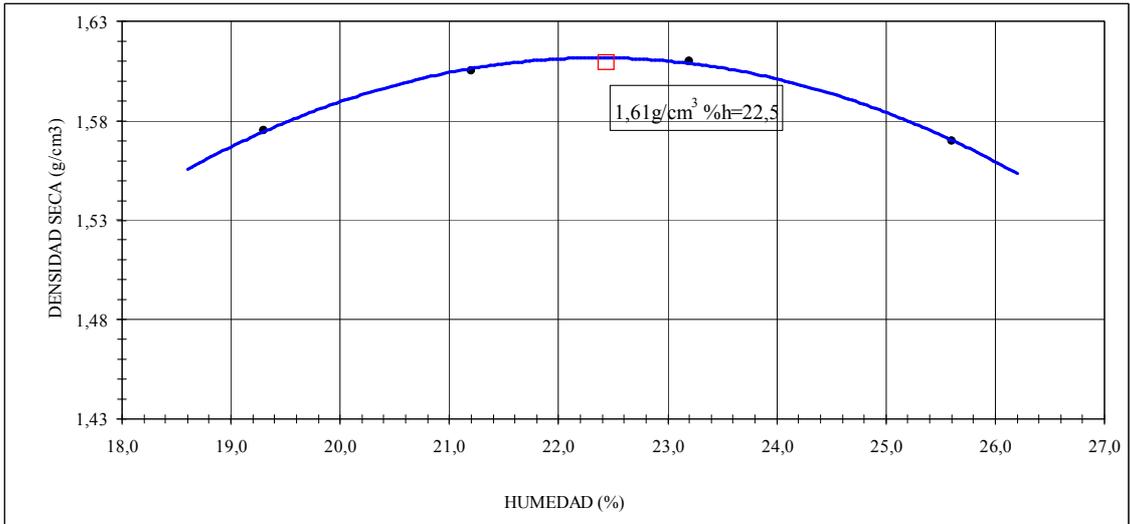


Figura 121. Próctor modificado del suelo S1

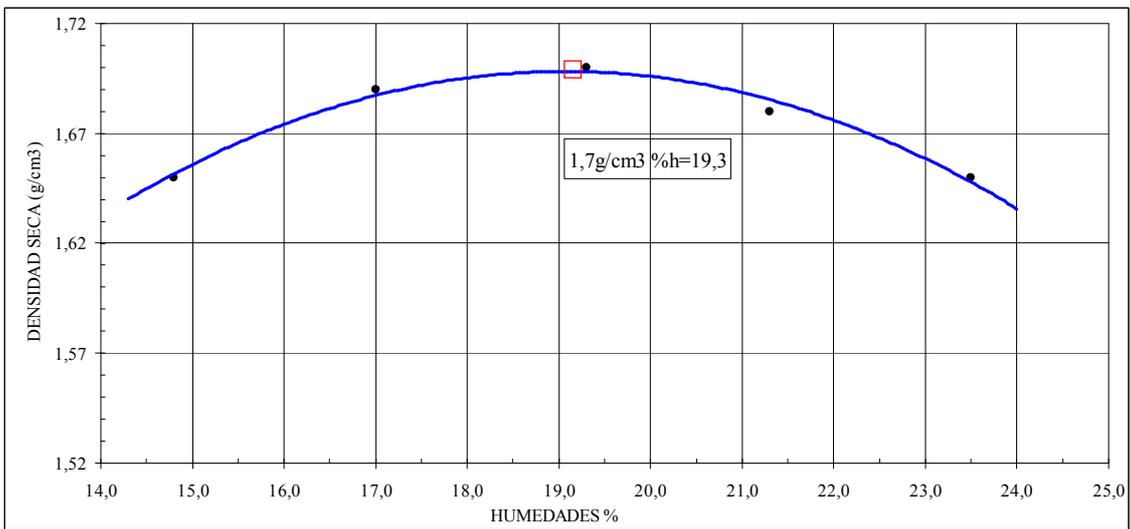


Figura 122. Próctor modificado del suelo S2

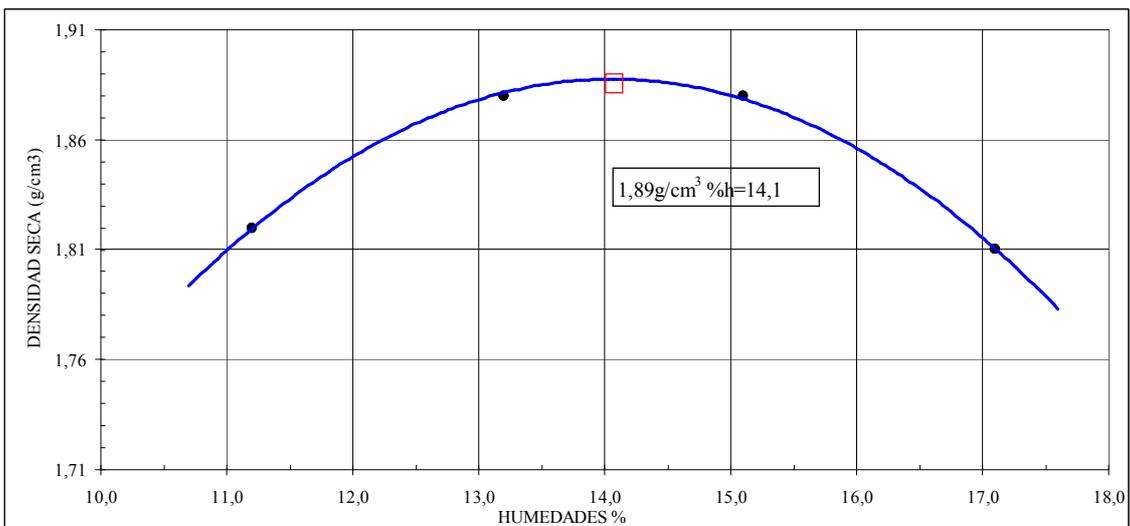


Figura 123. Próctor modificado del suelo S3

Hinchamiento libre y Asiento de Colapso

Se determina el hinchamiento libre y el asiento de colapso a partir de las normas UNE 103601 [47] y NLT-254 [17], respectivamente. Estos ensayos se han realizado con muestra remodelada a la humedad óptima y energía de compactación de Próctor Modificado para todos los suelos, y de Próctor Normal, según fuera necesario para su estudio y/o clasificación. Los resultados se muestran en la Tabla 88.

Característica	S0	S1	S2		S3	
Próctor de referencia	PM	PM	PN	PM	PN	PM
Hinchamiento Libre (%)	3,73	3,17	0,61	11,41	0,90	5,80
Asiento de Colapso (%)	0,10	0,05	0,22	0,16	0,16	0,00

Tabla 88. Hinchamiento libre y asiento de colapso de los suelos

El suelo S3 que por características químicas, granulometría y límites de Atterberg podía ser considerado suelo tolerable, comprobamos con estos resultados que su hinchamiento libre y su asiento de colapso con la energía de compactación del PN son inferiores a los límites establecidos en el PG-3 para este tipo de suelos (hinchamiento libre < 3%, asiento de colapso < 1%), por tanto podrá ser considerado tolerable si el resto de características están dentro de las establecidas para dicha categoría. Por otro lado, para poder emplear suelos tolerables en la explanada, la norma 6.1. I.C. indica que el hinchamiento libre con la energía de compactación de puesta en obra (en nuestro caso la del Próctor modificado) ha de ser inferior al 1%, por tanto el suelo S3 (hinchamiento a PM igual a 5,8%) tendrá que ser sometido a estabilización para poder ser utilizado.

Para los suelos S0, S1 y S2, los hinchamientos resultantes cuando el material se compacta a PM, son elevados, superiores al 3% de los suelos expansivos, por tanto todos ellos han de ser estabilizados.

El objeto de compactar la muestra de suelo S2 con la energía del Próctor Normal, fue comparar los hinchamientos y asientos de esta misma muestra con la energía del Próctor Modificado, observándose en estos resultados, que la diferencia tan importante entre una compactación y otra.

En cuanto a los valores de asiento de colapso, ninguna de las muestras tiene valores de suelos colapsables ($\geq 1\%$), no presentándose problemas de este tipo.

Índice C.B.R. a Próctor Modificado

Este ensayo se realiza según la norma UNE 103502:95 [46] con el fin de determinar la capacidad portante de la explanada. Se trata de un ensayo de penetración donde además se mide su eventual absorción e hinchamiento en agua. Para el ensayo se compactan tres probetas con el 25%, 50% y 100% de la energía del PM, que en la Tabla 89 corresponden con las probetas nº 1, 2 y 3, respectivamente.

En España ya no se utiliza el CBR para la clasificación de la explanada, actualmente la norma 6.1-IC “Secciones de firme” [25], clasifica las explanadas en función del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga del ensayo de carga con placa (E_{v2}). Sin embargo, en la clasificación de los materiales para la formación de explanadas, dicha

norma, sí utiliza el índice CBR como prescripción complementaria a la clasificación de suelos del PG-3 a la hora de caracterizar dichos materiales.

La Tabla 89 muestra los resultados del ensayo descrito, donde se aprecia que las 4 muestras de suelo, con el 100% de la energía de compactación del Próctor Modificado tienen CBR muy bajos, inferiores a 3, que es el mínimo que marca la norma 6.1.I.C en suelos tolerables para su posible utilización en explanadas. Para el caso de los suelos marginales no existe un CBR de referencia, si no que la condición es su estabilización hasta conseguir un suelo estabilizado S-EST1 o S-EST2, con sus correspondientes condiciones. Por tanto, no serán suelos que podamos emplear directamente en la traza del camino, si no que habrá que proceder a su estabilización para ver si de esta manera cumplen con las prescripciones exigidas. También se observa que a medida que la energía de compactación aumenta para cada una de las probetas de las muestras de suelo (compactación al 25%, 50% y 100% del PM), la densidad y el CBR también aumentan. Por el contrario, la absorción e hinchamientos disminuyen cuanto mayor es la energía de compactación, como era de esperar.

Muestra de Suelo	Probeta N°	1	2	3
S0	Densidad (g/cm ³)	1,50	1,59	1,65
	Absorción (%)	9,80	8,00	5,00
	Hinchamiento (%)	4,81	4,92	4,97
	Índice C.B.R. (%)	1,00	2,20	3,20
S1	Probeta N°	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,45	1,55	1,61
	Absorción (%)	12,20	8,40	4,20
	Hinchamiento (%)	4,03	3,61	3,41
	Índice C.B.R. (%)	1,40	2,10	2,80
S2	Probeta N°	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,44	1,56	1,70
	Absorción (%)	19,20	15,20	9,20
	Hinchamiento (%)	12,49	12,75	10,18
	Índice C.B.R. (%)	0,90	1,10	1,40
S3	Probeta N°	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,64	1,80	1,89
	Absorción (%)	11,50	7,30	5,10
	Hinchamiento (%)	8,31	7,33	6,19
	Índice C.B.R. (%)	0,80	1,40	2,30

Tabla 89. Resultados del ensayo CBR en suelos a PM

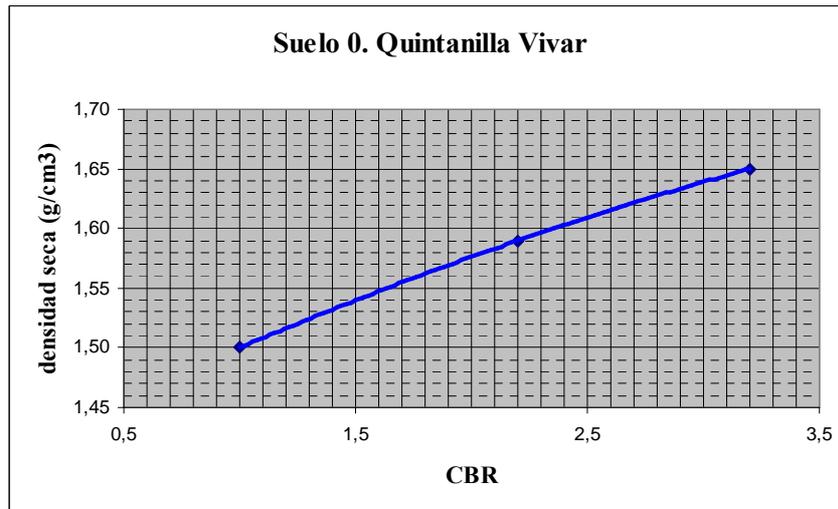


Figura 124. Índice CBR-densidad seca a PM del suelo S0

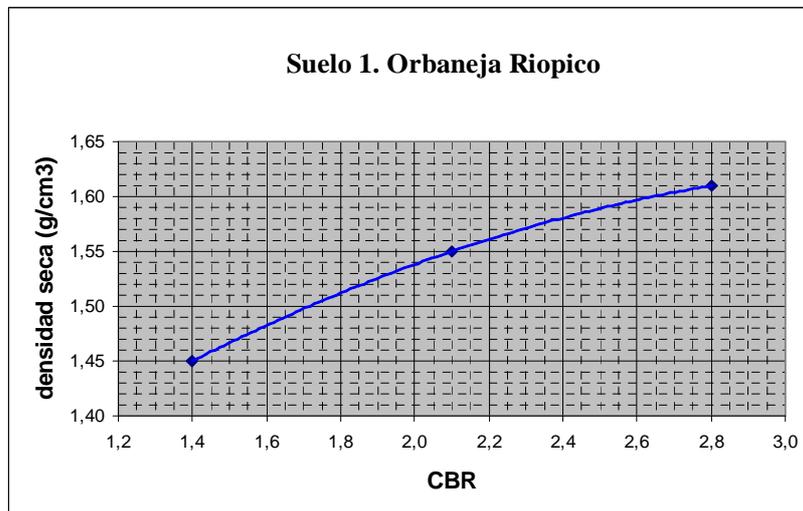


Figura 125. Índice CBR-densidad seca a PM del suelo S1

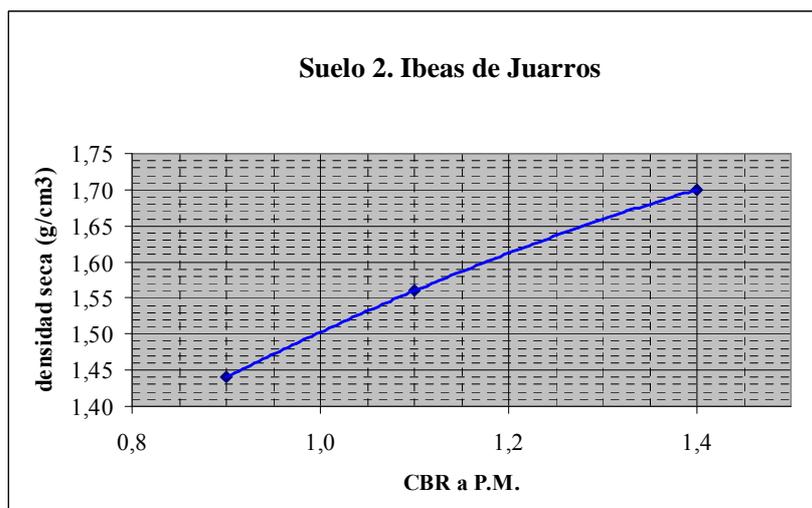


Figura 126. Índice CBR-densidad seca a PM del suelo S2

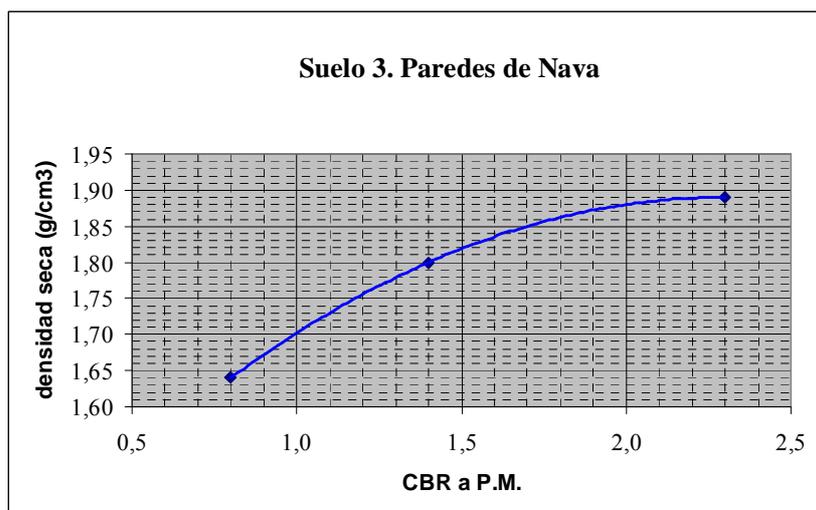


Figura 127. Índice CBR-densidad seca a PM del suelo S3

Resistencia a compresión

Se determina la resistencia a compresión simple y la deformación de rotura del suelo a diferentes edades de curado (0 días, 3 días, 7 días, 28 días y 90 días) según la norma UNE 103400:93 [43]. Los ensayos se realizan por triplicado sobre probetas cilíndricas de 38,1 mm de diámetro y 76,2 mm de altura, con la energía de compactación del Próctor Modificado, únicamente para S1 y S3, que como veremos más adelante son las muestras susceptibles de estabilización y representativas de las 4 muestras estudiadas.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente la Tabla 90:

Muestra	Tiempo de curado (días)	Resistencia a Compresión Simple q_u (kPa)				Deformación (%)			
		Prob. 1	Prob. 2	Prob. 3	Media	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 3	Media
S1	0	494,9	545,8	377,0	472,6	3,8	3,6	2,8	3,4
	3	437,6	456,4	450,5	448,2	3,8	3,8	3,3	3,6
	7	405,8	488,1	486,2	460,0	2,4	3,1	2,8	2,8
	28	381,1	426,3	459,4	422,3	2,8	2,4	3,1	2,8
	90	390,2	424,0	561,1	458,4	2,2	2,6	3,3	2,7
S3	0	540,4	557,1	564,0	553,8	3,6	3,6	4,2	3,8
	3	558,1	615,0	700,8	624,6	2,3	2,8	3,3	2,8
	7	611,3	500,9	656,7	589,7	3,2	2,5	2,5	2,8
	28	694,4	735,4	789,6	739,8	2,7	2,9	3,1	2,9
	90	705,7	644,1	804,0	717,9	3,1	2,7	2,7	2,8

Tabla 90. Compresión simple y deformación de Suelos

En general, un suelo no debe incrementar su resistencia a compresión simple cuando sólo se almacena en cámara húmeda durante un lapso de tiempo. La resistencia a compresión simple de un suelo podría variar considerablemente si la probeta ensayada perdiera un 1% de humedad con respecto a la empleada en la compactación de la misma. Para evitar que esta pérdida de humedad se deba a la evaporación, las probetas se guardaron en cámara húmeda protegidas con un material sintético “parafilm M”. Al

ensayar las probetas se comprobó que la masa de las mismas se mantenía constante, es decir que en ninguno de los casos existió pérdidas de agua por evaporación.

En el caso de S1, se cumple que la resistencia a compresión inicial (472,6 kPa) se mantiene con pequeñas variaciones a lo largo del tiempo; Por el contrario en el S3, la resistencia fluctúa a lo largo de tiempo, apreciándose un ligero incremento a partir de los 28 días de curado. Aparece un aumento en la resistencia a compresión al guardarse en cámara húmeda (**20 +/- 2 °C** de temperatura y **95 +/- 5 %** de humedad)

La deformación disminuye ligeramente con el curado, tanto para S1 como para S3; a partir del curado de 7 días, en los dos casos se aprecia que la deformación se mantiene prácticamente constante.

6.3.3 Resumen de ensayos geotécnicos de los suelos.

El resumen de los resultados de los ensayos geotécnicos realizados para los 4 tipos de suelo y explicados a lo largo del presente capítulo, se muestra en la Tabla 91, que junto con los ensayos químicos nos va a permitir clasificarlos.

Propiedad Física		S0	S1	S2		S3	
% finos pasan UNE 0,08		62%	85%	73%		86%	
Límites de Atterberg	LL	75,3	67,9	84,9		52,4	
	LP	26,9	25,2	28,8		21,4	
	IP	48,4	42,7	56,1		31,0	
Densidad relativa real partículas		2,66	2,70	2,53		2,41	
Peso específico partículas (g/cm ³)		2,66	2,69	2,53		2,41	
Próctor Normal	Densidad conjunto (g/cm ³)	-	-	1,42		1,65	
	Humedad óptima-natural (%)	-	-	30,1		21,1	
Próctor Modificado	Densidad conjunto (g/cm ³)	1,64	1,61	1,70		1,89	
	Humedad óptima-natural (%)	21,1	22,5	19,3		14,1	
Color		Gris verdoso	Amarillento Fragmentos marrones	Amarillento Fragmentos gris verdosos		Marrón rojizo claro	
Próctor de referencia		PM	PM	PN	PM	PN	PM
Ensayo CBR	Densidad (g/cm ³)	1,65	1,61	-	1,70	-	1,89
	Absorción (%)	5,00	4,20	-	9,20	-	5,10
	Hinchamiento (%)	4,97	3,41	-	10,18	-	6,19
	Índice CBR	3,20	2,80	-	1,40	-	2,30
Hinchamiento Libre (%)		3,73	3,17	0,61	11,41	0,90	5,80
Ensayo de Colapso (%)		0,10	0,05	0,22	0,16	0,16	0,00
Resistencia compresión simple (KPa)		-	452	-		-	645

Tabla 91. Propiedades geotécnicas de los suelos

6.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Teniendo en cuenta las prescripciones de caracterización de suelos expuestas en el capítulo 3, las tres clasificaciones descritas, los resultados obtenidos de los ensayos anteriores y las explicaciones correspondientes, se muestra en la Tabla 92, un resumen con las características químicas y geotécnicas a tener en cuenta y la clasificación de cada uno de los suelos.

La clasificación de suelos del PG-3, es la que más parámetros tiene en cuenta, por el contrario, la clasificación unificada de Casagrande y la clasificación de la AASHTO basan su clasificación únicamente en la granulometría y en los límites de Atterberg.

Característica		S0	S1	S2		S3	
Nº de ensayo		1	1	1	2	1	
Materia Orgánica (%)		0,043	0,063	0,103	0,120	0,120	
Sales Solubles Incluido el yeso (%)		0,068	0,283	0,384	8,150	0,093	
Sales Solubles distintas al yeso (%)		0,063	0,166	0,144	0,194	0,166	
Sulfatos Solubles (%SO ₃)		0,002	0,054	0,110	3,700	0,026	
Contenido en yeso (%)		0,005	0,117	0,240	7,956	0,056	
Granulometría	Tamaño máximo (mm)	80	8	4		18	
	Cernido UNE 0,40 (%)	64,4	92,3	82,2		95,9	
	Cernido UNE 2 (%)	67,8	98,0	97,6		98,8	
	Cernido UNE 0,80 (%)	62%	85%	73%		86%	
Límites de Atterberg	LL	75,3	67,9	84,9		52,4	
	LP	26,9	25,2	28,8		21,4	
	IP	48,4	42,7	56,1		31,0	
Próctor de referencia		PM	PM	PN	PM	PN	PM
Hinchariento Libre (%)		3,73	3,17	0,61	11,41	0,90	5,80
Ensayo de Colapso (%)		0,10	0,05	0,22	0,16	0,16	0,00
Índice CBR (%)		3,20	2,80	-	1,40	-	2,30
Clasificación Suelo	PG-3	Marginal	Marginal	Marginal		Tolerable	
	Casagrande	CH (arcilla de alta plasticidad)	CH (arcilla de alta plasticidad)	CH (arcilla de alta plasticidad)		CH (arcilla de alta plasticidad)	
	HRB (índice de grupo)	A-7-6 (28)	A-7-6 (40)	A-7-6 (44)		A-7-6 (29)	

Tabla 92. Clasificación de los suelos según PG-3, USCS y AASHTO

S0, S1 y S2 quedan clasificados en el PG-3 como MARGINALES por el simple hecho de no cumplir las la limitación del Límite Líquido (en los tres casos LL>65, condición máxima para englobarlo en la siguiente mejor categoría, la de tolerable). Para este tipo de suelos, la norma 6.1.I.C “secciones de firme” [25], exige que para que puedan ser empleados en la formación de explanadas han de ser estabilizados con cal o con cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2.

En el caso de S2, otra condición que le hace no considerarlo como tolerable es el contenido en yeso, limitado al 5% para los suelos de una categoría superior (tolerable). Igualmente para esta categoría, el contenido en SO₃ está limitado al 1% cuando el suelo

se emplea en la formación de explanadas. Estas características habrá que tenerlas muy en cuenta a la hora de estabilizar el suelo.

S3 queda clasificado en el PG-3 como TOLERABLE; no cumple las condiciones de granulometría para ser adecuado, por lo que pasaríamos a la siguiente categoría de calidad inferior. Sí cumple condiciones de Límites de Atterberg, asiento de colapso (<1%) e hinchamiento libre a PN (<3%) de un suelo Tolerable. Además, la norma 6.1.I.C, indica que para que un suelo tolerable pueda ser utilizado en la formación de explanadas, ha de tener un $CBR \geq 3\%$ y un hinchamiento libre <1%. S3 cumple estas condiciones con la energía de compactación de PN, que es la que nos permite clasificar el material; pero, como la energía de compactación que se va a emplear es la del Próctor Modificado, tendremos que tener en cuenta el CBR e hinchamiento del material libre a PM. Observando los resultados (CBR=2,3 e hinchamiento libre=5,8 % a PM), se aprecia que el suelo S3 no cumple las condiciones para materiales a emplear en la formación de explanadas, por lo que también hubo que proceder a su estabilización.

Según las otras dos clasificaciones todas las muestras son arcillas inorgánicas de plasticidad alta, arcillas pastosas y/o grasas (CH) y suelos arcillosos, de pobre a mala calidad A-7-6. Las principales propiedades de este tipo de materiales son: material impermeable en estado compactado, resistencia al corte deficiente, alta compresibilidad en estado compacto y dificultad de tratamiento en obra.

Por todo lo explicado anteriormente habrá que proceder a la estabilización de las 4 muestras de suelo, siempre y cuando la estabilización sea eficaz, hasta conseguir un material con las características adecuadas para su puesta en obra en la formación de explanadas de caminos rurales.

6.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Como conclusiones del presente capítulo pueden señalarse las siguientes:

- De los cuatro suelos clasificados en el presente capítulo, los suelos S0, S1 y S2 son mayoritariamente calizos-dolomíticos y el suelo S3 es mayoritariamente silíceo.
- El suelo S2 será impropio para su estabilización por su contenido en yeso.
- Los suelos S0, S1 y S2 quedan clasificados según el PG-3 como marginales y el suelo S3 como tolerable. Todos ellos NO aptos para su empleo directo en la explanada de un camino rural, según las prescripciones de la norma 6.1.I.C. “Secciones de firme”. Por ello, la solución que se plantea es su estabilización química.
- Los cuatro suelos estudiados quedan clasificados según la clasificación Unificada de Casagrande como: CH - arcilla de alta plasticidad.
- Los cuatro suelos estudiados quedan clasificados según la clasificación de la ASSHTO como: A-7-6 suelos arcillosos de pobre a mala calidad.

CAPÍTULO 7. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

7 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

7.1 INTRODUCCIÓN

Se entiende por suelo estable aquel que presenta una buena resistencia a la deformación y es poco sensible a la presencia de agua. Cuando a un suelo se le somete a una determinada carga, llamada crítica, se provoca en él una deformación no reversible con un deslizamiento de dos masas adyacentes de dicho suelo. Es precisamente esa carga crítica la que se denomina capacidad portante, entendida como límite de su resistencia. En tanto no se alcanza la carga crítica, el suelo resiste las cargas que se le aplican, aunque al no ser un cuerpo elástico, se pueden producir deformaciones permanentes.

La baja sensibilidad a la presencia de agua es producto de la concurrencia de varias circunstancias favorables, de las que la principal es la calidad o composición del propio suelo. Resulta útil, en general, procurar la disminución de la cantidad de huecos existentes del suelo, lo que se logra con la compactación de una mezcla homogénea a la humedad óptima y a la densidad prevista, según el destino que se vaya a dar al suelo; y también procurando una granulometría bien graduada, sin excesos de materiales plásticos o entumecibles, que asegure que la variación de humedad ante las diferentes situaciones meteorológicas esté comprendida entre límites muy pequeños.

Todos los suelos en estudio en esta Tesis son materiales altamente plásticos y sensibles al agua, por lo que requieren de una corrección en su comportamiento frente a ella, por medio de una estabilización con cal o material de características similares, que reaccione con la fracción arcillosa de los suelos.

Las prescripciones técnicas aplicables respecto a la estabilización de suelos se indican en el artículo 512 del Pliego PG3 “suelos estabilizados in situ” [26], donde se define como suelo estabilizado in situ “la mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal o con cemento, y eventualmente agua, en la propia traza de la carretera, la cual convenientemente compactada, tiene por objeto disminuir la susceptibilidad al agua del suelo o aumentar su resistencia, para su uso en la formación de explanadas”. Como es lógico, se debe cumplir la condición de que, sea cual fuere el ligante empleado, no debe perjudicar a las demás propiedades del suelo.

Efectuadas las correspondientes mezclas se obtienen unos suelos corregidos o nuevos suelos, cuyas resistencias a esfuerzos y frente al agua se han incrementado. En definitiva, estos nuevos suelos son más estables, pues tienen más resistencia a la deformación y al hinchamiento.

En éste capítulo lo primero que se ha hecho es comprobar que los suelos en estudio son susceptibles de estabilización, es decir, si cumplen las condiciones técnicas, recogidas en el PG-3, que ha de tener un suelo para que su estabilización sea efectiva. En segundo lugar, se define los materiales a emplear en las mezclas (suelo, LFS y cal). Y por último

se indican las mezclas realizadas, los métodos de trabajo utilizados y los resultados obtenidos.

Susceptibilidad a la estabilización

Si se tiene en cuenta las condiciones del apartado 3.4.1 (pg 87), de los suelos susceptibles a ser estabilizados y se completa la información con los datos del capítulo anterior, se obtiene la Tabla 93.

El pliego PG-3, establece en su artículo 512, tres tipos de suelos estabilizados *in situ*, denominados respectivamente S-EST1, S-EST2 y S-EST3. Los dos primeros se pueden conseguir con cal o con cemento, mientras que el tercer tipo se tiene que realizar necesariamente con cemento. Los requisitos que han de cumplir los suelos para proceder a su estabilización de una manera o de otra se establecen en la Tabla 93.

Siguiendo las indicaciones de la norma 6.1.I.C. [25], donde dice que los suelos marginales sólo podrán emplearse en la formación de explanadas si se estabilizan hasta conseguir suelo S-EST1 o S-EST2, y teniendo en cuenta que todas las muestras de suelo con las que contamos son suelos arcillosos con alta plasticidad, por lo que la estabilización pertinente es con cal, nos centraremos en éste capítulo en los requisitos exigidos por los suelos S-EST1 y S-EST2.

CARACTERÍSTICA		S0	S1	S2		S3	S-EST1	S-EST2	S-EST3
Nº de ensayo		1	1	1	2	1			
Granulometría UNE-EN 933-2	Cernido UNE 80	100	100	100		100	100		100
	Cernido UNE 2	67,8	98,0	97,6		98,8	-		>20
	Cernido UNE 0,063	61,6	84,3	72,0		85,7	≥15		<35
Materia Orgánica UNE 103204		0,043	0,063	0,103		0,842	<2	<1	
Sulfatos solubles (SO ₃) UNE 103201		0,002	0,054	0,110	3,700	0,026	<1 *		
IP. UNE 103104		48,4	42,7	56,1		31,0	≥12	≥12 y ≤40**	≤15
LL. UNE 103103		75,3	67,9	84,9		52,4	-	≤40	
* Si, SO ₃ >0,5%, se incrementa el control									
** Si IP>40, mezcla suelo-cal en dos etapas									

Tabla 93. Susceptibilidad de los suelos a ser estabilizados

Se puede observar que los suelos S0, S1 y S3 cumplen los requisitos para ser estabilizados con cal y conseguir un suelo estabilizado S-EST1. Por el contrario, la condición de LL inferior a 40 no la cumple ninguno de ellos, por lo que no podrán alcanzar las características de un S-EST2.

Como ya se explicó en el capítulo anterior, los resultados de sales solubles y contenido en yeso de S2 resultaron erróneos en el primer ensayo. De éstos primeros resultados se

desprendía que S2 era susceptible de estabilización. Tras realizar las mezclas con cal o con escoria LFS y ver que el suelo no mejoraba geotécnicamente, se planteó que podría tratarse de un suelo rico en sulfatos que en un primer momento no habíamos detectado. Se realizó un segundo y tercer ensayo para analizar el contenido de sales solubles y de yesos, obteniéndose efectivamente resultados muy diferentes a los iniciales, que harían del suelo no apto para ser estabilizado con cal. En apartados sucesivos se irán dando las explicaciones pertinentes. El error cometido en el primer resultado puede deberse a que la muestra inicial no era representativa del conjunto del suelo o a que el ensayo no fue realizado correctamente.

Mezclas de estabilización y componentes

Una vez clasificados los suelos y comprobando que son susceptibles de estabilización (en el caso de S2, para el primer resultado de contenido en sales solubles, sulfatos y yesos), se plantea la estabilización química de los suelos con cal, que nos servirá de referencia, y la estabilización química de los mismos suelos con la escoria blanca de horno de cuchara E1, estudiada en el capítulo 4 de la presente Tesis.

