

Anexos

ANEXO 1. INFORME DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR DIFRACCIÓN LASER DE LAS MATERIAS PRIMAS	1
ANEXO 2. GRÁFICAS DEL ENSAYO DE TERMOGRAVIMETRÍA DE LAS MATERIAS PRIMAS....	16
ANEXO 3. DISEÑO DE DOSIFICACIONES.....	21
A3.1. Fase 1: relación yeso-poliuretano.....	24
A3.1.1. Caracterización física.....	25
A3.1.2. Caracterización química	27
A3.1.3. Caracterización mecánica	28
A3.1.4. Conclusiones fase 1	30
A3.2. Fase 2: incorporación de fibra de vidrio	31
A3.2.1. Caracterización física.....	32
A3.2.2. Caracterización mecánica	33
A3.2.3. Conclusiones fase 2	35
A3.3. Fase 3: incorporación de aditivo fluidificante ..	35
A3.3.1. Caracterización física.....	36
A3.3.2. Caracterización mecánica	37
A3.3.3. Conclusiones fase 3	38
A3.4. Fase 4: incorporación de fibra de vidrio y aditivo fluidificante	39
A3.4.1. Caracterización física.....	40
A3.4.2. Caracterización mecánica	41
A3.4.3. Conclusiones fase 4	43
A3.5. Fase 5: relación agua-conglomerante.....	44
A3.5.1. Caracterización física.....	45
A3.5.2. Caracterización mecánica	46
A3.5.3. Conclusiones fase 5	48
A3.6. Conclusiones	49
ANEXO 4. AMPLIACIÓN DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD EN LAS MEZCLAS	51

ANEXO 5. INFORMES DEL ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD Y CALOR BRUTO DE COMBUSTIÓN DE LAS MEZCLAS.....	56
---	-----------

ANEXO 6. INFORME DEL ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD Y CALOR BRUTO DE COMBUSTIÓN DEL PREFABRICADO.....	67
--	-----------

ANEXO 7. INFORME DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN ACÚSTICA DEL PREFABRICADO	72
---	-----------

ANEXO 8. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA FASE EXPERIMENTAL	73
---	-----------

A8.1. Definición del objetivo y alcance del estudio..73

A8.1.1. Alcance del estudio.....	73
A8.1.2. Unidad funcional.....	74
A8.1.3. Límites del sistema	74
A8.1.4. Requisitos de calidad de los datos.....	75
A8.1.5. Metodología de evaluación de impacto.....	76
A8.1.6. Categorías de impacto.....	76

A8.2. Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV) ..78

A8.2.1. Adquisición de materias primas (A1)	78
A8.2.2. Transporte de materias primas (A2)	79
A8.2.3. Fabricación (A3)	80

A8.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) e interpretación.....81

A8.4. Conclusiones

ANEXO 9. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA FASE INDUSTRIAL.....	91
--	-----------

A9.1. Definición del objetivo y alcance del estudio..92

A9.1.1. Alcance del estudio.....	92
A9.1.2. Unidad funcional.....	94
A9.1.3. Límites del sistema	94
A9.1.4. Requisitos de calidad de los datos.....	95

A9.1.5.	Metodología de evaluación de impacto.....	96
A9.1.6.	Categorías de impacto.....	96
A9.2.	Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV) ..	99
A9.2.1.	Adquisición de materias primas (A1)	100
A9.2.2.	Transporte de materias primas (A2)	101
A9.2.3.	Fabricación (A3)	102
A9.2.4.	Transporte del producto (A4)	106
A9.2.5.	Construcción e instalación (A5).....	106
A9.2.6.	Uso (B1).....	107
A9.2.7.	Desmontaje o demolición (C1).....	107
A9.2.8.	Transporte (C2)	108
A9.2.9.	Ciclo de vida (A1-C2).....	108
A9.3.	Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV)	
	e interpretación.....	111
A9.4.	Conclusiones	119
ANEXO 10.	ANÁLISIS DEL COSTE DEL	
	CICLO DE VIDA.....	121
A10.1.	Definición del objetivo y alcance del estudio	121
A10.1.1.	Alcance del estudio.....	121
A10.1.2.	Unidad funcional.....	121
A10.1.3.	Límites del sistema	121
A10.1.4.	Requisitos de calidad de los datos.....	122
A10.1.5.	Metodología de evaluación de impacto.....	123
A10.1.6.	Categorías de impacto.....	123
A10.2.	Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV)	123
A10.2.1.	Adquisición de materias primas (A1) y	
	transporte (A2)	123
A10.2.2.	Fabricación (A3).....	124
A10.2.3.	Transporte (A4) y construcción e instalación (A5)	
	126	
A10.2.4.	Uso (B1).....	127
A10.2.5.	Desmontaje o demolición (C1).....	127
A10.2.6.	Transporte (C2)	127
A10.3.	Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV)	
	e interpretación.....	128

A10.4. Análisis de sensibilidad.....	134
A10.5. Conclusiones	136



ANEXO 1. INFORME DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR DIFRACCIÓN LASER DE LAS MATERIAS PRIMAS

Se incluyen los informes con las gráficas granulométricas correspondientes a las diferentes materias primas analizadas:

- Figura 1.1: escayola (muestra 1).
- Figura 1.2: escayola (muestra 2).
- Figura 1.3: residuo de poliuretano tipo I (pasa tamiz 0,5 mm).
- Figura 1.4: residuo de poliuretano tipo I (pasa tamiz 2 mm).
- Figura 1.5: residuo de poliuretano tipo B (pasa tamiz 0,5 mm).
- Figura 1.6: residuo de poliuretano tipo B (pasa tamiz 2 mm).
- Figura 1.7: residuo de poliuretano tipo P (pasa tamiz 0,5 mm).
- Figura 1.8: residuo de poliuretano tipo P (pasa tamiz 2 mm).
- Figura 1.9: residuo de poliuretano tipo A (pasa tamiz 0,5 mm).
- Figura 1.10: residuo de poliuretano tipo A (pasa tamiz 2 mm).
- Figura 1.11: residuo de poliuretano tipo SG (pasa tamiz 0,5 mm).
- Figura 1.12: residuo de poliuretano tipo SG (pasa tamiz 2 mm).
- Figura 1.13: residuo de poliuretano tipo BU (pasa tamiz 2 mm).
- Figura 1.14: residuo de poliuretano tipo ES (pasa tamiz 2 mm).

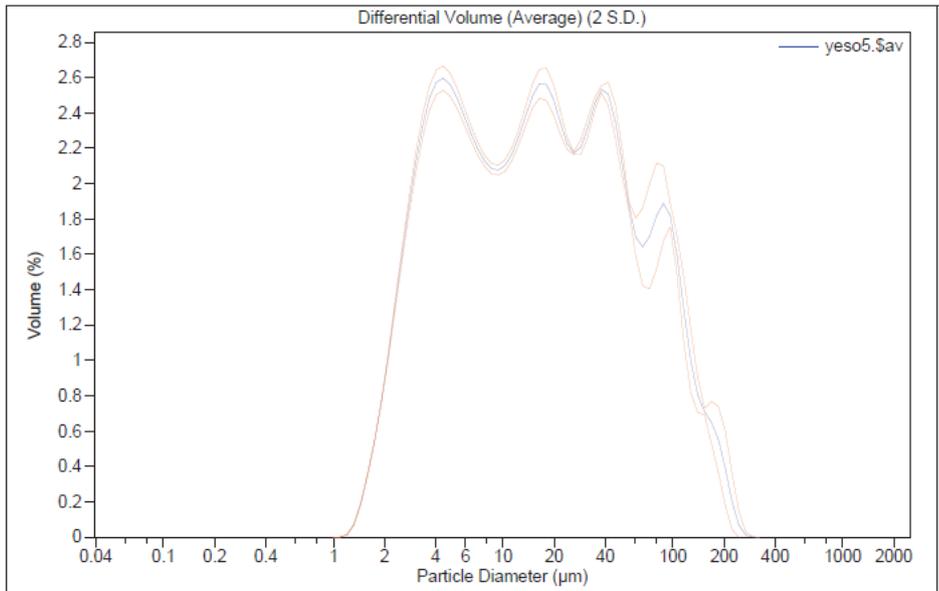


LS Particle Size Analyzer

20 Feb 2018 9:58

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\yeso5.\$av
 yeso5.\$av
 File ID: yeso5
 Sample ID: 18015-4
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Optical model: UBUgypsum.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Run length: 92 seconds
 Pump speed: 51%
 Fluid: alcohol isopropilico
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\Yeso5_04.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\Yeso5_05.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\Yeso5_06.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		yeso5.\$av		
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm				
Volume:	100%	S.D.:	39.42 µm	
Mean:	32.14 µm	Variance:	1554 µm ²	
Median:	15.97 µm	C.V.:	123%	
Mean/Median ratio:	2.013	Skewness:	2.087 Right skewed	
Mode:	4.443 µm	Kurtosis:	4.736 Leptokurtic	
d ₁₀ :	3.225 µm	d ₅₀ :	15.97 µm	
		d ₉₀ :	88.09 µm	
<10%	<25%	<50%	<75%	<90%
3.225 µm	5.638 µm	15.97 µm	42.38 µm	88.09 µm

Figura 1.1. Granulometría de la escayola tipo A (muestra 1)

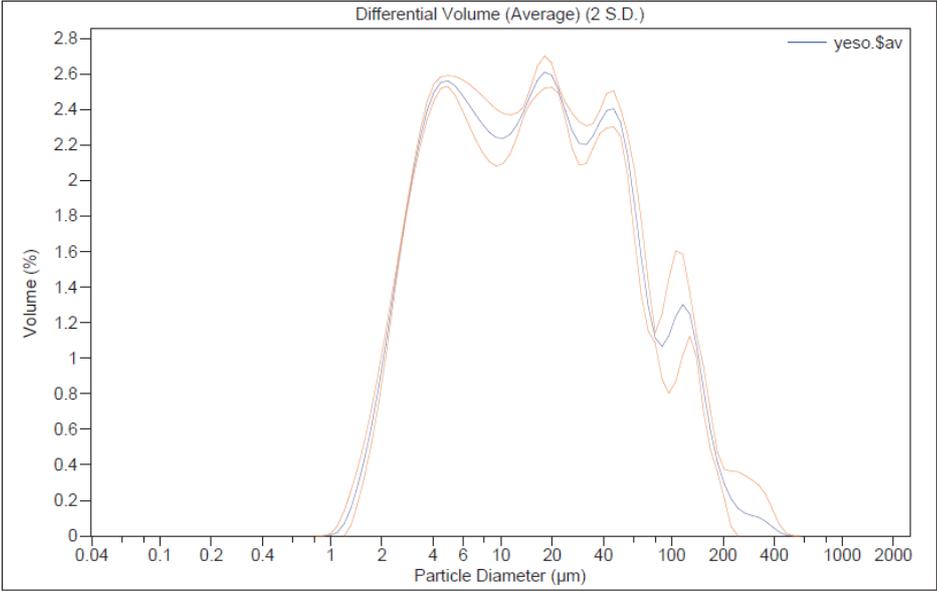


LS Particle Size Analyzer

27 May 2019 10:07

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\yeso.\$av
 yeso.\$av
 File ID: yeso (Y)
 Sample ID: GE19079-5
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Comment 2: tamizada 1.4mm
 Optical model: UBUgypsum.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: 2-Propanol
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\yeso (Y)_04.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\yeso (Y)_05.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\yeso (Y)_06.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		yeso.\$av	
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm			
Volume:	100%	S.D.:	44.05 µm
Mean:	32.04 µm	Variance:	1941 µm ²
Median:	15.16 µm	C.V.:	138%
Mean/Median ratio:	2.114	Skewness:	3.021 Right skewed
Mode:	18.00 µm	Kurtosis:	13.00 Leptokurtic
d ₁₀ :	3.162 µm	d ₅₀ :	15.16 µm
		d ₉₀ :	84.34 µm

Figura 1.2. Granulometría de la escayola tipo A (muestra 2)

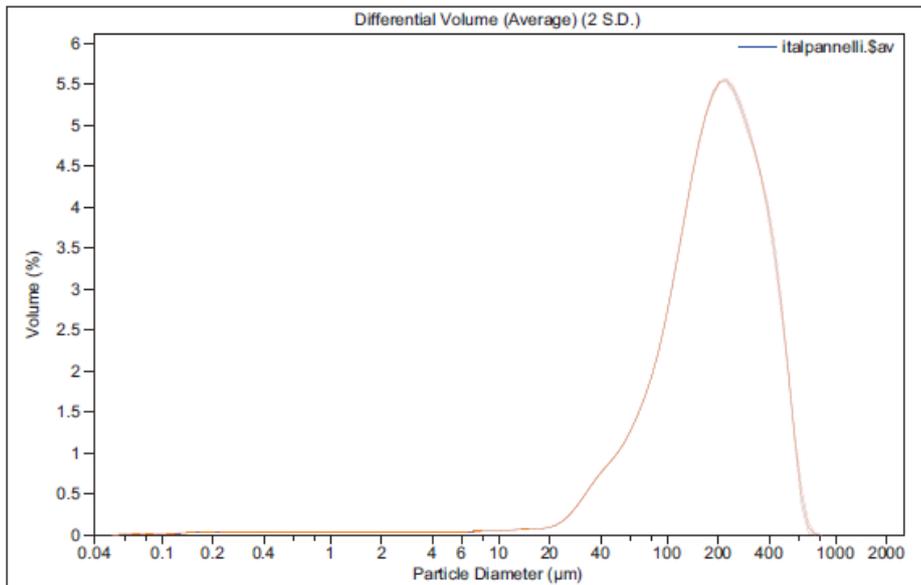


LS Particle Size Analyzer

30 Jul 2018 11:37

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018133\italpanelli.\$av
 italpanelli.\$av
 File ID: italpanelli
 Operator: LMR
 Comment 1: menor 0.5mm
 Comment 2: modulo ULM
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: 2-Propanol
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\Usuarios\Comité acceso\N2018133\italpanelli_07.\$ls
 C:\LS13320\Usuarios\Comité acceso\N2018133\italpanelli_08.\$ls
 C:\LS13320\Usuarios\Comité acceso\N2018133\italpanelli_09.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		italpanelli.\$av		
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm				
Volume:	100%	S.D.:	132.4 µm	
Mean:	217.9 µm	Variance:	17537 µm ²	
Median:	194.3 µm	C.V.:	60.8%	
Mean/Median ratio:	1.122	Skewness:	0.706 Right skewed	
Mode:	223.4 µm	Kurtosis:	-0.00075 Platykurtic	
d ₁₀ :	63.54 µm	d ₅₀ :	194.3 µm	
		d ₉₀ :	410.7 µm	
<10%	<25%	<50%	<75%	<90%
63.54 µm	117.7 µm	194.3 µm	299.9 µm	410.7 µm

Figura 1.3. Granulometría del residuo de poliuretano tipo I (pasa tamiz 0,5 mm)

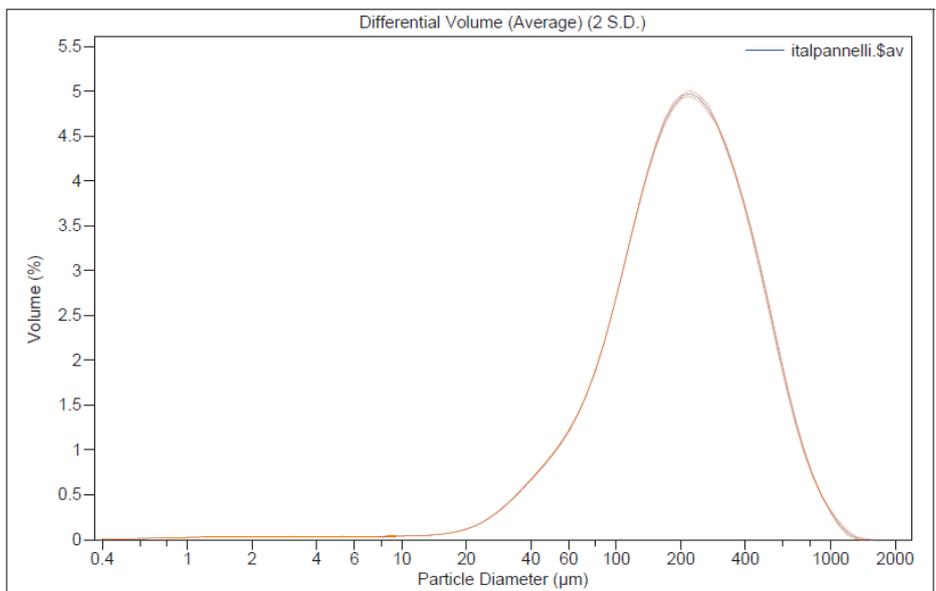


LS Particle Size Analyzer

27 May 2019 10:07

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\italpanelli.\$av
 italpanelli.\$av
 File ID: italpanelli (I)
 Sample ID: GE19079-6
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Comment 2: tamizada 1.4mm
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: 2-Propanol
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\italpanelli (I)_07.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\italpanelli (I)_08.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\italpanelli (I)_09.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		italpanelli.\$av	
Calculations from 0.375 µm to 2000 µm			
Volume:	100%	S.D.:	184.3 µm
Mean:	254.2 µm	Variance:	33960 µm ²
Median:	207.7 µm	C.V.:	72.5%
Mean/Median ratio:	1.224	Skewness:	1.450 Right skewed
Mode:	223.4 µm	Kurtosis:	2.693 Leptokurtic
d ₁₀ :	68.88 µm	d ₅₀ :	207.7 µm
		d ₉₀ :	504.0 µm

Figura 1.4. Granulometría del residuo de poliuretano tipo I (pasa tamiz 2 mm)

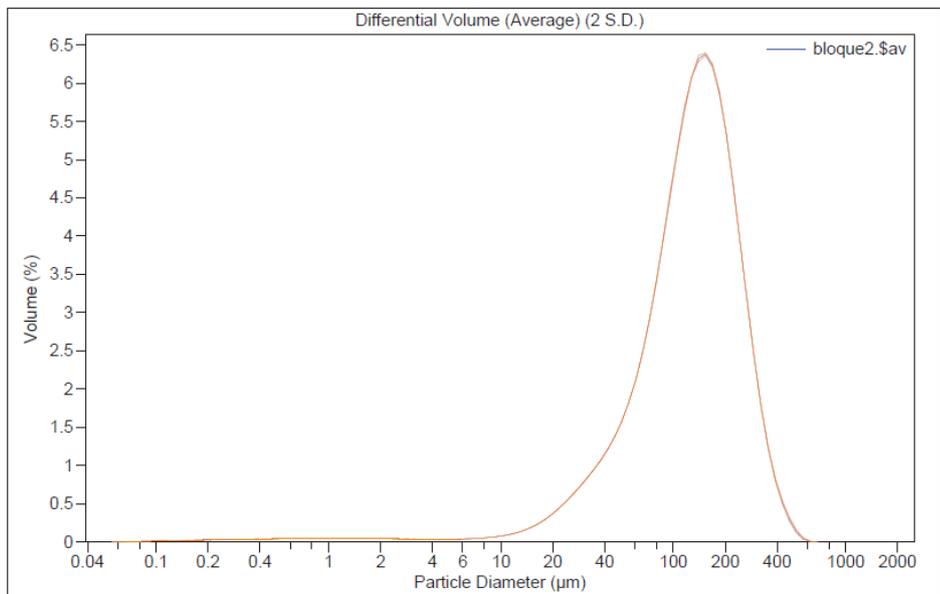


LS Particle Size Analyzer

20 Feb 2018 9:55

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\bloque2.\$av
 bloque2.\$av
 File ID: bloque2
 Sample ID: 18015-3
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: alcohol isopropilico
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\bloque2_04.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\bloque2_05.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\bloque2_06.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		bloque2.\$av	
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm			
Volume:	100%	S.D.:	86.68 µm
Mean:	144.5 µm	Variance:	7513 µm ²
Median:	131.7 µm	C.V.:	60.0%
Mean/Median ratio:	1.097	Skewness:	0.957 Right skewed
Mode:	153.8 µm	Kurtosis:	1.322 Leptokurtic
d ₁₀ :	44.14 µm	d ₅₀ :	131.7 µm
d ₉₀ :	259.4 µm		
<10%	<25%	<50%	<75%
<90%			
44.14 µm	82.62 µm	131.7 µm	191.8 µm
			259.4 µm

Figura 1.5. Granulometría del residuo de poliuretano tipo B (pasa tamiz 0,5 mm)

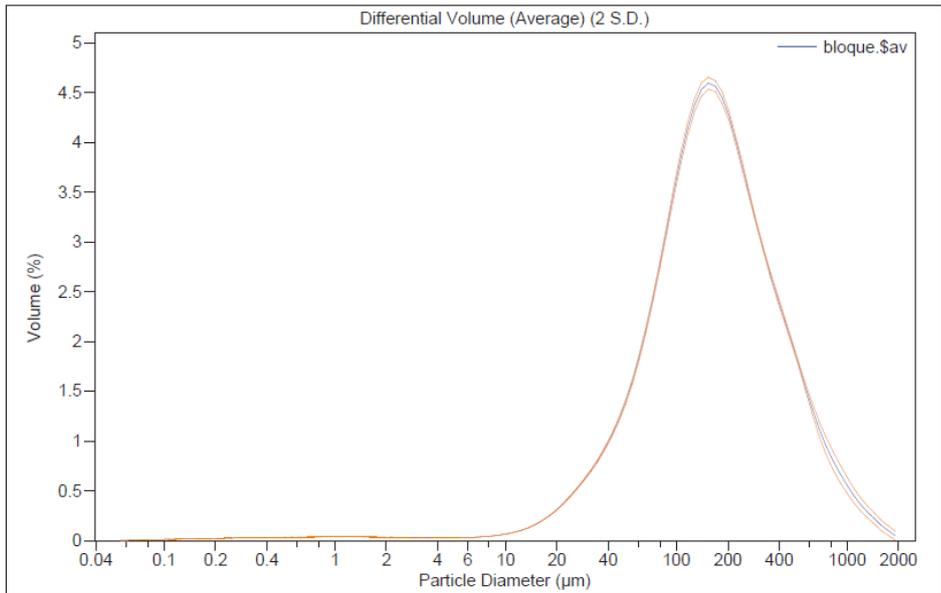


LS Particle Size Analyzer

27 May 2019 10:05

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\bloque.\$av
 bloque.\$av
 File ID: bloque (b)
 Sample ID: GE19079-2
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Comment 2: tamizada 1.4mm
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: 2-Propanol
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\bloque (b)_01.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\bloque (b)_02.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\bloque (b)_03.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		bloque.\$av	
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm			
Volume:	100%	S.D.:	231.8 µm
Mean:	234.4 µm	Variance:	53737 µm ²
Median:	162.2 µm	C.V.:	98.9%
Mean/Median ratio:	1.445	Skewness:	2.572 Right skewed
Mode:	153.8 µm	Kurtosis:	9.002 Leptokurtic
d ₁₀ :	49.75 µm	d ₅₀ :	162.2 µm
		d ₉₀ :	504.7 µm

Figura 1.6. Granulometría del residuo de poliuretano tipo B (pasa tamiz 2 mm)

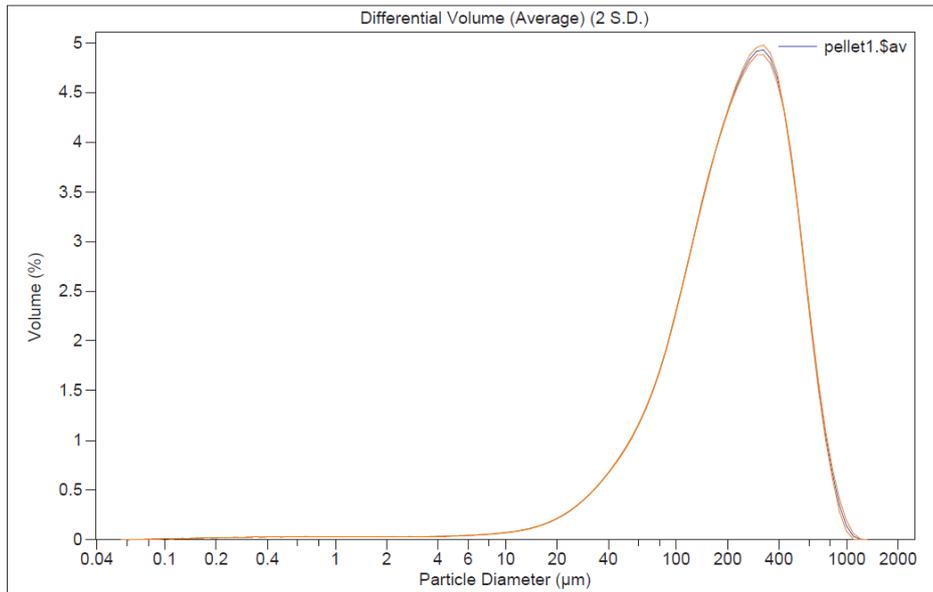


LS Particle Size Analyzer

20 Feb 2018 9:56

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\pellet1.\$av
 pellet1.\$av
 File ID: pellet1
 Sample ID: 18015-2
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: alcohol isopropilico
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\Usuarios\Comité acceso\N2018015\pellet1_04.\$is
 C:\LS13320\Usuarios\Comité acceso\N2018015\pellet1_05.\$is
 C:\LS13320\Usuarios\Comité acceso\N2018015\pellet1_06.\$is



Volume Statistics (Arithmetic)		pellet1.\$av		
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm				
Volume:	100%	S.D.:	182.1 µm	
Mean:	265.5 µm	Variance:	33161 µm ²	
Median:	229.1 µm	C.V.:	68.6%	
Mean/Median ratio:	1.159	Skewness:	0.962 Right skewed	
Mode:	324.4 µm	Kurtosis:	0.792 Leptokurtic	
d ₁₀ :	62.53 µm	d ₅₀ :	229.1 µm	
		d ₉₀ :	521.1 µm	
<10%	<25%	<50%	<75%	<90%
62.53 µm	125.3 µm	229.1 µm	371.2 µm	521.1 µm

Figura 1.7. Granulometría del residuo de poliuretano tipo P (pasa tamiz 0,5 mm)

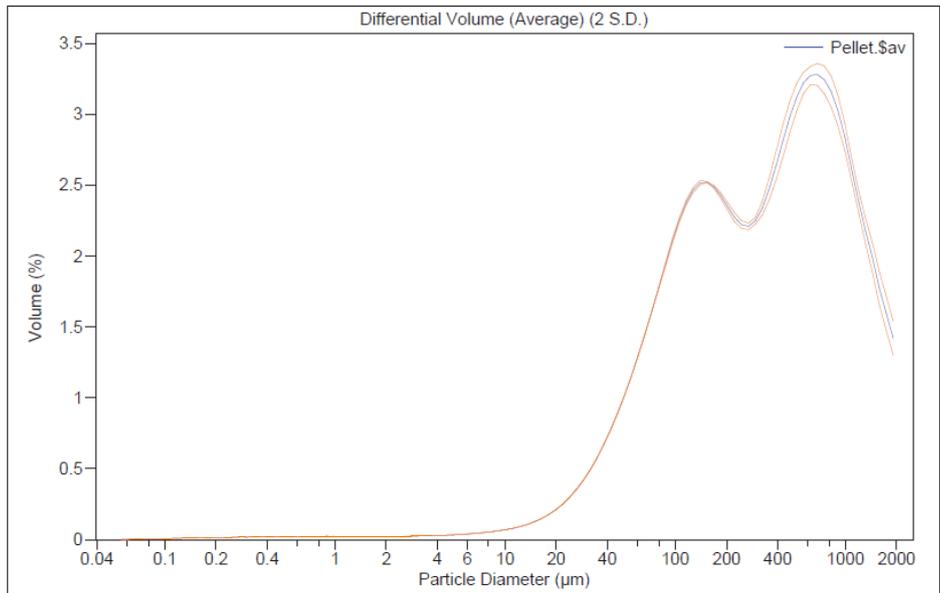


LS Particle Size Analyzer

27 May 2019 10:03

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Pellet.\$av
 Pellet.\$av
 File ID: Pellet 1.4mm
 Sample ID: GE19079-1
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Comment 2: tamizada 1.4mm
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: 2-Propanol
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Pellet 1.4mm_01.\$ts
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Pellet 1.4mm_02.\$ts
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Pellet 1.4mm_03.\$ts



Volume Statistics (Arithmetic)		Pellet.\$av	
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm			
Volume:	100%	S.D.:	462.8 µm
Mean:	496.5 µm	Variance:	214.1e3 µm ²
Median:	339.8 µm	C.V.:	93.2%
Mean/Median ratio:	1.461	Skewness:	1.181 Right skewed
Mode:	684.2 µm	Kurtosis:	0.657 Leptokurtic
d ₁₀ :	61.59 µm	d ₅₀ :	339.8 µm
		d ₉₀ :	1205 µm

Figura 1.8. Granulometría del residuo de poliuretano tipo P (pasa tamiz 2 mm)

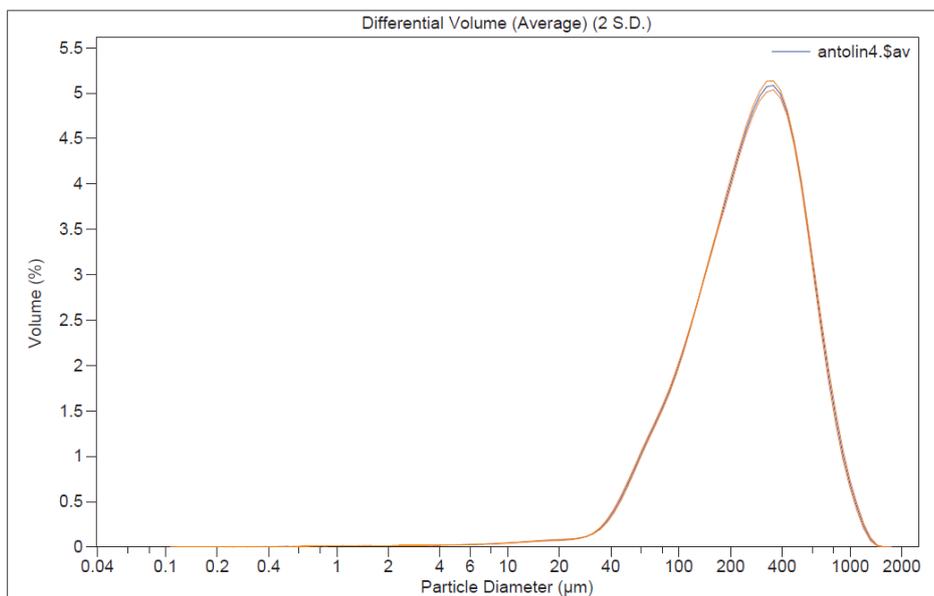


LS Particle Size Analyzer

20 Feb 2018 9:53

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\antolin4.\$av
 antolin4.\$av
 File ID: antolin4
 Sample ID: 18015-5
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Optical model: polimeroUBUpidsgris.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: alcohol isopropilico
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\antolin4_01.\$is
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\antolin4_02.\$is
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\antolin4_03.\$is



Volume Statistics (Arithmetic)		antolin4.\$av	
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm			
Volume:	100%	S.D.:	217.7 µm
Mean:	317.7 µm	Variance:	47375 µm ²
Median:	271.3 µm	C.V.:	68.5%
Mean/Median ratio:	1.171	Skewness:	1.164 Right skewed
Mode:	356.1 µm	Kurtosis:	1.512 Leptokurtic
d ₁₀ :	84.48 µm	d ₅₀ :	271.3 µm
		d ₉₀ :	616.9 µm
<10%	<25%	<50%	<75%
84.48 µm	152.3 µm	271.3 µm	433.3 µm
			616.9 µm

Figura 1.9. Granulometría del residuo de poliuretano tipo A (pasa tamiz 0,5 mm)

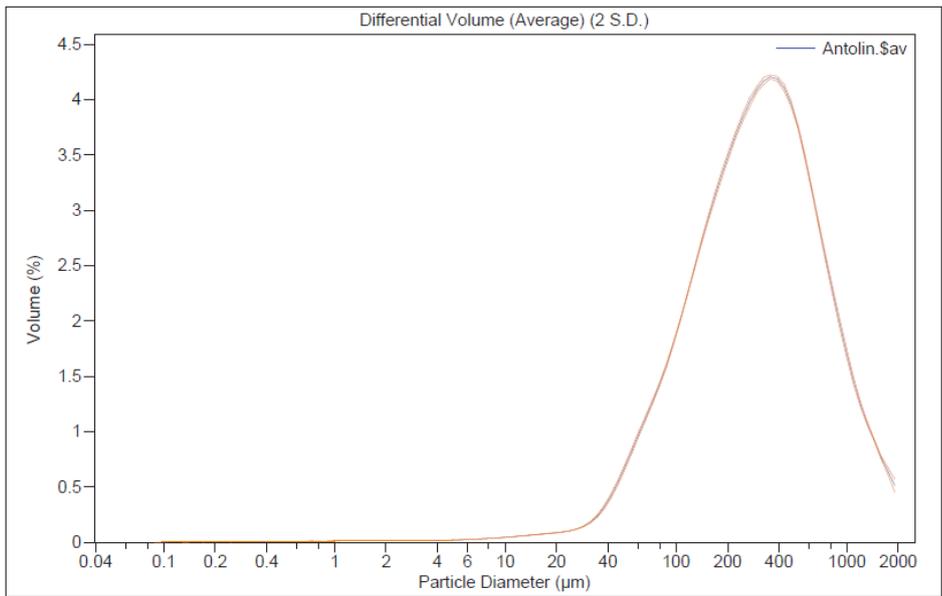


LS Particle Size Analyzer

27 May 2019 10:06

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Antolin.\$av
 Antolin.\$av
 File ID: Antolin 1.4mm
 Sample ID: GE19079-4
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Comment 2: tamizada 1.4mm
 Optical model: polimeroUBUpidsgris.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: 2-Propanol
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Antolin 1.4mm_01.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Antolin 1.4mm_02.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Antolin 1.4mm_03.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		Antolin.\$av	
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm			
Volume:	100%	S.D.:	351.8 µm
Mean:	408.0 µm	Variance:	123.8e3 µm ²
Median:	303.7 µm	C.V.:	86.2%
Mean/Median ratio:	1.343	Skewness:	1.699 Right skewed
Mode:	356.1 µm	Kurtosis:	3.153 Leptokurtic
d ₁₀ :	85.88 µm	d ₅₀ :	303.7 µm
		d ₉₀ :	878.9 µm

Figura 1.10. Granulometría del residuo de poliuretano tipo A (pasa tamiz 2 mm)

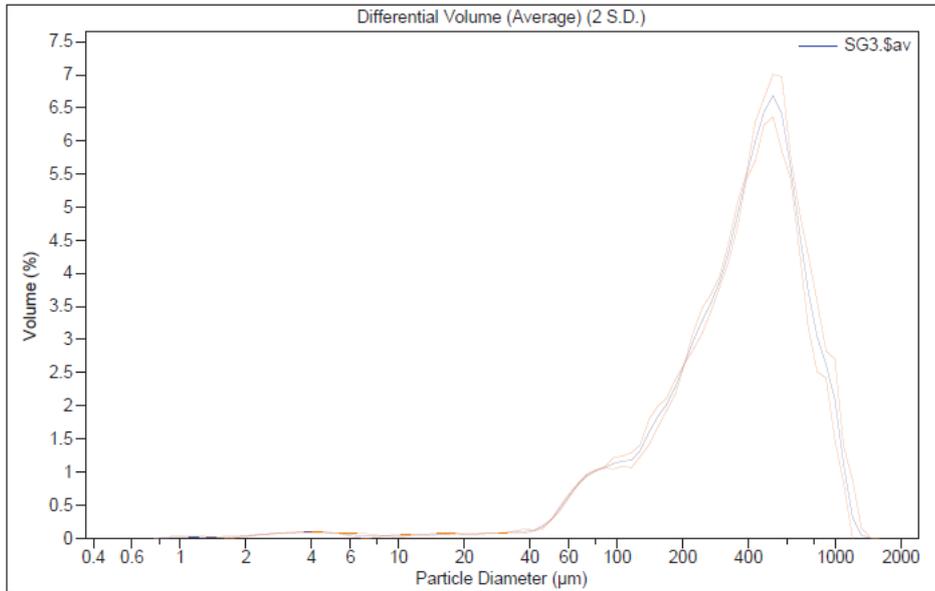


LS Particle Size Analyzer

20 Feb 2018 9:57

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\SG3.\$av
 SG3.\$av
 File ID: SG3
 Sample ID: 18015-1
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: alcohol isopropilico
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\Sg3_04.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\Sg3_05.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2018015\Sg3_06.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		SG3.\$av	
Calculations from 0.375 µm to 2000 µm			
Volume:	100%	S.D.:	250.2 µm
Mean:	424.0 µm	Variance:	62624 µm ²
Median:	401.0 µm	C.V.:	59.0%
Mean/Median ratio:	1.057	Skewness:	0.566 Right skewed
Mode:	517.2 µm	Kurtosis:	-0.125 Platykurtic
d ₁₀ :	110.8 µm	d ₅₀ :	401.0 µm
		d ₉₀ :	772.7 µm
<10%	<25%	<50%	<75%
110.8 µm	227.9 µm	401.0 µm	579.9 µm
			772.7 µm

Figura 1.11. Granulometría del residuo de poliuretano tipo SG (pasa tamiz 0,5 mm)

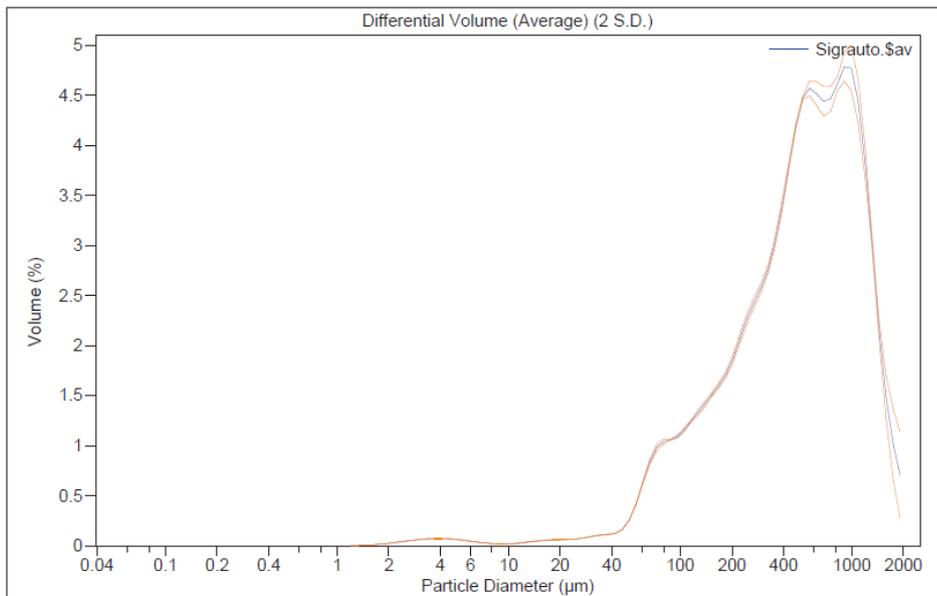


LS Particle Size Analyzer

27 May 2019 10:06

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Sigrauto.\$av
 Sigrauto.\$av
 File ID: Sigrauto 1.4mm
 Sample ID: GE19079-3
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Comment 2: tamizada 1.4mm
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 51%
 Fluid: 2-Propanol
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Sigrauto 1.4mm_01.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Sigrauto 1.4mm_02.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2019079\Sigrauto 1.4mm_03.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		Sigrauto.\$av	
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm			
Volume:	100%	S.D.:	420.2 µm
Mean:	606.2 µm	Variance:	176.5e3 µm ²
Median:	528.7 µm	C.V.:	69.3%
Mean/Median ratio:	1.147	Skewness:	0.740 Right skewed
Mode:	905.1 µm	Kurtosis:	-0.050 Platykurtic
d ₁₀ :	114.9 µm	d ₅₀ :	528.7 µm
		d ₉₀ :	1207 µm

Figura 1.12. Granulometría del residuo de poliuretano tipo SG (pasa tamiz 2 mm)

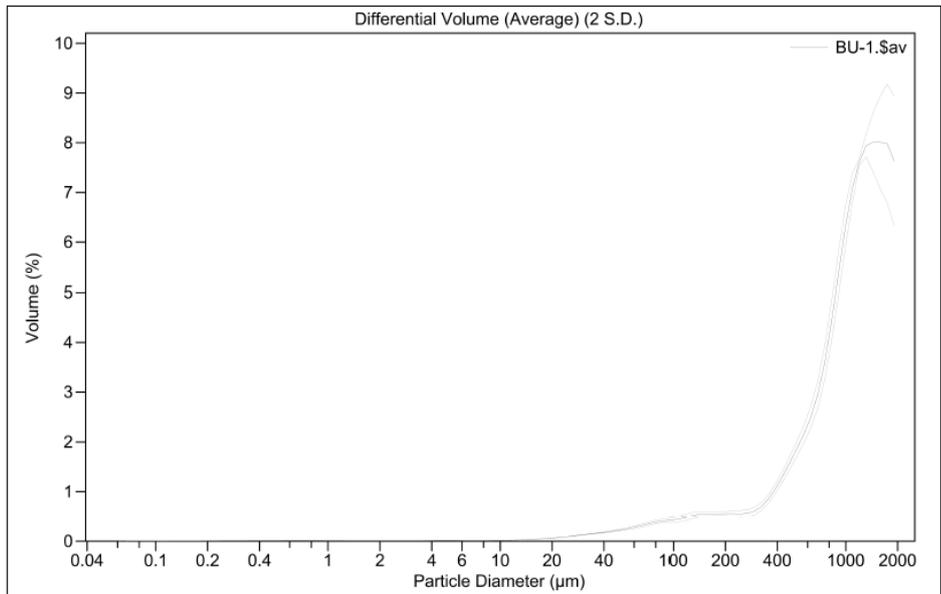


LS Particle Size Analyzer

18 May 2023 13:45

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2023135\BU-1.\$av
 BU-1.\$av
 File ID: BU-1
 Sample ID: GE23135-1
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Comment 2: en 2-propanol
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Pump speed: 52%
 Fluid: 2-propanol
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2023135\BU-1_13.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2023135\BU-1_14.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2023135\BU-1_15.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)		BU-1.\$av		
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm				
Volume:	100%	S.D.:	529.7 µm	
Mean:	1068 µm	Variance:	280.5e3 µm ²	
Median:	1102 µm	C.V.:	49.6%	
Mean/Median ratio:	0.969	Skewness:	-0.245 Left skewed	
Mode:	1443 µm	Kurtosis:	-0.853 Platykurtic	
<10%	<25%	<50%	<75%	<90%
252.8 µm	691.7 µm	1102 µm	1489 µm	1774 µm

Figura 1.13. Granulometría del residuo de poliuretano tipo BU (pasa tamiz 2 mm)

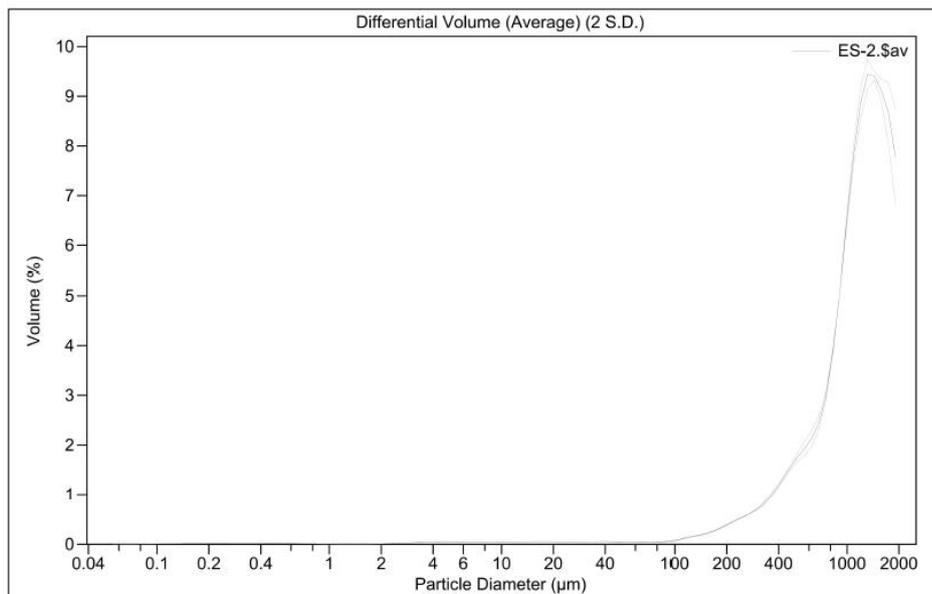


LS Particle Size Analyzer

18 May 2023 13:46

Beckman Coulter LS 13 320

File name: C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2023135\ES-2.\$av
 ES-2.\$av
 File ID: ES-2
 Sample ID: GE23135-2
 Operator: LMR
 Comment 1: Módulo ULM
 Comment 2: en 2-propanol
 Optical model: polimeroubupids1.rf780d PIDS included
 LS 13 320 Universal Liquid Module
 Run length: 92 seconds
 Pump speed: 52%
 Fluid: 2-propanol
 Average of 3 files:
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2023135\Es-2_16.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2023135\Es-2_17.\$ls
 C:\LS13320\usuarios\Comité acceso\N2023135\Es-2_18.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)			ES-2.\$av	
Calculations from 0.040 µm to 2000 µm				
Volume:	100%		S.D.:	489.9 µm
Mean:	1142 µm		Variance:	240.0e3 µm ²
Median:	1184 µm		C.V.:	42.9%
Mean/Median ratio:	0.964		Skewness:	-0.363 Left skewed
Mode:	1314 µm		Kurtosis:	-0.622 Platykurtic
<10%	<25%	<50%	<75%	<90%
426.7 µm	815.4 µm	1184 µm	1521 µm	1780 µm

Figura 1.14. Granulometría del residuo de poliuretano tipo ES (pasa tamiz 2 mm)

ANEXO 2. GRÁFICAS DEL ENSAYO DE TERMOGRAVIMETRÍA DE LAS MATERIAS PRIMAS

Se incluyen las gráficas termogravimétricas correspondientes a los diferentes tipos de residuos de poliuretano analizados. Se ensayan en el formato procesado y con un tamaño de partícula inferior a 4 mm:

- Figura 2.1: TGA residuo tipo I
- Figura 2.2: TGA residuo tipo B
- Figura 2.3: TGA residuo tipo P
- Figura 2.4: TGA residuo tipo A
- Figura 2.5: TGA residuo tipo AT
- Figura 2.6: TGA residuo tipo SG
- Figura 2.7: TGA residuo tipo BU
- Figura 2.8: TGA residuo tipo ES