Las características de la cal utilizada para estabilizar las probetas de referencia son las indicadas en la Tabla 94.

Identificación del Producto	
Nombre del producto	Hidróxido cálcico, Cal Hidratada, Cal Apagada
Datos físicos	Polvo Blanco sin olor
Peso molecular	74,09 g/mol
Solubilidad en agua	Prácticamente nula
Propiedades Físicas	
Punto de Ebullición (se descompone)	580°C
Punto de Fusión (se descompone)	580°C
Densidad Relativa	2,2 Kg/l
Composición Química	
Ca(OH) ₂	92,30%
MgO	1,40%
CO ₂	0,82%
HO ₂	0%

Tabla 94. Propiedades de la cal empleada en las probetas de referencia de suelo estabilizado

Para cada suelo se establecen varias mezclas, bien con cal bien con escoria. Para la designación de las mezclas usaremos la siguiente nomenclatura:

	Nomenclatura Mezcla
Mezcla Suelo-Cal	SCX _C
Mesta Suelo-Escoria	SEX _E

Siendo,

S: S0, S1, S2, S2: Suelos caracterizados en el capítulo 6.

C: Cal empleada en el estudio y descrita anteriormente.

E: Escoria blanca E1, caracterizada en el capítulo 4.

X_S : % suelo en la mezcla

X_C : % de Cal empleado en la mezcla suelo-cal.

X_E : % de E1 empleado en la mezcla suelo-escoria.

En la Tabla 95, se muestran los porcentajes de mezcla en peso seco de los materiales estudiados.

	Mezcla	X_{S0}	X_C	X_E
	S0	S0	100,0	-
S0C2		98,0	2,0	-
S0C3		97,0	3,0	-
S0C4		96,0	4,0	-
S0E3		97,0	-	3,0
	Mezcla	X_{S1}	X_C	X_E
	S1	S1	100	-
S1C1,5		98,5	1,5	-
S1C2		98,0	2	-
S1C2,5		97,5	2,5	-
S1E5		95,0	-	5,0
	Mezcla	X_{S2}	X_C	X_E
	S2	S2	100,0	-
S2C2		98,0	2,0	-
S2E5		95,0	-	5,0
	Mezcla	X_{S3}	X_C	X_E
	S3	S3	100,0	-
S3C2		98,0	2,0	-
S3E5		95,0	-	5,0

Tabla 95. Porcentajes en las mezclas de estabilización (% de peso seco)

Se estudiaron las propiedades geotécnicas de las mezclas propuestas para ver si experimentaba mejoras respecto de las propiedades originales de cada suelo. Se pretende conocer si la estabilización de estos suelos con escoria LFS proporciona buenos resultados, y por ello se trabaja con mezclas suelo-escoria. Para tener una referencia de lo que habitualmente sucede en la estabilización con cal, sobre esos mismos suelos, también se realizaron los ensayos sobre probetas de suelo-cal, de manera que puedan compararse los resultados. Las proporciones de escoria empleadas no han de ser muy altas, ni diferir demasiado de los porcentajes de cal empleados habitualmente, para que la estabilización sea viable. En las estabilizaciones de tierras blandas, los porcentajes de cal empleados están entre el 2 % y el 8%, recomendándose valores no superiores al 5%; por tanto es deseable que la estabilización realizada con otros materiales, como es nuestro caso con escoria blanca LFS, no emplee proporciones superiores al 10% de escoria. En estos trabajos se ha fijado un valor máximo para el contenido en escoria del 5%; es de esperar que pudieran conseguirse mejores resultados

con porcentajes mayores de escoria, pero no sería rentable llevarlo a la práctica por el elevado coste que supondría su transporte hasta el lugar de ejecución.

7.2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS MEZCLAS

Granulometrías

La granulometría de las mezclas no se realizó puesto que la proporción de cal o escoria es pequeña y se espera que, en estado seco, a penas varíe respecto de la granulometría que tienen los suelos originales.

Es posible que exista cierta modificación de la granulometría en presencia de humedad tras la estabilización, debido a la floculación de partículas como consecuencia del intercambio iónico, lo que mejora la permeabilidad y trabajabilidad del material.

7.2.1 Propiedades geotécnicas de las mezclas

Los ensayos que se realizaron sobre las muestras de suelo estabilizado con cal o con escoria blanca fueron los indicados en el apartado 3.4.2 de capítulo 3.

Plasticidad

Se ensayaron las distintas estabilizaciones para cada uno de los suelos mediante las normas UNE 103103:94 [36] y UNE 103104:93 [37], para obtener el límite líquido y el límite plástico de las diferentes mezclas. En la Tabla 96 se muestran los resultados obtenidos.

Suelo	Mezcla	LL	LP	IP
S0	S0	75,3	26,9	48,4
	S0C2	65,1	32,2	32,9
	S0C3	61,2	36,3	24,9
	S0C4	60,3	40,0	20,3
	S0E3	66,3	29,2	37,1
S1	S1	67,9	25,2	42,7
	S1C1,5	54,1	30,6	23,5
	S1C2	54,4	32,7	21,7
	S1C2,5	51,3	34,9	16,4
	S1E5	56,5	29,4	27,1
S2	S2	84,9	28,8	56,1
	S2C2	85,4	32,6	52,8
	S2E5	86,9	41,9	45,0
S3	S3	52,4	21,4	31,0
	S3C2	52,3	32,3	20,0
	S3E5	57,0	26,5	30,5

Tabla 96. Límites de Atterberg de las mezclas de suelo-escoria

Para todas las muestras de suelos estabilizados, bien sea con cal o con LFS, se constata que la plasticidad disminuye con la mezcla.

Comprobamos que la aplicación de la cal provoca de manera generalizada un aumento del límite plástico sin afectar al límite líquido de una manera clara, el cual sufre leves variaciones, bien sea hacia arriba o hacia abajo. Tan sólo parece verse éste afectado en las primeras veinticuatro horas desde la aplicación de la cal, pero en todo caso, en menor proporción que el límite plástico. Como consecuencia de ello se identifica una reducción en el índice de plasticidad.

El aumento del LL y LP, algunos autores como R. Taha o Joseph O. Akinmusuru, lo relacionan con la hidratación de componentes de la escoria Ca^{++} , Si^{++} , Al^{++} [204] [65]. Por otra parte hay estudios que indican que el límite líquido es mucho más sensible que el límite plástico al complejo de cambio de cationes de la arcilla. El límite líquido puede crecer o decrecer cuando se realiza un tratamiento con cal dependiendo de la naturaleza de la arcilla y de su complejo de cambio. En cambio el LP aumenta casi siempre. Las arcillas saturadas de calcio tienden a incrementar el LL cuando se tratan con cal, si embargo las arcillas con cationes de menor valencia, como el sodio, pueden experimentar cambio importantes de cationes y reducciones del LL en contacto con la cal [89] [156].

Además y como ya se indicó en el capítulo 3, la reducción del IP es progresivo; cuanto mayor cantidad de estabilizante añadido (cal o escoria LFS) mayor es la reducción del IP, aunque no es una reducción lineal, sino asintótica, y tiene un límite a partir del cual el aumento de cal no produce reducciones sustanciales ni mucho menos proporcionales de la plasticidad del suelo.

La reducción de la plasticidad en cualquiera de las estabilizaciones suelo-escoria es menor a la reducción experimentada por las mezclas suelo-cal en cualquiera de las proporciones y con respecto al suelo original. En algunos casos se observan resultados parecidos entre los suelos estabilizados con cal y los estabilizados con escoria blanca, como es el caso de **S0E3** y **S0C2**, **S1E5** y **S1C2** ó **S0C2** y **S0E3**.

Aunque la disminución de la plasticidad es importante, pues permite un mejor manejo del suelo, no alcanza lo valores que habíamos indicado en el capítulo 3, procedentes de diversas fuentes, donde marcaba un $\text{IP} \leq 12$ para asegurar la durabilidad de la explanada. Por otro lado, también hay pliegos donde indica que si la plasticidad inicial del suelo es superior a 35, se considera buena la estabilización si se reduce IP a la mitad y si IP inicial es inferior a 35 se considerara buena si IP se reduce en 15 unidades. A pesar de no conseguirse estas prescripciones, los resultados obtenidos en la estabilización con escoria son buenos y semejantes a los obtenidos en la estabilización con cal; ello no es un requisito imprescindible de suelo estabilizado S-EST1 según el PG-3.

Próctor Modificado

Como quedó indicado anteriormente, las propiedades de compactación se han estudiado a partir del ensayo Proctor Modificado, según la norma UNE 103501:94 [45], habitual en la formación de explanadas. A partir la energía de compactación empleada en el PM y de las propiedades de densidad seca-humdad conferidas al terreno, estudiaremos su capacidad portante, movimientos verticales y resistencia a compresión.

Se realiza un sólo Próctor Modificado de mezcla para cada suelo, tomándolo como referencia para el resto de mezclas de ese suelo. Sólo en un caso (S1) se hizo el PM para dos mezclas del mismo suelo (con cal y con escoria), ya que los resultados son prácticamente idénticos. De esta manera, se llevaron a cabo los PM sobre las mezclas: S0C3, S1C2, S1E5, S2C2 y S3C2.

Próctor Modificado	Densidad Máxima (g/cm^3)	Humedad óptima (%)
S0C3	1,62	22,3
S1C2	1,58	23,5
S1E5	1,59	23,4
S2C2	1,70	19,3
S3C2	1,88	14,6

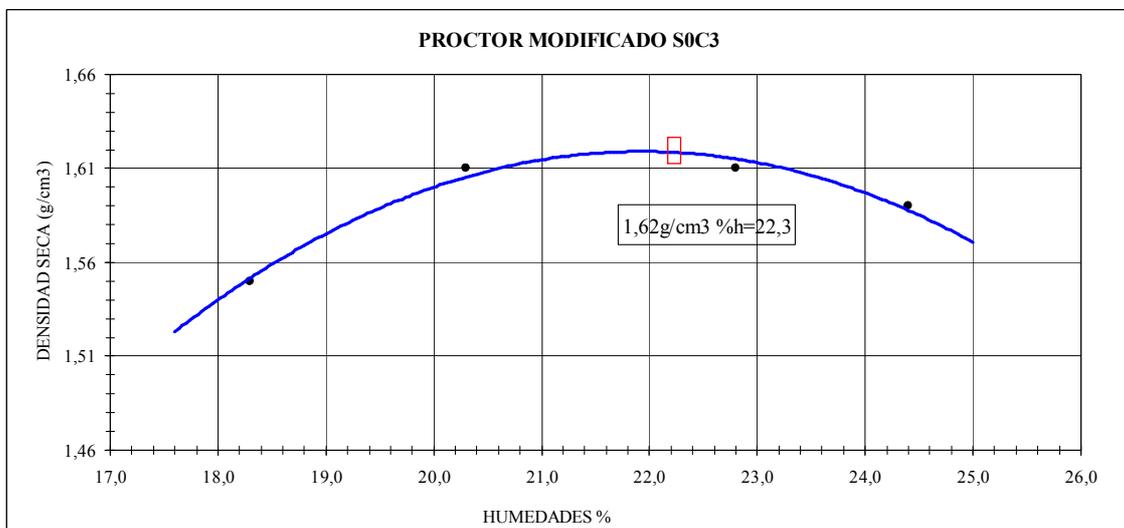


Figura 128. Próctor Modificado de la mezcla S0C3

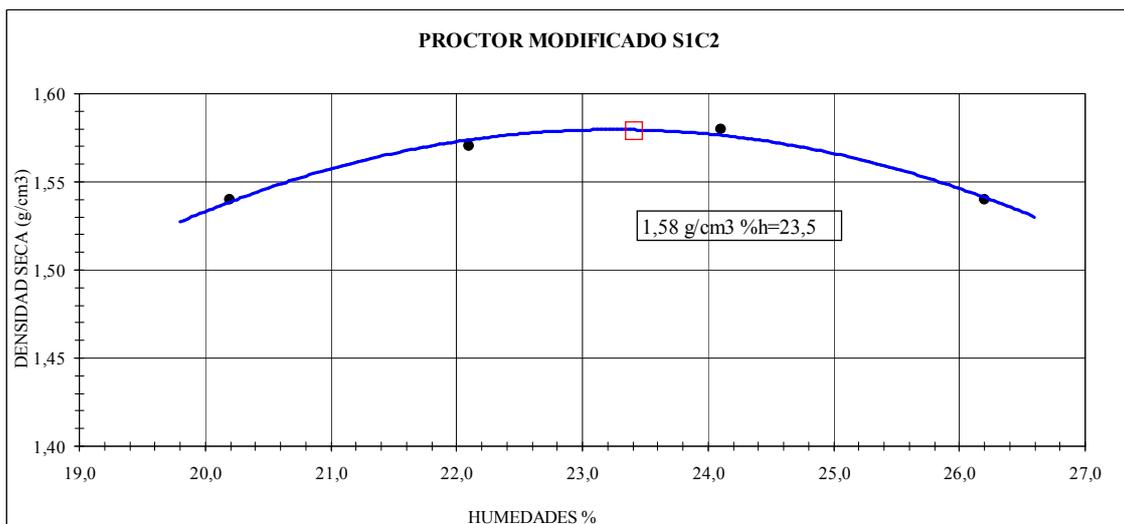


Figura 129. Próctor Modificado de la mezcla S1C2

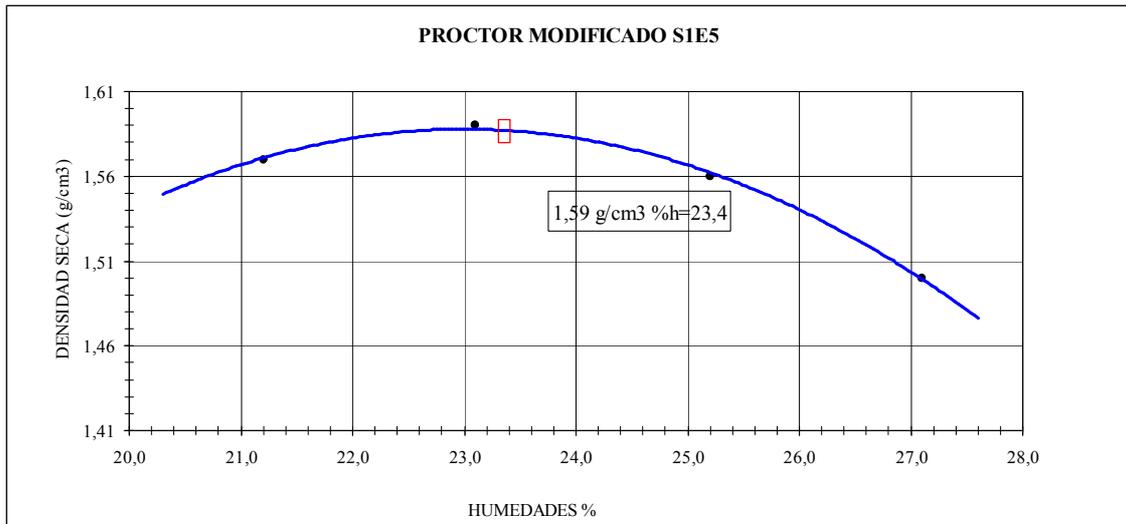


Figura 130. Próctor Modificado de la mezcla S1E5

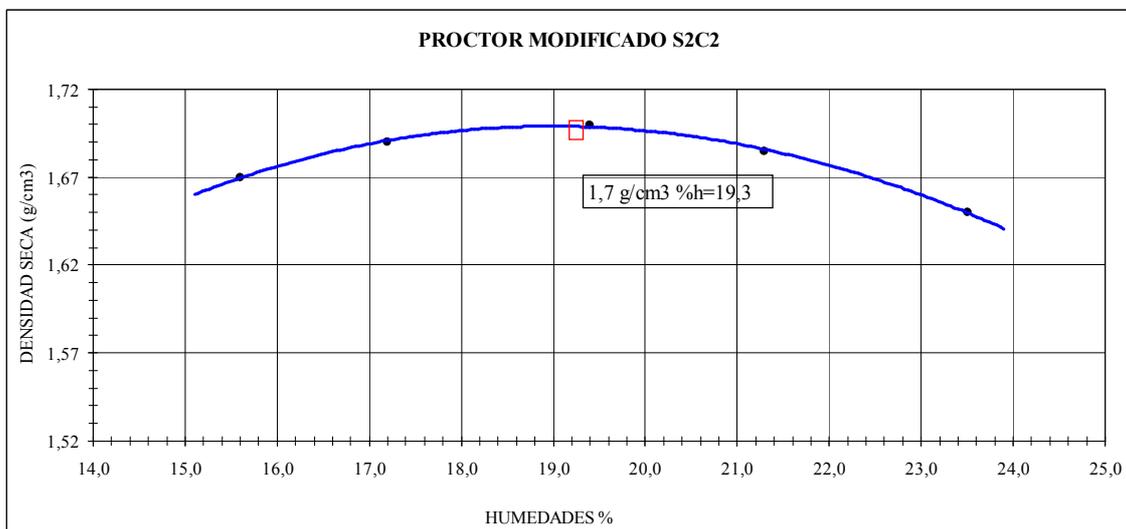


Figura 131. Próctor Modificado de la mezcla S2C2

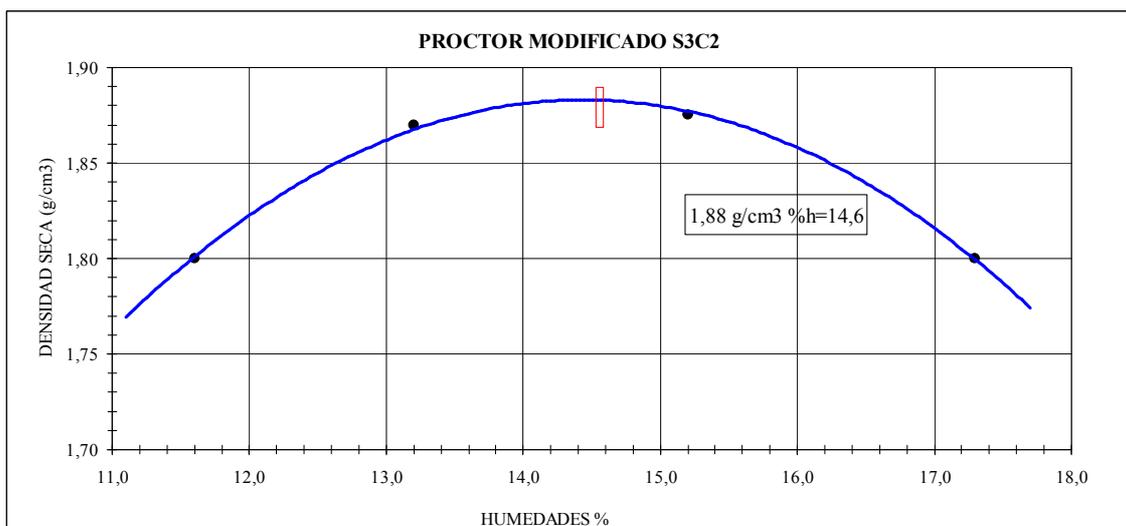


Figura 132. Próctor Modificado de la mezcla S3C2

En general, se observa un aplanamiento de la curva cuando la añadimos cal o escoria, si comparamos con el Próctor del suelo original; esto se debe a que los suelos estabilizados experimentan una reunificación de su estructura, aumentan la humedad retenida, aumentando su volumen y por consecuencia tienen menores densidades de compactación. Para los ensayos geotécnicos realizados sobre las muestras de suelo estabilizado, usaremos siempre la energía de compactación del PM.

Índice C.B.R. a PM

Este ensayo se realiza según la norma UNE 103502:95 [46] con el fin de determinar la capacidad portante de la explanada mejorada. En las tablas de éste apartado se observa la densidad, absorción, hinchamiento e índice C.B.R. de tres probetas designadas como 1, 2 y 3, que tienen distinta energía de compactación, 25%, 50% y 100% del Próctor Modificado, respectivamente, y con la humedad correspondiente al PM para cada mezcla de suelo, bien sea con cal, bien sea con escoria. A continuación se presentan los resultados del ensayo.

Índice C.B.R. sobre mezclas del suelo S0

Mezcla	probeta nº	1	2	3
S0	Densidad (g/cm ³)	1,50	1,59	1,65
	Absorción (%)	9,80	8,00	5,00
	Hinchamiento (%)	4,81	4,92	4,97
	Índice C.B.R. (%)	1,00	2,20	3,20
S0C2	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,48	1,59	1,63
	Absorción (%)	6,40	3,20	1,60
	Hinchamiento (%)	1,24	0,93	0,52
	Índice C.B.R. (%)	16,90	45,00	59,50
	% mejora de CBR	1590	1945	1759
S0C3	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,47	1,58	1,62
	Absorción (%)	6,40	2,80	1,50
	Hinchamiento (%)	1,18	0,87	0,47
	Índice C.B.R. (%)	16,90	50,80	84,40
	% mejora de CBR	1590	2209	2538
S0C4	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,47	1,57	1,62
	Absorción (%)	6,50	2,80	1,40
	Hinchamiento (%)	0,91	0,78	0,36
	Índice C.B.R. (%)	17,40	43,10	78,50
	% mejora de CBR	1640	1859	2353
S0E3	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,51	1,59	1,62
	Absorción (%)	4,50	3,60	2,60
	Hinchamiento (%)	2,03	1,77	1,28
	Índice C.B.R. (%)	9,80	18,40	31,20
	% mejora de CBR	880	736	875

Tabla 97. CBR sobre mezclas de suelo S0

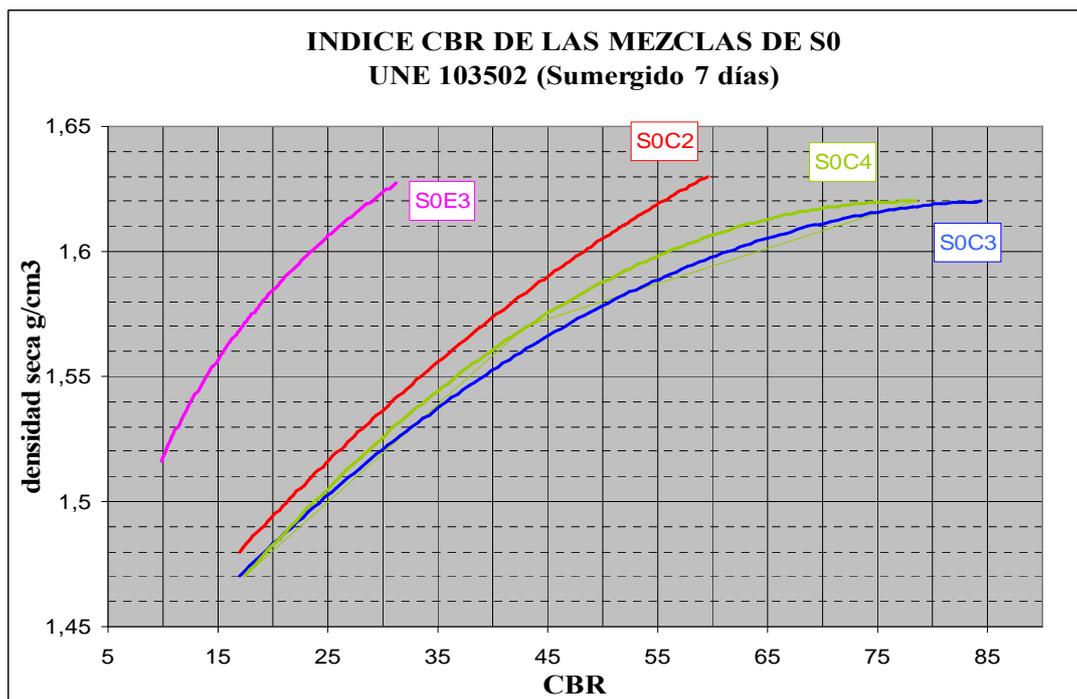


Figura 133. Índice CBR-densidad seca mezclas de suelo S0

Se observa que la mezcla S0C3 experimenta la mayor mejora de CBR de las 3 proporciones de cal empleadas, aumentando el C.B.R. desde 3,2 del suelo marginal (compactado con una energía del 100% del PM) a 84,4 en el suelo estabilizado (con la misma energía de compactación), lo que supone una mejora del 2538% respecto del suelo original sin mezclar. Para proporciones superiores de cal a la indicada la mejora es menor, lo que indica que existe una cantidad óptima de cal en la estabilización. En todos los casos, tanto con cal como con escoria, se alcanzan valores de CBR muy superiores a los indicados para un S-EST1 o S-EST2 ($CBR \geq 6$ y ≥ 12 , respectivamente), y en consecuencia, indicados para la formación de explanadas.

En todos los casos disminuye la absorción y el hinchamiento de la probeta, pasando éste último de valores cercanos a un 5% a hinchamientos de 0,36% en el caso más favorable, de la mezcla S0C4.

En el caso de la mezcla S0E3 existe un aumento considerable en el índice CBR del suelo, llegando a un valor de 31,2 (compactado con una energía del 100% del PM). La mejora en este caso es inferior a la experimentada con cal, como era de esperar, pero supone una mejora importante respecto del suelo original, y más que suficiente para su empleo como S-EST1 ($CBR \geq 6$) ó S-EST2 ($CBR \geq 12$). Además el hinchamiento medido sobre la probeta de CBR también disminuye considerablemente desde un 4,97% a un 1,28%, así como la absorción de agua. Estos resultados nos abren una puerta claramente esperanzadora hacia el uso de la escoria blanca como conglomerante hidráulico estabilizador de suelos.

Índice C.B.R. sobre mezclas del suelo S1

Mezcla	probeta nº	1	2	3
S1	Densidad (g/cm ³)	1,45	1,55	1,61
	Absorción (%)	12,20	8,40	4,20
	Hinchamiento (%)	4,03	3,61	3,41
	Índice C.B.R. (%)	1,40	2,10	2,80
S1C1,5	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,41	1,5	1,58
	Absorción (%)	11,3	7,8	4,2
	Hinchamiento (%)	1,32	0,92	0,68
	Índice C.B.R. (%)	12,8	29,6	51,1
S1C2	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,39	1,49	1,58
	Absorción (%)	11,30	7,00	4,00
	Hinchamiento (%)	1,27	0,76	0,65
	Índice C.B.R. (%)	13,30	32,10	58,60
S1C2,5	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,41	1,50	1,58
	Absorción (%)	10,20	6,70	3,60
	Hinchamiento (%)	0,67	0,52	0,28
	Índice C.B.R. (%)	16,70	37,70	64,10
S1E5	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,45	1,54	1,59
	Absorción (%)	9,80	6,70	4,20
	Hinchamiento (%)	1,43	0,93	0,80
	Índice C.B.R. (%)	14,90	38,00	52,60
	% mejora de CBR	964	1710	1779

Tabla 98. CBR sobre Mezclas S1

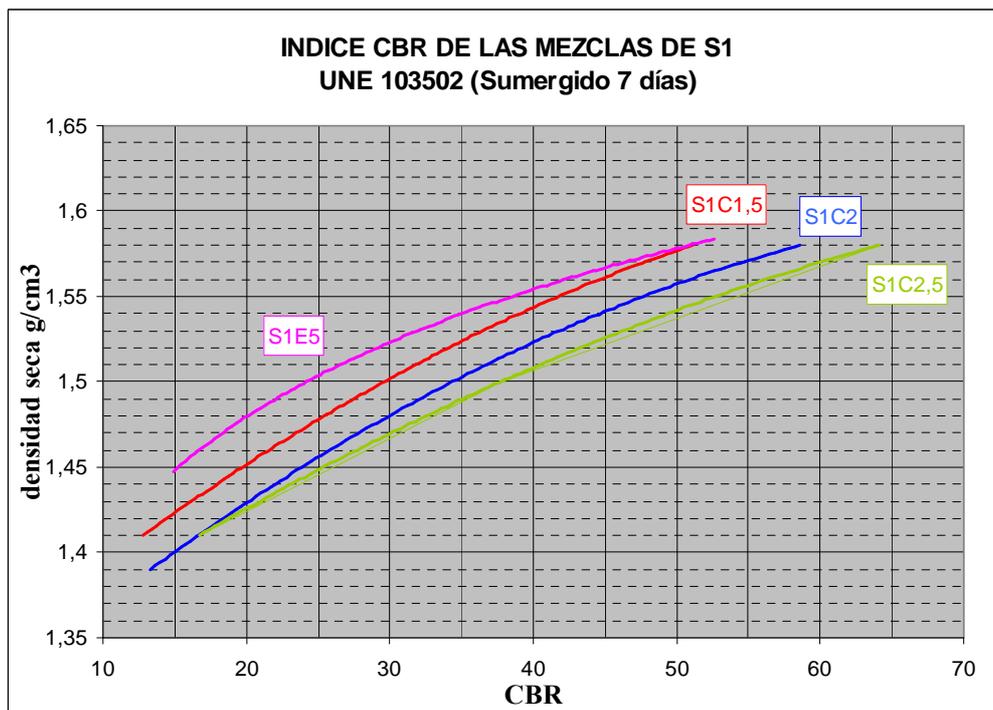


Figura 134. Índice CBR-densidad seca de las mezclas del suelo S1

Al igual que sucedía para las mezclas de S0, podemos observar en la Tabla 98 y en la Figura 134, que las estabilizaciones realizadas con el suelo S1, con cal o con escoria LFS, obtienen resultados muy positivos. En todas ellas, se da una disminución de hinchamiento y capacidad de absorción de las muestras. A su vez, los incrementos de CBR respecto del suelo sin estabilizar son muy grandes.

En el caso de la mezcla con escoria S1E5, los resultados obtenidos están muy cerca de los de la mezcla con cal S1C1,5 y no muy alejados de los obtenidos en la mezcla con cal S1C2; ésta circunstancia no se dio para el suelo anterior, donde la mezcla S0E3, a pesar de alcanzar valores de CBR muy positivos y válidos para la estabilización, estuvieron más alejados de la estabilización tradicional con cal; esta circunstancia nos lleva a pensar que la proporción de escoria blanca LFS a emplear para conseguir condiciones similares a las conseguidas en estabilizaciones habituales con cal, ha de ser algo mayor a éste último valor del 3%.

Índice C.B.R. sobre mezclas del suelo S2

Mezcla	probeta nº	1	2	3
S2	Densidad (g/cm ³)	1,44	1,56	1,70
	Absorción (%)	19,20	15,20	9,20
	Hinchamiento (%)	12,49	12,75	10,18
	Índice C.B.R. (%)	0,90	1,10	1,40
S2C2	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,46	1,56	1,70
	Absorción (%)	17,70	13,00	11,00
	Hinchamiento (%)	10,20	10,41	9,69
	Índice C.B.R. (%)	1,70	2,60	4,30
	% mejora de CBR	89	136	207
S2E5	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,50	1,58	1,70
	Absorción (%)	14,20	11,70	9,60
	Hinchamiento (%)	10,37	10,23	9,89
	Índice C.B.R. (%)	1,80	2,90	4,40
	% mejora de CBR	100	164	214

Tabla 99. CBR sobre las mezclas del suelo S2

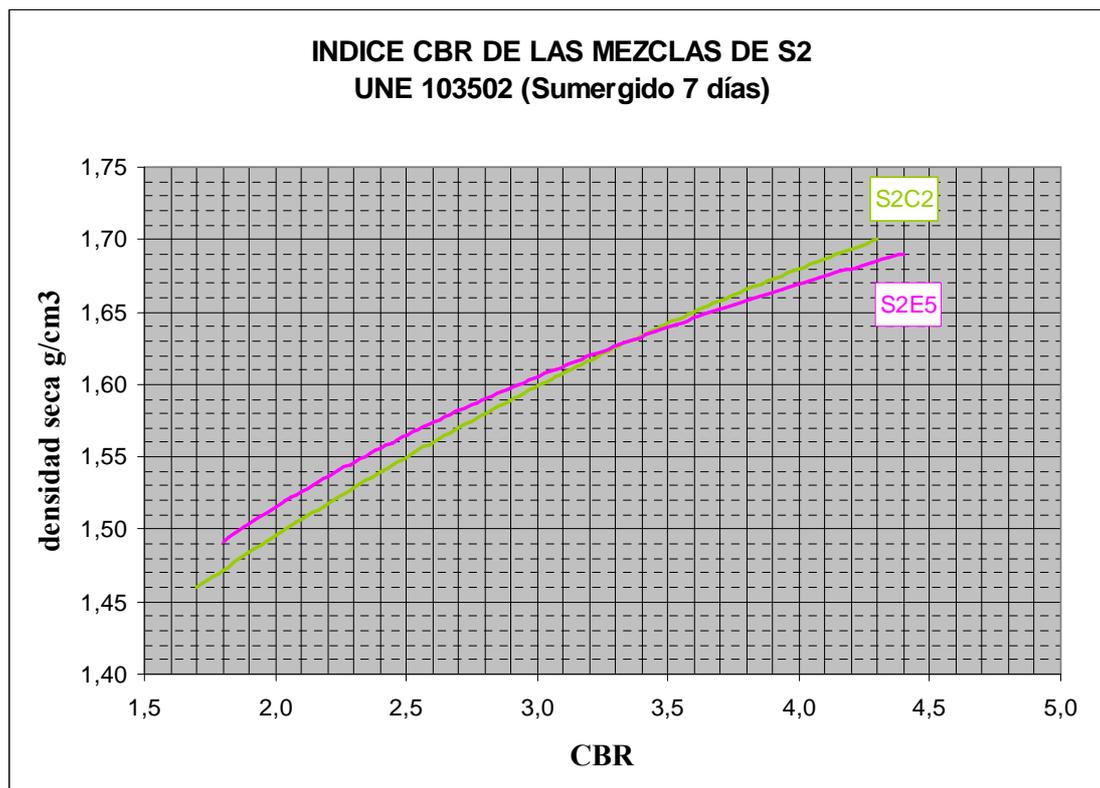


Figura 135. Índice CBR-densidad seca de las mezclas del suelo S2

La estabilización de este suelo no muestra resultados muy esperanzadores; a pesar de que hay un aumento de CBR y disminución de hinchamiento, la variación respecto del suelo sin estabilizar es muy pequeña.