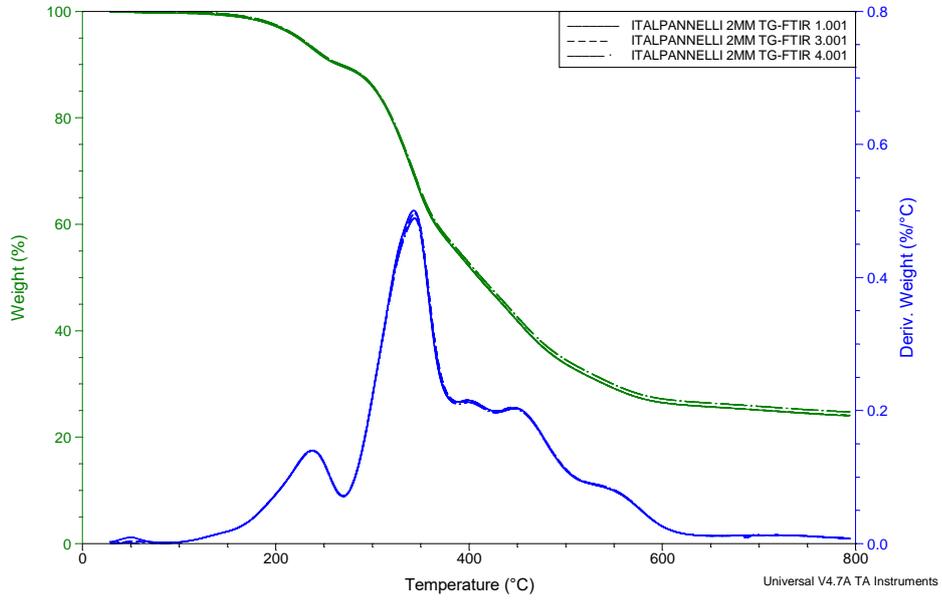


Figura 2.1. TGA residuo tipo I

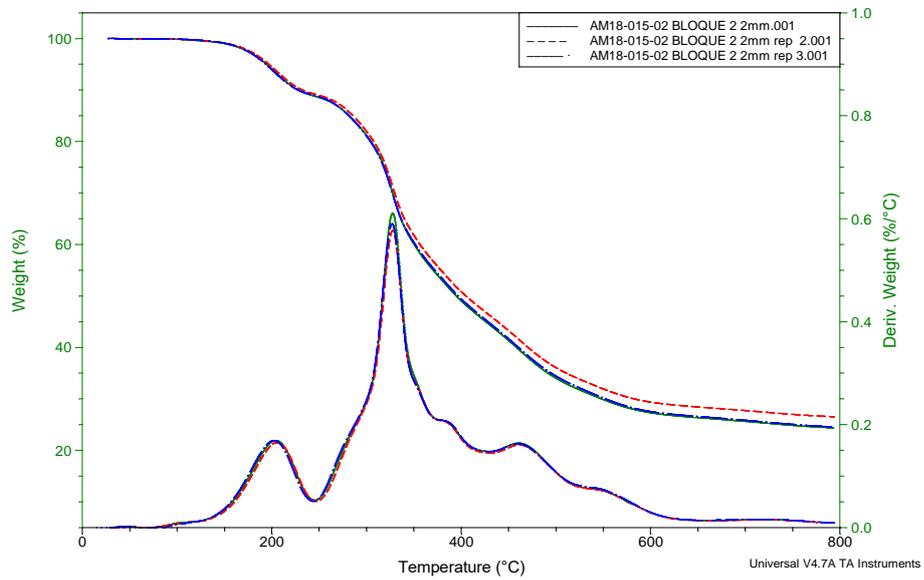


Figura 2.2. TGA residuo tipo B

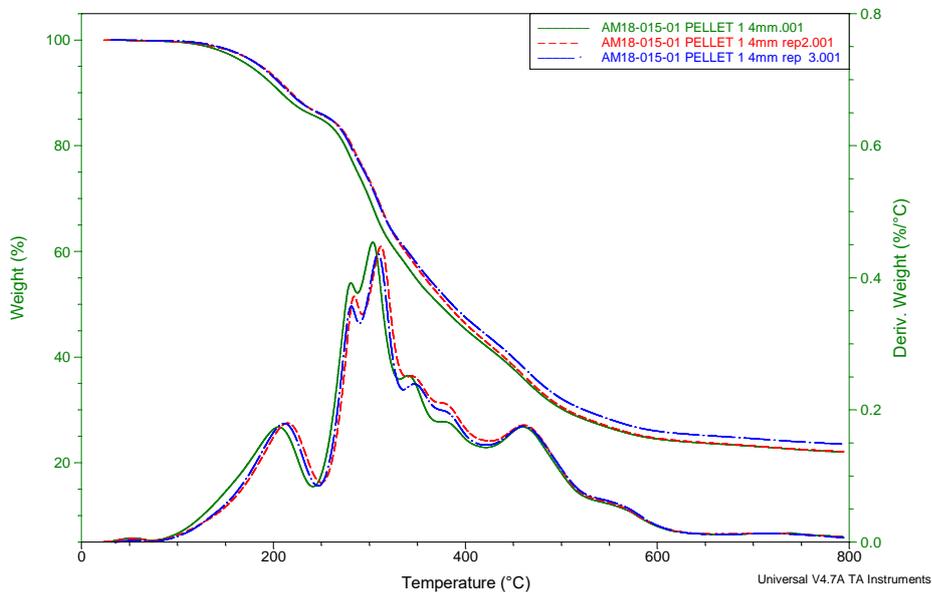


Figura 2.3. TGA residuo tipo P

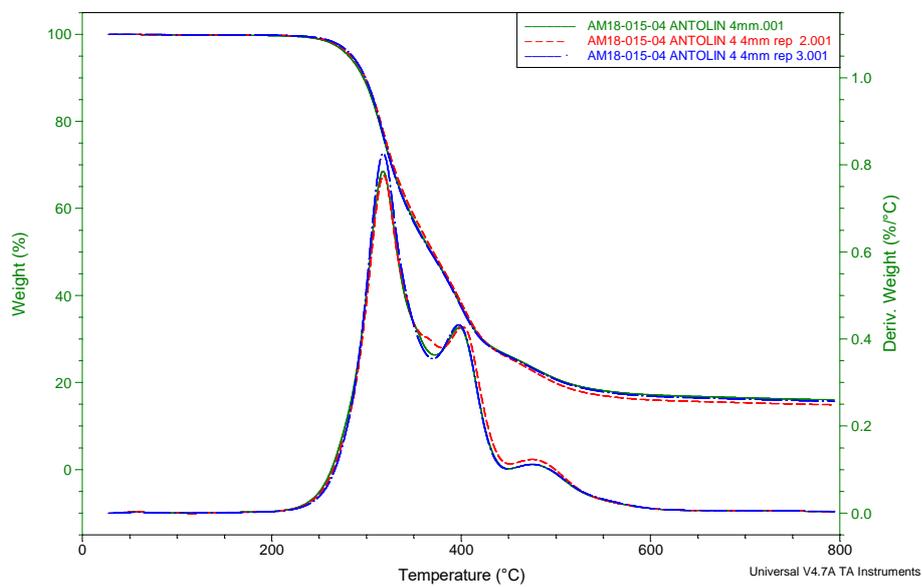


Figura 2.4. TGA residuo tipo A

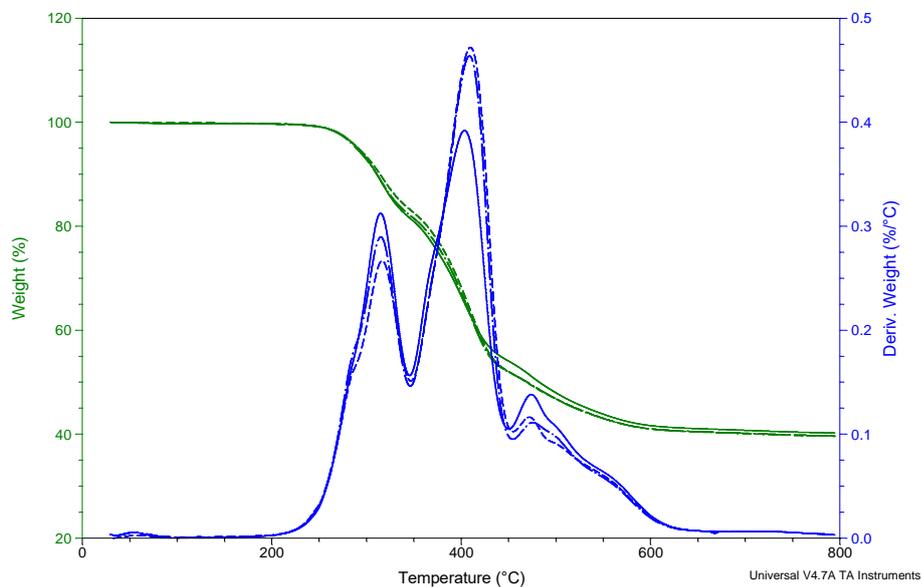


Figura 2.5. TGA residuo tipo AT

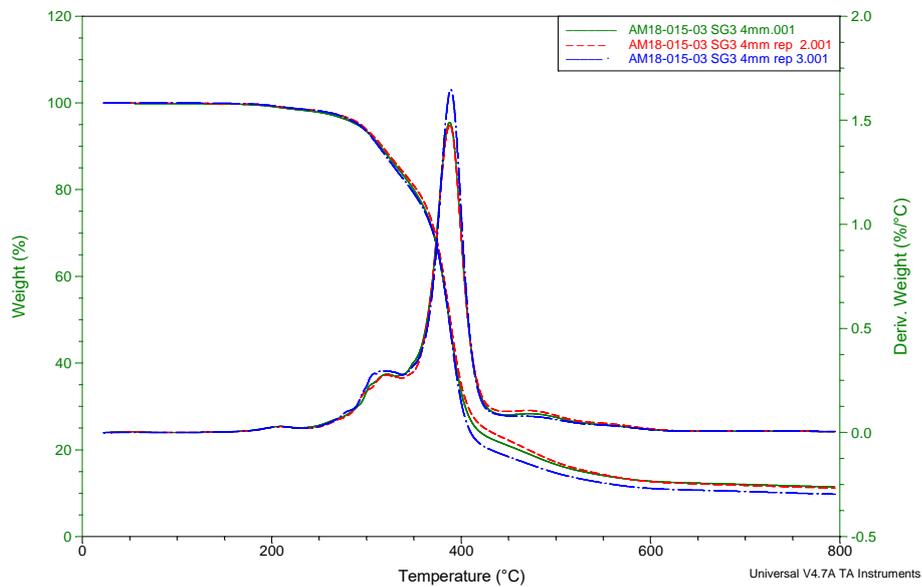


Figura 2.6. TGA residuo tipo SG

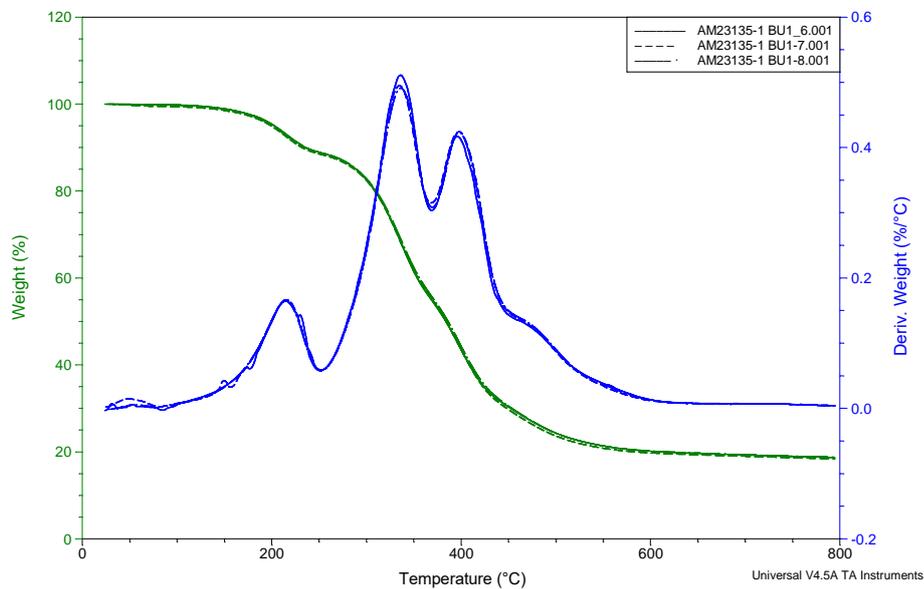


Figura 2.7. TGA residuo tipo BU

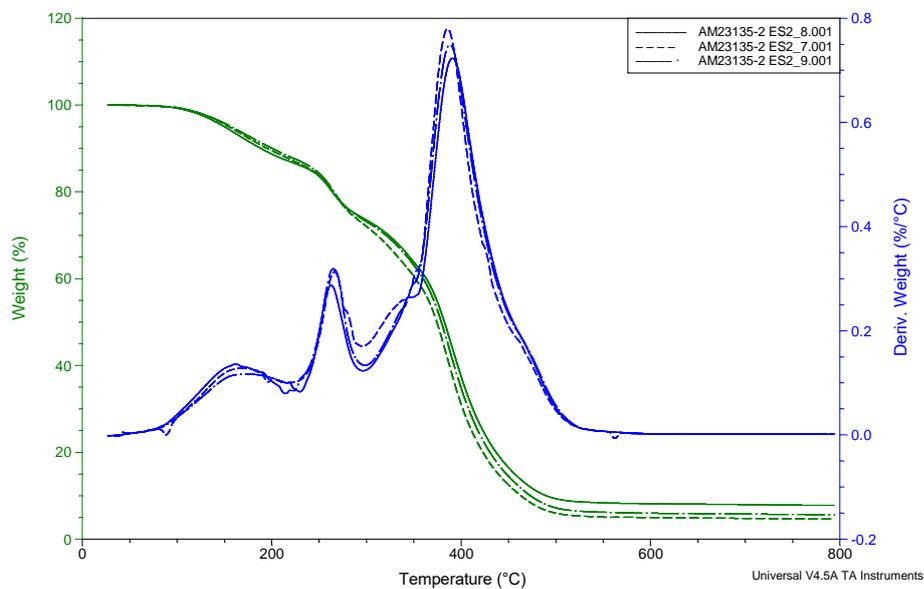


Figura 2.8. TGA residuo tipo ES

ANEXO 3. DISEÑO DE DOSIFICACIONES

El plan de trabajo establecido consiste en fabricar y analizar diferentes mezclas de yeso y residuo de poliuretano, sustituyendo en volumen parte del conglomerante por polímero. En función de la cantidad de yeso reemplazada surgen las diferentes dosificaciones objeto de estudio. Se analiza también la proporción de fibras de vidrio, de aditivo y de agua a incluir en las mezclas.

El estudio completo de todas las combinaciones posibles de yeso y los ocho tipos de residuo de poliuretano se considera inviable, dado el volumen de trabajo que ello significa. Es por ello que de entre todos los desechos poliméricos en estudio se escoge el tipo P para la consecución de esta fase. Las razones que llevan a su elección proceden de la fase de caracterización de materias primas en la que se concluye que éste es el que mayor potencial de aprovechamiento presenta dado que es el que menos tiempo y energía de procesado precisa y dada su presentación en forma de pellet, que reduce considerablemente su volumen de transporte y almacenamiento.

La dosificación ideal se determina analizando progresivamente la incorporación de diferentes materias primas a la mezcla (Tabla 3.1). El trabajo se divide en fases que se realizan de manera consecutiva:

- Fase 1: estudio de la relación yeso-poliuretano (Y+PU). Se incluye el análisis de dos tamaños de residuo diferentes P2 y P4, es decir, residuo tipo P con tamaño de partícula inferior a 2 mm (P2) y residuo tipo P con tamaño de partícula inferior a 4 mm (P4).
- Fase 2: análisis de la cantidad de fibra de vidrio (F).
- Fase 3: análisis de la dosis de aditivo fluidificante (A).
- Fase 4: estudio en conjunto de la proporción de fibra de vidrio y aditivo fluidificante en las mezclas (F+A).
- Fase 5: análisis comparativo del rendimiento de las dosificaciones con diferentes relaciones agua-conglomerante ($a/(Y+PU)$).

Fases	Residuo tipo P (Pasa tamiz 2 mm (P2))	Residuo tipo P (Pasa tamiz 2 mm (P2) / 4 mm (P4))		Residuo tipo P (Pasa tamiz 2 mm (P2))
	$\alpha/(Y+PU) = 0,95$	$\alpha/(Y+PU) = 1$		$\alpha/(Y+PU) = 1,10$
Fase 1: Yeso (Y) + Poliuretano (PU)	-	Y1P2 Y1,5P2 Y1,75P2 Y2P2	Y1P4 Y1,5P4 Y1,75P4 Y2P4	-
Fase 2: Yeso (Y) + Poliuretano (PU) + Fibras (F)	-	Y1,5P2+2%F Y1,5P2+4%F		-
Fase 3: Yeso (Y) + Poliuretano (PU) + Aditivo (A)	-	Y1,5P2+0,2%A Y1,5P2+0,4%A		-
Fase 4: Yeso (Y) + Poliuretano (PU) + Fibras (F) + Aditivo (A)	-	Y1,5P2+1%F+0,5%A Y1,5P2+1%F+1%A Y1,5P2+1%F+2%A Y1,5P2+1%F+2,5%A Y1,5P2+1%F+3%A Y1,5P2+2%F+0,4%A Y1,5P2+2%F+0,8%A Y1,5P2+4%F+0,4%A		-
Fase 5: Yeso (Y) + Poliuretano (PU) + Fibras (F) + Aditivo (A)	Y1,5P2+1%F+0,5%A Y1,5P2+1,7%F+0,5%A	-	-	Y1,5P2+1%F +1%A Y1,5P2+1%F +2%A

Tabla 3.1. Mezclas analizadas en la fase de diseño de la dosificación idónea

En primer lugar, se estudian diferentes proporciones de yeso-poliuretano, se realizan sustituciones en volumen de 1, 1,5, 1,75 y 2 partes, lo que quiere decir que por cada parte en volumen de escayola se incorpora 1, 1,5, 1,75 o 2 partes en volumen de residuo. Al mismo tiempo, se evalúan diferentes tamaños de partícula del residuo tipo P que se incorpora en la mezcla, estos tamaños son el pasa del tamiz de 2 mm (P2) o el del de 4 mm (P4).

Posteriormente, se procede con el análisis de las pastas incluyendo aditivo fluidificante y fibra de vidrio en su composición, primero por separado y luego en conjunto. Se analiza la incorporación de un 1 %, 2 % y 4 % de fibras de vidrio (F) y un 0,2 %, 0,4 %, 0,5 %, 0,8 %, 1 %, 2 %, 2,5 % y 3 % de aditivo (A), todo ello respecto del peso de conglomerante.

Por último, se estudia el comportamiento de las mezclas ajustando la relación agua-conglomerante ($\alpha/(Y+PU)$). Las proporciones analizadas son 0,95, 1 y 1,1.

Se incluye la fabricación y análisis de una dosificación de referencia que exclusivamente contiene conglomerante, con el fin de comparar los resultados obtenidos y valorar la influencia de la incorporación de residuo de poliuretano en las mezclas.

Para la caracterización de las mezclas de yeso se siguen las indicaciones recogidas en la norma UNE-EN 13279-2¹. En cada fase se llevan a cabo diferentes ensayos, entre los que se encuentran la determinación del principio de fraguado de la mezcla, la densidad aparente en estado húmedo y en estado endurecido y las propiedades mecánicas (resistencia a flexión, resistencia a compresión y dureza Shore C).

La Tabla 3.2 incluye detalladamente la composición de las diferentes dosificaciones en estudio, éstas son las mismas que las recogidas por fases de ejecución en la Tabla 3.1.

Dosificación	Relación Y-PU (en volumen)	Tamaño PU tipo P (mm)		Fibra de vidrio (F) (%)	Aditivo fluidificante (A) (%)	Relación $\alpha/(Y+PU)$
		2	4			
Fase 1						
Y1P2	1	P2	-	-	-	1
Y1,5P2	1,5	P2	-	-	-	1
Y1,75P2	1,75	P2	-	-	-	1
Y2P2	2	P2	-	-	-	1
Y1P4	1	-	P4	-	-	1
Y1,5P4	1,5	-	P4	-	-	1

¹ Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.

Y1,75P4	1,75	-	P4	-	-	1
Y2P4	2	-	P4	-	-	1
Fase 2						
Y1,5P2+2%F	1,5	P2	-	2	-	1
Y1,5P2+4%F	1,5	P2	-	4	-	1
Fase 3						
Y1,5P2+0,2%A	1,5	P2	-	-	0,2	1
Y1,5P2+0,4%A	1,5	P2	-	-	0,4	1
Fase 4						
Y1,5P2+1%F+0,5%A	1,5	P2	-	1	0,5	1
Y1,5P2+1%F+1%A	1,5	P2	-	1	1	1
Y1,5P2+1%F+2%A	1,5	P2	-	1	2	1
Y1,5P2+1%F+2,5%A	1,5	P2	-	1	2,5	1
Y1,5P2+1%F+3%A	1,5	P2	-	1	3	1
Y1,5P2+2%F+0,4%A	1,5	P2	-	2	0,4	1
Y1,5P2+2%F+0,8%A	1,5	P2	-	2	0,8	1
Y1,5P2+4%F+0,4%A	1,5	P2	-	4	0,4	1
Fase 5						
Y1,5P2+1%F+0,5%A	1,5	P2	-	1	0,5	0,95
Y1,5P2+1,7%F+0,5%A	1,5	P2	-	1,7	0,5	0,95
Y1,5P2+1%F+1%A	1,5	P2	-	1	1	1,10
Y1,5P2+1%F+2%A	1,5	P2	-	1	2	1,10

Tabla 3.2. Detalle de la composición de las mezclas analizadas en la fase de diseño de la dosificación idónea

A3.1. Fase 1: relación yeso-poliuretano

Esta etapa de trabajo comprende los ensayos llevados a cabo para determinar la mejor proporción yeso-poliuretano en las mezclas de yeso. Incluye la caracterización física, química y mecánica de las muestras objeto de estudio.

Las dosificaciones analizadas son Y1P2, Y1,5P2, Y1,75P2 y Y2P2 (serie P2) y Y1P4, Y1,5P4, Y1,75P4 y Y2P4 (serie P4), con una relación agua-conglomerante igual a 1.

A3.1.1. Caracterización física

La caracterización física de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano contempla la determinación de la densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas.

El cálculo de la densidad aparente se realiza teniendo en cuenta la masa de las probetas prismáticas de dimensiones 160 x 40 x 40 mm al desmoldar 1 día después de su elaboración (densidad aparente en estado húmedo (EH)) y transcurridos 7 días desde su fabricación (densidad aparente en estado endurecido (EE)), y su volumen. La Tabla 3.3 recoge los datos obtenidos.

Dosificación ($(\alpha/(Y+PU) = 1)$)	Densidad aparente en estado húmedo (EH) (Kg/m ³)	Densidad aparente en estado endurecido (EE) (Kg/m ³)
Y0	1.478,00	877,00
Y1P2	1.208,00	690,00
Y1,5P2	1.161,00	670,00
Y1,75P2	1.143,00	647,00
Y2P2	1.115,00	637,00
Y1P4	1.171,00	677,00
Y1,5P4	1.115,00	633,00
Y1,75P4	1.099,00	620,00
Y2P4	1.073,00	610,00

Tabla 3.3. Densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 1

Los resultados muestran un descenso generalizado de la densidad aparente de las mezclas que incorporan residuo de poliuretano con respecto de la muestra de yeso de referencia. En estado húmedo el descenso se sitúa entre un 18 y 24 % en las mezclas con residuo P2 y entre un 20 y 27 % en aquellas que incluyen el P4. En estado endurecido la densidad aparente disminuye entre un 21 y 27 % con el poliuretano P2 y entre un 22 y 30 % con el P4. Por otro lado, las mezclas realizadas con residuo tipo P con tamaño de partícula inferior a 2 mm (P2) tienen una densidad aparente ligeramente superior, de en torno al 4 %, que la de las

mezclas que emplean el pasa del tamiz de 4 mm (P4), por lo que estos últimos experimentan un mayor descenso en la densidad aparente posiblemente motivado por un aumento de la porosidad.

La muestra de referencia experimenta una disminución en su densidad aparente del estado húmedo al estado endurecido del 40 %, mientras que las mezclas con poliuretano muestran una reducción uniforme del 43 %.

En la Figura 3.1 se advierte que la pérdida de densidad se acentúa cuanto mayor es la cantidad de residuo de poliuretano incorporado en la mezcla.

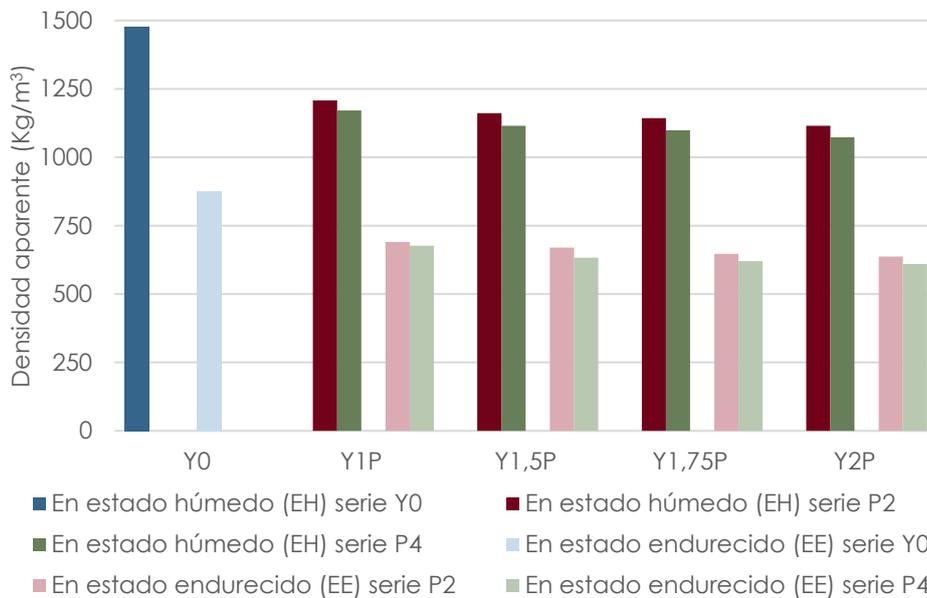


Figura 3.1. Comparativa de la densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 1

Se concluye que la disminución que experimenta la densidad aparente de las mezclas con la incorporación de poliuretano triturado atiende a un patrón razonable, dadas las características de las materias primas que participan. El yeso tiene una densidad aparente seis veces superior a la del residuo tipo P que lo reemplaza.

A3.1.2. Caracterización química

La caracterización química de las dosificaciones de yeso con residuo de poliuretano comprende la determinación del principio de fraguado de las mezclas en estado fresco.

El análisis de esta propiedad es fundamental, siendo una de las premisas establecidas para garantizar la correcta transferencia del producto a la fase de industrialización. El principio de fraguado no debe superar los 20-22 minutos, dado que éste es el tiempo que la placa discurre por la línea de producción hasta ser desmoldada.

En la Figura 3.2 se muestran y representan los resultados obtenidos del análisis del principio de fraguado de las diferentes dosificaciones.

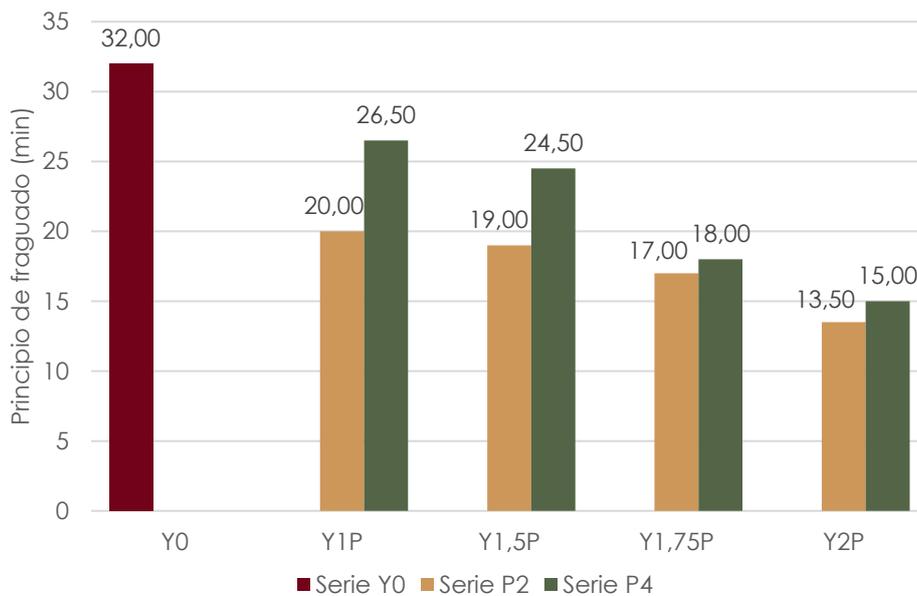


Figura 3.2. Comparativa del tiempo de principio de fraguado de las mezclas analizadas en la fase 1

La incorporación de poliuretano en las mezclas de yeso conlleva un descenso en el tiempo de inicio del proceso de fraguado de entre un 37 y 58 % para la serie P2 y de entre un 17 y 53 % para la serie P4, con respecto de Y0.

El inicio de fraguado disminuye progresivamente cuanto mayor es la proporción de residuo polimérico y, en consecuencia, menor es la cantidad de yeso en la mezcla, no obstante, las dosificaciones con mayor cantidad de poliuretano también son las que más agua incorporan.

En cuanto a los diferentes tamaños de partícula del agregado, se observa que las dosificaciones de yeso con residuo P2 comienzan el proceso de fraguado considerablemente antes que las mezclas que incluyen polímero de tamaño P4, especialmente en las dosificaciones de 1 y 1,5 partes de poliuretano por 1 parte de yeso. Las muestras Y1P4 y Y1,5P4 superan los requisitos de inicio de fraguado establecidos.

Por otro lado, durante la fabricación de las mezclas se notifica la pérdida de trabajabilidad y de consistencia fluida de las dosificaciones en estado fresco a medida que aumenta la cantidad de polímero en su composición.

A3.1.3. Caracterización mecánica

Este apartado comprende la realización de ensayos que permiten determinar las propiedades mecánicas de las mezclas. Las características analizadas son la resistencia a flexión, la resistencia a compresión y la dureza Shore C de las muestras de yeso con polímero en estado endurecido.

Investigaciones previas sugieren un comportamiento mecánico a 7 y 28 días muy similar para mezclas de yeso con polímeros². En esta fase inicial únicamente se estudian dichas propiedades transcurridos 7 días desde la fabricación de las mezclas. La Tabla 3.4 incluye los valores obtenidos.

² Alameda L. (2015). Placas de yeso laminado aligeradas con residuos poliméricos reforzadas con fibras de polipropileno. Fabricación y puesta en obra. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos.

Dosificación (($\alpha/(Y+PU) = 1$))	Resistencia a flexión (7 días) (N/mm ²)	Resistencia a compresión (7 días) (N/mm ²)	Dureza superficial (7 días) (Shore C)
Y0	2,02	3,83	43,10
Y1P2	1,16	2,10	35,40
Y1,5P2	0,95	1,75	32,20
Y1,75P2	0,91	1,53	29,90
Y2P2	0,78	1,42	28,60
Y1P4	1,08	1,50	33,10
Y1,5P4	0,87	1,21	28,40
Y1,75P4	0,86	1,17	28,60
Y2P4	0,72	1,10	28,00

Tabla 3.4. Resistencias mecánicas de las mezclas analizadas en la fase 1

Analizando los resultados se observa que el rendimiento mecánico de las mezclas se ve considerablemente mermado con la inclusión de residuo de poliuretano en su composición. La pérdida de resistencia es proporcional a la cantidad de polímero añadido a la dosificación, es decir, a medida que aumenta la cantidad de residuo incluido en la muestra, descienden las resistencias mecánicas del material. La resistencia a compresión disminuye entre un 45 y 63 % en las mezclas con residuo tipo P2 y entre un 61 y 71 % para las muestras con residuo de tamaño inferior a 4 mm (P4), con respecto al material de referencia. La resistencia a flexión se reduce entre un 42 y 61%, cuando se incluye el poliuretano P2, y entre un 47 y 64 % con el polímero tipo P4.

Comparando los resultados de las series con residuo tipo P2 y P4, se observa que la primera obtiene mejores valores en las propiedades mecánicas, lo que concuerda con la idea de que la serie P4 pueda tener una mayor presencia de poros en su estructura interna.

La norma UNE-EN 13279-1³ regula los requerimientos mínimos en cuanto a las prestaciones mecánicas de las mezclas de yeso y establece que la resistencia a compresión no debe ser inferior a 2 N/mm² (RMC) ni

³ Asociación Española de Normalización (AENOR). (2008). UNE-EN 13279-1 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones

la resistencia a flexión debe bajar de 1 N/mm² (RMF). La única dosificación que cumple con ambas premisas es la Y1P2, si bien, la Y1,5P2 se queda cerca de satisfacer ambas demandas (Figura 3.3).

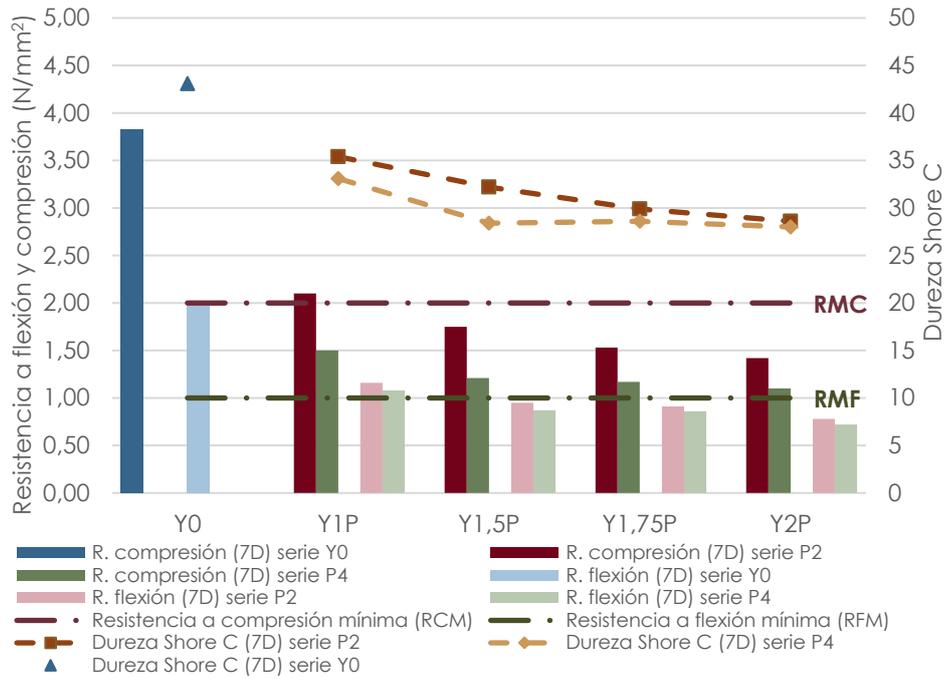


Figura 3.3. Comparativa de las resistencias mecánicas a 7 días de las mezclas analizadas en la fase 1

Por otro lado, la dureza superficial a 7 días se ve reducida entre un 18 y 34 % para la serie con residuo P2 y entre un 23 y 35 % para la serie con residuo P4. En consecuencia, se deduce que este descenso en la dureza superficial es debido a la inclusión del residuo polimérico que reduce la dureza superficial global.

A3.1.4. Conclusiones fase 1

Durante la fase 1 se pone de manifiesto la influencia en las propiedades de la mezcla del residuo de poliuretano procesado incorporado en las pastas de yeso. Los aspectos más relevantes, con respecto a la inclusión de este polímero, son:

- La densidad aparente de las mezclas disminuye.

- El tiempo de principio de fraguado de las nuevas mezclas se recorta considerablemente.
- Las propiedades mecánicas (resistencia a flexión, resistencia a compresión y dureza shore C) descienden de forma notoria.
- La disminución de la densidad aparente, del principio de fraguado y de la resistencia mecánica está relacionada con la cantidad de residuo incluida en la mezcla, es decir, cuanto mayor es la cantidad de poliuretano incorporada en la mezcla, más se reducen estas propiedades.

Esta fase concluye con la determinación de la proporción yeso-poliuretano, siendo determinantes los resultados relativos al rendimiento mecánico.

La serie de mezclas que incorpora el residuo de poliuretano con tamaño de partícula inferior a 4 mm (P4) es descartada por sus bajos rendimientos mecánicos, ninguna de las dosificaciones cumple con ambas exigencias mínimas de resistencia a compresión y flexión.

En cuanto a la serie de mezclas de yeso que incluyen residuo de poliuretano con tamaño de partícula inferior a 2 mm (P2), únicamente la dosificación Y1P2 cumple las exigencias mínimas, si bien, la mezcla Y1,5P2 se queda próxima a su cumplimiento.

Finalmente, la relación yeso-poliuretano seleccionada es la 1,5 dado que es la que mayor cantidad de residuo polimérico valoriza de entre todas las seleccionables y se entiende que la incorporación de fibra de vidrio en la mezcla (fase 2) proporcionará una mejora suficiente en las propiedades mecánicas del material para el cumplimiento de los requerimientos normativos.

A3.2. Fase 2: incorporación de fibra de vidrio

Esta fase experimental contempla la inclusión de fibra de vidrio en las mezclas de yeso con residuo de poliuretano, considerando la relación yeso-poliuretano de 1,5 seleccionada en la fase anterior. Se espera que la incorporación de esta materia prima en las dosificaciones mejore sus prestaciones mecánicas. El comportamiento de las fibras de vidrio se estudia analizando las propiedades físicas y mecánicas de varias muestras.

Las dosificaciones objeto de estudio de esta etapa son Y1,5P2+2%F y Y1,5P2+4%F, las cuales incorporan un 2 % y 4 % de fibra de vidrio en su composición, con respecto al peso de yeso. Con el objetivo de evaluar su rendimiento, también se incluyen el material de referencia (Y0) y la mezcla de yeso con poliuretano procesado (Y1,5P2).

A3.2.1. Caracterización física

La caracterización física de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano y fibra de vidrio comprende la determinación de la densidad aparente en estado húmedo (EH), al desmoldar las probetas 1 día después de su elaboración, y endurecido (EE), una vez transcurridos 7 días de su fabricación. La Tabla 3.5 muestra los resultados obtenidos para las nuevas dosificaciones.

Dosificación ($\alpha/(Y+PU) = 1$)	Densidad aparente en estado húmedo (EH) (Kg/m ³)	Densidad aparente en estado endurecido (EE) (Kg/m ³)
Y0	1.478,00	877,00
Y1,5P2	1.161,00	670,00
Y1,5P2+2%F	1.107,00	670,00
Y1,5P2+4%F	1.130,00	687,00

Tabla 3.5. Densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 2

La densidad aparente en estado húmedo disminuye con la introducción de fibra de vidrio en la pasta, no obstante, este descenso se acorta al aumentar la cantidad de fibra. La densidad aparente en estado endurecido se mantiene invariable con la incorporación de un 2 % de fibra de vidrio en la mezcla Y1,5P2, mientras que con un 4 % aumenta ligeramente.

La incorporación de esta materia prima en las dosificaciones de yeso hace suponer un aumento de la densidad aparente del conjunto, si bien, ello puede no verse reflejado claramente en los resultados dado que añadir fibra de vidrio en la mezcla también implica un crecimiento en la porosidad de la misma.

La Figura 3.4 incluye una imagen comparativa de los resultados obtenidos.

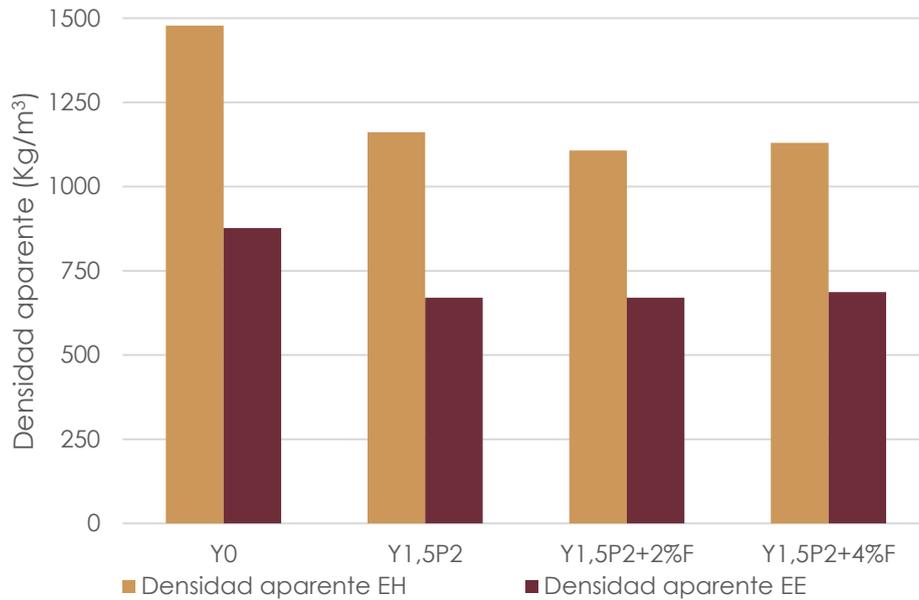


Figura 3.4. Comparativa de la densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 2

A3.2.2. Caracterización mecánica

La evaluación de las propiedades mecánicas incluye el análisis de la resistencia a flexión, la resistencia a compresión y la dureza Shore C. La Tabla 3.6 muestra la influencia de las fibras de vidrio en las características mecánicas de las mezclas analizadas.

Dosificación (($\alpha/(Y+PU) = 1$))	Resistencia a flexión (7 días) (N/mm ²)	Resistencia a compresión (7 días) (N/mm ²)	Dureza superficial (7 días) (Shore C)
Y0	2,02	3,83	43,10
Y1,5P2	0,95	1,75	32,20
Y1,5P2+2%F	1,30	2,09	36,07
Y1,5P2+4%F	2,13	2,33	40,03

Tabla 3.6. Resistencias mecánicas de las mezclas analizadas en la fase 2

La resistencia a compresión de la mezcla mejora un 20 % con la incorporación de un 2 % de fibra de vidrio y un 33 % añadiendo un 4 %. Un aumento aún más notable se experimenta en la resistencia a flexión, la cual se incrementa un 37 % con un 2 % de fibra de vidrio y un 124 % con un 4 %. La dureza superficial mejora entre un 12 y 24 % con la incorporación de fibras en la mezcla Y1,5P2.

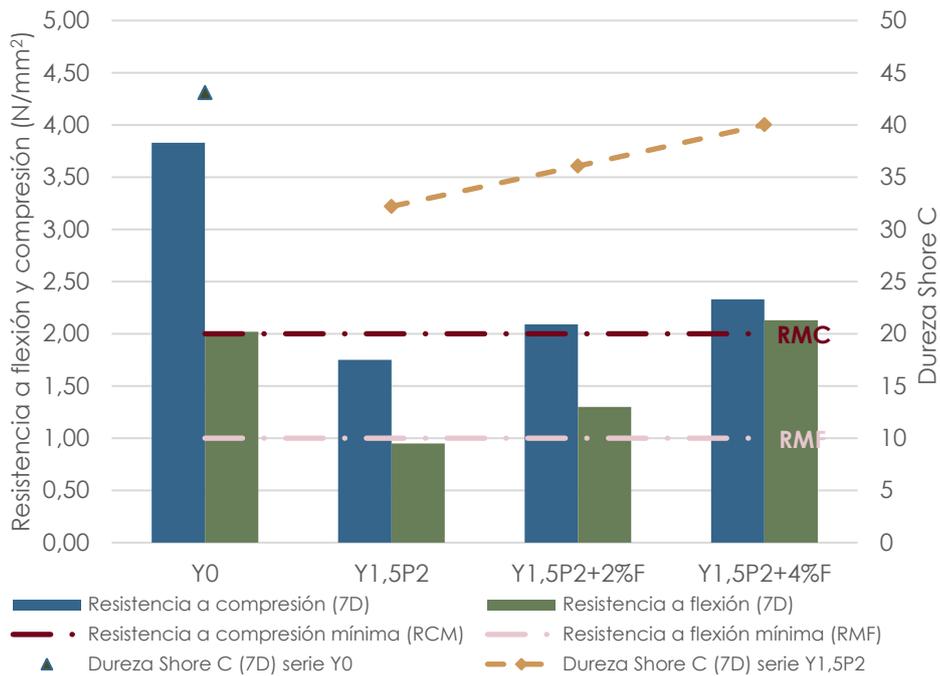


Figura 3.5. Comparativa de las resistencias mecánicas a 7 días de las mezclas analizadas en la fase 2

Comparando los resultados de las dosificaciones con fibras de vidrio con los del material de referencia se observa que las nuevas resistencias a compresión y los valores de dureza Shore C continúan siendo inferiores. No obstante, no ocurre lo mismo para la resistencia a flexión en la dosificación Y1,5P2+4%F que presenta valores superiores a los de la muestra Y0 (Figura 3.5). A pesar de todo ello, las propiedades mecánicas de ambas dosificaciones se sitúan por encima de los requerimientos normativos.

A3.2.3. Conclusiones fase 2

Los resultados obtenidos durante la fase 2 notifican la influencia de las fibras de vidrio incorporadas en las mezclas de yeso con residuo de poliuretano. Los aspectos más relevantes, con respecto a la inclusión de éstas, son:

- La densidad aparente de las mezclas es similar incorporando un 2 % de fibra de vidrio y ligeramente superior con un 4 %.
- Las propiedades mecánicas mejoran significativamente, especialmente la resistencia a flexión, situándose ambas dosificaciones analizadas por encima de las resistencias a compresión y a flexión mínimas requeridas.
- El incremento de la densidad aparente y de las resistencias mecánicas está relacionada con la cantidad de fibra de vidrio incluida en la mezcla, es decir, cuanto mayor es la cantidad de fibras añadida en la muestra, más aumentan estas propiedades.

Esta etapa permite evaluar de forma individualizada la influencia de la fibra de vidrio en la matriz de yeso-poliuretano. De este estudio se deduce que dicho material sí otorga a las mezclas las mejoras mecánicas requeridas en la fase 1. No obstante, la dosificación ideal de fibra de vidrio a incorporar en la dosificación se decide en una fase posterior (fase 4), cuando ésta se incorpore en la mezcla junto con el aditivo, necesario para obtener una buena trabajabilidad de la mezcla.

Durante la fabricación y amasado de las dosificaciones se advierte que el 2 % y 4 % de fibra de vidrio con respecto al peso del yeso puede resultar excesivo dado que disminuye considerablemente la trabajabilidad de la mezcla, por lo que en futuras fases se incluirá el estudio del 1 %.

A3.3. Fase 3: incorporación de aditivo fluidificante

En esta etapa de trabajo se considera la incorporación de aditivo fluidificante en las mezclas de yeso con residuo de poliuretano con dosificación Y1,5P2. Entre las premisas para lograr una exitosa transferencia del producto del nivel de laboratorio al nivel industria se encuentra que la pasta tenga una consistencia líquida. En consecuencia,

se considera la inclusión de un aditivo fluidificante que mejore la trabajabilidad de la mezcla sin que mermen de forma notoria las propiedades mecánicas, como sucede con el agua.

La influencia del aditivo se analiza con el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de varias dosificaciones.

Las dosificaciones objeto de estudio de esta etapa son Y1,5P2+0,2%A y Y1,5P2+0,4%A, las cuales incorporan un 0,2 % y 0,4 % de aditivo en su composición, con respecto al peso de yeso. Con el fin de evaluar su rendimiento, también se incluyen el material de referencia (Y0) y la mezcla de yeso con residuo de poliuretano (Y1,5P2).

A3.3.1. Caracterización física

La caracterización física de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano y aditivo fluidificante comprende la determinación de la densidad aparente en estado húmedo (EH) y endurecido (EE) de las muestras, al desmoldar 1 día después de su elaboración y una vez transcurridos 7 días de su fabricación. La Tabla 3.7 muestra los resultados obtenidos para las nuevas dosificaciones.

Dosificación ($(\alpha/(Y+PU) = 1)$)	Densidad aparente en estado húmedo (EH) (Kg/m ³)	Densidad aparente en estado endurecido (EE) (Kg/m ³)
Y0	1.478,00	877,00
Y1,5P2	1.161,00	670,00
Y1,5P2+0,2%A	1.077,00	643,00
Y1,5P2+0,4%A	1.087,00	657,00

Tabla 3.7. Densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 3

La densidad aparente en estado húmedo y la densidad aparente en estado endurecido se ven levemente reducidas con la introducción de aditivo en las mezclas. La primera disminuye entre un 6 y 7 %, mientras que la segunda muestra un descenso más contenido de entre un 2 y 4 %. No obstante, a medida que aumenta la cantidad de aditivo fluidificante en las muestras, la densidad aparente en ambos estados también aumenta y se aproxima a la de la dosificación Y1,5P2.

Con respecto al material de referencia, el descenso de la densidad aparente tanto en estado húmedo como en estado endurecido se mantiene entorno al 26 % (Figura 3.6).

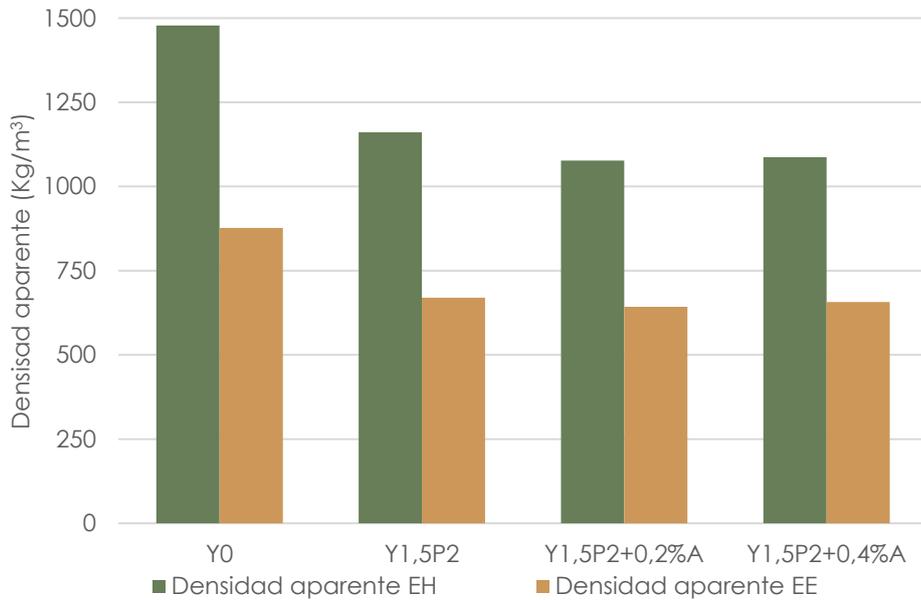


Figura 3.6. Comparativa de la densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 3

A3.3.2. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica de los compuestos de yeso con residuo de poliuretano y aditivo fluidificante comprende la realización de ensayos para determinar la resistencia a flexión, la resistencia a compresión y la dureza Shore C de las mezclas en estado endurecido. Los datos obtenidos se comparan con los de otras muestras sin aditivo para evaluar el rendimiento de éste (Tabla 3.8).

Dosificación ($\alpha/(Y+PU) = 1$)	Resistencia a flexión (7 días) (N/mm ²)	Resistencia a compresión (7 días) (N/mm ²)	Dureza superficial (7 días) (Shore C)
Y0	2,02	3,83	43,10
Y1,5P2	0,95	1,75	32,20
Y1,5P2+0,2%A	1,03	1,89	33,57
Y1,5P2+0,4%A	1,11	1,93	34,37

Tabla 3.8. Resistencias mecánicas de las mezclas analizadas en la fase 3

Los resultados obtenidos muestran cierta mejoría en todas las propiedades mecánicas analizadas. Con respecto a la dosificación Y1,5P2, la resistencia a compresión aumenta un 8 y 10 %, la resistencia a flexión un 8 y 17 % y la dureza Shore C un 4 y 7 % con un 0,2 y 0,4 % de aditivo respectivamente.

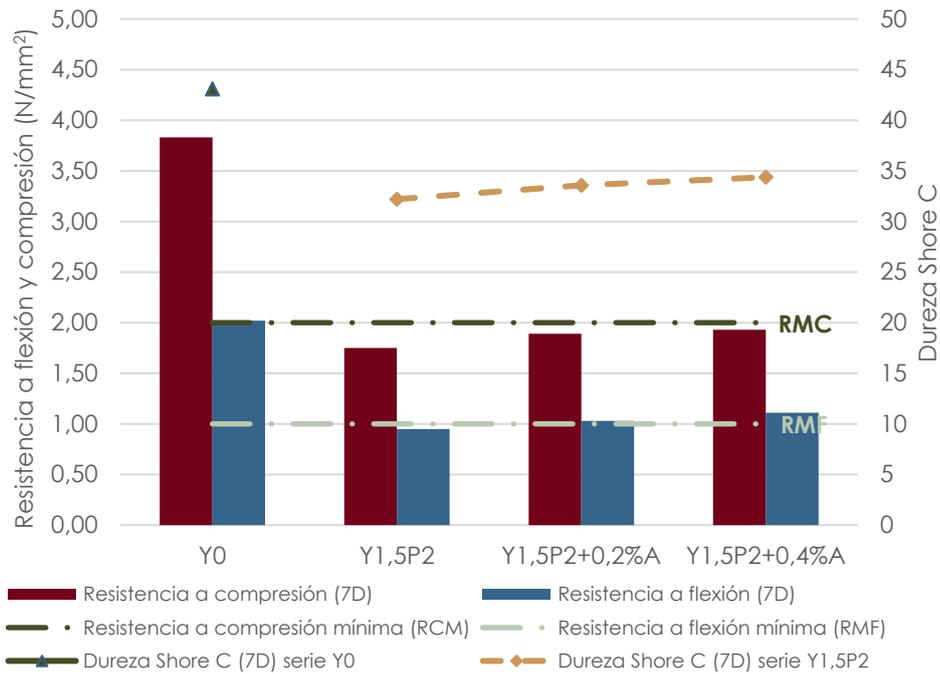


Figura 3.7. Comparativa de las resistencias mecánicas a 7 días de las mezclas analizadas en la fase 3

Comparando los resultados de las dosificaciones con aditivo fluidificante con los del material de referencia se observa que las características mecánicas continúan siendo inferiores. Por otro lado, las resistencias a flexión alcanzadas son suficientes para cumplir los requerimientos mínimos, sin embargo, no ocurre lo mismo con las resistencias a compresión, las cuales se sitúan por debajo del mínimo necesario (Figura 3.7).

A3.3.3. Conclusiones fase 3

Durante la fase 3 se pone de manifiesto la influencia del aditivo fluidificante incorporado en la mezcla de yeso con poliuretano

procesado. Los aspectos más relevantes, con respecto a la inclusión de este producto, son:

- La densidad aparente de las mezclas disminuye inicialmente, sin embargo, aumenta con el incremento de aditivo.
- Las propiedades mecánicas (resistencia a flexión y compresión y dureza shore C) aumentan ligeramente, si bien únicamente la resistencia a flexión cumple el requisito mínimo establecido en la normativa correspondiente.
- El incremento de la densidad aparente y de la resistencia mecánica está relacionada con la cantidad de aditivo incluido en la mezcla, es decir, cuanto mayor es la cantidad de este material en la mezcla, más aumentan estas propiedades.

En consecuencia, la dosificación ideal de aditivo fluidificante a incorporar en las mezclas de yeso con poliuretano se decide en una fase posterior (fase 4), cuando éste se incorpore junto con las fibras de vidrio en la dosificación, necesarias para cumplir los requerimientos mecánicos. Si bien, esta etapa permite conocer de forma individualizada la influencia de este producto en la matriz.

A3.4. Fase 4: incorporación de fibra de vidrio y aditivo fluidificante

Esta fase experimental contempla la inclusión de fibra de vidrio y aditivo fluidificante en la mezcla de yeso con residuo de poliuretano con dosificación Y1,5P2. Con la incorporación de ambos productos se pretende mejorar la respuesta mecánica y la trabajabilidad del material.

La influencia en las mezclas de la fibra de vidrio y el aditivo se examina a través de su caracterización física y mecánica.

Las dosificaciones objeto de estudio de esta etapa son Y1,5P2+1%F+0,5%A, Y1,5P2+1%F+1%A, Y1,5P2+1%F+2%A, Y1,5P2+1%F+2,5%A, Y1,5P2+1%F+3%A, Y1,5P2+2%F+0,4%A, Y1,5P2+2%F+0,8%A y Y1,5P2+4%F+0,4%A las cuales incorporan un 1 %, 2 % y 4 % de fibra de vidrio y un 0,4 %, 0,5 %, 0,8 %, 1 %, 2 %, 2,5 % y 3 % de aditivo fluidificante en su composición, con respecto al peso de yeso. Con el fin de evaluar su rendimiento, también se incluyen el material de referencia (Y0) y la mezcla de yeso con poliuretano procesado (Y1,5P2).

A3.4.1. Caracterización física

La caracterización física de las muestras de yeso con residuo de poliuretano, fibra de vidrio y aditivo fluidificante comprende la determinación de la densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas. Los resultados obtenidos pueden visualizarse en la Tabla 3.9.