Los valores de CBR alcanzados tanto para la mezcla con cal S2C2, como para la mezcla con escoria S2E5, son bajos, y los de hinchamientos demasiado elevados, como para su empleo en la formación de explanadas como suelo S-EST1 y S-EST2. La parte positiva de estos resultados es que, tanto en la estabilización con cal como con escoria sucede lo mismo, de ahí que no descartemos nuestra escoria como buen estabilizador, si no que, habrá que buscar la explicación al mal comportamiento del suelo S2 ante la estabilización química.

Como se expuso en el capítulo 6, la primera determinación de sales y de sulfatos solubles realizada sobre el suelo S2, proporcionó resultados incorrectos, obteniéndose valores elevados en las repeticiones (sales solubles superior al 8%, contenido en sulfatos solubles SO_3 de 3,7% según norma UNE y contenido en yeso del 7,9% según NLT y sulfato cálcico del 2% según la difracción de rayos X). Es por ello, que la estabilización con cal o con escoria blanca no es el método apropiado para trabajar con este tipo de suelos. El PG-3 limita el contenido de SO_3 al 1%, para suelos que vayan a estabilizarse con cal; esto es debido a que los suelos con alto contenido en sulfatos, al combinarse con la cal, y otros elementos, forman productos de mayor volumen, como la etringita y la thaumasita, que se traducen en un elevado hinchamiento de la muestra.

Índice C.B.R. sobre mezclas del suelo S3

S3	probeta n°	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,64	1,80	1,89
	Absorción (%)	11,50	7,30	5,10
	Hinchamiento (%)	8,31	7,33	6,19
	Índice C.B.R. (%)	0,80	1,40	2,30
S3C2	probeta n°	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,62	1,79	1,88
	Absorción (%)	10,40	6,20	3,50
	Hinchamiento (%)	4,23	3,71	2,50
	Índice C.B.R. (%)	5,80	10,40	18,00
	% mejora de CBR	625	643	683
S3E5	probeta n°	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	1,64	1,82	1,88
	Absorción (%)	10,20	5,80	3,20
	Hinchamiento (%)	5,67	4,40	2,56
	Índice C.B.R. (%)	3,50	9,10	13,20
	% mejora de CBR	338	550	474

Tabla 100. CBR sobre las mezclas del suelo S3

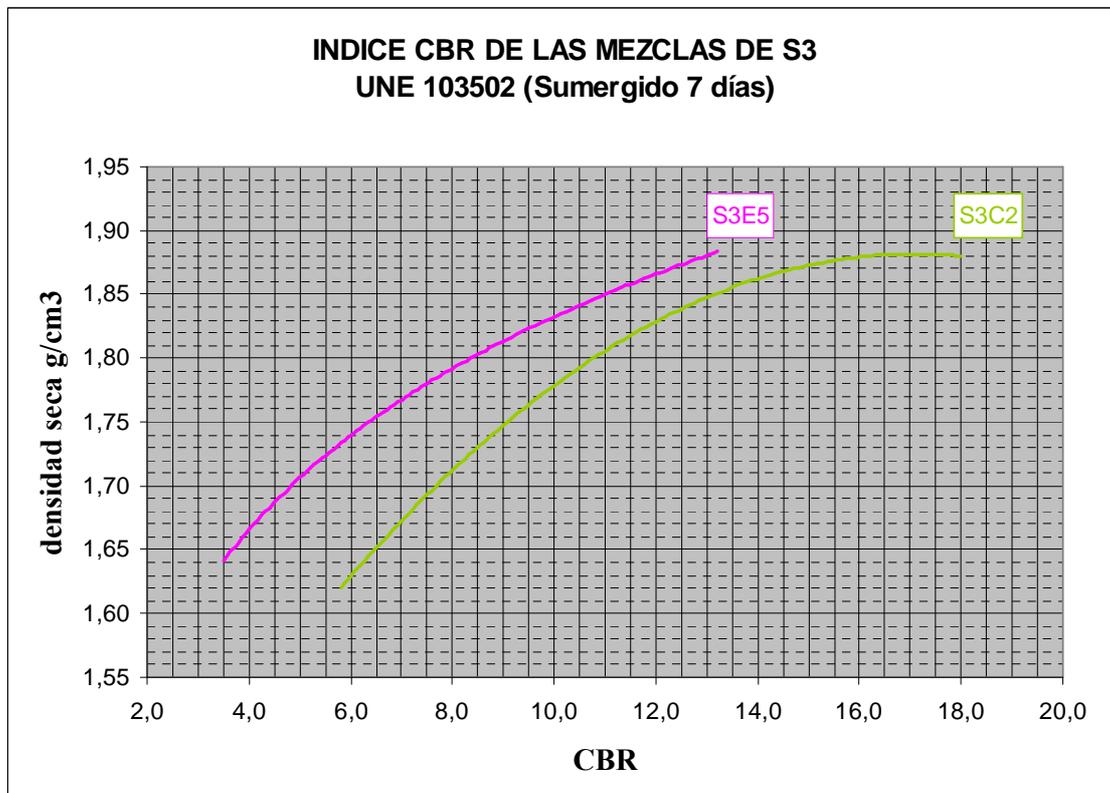


Figura 136. Índice CBR-densidad seca de las mezclas del suelo S3

En el caso del suelo S3, los resultados de su estabilización con cal o con escoria, en cuestión de absorción e hinchamiento son muy parecidos entre sí, ambos parámetros disminuyen respecto del suelo sin estabilizar. Los valores de hinchamiento se sitúan por debajo del 3% (hinchamiento libre) recomendado cuando el suelo es estabilizado. El CBR aumenta en ambas mezclas, alcanzándose valores superiores a 6 que es el mínimo que ha de tener un S-EST1 y $CBR \geq 12$ un S-EST2.

El suelo S3 en su composición es mayoritariamente silíceo, con altos contenidos de feldspatos; por el contrario, los suelos S0, S1 y S2 son suelos mayoritariamente calizos-dolomíticos. A la vista de los resultados, la composición mineralógica del suelo tiene mucho que ver en la eficacia de estabilización química. Para este último suelo S3, aunque la estabilización fue suficientemente eficaz, no se obtuvieron resultados de capacidad portante en ensayos a corto plazo tan buenos como los obtenidos para S0 y S1; pero los resultados de resistencia a compresión con plazo de maduración del suelo más largo son excelentes en el suelo S3, como se expone a continuación.

Resistencia a Compresión

De igual manera que se hizo para los suelos S1 y S3, se determinó la resistencia a compresión simple y la deformación de rotura para cada una de sus mezclas con cal o con escoria: S1C2, S1E5, S3C2 y S3E5. Esta se determinó a diferentes edades de curado (0 días, 3 días, 7 días, 28 días y 90 días) según la norma UNE 103400:93 [43]. Los ensayos se realizan por triplicado sobre probetas cilíndricas de 38,1 mm de diámetro y 76,2 mm de altura y los ensayos se muestran en la Tabla 101, Tabla 102 y en las figuras siguientes, junto con los resultados obtenidos para el suelo sin mezclar.

Muestra	Tiempo curado (días)	Resistencia a Compresión Simple q_u (kPa)				Deformación (%)			
		Prob. 1	Prob. 2	Prob. 1	Media	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 1	Media
S1	0	494,9	545,8	377,0	472,6	3,8	3,6	2,8	3,4
	3	437,6	456,4	450,5	448,2	3,8	3,8	3,3	3,6
	7	405,8	488,1	486,2	460,0	2,4	3,1	2,8	2,8
	28	381,1	426,3	459,4	422,3	2,8	2,4	3,1	2,8
	90	390,2	424,0	561,1	458,4	2,2	2,6	3,3	2,7
S1C2	0	708,8	653,4	622,8	661,7	3,0	3,0	3,4	3,1
	3	813,1	594,0	701,9	703,0	1,8	1,9	1,8	1,8
	7	738,2	695,0	720,4	717,9	1,8	1,4	1,5	1,6
	28	594,8	903,1	850,8	782,9	1,0	1,4	1,5	1,3
	90	728,7	855,0	898,2	827,3	1,7	1,6	1,3	1,5
S1E5	0	430,4	496,8	571,5	499,6	3,4	3,5	4,0	3,6
	3	854,5	745,7	834,2	811,5	1,8	1,4	1,8	1,7
	7	984,4	974,0	783,5	914,0	1,2	1,3	1,2	1,2
	28	1237,2	1090,0	961,0	1096,1	1,3	1,4	1,4	1,4
	90	1352,0	1531,0	1033,3	1305,4	1,2	1,0	1,2	1,1

Tabla 101. Compresión simple y deformación de las mezclas del suelo S1

Muestra	Tiempo curado (días)	Resistencia a Compresión Simple q_u (kPa)				Deformación (%)			
		Prob. 1	Prob. 2	Prob. 1	Media	Prob. 1	Prob. 2	Prob. 1	Media
S3	0	540,4	557,1	564,0	553,8	3,6	3,6	4,2	3,8
	3	558,1	615,0	700,8	624,6	2,3	2,8	3,3	2,8
	7	611,3	500,9	656,7	589,6	3,2	2,5	2,5	2,8
	28	694,4	735,4	789,6	739,8	2,7	2,9	3,1	2,9
	90	705,7	644,1	804,0	717,9	3,1	2,7	2,7	2,8
S3C2	0	885,9	840,4	895,2	873,8	1,8	2,1	1,8	1,9
	3	886,9	856,7	900,9	881,5	1,2	1,3	1,3	1,3
	7	915,3	885,3	910,4	903,7	1,1	1,0	1,5	1,2
	28	771,2	1347,7	875,1	998,0	1,7	1,2	1,6	1,5
	90	1157,4	1062,2	889,8	1036,5	1,6	1,5	1,7	1,6
S3E5	0	892,8	808,6	858,3	853,2	2,9	2,8	2,8	2,8
	3	913,9	898,4	796,8	869,7	1,6	1,6	1,6	1,6
	7	900,3	942,0	794,5	878,9	1,4	1,1	1,4	1,3
	28	1058,6	1170,0	913,8	1047,4	1,2	1,3	1,6	1,3
	90	1234,1	1370,3	1473,2	1359,2	1,5	1,8	1,4	1,5

Tabla 102. Compresión simple y deformación de las mezclas del suelo S3

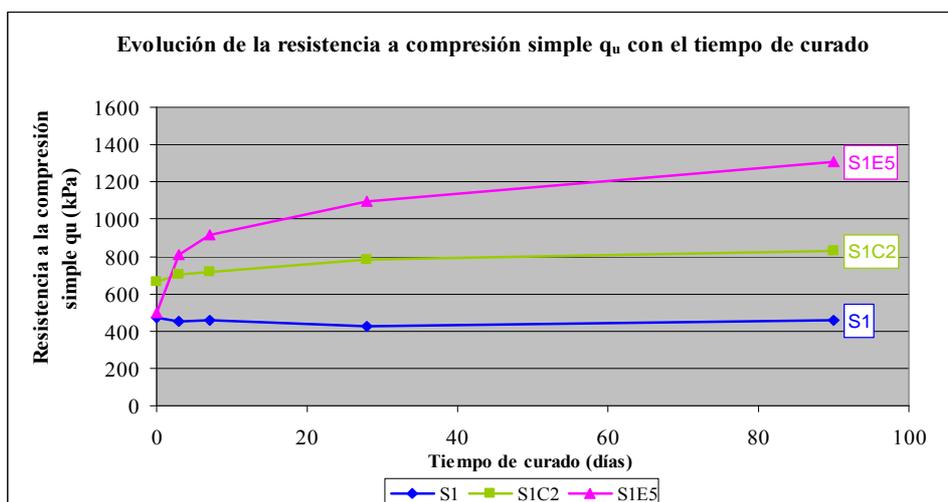


Figura 137. Evolución de la resistencia a compresión simple con el tiempo de curado. Mezclas de S1

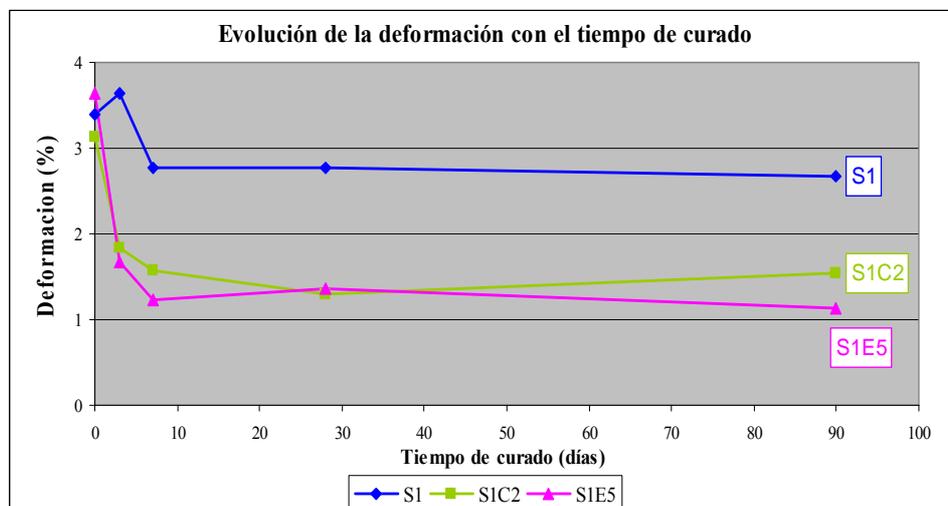


Figura 138. Evolución de la deformación con el tiempo de curado. Mezclas de S1

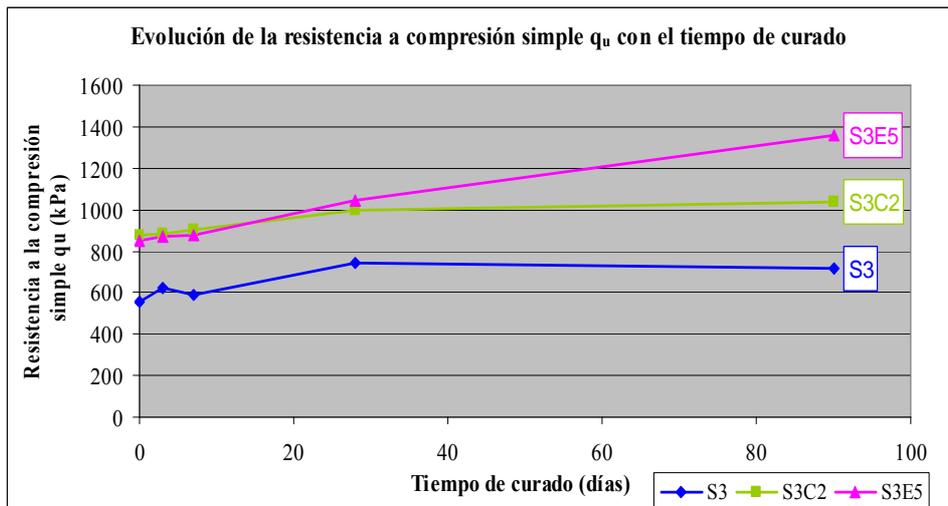


Figura 139. Evolución de la resistencia a compresión simple con el tiempo de curado. Mezclas de S3

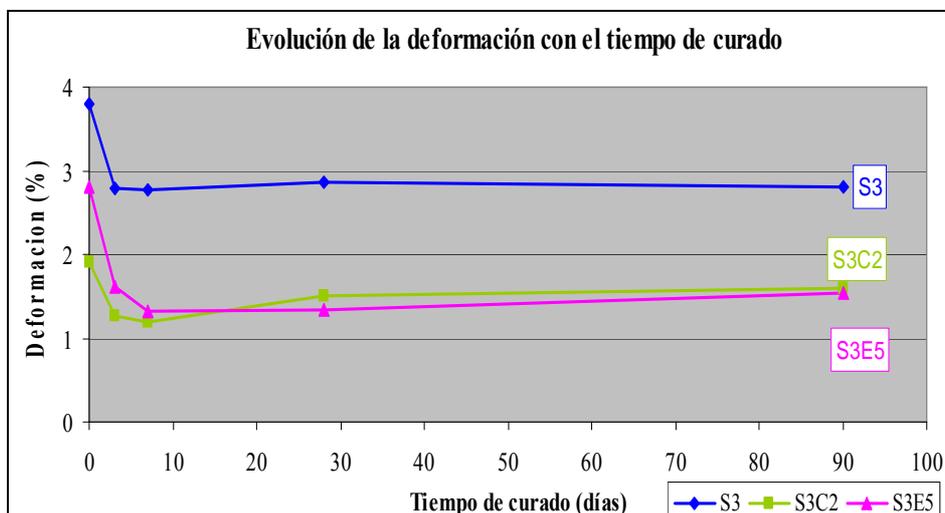


Figura 140. Evolución de la deformación con el tiempo de curado. Mezclas de S3

Las mezclas suelo-cal y suelo-escoria, incrementan significativamente la resistencia a la compresión simple con el tiempo de curado. Kanagawa & Kuwayama [124], ensayaron también probetas de compresión simple de mezclas de suelo y escoria blanca. En dicho artículo, los autores relacionan la disminución del contenido de humedad en las probetas con el incremento en la resistencia a compresión simple. Este incremento lo justifican con la hidratación de las fases minerales (principalmente $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$) que constituyen la escoria LFS que producen la cementación de la misma. Asimismo, el aumento de resistencia a compresión a largo plazo puede estar también relacionado con una reacción puzolánica (reacción que sucede cuando SiO_2 soluble se junta con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y con el tiempo endurece).

En nuestro caso, teniendo en cuenta que no ha existido pérdida de humedad por evaporación, gracias a la lámina impermeable que cubría las probetas y que el peso de las mismas se mantuvo constante con el tiempo de curado, podríamos estar ante el mismo caso que los citados autores. La diferencia es que en su investigación requieren de altos porcentajes de escoria (20%, 30%) para mejorar tierras blandas hasta conseguir propiedades que podrían alcanzarse con un 5% de cemento. Aunque los resultados

fueron esperanzadores, son porcentajes demasiado elevados para poder llevarse a la práctica, quedando claro que en su caso es preferible la estabilización con cemento.

En las mezclas de suelo con cal, **S1C2** y **S3C2**, la mejora se produce de forma inmediata (a los 0 días), con un incremento de la resistencia entorno al 35-40% respecto del suelo sin mezclar a la misma edad de curado. Como quedó explicado en el capítulo 3, la resistencia se incrementa y el módulo de deformación disminuye en una estabilización con cal, debido a dos tipos de reacciones: reacciones rápidas y reacciones a largo plazo. Dentro de las primeras está el intercambio iónico producido entre las arcillas y la cal; éste es el motivo por el que podemos observar ese aumento de resistencia en las primeras horas de mezcla con la cal.

A medida que aumenta la edad de curado, las mezclas con cal, tanto **S1C2** como **S3C2**, continúan aumentando la resistencia a compresión simple, alcanzando un incremento final del 75% y 65%, respectivamente. Este incremento de la resistencia se deberá a las reacciones de hidratación, reacciones puzolánicas y de carbonatación. Además el módulo de deformación disminuye, especialmente durante los tres primeros días de curado, a partir de ahí se mantiene sin casi variación.

El aumento de la resistencia en las mezclas con escoria durante las primeras horas (0 días) es menor que la resistencia ganada en el mismo periodo de tiempo por las muestras mezcladas con cal; es decir, la cal tienen mayor actividad en las reacciones de intercambio iónico a corto plazo.

Importante es el incremento que **S1E5** experimenta durante los primeros días de curado, así con tan solo 3 días se consigue un incremento en la resistencia a compresión simple del 72% respecto de la de S1. Además, los valores de resistencia siguen creciendo, alcanzándose una mejora final en la resistencia del 176% respecto del suelo original sin mezclar. La estabilización **S3E5** también aumenta su resistencia a compresión con el tiempo de curado, alcanzándose un incremento del 115% respecto a la resistencia del suelo sin mezclar S3.

Puede apreciarse, que aunque el suelo S1 partía de una resistencia a compresión menor que S3, la resistencia final alcanzada en sus mezclas con escoria es muy semejante.

Los resultados expuestos permiten proponer un comportamiento parecido de las mezclas de suelo estabilizadas bien con cal bien con escoria blanca de horno de cuchara; de ahí que pueda pensarse que las reacciones que se suceden en las mezcla suelo-escoria pueden ser semejantes a las ya conocidas con cal, reacciones de intercambio iónico, puzolánicas y de carbonatación de la cal. Incluso podemos decir que, en los suelos en estudio, presenta mejores resultados en cuanto a resistencia a compresión simple, la estabilización con escoria que la estabilización con cal, cuestión que puede ser asociada a la presencia de aluminatos cálcicos hidratables en la escoria blanca. En las figuras siguientes se muestra el aspecto final de las probetas de suelo y sus respectivas mezclas con cal o con escoria, a la edad de curado de 90 días, tras su rotura en la prensa.



Figura 141. Probeta de suelo S1 con 90 días de curado

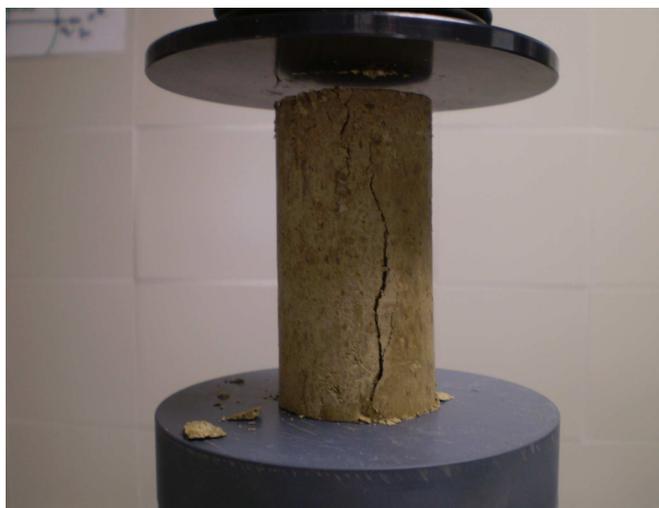


Figura 142. Probeta de mezcla con cal S1C2 con 90 días de curado



Figura 143. Probeta de mezcla con escoria S1E5 con 90 días de curado



Figura 144. Probeta de suelo S3 con 90 días de curado



Figura 145. Probeta de mezcla con cal S3C2 con 90 días de curado



Figura 146. Probeta de mezcla con escoria S3E5 con 90 días de curado

7.2.2 Ensayos de cambio volumétrico

Para que un material sea adecuado para emplearlo en la construcción de explanadas, tanto el asiento de colapso, el hinchamiento, como la expansión potencial, deben alcanzar valores muy moderados.

El PG-3 [26], en la caracterización de suelos, limita los suelos tolerables a un hinchamiento libre de 3% y un asiento en el ensayo de colapso a 1%; los marginales tienen la limitación de hinchamiento libre por debajo del 5%. Estas propiedades en la caracterización de suelos se ensayan teniendo en cuenta la energía de compactación del Próctor Normal, que fue lo que hicimos en el capítulo anterior.

A su vez, la norma 6.1.I.C. “Secciones de firme” [25], establece otras limitaciones cuando los suelos se vayan a emplear en la formación de explanadas. Las propiedades, en ésta norma, detalladas y limitadas para cada uno de los tipos de suelos, se determinarán de acuerdo a las condiciones especificadas de puesta en obra, es decir, en nuestro caso con la energía de compactación del Próctor Modificado; y su valor se empleará exclusivamente para la aceptación o rechazo de los materiales utilizables en la diferentes capas.

En dicha norma, la limitación que hay para emplear en explanadas construidas con un suelo tolerable (como es suelo S3) acerca de cambios volumétricos es, hinchamiento libre < 1%. Como el hinchamiento libre a PM del suelo S3 es del 5,8%, no puede utilizarse directamente, por ello procederemos a su estabilización hasta conseguir S-EST1 o S-EST2.

Para los suelos marginales, la anterior norma dice que su empleo en explanadas solo será posible si se estabilizan con cal o cemento hasta conseguir S-EST1 o S-EST2, que es lo que sucede en la mayoría de los suelos que estamos ensayando: S0, S1 y S2.

Las condiciones de los suelos S-EST1 y S-EST2, quedaron recogidas en el capítulo 3, y son las limitadas por el artículo 512 del PG-3 [26]. Si tenemos en cuenta que éste documento define suelo expansivo, a aquellos que presentan un % de hinchamiento libre en edómetro, con densidad y humedad del próctor de referencia, por encima de 3%, éste será el valor que estableceremos en nuestros ensayos, aunque su uso queda limitado a un estudio especial que fundamente su utilización.

Por otro lado, se denominan suelos colapsables, aquellos que tienen un asiento de colapso superior al 1% según NLT 254 [17], con la presión de ensayo de dos décimas de megapascal (0,2 MPa), por tanto éste será el valor que tomemos como límite para nuestras mezclas de suelo-cal y suelo-escoria.

Por último, la expansión potencial o estabilidad dimensional, es una propiedad muy importante cuando estamos hablando de arcillas y materiales expansibles como pueden ser las escorias de acería. Este ensayo se realizará según ASTM D4792 [67] y se tendrá en cuenta la ASTM D2940 [4], que establece como valor límite de expansión de los materiales empleados en la formación de carreteras el de 0,5%.

Hinchamiento libre y asiento de colapso

Determinamos el hinchamiento libre y el asiento de colapso para las mezclas en estudio, a partir de las normas UNE 103601 [47] y NLT-254[17], respectivamente. Estos ensayos se han realizado con muestra remodelada a la humedad óptima y energía de compactación de Próctor Modificado para todas las mezclas descritas. Los resultados son los que se muestran en la Tabla 103. En la misma tabla observamos el porcentaje de reducción de hinchamiento respecto del que tenía cada una de las muestras de suelo en estado natural.

Suelo	Muestra	Hinchamiento libre UNE 103601:96 (%)	Asiento de Colapso NLT 254 (%)	% Reducción de hinchamiento
S0	S0	3,73	0,10	-
	S0C2	1,10	0,05	71
	S0C3	0,61	0,05	84
	S0C4	0,50	0,00	87
	S0E3	1,60	0,05	57
S1	S1	3,17	0,05	-
	S1C1,5	1,59	0,05	50
	S1C2	0,87	0,00	73
	S1C2,5	0,66	0,00	79
	S1E5	1,18	0,05	63
S2	S2	11,41	0,16	-
	S2C2	10,13	0,11	11
	S2E5	10,08	0,11	12
S3	S3	5,80	0,00	-
	S3C2	2,16	0,05	63
	S3E5	2,35	0,05	59

Tabla 103. Hinchamiento libre y asiento de colapso para las diferentes mezclas de suelo

En el caso de todos los suelos en estudio el hinchamiento libre según PM fue superior a 3, lo que el PG-3 considera suelo expansivo. Por el contrario los resultados obtenidos en el ensayo de asiento de colapso, están dentro de todos los límites permitidos por la normativa. Tras su estabilización con cal o con escoria blanca, todas las muestras redujeron su hinchamiento por debajo del 3%, a excepción de S2 (caso que merece especial atención y que detallaremos más adelante). Como era de esperar, a igual proporción de cal o escoria, son mayores las reducciones de hinchamiento libre en las mezclas con cal; incluso en algunos casos, aunque la proporción de escoria empleada sea mayor que la de cal, la mejora experimentada en el hinchamiento es mayor para el caso de la estabilización con cal, por ejemplo: S0C2 (71% mejora) y S0E3 (57% mejora), igualmente sucede para las mezclas de los suelos S1 y S3.

La reducción es mayor cuanto mayor es el porcentaje de cal añadido. La reducción en el hinchamiento libre para muestras estabilizadas, es debida a la reducción de la capa doble entre las partículas de las arcillas con la aplicación de la cal o escoria LFS, lo que disminuye la susceptibilidad del material a los niveles de agua y aumenta la estabilidad al hinchamiento y/o retracción.

En todos los casos el asiento de colapso se mantiene o disminuye en las mezclas, siempre cumpliendo las prescripciones necesarias para la formación de explanadas (suelo no colapsable < 1%).

Podemos concluir, que las proporciones de la escoria blanca E1 utilizadas para estabilizar las muestras de suelo del estudio, son adecuadas, puesto que nos proporcionan resultados muy positivos y dentro de los límites establecidos por las prescripciones técnicas que dirigen el empleo de materiales en la formación de explanadas. Además son valores próximos a los alcanzados con las mezclas de cal.

El suelo S2, merece mención especial, ya que en estado natural presentó un hinchamiento libre según su Próctor Modificado de 11,41% (valor muy elevado) y apenas disminuyó ni en su estabilización con cal ni en su estabilización con escoria blanca, resultados muy diferentes a los obtenidos con los otros tres tipos de suelo. En ninguno de las dos mezclas se alcanzan valores de hinchamiento por debajo del 3% que es lo que indica el PG-3 [26] para su empleo en explanadas. La parte positiva de estos resultados, es que la reducción experimentada en la estabilización con uno y otro material son muy similares (reducción del 11% en la estabilización con el 2% de cal y del 12% con el 5% de escoria LFS).

Estos resultados del suelo S2 son coherentes con lo explicado anteriormente respecto a su composición química, rica en sulfatos, que hacen del suelo un material no apto para estabilización. Continuaremos con los ensayos de expansión potencial de las muestras y así podremos tener una idea más clara de lo que sucede, especialmente en el suelo S3.

Expansión potencial.

Como se vio en el capítulo 4, las escorias LFS pueden presentar un elevado potencial final de hinchamiento tras un largo periodo de tiempo (debido a la hidratación de algunos de sus componentes), por ello queremos saber el efecto que éstas pueden tener en su mezcla con cada uno de los suelos.

Para acelerar las reacciones de hidratación, responsables del hinchamiento a largo plazo de las escorias, se ha utilizado el ensayo de expansión potencial según la norma ASTM D 4792 [67]. Para cuantificar la expansión potencial de las mezclas con escoria, se compactan 3 probetas en el molde CBR con el peso específico máximo seco determinado en nuestro caso según Próctor Modificado y se sumergen en agua a una temperatura de 70°C por un mínimo de 7 días, o hasta que presenten incrementos diarios muy bajos o nulos. Los resultados del ensayo están en la Tabla 104 y queda representada la evolución de las muestras sometidas a ensayo en las graficas siguientes.