Dosificación ((α /(Y+PU) = 1)	Densidad aparente en estado húmedo (EH) (Kg/m ³)	Densidad aparente en estado endurecido (EE) (Kg/m ³)
Y0	1.478,00	877,00
Y1,5P2	1.161,00	670,00
Y1,5P2+1%F+0,5%A	1.080,00	643,00
Y1,5P2+1%F+1%A	1.063,00	640,00
Y1,5P2+1%F+2%A	1.050,00	633,00
Y1,5P2+1%F+2,5%A	1.053,00	623,00
Y1,5P2+1%F+3%A	1.057,00	627,00
Y1,5P2+2%F+0,4%A	1.087,00	670,00
Y1,5P2+2%F+0,8%A	1.080,00	660,00
Y1,5P2+4%F+0,4%A	1.103,00	680,00

Tabla 3.9. Densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 4

La densidad aparente en estado húmedo de todas dosificaciones estudiadas se sitúa entre un 5 y 10 % por debajo de la densidad de la mezcla Y1,5P2. Esta diferencia se recorta considerablemente en el caso de la densidad aparente en estado endurecido, llegando en algunos casos a igualar o superar la de la muestra Y1,5P2.

De forma general, se aprecia un aumento de ambas densidades aparentes a medida que se incrementa la cantidad de fibra de vidrio en la mezcla, corroborando las conclusiones de la fase 2 de este estudio.

Analizando en detalle la serie que incorpora un 1 % de fibra de vidrio se concluye que el aditivo contribuye al descenso progresivo de la densidad del material, no obstante, en torno al 3 % de fluidificante dicho comportamiento se ve revertido. La cantidad de aditivo incluida en la pasta influye mejorando su trabajabilidad, lo que a su vez contribuye a

reducir la porosidad, especialmente teniendo en cuenta la presencia de fibra de vidrio en el conjunto, lo que conlleva un aumento de la densidad aparente. Todo ello provoca cierto baile de resultados en cuanto a la densidad aparente y la dificultad de predecir un comportamiento tipo.

La pérdida de peso entre el estado húmedo y el estado endurecido es del 40,5 % para la muestra de referencia, del 42 % para la mezcla Y1,5P2 y entre el 38 y 41 % para las dosificaciones que incluyen fibra de vidrio y aditivo.

En ningún caso se superan las densidades aparentes de la muestra de referencia Y0, por lo que el nuevo material se confirma como una alternativa más ligera al material tradicional (Figura 3.8).

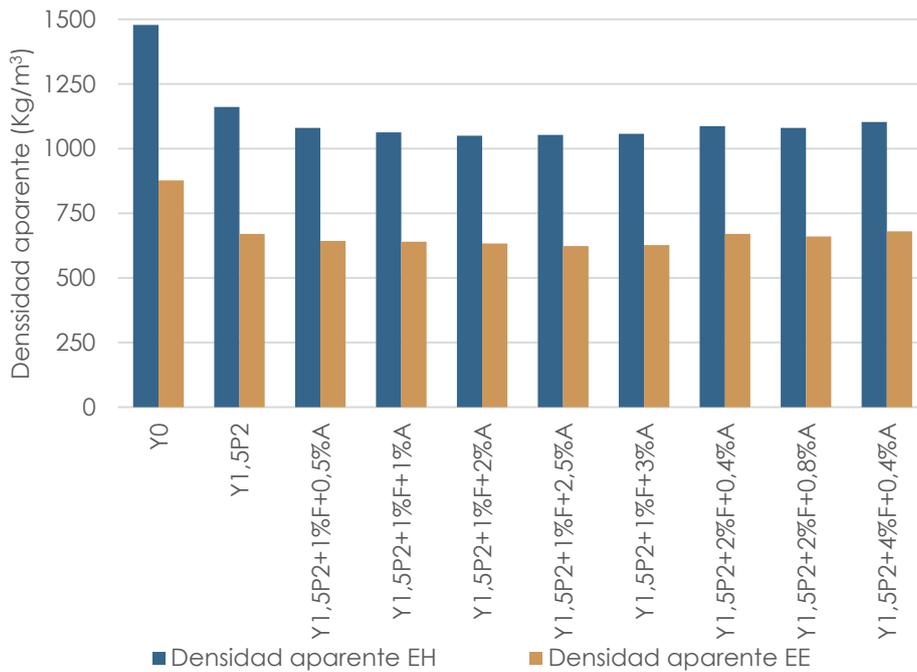


Figura 3.8. Comparativa de la densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 4

A3.4.2. Caracterización mecánica

En la caracterización mecánica de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano, fibra de vidrio y aditivo se considera la realización de ensayos que permiten determinar la resistencia a flexión, la resistencia a

compresión y la dureza Shore C de las mezclas en estado endurecido. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 3.10.

Dosificación ($(\alpha/(Y+PU) = 1)$)	Resistencia a flexión (7 días) (N/mm ²)	Resistencia a compresión (7 días) (N/mm ²)	Dureza superficial (7 días) (Shore C)
Y0	2,02	3,83	43,10
Y1,5P2	0,95	1,75	32,20
Y1,5P2+1%F+0,5%A	1,21	2,01	35,00
Y1,5P2+1%F+1%A	1,09	1,87	31,00
Y1,5P2+1%F+2%A	1,17	1,69	31,00
Y1,5P2+1%F+2,5%A	1,12	1,54	31,50
Y1,5P2+1%F+3%A	0,94	1,41	30,20
Y1,5P2+2%F+0,4%A	1,54	2,14	36,00
Y1,5P2+2%F+0,8%A	1,48	2,16	36,40
Y1,5P2+4%F+0,4%A	2,70	2,40	40,80

Tabla 3.10. Resistencias mecánicas de las mezclas analizadas en la fase 4

Se observa que cuanto mayor es la cantidad de fibra de vidrio incorporada, mayores son las resistencias a compresión y a flexión. Sin embargo, el aditivo genera el efecto contrario, una mayor cantidad de este producto en la mezcla provoca un ligero retroceso en el rendimiento mecánico. La dureza superficial mejora con la cantidad de fibra de vidrio añadida.

Respecto de los requisitos mínimos de resistencia a compresión y flexión, para la serie que incorpora un 1 % de fibra de vidrio, únicamente la dosificación Y1,5P2+1%F+0,5%A obtiene unos resultados que superan los requerimientos establecidos. Del resto de mezclas, la Y1,5P2+2%F+0,4%A, Y1,5P2+2%F+0,8%A y Y1,5P2+4%F+0,4%A también cumplen dichas exigencias (Figura 3.9).

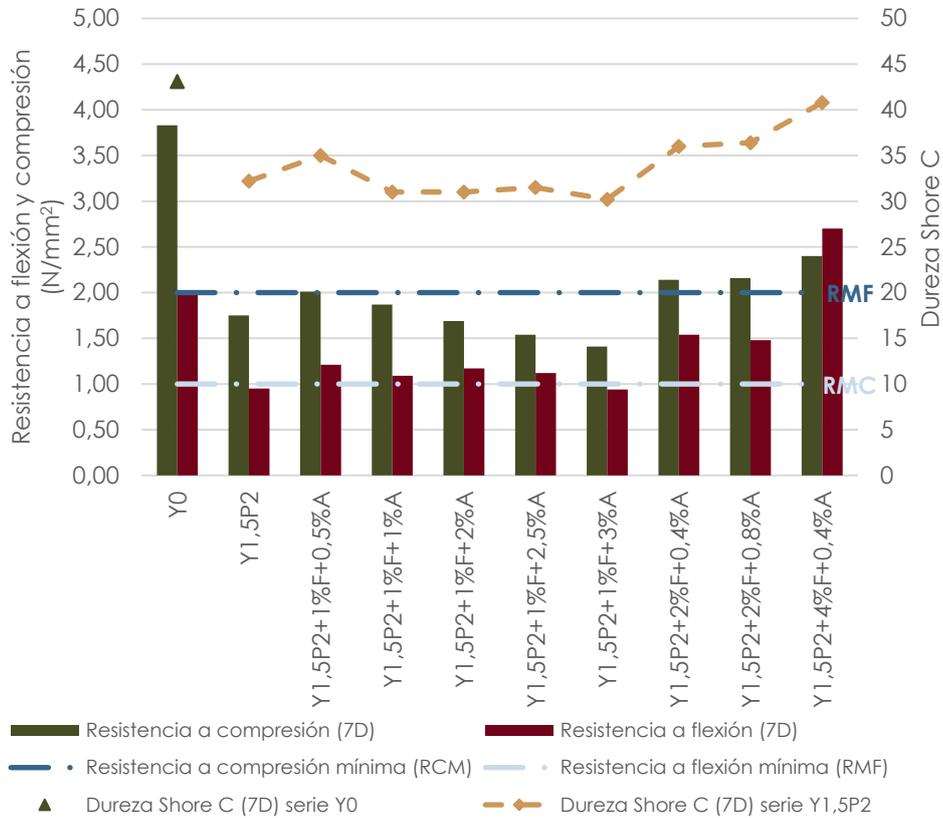


Figura 3.9. Comparativa de las resistencias mecánicas a 7 días de las mezclas analizadas en la fase 4

A3.4.3. Conclusiones fase 4

Durante la fase 4 se pone de manifiesto la influencia de la fibra de vidrio y del aditivo fluidificante incorporado de forma conjunta en la mezcla de yeso con poliuretano procesado, así como, la interacción fibra-aditivo. Los aspectos más relevantes, con respecto a la inclusión de estos productos, son:

- La densidad aparente de las mezclas aumenta con la incorporación progresiva de fibra de vidrio y disminuye a medida que se incrementa la cantidad de aditivo.
- La resistencia a flexión y a compresión de las dosificaciones estudiadas mejora con la cantidad de fibra de vidrio añadida y empeora cuanto mayor es la cantidad de aditivo. La dureza

superficial mejora con la incorporación de fibra de vidrio, con excepción de la muestra Y1,5P2+1%F+0,5%A que presenta valores relativamente buenos pese a tener únicamente un 1 % de fibra.

- Únicamente las dosificaciones Y1,5P2+1%F+0,5%A, Y1,5P2+2%F+0,4%A, Y1,5P2+2%F+0,8%A y Y1,5P2+4%F+0,4%A cumplen los requisitos mínimos en cuanto a resistencia a flexión y compresión.

El comportamiento notificado respecto de la inclusión de aditivo fluidificante difiere de las conclusiones de la fase 3, si bien, la muestra analizada era pequeña y, por tanto, menos representativa. En esta fase, se incluye como novedad la serie con un 1 % de fibra de vidrio en la que se estudian cinco porcentajes diferentes de aditivo.

Del análisis de esta fase se concluye que la dosificación que mejor comportamiento global presenta es la Y1,5P2+1%F+0,5%A, dado que presenta la menor densidad de entre todas las que cumplen los requerimientos mecánicos. Por otro lado, es la mezcla que menos materia prima demanda, siendo la que menor cantidad de fibra de vidrio y aditivo incorpora de entre las seleccionables.

A3.5. Fase 5: relación agua-conglomerante

La última etapa experimental contempla la caracterización física y mecánica de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano, fibra de vidrio y aditivo fluidificante variando la relación agua-conglomerante, en definitiva, la cantidad de agua incluida en la dosificación.

Se estudian las relaciones agua-conglomerante de 0,95 y 1,10, además de la de 1,00 estudiada previamente.

En las dosificaciones analizadas se modifica la cantidad de fibra y aditivo en función de la cantidad de agua según la experiencia obtenida a lo largo de la investigación y teniendo en cuenta la consistencia de las pastas en estado fresco. Se estudian las mezclas Y1,5P2+1%F+0,5%A y Y1,5P2+1,7%F+0,5%A con una relación agua-conglomerante de 0,95 y las pastas Y1,5P2+1%F+1%A y Y1,5P2+1%F+2%A con una relación agua-conglomerante de 1,10.

A3.5.1. Caracterización física

La caracterización física de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano con diferentes relaciones agua-conglomerante comprende la determinación de la densidad aparente en estado húmedo y endurecido. Los datos resultantes se muestran en la Tabla 3.11.

Dosificación	Relación a/(Y+PU)	Densidad aparente en estado húmedo (EH) (Kg/m ³)	Densidad aparente en estado endurecido (EE) (Kg/m ³)
Y0	1,00	1.478,00	877,00
Y1,5P2	1,00	1.161,00	670,00
Y1,5P2+1%F+0,5%A	1,00	1.080,00	643,00
Y1,5P2+1%F+0,5%A	0,95	1.110,00	687,00
Y1,5P2+1,7%F+0,5%A	0,95	1.107,00	690,00
Y1,5P2+1%F+1%A	1,10	1.007,00	583,00
Y1,5P2+1%F+2%A	1,10	1.020,00	583,00

Tabla 3.11. Densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 5

De los resultados obtenidos se observa, en líneas generales, que la reducción de la relación agua-conglomerante implica un aumento tanto de la densidad aparente en estado húmedo como en estado endurecido. Mientras que un aumento de dicha relación conlleva el efecto contrario, un descenso de las densidades. Este comportamiento tiene que ver con los cambios que experimenta la porosidad de la mezcla como consecuencia de la cantidad de agua incorporada. Finalmente se concluye que la porosidad es proporcional a la cuantía de agua e inversamente proporcional a la densidad.

Las muestras con una relación agua-conglomerante de 0,95 experimentan una reducción de su densidad del estado húmedo al endurecido del 38 %, las de la relación agua-conglomerante de 1,00 pierden un 41 % y las de la relación agua-conglomerante de 1,10 un 42,50 %. Lo que parece indicar que cuanto mayor es la cantidad de agua, también mayor es la reducción de densidad que experimentan las muestras del estado fresco al estado endurecido.

La Figura 3.10 ilustra el análisis comparativo de las densidades de las diferentes dosificaciones analizadas.

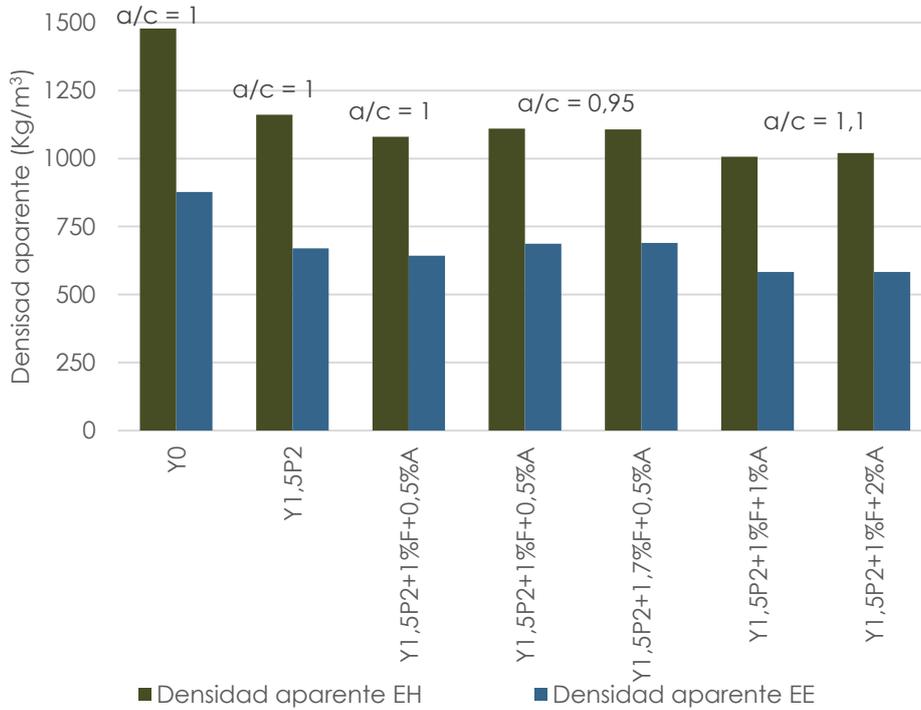


Figura 3.10. Comparativa de la densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas analizadas en la fase 5

A3.5.2. Caracterización mecánica

El comportamiento mecánico de las dosificaciones objeto de estudio se analiza a través de los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a flexión y dureza Shore C. Estas pruebas se realizan sobre las probetas en estado endurecido. La Tabla 3.12 incluye los resultados obtenidos.

Dosificación	Relación a/(Y+PU)	Resistencia a flexión (7 días) (N/mm ²)	Resistencia a compresión (7 días) (N/mm ²)	Dureza superficial (7 días) (Shore C)
Y0	1,00	2,02	3,83	43,10
Y1,5P2	1,00	0,95	1,75	32,20
Y1,5P2+1%F+0,5%A	1,00	1,21	2,01	35,00
Y1,5P2+1%F+0,5%A	0,95	1,24	2,26	37,93
Y1,5P2+1,7%F+0,5%A	0,95	1,53	2,40	38,53
Y1,5P2+1%F+1%A	1,10	0,77	1,37	24,60
Y1,5P2+1%F+2%A	1,10	0,66	1,18	24,30

Tabla 3.12. Resistencias mecánicas de las mezclas analizadas en la fase 5

Los datos muestran una fuerte influencia de la relación agua-conglomerante en las propiedades mecánicas. Aquellas dosificaciones en las que se reduce la cantidad de agua empleada ($a/c = 0,95$) mejoran en un 12 y 19 % sus resistencias a compresión, en un 2 y 26 % las resistencias a flexión y en un 8 y 10 % la dureza superficial, con respecto a la misma dosificación con relación $a/c = 1$. Por el contrario, las mezclas que incorporan mayor cantidad de agua ($a/c = 1,1$) ven disminuida su resistencia a compresión en un 32 y 41 %, la resistencia a flexión en un 36 y 45 % y la dureza Shore C en un 30 y 31 %.

En la Figura 3.11 se observa como las resistencias a compresión y a flexión de las mezclas con relación agua-conglomerante de 1,1 caen por debajo de los requerimientos mínimos establecidos en la normativa de aplicación, mientras que las de relación agua-conglomerante de 0,95 no sólo se mantienen por encima, sino que mejoran los resultados de la misma dosificación con una relación de 1,00.

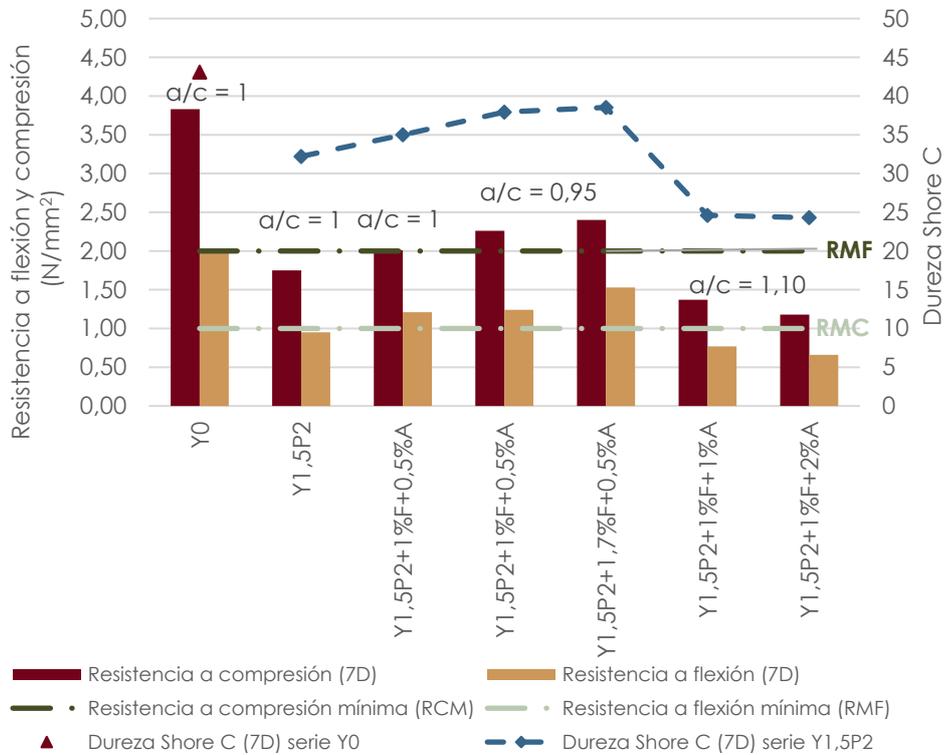


Figura 3.11. Comparativa de las resistencias mecánicas a 7 días de las mezclas analizadas en la fase 5

A3.5.3. Conclusiones fase 5

En la etapa 5 se evalúa la influencia de la relación agua-conglomerante en las características físicas y mecánicas. Los aspectos más relevantes, con respecto a las diferentes cantidades de agua incorporadas, son:

- La densidad aparente disminuye con el aumento de la cantidad de agua en las muestras y aumenta cuando ésta se reduce.
- Las prestaciones mecánicas mejoran cuanto menor es la relación agua-conglomerante. Las dosificaciones con mayor cantidad de agua muestran un descenso en su resistencia a compresión, resistencia a flexión y en la dureza Shore C.

- Únicamente las dosificaciones Y1,5P2+1%F+0,5%A ($a/c = 0,95$ y 1) y Y1,5P2+1,7%F+0,5%A ($a/c = 0,95$) cumplen los requisitos mínimos en cuanto a resistencia a flexión y a compresión.
- El incremento de la densidad aparente y de la resistencia mecánica está relacionada con la cantidad de agua de las dosificaciones, es decir, cuanto menor es la cantidad de agua añadida a la mezcla, más aumentan estas propiedades.

El estudio de la relación agua-conglomerante concluye con la selección de la proporción 0,95 para la dosificación Y1,5P2+1%F+0,5%A, la cual presenta una baja densidad aparente y cierta mejoría en las propiedades mecánicas permitiendo un ligero margen de seguridad con respecto de los mínimos establecidos.

Por último, esta leve reducción de la cantidad de agua de la mezcla puede disminuir el tiempo de principio de fraguado a la vez que se mantiene una consistencia suficientemente líquida, aspectos de especial interés para la etapa de industrialización.

A3.6. Conclusiones

Del estudio pormenorizado de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano tipo P realizado se concluye que los mejores resultados y optimización de materias primas suceden en la dosificación Y1,5P2+1%F+0,5%A, que contiene 1,5 partes de residuo por cada parte yeso (en volumen), el residuo triturado utilizado es el pasa del tamiz de 2 mm, incorpora un 1 % de fibra de vidrio y un 0,5 % de aditivo (respecto del peso del yeso) y la relación agua-conglomerante es de 0,95.

Con respecto a cada fase experimental se concluye que:

- Fase 1: la incorporación de residuo de poliuretano triturado en mezclas de yeso supone el descenso de la densidad aparente, del principio de fraguado y de las propiedades mecánicas. Los mejores resultados se obtienen con la inclusión del polímero de menor tamaño de partícula (P2). Se selecciona la relación Y+PU de 1,5 y el tamaño de partícula menor de 2 mm (Y1,5P2).
- Fase 2: la inclusión de fibra de vidrio en las mezclas de yeso con residuo de poliuretano conlleva un ligero aumento de la densidad

aparente y una mejoría significativa en el rendimiento mecánico de las mezclas.

- Fase 3: el aditivo fluidificante influye mejorando la trabajabilidad de la mezcla en la que se incluye.
- Fase 4: del estudio en conjunto de la proporción de fibra de vidrio y aditivo fluidificante se concluye que la densidad aparente y el rendimiento mecánico aumentan con la fibra de vidrio y disminuye con el aditivo. En esta fase se selecciona la dosificación $Y1,5P2+1\%F+0,5\%A$ para continuar con el estudio.
- Fase 5: la relación agua-conglomerante de las mezclas influye significativamente en la densidad aparente y las propiedades mecánicas, que aumentan cuanto menor en la cantidad de agua incorporado. En esta etapa concluye la fase experimental dedicada al estudio de las proporciones de materias primas a incluir en la mezcla, la dosificación $Y1,5P2+1\%F+0,5\%A$ con relación agua-conglomerante de 0,95 destaca positivamente.

La Figura 3.12 incluye un resumen de las conclusiones de cada etapa y la dosificación final seleccionada en la fase de diseño de la mezcla.



Figura 3.12. Resumen de las conclusiones de la fase de diseño de la dosificación idónea

ANEXO 4. AMPLIACIÓN DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD EN LAS MEZCLAS

Ensayo según la metodología descrita en la norma UNE-EN 1015-18

El ensayo de absorción de agua capilaridad se continua hasta pasadas 78 horas de su inicio. En la Figura 4.1 se representa el aumento de peso progresivo que experimenta cada dosificación en función del tiempo.

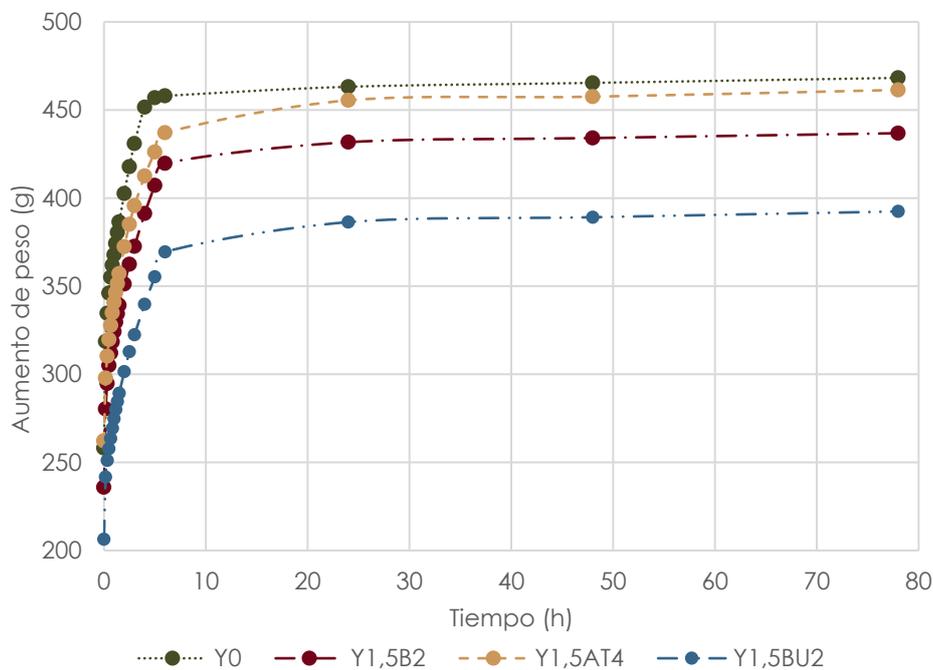


Figura 4.1. Variación de peso, debido a la absorción de agua por capilaridad, en función del tiempo de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Todas las curvas tienen una trayectoria similar en la que se pueden diferenciar dos etapas. La primera se extiende desde el inicio del ensayo hasta pasadas seis horas y en ella se notifica que la velocidad a la que aumenta el peso de las muestras, debido a la absorción de agua por capilaridad, es alta. Sin embargo, en la segunda etapa, que transcurre desde las seis horas de ensayo hasta el final del mismo, se notifica la estabilización del peso de las muestras dado que se aproximan a su nivel de saturación.

La Figura 4.2 muestra la primera etapa en detalle. Es importante tener en cuenta que la velocidad a la que los materiales ganan peso varía en función del tiempo, lo que se ve reflejado en la pendiente de cada curva, es decir, cuanto mayor sea la velocidad mayor es la pendiente.

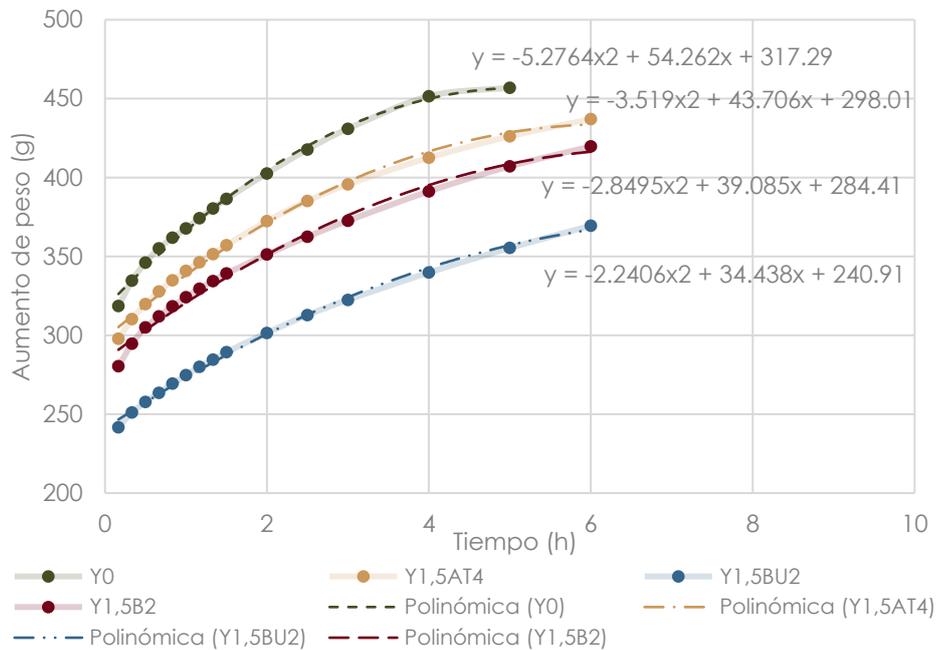


Figura 4.2. Detalle del aumento de peso, debido a la absorción de agua por capilaridad, en las primeras seis horas del ensayo de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Del análisis de las primeras horas del ensayo se observa que el material de referencia (Y0) muestra indicios de saturación en menos tiempo, en torno a las cinco horas, mientras que en el resto de muestras aparecen en torno a las seis horas. A esta conclusión se llega comprobando que los valores de R^2 disminuyen con la inclusión en la ecuación de los resultados obtenidos para tiempo posteriores.

Por otro lado, la Tabla 4.1 incluye el estudio de las ecuaciones de las líneas de tendencia de cada dosificación de yeso. El dato de R^2 indica la dispersión de los datos de la curva con respecto a la ecuación de la línea de tendencia, valores próximos a 1 indican un buen ajuste de la ecuación a los datos representados.

Clave	Ecuación ($y = Ax^2 + Bx + C$)	R ²	a	V ₀ (10 min)	V _f (300 ¹ /360 ² min)
			$a = 2 \cdot A$ (g/h ²)	B (g/h)	$V_f = V_0 + a \cdot t$ (g/h)
Y0	$y = -5.2764x^2 + 54.262x + 317.29$	0.9953	-10.55	54.26	3.26 ¹
Y1,5B2	$y = -2.8495x^2 + 39.085x + 284.41$	0.9906	-5.70	39.09	5.84 ²
Y1,5AT4	$y = -3.519x^2 + 43.706x + 298.01$	0.9950	-7.04	43.71	2.65 ²
Y1,5BU2	$y = -2.2406x^2 + 34.438x + 240.91$	0.9970	-4.48	34.44	8.30 ²

Tabla 4.1. Ecuaciones de las líneas de tendencia para las curvas en la primera etapa del ensayo de absorción de agua por capilaridad de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Las ecuaciones presentan un valor de la aceleración (a) negativo, lo que nos indica que la velocidad de aumento de peso disminuye a medida que transcurre el tiempo.

La dosificación Y0 muestra la velocidad inicial (v_0 , $t=10$ min) más alta, lo que implica una mayor absorción de agua al inicio del ensayo por parte de dicho material, siendo la muestra Y1,5BU2 la de menor velocidad inicial en el aumento de peso. Estos datos coinciden con los resultados obtenidos en cuanto al coeficiente de absorción por capilaridad.

Por otro lado, la velocidad final (v_f , $t= 300/360$ min) muestra la desaceleración en la ganancia de peso debida a la saturación. A este respecto, la probeta Y1,5BU2 muestra una velocidad final ($t = 360$ min) aún elevada, de lo que se deduce que alcanza el punto de saturación más tarde que las muestras Y1,5AT4 y Y1,5B2.

La Figura 4.3 recoge las mediciones relativas a la altura de la marca de agua en las probetas en función del tiempo.

En concordancia con los resultados vistos anteriormente en la muestra de referencia (Y0), con el mayor coeficiente de absorción de agua de las muestras analizadas, se observa que la marca de agua en la superficie de la probeta es la que más rápido avanza, al igual que en la ganancia de peso.

La muestra Y1,5AT4 es la segunda con mayor coeficiente de absorción de agua y ganancia de peso, sin embargo, la altura de la marca de agua no sigue esta tendencia.

En cuanto a las muestras Y1,5B2 y Y1,5BU2, la velocidad de ascenso del agua observado en la superficie de las probetas se corresponde con el resto de datos obtenidos, siendo la muestra Y1,5BU2 la de menor coeficiente de absorción y, en consecuencia, la que presenta un menor ritmo de ascenso del agua por su masa y cuyo aumento de peso se produce a una velocidad más reducida.

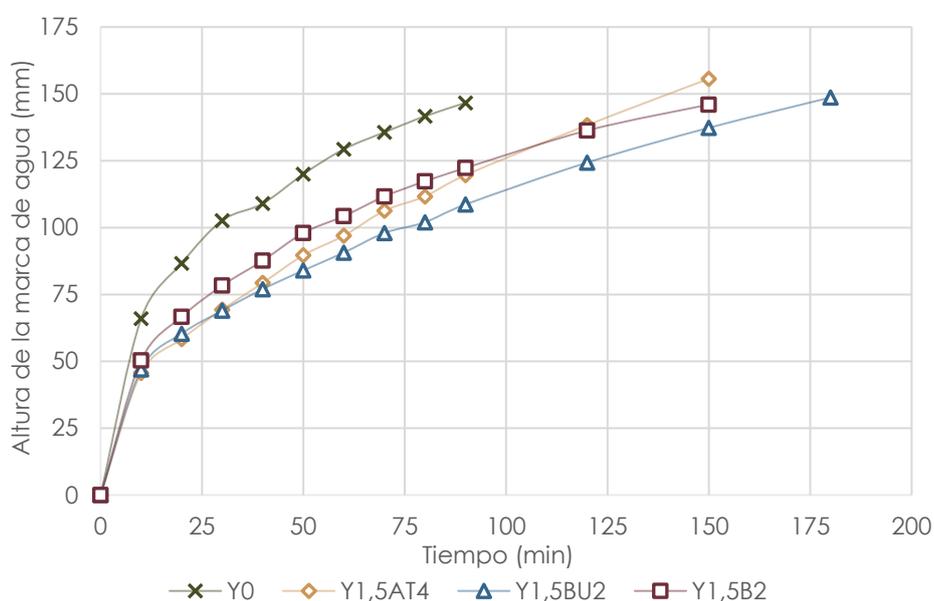


Figura 4.3. Curva de la altura de la marca de agua en la probeta en función del tiempo de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Por último, la Figura 4.4 muestra el estado de las probetas tras 78 horas en contacto con el agua. Las muestras se acompañan de otras en estado seco, lo que permite observar el cambio de coloración de las primeras.

Las probetas son de las dosificaciones Y1,5AT4, Y1,5B2, Y1,5BU2 y Y0 de izquierda a derecha en las imágenes. Se observa que las diferentes tonalidades que adquieren se asemejan al color de la materia prima de residuo de poliuretano que cada muestra incorpora. En cuanto a la

superficie en contacto con el agua no se observa un deterioro considerable en unas muestras respecto de otras, si bien se considera oportuno mencionar que todas ellas incorporan fibra de vidrio en su composición, la cual contribuye a mejorar la unión entre las partículas del material.



Figura 4.4. Estado final de las probetas de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas tras el ensayo de absorción de agua por capilaridad

Pese al amplio estudio realizado, los resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad se consideran poco relevantes en la presente investigación dado que el prefabricado de yeso a desarrollar a nivel industrial es específico para techos y, por lo tanto, su probabilidad de estar en contacto directo con una capa agua que ascienda por capilaridad es muy baja. No obstante, entre las futuras líneas de investigación está el traslado de los resultados de este estudio a la fabricación de placas de yeso para revestimientos verticales, las cuales si pueden estar expuestas a este tipo de situaciones con mayor frecuencia y probabilidad.



**CLASIFICACIÓN DE LA REACCIÓN AL FUEGO SEGÚN
NORMA UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010**

Solicitante:	UNIVERSIDAD DE BURGOS. C/ Hospital del Rey, s/n <u>09001-BURGOS</u>
Laboratorio emisor:	AFITI-LICOF Organismo notificado nº: 1168
Producto:	Material compuesto de yeso Tipo A y residuos de poliuretano (PUR). Fabricante: Grupo de Investigación en ingeniería de la edificación. Referencia: "REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254"
Informe de Clasificación nº:	3603T18-2 Fecha de emisión: 14-ene-19



Contenido del informe

1.- Objeto del informe	Página 3
2.- Detalles del producto objeto de clasificación	Página 3
3.- Informes y resultados de ensayo en los	Página 3
que se basa la clasificación.	
4.- Clasificación y campo de aplicación	Página 4
5.- Limitaciones	Página 5



La información contenida en este Informe de Clasificación tiene carácter confidencial, por lo que el Laboratorio no facilitará a terceros información relativa a este Informe, salvo que lo autorice el Solicitante.

El presente Informe de Clasificación no debe reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.



Informe de Clasificación nº 3603T18-2

1.- OBJETO DEL INFORME

Este Informe de Clasificación define la clasificación de la Reacción al Fuego asignada al material compuesto de yeso Tipo A y residuos de poliuretano (PUR), denominada por el fabricante como "REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254", de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010 "Clasificación en función del comportamiento frente al Fuego de productos de construcción y elementos para edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de Reacción al Fuego".

2.- DETALLES DEL PRODUCTO OBJETO DE CLASIFICACIÓN

2.1.- GENERAL

El producto referenciado como "REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254" se define como material compuesto de yeso Tipo A y residuos de poliuretano (PUR) según la especificación técnica correspondiente.

2.2.- DESCRIPCIÓN

El producto está completamente descrito en el informe de ensayo en el que se basa esta clasificación. Dicho informe se identifica en el capítulo 3 del presente informe.

3.- INFORMES Y RESULTADOS DE ENSAYO EN LOS QUE SE BASA LA CLASIFICACIÓN.

3.1.- ENSAYOS

Informes de ensayo

Laboratorio emisor	Solicitante	Informe	Normas de ensayo	Condición final de uso
AFITI-LICOF Pol. Ind. Sta. M ^ª de Benquerencia C/ Río Estenilla, s/n 45007 – TOLEDO Organismo notificado nº: 1168	UNIVERSIDAD BURGOS. C/ Hospital del Rey, s/n 09001-BURGOS	DENº: 3603T18	UNE-EN ISO 1716 :2011	Prefabricado de yeso para uso en interiores (Techos y paredes).
		F. emisión: 14-ene19 F ensayo: 16-oct-18		
		F ensayo: 15-nov-18	UNE-EN ISO 1182:2011	





Informe de Clasificación nº 3603T18-2

Resultados de ensayo

Informe de ensayo nº 3603T18

Método de ensayo	Parámetro	Número de ensayos	Resultados	
			Media de parámetro continuo (m)	Parámetros que se tienen que cumplir
UNE-EN ISO 1716:2011 Determinación del Potencial Calorífico Superior (PCS)	PCS (MJ/kg)	1	1,0477	No aplicable

Método de ensayo	Parámetro	Número de ensayos	Resultados	
			Media de parámetro continuo (m)	Parámetros que se tienen que cumplir
UNE-EN ISO 1182:2011 Ensayo de no combustibilidad	Incremento temperatura del horno (°C)	1	15,8	No aplicable
	Persistencia de la inflamación		0	No aplicable
	Pérdida de masa (%)		26,73	No aplicable

I.- CLASIFICACIÓN Y CAMPO DE APLICACIÓN

4.1.- NORMA DE CLASIFICACIÓN

La clasificación de la reacción al fuego se ha realizado de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010.

4.2.- CLASIFICACIÓN

El producto "REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254" presenta la siguiente clasificación:

Clasificación de la Reacción al Fuego

Comportamiento al Fuego
A1

4.3.- CAMPO DE APLICACIÓN

Esta clasificación solo es válida para las condiciones de montaje y características del producto detalladas en el informe de ensayo nº 3603T18.





Informe de Clasificación nº 3603T18-2

5.- LIMITACIONES

Este informe no representa ninguna aprobación de tipo ni certificación del producto.

Toledo, 14 de enero de 2019


Documento Firmado Digitalmente

Fdo.: David Sáez García
Director Técnico del Laboratorio
de Reacción al Fuego



INFORME de la dosificación Y1,5I2:



Nº 3574T18
Página 1 de 12

Informe de Ensayo



Laboratorio de Reacción al Fuego

SOLICITANTE: UNIVERSIDAD DE BURGOS.

PROYECTO: LIFE-REPOLYUSE "Recovery of Polyurethane for Reuse in Ecoefficient materials" (REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254)

ENSAYOS

Ensayos de Reacción al Fuego para productos de Construcción

- **Norma de ensayo:** - UNE-EN ISO 1182:2011
- **Material:** Material compuesto de yeso Tipo A y residuos de poliuretano (PUR).
 - **Fabricante:** Grupo de Investigación en ingeniería de la edificación.
"YESO POLIURETANO "B"
"YESO POLIURETANO "B "
 - **Referencia:** "YESO POLIURETANO "I"
"YESO POLIURETANO "I"
"YESO POLIURETANO "I"

SEDE SOCIAL Y LABORATORIOS Camino del Estrechillo, 8
E-28500 Arganda del Rey - Madrid (España)

SEDE CENTRAL Y LABORATORIOS C/ Río Estenilla, s/n - P.I. Sta. Mª de Benquerencia
E-45007 Toledo (España)

+34 902 112 942
+34 918 713 524
+34 901 706 587
licof@afiti.com
www.afiti.com



SOLICITANTE

UNIVERSIDAD DE BURGOS.
 C/ Hospital del Rey, s/n
09001-BURGOS

Fecha de solicitud: 13-jun-18 Aceptación de presupuesto: 03-sep-18

PROYECTO

LIFE-REPOLYUSE "Recovery of Polyurethane for Reuse in Ecoefficient materials" (REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254)

MUESTRAS DE ENSAYO

Tipo de muestra: Material compuesto de yeso Tipo A y residuos de poliuretano (PUR).
 Fabricante: Grupo de Investigación en ingeniería de la edificación.
 Referencias: "YESO POLIURETANO "B"
 "YESO POLIURETANO "B "
 "YESO POLIURETANO "I";
 "YESO POLIURETANO "I"
 "YESO POLIURETANO "I"

ENSAYOS REALIZADOS

Norma de ensayo	Fecha de ensayo
UNE-EN ISO 1182:2011	05-sep-18 y 06-sep-18
UNE-EN ISO 1716:2011	04-sep-18

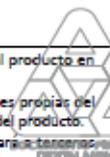
Lugar de realización del ensayo: Instalaciones de Toledo



Contenido del informe

1.- Muestras de ensayo	Página 3
2.- Ensayos realizados	Página 3
3.- Resultados	Página 4
ANEXO 1: Documentación Técnica	Página 7

Los resultados de este Informe de Ensayo hacen referencia única y exclusivamente a las muestras ensayadas, y no al producto en general.
 Los resultados del ensayo corresponden al comportamiento de muestras de ensayo de un producto, bajo las condiciones propias del ensayo. No pretende constituir el único criterio de valoración del riesgo potencial de incendio que puede conllevar el uso del producto.
 La información contenida en este Informe de Ensayo tiene carácter confidencial, por lo que el Laboratorio no facilitará a terceros, ni información relativa a este Informe de Ensayo, salvo que lo autorice el Solicitante.
 El presente Informe de Ensayo no debe reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.





1.- MUESTRAS DE ENSAYO

Recepción: 04-abr-18

Unidades: 2 muestras de 45 mm de diámetro x 50 mm de altura (muestra 1)
2 muestras de 45 mm de diámetro x 50 mm de altura (muestra 2)
2 muestras de 45 mm de diámetro x 50 mm de altura (muestra 3)
2 muestras de 45 mm de diámetro x 50 mm de altura (muestra 4)
2 muestras de 45 mm de diámetro x 50 mm de altura (muestra 5).
1 muestra en polvo de aprox. 100 g. (20Y/80S)

- Las muestras se reciben en una caja de cartón.
- Las muestras ha sido enviadas, seleccionadas y preparadas para ensayo por el solicitante.

Documentación

La documentación técnica incluida en el presente informe ha sido recepcionada en fecha 11-sep-18.

Descripción

Material compuesto de yeso Tipo A y residuos de poliuretano (PUR) en distintas proporciones (%), con un contenido en fibra de vidrio del 1 % y un contenido de aditivo fluidificante del 0,5% (excepto la muestra T3574F). Todas las muestras son de color blanco y aspecto liso.

Las principales características descriptivas de la muestra han sido suministradas por el solicitante. Dicha información se incluye en el Anexo 1 del presente Informe de Ensayo.

Información sobre el destino de aplicación de las muestras (material).

Dato no facilitado por el solicitante.

2.- ENSAYOS REALIZADOS

Ensayo según norma:

- UNE-EN ISO 1182:2011 "Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad". (ISO 1182:2010)
- UNE-EN ISO 1716:2011 (EN ISO 1716:2010) "Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del calor bruto de combustión (valor calorífico) (EN ISO 1716:2010)"

La Norma utilizada para la realización del acondicionamiento de las muestras ha sido la Norma UNE-EN 13238:2011 "Ensayos de reacción al fuego para productos de construcción. Procedimiento de acondicionamiento y reglas generales para la selección de sustratos."

OBSERVACIÓN: Se ha realizado el método de ensayo de acuerdo a la Norma UNE-EN ISO 1182:2011 excepto en lo relativo al número de muestras ensayadas





Informe de Ensayo nº 3574T18

3.- RESULTADOS

3.1.- ENSAYO SEGÚN UNE-EN ISO 1182:2011

Calibración del horno de No Combustibilidad

Fecha de calibración:	15-mar-18
Procedimiento de calibración:	Según capítulo 7.3 de la norma UNE-EN ISO 1182:2011

Criterios de Cumplimiento	
Media aritmética de las desviaciones de temperatura media en los ejes respecto de la temperatura media de la pared del horno < 0,5 %.	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple <input type="checkbox"/> No Cumple
Media aritmética de las desviaciones de temperatura media en los tres niveles respecto de la temperatura media de la pared del horno < 1,5 %.	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple <input type="checkbox"/> No Cumple
Temperatura media de pared en el nivel (+30 mm) < Temperatura media de pared en el nivel (-30 mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple <input type="checkbox"/> No Cumple
Temperatura del horno dentro de los límites establecidos en la norma UNE-EN ISO 1182:2011	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple <input type="checkbox"/> No Cumple

Condiciones de Ensayo

Acondicionamiento de las muestras	Temperatura (°C)	23 ± 2
	Humedad (%)	50 ± 5
	Tiempo de acondicionamiento (h)	120





Expresión de resultados

	Muestra nº				
	T3574A	T3574C	T3574E	T3574G	T3574I
Incremento Temperatura Horno	16,4	16,6	19,5	13,3	17,4
Persistencia de la inflamación (s)	---	---	---	---	---
Pérdida de masa (%)	24,97	26,63	27,72	25,57	25,43

La muestra T3574A se corresponde con la muestra identificada por el solicitante como "Muestra 1".

La muestra T3574C se corresponde con la muestra identificada por el solicitante como "Muestra 2".

La muestra T3574E se corresponde con la muestra identificada por el solicitante como "Muestra 3".

La muestra T3574G se corresponde con la muestra identificada como por el solicitante como "Muestra 4".

La muestra T3574I se corresponde con la muestra identificada por el solicitante como "Muestra 5".

Observaciones durante el ensayo

No se observan hechos relevantes durante el ensayo.

3.2.- ENSAYO SEGÚN UNE-EN ISO 1716:2011 – UNE-EN ISO 1716:2011 TEST

Condiciones de Ensayo – Test conditions

Acondicionamiento de las muestras Specimen conditioning	Temperatura (°C) Temperature	23±2
	Humedad (%) Humidity	50±5
	Tiempo de acondicionamiento (h) Conditioning time	120





Informe de Ensayo nº 3574T18

Expresión de resultados - Test results

- Valor del equivalente de agua – Water equivalent

Equivalente de agua Water equivalent	(MJ/Kg)	10,153·10 ⁻³
---	---------	-------------------------

Componentes – Component		Potencial Calorífico Superior (PCS) Calorific Value (PCS)	
		MJ/kg	MJ/m ²
Componente sustancial 1 (Yeso) Non substantial component 1 (Yeso)	Muestra nº	T35574K-1	0,0000
		T3532K-2	0,0000
		T3532K-3	0,0000
Media aritmética Average		0,0000	0,0000

PCS (MJ/kg). [Potencial Calorífico Superior del producto] PCS (M.J/Kg) .[Product gross calorific potencial]	0,0000
--	--------

Observaciones durante el ensayo

No se observan hechos relevantes durante el ensayo.

Toledo, 14 de septiembre de 2018


Documento Firmado Digitalmente

Fdo.: David Sáez García
Director Técnico del
Laboratorio de Reacción al Fuego





**CLASIFICACIÓN DE LA REACCIÓN AL FUEGO SEGÚN
NORMA UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010**

Solicitante:	UNIVERSIDAD DE BURGOS. C/ Hospital del Rey, s/n <u>09001-BURGOS</u>
Laboratorio emisor:	AFITI-LICOF Organismo notificado nº: 1168
Producto:	Material compuesto de yeso Tipo A y residuos de poliuretano (PUR). Fabricante: Grupo de Investigación en ingeniería de la edificación. Referencia: "REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254"
Informe de Clasificación nº:	3603T18-2 Fecha de emisión: 14-ene-19



Contenido del informe

1.- Objeto del informe	Página 3
2.- Detalles del producto objeto de clasificación	Página 3
3.- Informes y resultados de ensayo en los	Página 3
que se basa la clasificación.	
4.- Clasificación y campo de aplicación	Página 4
5.- Limitaciones	Página 5

La información contenida en este Informe de Clasificación tiene carácter confidencial, por lo que el Laboratorio no facilitará a terceros información relativa a este Informe, salvo que lo autorice el Solicitante.

El presente Informe de Clasificación no debe reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.





Informe de Clasificación nº 3603T18-2

1.- OBJETO DEL INFORME

Este Informe de Clasificación define la clasificación de la Reacción al Fuego asignada al material compuesto de yeso Tipo A y residuos de poliuretano (PUR), denominada por el fabricante como "REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254", de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010 "Clasificación en función del comportamiento frente al Fuego de productos de construcción y elementos para edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de Reacción al Fuego".

2.- DETALLES DEL PRODUCTO OBJETO DE CLASIFICACIÓN

2.1.- GENERAL

El producto referenciado como "REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254" se define como material compuesto de yeso Tipo A y residuos de poliuretano (PUR) según la especificación técnica correspondiente.

2.2.- DESCRIPCIÓN

El producto está completamente descrito en el informe de ensayo en el que se basa esta clasificación. Dicho informe se identifica en el capítulo 3 del presente informe.

3.- INFORMES Y RESULTADOS DE ENSAYO EN LOS QUE SE BASA LA CLASIFICACIÓN.

3.1.- ENSAYOS

Informes de ensayo

Laboratorio emisor	Solicitante	Informe	Normas de ensayo	Condición final de uso
AFITI-LICOF Pol. Ind. Sta. M ^a de Benquerencia C/ Río Estenilla, s/n 45007 – TOLEDO Organismo notificado nº: 1168	UNIVERSIDAD BURGOS. C/ Hospital del Rey, s/n 09001-BURGOS	DE nº: 3603T18	UNE-EN ISO 1716 :2011	Prefabricado de yeso para uso en interiores (Techos y paredes).
		F. emisión: 14-ene19 F ensayo: 16-oct-18		
		F ensayo: 15-nov-18	UNE-EN ISO 1182:2011	





Informe de Clasificación nº 3603T18-2

Resultados de ensayo

Informe de ensayo nº 3603T18

Método de ensayo	Parámetro	Número de ensayos	Resultados	
			Media de parámetro continuo (m)	Parámetros que se tienen que cumplir
UNE-EN ISO 1716:2011 Determinación del Potencial Calorífico Superior (PCS)	PCS (MJ/kg)	1	1,0477	No aplicable

Método de ensayo	Parámetro	Número de ensayos	Resultados	
			Media de parámetro continuo (m)	Parámetros que se tienen que cumplir
UNE-EN ISO 1182:2011 Ensayo de no combustibilidad	Incremento temperatura del horno (°C)	1	15,8	No aplicable
	Persistencia de la inflamación		0	No aplicable
	Pérdida de masa (%)		26,73	No aplicable

I.- CLASIFICACIÓN Y CAMPO DE APLICACIÓN

4.1.- NORMA DE CLASIFICACIÓN

La clasificación de la reacción al fuego se ha realizado de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010.