MUESTRA	S0E3	S1E5	S2E5	S3E5
Densidad de compactación (kg/cm ³)	1,62	1,59	1,70	1,88
Humedad de compactación (%)	22,3	23,4	19,3	14,6
Expansión potencial (20h) (%)	0,12	0,06	1,81	0,30
Expansión potencial (7días) (%)	0,13	0,07	1,84	0,29
Expansión potencial final (%)	0,14	0,09	1,84	0,29
Tiempo requerido (horas)	1500	3600	1273	1273

Tabla 104. Expansión potencial para las mezcla suelo-escoria LFS

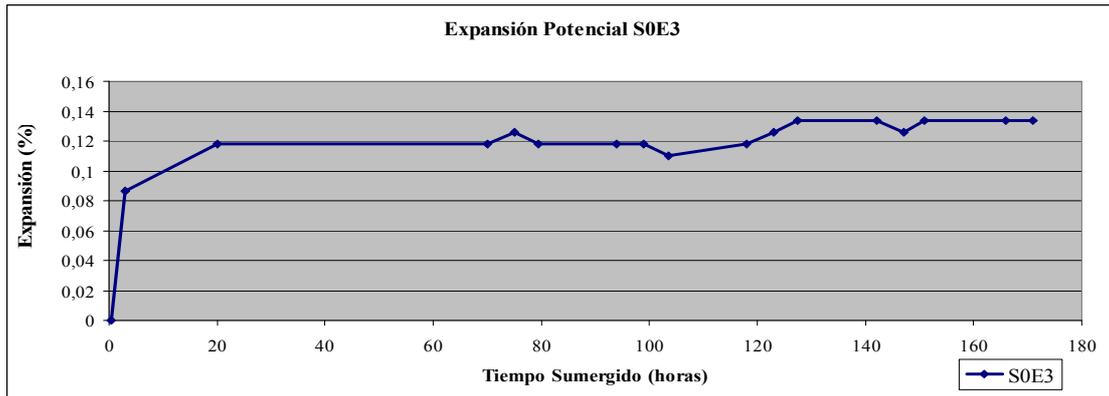


Figura 147. Expansión potencial de la mezcla S0E3 durante los 7 primeros días

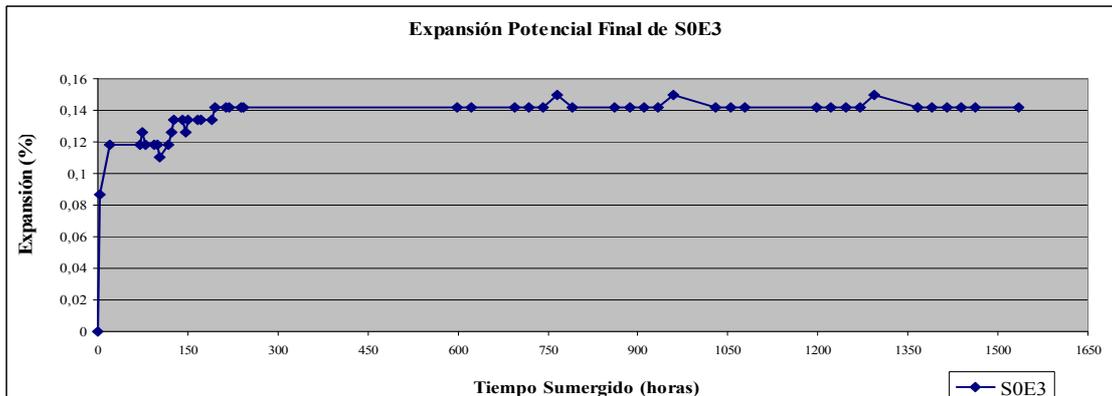


Figura 148. Expansión potencial final de la mezcla S0E3

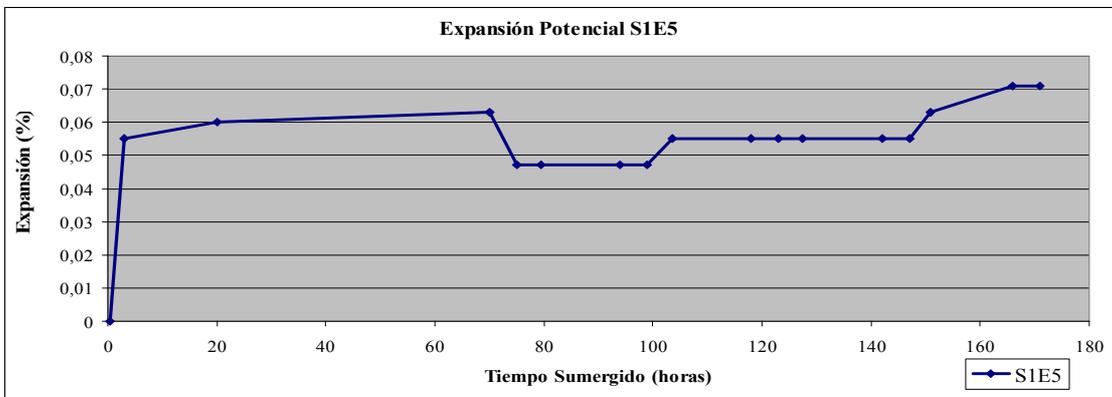


Figura 149. Expansión potencial de la mezcla S1E5 durante los 7 primeros días

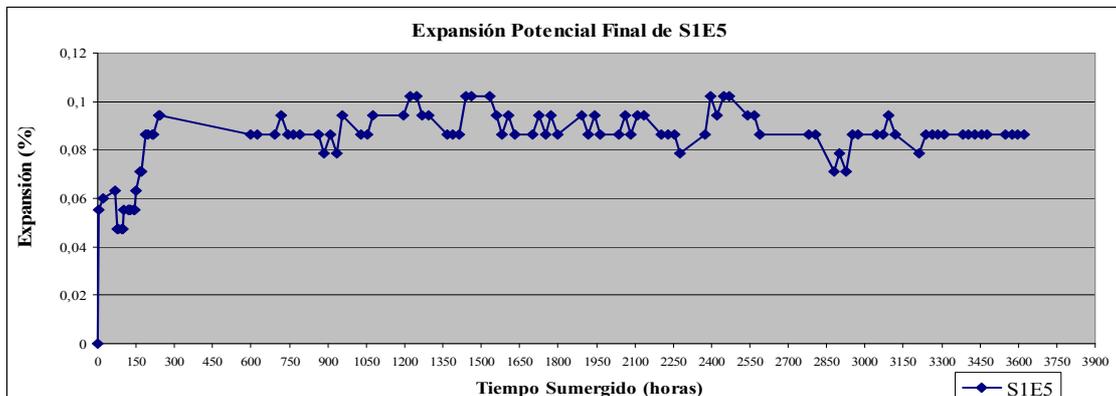


Figura 150. Expansión potencial final de la mezcla S1E5

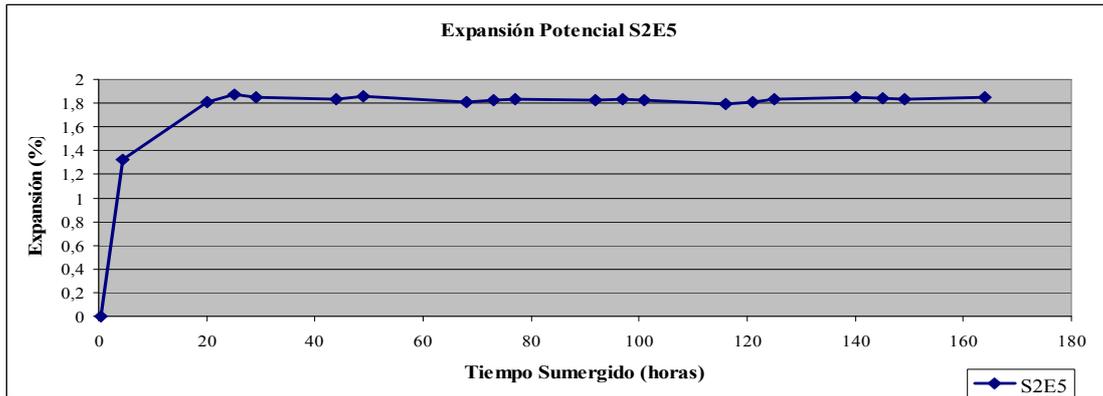


Figura 151. Expansión potencial de la mezcla S2E5 durante los 7 primeros días

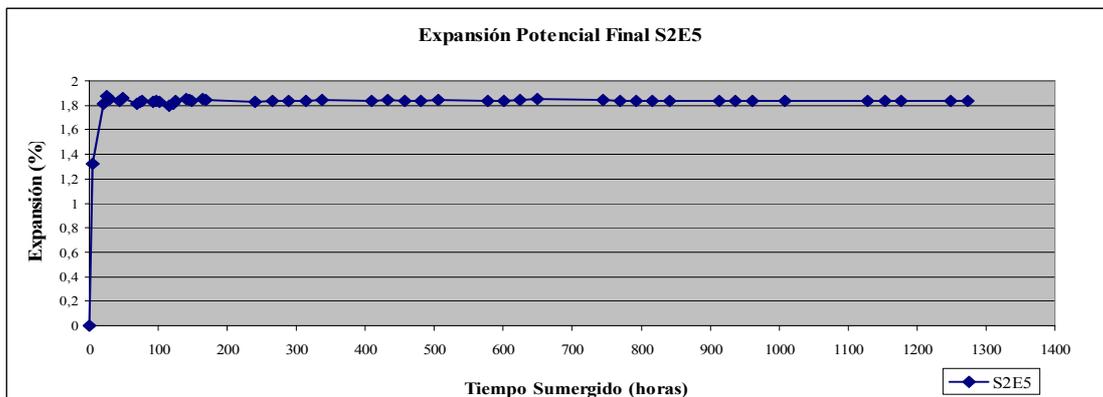


Figura 152. Expansión potencial final de la mezcla S2E5

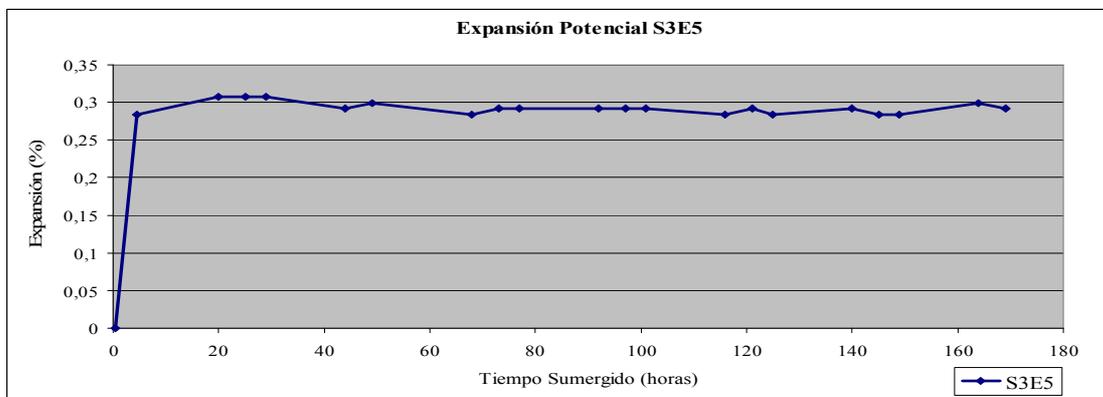


Figura 153. Expansión potencial de la mezcla S3E5 durante los 7 primeros días

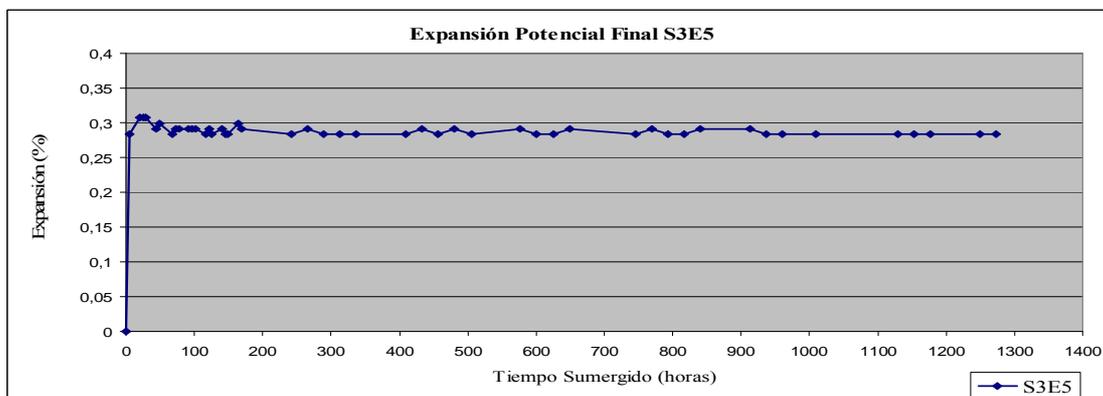


Figura 154. Expansión potencial final de la mezcla S3E5

Las mezclas con escoria de los suelos **S0**, **S1** y **S3**, no experimentan expansiones finales elevadas, alcanzando valores entorno a 0,14%, 0,10% y 0,30% tras largos periodos de tiempo. Como referencia para contrastar esta magnitud de hinchamiento acelerado, cabe señalar que la norma ASTM D2940 [4] “Graded Aggregate Materials for Bases or Subbases for Highways or Airports” admite una expansión máxima del 0,50% en el ensayo de hinchamiento acelerado según ASTM D 4792 [67]. Por tanto, las mezclas S0E3, S1E5 y S3E5, cumpliría ampliamente la normativa especificada, por lo que podrían utilizarse para la construcción de explanadas, que es el objeto de la presente investigación.

Puede observarse que la expansión potencial al finalizar los 7 primeros días de ensayo representa entre el 75 y el 100 % de la expansión potencial final, sobre cada una de las muestras. Incluso, ya durante las 20 primeras horas se alcanza entre el 65 y 100% de la expansión potencial final, según casos. Se trata de cuatro claros ejemplos donde la mezcla de suelos arcillosos con escoria LFS reduce tempranamente el potencial de hinchamiento de estas últimas.

La expansión inicial producida se debe, principalmente, a la hidratación de los óxidos de calcio (CaO) no combinado químicamente que quedan en la escoria. Cabe señalar que este compuesto se hidrata rápidamente en comparación con otros. La expansión lenta, probablemente se debe al contenido de periclase (MgO) de la escoria.

Nuevamente, caso excepcional es el del suelo **S2**. En su estabilización con escoria blanca E1, la mezcla **S2E5** alcanza una expansión final del 1,84%, éste valor se alcanzó durante los primeros días de ensayo y se mantuvo hasta transcurrido más de mes y medio. Con estos valores estaríamos fuera de lo establecido por la norma ASTM D2940 [4], que máximo admite una expansión final del 0,50% en el ensayo de hinchamiento acelerado. Por tanto, una característica más de la mezcla S2E5 que la hace estar fuera de las prescripciones establecidas para los materiales formadores de explanadas.

Estos resultados mantienen la explicación que hasta ahora venimos manteniendo respecto a éste suelo, de la que deducimos un problema inicial en el análisis químico.

A parte de PG-3 [26], que viene siendo una norma de referencia a lo largo de la presente Tesis Doctoral, en el que se indica que un suelo para ser estabilizado con cal o cemento ha de tener un contenido en $SO_3 < 1\%$, incluso dice que si $SO_3 > 0,5\%$ habrá que incrementar el control; encontramos diversa bibliografía en la que se documentan las reacciones que tienen lugar entre los sulfatos y la cal, y las consecuencias que ello tiene.

Un contenido elevado de sulfatos solubles en el suelo, va a provocar que la cal añadida para estabilizarlo, reaccione con estos sulfatos, formando compuestos inestables y expansivos como son:

- ETRINGITA: $Ca_6[Al(OH)_6]_2(SO_4)_3 \cdot 26H_2O$
- THAUMASITA: $Ca_3Si(OH)_6CO_3(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$

Para que se forme etringita se requiere una temperatura estándar (25°C), pH superior a 10, agua, aluminio, sulfato y calcio. Más tarde, como evolución del proceso, si existe

suficiente carbono, silicio y una temperatura inferior a 15°C se puede formar thaumasita.

El Departamento de Transportes de Texas Dallas y Fort Worth Districts no recomienda usar cal para estabilizaciones si el suelo tiene un contenido en sulfatos superior al 0,3% (3000 ppm), incluso siendo prudentes las concentraciones de sulfatos se limitan al 0,2% (2000 ppm) [116].

No hay un método seguro que permita determinar el contenido de sulfatos límite que nos permita estabilizar con cal, pero se ha observado, dependiendo del suelo, que un suelo con 0,3% de SO₄ soporta hinchamientos entre el 1% y el 3%. Además a lo largo del tiempo se pueden producir aportaciones de sulfatos procedentes de capas inferiores que ascienden por capilaridad o arrastrados por la lluvia.

La cal y el cemento suben el pH aproximadamente a 12,3, lo que provoca la disolución de la arcilla, dejando libre el aluminio. El agua puede proceder de diferentes fuentes: durante el proceso de estabilización, de la precipitación, de reservorios existentes bajo el suelo. Y el sulfato puede proceder del propio suelo rico en sulfatos, de la disolución del yeso o de minerales sulfurosos como la pirita.

Si se dan estas condiciones, se producen de manera abreviada según el modelo de Hunter [118], las siguientes reacciones:



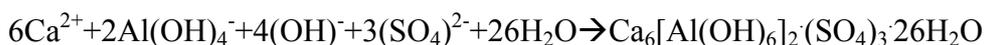
(Ionización de la cal; se eleva el pH por encima de 12,3)



(Disolución de la kaolinita a pH > 10,5)



(Disolución del yeso)

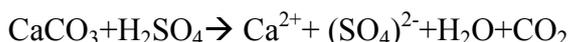


(Formación de etringita)

En este caso el aporte de iones sulfato procede de la disolución del yeso. Podría proceder de la oxidación de materiales sulfurosos como la pirita o marcasita (para ambos: FeS₂), donde se darían las siguientes reacciones:



(Oxidación de la pirita, crea un medio ácido: H₂SO₄)



(La caliza se diluye en el medio ácido, quedando libres iones sulfato)



(Los iones sulfatos precipitan en forma de yeso (CaSO₄·2H₂O) si hay calcio suficiente y vuelven a darse las reacciones indicadas en el párrafo anterior)

Esta transformación del mineral de pirita a hidróxido férrico y yeso da como resultado un aumento de volumen. [92]

La formación de etringita y thaumasita es la responsable del levantamiento o hinchamiento de capas estabilizadas en varios estudios realizados. [116, 129, 155, 158, 159, 192, 213]. La velocidad a la que tienen lugar estas reacciones dependen de diversos factores, como son: temperatura, concentración de reactivos y productos, tamaño del cristal de los reactivos. Por ejemplo, granos grandes de yeso se disuelven más lentamente que los pequeños.

La National Lime Association [75] recomienda técnicas de construcción modificadas cuando se trata de estabilizar suelos con altos contenidos de sulfatos. Tres de las técnicas que recomiendan son:

- a) Aplicar la cal al suelo y dejarlo madurar (reaccionar) de 1 a 3 días antes de la compactación final. Durante este periodo reacciona la mayor parte de los sulfatos solubles con la cal, aunque tras la compactación puede seguir reaccionando y formándose etringita. Se ha comprobado que mejora el tratamiento y disminuye el hinchamiento.
- b) Elevar la humedad de la mezcla en un 3-5% de la humedad óptima. Si existe suficiente agua disponible, toda la cal es capaz de reaccionar. Además la densidad de compactación es menor, por lo que existe mayor espacio de poros, que permiten dejar sitio a los productos expansivos como la etringita, reduciéndose así el hinchamiento.
- c) Aplicar el contenido de cal en un doble tratamiento. Se trata de repartir en 2 aplicaciones el contenido óptimo de cal. Por una parte tendría lugar el proceso explicado en el apartado a), en el que se formaría etringita, con la consecuente expansión y tras un periodo de maduración se haría la segunda aplicación de cal que continuaría con las reacciones puzolánicas para formar productos cementicios que unen las partículas del suelo y en ocasiones aumenta la resistencia del mismo. Pero el problema de expansión continúa en algunos suelos, incluso después de tres tratamientos con cal. Si el suelo tiene suficientes sulfatos solubles, puede continuar la formación de etringita, incluso en capas inferiores a las previamente estabilizadas. El doble tratamiento con cal es efectivo si el nivel de sulfatos no es muy alto y el suelo no contienen minerales sulfurosos [129]. Sin embargo, sólo es efectivo si se dan largos periodos de tiempo entre ambas aplicaciones y los porcentajes de agua y cal son óptimos en la primera aplicación. No hay demostradas aplicaciones con doble tratamiento con cal con éxito.

Existen otro tipo de recomendaciones para la estabilización de suelos con alto contenido en sulfato [129]:

- a) Bredenkamp [80] en su tesis doctoral recomienda usar bajas cantidades de cal para estabilizar suelos con sulfatos. La cal tiene mayor contenido en Ca^{+2} que el cemento o las cenizas, por lo que al estabilizar un suelo rico en sulfatos, se espera que se forme mayor cantidad de etringita y por tanto exista un mayor levantamiento.

- b) Usar material estabilizador no basado en el calcio. La utilización de estabilizadores sin calcio evita la formación de etringita y thaumasita. Petry y Littler [174] dicen que para que el fenómeno de levantamiento ocurra es necesario la formación de etringita. Hay varios estabilizadores no cálcicos en el mercado pero carecen de utilización histórica. Habría que realizar estudios con ellos en suelos con sulfatos.
- c) Usar geotextiles y/o geomallas. Puede considerarse una alternativa en suelos con altas plasticidad y alto contenido en sulfatos. El objetivo del geotextil es separar las capas del pavimento del suelo natural para prevenir infiltraciones de la arcilla en las capas superiores por la acción dinámica de las cargas del tráfico. Si el suelo natural no es una arcilla altamente plástica, pueden usarse geomallas. Existen buenos y malos resultados con esta solución.
- d) Pretratamientos con componentes báricos: Ferris et al [97], sugieren un primer tratamiento con bario, seguido de un tratamiento con cal. Los sulfatos son atacados por el Bario y en consecuencia la posterior aplicación con calcio estabiliza la arcilla exitosamente, sin formación de materiales expansivos. Aunque los resultados son buenos en laboratorio, no se han aplicado al campo por el impacto medioambiental del Bario.
- e) Colocar una capa de material con baja plasticidad entre el suelo natural (con alta plasticidad) y la capa de asfalto estabilizado.
- f) Compactar la capa estabilizada a la menor densidad posible para reducir la expansión horizontal. Al aumentar el espacio de poros, existe mayor espacio para el crecimiento de materiales expansivos y da un resultado final de menor expansión total.

Una vez expuestas las consecuencias de estabilizar con cal un suelo rico en sulfatos, prestaremos especial atención a los resultados obtenidos en la caracterización química de éstas mezclas tras el ensayo de expansión potencial, donde pueden aparecer los compuestos anteriormente descritos. Esta caracterización se describe en el apartado siguiente.

La Figura 155 es una imagen del baño donde se sumergen las probetas de ensayo y la Figura 156, Figura 157 y Figura 158 son fotografías de las probetas de suelo con escoria blanca ensayadas a expansión potencial.



Figura 155. Baño para probetas en el ensayo de expansión potencial



Figura 156. Probeta de S1E5 tras el ensayo de expansión potencial



Figura 157. Probeta de S2E5 tras el ensayo de expansión potencial



Figura 158. Probeta de S3E5 tras el ensayo de expansión potencial

Caracterización química de los suelos estabilizados sometidos a ensayo de expansión potencial.

Las técnicas y ensayos utilizados para la caracterización química de las muestras de suelo mezcladas con escoria blanca, y sometidas al ensayo de expansión potencial fueron:

1. Espectrofotometría de absorción atómica, fluorescencia de rayos-X y combustión y análisis de gases, para el análisis químico.
2. Difracción de rayos-X.
3. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial.

Análisis mediante espectroscopía de fluorescencia de rayos X

Se realizaron los análisis químicos para determinar los óxidos principales presentes en las muestras de suelo estabilizadas con escoria blanca tras ser sometidas a ensayo de expansividad. En la Tabla 105 se muestra los resultados del análisis de espectrometría para las tres mezclas de suelos y escoria blanca, y en la Tabla 106 se muestra los resultados de carbono y azufre determinados mediante combustión.

Muestra tras expansividad	%SiO ₂	%CaO	%Al ₂ O ₃	%SO ₃	%MgO	%Fe ₂ O ₃	%K ₂ O	Perdida Fuego*
S1E5	22,0	24,7	9,5	<1,00	10,1	3,4	1,8	27,4
S2E5	25,6	23,3	12,3	5,3	4,8	3,9	2,2	22,0
S3E5	49,2	7,1	22,4	<1,00	1,3	6,8	2,9	9,0

* Calculado a partir de la pérdida de masa obtenida del análisis TGA-DTA

Tabla 105. Composición química de mezclas de suelo-escoria blanca tras expansividad

Análisis de carbono y azufre mediante combustión

Muestra tras expansividad	%C	%S
S1E5	6,54	0,16
S2E5	4,36	1,63
S3E5	1,20	0,05

Tabla 106. Análisis de C y S mediante combustión

Análisis mineralógico por difracción de rayos X

El ensayo fue realizado mediante la técnica de difracción de rayos-X, utilizando un equipo PHILIPS PW1729/40, con un tubo emisor con anticátodo de cobre de longitud de onda $\lambda=1,542 \text{ \AA}$.

Las Figura 159, Figura 160 y Figura 161 muestran los difractogramas de rayos-X de las muestras S1E5, S2E5 y S3E5, respectivamente. Por otro lado, la Tabla 107 contiene la proporción de cada mineral en cada una de las muestras.

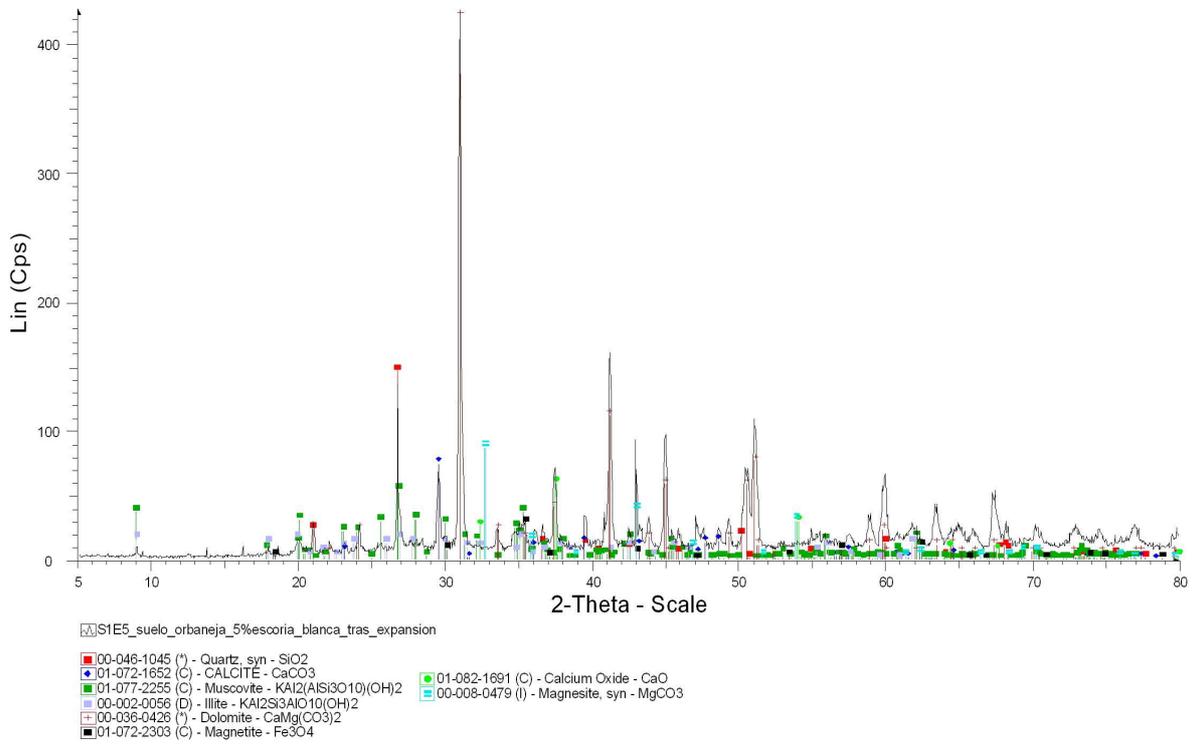


Figura 159. Difracción rayos X de la mezcla S1E5 tras ensayos de expansividad

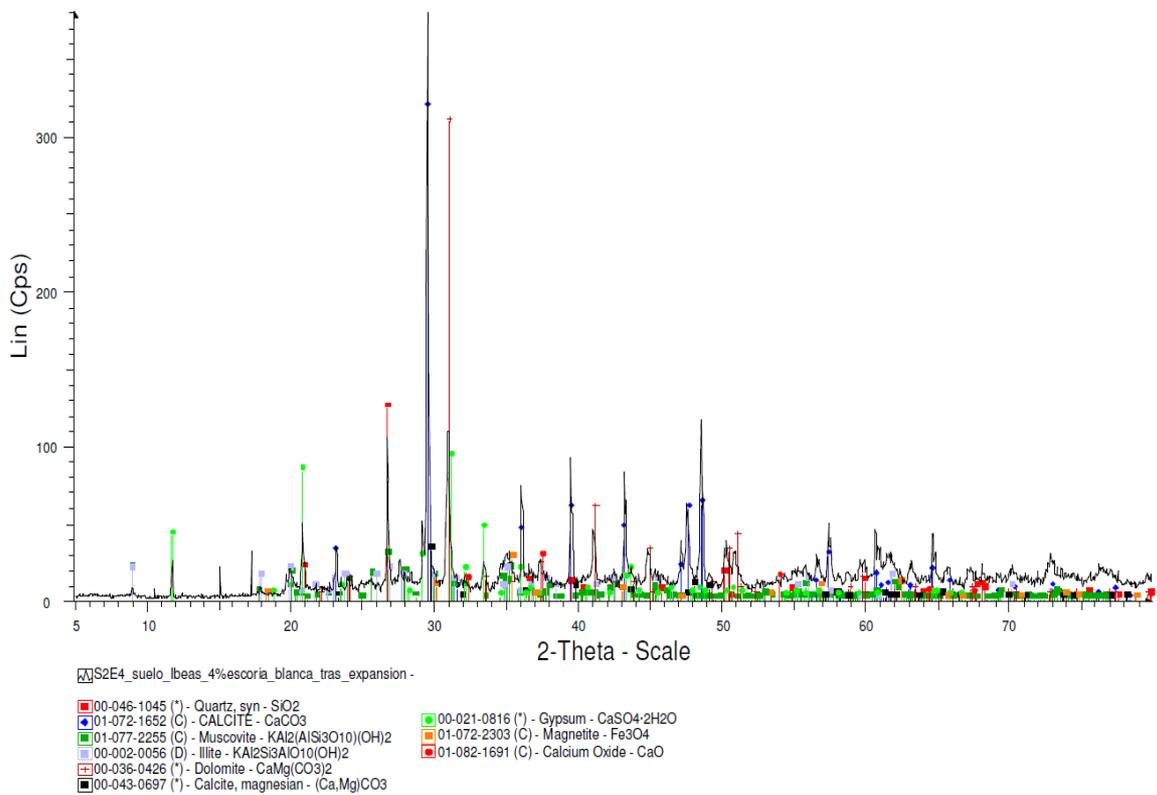


Figura 160. Difracción rayos X de la mezcla S2E5 tras ensayos de expansividad

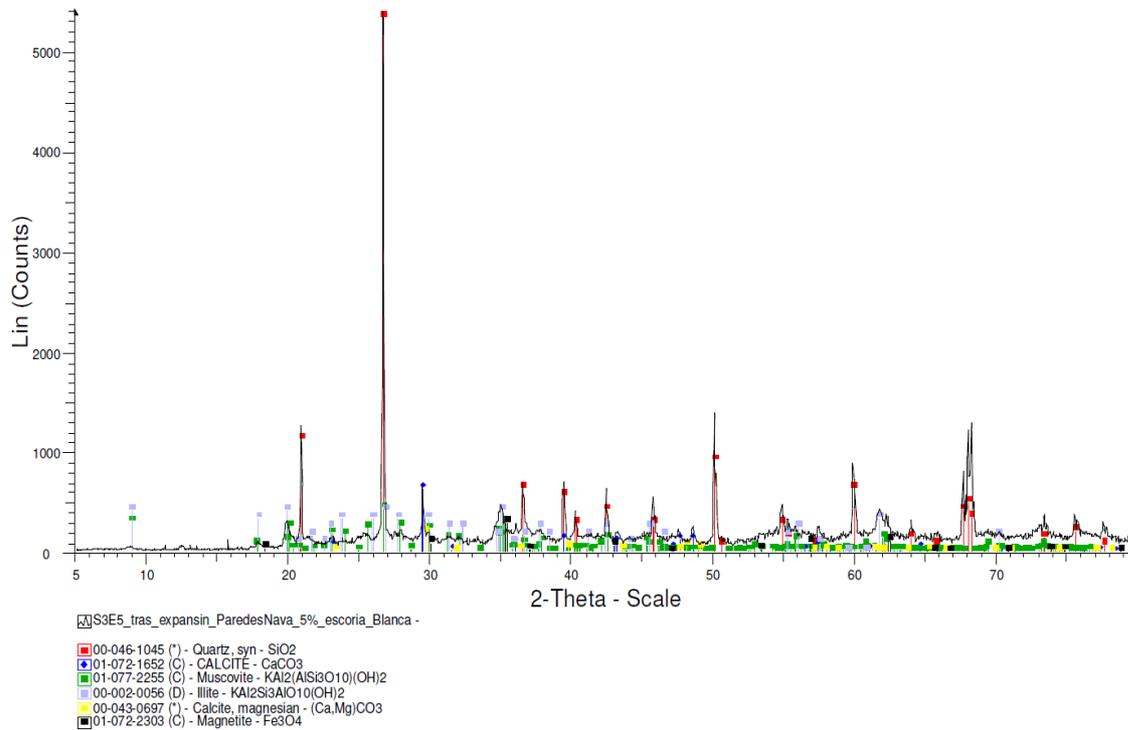


Figura 161. Difracción rayos X de la mezcla S3E5 tras ensayos de expansividad

Mineral	Fórmula	Proporción		
		S1E5	S2E5	S3E5
Cuarzo	SiO ₂	medium	medium	major
Calcita	CaCO ₃	medium	major	medium
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	medium	minor	medium
Illita	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	medium	medium	medium
Dolomita	CaMg(CO ₃)	major	medium	-
Magnetita	Fe ₃ O ₄	minor	minor	minor
Óxido de Calcio	CaO	minor	minor	-
Magnesita	MgCO ₃	minor	-	-
Calcita, magnesia	(Ca, Mg)CO ₃	-	minor	minor
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-	medium	-

Tabla 107. Compuestos presentes en la mezclas de suelo-escoria blanca tras expansividad según XRD

Análisis termogravimétrico y calorimétrico

En las figuras siguientes se muestra el análisis TGA-DTA, termogravimétrico y calorimétrico realizado sobre las mezclas S1E5, S2E5 y S3E5 tras el ensayo de expansividad.

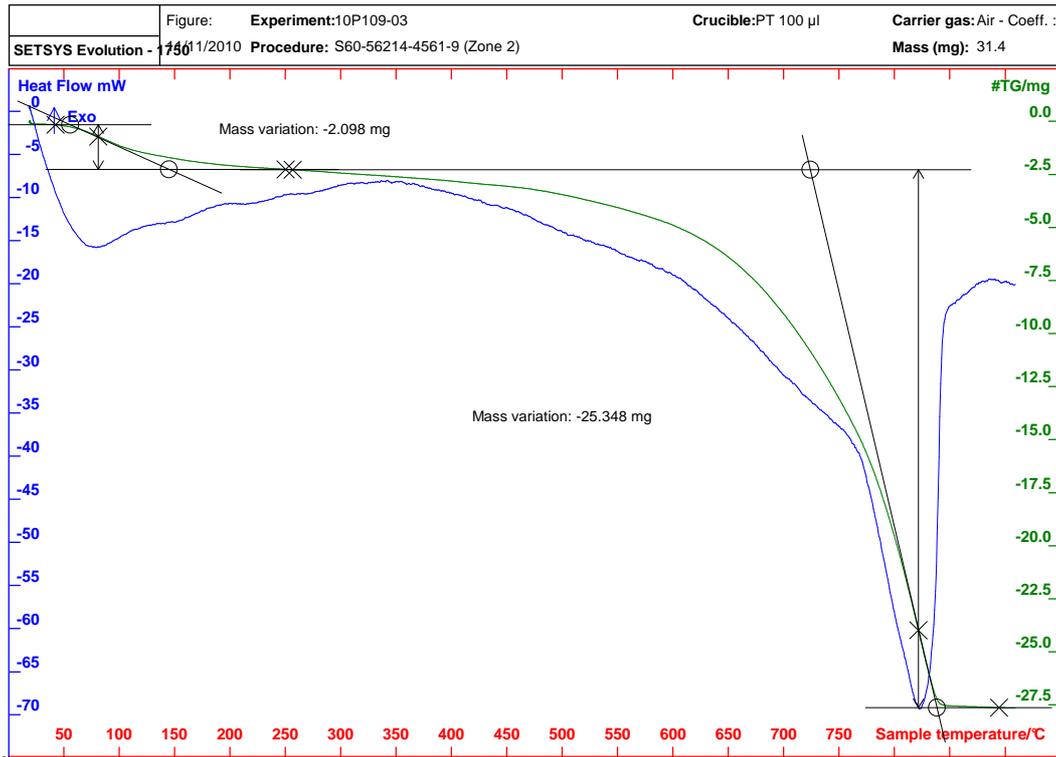


Figura 162. Análisis térmico del la mezcla S1E5 tras el ensayo de expansividad

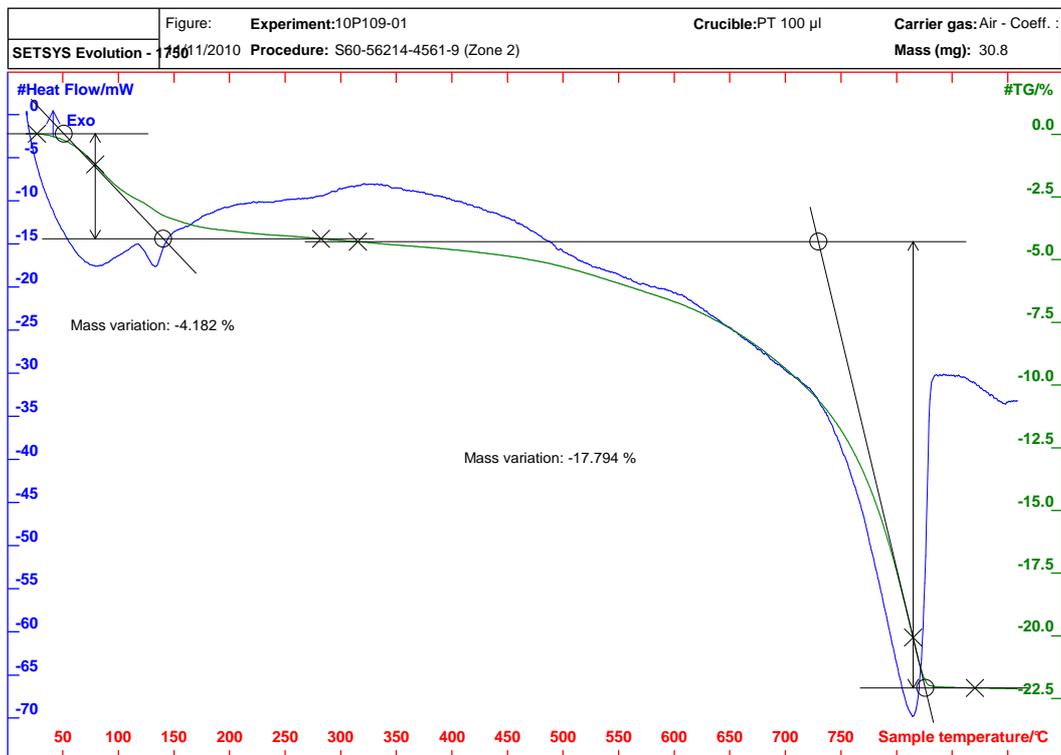


Figura 163. Análisis térmico del la mezcla S2E5 tras el ensayo de expansividad

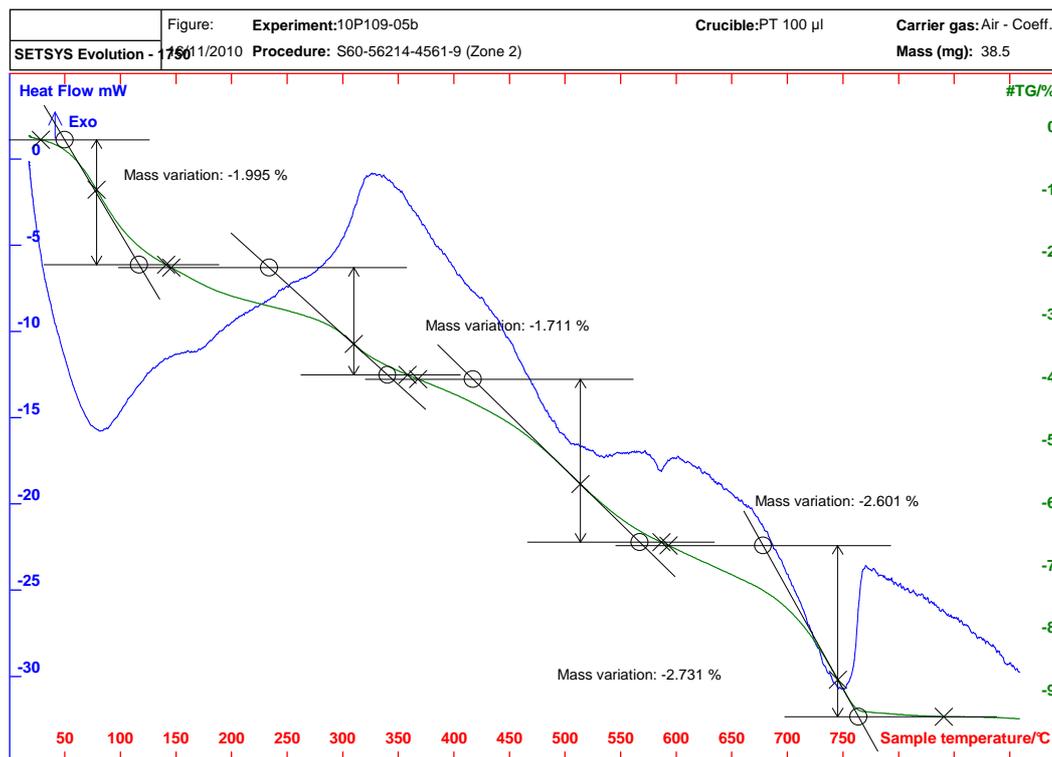


Figura 164. Análisis térmico del la mezcla S3E5 tras el ensayo de expansividad

Interpretación de los resultados de caracterización química de las muestras suelo-escoria sometidas a expansión potencial

Si comparamos los resultados de éste último análisis químico, con el análisis del suelo natural sin estabilizar, las principales diferencias que se observan es una leve disminución general en el contenido de cal y de magnesia, poco relevantes y propia de la dispersión natural de resultados. Un dato visible es la reducción de sulfatos (SO_3) en la composición química de la mezcla S2E5 ($\text{SO}_3=5,5\%$) respecto del suelo S2 ($\text{SO}_3=9,6\%$), reducción también propia de la variabilidad de las muestras destinadas a análisis.

La mezcla de suelo S3E5, es la única que en su análisis de XRD no tiene CaO; es posible que al tratarse de un suelo mayoritariamente silíceo, toda la cal libre contenida en la escoria blanca que hemos añadido haya sido adsorbida sobre las partículas de arcilla, e incluso reaccionado con el silicio en reacciones puzolánicas.

En cuanto al análisis TGA-DTA de las muestra suelo-escoria tras el ensayo de expansividad, se observa gran semejanza con dicho análisis realizado sobre las muestras de suelo inicial.

La mezcla S1E5 presenta una pérdida inicial de masa del 2%, producida hasta los 150°C, asociada a la presencia de humedad y de materia orgánica. Desde los 400°C hasta los 800°C se produce la descomposición del carbonato cálcico-magnésico de la dolomita, superpuesto con la pérdida de agua interlamilar de la arcilla y con la descomposición de la calcita y magnesita, que supone en total, una pérdida de masa del 25%. Se adivina una leve deshidratación de aluminatos hidratados de la escoria blanca.

La mezcla S2E5, al igual que sucedía con el suelo S2 sin mezclar, presenta en su termogravimetría, la deshidratación del yeso en torno a los 150°C, asociado a una pérdida de masa entorno al 4%. Entre los 400°C y 800°C se observa la descomposición de la dolomita, la magnesita y la calcita y la pérdida de agua interlaminar de la arcilla, con una pérdida de masa del 18%. También se adivina la deshidratación de aluminatos.

La mezcla S3E5, sufre una deshidratación de aluminatos entre los 150°C y los 350°C, asociada a una pérdida de masa del 1,7%. Las pérdidas de masa previas a éstas, hasta los 150°C, pueden ser asociadas a la descomposición de la materia orgánica. También se adivina la deshidratación de aluminatos. Entre los 350°C y los 500°C se produce la pérdida de agua interlaminar de las arcillas, que supone un 2,6% de pérdida de masa. Entre los 600°C y 800°C, se produce la descomposición de la calcita, con una pérdida de masa del 2,7%

7.2.3 Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas

A continuación se expone un resumen de resultados de los ensayos geotécnicos realizados sobre todas las muestras de suelo estabilizadas, bien con cal, bien con la escoria blanca de horno de cuchara.

Resumen de ensayos geotécnicos sobre el suelo S0 estabilizado

Propiedad Física		S0	S0C2	S0C3	S0C4	S0E3
Límites de Atterberg	LL (%)	75,3	65,10	61,20	60,30	66,30
	LP (%)	26,9	32,20	36,30	40,00	29,20
	IP	48,4	32,9	24,9	20,3	37,1
Próctor Modificado	Densidad conjunto (g/cm ³)	1,64	1,62	1,62	1,62	1,62
	Humedad óptima (%)	21,1	22,3	22,3	22,3	22,3
Próctor de referencia		PM	PM	PM	PM	PM
Ensayo CBR	Densidad (g/cm ³)	1,65	1,63	1,62	1,62	1,62
	Absorción (%)	5,00	1,6	1,5	1,4	2,6
	Hinchamiento (%)	4,97	0,52	0,47	0,36	1,28
	Índice CBR (%)	3,20	59,5	84,4	78,5	31,2
	% Mejora en CBR	-	1759	2538	2353	875
Hinchamiento Libre (%)		3,73	-	0,61	-	1,6
Ensayo de Colapso (%)		0,10	-	0,05	-	0,05
Expansión potencial (%)	Trascurridas 20h (%)	-	-	-	-	0,12
	Trascurridos 7 días (%)	-	-	-	-	0,13
	Expansión potencial final (%)	-	-	-	-	0,14
	Tiempo para Expan.final (h)	-	-	-	-	1500
Clasificación Suelo	PG-3	Marginal	S-EST1	S-EST1	S-EST1	S-EST1
	Casagrande	CH	MH	MH	MH	CH
	HRB (índice de grupo)	A-7-6 (28)	A-7-5 (20)	A-7-5 (15)	A-7-5 (13)	A-7-6 (22)

Tabla 108. Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas de suelo S0

Resumen de ensayos geotécnicos sobre el suelo S1 estabilizado

Propiedad Física		S1	S1C1,5	S1C2	S1C2,5	S1E5
Límites de Atterberg	LL (%)	67,9	54,1	54,4	51,3	56,5
	LP (%)	25,2	30,6	32,7	34,9	29,4
	IP	42,7	23,5	21,7	16,4	27,1
Próctor Modificado	Densidad conjunto (g/cm ³)	1,61	1,58	1,58	1,58	1,59
	Humedad óptima-natural (%)	22,5	23,5	23,5	23,5	23,4
Próctor de referencia		PM	PM	PM	PM	PM
Ensayo CBR	Densidad (g/cm ³)	1,61	1,58	1,58	1,58	1,59
	Absorción (%)	4,20	4,2	4,0	3,6	4,2
	Hinchamiento (%)	3,41	0,68	0,65	0,28	0,8
	Índice CBR (%)	2,80	51,1	58,6	64,1	52,6
	% Mejora en CBR	-	1725	1993	2189	1779
Hinchamiento Libre (%)		3,17	1,59	0,87	0,66	1,18
Ensayo de Colapso (%)		0,05	0,05	0	0,00	0,05
Resistencia a compresión simple (kPa)	0 días (kPa)	472,6	-	661,7	-	499,6
	3 días (kPa)	448,2	-	703,0	-	811,5
	7 días (kPa)	460,0	-	717,9	-	914,0
	28 días (kPa)	422,3	-	782,9	-	1096,1
	90 días (kPa)	458,4	-	827,3	-	1305,4
	% Mejora final respecto de S1	-	-	75	-	176
Expansión potencial (%)	Trascurridas 20h (%)	-	-	-	-	0,06
	Trascurridos 7 días (%)	-	-	-	-	0,07
	Expansión potencial final (%)	-	-	-	-	0,09
	Tiempo para Expan.final (h)	-	-	-	-	3600
Clasificación Suelo	PG-3	Marginal	S-EST1	S-EST1	S-EST1	S-EST1
	Casagrande	CH	MH	MH	MH	CH
	HRB (índice de grupo)	A-7-6 (40)	A-7-5 (23)	A-7-5 (23)	A-7-5 (17)	A-7-5 (26)

Tabla 109. Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas de suelo S1

Resumen de ensayos geotécnicos sobre el suelo S2 estabilizado

Propiedad Física		S2	S2C2	S2E5
Límites de Atterberg	LL (%)	84,9	85,4	86,9
	LP (%)	28,8	32,6	41,9
	IP	56,1	52,8	45,0
Próctor Normal	Densidad conjunto (g/cm ³)	1,42	-	-
	Humedad óptima (%)	30,1	-	-
Próctor Modificado	Densidad conjunto (g/cm ³)	1,70	1,70	1,70
	Humedad óptima (%)	19,3	19,3	19,3
Próctor de referencia		PN	PM	PM
Ensayo CBR	Densidad (g/cm ³)	1,42	1,70	1,70
	Absorción (%)	5,10	9,20	11,00
	Hinchamiento (%)	3,65	10,18	9,69
	Índice CBR (%)	-	1,40	4,30
	% Mejora en CBR	-	-	207
Hinchamiento Libre (%)		0,6	11,4	10,1
Ensayo de Colapso (%)		0,2	0,16	0,11
Expansión potencial (%)	Trascurridas 20h (%)	-	-	1,81
	Trascurridos 7 días (%)	-	-	1,84
	Expansión potencial final (%)	-	-	1,84
	Tiempo para Expan. final (h)	-	-	1273
Clasificación Suelo	PG-3	Marginal	Marginal	Marginal
	Casagrande	CH	CH	MH
	HRB (índice de grupo)	A-7-6 (44)	A-7-5 (42)	A-7-5 (37)

Tabla 110. Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas de suelo S2

Resumen de ensayos geotécnicos sobre el suelo S3 estabilizado

Propiedad Física		S3	S3C2	S3E5
Límites de Atterberg	LL (%)	52,4	52,3	57
	LP (%)	21,4	32,3	26,5
	IP	31,0	20	30,5
Próctor Normal	Densidad conjunto (g/cm ³)	1,65	-	-
	Humedad óptima (%)	21,1	-	-
Próctor Modificado	Densidad conjunto (g/cm ³)	1,89	1,88	1,88
	Humedad óptima (%)	14,1	14,6	14,6
Próctor de referencia		PN	PM	PM
Ensayo CBR	Densidad (g/cm ³)	-	1,89	1,88
	Absorción (%)	-	5,10	3,50
	Hinchamiento (%)	-	6,19	2,50
	Índice CBR (%)	-	2,30	18,00
	% Mejora en CBR	-	-	683
Hinchamiento Libre (%)		0,90	5,80	2,16
Ensayo de Colapso (%)		0,16	0,00	0,05
Resistencia a compresión simple (kPa)	0 días (kPa)	-	553,8	873,8
	3 días (kPa)	-	624,6	881,5
	7 días (kPa)	-	589,6	903,7
	28 días (kPa)	-	739,8	998,0
	90 días (kPa)	-	717,9	1036,5
	% Mejora final respecto de S3	-	-	66
Expansión potencial (%)	Trascurridas 20h (%)	-	-	0,30
	Trascurridos 7 días (%)	-	-	0,29
	Expansión potencial final (%)	-	-	0,29
	Tiempo para expan. final (h)	-	-	1273
Clasificación Suelo	PG-3	Tolerable	S-EST1	S-EST1
	Casagrande	CH	MH	CH
	HRB (índice de grupo)	A-7-6 (29)	A-7-5 (21)	A-7-5 (29)

Tabla 111. Resumen de ensayos geotécnicos de las mezclas de suelo S3

Las estabilizaciones con cal o escoria de los suelos S0, S1 y S3 alcanzan los requisitos exigidos para S-EST1 según el PG-3 [26]. No sucede lo mismo con S2, debido a su alto contenido en sulfatos, como hemos ido explicando a lo largo del presente capítulo.

Para la mayoría de las estabilizaciones con cal, las mezclas quedan caracterizadas según la clasificación unificada de Casagrande como MH – limos de alta plasticidad con arena, que corresponde con limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomea, limos elásticos. Por el contrario las estabilizaciones con escoria blanca E1, en su mayoría no experimentan un cambio de clase respecto al suelo original, manteniendo la clasificación CH - arcillas de alta plasticidad.

Según la clasificación la ASSHTO, la mayoría de las estabilizaciones con cal o con escoria blanca E1, quedan englobadas dentro de la clase A-7-5 (suelos arcillos, de pobre a mala calidad), con índices de grupo variables entre 13 a 42.

7.2.4 Ensayos de lixiviación.

Al poner en contacto materiales sólidos con el agua, sea esta de lluvia, regado, freática escorrentía, etc., la ciencia básica nos indica que alguno de los componentes de dicho material sólido pueden pasar al agua por disolución y ser arrastrados por ella en su curso natural. Si los citados componentes solubles son inocuos para la salud de personas, animales o plantas, el caso no plantea problemas; pero si, por el contrario, alguno de ellos es tóxico, es preciso controlar su velocidad de disolución y su concentración en el agua residual. Los ensayos de lixiviación son empleados para simular las condiciones reales de disolución espontánea de sales y compuestos en las aguas naturales.

En nuestro caso se han llevado a cabo ensayos de lixiviación según la propuesta metodológica de IHOBE sobre muestras de escoria blanca y mezclas del suelo S1 y del suelo S3 con escoria blanca. El ensayo se ha desarrollado según UNE EN 12457-03 en dos etapas [61], con relaciones (líquido / sólido) L/S =2 en primera etapa y L/S =8 en la segunda.

La tabla adjunta recoge los resultados obtenidos y los límites máximos establecidos según el Decreto 34/2003 del 18 de febrero [9], de la Comunidad Autónoma del País Vasco y el Decreto 104/2006 del 19 de octubre de la Comunidad Autónoma de Cantabria [10] y el Decreto 32/2009 de 24 de febrero de la Comunidad de Cataluña [8], para los parámetros más representativos de cara a una primera y breve aproximación al comportamiento medio ambiental.

Parámetro	Muestra	A ₂₋₁₀ (mg/kg)	Decreto 34/2003 (mg/kg)	Decreto 104/2006 (mg/kg)	Decreto 32/2009 (mg/kg)
Sulfatos	E1	2,3	377	1000	1000
	S1E5	3,6			
	S3E5	4,1			
Fluoruro	E1	<0,01	18	10	18
	S1E5	<0,01			
	S3E5	<0,01			
Cd	E1	<0,001	0,009	0,04	0,04
	S1E5	<0,001			
	S3E5	<0,001			
Cr total	E1	<0,01	2,6	0,5	0,5
	S1E5	<0,01			
	S3E5	<0,01			
Ni	E1	<0,05	0,8	0,4	0,4
	S1E5	<0,05			
	S3E5	<0,05			
Pb	E1	<0,001	0,8	0,5	0,5
	S1E5	<0,001			
	S3E5	<0,001			
Zn	E1	<0,05	1,2	4	4
	S1E5	<0,05			
	S3E5	<0,05			

Tabla 112. Resultados de lixiviados y límites legales sobre la LFS y su mezcla con los suelos S1 y S3

No se ha detectado la presencia de ningún elemento químico peligros en la escoria blanca sola y por tanto no se supera ninguno de los límites permitidos por los decretos mostrados. Como era de esperar, debido a los nulos problemas de lixiviación detectados en la escoria blanca, la mezcla de ésta con los distintos suelos naturales (en las proporciones aquí estudiadas) tampoco presenta problemas de lixiviación como consecuencia de la mezcla.

Los resultados pueden calificarse como buenos, aunque nunca debemos darnos por satisfechos en la mejora del comportamiento medioambiental de los materiales de construcción.

7.2.5 Ensayos de durabilidad.

Se realizaron ensayos de durabilidad para los suelos S1 y S3, que son aquellos suelos cuyos resultados en ensayos anteriores nos dieron una idea clara de su susceptibilidad a ser estabilizados con escoria blanca LFS y los buenos resultados obtenidos con esta.

Se realizaron dos tipos de ensayos, el de humedad-sequedad, según NLT 302-72 [18] y congelación-deshielo, según NLT 303-72 [19]. Ambas normas se refieren a probetas de suelo-cemento, por lo que no se ajusta exactamente al material que nosotros tratamos en esta Tesis. Se trata de ver el comportamiento de nuestro suelo estabilizado con escoria blanca LFS a lo largo del tiempo, aunque no puede hacerse una comparación exacta con lo que la normativa de referencia expone. Por ello, aplicaremos estos ensayos a probetas de suelo-cal, que nos servirán de referencia y a las probetas de suelo-escoria, y haremos una comparación entre ellas.

Ensayo de humedad-sequedad

Se construyeron cuatro probetas para cada suelo, dos de ellas con cal y dos con escoria, y se las sometió a cada una de ellas a 12 ciclos de 48 horas cada uno, de humedad-sequedad. En la primera probeta de cada mezcla se observa los máximos cambios de volumen debidos el cambio de medio en el que se encuentra la probeta (sumergida en agua o en la estufa) y en la segunda probeta se observa la pérdida de peso tras el cepillado de la probeta sometida a éstos ciclos.

Como ya indicamos anteriormente es un ensayo planteado para otro tipo de material y a la vista de los resultados, éstos son poco representativos. Las probetas al ser sumergidas en el baño de agua pierden gran cantidad de material y por consiguiente peso seco y volumen, aunque este último se mantiene en los primeros ciclos debido al hinchamiento que experimenta el material con el agua.

Este ensayo fue difícil de llevar a cabo ya que las probetas apenas aguantaron 3 y 4 ciclos para las mezclas de los suelos S3 y S1, respectivamente.

Los resultados del ensayo se muestran en la Tabla 113 y expresan la pérdida de material, en pérdida de peso y pérdida de volumen, respecto del peso y volumen inicial, para las mezclas suelo-cal y suelo-escoria de S1 y S3, al final del ciclo 3.

Suelo	Mezcla	Máxima pérdida de Peso (%)	Máximo cambio de Volumen (%)	Pérdidas admisibles de Peso para suelo-cemento (%)	Pérdidas admisibles de Volumen %
S1	S1C2	20,1	-2,5	Arenoso:14 Limoso:10 Arcilloso:7	2
	S1E5	19,3	-3,1		
S3	S3C2	61,2	-41,2		
	S3E5	35,8	-5,0		

Tabla 113. Resultados del ensayo humedad-sequedad para mezclas de S1 y S3

A la vista de los resultados, concluimos que:

- Éste ensayo difiere bastante dependiendo del material con el que estemos trabajando, por lo que no podremos asemejarlo a las exigencias para un material como el suelo-cemento. Además, la cantidad de estabilizante añadida es muy inferior a la indicada para este tipo de suelos (A-6) con cemento.
- Si hacemos una comparación entre las probetas de un mismo suelo, bien con cal bien con escoria, apreciamos que a pesar de que en ninguna de ellas el resultado es óptimo, las probetas con escoria aguantan de manera similar o incluso más con escoria que con cal. Puede observarse en el suelo S3, que cuando detenemos el ensayo (en el tercer ciclo) las pérdidas de material en las probetas de escoria son inferiores al 40% en peso seco respecto a la pérdida de las probetas con cal.
- Las pérdidas de volumen en algunos casos parecen muy pequeñas si tenemos en cuenta con qué pérdida de peso se corresponde, esto es debido a que al tomar medidas de altura y diámetro medio parece que apenas hay pérdidas de volumen, a pesar de que hay muchos huecos en la probeta.
- Las probetas mostraron gran cantidad de grietas, mayores en las probetas con cal, puede deberse a la expansión a corto plazo de la misma.
- Las probetas de suelo S3 fueron sometidas a 4 ciclos, aunque se han mostrado los resultados obtenidos en el ciclo 3, ya que al final del cuarto prácticamente todo el material de las probetas se había perdido, por lo que no pudieron tomarse medidas.
- Las probetas de suelo S1 obtuvieron menores pérdidas de material y volumen que las probetas de suelo S3. Al igual que en el resto de ensayos, se aprecia un mejor comportamiento del suelo S1 ante la estabilización con el 5% de escoria que en el suelo S3.

La Figura 165, la Figura 166, la Figura 167 y la Figura 168 se muestran las imágenes de las probetas suelo-cal y suelo escoria para los suelos S1 y S3, al finalizar el ensayo de humedad-sequedad.



Figura 165. Probetas tras ensayo humedad-sequedad de la mezcla S1C2



Figura 166. Probetas tras ensayo humedad-sequedad de la mezcla S1E5



Figura 167. Probetas tras ensayo humedad-sequedad de la mezcla S3C2



Figura 168. Probetas tras ensayo humedad-sequedad de la mezcla S3E5

Ensayo de hielo-deshielo

Se fabrican cuatro probetas para cada suelo, suelo S1 y suelo S3, dos de ellas con cal y dos con escoria, y se las sometió a 12 ciclos de 48 horas cada uno de hielo-deshielo. En la primera de las probetas de cada mezcla se observa los máximos cambios de volumen debidos al cambio de medio en el que se encuentra la probeta (en cámara frigorífica o en la cámara húmeda) y en la segunda probeta se observa la pérdida de peso tras el cepillado de la probeta sometida a estos ciclos.

Los resultados que se muestran a continuación expresan la pérdida de material al final de los 12 ciclos, en ambos suelos, tanto para las mezclas con escoria como para las mezclas con cal, que son las que nos servirán de referencia.

Suelo	Mezcla	Máxima pérdida de Peso (%)	Máximo cambio de Volumen (%)	Pérdidas admisibles de Peso para suelo-cemento (%)	Pérdidas admisibles de Volumen (%)
S1	S1C2	5,1	-2,3	Arenoso:14 Limoso:10 Arcilloso:7	2
	S1E5	5,0	-2,2		
S3	S3C2	6,1	-2,5		
	S3E5	6,2	-2,4		

Tabla 114. Resultados ensayo hielo-deshielo para mezclas de suelo S1 y S3

A la vista de los resultados, concluimos que:

- En cada uno de los ciclo, el material pierde humedad cuando está en la cámara frigorífica y lo recupera en la cámara húmeda, aunque no recupera la inicial. Las fluctuaciones de humedad respecto de la original a lo largo de los 12 ciclos están entorno al 1,0 - 2,0%.
- En la cámara frigorífica disminuye el volumen ciclo tras ciclo, y disminuye el volumen respecto el original. Recupera volumen en la cámara húmeda, puede deberse a la expansión de alguno de los componentes de la cal o escoria cuando están en presencia de agua o simplemente a la incorporación de agua en la probeta.
- La pérdida de peso es pequeña a lo largo de los ciclos, tanto para un material como para el otro cumple con las perdidas admisibles para suelo-cemento de un material arcilloso. El comportamiento en éste ensayo es muy parecido tanto para la mezcla suelo-escoria como para suelo-cal, dentro de cada tipo de suelo.
- Los resultados obtenidos para las mezclas de suelo S1 son muy parecidos a los de las mezclas de suelo S3, aunque la pérdida de material y volúmenes es algo más pequeña.

En ambos ensayos, humedad-sequedad y hielo-deshielo, la mayor resistencia mecánica y compacidad de la muestra S1E5 se refleja en sus mejores resultados entre todas ellas.

La mezcla de cal o escorias con algunos suelos en una determinada proporción da lugar a un material con unas características adecuadas de resistencia y durabilidad después de

la compactación. A pesar, de la mejora experimentada en los suelos con la estabilización, el material suelo-cal o suelo-escoria, debido a la poca resistencia que tiene al desgaste, debe de ir protegido por una capa base o subbase para su empleo en la construcción de caminos.

La Figura 169, la Figura 170, la Figura 171 y la Figura 172 muestran el aspecto final de las probetas sometidas a ensayo de hielo-deshielo.



Figura 169. Probetas tras ensayo hielo-deshielo de la mezcla S1C2



Figura 170. Probetas tras ensayo hielo-deshielo de la mezcla S1E5



Figura 171. Probetas tras ensayo hielo-deshielo de la mezcla S3C2

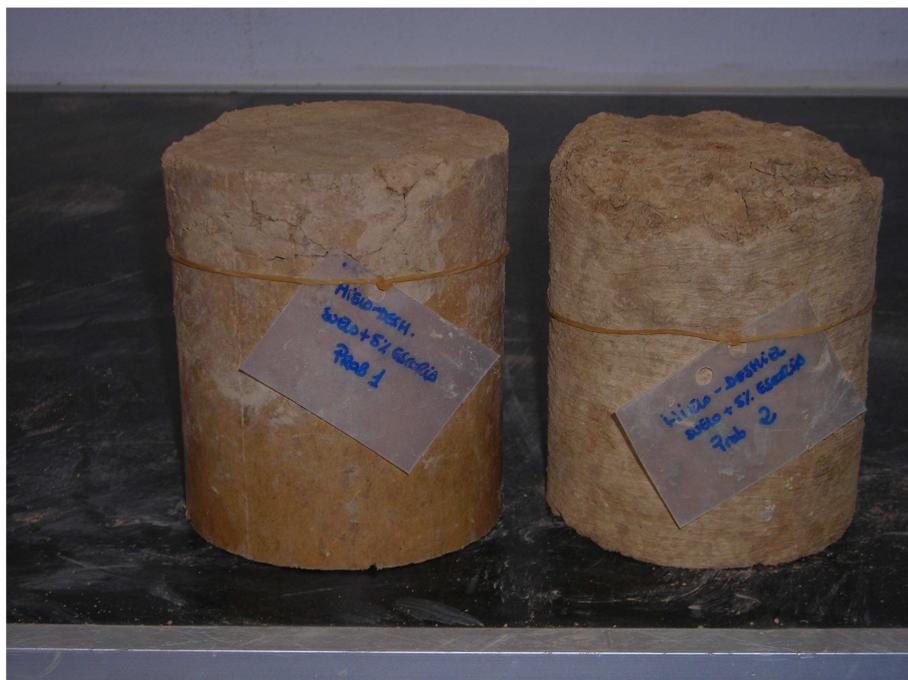


Figura 172. Probetas tras ensayo hielo-deshielo de la mezcla S3E5

7.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Como conclusiones del presente capítulo pueden señalarse las siguientes:

- De los 4 suelos estudiados, sólo S0, S1 y S3, son susceptibles de estabilización. El suelo S3, por su alto contenido en SO_3 , no reacciona de forma adecuada ante la estabilización química con cal o con escoria LFS.
- Los resultados obtenidos en éste capítulo pueden considerarse excelentes. La estabilización de suelo con pequeñas proporciones de escoria LFS (entorno al 5%) proporciona resultados cercanos a los obtenidos en la estabilización con cal; todos ellos superando los requisitos mínimos exigidos para la formación de suelo estabilizado S-EST1.
- En las estabilizaciones llevadas a cabo se suceden una serie de cambios comunes:
 - La granulometría varía y aumenta la trabajabilidad de material. Se debe a los mecanismos de floculación y aglomeración de partículas, secado de la masa de suelo, pérdida de las fuerzas de unión entre partículas de arcilla y a su disposición dispersa.
 - Disminuye el índice de plasticidad. De manera general el índice plástico aumenta y el límite líquido en unos casos aumenta y en otros disminuye, dependiendo del complejo de cambio de la arcilla.
 - La curva del Próctor sufre un aplanamiento, disminuyendo la densidad máxima seca y aumentando la humedad necesaria para conseguirla. Un mayor tamaño de partículas, supone una mayor proporción de huecos entre las mismas y por tanto una menor densidad seca. Con todo ello, disminuirá la sensibilidad a la humedad en su compactación, así como la sensibilidad de su tendencia a hincharse y/o contraerse.
 - Aumenta el índice CBR, y en consecuencia su capacidad portante. La redistribución de las partículas afecta al rozamiento interno de las mismas y en consecuencia a las propiedades mecánicas de los suelos de manera muy importante.
 - La resistencia a compresión simple también aumenta con la estabilización. Generalmente este aumento se debe al aumento de la cohesión interna de las partículas que sucede durante la reacción puzolánica a medio plazo. Por el contrario, la deformación disminuye con el tiempo.
 - El aumento de capacidad portante y resistencia, se debe, entre otros, a procesos de cementación. Al aumentar el pH del suelo por adición de la cal, se rompen las partículas de la arcilla, liberando la sílice y la alúmina, que reaccionan con el calcio y forman compuestos cementantes como hidratos de calcio-silicatos (CSH) y hidratos de calcio-aluminatos (CAH)

- Como consecuencia del aumento de resistencias, también aumenta la durabilidad del material y susceptibilidad al agua; sin embargo, los resultados expuestos en el presente capítulo sobre el ensayo humedad-sequedad no muestran resultados muy positivos. Esto es debido al origen de la normativa, de aplicación en otro tipo de material. Los resultados obtenidos del ensayo hielo-deshielo de las muestras suelo-escoria LFS muestran resultados muy similares a los de las muestras suelo-cal.
- Disminuyen los cambios de volumen; se obtiene valores de hinchamiento libre y expansión potencial inferiores a los máximos permitidos.
- La toxicidad potencial de LFS por lixiviación no presentó riesgo alguno en las mezclas ensayadas de suelo-escoria. Aún así debe de ser evaluada de modo periódico por la importancia que tiene el cuidado y respeto del medio ambiente.
- Los suelos ricos en sulfatos, con contenidos superiores al 1%, como indica el PG-3, no son susceptibles de estabilización con cal. Estos sulfatos en condiciones adecuadas (de pH, temperatura, presencia de agua, aluminio y calcio) pueden reaccionar con la cal añadida, formando compuestos inestables y expansivos como son la etringita y la thaumasita. Estos componentes son responsables del levantamiento de las capas estabilizadas.