4.2.- CLASIFICACIÓN

El producto "REFERENCIA: LIFE16 ENV/ES/000254" presenta la siguiente clasificación:

Clasificación de la Reacción al Fuego

Comportamiento al Fuego
A1

4.3.- CAMPO DE APLICACIÓN

Esta clasificación solo es válida para las condiciones de montaje y características del producto detalladas en el informe de ensayo nº 3603T18.





Informe de Clasificación nº 3603T18-2

5.- LIMITACIONES

Este informe no representa ninguna aprobación de tipo ni certificación del producto.

Toledo, 14 de enero de 2019

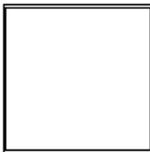
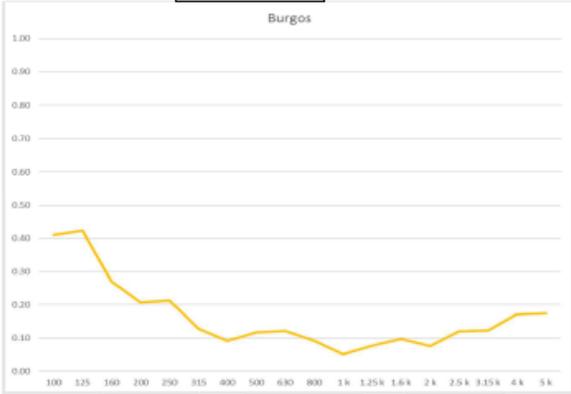

Documento Firmado Digitalmente

Fdo.: David Sáez García
Director Técnico del Laboratorio
de Reacción al Fuego



ANEXO 7. INFORME DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN ACÚSTICA DEL PREFABRICADO

 Código 01PR-15-050 REV N: 0	ACOUSTICS ANALYSIS S.A. INGENIEROS	POL.IND. BERRIAINZ, CALLE C, NAVE 103 31013 BERRIOZAR, NAVARRA, ESPAÑA Tel: (+34) 948 309 128 Fax: (+34) 948 309 129
	INFORME ACÚSTICO	
MEDICIONES DE COEFICIENTE DE ABSORCIÓN MATERIAL LIFE REPOLYUSE + PLENUM 30 CM		

Coeficiente de absorción conforme a la ISO 354 Medición de absorción sonora en una cámara reverberante																																							
Fabricante: YESYFORMA Cliente: UNIVERSIDAD DE BURGOS Elemento Montado por: ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA	Identificador del producto: Recovery of Polyurethane for Reuse in Ecoefficient materials Identificación de la sala de ensayos: ACOUSTICS ANALYSIS S.A. Fecha de ensayo: 27/05/2019																																						
Descripción de objeto de ensayo y plataforma: Muestra formada por 21 paneles de forma rectangular de 60 mm x 60 mm, espesor 10 mm, liso sin perforaciones). Siendo la distancia respecto al suelo total de 30 cm (cámara de aire), no se coloca material absorbente en el interior de la cámara.																																							
Volumen de la sala (m³): 103,51 Temperatura de la sala (°C): 20,0	Área muestra de ensayo (m²): 7,6 Humedad de la sala de ensayos (%): 52,1																																						
																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Hz</th> <th>α</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100</td><td>0.41</td></tr> <tr><td>125</td><td>0.42</td></tr> <tr><td>160</td><td>0.27</td></tr> <tr><td>200</td><td>0.21</td></tr> <tr><td>250</td><td>0.21</td></tr> <tr><td>315</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>400</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>500</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>630</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>800</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>1 k</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>1.25 k</td><td>0.08</td></tr> <tr><td>1.6 k</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>2 k</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>2.5 k</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>3.15 k</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>4 k</td><td>0.17</td></tr> <tr><td>5 k</td><td>0.17</td></tr> </tbody> </table>	Hz	α	100	0.41	125	0.42	160	0.27	200	0.21	250	0.21	315	0.13	400	0.09	500	0.12	630	0.12	800	0.09	1 k	0.05	1.25 k	0.08	1.6 k	0.10	2 k	0.07	2.5 k	0.12	3.15 k	0.12	4 k	0.17	5 k	0.17
Hz	α																																						
100	0.41																																						
125	0.42																																						
160	0.27																																						
200	0.21																																						
250	0.21																																						
315	0.13																																						
400	0.09																																						
500	0.12																																						
630	0.12																																						
800	0.09																																						
1 k	0.05																																						
1.25 k	0.08																																						
1.6 k	0.10																																						
2 k	0.07																																						
2.5 k	0.12																																						
3.15 k	0.12																																						
4 k	0.17																																						
5 k	0.17																																						
Cálculos realizados conforme a la norma ISO 354. Basado en medidas realizadas en laboratorio, obtenidas mediante un método validado.																																							

Elaborado por: Miguel Saralegui San Sebastián 	Aprobado por: Iñigo López Cebrian 
Fecha Elaboración: 08/08/2019	Fecha aprobación: 22/08/2019
ESTE INFORME Y SU CONTENIDO SON PROPIEDAD DE ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA S.A. ®	
www.acusticarqu.com	
PAG 1 de 1	

ANEXO 8. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA FASE EXPERIMENTAL

En este apartado se recoge el estudio ambiental de las mezclas de yeso con diferentes tipos de residuo de poliuretano analizadas en la fase experimental, también se incluye la mezcla de referencia.

La mezcla Y1,5ES2 es omitida del ACV comparativo dado su bajo rendimiento en la fase de caracterización previa.

Se prioriza la obtención de datos claros, sencillos y específicos, que reflejen las diferencias en cuanto al impacto ambiental de unas mezclas u otras, frente al cálculo del impacto total de las mismas. Es por esta razón, que en la fase de ICV se tienen en cuenta fundamentalmente aquellos procesos en los que las entradas y/o salidas son diferentes de unas dosificaciones a otras, de forma que los resultados obtenidos no estén distorsionados por aspectos comunes de dimensión suficiente para opacar los impactos debidos a las diferencias mencionadas.

A8.1. Definición del objetivo y alcance del estudio

El propósito del análisis de ciclo de vida en la fase experimental es llevar a cabo una aseveración comparativa cuantificando el rendimiento ambiental de las diferentes mezclas de yeso con poliuretano reciclado y el material de referencia de cara a una posible toma de decisiones.

El público previsto es la comunidad científica.

A8.1.1. Alcance del estudio

Al tratarse de un ACV de un material en fase experimental, únicamente se analizan las fases del ciclo de vida correspondientes a la etapa de producto que incluye la adquisición y transporte de materias primas y la fabricación. El sistema de producto de las mezclas que incluyen poliuretano reciclado es idéntico y difiere con respecto a la del material de referencia en la adquisición y transporte del residuo de poliuretano y el proceso de trituración (Figura 8.1).

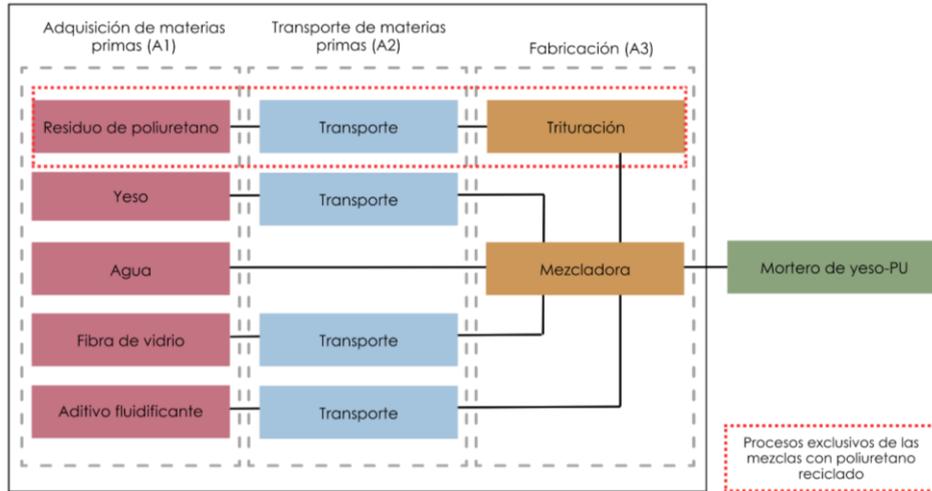


Figura 8.1. Sistema de producto de la mezcla de yeso y de las dosificaciones de yeso con poliuretano reciclado

A8.1.2. Unidad funcional

La unidad funcional seleccionada, en base a la cual se realiza el inventario de datos y se muestran los resultados, es "1 m² de revestimiento pasta de yeso de 15 mm de espesor". Los flujos de referencia de cada análisis son 1 m² de pasta de yeso estándar de 15 mm para la muestra de referencia y 1 m² pasta de yeso con poliuretano de 15 mm de espesor para las mezclas que incluyen polímero reciclado.

Se selecciona un parámetro de superficie dada la funcionalidad específica del producto, el cual se dispone a modo de revestimiento sobre paramentos verticales u horizontales de techo. La unidad de referencia se establece en 1 m² por tratarse de una pasta, de forma que este análisis pueda compararse de manera más sencilla con los de otros productos de aplicaciones y funciones similares.

A8.1.3. Límites del sistema

Se entiende por límites del sistema al acotamiento de los procesos unitarios a incluir en el análisis, estos se reflejan en el sistema de producto representado según sean incluidos o no. En el presente estudio únicamente se consideran las etapas de suministro de materias primas, el transporte de materias primas hasta el lugar de fabricación y el proceso

de fabricación de las mezclas, es decir, se realiza un ACV de tipo de la “cuna a la puerta” (Tabla 8.1).

Etapas de producto	A1	Suministro de materias primas	X
	A2	Transporte a fábrica	X
	A3	Fabricación	X
Construcción	A4	Transporte a obra	MNE
	A5	Instalación / Construcción	MNE
Uso	B1	Uso	MNE
	B2	Mantenimiento	MNE
	B3	Reparación	MNE
	B4	Sustitución	MNE
	B5	Rehabilitación	MNE
	B6	Uso de energía en servicio	MNE
	B7	Uso de agua en servicio	MNE
Fin de vida	C1	Deconstrucción / Demolición	MNE
	C2	Transporte	MNE
	C3	Tratamiento de los residuos	MNE
	C4	Eliminación	MNE
	D	Potencial de reutilización, recuperación y/o reciclaje	MNE

X = módulo incluido; NR = módulo no relevante; MNE: módulo no evaluado

Tabla 8.1. Módulos de información considerados en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental

Los límites geográficos tienen en cuenta la distancia entre los proveedores de materias primas y el centro de investigación en el que se fabrican los productos.

En cuanto a los límites temporales, los datos utilizados son relativos al año 2022.

A8.1.4. Requisitos de calidad de los datos

Los datos principales se obtienen a partir de la información propia de la investigación. Los datos secundarios se adquieren de la base de datos de Ecoinvent (v3.6) del software SimaPro (Tabla 8.2).

Adquisición de materias primas	Bases de datos y bibliografía
Transporte de materias primas	Datos reales y bibliografía
Fabricación	Datos reales y bibliografía

Tabla 8.2. Calidad de los datos utilizados en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental

A8.1.5. Metodología de evaluación de impacto

Los cálculos se realizan con ayuda del software SimaPro (v 9.1). El modelo de impacto utilizado se corresponde con el EN 15804+A2 (v 1.00)⁴. Este modelo nace del EF 3.0, del que difiere en algunas categorías de impacto relacionadas con el cambio climático con diferentes factores de caracterización. Esta metodología es revisada en el año 2019 e incluye valores de normalización y ponderación.

A8.1.6. Categorías de impacto

Las categorías de impacto vienen predeterminadas por el método de cálculo empleado y, en este caso, se estiman suficientes. Las categorías de impacto consideradas son:

- Cambio climático: evalúa las emisiones de gases de efecto invernadero. Constituye un indicador de impacto ambiental.
- Agotamiento de la capa de ozono: analiza las emisiones de sustancias que contribuyen a la degradación y destrucción del ozono a nivel estratosférico.
- Radiación ionizante: estudia las emisiones radiactivas y sus efectos en la salud humana.
- Formación de ozono fotoquímico: analiza la oxidación fotoquímica de diversos compuestos que generan ozono a nivel de la troposfera, perjudicial en altas concentraciones.
- Partículas en suspensión: estudia la emisión de partículas y sus efectos adversos para el ser humano.

⁴ Comisión Europea. (2023, julio). European Platform on LCA | EPLCA - EN 15804 reference package. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/EN15804.xhtml>

- Toxicidad humana – no cancerígena: analiza la ingesta, inhalación, etc., del ser humano de sustancias tóxicas no cancerígenas.
- Toxicidad humana – cancerígena: evalúa la ingesta, inhalación, etc., del ser humano de sustancias tóxicas cancerígenas.
- Acidificación: estudia la cantidad de sustancias acidificantes vertidas al medio ambiente.
- Eutrofización: analiza el exceso de nutrientes en aguas y tierras de cultivo.
- Ecotoxicidad – agua dulce: analiza los diferentes mecanismos toxicológicos que dañan la salud del ecosistema.
- Uso del suelo: cuantifica el uso y explotación de la superficie de la tierra.
- Uso del agua: evalúa el potencial de privación de agua disponible en la cuenca hidrográfica.
- Uso de recursos, fósiles: estudia el consumo de recursos naturales fósiles no renovables.
- Uso de recursos, minerales y metales: analiza el consumo de recursos naturales abióticos no renovables.

La Tabla 8.3 incluye las categorías de impacto evaluadas junto con su clave y unidad de medición.

Categoría de impacto	Clave	Unidad
Cambio climático	CC	Kg CO ₂ eq
Agotamiento de la capa de ozono	ODP	Kg CFC ₁₁ eq
Radiación ionizante	IR	KBq U-235 eq
Formación de ozono fotoquímico	POF	Kg NMVOC eq
Partículas en suspensión	PM	Disease inc.
Toxicidad humada - no cancerígena	HTOX-NC	CTU _h
Toxicidad humada - cancerígena	HTOX-C	CTU _h
Acidificación	AC	Mol H ⁺ eq
Eutrofización, agua dulce	FEU	Kg P eq
Eutrofización, marina	MEU	Kg N eq
Eutrofización, terrestre	TEU	Mol N eq
Ecotoxicidad, agua dulce	ECOTOX	CTU _e
Uso del suelo	LU	Pt
Uso del agua	WU	m ³
Uso de recursos, fósiles	FRD	MJ
Uso de recursos, minerales y metales	MRD	Kg Sb eq

Tabla 8.3. Detalle de las categorías de impacto empleadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental

A8.2. Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV)

En este apartado se recopilan las entradas y salidas de forma cualitativa y cuantitativa de los procesos unitarios incluidos en el sistema de producto.

El cálculo del consumo de electricidad se realiza de forma individual para cada equipo utilizado, teniendo en cuenta el tiempo de uso y la potencia.

A8.2.1. Adquisición de materias primas (A1)

Los flujos de entrada de este proceso unitario se corresponden con la cantidad de materia prima necesaria para la fabricación de cada una de las dosificaciones (Tabla 8.4).

En el residuo de poliuretano no se tiene en cuenta ningún impacto relativo a su fabricación dado que se trata de un desecho que, de no reutilizarse, se depositaría directamente en vertedero, por lo que la carga

ambiental del ciclo de vida completo del poliuretano queda asignada al material primario del que resulta.

Clave	Yeso (Kg/m ²)	Poliuretano (Kg/m ²)	Agua (Kg/m ²)	Fibra de vidrio (Kg/m ²)	Aditivo fluidificante (Kg/m ²)
Y0	7805,56	-	7415,28	78,06	39,03
Y1,5I2	5555,56	542,61	5793,25	55,56	27,78
Y1,5B2	5555,56	459,90	5714,68	55,56	27,78
Y1,5P2	5555,56	1503,76	6706,35	55,56	27,78
Y1,5A2	5555,56	1310,78	6523,02	55,56	27,78
Y1,5AT4	5555,56	1092,73	5651,04	-	-
Y1,5SG2	5555,56	931,08	6162,30	55,56	27,78
Y1,5BU2	5555,56	932,33	6163,49	55,56	27,78

Tabla 8.4. Composición de las mezclas de la fase experimental por unidad funcional

A8.2.2. Transporte de materias primas (A2)

Para calcular los consumos de combustible es preciso conocer la distancia entre los proveedores de materias primas y los espacios de trabajo de la Universidad de Burgos, así como, la cantidad transportada en cada viaje y el tipo de vehículo empleado.

En el caso del yeso, la fibra de vidrio y el aditivo fluidificante se desconocen los datos relativos al transporte, dado que la cantidad de materia prima demandada es pequeña y la empresa de logística que lo suministra varía el tipo de vehículo, la distancia recorrida según la ruta de reparto y la cantidad de otros productos transportados, lo que afecta directamente en la asignación de cargas. En este caso se asumen los datos proporcionados por la base de datos.

En la Tabla 8.5 se detallan los datos conocidos relativos al transporte de cada tipo de residuo de poliuretano, como vehículo se considera una furgoneta comercial en todos los casos.

	I	B	P	A	AT	SG	BU
Distancia (Km)	301	351	351	7	7	236	9

Tabla 8.5. Distancia de transporte de los residuos de poliuretano en la fase experimental

A8.2.3.Fabricación (A3)

A continuación, se describen y cuantifican las entradas y salidas necesarias para la consecución de cada proceso unitario que forma parte de la etapa de fabricación.

Las entradas relativas al proceso de trituración son el residuo de poliuretano en su formato de recepción y la electricidad consumida por el equipo de corte. Las salidas están constituidas por el residuo de poliuretano en polvo y las emisiones debidas al consumo energético. Este proceso únicamente sucede en las mezclas de yeso con poliuretano reciclado, no así en el material de referencia.

La Tabla 8.6 muestra el consumo de electricidad de cada tipo de poliuretano referenciado a la unidad funcional. Esta medición se realiza teniendo en cuenta el tiempo que se precisa para triturar 1 Kg de residuo y la potencia del equipo de trituración.

	I	B	P	A	AT	SG	BU
Energía eléctrica (KWh/m²)	0,271	0,313	0,226	0,826	1,104	2,095	0,308

Tabla 8.6. Consumo de energía eléctrica necesario para el procesado de cada tipo de residuo de poliuretano

El rendimiento del proceso es del 100 % por lo la cantidad de poliuretano procesado que sale en forma de polvo es la misma que entra según la forma de cada tipo. No se consideran residuos de embalaje relativos al residuo de poliuretano.

En cuanto al proceso de mezclado, las entradas se corresponden con las materias primas necesarias para cada tipo de mezcla (Tabla 8.4) y la electricidad. Las salidas son la pasta de yeso en estado fresco (Tabla 8.7) y las emisiones debidas al consumo de electricidad.

	Y0	Y1,5I2	Y1,5B2	Y1,5P2	Y1,5A2	Y1,5AT4	Y1,5SG2	Y1,5BU2
Pasta en estado fresco (Kg/m²)	22,68	19,77	19,73	17,40	20,34	21,27	20,09	17,16

Tabla 8.7. Cantidad de mezcla en estado fresco referenciada a la unidad funcional para cada dosificación

La electricidad consumida por cada dosificación es de 0,0925 Kw/m², la duración del amasado es el mismo para todas. No obstante, este dato no se tiene cuenta en el ACV dado su baja magnitud y que todas las mezclas presentan el mismo valor.

No se tienen en cuenta los residuos generados por el uso de materias primas dada su baja proporción y repercusión en el análisis. En la fabricación a nivel de laboratorio los moldes no se lavan, el material pegado se retira manualmente, por lo que no se producen vertidos de agua contaminados a la red.

En cuanto al proceso de secado, se consideran las entradas correspondientes a la pasta húmeda. Las salidas de este proceso unitario por la mezcla en estado seco (Tabla 8.8).

	Y0	Y1,5I2	Y1,5B2	Y1,5P2	Y1,5A2	Y1,5AT4	Y1,5SG2	Y1,5BU2
Pasta en estado seco (Kg/m²)	13,46	12,00	11,90	10,35	11,85	14,81	12,45	10,59

Tabla 8.8. Cantidad de mezcla en estado seco referenciada a la unidad funcional para cada dosificación

El consumo de electricidad del proceso de secado no se tiene en cuenta dado que el tiempo que las pastas transcurren en el interior de la estufa es el mismo para todas las dosificaciones y no se advierten diferencias en cuanto al impacto ambiental de un modelo u otros.

A8.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) e interpretación

En esta fase se incluye la evaluación del impacto del ciclo de vida en base al ICV previo y se interpretan los datos y resultados obtenidos. La evaluación se realiza con ayuda del software SimaPro, específico para el análisis de ciclo de vida de tipo ambiental.

Todas las categorías de impacto incluidas se interpretan de forma que cuanto menor es el resultado menor es el impacto ambiental, por lo tanto, aquellas mezclas que presentan menores valores tienen un mejor rendimiento ambiental en dicho parámetro. La Tabla 8.9 recoge los datos obtenidos de las mezclas de la fase experimental para las diferentes categorías de impacto.

	Y0	Y1,5I2	Y1,5B2	Y1,5P2	Y1,5A2	Y1,5AT4	Y1,5SG2	Y1,5BU2
CC (Kg CO₂ eq)	0,70	0,83	0,84	1,35	0,78	0,68	1,50	0,61
ODP (Kg CFC₁₁ eq)	8,90 · 10 ⁻⁸	1,29 · 10 ⁻⁷	1,29 · 10 ⁻⁷	2,49 · 10 ⁻⁷	9,62 · 10 ⁻⁸	9,09 · 10 ⁻⁸	2,11 · 10 ⁻⁷	7,78 · 10 ⁻⁸
IR (KBq U-235 eq)	0,10	0,16	0,17	0,18	0,28	0,33	0,59	0,15
POF (Kg NMVOC eq)	3,78 · 10 ⁻³	4,51 · 10 ⁻³	4,54 · 10 ⁻³	7,74 · 10 ⁻³	3,78 · 10 ⁻³	3,25 · 10 ⁻³	7,17 · 10 ⁻³	3,16 · 10 ⁻³
PM (Disease inc.)	3,52 · 10 ⁻⁸	5,28 · 10 ⁻⁸	5,28 · 10 ⁻⁸	1,11 · 10 ⁻⁷	3,15 · 10 ⁻⁸	2,31 · 10 ⁻⁸	7,23 · 10 ⁻⁸	2,83 · 10 ⁻⁸
HTOX-NC (CTU_h)	1,31 · 10 ⁻⁸	1,27 · 10 ⁻⁸	1,28 · 10 ⁻⁸	1,82 · 10 ⁻⁸	1,20 · 10 ⁻⁸	5,54 · 10 ⁻⁹	1,91 · 10 ⁻⁸	1,04 · 10 ⁻⁸
HTOX-C (CTU_h)	3,47 · 10 ⁻¹⁰	6,14 · 10 ⁻¹⁰	6,13 · 10 ⁻¹⁰	1,39 · 10 ⁻⁹	3,19 · 10 ⁻¹⁰	1,38 · 10 ⁻¹⁰	8,47 · 10 ⁻¹⁰	2,86 · 10 ⁻¹⁰
AC (Mol H⁺ eq)	4,93 · 10 ⁻³	5,48 · 10 ⁻³	5,58 · 10 ⁻³	7,94 · 10 ⁻³	5,93 · 10 ⁻³	5,45 · 10 ⁻³	1,09 · 10 ⁻²	4,49 · 10 ⁻³
FEU (Kg P eq)	1,10 · 10 ⁻⁴	1,15 · 10 ⁻⁴	1,20 · 10 ⁻³	1,13 · 10 ⁻⁴	1,80 · 10 ⁻⁴	1,65 · 10 ⁻⁴	3,32 · 10 ⁻⁴	1,18 · 10 ⁻⁴
MEU (Kg N eq)	1,23 · 10 ⁻³	1,43 · 10 ⁻³	1,44 · 10 ⁻³	2,35 · 10 ⁻³	1,27 · 10 ⁻³	1,13 · 10 ⁻³	2,36 · 10 ⁻³	1,04 · 10 ⁻³
TEU (Mol N eq)	1,39 · 10 ⁻²	1,59 · 10 ⁻²	1,60 · 10 ⁻²	2,62 · 10 ⁻²	1,39 · 10 ⁻²	1,25 · 10 ⁻²	2,56 · 10 ⁻²	1,16 · 10 ⁻²
ECOTOX (CTU_e)	24,77	19,77	19,89	22,21	20,49	19,38	26,15	18,79
LU (Pt)	0,44	0,63	0,68	0,61	1,20	1,25	2,52	0,66
WU (m³)	0,48	0,43	0,44	0,46	0,59	0,54	0,85	0,46
FRD (MJ)	11,46	13,75	14,03	20,89	14,78	13,51	28,66	10,85
MRD (Kg Sb eq)	1,14 · 10 ⁻⁵	8,13 · 10 ⁻⁶	8,14 · 10 ⁻⁶	8,17 · 10 ⁻⁶	8,16 · 10 ⁻⁶	1,45 · 10 ⁻⁷	8,28 · 10 ⁻⁶	8,12 · 10 ⁻⁶

Tabla 8.9. Resultados obtenidos en las categorías de impacto del análisis de ciclo de vida para las dosificaciones de la fase experimental

El número de categorías de impacto, así como de mezclas evaluadas es muy numeroso. Con el fin de facilitar el proceso de análisis

de los datos, éstos se recogen en la Figura 8.2 expresados de forma relativa y porcentual, es decir, a aquella dosificación con el valor más alto para una categoría de impacto se le asigna el 100% y el resto se relativizan en función de sus valores. El análisis se refleja de forma porcentual dada la gran variabilidad en el orden de magnitud que presentan los resultados de unas categorías a otras.