CAPÍTULO 8. UTILIZACIÓN DE LA EAFS EN CAPAS DEL FIRME DE CAMINOS RURALES

8 UTILIZACIÓN DE LA EAFS EN CAPAS DEL FIRME DE CAMINOS RURALES

8.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo 5, se comprobó que la escoria negra tiene unas características muy similares a las de las zahorras artificiales. Por otra parte, cumple las condiciones indicadas en la norma para el dimensionado de firmes de la red de carreteras del País Vasco [22], cercana a las prescripciones descritas en la norma 6.1.I.C., donde se incluyen ciertas características concretas del uso de áridos siderúrgicos EAFS como zahorras en las capas del firme. En concreto, la EAFS cumple:

- Condiciones del PG-3.
- Envejecimiento superior a 3 meses.
- IGE (Grado de envejecimiento de las escorias de Acería) = 0,04% < 1%, según la norma NLT-361 [21]
- Expansividad = 0,25% < 5 %
- Expansividad de la granulometría combinada < 0,5% según ASTM D 4792 [67].

La escoria negra tiene falta de finos para ajustarse a los husos de zahorras del PG-3 y es un material no plástico, por ello, aparecen dos posibles soluciones para su empleo en las capas del firme de caminos rurales.

- Por un lado, teniendo en cuenta que la curva granulométrica de EAFS se ajusta bien a la de zahorras drenantes, podría optarse por formar la base del firme con escoria negra EAFS y sobre ella aplicar un tratamiento con gravilla bicapa, según indica la norma 6.1.I.C. “secciones de firme” [25] para vías con una categoría de tráfico pesado T42 con tráfico de intensidad reducida.
- Por otro lado, podría optarse por mezclar la escoria negra EAFS con un material que aporte los finos que le faltan para ajustarse a la curva granulométrica de las zahorras ZA20 ó ZA25, ó a los husos granulométricos recomendados por las AASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials) para su empleo en la base de caminos rurales sin necesidad de emplear revestimiento asfáltico (husos A, C y D, que quedaron definidos en el capítulo 3). El material ha de aportar cierta plasticidad para que exista cohesión en la mezcla. Por ello se buscó un detritus calizo, rico en finos y con plasticidad, material que es excedentario en cantera y que puede ayudarnos a alcanzar las características necesarias en la mezcla.

Una vez realizada la combinación binaria, estas normas exigen ciertas características que el material que pasa por el tamiz 0,40 UNE debe cumplir. En concreto se trata de estudiar las siguientes propiedades en la mezcla: límites de Atterberg, equivalente

de arena, Próctor modificado, coeficiente de desgaste de los ángeles, CBR e hinchamiento. Resultados que se desarrollarán a lo largo del presente capítulo.

En la Tabla 115 se muestran las prescripciones exigidas para bases de firmes aplicables a caminos rurales indicadas en la normativa de referencia.

ENSAYO	Zahorras Artificiales. Arcenes no pavimentados PG-3 y 6.1.I.C.		Prescripciones AASHTO. Si no lleva revestimiento asfáltico			
	ZA20	ZA25	HUSO B	HUSO C	HUSO A	HUSO D
Modulo granulométrico con tamices zahorras	4,48	4,96	5,01	4,59	3,23	4,13
Equivalente de Arena. E.A.(%)	EA>30		EA≥25		EA≥30	
Límites de Atterberg	LL	LL<30	LL<35		LL<35	
	LP	-	6≤IP≤12, Regiones secas		8≤IP≤10, Regiones secas	
	IP	6≤IP<10	4≤IP≤9, Reg. húmedas		6≤IP≤9, Reg. húmedas	
Desgaste Ángeles. L.A. (%)	LA<35 (árido siderúrgico LA<40)		LA<40			
Índice lajas. I.L. (%)	IL<35		-			
PM	Densidad (g/cm ³)	-	≥ 2			
	Humedad (%)	-	-			
Ensayo CBR	Densidad (g/cm ³)		-	-	-	
	Absorción (%)		-	-	-	
	Hinchamiento (%)		-	-	-	
	Índice CBR (%)	CBR≥20		CBR≥20		CBR≥70
Estabilidad dimensional (%)	< 0,5%		< 0,5%			

Tabla 115. Prescripciones para bases de firmes aplicables a caminos rurales

8.2 DETRITUS CALIZO

Material empleado y procedimiento

La recogida del detritus se hizo en la cantera “Hormigones y Canteras García”, sita en Cardeñuela Riopico (Burgos). Se tomó de un acopio que la propia cantera rechaza para su empleo como zahorra artificial. Se trata de un detritus calizo 0/30, con un tamaño máximo de árido de 30 mm, rico en material fino y cierta plasticidad. La Figura 173 muestra una fotografía de la cantera donde el material fue recogido.

Para establecer las proporciones de mezcla EAFS-Detritus, determinamos en primer lugar la granulometría del detritus. Con la granulometría de EAFS y del detritus calizo, determinamos sus módulos granulométricos, en función de la serie de tamices utilizados en el PG-3 para zahorras artificiales. Asimismo, se obtienen los módulos granulométricos del huso medio de ZA20, ZA25 y los husos de Talbot (A, B, C, D) recomendados en caminos rurales.

Para obtener el módulo granulométrico, poder comparar y establecer combinaciones binarias, hemos de utilizar siempre la misma serie de tamices. El módulo granulométrico de un suelo se obtiene como la suma de las cantidades retenidas

acumuladas en los distintos tamices en el tamizado de una muestra de suelo, dividido por 100.

Una vez que se tienen los módulos granulométricos de los materiales de partida, se establece la relación entre ambos para obtener el módulo del huso que nos interese. De ahí se obtendrá la proporción de mezcla necesaria.

Establecidas las proporciones de mezcla, se realizaron los ensayos que ha de cumplir la mezcla binaria para su empleo en bases de caminos rurales cuando no llevan revestimiento asfáltico, indicados en el capítulo 3. En los apartados siguientes se muestra los resultados de dichos ensayos para las mezclas, así como para los materiales que forman la mezcla.



Figura 173. Recogida en cantera de detritus calizo

Granulometría del detritus calizo

El ensayo granulométrico se realizó según la norma UNE-EN 933-1 [51]. El resultado se muestra en la Figura 174. El % de **FINOS** es de **2,55%**

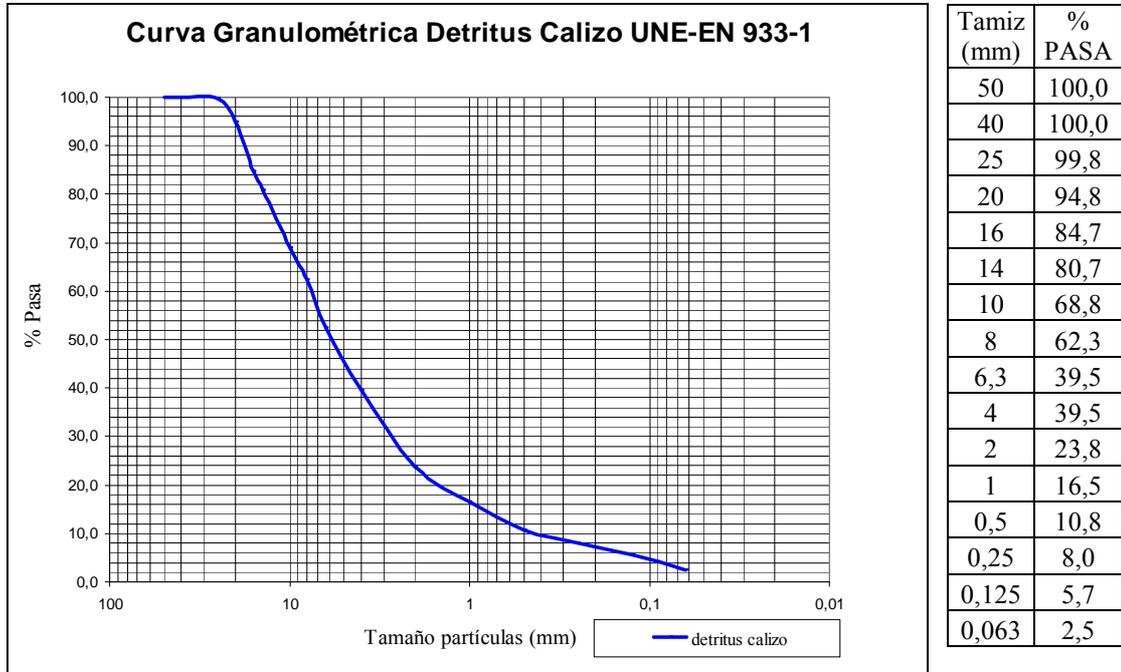


Figura 174. Granulometría del detritus calizo



Figura 175. Granulometría del detritus calizo

Si comparamos la granulometría con los husos de ZA25 y ZA20 podemos comprobar una ligera falta de material grueso.

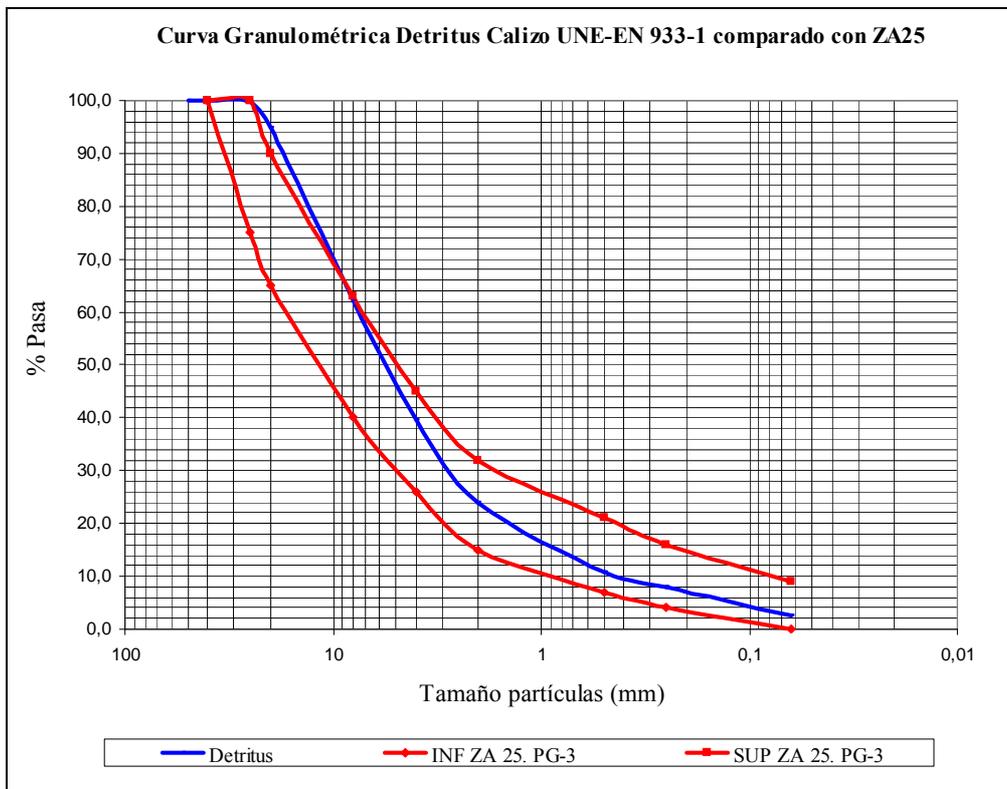


Figura 176. Granulometría detritus calizo comparado con ZA25

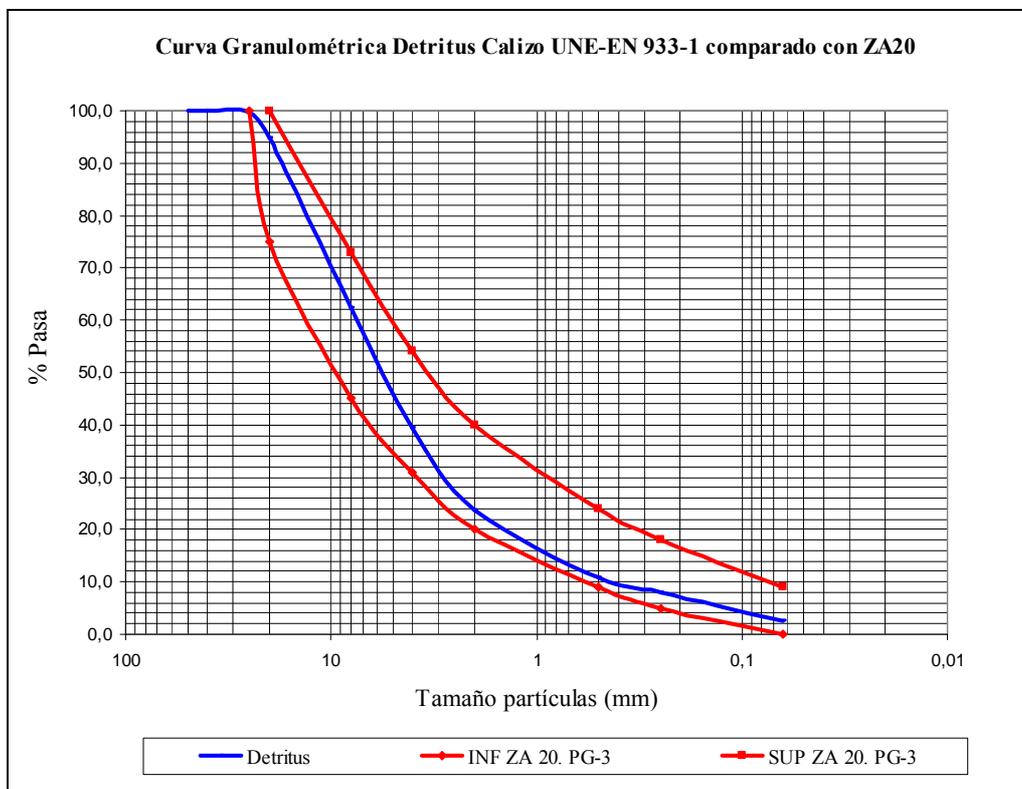


Figura 177. Granulometría detritus calizo comparado con ZA20

Proporciones de mezcla

Como ya se indicó anteriormente, se calculó el módulo granulométrico de EAFS y del detritus calizo, así como el módulo granulométrico de los husos que pretendemos obtener para establecer la combinación binaria de los áridos en la capa base del firme de un camino rural.

En las siguiente tabla se muestra los módulos granulométricos de la escoria negra, del detritus calizo y de los husos medios que se pretenden alcanzar.

%RETENIDO. HUSOS ZAHORRAS ARTIFICIALES				
Tamiz UNE	ZA 25	ZA20	EAFS	DETRITUS
50	0	0	0	0
40	0	0	0	0
25	12,5	0	5,7	0,2
20	22,5	12,5	11,6	5,2
8	48,5	41	45,7	37,7
4	64,5	57,5	71,3	60,5
2	76,5	70	88,4	76,2
0,5	86	83,5	98,9	89,2
0,25	90	88,5	99,8	92
0,063	95,5	95,5	99,9	97,5
Modulo granulométrico	4,96	4,49	5,21	4,59
% RETENIDO. HUSOS ASSHTO				
Tamiz UNE	B	C	A	D
50	0	0	0	0
40	15	0	0	0
25	30	15	0	0
20	35	25	7,5	15
10	45	40	17,5	35
5	55	55	30	50
2	65	65	45	62,5
0,4	80	80	65	77,5
0,25	86	89	75	82,5
0,08	90	90	82,5	90
Modulo granulométrico	5,01	4,59	3,23	4,13

Tabla 116. Módulos granulométricos husos medios

A la vista de los resultados con escoria EAFS y detritus calizo, que tienen 5,21 y 4,59 de módulo granulométrico, respectivamente, con una combinación binaria, sólo seremos capaces de alcanzar el módulo granulométrico con valor superior al del propio detritus, por tanto buscaremos la combinación binaria que pueda proporcionarnos bien el módulo granulométrico medio de ZA25 bien del Huso B.

Establecemos la ecuación, para obtener el porcentaje de mezcla:

X_{EN} es el % de escoria EAFS y X_D es el % de detritus calizo en la combinación binaria, Para obtener el módulo granulométrico de ZA25 tendremos:

$$X_{EN} * 5,21 + X_D * 4,59 = 100 * 4,96$$

$$X_{EN} + X_D = 100$$

Resultado:

$X_D=40,3\%$ de detritus

$X_{EN}=59,7\%$ de EAFS.

Para obtener el módulo granulométrico del Huso B tendremos:

$$X_{EN} * 5,21 + X_D * 4,59 = 100 * 5,01$$

$$X_{EN} + X_D = 100$$

Resultado:

$X_D=32,2\%$ de detritus

$X_{EN}=67,8\%$ de EAFS.

Ante los resultados expuestos, se plantea como mezcla inicial de estudio: 60% de escoria EAFS y 40% de detritus calizo, mezcla necesaria para obtener el módulo granulométrico de una zahora artificial ZA25. Además, se realizan los ensayos necesarios para mezcla a la inversa, 40% de escoria EAFS y 60% de detritus; ante la dificultad de realizar ciertos ensayos como el PM con el material de la primera mezcla, se optó por estudiar también la proporción al 50%. Todos ellos son porcentaje en peso. Por tanto en los apartados del presente capítulo, se mostrará los ensayos realizados sobre las mezclas que a continuación se detallan:

Mezcla Firme	X_{EN} (% peso)	X_D (% peso)
60EN-40D	60	40
50EN-50D	50	50
40EN-60D	40	60

Tabla 117. Proporciones de mezcla EAFS-Detritus (% peso)

donde, la mezcla se expresa como $X_{EN}EN - X_D D$; X_{EN} es el % en peso de escoria EAFS y X_D es el % en peso de detritus calizo en la mezcla, respectivamente; EN es escoria negra (EAFS) y D es detritus.

Si transformamos estos porcentajes en peso a porcentajes de volumen, teniendo en cuenta la densidad de conjunto de cada componente (densidad de conjunto de detritus: $1,9 \text{ T/m}^3$; densidad de conjunto de EAFS: $2,3 \text{ T/m}^3$), las proporciones sería las siguientes:

Mezcla Firme	X_{EN} (% volumen)	X_D (% volumen)
60EN-40D	55	45
50EN-50D	45	55
40EN-60D	35	65

Tabla 118. Proporciones de mezcla EAFS-Detritus (% volumen)

Puede observarse que para cualquiera de las mezclas, la ejecución, sería relativamente sencilla. En las dos primeras, estamos entorno a un 50% en volumen de material, lo que supone 1 unidad de volumen de escoria por 1 unidad de volumen de detritus. Por otro lado, en la tercera mezcla nos aproximamos a un 33%-66% en volumen, lo que suponen 1 unidad de volumen de escoria por cada 2 unidades de volumen de detritus.

8.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL A EMPLEAR EN LAS CAPAS DEL FIRME DE CAMINOS RURALES

8.3.1 Granulometrías

Los ensayos granulométricos se realizan sobre las tres mezclas de escoria negra y detritus, según la norma UNE-EN 933-1 [51], utilizando los tamices de ensayo según UNE-EN 933-2 [52].

Tamiz UNE (mm)	%PASA		
	60EN-40D	50EN-50D	40EN-60D
50	100,0	100,0	100,0
40	100,0	100,0	100,0
25	96,5	97,0	97,6
20	90,9	91,6	92,2
16	82,0	84,0	83,0
14	77,0	78,0	79,0
10	65,0	64,5	66,8
8	57,5	58,3	59,1
6,3	49,0	49,9	50,0
4	33,0	34,1	35,2
2	16,5	17,7	18,9
1	9,0	10,1	12,0
0,5	5,0	5,9	6,9
0,25	3,5	4,3	5,0
0,125	2,0	3,0	3,5
0,063	1,1	1,3	1,6
% FINOS	1,1	1,3	1,6

Tabla 119. Granulometría mezclas EAFS-Detritus



Figura 178. Granulometría mezcla 40EN-60D

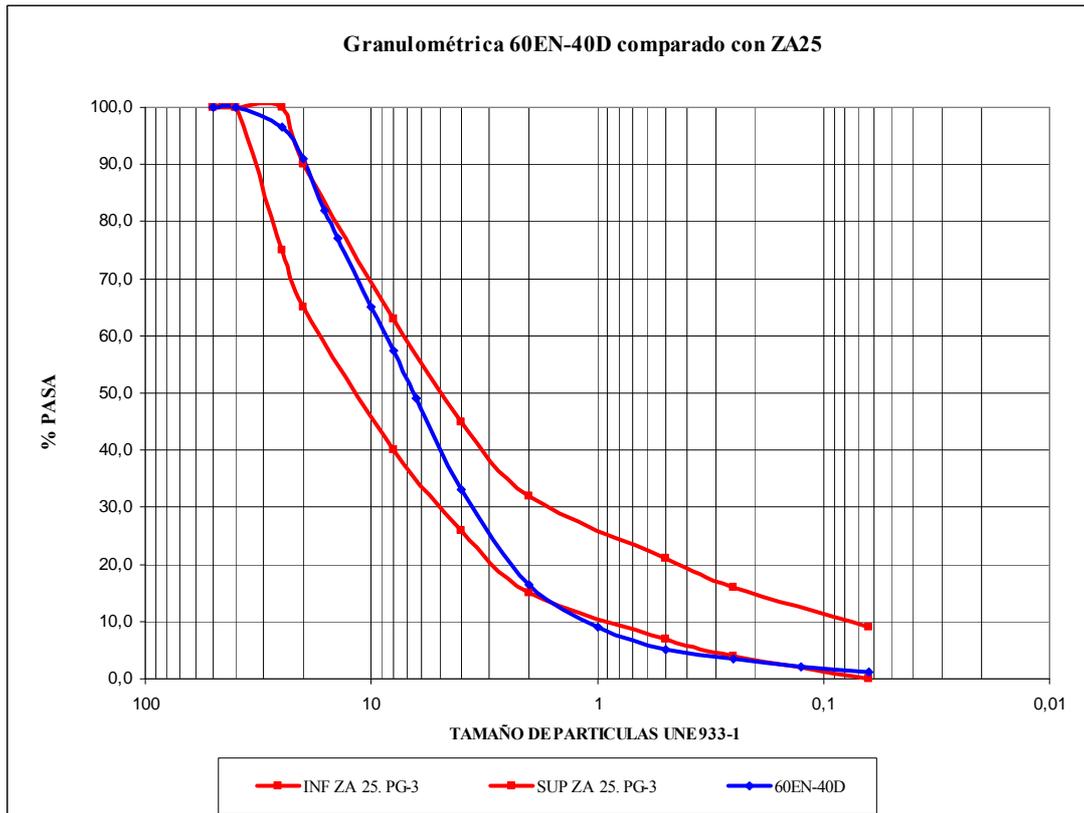


Figura 179. Granulometría 60N-40D

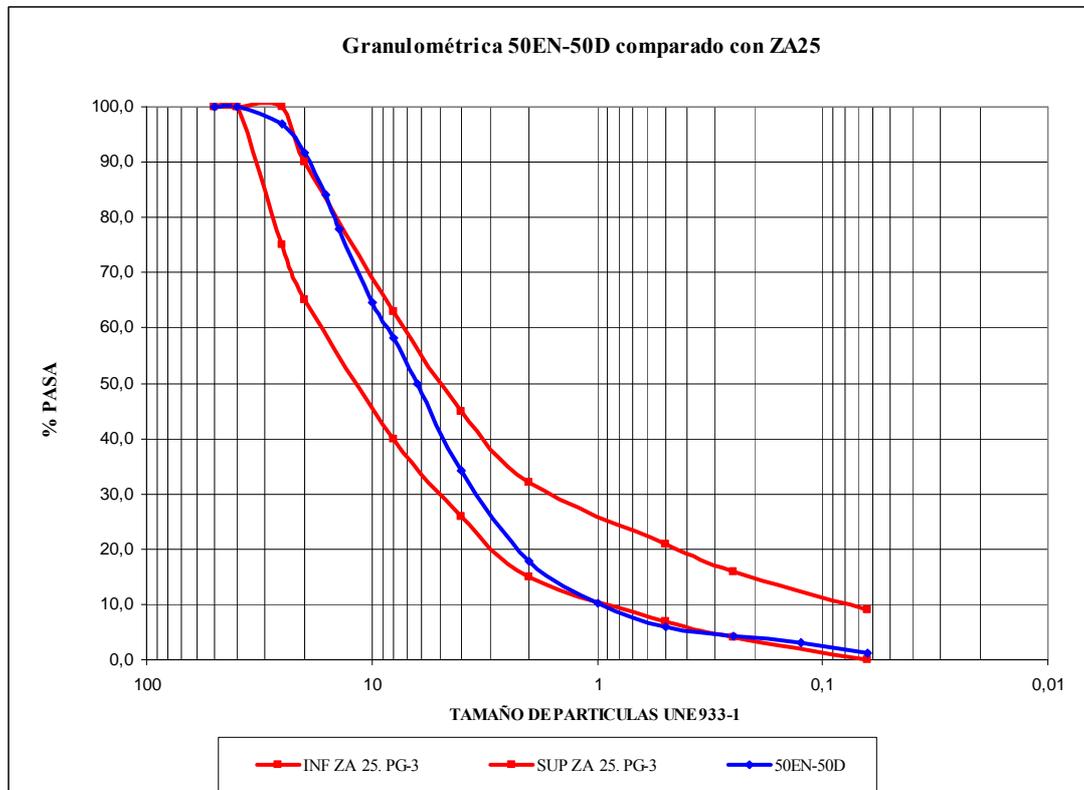


Figura 180. Granulometría 50N-50D

Normalmente colocaremos un espesor entorno a 30 cm, por tanto teniendo en cuenta que el tamaño máximo de nuestro árido está entorno a 25-30 mm, se cumple ampliamente la recomendación.

Otra recomendación es que la cantidad de material que pasa por el tamiz n°200 (0,80 UNE) sea menor que las dos terceras partes de lo que pasa por el tamiz n°40 (0,40 UNE), condición que también se cumple para cualquiera de las tres mezclas.

8.3.2 Propiedades físicas

Equivalente de arena

El ensayo de equivalente de arena se corresponde con el de determinación “a vista” (EAV) que se recoge en la Norma Europea UNE-EN 933-8:2000 [56].

Se muestran los resultados de las mezclas junto con los resultados de los materiales que componen la combinación binaria para poder compararlos.

ENSAYO	EAFS	60EN-40D	50EN-50D	40EN-60D	DETRITUS
Equivalente de Arena. E.A. (%)	89	53	40	27	22

Tabla 120. Resultados de equivalente de arena de las mezclas para firmes

Como ya se indicó previamente, la escoria negra EAFS se trata de un material granular con muy poca cantidad de finos, de ahí su elevado equivalente de arena. Por el contrario el detritus calizo de machaqueo tiene un alto contenido en finos, con un equivalente de arena por debajo de 25, lo que indica que se trata de un material plástico. Como consecuencia, las mezclas en sus diferentes proporciones, cuentan con EA intermedios, serán EA mayores, cuanto mayor es la proporción de escoria y por tanto, menor es el contenido en finos.

Cualquiera de los resultados obtenidos para las mezclas es válido si nos queremos ajustar a las prescripciones indicadas para un huso C ó B o para zahorras naturales (tráfico T3 y T4). Sin embargo, según las condiciones indicadas para zahorras artificiales el EA ha de ser superior a 30, por lo que la mezcla 40EN-60D no cumpliría, aunque con un resultado muy próximo. Habrá que tener cuidado al añadir un material con finos, ya que si la proporción es muy elevada podría haber problemas de entumecimiento. Si el esqueleto granular es demasiado pequeño, disminuye el ángulo de fricción interna y aumenta la inestabilidad en presencia de humedad.



Figura 182. Ensayo de equivalente de arena de las mezclas para firmes

Límites de Atterberg

Para conocer la plasticidad del detritus calizo y la de sus mezclas con escoria negra, que ya indicamos es un material no plástico, utilizamos las normas UNE 103103:94 [36] y UNE 103104:93 [37]. En la Tabla 121 se muestran los resultados obtenidos.

ENSAYO		EAFS	60EN-40D	50EN-50D	40EN-60D	DETRITUS
Límites de Atterberg	LL	NP	20,0	19,8	19,7	17,9
	LP		14,9	14,3	14,0	11,9
	IP		5,1	5,5	5,7	6,0

Tabla 121. Límites Atterberg de las mezclas para firmes

De los resultados se deduce que el detritus consigue el aporte de plasticidad que se está buscando para que exista cierta cohesión en la mezcla.

La mayoría de prescripciones indican que si el firme no ha de llevar revestimiento asfáltico, el índice de plasticidad debe de estar entre 6 y 10, para dotar a la capa de una mayor impermeabilidad al tener más proporción de arcilla plástica. En regiones húmedas, se establece el índice de plasticidad entre 4 y 9, ya que puede existir riesgo de deslizamiento por embarrado. Los índices de plasticidad de las mezclas EAFS-detritus son bastante parecidos y están entre 5 y 6, valores que podrían considerarse válidos si la mezcla cumple el resto de condiciones.

Resistencia al desgaste de Los Ángeles

De igual forma que se realizó para las escorias negras en el capítulo 5, procedimos a realizar el ensayo de resistencia al desgaste de los Ángeles según la norma UNE EN 1097-2 [58]. Los resultados se indican en la Tabla 122.

ENSAYO	EAFS	60EN-40D	50EN-50D	40EN-60D	DETRITUS
Desgaste Ángeles. L.A. (%)	18	24	26	28	32

Tabla 122. Desgaste de Los Ángeles de mezclas para firmes

Ya se vio en el capítulo 5, que la escoria EAFS tiene muy buena resistencia al desgaste de Los Ángeles, y en consecuencia sus mezclas con un detritus calizo, proporcionan resultados válidos para su empleo en el firme de caminos rurales.

El detritus en estudio tiene un desgaste de los ángeles de LA=32, que está por debajo del límite establecido para zahorras artificiales (LA<35) y cualquiera de los husos de la AASHTO (LA<40); por tanto, cualquier mezcla con EAFS será válida para su empleo en bases de firmes, siempre y cuando cumpla el resto de prescripciones.

Índice de lajas y agujas

La caracterización de la forma geométrica que poseen los áridos gruesos del detritus calizo, se realizó mediante la evaluación de índice de lajas según la norma UNE-EN 933-3 [53].

DETRITUS CALIZO				
Fracción Granulométrica d_i/D_i (mm)	Masa (R_i) de la fracción granulométrica d_i/D_i (gramos)	Anchura nominal de las ranura de los tamices de barras (mm)	Masa que pasa por el tamiz de barras (m_i) (gramos)	IL de cada fracción $IL_i=(m_i/R_i)*100$ (%)
40/50	0	25	0	-
31,5/40	0	20	0	-
25/31,5	28	16	13	-
20/25	611	12,5	144	24
16/20	1237	10	212	17
12,5/16	1176	8	184	16
10/12,5	779	6,3	147	19
8/10	801	5	155	19
6,3/8	1217	4	228	19
5/6,3	996	3,15	248	25
4/5	583	2,5	152	26
$M_1=\sum R_i=$	7428	$M_2=\sum m_i=$	1483	
$IL=(M_2/M_1)*100=$			20	

Tabla 123. Índice de lajas del detritus calizo

El resultado es inferior a cualquiera de los indicados en las prescripciones para su empleo en las capas del firme, en el caso concreto de zahorras artificiales limitado al

35%. Por tanto, cualquier mezcla con escorias EAFS, cuyo índice de lajas es $IL=3$, cumplirá dicha condición.

De la misma manera se llevó a cabo el ensayo para las diferentes mezclas. En la Tabla 124 se muestra los resultados de las mezclas y materiales sin mezclar.

ENSAYO	EAFS	60EN-40D	50EN-50D	40EN-60D	DETRITUS
Índice lajas. I.L. (%)	3	5	7	9	20

Tabla 124. Índice de lajas de las mezclas para firmes

Próctor Modificado.

Se determina la densidad máxima y humedad óptima de compactación de las mezclas EAFS-detritus, según la norma UNE 103501:94 [45].

En nuestro caso, la muestra fue tomada sin eliminar tamaños superiores a 20 mm para que la densidad máxima y humedad óptima obtenida en el PM sea obtenida en las mismas condiciones en que se realiza el posterior ensayo DE CBR.

La formación de probetas de la mezcla 60EN-40D provocó ciertas dificultades, puesto que las probetas fabricadas con humedades superiores a la óptima, que en principio debieran presentar menores densidades, mantenían su densidad casi constante a partir de un cierto valor de humedad. Se repitió el ensayo varias veces (de ahí los puntos que se observan en el gráfico), obteniéndose valores similares. Por otro lado, aunque la densidad seca no disminuía al aumentar la humedad, la humedad que se mantenía en la probeta era menor que la humedad añadida; esto se debe a la pérdida de agua durante la compactación, como puede observarse en la Figura 186. La escoria negra al ser tan porosa y al existir en la mezcla poca cantidad de material fino, hace que las probetas no mantengan el agua añadida adsorbida a sus partículas, por lo que el agua que en un principio forma parte de la mezcla, al ser compactada sale por los huecos.

Los resultados obtenidos para las tres mezclas se exponen en la Tabla 125.

ENSAYO		60EN-40D	50EN-50D	40EN-60D
PM	Densidad (g/cm^3)	2,46	2,47	2,49
	Humedad (%)	7,2	6,3	5,9

Tabla 125. Próctor Modificado mezclas para firmes

De los resultados se desprende que los valores de humedad-densidad del PM no varían demasiado con la proporción. Lo que si se aprecia es mayor dificultad a la hora de trabajar con el material a medida que el porcentaje de detritus es menor. En la Figura 183, la Figura 184 y la Figura 185 se muestran las curvas humedad-densidad del próctor modificado para las distintas mezclas de escoria negra-detritus.

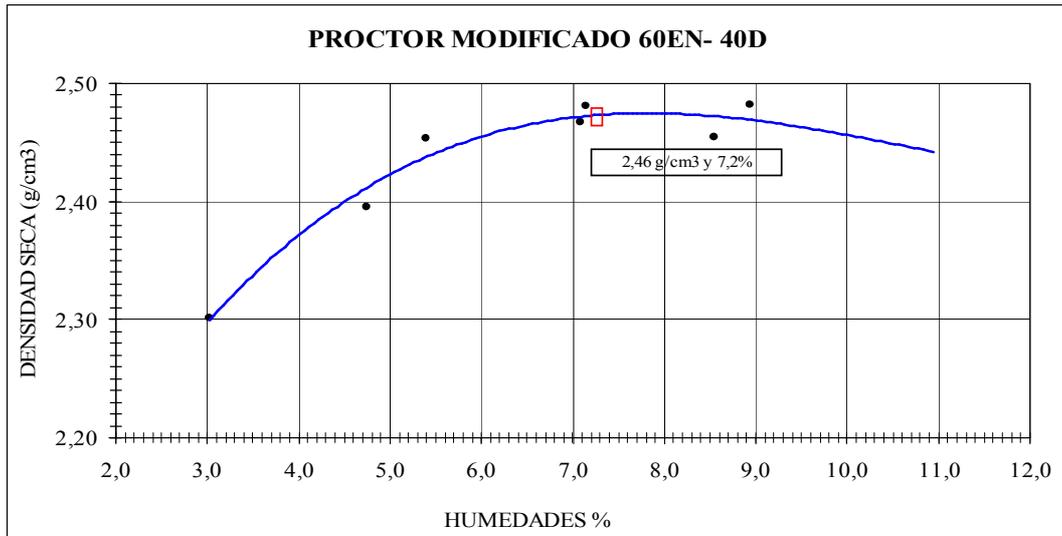


Figura 183. Próctor modificado de la mezcla 60EN-40D

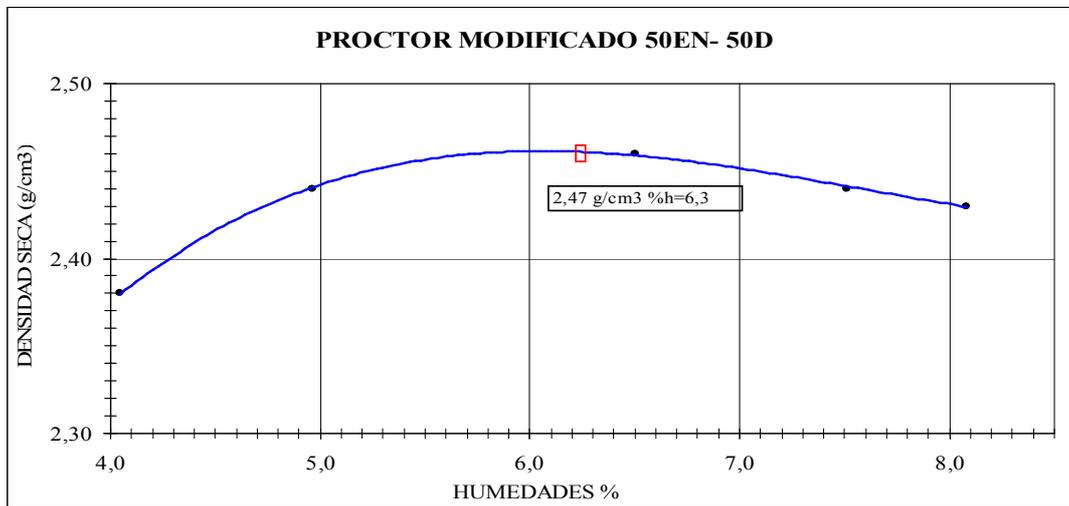


Figura 184. Próctor modificado de la mezcla 50EN-50D

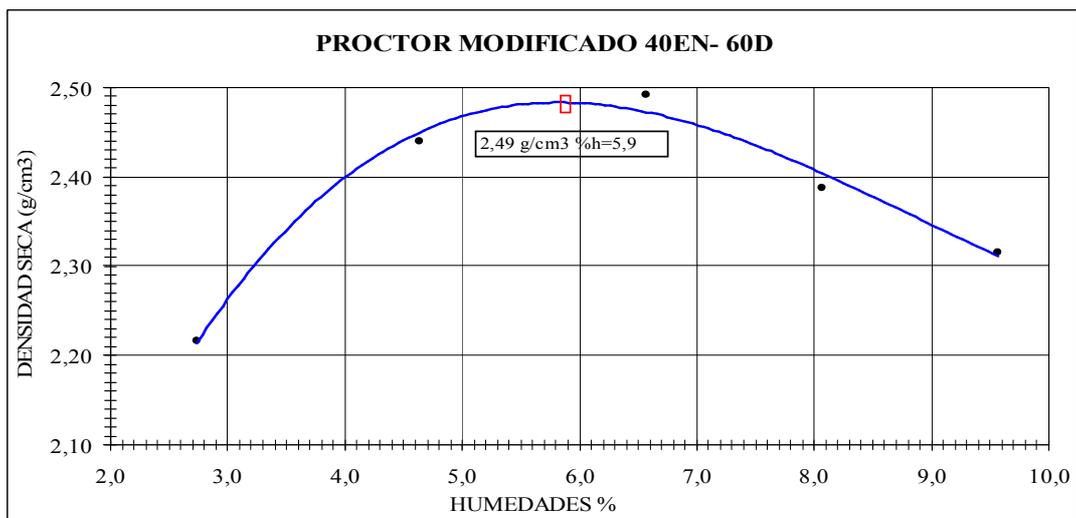


Figura 185. Próctor modificado de la mezcla 40EN-60D



Figura 186. Compactación de la mezcla 60EN-40D con maza automática



Figura 187. Probeta de de la mezcla 60EN-40D



Figura 188. Probeta de de la mezcla 50EN-50D



Figura 189. Probeta de de la mezcla 40EN-60D

Índice C.B.R. e hinchamientos

Este ensayo se realiza según la norma UNE 103502:95 [46] con el fin de determinar la capacidad portante de la base del camino rural. Para el ensayo se compactan tres probetas al 25%, 50% y 100% de la energía empleada en el PM; en la Tabla 126, estas probetas se corresponden con las probetas nº 1, 2 y 3, respectivamente.

Mezcla	probeta nº	1	2	3
60EN-40D	Densidad (g/cm ³)	2,01	2,18	2,46
	Absorción (%)	2,20	1,70	0,90
	Hinchamiento (%)	0,00	0,00	0,00
	Índice C.B.R. (%)	30,8	49,4	152,1
50EN-50D	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	2,02	2,19	2,47
	Absorción (%)	2,10	1,70	0,80
	Índice C.B.R. (%)	33,70	66,90	154,20
40EN-60D	probeta nº	1	2	3
	Densidad (g/cm ³)	2,15	2,33	2,49
	Absorción (%)	2,40	1,80	0,90
	Índice C.B.R. (%)	37,3	70,5	159,2

Tabla 126. Resultados del ensayo CBR de mezclas para firmes

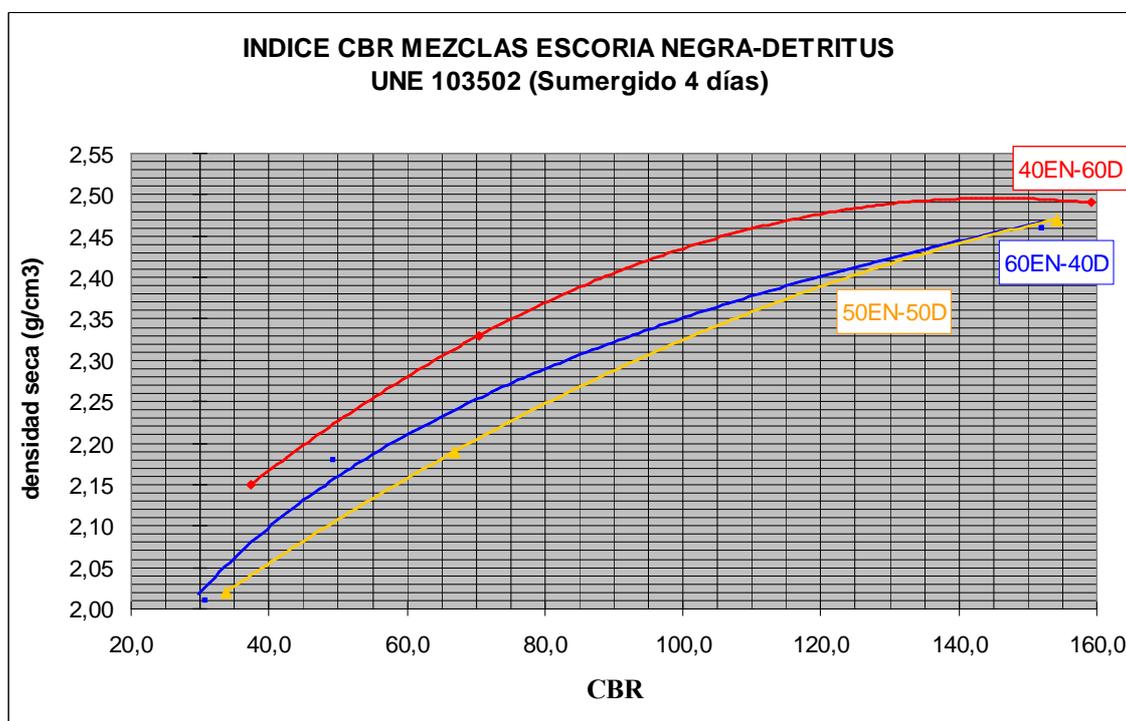


Figura 190. Índice CBR de mezclas EAFS-detrítus para firmes

En todos los casos para el 100% de energía de compactación se consiguen CBR altos, muy superiores a los índices mínimos establecidos en la normativa existente (superior a 20 ó a 70, según casos). Además los hinchamientos son prácticamente nulos y la absorción relativamente baja, menor cuanto mayor es la compactación.



Figura 191. Prensa para pinchar las probetas CBR



Figura 192. Medición de hinchamientos CBR



Figura 193. Probetas de CBR de la mezcla 60EN-40D



Figura 194. Probetas de CBR de la mezcla 50EN-50D



Figura 195. Probetas de CBR de la mezcla 40EN-60D

Expansión potencial

Como ya se explicó en el capítulo 5, la escoria negra es potencialmente expansiva debido a su composición química. Por ello en este apartado vamos a ver la evolución de la estabilidad dimensional de las mezclas de escoria negra con detritus. El ensayo fue realizado según la norma ASTM D-4792 [67] y los resultados se muestran a continuación.

ENSAYO		60EN-40D	50EN-50D	40EN-60D
Expansión potencial (%)	Expansión final (%)	1,42	1,40	0,71
	Tiempo requerido (horas)	2302	2302	2302
	Absorción (%)	2,4	2,6	3,3

Tabla 127. Expansión potencial para las mezclas EAFS-detritus

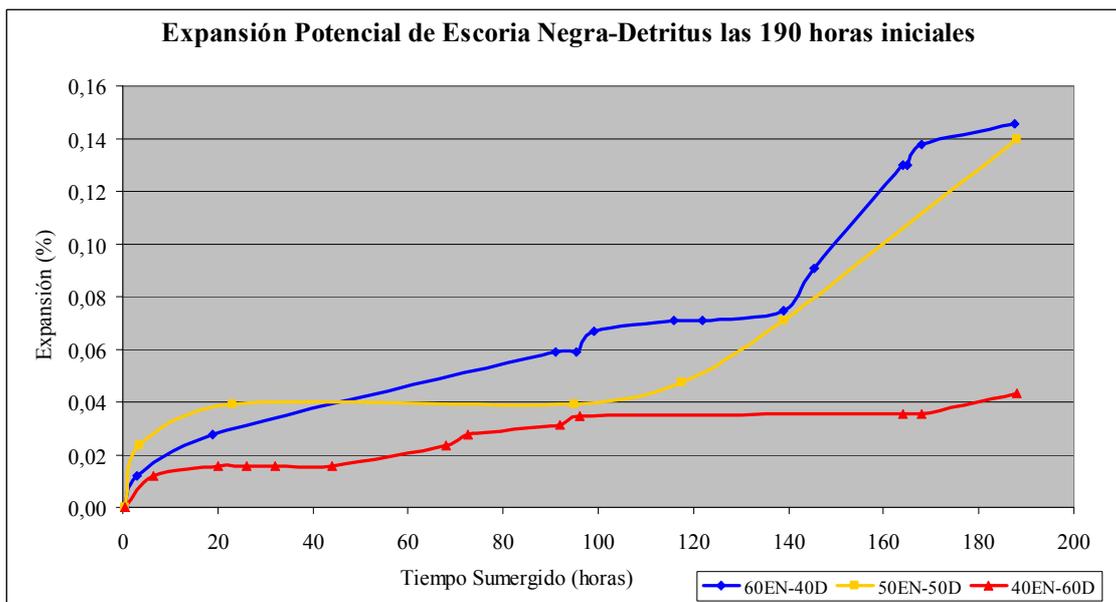


Figura 196. Expansión potencial de mezclas EAFS-detritus para firmes durante las 190 horas iniciales

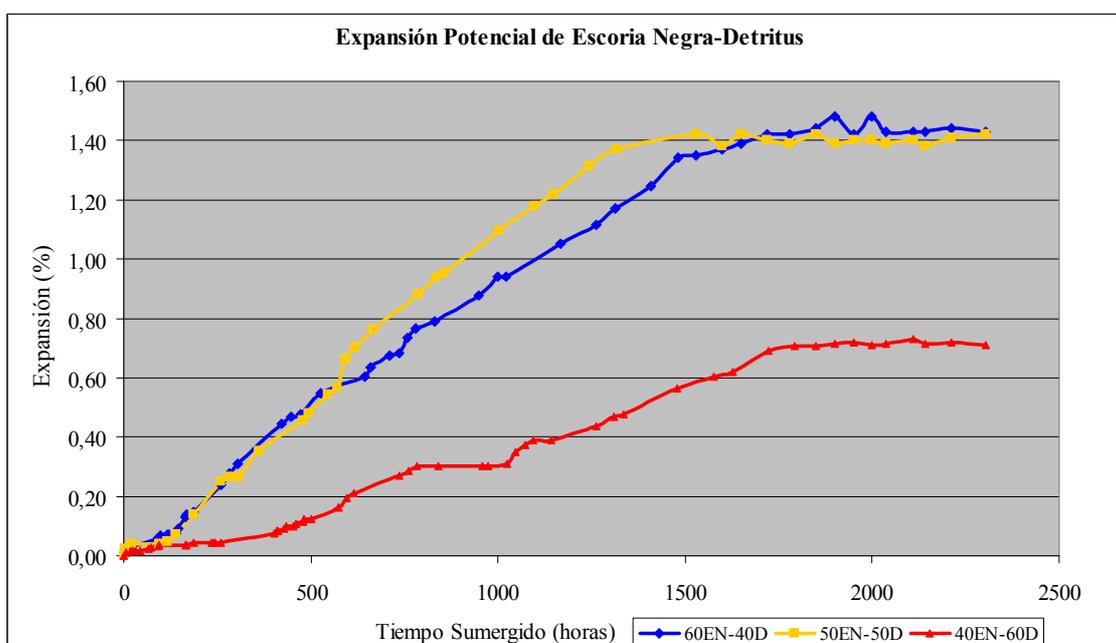


Figura 197. Expansión potencial final de mezclas EAFS-detritus para firmes

Todas las mezclas presentan una expansión potencial que sigue una misma tendencia. Durante el tiempo de ensayo indicado en la norma ASTM D-4792 [67], la expansión alcanzó valores inferiores a 0,5%, recomendado por la norma ASTM-D-2940:92 [4], sobre las características a exigir a los materiales granulares que se usen como bases o subbases en carreteras o aeropuertos, pero durante el periodo total de ensayo (3 meses aproximadamente) las muestras continuaron su hinchamiento hasta alcanzar valores entorno al 1%, dato que no es excesivo y totalmente asumible.

8.3.3 Resumen de características del material a emplear en las capas del firme de caminos rurales

En la Tabla 128 se muestra el resumen de los resultados obtenidos para las tres mezclas escoria negra-detritus propuestas.

ENSAYO		EAFS	60EN-40D	50EN-50D	40EN-60D	DETRITUS
Modulo granulométrico con tamices zahorras		5,21	5,04	4,97	4,90	4,58
Finos (%)		0,26	1,11	1,33	1,61	2,55
Equivalente de Arena. E.A. (%)		89	53	40	27	22
Límites de Atterberg	LL	NP	20,0	19,8	19,7	17,9
	LP		14,9	14,3	14,0	11,9
	IP		5,1	5,5	5,7	6,0
Desgaste Ángeles. L.A. (%)		18	24	26	28	32
Índice lajas. I.L. (%)		3	5	7	9	20
PM	Densidad (g/cm ³)	-	2,46	2,47	2,49	-
	Humedad (%)	-	7,2	6,3	5,9	-
Ensayo CBR	Densidad (g/cm ³)	-	2,46	2,47	2,49	-
	Absorción (%)	-	0,90	0,80	0,90	-
	Hinchamiento (%)	-	0,00	0,00	0,00	-
	Índice CBR	-	152,1	154,2	159,2	-
Expansión potencial (%)	Expansión final (%)	0,25	1,42	1,40	0,71	-
	Tiempo requerido (horas)	168	2302	2302	2302	-
	Absorción (%)	-	2,4	2,6	3,3	-

Tabla 128. Resumen ensayos mezclas EAFS-Detritus calizo

Los resultados son acordes con la normativa a tener en cuenta en el presente capítulo. Cualquiera de las mezclas cumple los criterios de límite de Atterberg, desgaste de los ángeles, índice de lajas, densidad del PM, estabilidad dimensional e índices CBR para el material a emplear en la capa base de un camino rural.

Por el contrario, la mezcla con menor contenido en escoria (40EN-60D), no cumple el valor equivalente de arena si lo comparamos con las zahorras del PG-3 ($EA > 30$), pero sí las prescripciones de la AASHTO ($EA \geq 25$). Al tener mayor contenido en detritus, la cantidad de finos es mayor, por eso los valores de EA son más bajos. A pesar de ello, la mezcla sigue presentando un aspecto bastante limpio y desde el punto de vista del resto de ensayos válida para su empleo en la formación de firmes.

Por otro lado, se requiere para el empleo de las mezclas en un firme sin revestimiento asfáltico, que el material tenga cierta plasticidad que mantenga la cohesión entre partículas. Los índice de plasticidad alcanzados en las mezclas están por debajo de 6, recomendado por la normativa, pero por encima de 4, valor indicado en las

prescripciones de AASHTO para regiones húmedas. Dependiendo del lugar donde se quiera aplicar la mezcla, el valor teórico pondría ser alcanzado.

Teniendo en cuenta los resultados expuestos en el capítulo 5, sobre los lixiviados de la escoria negra, no es aventurado decir que la mezcla entre dicha escoria y el detritus no tiene riesgo de lixiviados.

8.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Como conclusiones del presente capítulo pueden señalarse las siguientes:

- La normativa española referente a caminos rurales es escasa y confusa, por lo que tenemos que ajustarnos a la normativa existente para carreteras con baja intensidad de tráfico y a la normativa americana mas desarrollada en éste área.
- La escoria negra de horno eléctrico de arco, posee una interesante aplicación en la construcción de firmes de caminos rurales, como sustitución a la zahorra artificial empleada tradicionalmente.
- Para alcanzar las propiedades exigidas en la normativa referente a firmes de caminos rurales, una solución adecuada es la mezcla de escoria negra con detritus calizo. Este detritus calizo contiene finos, por lo que una mezcla adecuada con EAFS proporciona la fracción necesaria para ajustarse a la curva granulométrica de zahorras artificiales indicada en el PG-3.
- El detritus aporta a las EAFS la plasticidad necesaria para construir firmes de caminos rurales sin necesidad de revestimiento asfáltico. El detritus calizo es excedentario en cantera, por lo que su empleo, convierte ésta aplicación en una salida para el dicho material.
- Las mezclas en peso de EAFS-DETRITUS planteadas en el presente capítulo: 60EN-40D, 50EN-50D, 40EN-60D, cumplen las prescripciones de la normativa vigente en materia de construcción de firmes de caminos rurales.
- Las mezclas EAFS-DETRITUS planteadas en el presente capítulo, son de fácil ejecución, puesto que su mezcla en porcentaje de volumen, está en torno a 1 unidad de volumen de EAFS por 1 unidad de volumen de detritus (para las dos primeras mezclas) y 1 unidad de volumen de EAFS por 2 unidades de volumen de detritus (para la tercera mezcla).
- Hemos de tener presente que las variaciones de composición química y de constituyentes que presenta la escoria de las distintas plantas de producción de acero, o incluso en distintas coladas dentro de la misma planta, hace que no siempre los resultados tengan que ser los expuestos en la presente Tesis Doctoral.

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES FINALES DE LA TESIS DOCTORAL Y TRABAJOS FUTUROS

9 CONCLUSIONES FINALES DE LA TESIS DOCTORAL Y TRABAJOS FUTUROS

9.1 CONCLUSIONES FINALES DE LA TESIS DOCTORAL

Se exponen a continuación las conclusiones más destacadas que merecen ser reseñadas y son la referencia última a la investigación realizada. Algunas de estas conclusiones ya han sido expuestas en los apartados correspondientes a la experimentación. No obstante, con el ánimo de ordenar y referir las conclusiones generales deducidas a partir de los trabajos realizados, se mencionan a continuación de forma concisa las más destacables.

1. La escoria blanca o básica de horno-cuchara LFS y la escoria negra o ácida de horno eléctrico de arco EAFS procedentes de la fabricación de aceros al carbono y de baja aleación son unos materiales que puede ser utilizado de modo eficiente y sistemático como adiciones en construcción y obra civil.
2. La composición química y los componentes de la escoria blanca LFS y escoria negra EAFS deben ser evaluados de modo periódico como ensayo de control para garantizar que la escoria posee una calidad definida y homogénea.
3. La toxicidad potencial de las escorias por lixiviación, debe de ser asimismo evaluada de modo periódico. Estos ensayos deben ser considerados como obligatorios e indispensables en cualquier empleo de escorias o subproductos industriales. No obstante, las escorias EAFS y LFS ensayadas en la presente Tesis Doctoral no presentaron problemas de lixiviación fuera de los límites máximos permitidos por el Decreto 34/2003 [9], el Decreto 104/2006 [10] y el Decreto 32/2009 [8].
4. Para la utilización de la escoria negra y la escoria blanca en la fabricación de materiales útiles en construcción, es preciso un tratamiento previo de acondicionamiento que comprenda homogeneización y estabilización, asegurando la uniformidad de sus propiedades y evitando así procesos expansivos no deseados. Es preciso un control sistemático del producto que garantice propiedades uniformes y adecuadas en el momento de su utilización.
5. La estabilidad volumétrica o dimensional de la EAFS debe de ser evaluada de modo periódico para garantizar que no plantean problemas de expansividad.
6. Hemos de tener presente que las variaciones de composición química y de constituyentes que presenta la escoria en las distintas plantas de producción de acero, o incluso en distintas coladas dentro de la misma planta, hace que no siempre los resultados sean los presentados en la presente Tesis Doctoral.

7. Tras el estudio físico y químico de la escoria blanca de horno de cuchara podemos decir que, su composición química (aluminatos y silicatos cálcicos y de magnesio), su estructura y características, guardan cierta similitud con las de la cal y las del cemento, por lo que podría utilizarse en sustitución de éstos en estabilizaciones de suelos con alta plasticidad.
8. Las LFS investigadas en este trabajo no son volumétricamente estables bajo las condiciones de la norma ASTM D 4792-00 “Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions” [5]. La expansión potencial para la escoria blanca E1 y E2, alcanzó valores en torno al 18% y 30%, respectivamente. El periodo de tiempo necesario para alcanzar la expansión final fue de 5060 horas y de 3885 horas, para E1 y E2. Por tanto, el ensayo de expansión potencial para que las LFS alcanzasen toda su expansividad potencial requirió más de los 7 días indicados en la norma ASTM D 4792-00 [5].
9. En la presente Tesis Doctoral se propone como aplicación para las LFS su empleo en la estabilización de suelos para la formación de explanadas de caminos rurales, en proporciones comprendidas entre el 3% y el 5% de LFS mezclada con suelos naturales, con resultados calificables de modo global como buenos, o incluso en alguno de ellos como excelentes. La estabilización química se realizó sobre cuatro muestras de suelo, tres de ellas clasificadas como suelos marginales y la otra como suelo tolerable; todas ellas con hinchamientos elevados.
10. La escoria blanca de horno de cuchara parece tener un alto potencial en la estabilización de suelos con grano fino (arcillas), siempre dependiendo de la composición química del suelo de que se trate. De modo general, mejora la trabajabilidad, aumenta su capacidad portante (CBR) y resistencia a compresión simple, disminuye la densidad máxima del Próctor (la curva Próctor se aplana), plasticidad, absorción e hinchamiento.
11. De los incrementos de resistencia, cuantificados con distintos periodos de curado, de las probetas de CBR y compresión simple, se puede concluir que la escoria blanca presenta bajas reacciones de cementación que mejoran las propiedades de las mezclas con el tiempo. Principalmente dicha mejora, se produce a edades tempranas, por intercambio de iones con las arcillas, y reacciones de hidratación. Los aumentos de resistencia a largo plazo se deben a reacciones puzolánicas y de carbonatación.
12. De manera general, las mezclas de suelo y escoria reducen severamente el porcentaje de hinchamiento libre del suelo original determinado en la célula edométrica. Se cree que este fenómeno puede deberse al intercambio iónico producido entre el suelo y la escoria y/o a reacciones puzolánicas, similar a lo que ocurre cuando se estabiliza suelos con cal.
13. Como se señaló anteriormente, la escoria blanca presenta elevados porcentajes de expansión potencial a plazo muy largo. Sin embargo, tal expansión no está presente en las mezclas de las LFS con suelo, debido a su baja proporción y a tratarse de

una mezcla porosa poco cohesiva donde las expansiones locales quedan amortiguadas.

14. Como ya ha quedado descrito en varios trabajos de investigación, la presente Tesis Doctoral corrobora que los suelos ricos en sulfatos no son aptos para estabilización con cal, debido a la formación de productos como la etringita o thaumasita cuando el medio tienen las condiciones adecuadas de temperatura, pH, presencia de aluminatos, sulfatos y cal.
15. Las escorias negras de HEA son, en general, áridos pesados (densidad superior a 3 g/cm^3) y redondeados, con propiedades cercanas a las zahorras empleadas en las bases y subbases de caminos rurales; por ello, pueden ser utilizadas de modo eficiente y sistemático en su construcción, con un apreciable ahorro tanto económico como medioambiental, ya que evitamos de esta manera la sobreexplotación de canteras. El empleo de las EAFS en bases de caminos rurales requiere bien de un riego con gravilla bicapa como capa de revestimiento bien la mezcla con un material que aporte material fino y plasticidad.
16. Para ajustar la granulometría al huso indicado para zahorras en el PG-3, recurrimos a solventar la falta de finos con un detritus calizo, material barato y excedentario procedente de cantera. Además conseguimos aumentar la plasticidad y cohesión entre partículas, necesaria en firmes que no llevan revestimiento asfáltico.
17. Las mezclas en peso de EAFS-Detritus calizo estudiadas fueron: 60EAFS-40D, 50EAFS-50D, 40EAFS-60D. Todas ellas cumplieron las prescripciones de la normativa, en cuanto a desgaste de Los Ángeles, índice de lajas, densidad del Próctor Modificado, estabilidad dimensional e índice CBR.
18. Por último, y como conclusión general de esta Tesis Doctoral, se puede señalar que materiales como las escorias LFS, EAF y suelos clasificados por el PG-3 como marginales o inadecuados, que por separado serían llevados a vertederos, pueden valorizarse combinándolos y emplear la mezcla resultante como material apto para la construcción de explanadas y firmes de viales, al menos por aspectos de tipo técnicos determinados a partir de ensayos de laboratorio. Además de la consiguiente mejora medioambiental experimentada, en cuestión de eliminación de acopios de subproductos, transporte de suelos a vertedero y sobreexplotación de canteras y recursos naturales.

9.2 TRABAJOS FUTUROS

Desde el punto de vista eminentemente práctico y con una perspectiva de la actividad investigadora realista, que aporte soluciones útiles para mejorar la vida de las personas, se proponen algunas líneas de trabajo para proyectos futuros:

- Construir un tramo de prueba en el que se apliquen las técnicas establecidas en la presente Tesis Doctoral.

- Buscar la relación entre el porcentaje de tratamiento con las LFS y el contenido en sulfatos del suelo tratado para garantizar que no se producen daños por formación de sales expansivas.
- A diferencia de lo que ocurre con un suelo expansivo, se desconoce el comportamiento de la escoria cuando se añade a un suelo potencialmente colapsable, salvo alguna referencia bibliográfica prometedora.
- Estabilización de tierras blandas con otros subproductos, como cenizas volantes, enzimas, mezclas puzolana-cal, etc.
- Estudiar el efecto de la incorporación de las LFS y las EAFS en el diseño de mezclas bituminosas en caliente para firmes.
- Experimentar en firmes de caminos rurales con residuos de construcción y demolición (RCD).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Fomento. <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/catalogo.aspx>
- [2] UNESID. Unión de Empresas Siderúrgicas. <http://www.unesid.org>. <http://www.unesid.org>
- [3] AASHTO M-147-70 (1980) "Materials for Aggregate and Soil-Aggregate Subbase, Base and Surface Courses". American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- [4] ASTM D 2940-09 (1998) "Standard Specification for Graded Aggregate Material for Bases and Subbases for Highways and Airports". American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, P.A.
- [5] ASTM D 4792 (2006) "Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions". American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, P.A.
- [6] ASTM D 6275 (1998) "Standard Practice for Laboratory Testing of Bridge Decks ". American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA.
- [7] CEB-FIB (1995) "Código modelo CEB-FIB 1990 para el hormigón estructural, E-4". Canales y Puertos Colegio de Ingenieros de Caminos. Madrid.
- [8] Decreto 32/2009 de 24 de febrero (2009) "Valorización de escorias siderúrgicas de la Comunidad Autónoma de Cataluña". DOGC Núm. 5328 – 27.2.2009. España.
- [9] Decreto 34/2003 de 18 de febrero (2003) "Valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco". BOPV- miércoles 26 de febrero de 2003. España.
- [10] Decreto 104/2006 de 19 de octubre (2006) "Valorización de escorias en la Comunidad Autónoma del Cantabria". BOC- Jueves, 26 de octubre de 2006. España.
- [11] EHE (2008) "Instrucción para realización de obras de hormigón estructural". Ministerio de Fomento. Comisión Permanente de Hormigón. Madrid.

- [12] Ley 10/1998 de 21 de abril (1998) "Ley de Residuos". que transpone la Directiva 91/156/CEE donde se definen lo que se considera por residuo urbano y se regulan las competencias en materia de recogida y tratamiento de los mismos.
- [13] NLT- 114 (1999) "Determinación del contenido en sales solubles en los suelos". Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. CEDEX. Madrid.
- [14] NLT- 115 (1999) "Determinación del contenido en yeso de los suelos". Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. CEDEX. Madrid.
- [15] NLT- 172 (1986) "Determinación de la limpieza". Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. CEDEX. Madrid.
- [16] NLT- 251 (1991) "Determinación de la durabilidad al desmoronamiento de rocas blandas". Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. CEDEX. Madrid.
- [17] NLT- 254 (1999) "Ensayo de colapso en suelos". Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. CEDEX. Madrid.
- [18] NLT- 302 (1972) "Humedad-Sequedad de probetas de suelo-cemento". Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. CEDEX. Madrid.
- [19] NLT- 303 (1972) "Congelación-Deshielo de probetas de suelo-cemento". Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. CEDEX. Madrid.
- [20] NLT- 326 (2000) "Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras. Método del tanque". Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. CEDEX. Madrid.
- [21] NLT- 361 (1991) "Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería". Ministerio de Fomento. Centro de Estudios de Carreteras. CEDEX. Madrid.
- [22] Norma (2006) "Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco". Administración de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Departamento de Transportes y Obras Públicas. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. ISBN 84-457-2504-1. Vitoria-Gasteiz.
- [23] Orden circular 306/89 (1989) "Calzadas de servicio y accesos a zonas de servicio". Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- [24] Orden de 13 de Octubre de 1989 (1989) "Métodos de caracterización de los residuos tóxicos y peligrosos". Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. BOE nº270, de 10 de noviembre de 1989. España.
- [25] Orden FOM/3460 (2003) "Norma 6.1. IC secciones de firme, de la instrucción de carreteras". Ministerio de Fomento. BOE de 12 de diciembre de 2003.
- [26] PG-3 (2004) "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes". Ministerio de Fomento. Ediciones Liteam. Madrid.

- [27] Resolución de 20 de enero de 2009 (2009) "Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015." BOE núm. 49. Jueves 26 de febrero de 2009.
- [28] UNE-EN 14227-13 (2007) "Mezclas con conglomerante hidráulico. Especificaciones. Parte 13: Suelo tratado con conglomerante hidráulico para carreteras". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [29] UNE-ENV 13282 (2001) "Conglomerantes hidráulicos para carreteras. Composición, especificaciones y criterios de conformidad". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [30] UNE 1097-3 (1999) "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Determinación de la densidad aparente y porosidad". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [31] UNE 1097-6:A1 (2001) "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [32] UNE 7371 (1975) "Toma de muestras superficiales de suelo de tipo inalterado". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [33] UNE 80502 (2003) "Cales vivas o hidratadas utilizadas en la mejora y/o estabilización de suelos". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [34] UNE 103100 (1995) "Preparación de muestras para ensayos de suelos". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [35] UNE 103101 (1999) "Análisis granulométrico de suelos por tamizado". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [36] UNE 103103 (1993) "Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [37] UNE 103104 (1993) "Determinación del límite plástico de un suelo ". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [38] UNE 103201 (1996) "Determinación cuantitativa del contenido de sulfatos solubles de un suelo". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [39] UNE 103202 (1995) "Determinación cualitativa del contenido de sulfatos solubles de un suelo". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.

- [40] UNE 103204 (1993) "Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [41] UNE 103300 (1993) "Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [42] UNE 103302 (1994) "Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [43] UNE 103400 (1993) "Ensayo de ruptura a compresión simple en probetas de suelo". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [44] UNE 103500 (1994) "Ensayo de compactación. Próctor normal". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [45] UNE 103501 (1994) "Ensayo de compactación. Próctor modificado". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [46] UNE 103502 (1995) "Método de ensayo para determinar en laboratorio el CBR de un suelo". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [47] UNE 103601 (1996) "Ensayo de hinchamiento libre de un suelo en edómetro". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [48] UNE EN 196-2 (2006) "Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos." Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [49] UNE EN 459-1 (2002) "Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios e conformidad". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [50] UNE EN 932-1 (1997) "Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [51] UNE EN 933-1 (1998) "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos, Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [52] UNE EN 933-2 (1996) "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos, Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.

- [53] UNE EN 933-3 (1997) "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos, Parte 3: Determinación del índice de lajas". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [54] UNE EN 933-4 (2008) "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos, Parte 4: Determinación del coeficiente de forma de las partículas. Coeficiente de forma". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [55] UNE EN 933-5 (1995) "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos, Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [56] UNE EN 933-8 (2000) "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos, Parte 8: Ensayo del equivalente de arena". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [57] UNE EN 933-9 (2010) "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno." Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [58] UNE EN 1097 (1997) "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste. Parte 2: método para la determinación de la resistencia a la fragmentación. Parte 3: Métodos para determinar la densidad aparente y la porosidad. Parte 4: determinación de la porosidad del filler seco compactado. Parte 5: determinación del contenido en agua por secado en estufa. Parte 6: determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Parte 7: Determinación de la densidad de las partículas de filler. Método del picnómetro. Parte 8: determinación del coeficiente de pulimento acelerado." Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [59] UNE EN 1744-1 (1997) "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. Contenido de materia orgánica". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [60] UNE EN 7144 (1996) "Determinación de la finura de molido de los cementos con el permeabilímetro Blaine". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [61] UNE EN 12457 (2003) "Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.
- [62] UNE EN 103109 (1995) "Método de ensayo para determinar el índice equivalente de arena de un suelo". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid.

- [63] Ahnberg, H., Johansson, S. E., Pihl, H., Carlsson, T. "Stabilising effects of different binders in some Swedish soils". *Ground Improvement* 2003; 7(1). p. 9-23.
- [64] Akin Altun, I., Yilmaz, I. "Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement". *Cement and concrete Research* 2002; 32 (8). p. 1247-1249.
- [65] Akinmusuru, J. O. "Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes". *Resources, Conservation and Recycling* 1991; 5(1). p. 73-80.
- [66] Alizadeh, R., Chini, M., Ghods, P., Hoseini, M., Montazer, S., Sherkarchi, M. "Utilization of electric arc furnace slag as aggregates in concrete- environmental issue". CMI report; Tehran. 1996.
- [67] Amaral de Lima, L. Tesis doctoral: "Hormigones con escoria de Horno Eléctrico de Arco como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental". Universidad Politécnica de Cataluña. España; 1999.
- [68] ANCADE. "Manual de estabilización de suelos con cal". Asociación Nacional de fabricantes de cales y derivados de España (ANCADE). ; Madrid:1997.
- [69] Aquino, C., Inoue, M., Miura, H., Mizuta, M., Okamoto, T. "The effects of limestone aggregate on concrete properties". *Construction and Building Materials* 24(12). p. 2363-2368.
- [70] Bakker, R. F. M. "Initial period. Report of the technique Committee". RILEM 60-CSC-Corrosion of Steel in Concrete. P. Shiessl 1988;
- [71] Balcázar, N. Tesis doctoral: "La gestión medioambiental de la escoria LD: su utilización en agricultura y silvicultura". Universidad de Alcalá. España; 1992.
- [72] Bauzá Castello, J. D. "Criterios de selección y dosificación en los tratamientos con cal. Explanadas estabilizadas y capas de firmes estabilizadas con cementos. Aspectos prácticos". Madrid. 2005.
- [73] Bäverman, C., Sapiej, A., Moreno, L., Neretnieks, I. "Serial batch test performed on municipal solid waste incineration bottom ash and electric arc furnace slag, in combination with computer modelling". *Waste management and Research* 1997; 15(1). p. 55-71.
- [74] Bäverman, C., Aran, F. A. "A study of the potential of utilising electric arc furnace slag as filling materials in concrete". *Studies in Environmental Science* 1997; 71(C). p. 373-376.
- [75] Berger, E., Little, D. N., Graves, R. "Technical Memorandum: Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates". 2001;28. http://www.lime.org/publications/free_downloads.asp. p. 1-8.

- [76] Bergman, B., Bannenberg, N. "Schalackenführung und Schlackenoptimierung in der Sekundärmetallurgie". Stahl und Eisen 1991; 111(1). p. 125-131.
- [77] Beshr, H., Almusallam, A. A., Maslehuddin, M. "Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete". Construction and Building Materials 2003; 17(2). p. 97-103.
- [78] Best, N. F. "Volumetric stability of weathered LD slags containing both free lime and periclase". Final report. British Steel Corporation, Commission of the European Communities. Eds. EUR 10753 EN. 1987.
- [79] Bonnot, J., al., e. "Utilisation du laitier granulé en construction routière. Rapport final LCPC". Commission des Communautés Européenes. Eds. EUR 6553. FR. 1980.
- [80] Bredenkamp, S. Tesis doctoral: "Sulfate-Induced Heave in Lime Stabilized Soil". Texas: A&M University; 1994.
- [81] Burström, G., Ye, E., Fällman, A. M. "Utilisation and Stabilisation of Steelmaking Slags". AFR-report 1995; 57
- [82] Capodilupo, D. "Development of the foamy slag method in the electric arc furnace for melting and treatment of high-chrome steel". Final report CSM. European Commission. Eds. In press.
- [83] Casagrande, A., Fadum, R. E. "Notes on Soil Testing for Engineering Purposes". Harvard University Graduate School Engineering Publication; Massachusetts:1940.
- [84] Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., Heineck, K. S. "Key parameters for strength control of artificially cemented soils". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2007; 133(2). p. 197-205.
- [85] Chang, J., Wang, S., Shao, Y. "Manufacture of electric arc furnace slag aggregate and concrete through carbonation curing". Kuei Suan Jen Hsueh Pao/ Journal of the Chinese Ceramic Society 2007; 35(9). p. 1264-1269.
- [86] Dal-Re Tenreiro, R. "Caminos Rurales, Proyecto y Construcción". Mundi-Prensa; Madrid:1994. ISBN: 84-7114-494-8.
- [87] Del-Val Melus, M. A. e. a. "Manual de pavimentos asfálticos para vías de baja intensidad de tráfico". Madrid:1991.
- [88] Del Barrio, E. "Red de caminos en zonas regables". Curso Internacional de Riego y Drenaje. CENTER. IRYDA; Madrid.
- [89] Diamond, S., KInter, E. B. "Mechanisms of soil-lime stabilization, an interpretive review". Highway research record 1965; 92. p. 83-102.
- [90] Dippenaar, R. "Industrial uses of slag (the use and re-use of iron and steelmaking slags)". Ironmaking and Steelmaking 2005; 32(1). p. 35-46.

- [91] Drissen, P., Arlt, K. J. "Entstehung feinkörniger Pfannenschalchen". Report des Forschungsinstituts, FEHS, Duisburg (Germany) 2000; 7(1). p. 12-16.
- [92] Dubbe, D. D., Usmen, M. A., Moulton, L. K. "Expansive Pyritic Shales". Transportation Research Record 1984. p. 19-27.
- [93] Dussart, J. "Utilisation de la scorie LD en technique routière". Rapport final Laitiemor, Usinor; Commission des Communautés Européenes. Eds. EUR 10244 FR. 1986.
- [94] Eades, J. E., Grim, R. E. "A quick test to determine lime requirements for lime stabilization". Highway Research Board. Washington, DC 20001 USA 1963; 139. p. 9.
- [95] Etxeberria, M., Pacheco, C., Meneses, J. M., Berridi, I. "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates". Construction and Building Materials 24(9). p. 1594-1600.
- [96] Faraone, N., Tonello, G., Furlani, E., Maschio, S. "Steelmaking slag as aggregate for mortars: Effects of particle dimension on compression strength". Chemosphere 2009; 77(8). p. 1152-1156.
- [97] Ferris, G. A., Eades, J. L., McClellan, G. H., Graves, R. E. "Improved Characteristics in Sulfate Soils Treated with Barium Compounds Before Lime Stabilization". National Research Council. Transportation Research Record; Washington D.C. 1991. 1295.
- [98] Ferron, J. "Forschung Jahre and Entwicklung 1981-1990". Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Eds. EUR 13782 DE. 1992.
- [99] Formoso, A. "Use of Blast Furnace and Steelwork Slags as Fertilizer". 5th. EC Conference RTD on Industrial Technologies. Proceedings; Brussels. 1994. p. 71-72.
- [100] Formoso, A., López, F., Medina, f., Balcázar, N. "Utilización Agrícola de la escoria LD". Informe final CENIM. Comisión Europea, Eds. EUR 15591 ES. 1996.
- [101] Frías Rojas, M., Sánchez, M. I. "Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive Compounds". Cement and concrete Research 2004; 34. p. 1881-1888.
- [102] Frías Rojas, M., Sánchez, M. I., Uria, A. "Study of the instability of black slags from EAF steel industry". Materiales de Construcción 2002; 52(267). p. 79-83.
- [103] Frías Rojas, M., San-José, J. T., Vegas, I. "Árido siderúrgico en hormigones: proceso de envejecimiento y su efecto en compuestos potencialmente expansivos". Materiales de Construcción 2010; 60(297). p. 33-46.

- [104] Geiseler, J., Schilösser, R. "Kriterien zur Verwertung von Elektroofenschlacken". Preprints, 2nd European Electric Steelmaking Congress; Florence. 1986.
- [105] Geiseler, J. "Verwertung der Stahlwerksschlacken". Stahl und Eisen 111, Nr.1; Düsseldorf:1991.
- [106] Geiseler, J. "Composition and structure of slag". Slag Atlas edited by VDEh and European Coal and Steel Community (ECSC). Verlag Stahleisen GmbH, Second Edition:1995.
- [107] Geiseler, J. "Der Bustoff Electroofenschalacke. Entstehung, Nutzung, Erfahrungen". Schriftenreihe der forschungsgemeinschaft Eishüttenschlacken 1994; 3. p. 1-8.
- [108] Geiseler, J. "Use of steetwork slag in Europe". Waste Manement 1996; 16(1-3). p. 59-63.
- [109] Geyer, R. T. "Evaluation of the durability of the reinforced concrete with electric arc furnace addition". Congrasso Annual Associação Brasileira de Metalugio e Materiais. 2001. 56. p. 127-136.
- [110] Ghionna, V., Pedroni, S., Tenani, P., Veggi, S. "Geotechnical investigation on steel slags mixtures for landfills embankments construction." Proc. Second International Conference on Environmental Geotechnics; Osaka, Japan, 5-8 November 1996. Balkema, Rotterdam. 1996. p. 709-714.
- [111] GIASA. "Recomendaciones para la redacción de pliegos de especificaciones técnicas generales para el tratamiento de los suelos con cal". Unidad de control técnico. Gestión de Infraestructuras de Andalucía S. A. Consejería de Obras Públicas y Transportes 2010;
- [112] Gil Amores, A., Chico Gaytán, J. C., Ayuso Muñoz, J. "Cálculo y Dimensiones de Firmes en vías de baja intensidad de tráfico". Universidad de Córdoba:1997. ISBN: 84-7801-388-1.
- [113] Goldring, D. C., Jukes, L. M. "Petrology and stability of steel slags". Ironmaking and Steelmaking 1997; 24(6). p. 447-456.
- [114] González Martínez, J., J. "Estudio del hinchamiento de la escoria de horno eléctrico de arco. Valoración como material de construcción". Informe final Proyecto de Investigación Universidad-Empresa UE 97-19; Bilbao:1999.
- [115] Han Young, M., Jung Hoon, Y., Seong Soo, K. "A fundamental study on the steel slag aggregate concrete". Geosystem Engineering. 2002. 5 (2). p. 38-45.
- [116] Harris, J. P., Sebesta, S., Scullion, T. "Hydrated lime stabilization of sulfate-bearing vertisols in Texas". Transportation Research Record 2004; (1868). p. 31-39.

- [117] Heras, R. "Manual de Ingeniería de Regadíos". CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Centro de Estudios Hidrográficos. MOPU; Madrid.
- [118] Hunter, D. Tesis doctoral: "The Geochemistry of Lime-Induced Heave in Sulfate Bearing Clay Soils. (dissertation)". Reno: University of Nevada; 1989.
- [119] Iguchi, Y., Narushima, T., Izumi, C. "Calorimetric study on hydration of CaO-based oxides". Journal of Alloys and Compounds 2001; 321(2). p. 276-281.
- [120] IHOBE. "Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Escorias de Acería". Sociedad pública de gestión ambiental. Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. Gobierno Vasco; Bilbao:1999. Dep legal BI-249-99.
- [121] Jahrbuch, S. "VDEh". Eds. Stahl-Eisen Verlag; Düsseldorf:1998.
- [122] Jones, N. C. "The successful use of EAF slag in Asphalt". Proceedins of 2nd European Slag Conference. EUROSGAL Eds. Publication nº1; ISSN 1617-5867; Düsseldorf. 2001. p. 111-121.
- [123] Juckes, L. M. "The volume stability of modern steelmaking slags". Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy 2003; 112(3 DEC.). p. 177-197.
- [124] Kanagawa, A., Kuwayama, T. "The improvement of soft clayey soil utilizing reducing slag produced from electric arc furnace". Denki Seiko 1997; 68(4). p. 261-267.
- [125] Kojimori, M., Nemoto, K., Fukuokaya, T., Uchida, S., Matumoto, H., Mori, T. "Construction of new slag granulating equipment". Denki-Seiko [Electri Furnace Steel] 2003; 74(1). p. 55-59.
- [126] Koliass, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., Karahalios, A. "Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement". Cement and concrete composites 2005; 27(2). p. 301-313.
- [127] Kollar, J., Gunkel, P. "Untersuchungen an LD-Schlacken, insbesondere im Hinblick auf die Verwertung im Straßenbau". Abschlussbericht FEhS. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Eds. EUR 8311 DE. 1983.
- [128] Koros, P. J. "Dusts, Scale, Slags, Sludges. . . Not Wastes, but Sources of Profits". Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science 2003; 34(6). p. 769-779.
- [129] Kota, P. B. V. S., Hazlett, D., Perrin, L. "Sulfate-bearing soils: Problems with calcium-based stabilizers". Transportation Research Record 1996; (1546). p. 62-69.

- [130] Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., Romana, M. G., Sanchez Blanco, V., del Val, M. A. "Ingeniería de carreteras." McGRAW-HILL; Madrid:2004. ISBN: 84-481-3999-2.
- [131] Kuehn, M., Drissen, P., Schrey, H. "Treatment of liquid steel slags". Proceedings of 2nd European Slag Conference. EUROSLAG Eds.; Dusseldorf. 2000. 1. ISBN: 1617-5867. p. 123-135.
- [132] Kukko, H. "Stabilization of clay with inorganic by-products". Journal of Materials in Civil Engineering 2000; 12(4). p. 307-309.
- [133] Lamm, R., Beck, A., Ruscher, R., Mailaender, R. "How to make two-lane rural roads safer." WitPress; Sourhampton, Boston:2007.
- [134] Landa Lazcano, M. P. "La escoria blanca de acería como material utilizable en construcción". Informe final Proyecto de Investigación Universidad-Empresa UE 97-19; Bilbao:2001.
- [135] Lea, F. M. "The chemistry of cement and concrete. 3th Edition". New York:1971.
- [136] Leong Sing, W., Hashim, R., Haji Ali, F. "Compression rates of untreated and stabilized peat soils". Ejge 2008; 13
- [137] Little, D. "Evaluation of structural oflime stabilized and aggregates". National Lime Association; EEUU. 1999. Vol. 1.
- [138] Little, D. N., Thompson, M. R., Terrell, R. L., Epps, J. A., Barenberg, E. J. "Soil Stabilization for Roadways and Airfields". Air Force Engineering and Services Center. Final Report, ESL-TR-86-19, Engineering and Services Laboratory; Florida, USA. 1987.
- [139] Locher, F. W. "Research Institute for Cement Industry". Dusseldorf, Germany.
- [140] López, F. A., López-Delgado, A., Balcázar, N. "Physico-chemical and mineralogical properties of EAF and AOD Slags". Afinidad 1996; 53(461). p. 39-46.
- [141] Losa, J. "Camino Económico". Mundi-Prensa; Madrid:1979. ISBN: 84-7114-080-2.
- [142] Losañez Gonzalez, M. Tesis doctoral: "Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil". Universidad de País Vasco. España; 2005.
- [143] Luxán, M. P. "Tipificación de escorias producidas por la siderurgia de horno eléctrico, comomaterial utilizable en la construcción. I. Caracterización previa de las escorias". Informe técnico 16.939-I CSIC-Instituto de Ciencias de la Construcción de Eduardo Torroja; Madrid:1995.

- [144] Luxán, M. P., Sotolongo, R., Dorrego, F., Herrero, E. "Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by EAF". *Cement and concrete Research* 2000; 30(4). p. 517-519.
- [145] Mäkikyro, M. "Industrial slag use in geotechnical engineering: Slag in the geotechnical engineering project".
- [146] Manso Villalaín, J. M. Tesis doctoral: "Fabricación de Hormigón Hidráulico con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco". Universidad de Burgos. España; 2001.
- [147] Manso Villalaín, J. M., Polanco, J. A., Losañez Gonzalez, M., Gonzalez, J. J. "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate". *Cement and concrete composites* 2006;
- [148] Manso Villalaín, J. M., Gonzalez, J. J., Polanco, J. A. "EAF slag in concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*. ASCE 2004; 16(6). p. 639-645.
- [149] Manso Villalaín, J. M., Polanco, J. A., Losañez Gonzalez, M., Gonzalez, J. J. "Ladle Furnace Slag in Construction". *Journal of Materials in Civil Engineering* 2005; 17. p. 513-518.
- [150] Maslehuddin, M., Sharif, A. M., Shameem, M., Ibrahim, M., Barry, M. S. "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes". *Construction and Building Materials* 2003; 17(2). p. 105-112.
- [151] Maso, J. C. "The bond between aggregates and hydrated cement paste". *Proceeding of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements*. Vol I. edición septima; Paris. 1980.
- [152] Mehta, P. K., Manmohan, D. "Pore size distribution and permeability of hardened cement pastes". *Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements*. Vol. III. Edition septima; Paris. 1980.
- [153] Mehta, P. K. "Pozzolanic and cementitious by-products in concrete-another look". *ACE-SP*, 114-1; Thondhein. 1989.
- [154] Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. "Concrete. Structure, properties and materials". Secon Edition. Prentice Hall; New Jersey, USA:1993.
- [155] Mehta, P. K., Wang, S. "Expansion of ettringite by water adsorption". *Cement and concrete Research* 1982; 12(1). p. 121-122.
- [156] Miller, G. A., Azad, S. "Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust". *Construction and Building Materials* 2000; 14(2). p. 89-97.
- [157] Mills, K. C., Keene, B. L. "Physico-chemical, properties of BOS slag". Final report NPL. European Commission, Eds. EUR1 0434 EN; . 1986.

- [158] Mitchell, J. K., Dermatas, D. "Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions". ASTM Special Technical Publication. Publ by ASTM; San Francisco, CA, USA. 1992. 10403094 (ISSN). p. 41-64.
- [159] Mitchell, J. K. "Practical problems from surprising soil behavior". Journal of Geotechnical Engineering - ASCE 1986; 112(3). p. 255-289.
- [160] Monzó, J., Payá, J., Peris, E. "A preliminary study of gly ash granulometric influence on mortar strength". Cement and concrete Research 1994; 24. p. 791-796.
- [161] Morilla Abad, I. "Control de calidad en obras de carretera". Asociación técnica y Española de la Carretera, SEOPAN; Madrid:1989. ISBN: 84-404-5646-8.
- [162] Morino, K., Iwatsuki, E. "Utilization of electric arc furnace oxidizing slag". Proceedings of the TMS Fall Extraction and Processing Conference; San Sebastian. 1999. 1. p. 521-530.
- [163] Motz, H., Geiseler, J. "Products of steel slags and opportunity to save natural resources". Waste Management 2001; 21(3). p. 285-293.
- [164] Murphy, J. N., Meadowcroft, T. R., Barr, P. V. "Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag". Canadian Metallurgical Quarterly 1997; 36(5). p. 315-331.
- [165] Nessim, A. A., Wajda, R. L. "The rheology of cement-lime mortars". Magazine of Concrete Research 1968; 17(51). p. 59-68.
- [166] Okumura, H. "Recycling of iron and steelmaking slags in Japan". First International Conference on Processing Materials for Properties; Warrendale, PA. 1993. p. 803-806.
- [167] Ortuño, L., Rodríguez, J. L. "La estabilización del suelo con cal como mejora de suelos. Estudio realizado en el tramo V de la A-381: Jerez-Los Barrios". II Congreso Andaluz de Carreteras; Cadiz. 2000. Vol II.
- [168] Orus Asso, F. "Materiales de construcción". Dossat; Madrid:1985.
- [169] Oteo Mazo, C. "Escorias: Propiedades y aplicaciones geotécnicas". Curso sobre geotecnia ambiental. Tomo I; Madrid. 1993.
- [170] Papayianni, I., Anastasiou, E. "Concrete incorporating high volumes of industrial by-products". Role of Cement Science in Sustainable Development - Proceedings of the International Symposium - Celebrating Concrete: People and Practice; Dundee. 2003. 0727732463 (ISBN). p. 595-604.
- [171] Pasetto, M., Baldo, N. "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags". Journal of Hazardous Materials 181(1-3). p. 938-948.

- [172] Pellegrino, C., Gaddo, V. "Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate". *Cement and concrete composites* 2009; 31(9). p. 663-671.
- [173] Petry, T. M., Little, D. N. "Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures - History, practice, and future". *Journal of Materials in Civil Engineering* 2002; 14(6). p. 447-460.
- [174] Petry, T. M., Little, D. N. "Update on Sulfate-Induced Heave in Treated Clays: Problematic Sulfate Levels". National Research Council. *Transportation Research Record*; Washington D.C. 1992. 1362. p. 51-55.
- [175] Piret, J., Lesgardeur, A., Delmarcelle, A. "Utilisation de la scorie LD en construction routiere". *Rapport final CRM. Commission des Communautés Européenes*. Eds. EUR 7631 FR. 1982.
- [176] Piret, J., Willemijns, K., Lete, E., Chavet, J. "Recherche pour une meilleure valorisation du laitier de haut fourneau et de la scorie LD. Partie B:Développement d'une technique permettant de mieux connaitre la stabilité volumique de la scorie LD. Partim: Action de la chaux libre sur le gonflement de la scorie LD effect du vieillissement". *Report final. Commission des Communautés Européennes*. Eds. EUR 11750 FR; Luxemburgo. 1988.
- [177] Poh, H. Y., Ghataora, G. S., Ghazireh, N. "Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines". *Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE* 2006; 18(2). p. 229-240.
- [178] Posch, W., Presslinger, H., Hiebler, H. "Mineralogical evaluation of ladle slags at voestalpine stahl GmbH". *Ironmaking and Steelmaking* 2002; 29(4). p. 308-312.
- [179] Powers, T. C. *J. Am Ceram. Soc.* 1958; 61(1). p. 1-5.
- [180] Proctor, D. M., Fehling, K. A., Shay, E. C., Wittenborn, J. L., J.J., G., Avent, C. "Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace and electric arc furnace steel industry slag". *Environ Sci Technol* 2000; 34(8). p. 1576-1582.
- [181] Qasrawi, H., Shalabi, F., Asi, I. "Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate". *Construction and Building Materials* 2009; 23(2). p. 1118-1125.
- [182] Richardson, I. G., Cabrera, J. G. "The nature of C-S-H in model slag cements". *Cement and concrete composites* 2000; 22(4). p. 259-266.
- [183] Robinson, R. G. "A Study on the Beginning of Secondary Compression of Soils". *Journal of Testing and Evaluation* 2003; 31(5). p. 388-397.
- [184] Rodríguez Sáiz, Á. Tesis doctoral: "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno de cuchara y su utilización en construcción". Burgos, España: Universidad de Burgos; 2008.

- [185] Rodríguez Sáiz, Á., Manso Villalaín, J. M., Aragón, A., Gonzalez, J. J. "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag". *Resources, Conservation and Recycling* 2009; 53. p. 645-651.
- [186] Rovnushkin, V. A., Visloguzova, E. A., Spirin, S. A., Shekhovtsov, E. V., Kromm, V. V., Metelkin, A. A. "Composition of ladle slag and refractory materials and its effect on the wear resistance of the lining of an RH vacuum degasser". *Refractories and Industrial Ceramics* 2005; 46(3). p. 193-196.
- [187] Rubio, A. R., Carretero, J. G. "La aplicación de las corias de acería en Caarreteras". *Ingeniería Civil* 1991; 80. p. 5-9.
- [188] San José, J. T. "Reutilización y valoración en obra civil de escorias de horno eléctrico de arco producidas en la CAPV". *Arte y Cemento* 2000; 124(6)
- [189] Sanpedro Rodriguez, Á. "Tratamientos de suelo con cal. Planteamiento general, diseño y control de calidad". Asociación Nacional de fabricantes de cales y derivados de España (ANCADE). ; Madrid:2005.
- [190] Sanpedro Rodriguez, Á., Sanpedro Rodriguez, J. "De cal y carreteras". *Carreteras* 2004; 135
- [191] Sawaddee, A. Tesis doctoral: "A Study of properties of Portland cement containing electric furnace slag microsilica and superplasticizer". Thailandia; 1997.
- [192] Schlorholtz, S., Demirel, T. "Quick lime-gypsum interactions in stabilized soil bases for concrete highways". *Cement and concrete Research* 1984; 14(4). p. 529-532.
- [193] Setién, J., Hernández, D., González, J. J. "Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material". *Construction and Building Materials* 2009; 23(5). p. 1788-1794.
- [194] Shekarchi, M., Alizadeh, R., Chini, M., Ghods, P., Hoseini, M., Montazer, S. "Study on electric arc furnace slag properties to be used as aggregates in concrete". CANMET/ACI international conference on recent advances in concrete technology; Bucharest, Romania. 2003.
- [195] Shekarchi, M., Soltani, M., Alizadeh, R., Chini, M., Ghods, P., Hoseini, M., Montazer, S. "Study of the mechanical properties of heavy weight preplaced aggregate concrete using electric arc furnace slag as aggregate". International conference on concrete engineering and technology; Malaysia. 2004.
- [196] Sherwood, P. T. "Soil stabilisation with Cement and Lime-state of the art review". HNSO Publication 1993;
- [197] Shi, C., Day, R. L. "Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/FLY ASH BLENDS". *ADVANCE IN cEMENT rESEARCH* 1999; 11. p. 1851-1865.

- [198] Shi, C. "Steel slags. Its production, processing, characteristics and cementitious properties". *Journal of Materials in Civil Engineering* 2004; 16. p. 230-236.
- [199] Shi, C., Quian, J. "High performance cementing materials from industrial slags". *Resources, Conservation and Recycling* 2000; 29. p. 195-207.
- [200] Shi, C. "Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production". *Cement and concrete Research* 2002; 32(3). p. 459-462.
- [201] Shi, C., Hu, S. "Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions". *Cement and concrete Research* 2003; 33(11). p. 1851-1856.
- [202] Shi, C., Meyer, C., Behnood, A. "Utilization of copper slag in cement and concrete". *Resources, Conservation and Recycling* 2008; 52. p. 1115-2000.
- [203] Smolzyk, H. G. "Slag structure and identification of slags". 7th. International Congress on the Chemistry of Cement; Paris. 1983. 1. p. III-1/3.
- [204] Taha, R., Al-Rawas, A., Al-Jabri, K., Al-Harthy, A., Hassan, H., Al-Oraimi, S. "An overview of waste materials recycling in the Sultanate of Oman". *Resources, Conservation and Recycling* 2004; 41. p. 293-306.
- [205] Thomas, G. H. "Investigations on LD slag with particular reference to its use for road construction". Final report British Steel Corporation. Commission of the European Communities. Eds. EUR 8622 EN. 1983.
- [206] Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menand, N., Larsson, L., Bjorkam, B. "Characteristics of steel slag under cooling conditions". *Waste Management* 2007; 27(1335-1344)
- [207] Tufekci, M., Demirbas, A., Genc, H. "Evaluation of steel furnace slags as cement additives". *Cement and concrete Research* 1997; 27(11). p. 1713-1717.
- [208] UNESID. "La fabricación del acero". Union de Empresas Siderúrgicas; Madrid:1998.
- [209] Urbina, G. O., San Martín, R., De Castro, M., Elias, X. "Valorización de escorias procedentes del proceso de fabricación de acero de hornos de arco eléctrico". *Residuos* 1996; 31. p. 66-69.
- [210] Vallet, B., Comeau, Y., Bouvrette, J., Parent, S. "Dephosphatation de léau par des scories d'aciérie". Biodôme de Montreal; Canadá:2002.
- [211] Vazquez Ramonich, E., Barra, M. "Durability of concretes with steel slag as aggregates". Workshop on R+D+I in Technology of concrete structures. A tribute to Dr. Ravindra Gettu; Barcelona. 2004. p. 23-30.
- [212] Vazquez Ramonich, E., Barra, M. "Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction". *Materiales de Construcción* 2001; 51(263-264). p. 137-148.

- [213] Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. I., Higgins, D. D. "Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag". *Engineering Geology* 1999; 51(4). p. 257-277.
- [214] Wu, W., Zhang, W., Ma, G. "Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete". *Materials and Design* 31(6). p. 2878-2883.