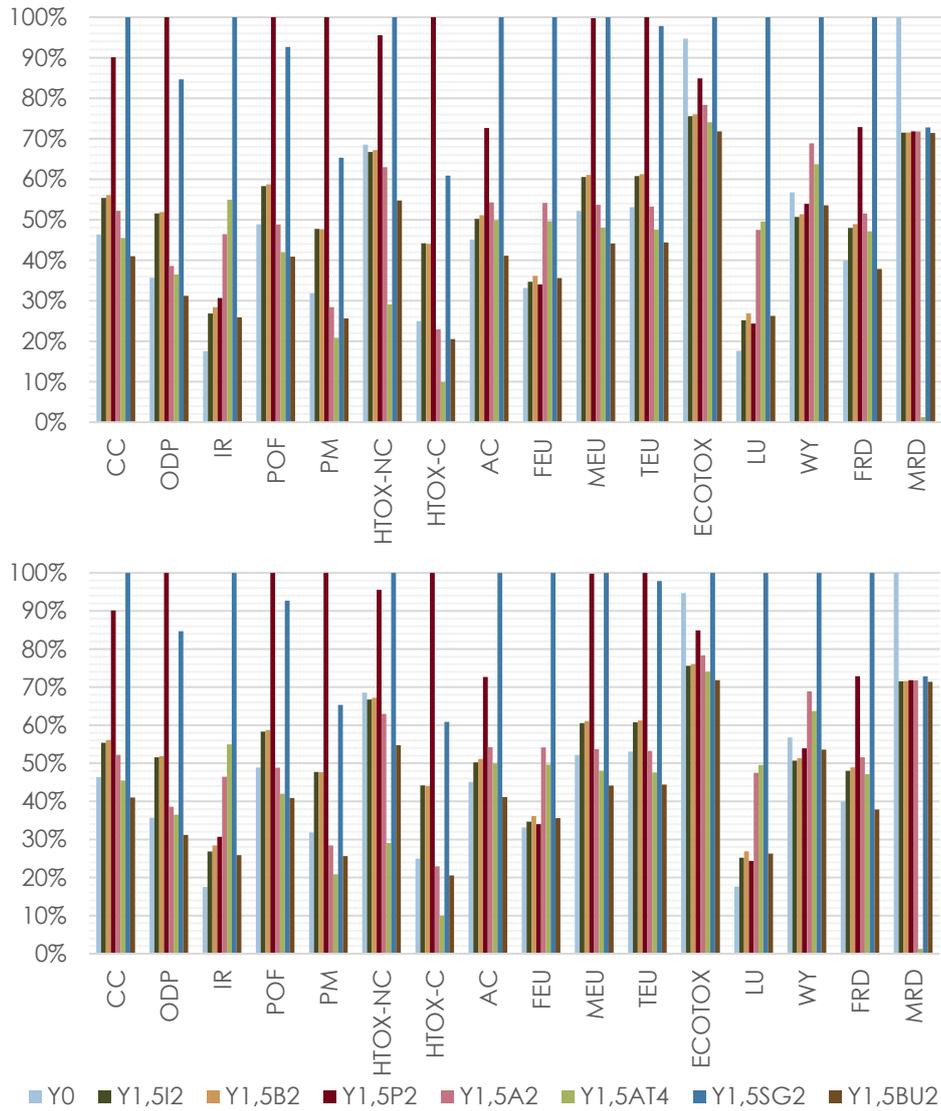


Figura 8.2. Comparativa de los resultados obtenidos en las categorías de impacto del análisis de ciclo de vida para las dosificaciones de la fase experimental

La mezcla Y1,5SG2 presenta los datos más altos en 10 de las 16 categorías de impacto. Le sigue la muestra Y1,5P2 con los resultados más elevados en 5 categorías. Por último, la dosificación de referencia Y0 es la que peor rendimiento muestra en la categoría restante.

En el análisis de forma individualizada, varias mezclas presentan impactos inferiores al material de referencia en algunas categorías mientras que en otras no, debido a la huella asociada a los procesos de transporte y trituración del polímero. Una afirmación generalizada acerca de la idoneidad ambiental de la incorporación de poliuretano en las mezclas no es posible. Destaca el buen rendimiento de la mezcla Y1,5BU2.

Los resultados obtenidos en la fase de EICV se someten a un proceso de ponderación. Este método opcional permite calcular una puntuación única y obtener un indicador global del impacto. Para ello, agrupa y suma todas las categorías de impacto otorgándoles a cada una un peso o relevancia que viene predefinido por la metodología de cálculo utilizada. El método EN 15804+A2 aplica los factores de ponderación incluidos en la Tabla 8.10 para cada categoría de impacto.

Categoría de impacto	Clave	Factor de ponderación (%)
Cambio climático	CC	21,06
Agotamiento de la capa de ozono	ODP	6,31
Radiación ionizante	IR	5,01
Formación de ozono fotoquímico	POF	4,78
Partículas en suspensión	PM	8,96
Toxicidad humada - no cancerígena	HTOX-NC	1,84
Toxicidad humada - cancerígena	HTOX-C	2,13
Acidificación	AC	6,20
Eutrofización, agua dulce	FEU	2,80
Eutrofización, marina	MEU	2,96
Eutrofización, terrestre	TEU	3,71
Ecotoxicidad, agua dulce	ECOTOX	1,92
Uso del suelo	LU	7,94
Uso del agua	WU	8,51
Uso de recursos, fósiles	FRD	8,32
Uso de recursos, minerales y metales	MRD	7,55

Tabla 8.10. Valores de ponderación para las categorías de impacto del método de cálculo EN 15804+A2

Los resultados obtenidos de la etapa de ponderación se incluyen en la Figura 8.3. En ella se observa la contribución de cada categoría de impacto a una puntuación global, llamada puntuación única, para cada dosificación analizada.

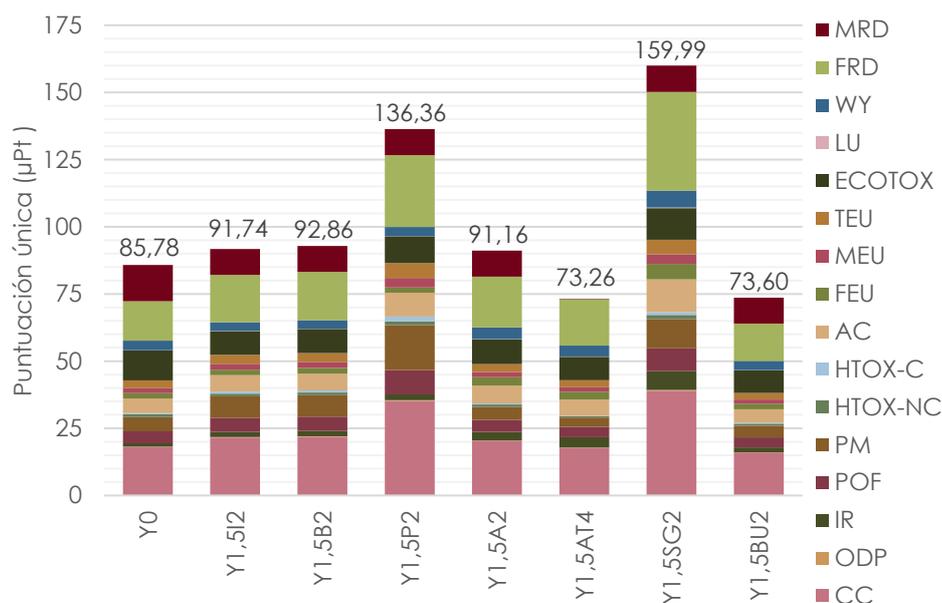


Figura 8.3. Resultados obtenidos de puntuación única en el análisis de ciclo de vida para las dosificaciones de la fase experimental según las categorías de impacto analizadas

Las dosificaciones Y1,5P2 y Y1,5SG2 presentan un impacto ambiental global muy superior al del material de referencia (Y0), cuantificado en un 58,96 % y 86,50 % respectivamente. Ello se debe al tipo de residuo polimérico que incorporan, los cuales conllevan largas distancias de transporte, elevados tiempos de trituración y amplios consumos eléctricos. La cantidad de poliuretano reciclado incluido en la mezcla varía de unas dosificaciones a otras en función de la densidad del polímero, de forma que las cargas asociadas a este material reciclado son más notorias cuanto más poliuretano se incluya.

Las mezclas Y1,5I2, Y1,5B2 e Y1,5A2 tienen un impacto de entorno al 6-8 % superior al de la muestra Y0. Estas dosificaciones presentan un impacto medio debido a la inclusión de poliuretano reciclado, en los que se combinan parámetros elevados con otros más moderados.

La dosificación Y1,5AT4 obtiene el mejor rendimiento ambiental, si bien presenta valores relativos a los procesos inherentes al poliuretano más similares a la mezcla Y1,5A2 que a la mezcla Y1,5BU2 y, sin embargo, su impacto ambiental global es un 14,5 % inferior al de la muestra Y0. El buen resultado obtenido se debe a la ausencia de fibra de vidrio en su composición, la cual experimenta un impacto relevante en el resto de mezclas. Tampoco incorpora aditivo fluidificante, sin embargo, esta materia prima tiene una huella ecológica menor.

La mezcla Y1,5BU2 presenta el segundo menor impacto ambiental de entre todas las analizadas, reduciendo en un 14 % la huella de la muestra de referencia. El bajo consumo eléctrico del proceso de trituración y el reducido transporte de este polímero son las razones de su buen rendimiento ambiental.

La Figura 8.4 muestra los mismos resultados de puntuación única considerando la contribución de los procesos relativos a cada materia prima incluida en las mezclas. Además, se incluye el consumo eléctrico debido al proceso de amasado de la mezcla.

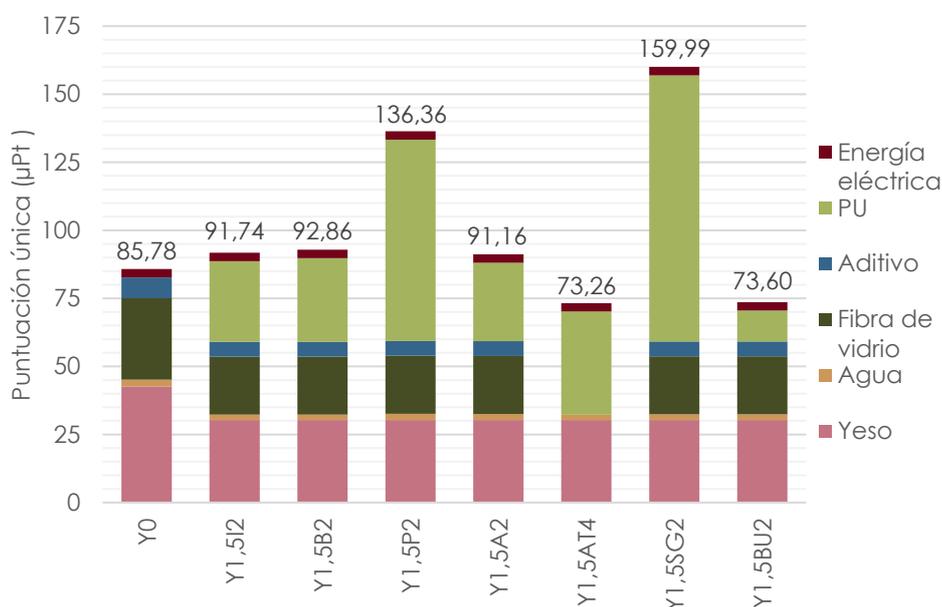


Figura 8.4. Resultados obtenidos de puntuación única en el análisis de ciclo de vida para las dosificaciones de la fase experimental según las materias primas incluidas en su fabricación

De forma general, se observa que los procesos que más influyen en el desempeño ambiental de las diferentes mezclas son aquellos relacionados con el yeso, la fibra de vidrio y el residuo de poliuretano. La incorporación de agua y aditivo fluidificante tiene una menor relevancia.

La incorporación de poliuretano en sustitución de yeso provoca un descenso en el impacto del conglomerante del 29 %, pasando de 43 μ Pt en la muestra de referencia a 30 μ Pt en las mezclas que incluyen polímero. La fibra de vidrio desciende de los 30 μ Pt a los 21 μ Pt y el aditivo fluidificante de los 7,50 μ Pt a los 5,50 μ Pt, ambos un 29 % menos. El impacto por el consumo de agua se reduce en estos materiales un 18 %. El consumo eléctrico es muy similar para todas las mezclas, incluyendo la de referencia, dado que se corresponde con la energía necesaria para el amasado de la pasta. El consumo eléctrico debido al proceso de trituración se incluye en los datos de la materia prima de poliuretano.

Para las muestras Y1,5AT4 y Y1,5BU2 estas reducciones de huella son suficientes para paliar el impacto que supone la incorporación de residuo de poliuretano, mientras que los residuos tipo I, B y A acarrean cargas ambientales más altas y superiores a las evitadas, por lo que presentan un daño ambiental ligeramente superior a la de Y0. La incorporación de los residuos tipo P y SG conlleva un gran impacto lo que hace inviable a nivel medioambiental su incorporación. Se concluye que la incorporación de residuo de poliuretano en mezclas de yeso es factible desde el punto de vista medioambiental, si bien es preciso prestar atención al impacto que conllevan los nuevos procesos.

El transporte del residuo es el único proceso de los tres introducidos por la incorporación de poliuretano reciclado sobre el que existe cierto poder acción, ya que la cantidad de polímero en la mezcla viene fijada de la fase experimental y el tiempo y consumo eléctrico del procesado es intrínseco al tipo material.

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad del presente ACV a la variación de la distancia en el transporte del residuo, se realiza un nuevo análisis estableciendo un valor uniforme de traslado de 10 Km para todos los tipos de polímero. La Figura 8.5 incluye los resultados de puntuación única según la contribución de cada categoría de impacto para este caso. Los resultados de puntuación única considerando la contribución de cada materia prima incluida en su elaboración y el consumo eléctrico de la fase de amasado se incluyen en la Figura 8.6.

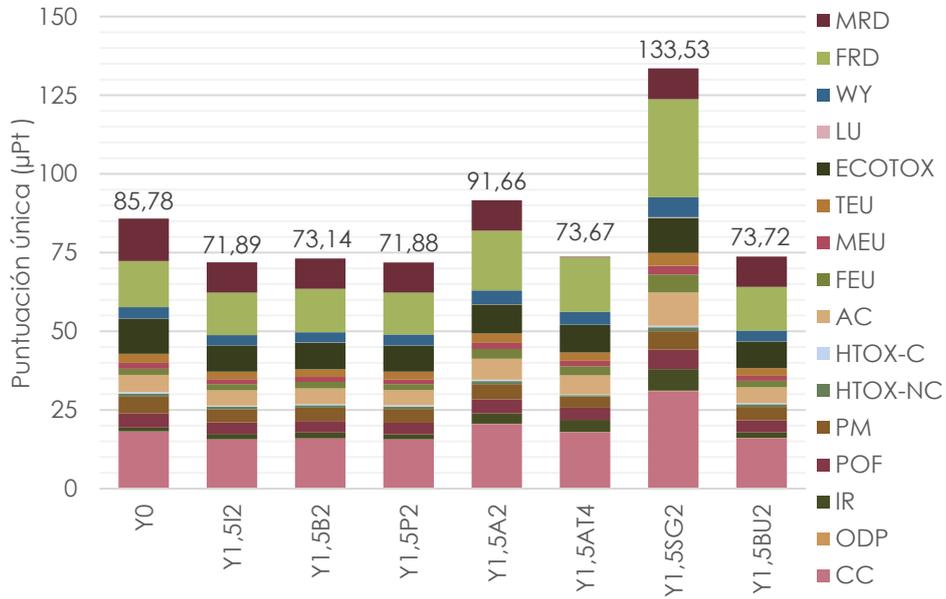


Figura 8.5. Resultados obtenidos de puntuación única en el análisis de ciclo de vida para las dosificaciones de la fase experimental según las categorías de impacto analizadas considerando un transporte de poliuretano de 10 km

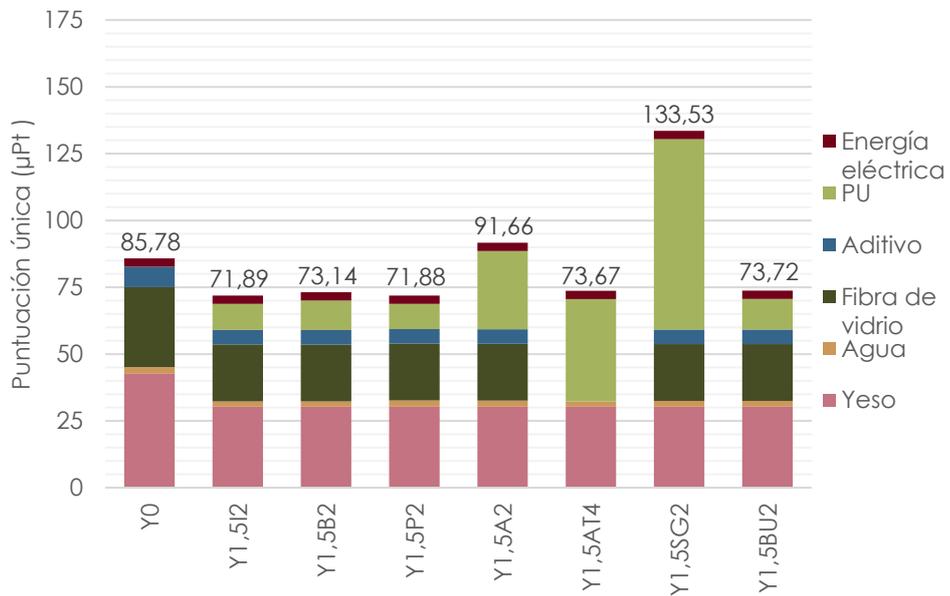


Figura 8.6. Resultados obtenidos de puntuación única en el análisis de ciclo de vida para las dosificaciones de la fase experimental según las materias primas incluidas en su fabricación considerando un transporte de poliuretano de 10 km

La reducción de la distancia del transporte de la materia prima de poliuretano contribuye de manera positiva en las categorías de impacto de toxicidad humana-cancerígena, partículas en suspensión y agotamiento de la capa de ozono. En menor medida, también se ven favorecidas los parámetros de cambio climático, formación de ozono fotoquímico, eutrofización marina, eutrofización terrestre y uso de recursos fósiles.

Esta mejora se hace especialmente notable en el residuo tipo P que advierte una mejora en su rendimiento ambiental del 47 %. Las muestras con residuos tipo I, B y SG experimentan una reducción de su huella ambiental de entre un 16,5 y 21,5 %, mientras que las mezclas Y1,5A2, Y1,5AT4 y Y1,5BU2 sufren un leve aumento de su impacto global, entorno al 0,5 %, ya que la distancia de transporte original era inferior a 10 Km.

Con respecto al material de referencia, 5 de las 7 dosificaciones que incluyen residuo de poliuretano presentan una huella de entre un 14 y 16 % inferior. Las mezclas Y1,5I2, Y1,5B2 y Y1,5P2 que en el análisis anterior presentaban peor rendimiento, en este caso presentan un mejor desempeño ambiental que Y0. Los residuos tipo A y SG se mantienen con un daño superior al del material estándar dada la alta cantidad de residuo incorporada en la mezcla y el elevado tiempo de procesado que requieren.

En cuanto al análisis de la contribución de las materias primas a dicho impacto, esta reducción de kilometraje se ve reflejada en la huella debida al residuo de poliuretano, como era previsible. El poliuretano tipo P reduce su impacto en un 47 %, los tipos I y B entorno a un 21,5 % y el SG un 16,5 %. Los residuos A y AT se mantiene invariable dado que la distancia propuesta es similar a la anterior. El amplio tamaño de su impacto se debe a la alta cantidad de producto en la mezcla y al elevado consumo eléctrico en el proceso de trituración. En la misma situación inalterable se encuentra el residuo BU, sin embargo, este presenta datos de procesado mucha más favorables, de ahí su baja huella ambiental.

A este respecto se concluye que una distancia corta del transporte de material valorizado es determinante a la hora de que su rendimiento ambiental sea más favorable que el de la muestra de referencia.

A8.4. Conclusiones

Del análisis de ciclo de vida realizado sobre las dosificaciones de la fase experimental se concluye que es posible y viable mejorar el desempeño ambiental del producto de referencia con la incorporación de residuo de poliuretano en su matriz.

Para lograr una huella ecológica que satisfaga el objetivo de reducir el impacto ambiental del material estándar es preciso prestar atención a los procesos novedosos que introduce la nueva materia prima, siendo éstos la cantidad de residuo en la mezcla, la distancia de transporte y el tiempo de procesado. Cuanto menor sean los valores de estos parámetros menor será el daño ambiental global.

En este ACV resulta determinante que con menor cantidad de materias primas se cumpla la misma función de revestimiento de 1 m² de superficie.

La cantidad de yeso sustituida en la mezcla es importante ya que esta materia prima supone el 50 % del impacto de la muestra estándar, mientras que la fibra de vidrio representa el 35 %

ANEXO 9. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA FASE INDUSTRIAL

Tras conseguir y comprobar con éxito que el desarrollo de una nueva placa para techos suspendidos de yeso que incorpora un importante porcentaje de subproducto industrial es posible, surge la necesidad de conocer su desempeño desde el punto de vista ambiental.

La evaluación de este aspecto comprende la realización de un análisis de aseveración comparativa entre el nuevo producto y la placa de yeso tradicional.

El objetivo del estudio es el análisis de todos los procesos del ciclo de vida de ambos modelos, analizando las entradas y salidas de materia, energía, emisiones, etc., con el fin de conocer su influencia en las diferentes categorías de impacto consideradas en la evaluación. Se analizan los parámetros en los que el prefabricado innovador presenta un mejor rendimiento que su homóloga tradicional, concluyendo cuál de las dos es más respetuosa con el medioambiente.

La diferencia de peso y de conductividad térmica de las placas puede repercutir en los resultados obtenidos en el ACV. La Tabla 9.1 recoge varias propiedades interesantes de ambos prefabricados.

	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Dimensiones nominales (mm)	593 x 593 x 15 (±2)	593 x 593 x 15 (±2)
Peso por unidad (Kg/ud)	3,49 (±5%)	2,50 (±5%)
Reacción al fuego (UNE EN ISO 1716⁵)	A1	A1
Conductividad térmica (W/m K) (UNE-EN 12667⁶)	0,30	0,22
Coefficiente de absorción acústica (a_m)	0,08	0,08

⁵ Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN ISO 1716 Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del calor bruto de combustión (Valor calorífico) (ISO 1716:2010).

⁶ Asociación Española de Normalización (AENOR). (2002). UNE-EN 12667 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica.

(UNE-EN ISO 354⁷)		
Coefficiente de reducción de ruido (NRC) (UNE-EN ISO 354)	0,12	0,12
Coefficiente de absorción acústica (a_w) (UNE-EN ISO 354)	0,10	0,10

Tabla 9.1. Características principales de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU

Ambos productos carecen en su composición de sustancias peligrosas sujetas a autorización (lista de sustancias candidatas extremadamente preocupantes). Al mismo tiempo, no emiten sustancias peligrosas al aire, el agua o el suelo durante su fase de uso.

A continuación, se procede con la evaluación ambiental siguiendo el procedimiento descrito en la metodología.

A9.1. Definición del objetivo y alcance del estudio

El objetivo de este ACV es cuantificar y realizar una aseveración comparativa en cuanto al rendimiento ambiental de la placa de techo de yeso estándar y la placa de techo de yeso-PU.

El público previsto para este estudio es la comunidad científica, el fabricante de los prefabricados analizados y los clientes o consumidores de dichos productos.

A9.1.1. Alcance del estudio

El alcance del estudio incluye todos los procesos considerados en el sistema de producto, el cual se realiza teniendo en cuenta el sistema de producción habitual a nivel industrial de las placas para techo suspendido.

Los sistemas de producto de ambas placas son muy similares, no obstante, la manufactura del nuevo prefabricado requiere de la implementación de nuevos procesos relacionados con la incorporación

⁷ Asociación Española de Normalización (AENOR). (2004). UNE-EN ISO 354 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.

de residuo de poliuretano (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

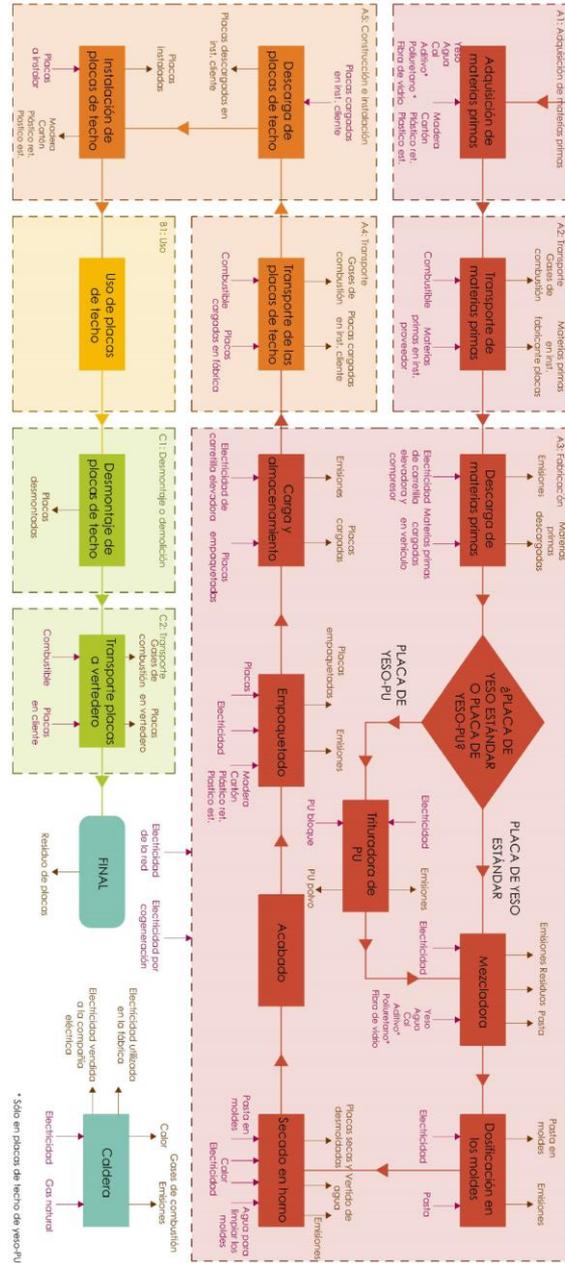


Figura 9.1. Sistema de producto de la placa de techo de yeso estándar y de la placa de techo de yeso-PU

A9.1.2.Unidad funcional

La unidad funcional seleccionada, en base a la cual se realiza el inventario de datos y se muestran los resultados, es “1 m² de revestimiento de placa de yeso de 15 mm de espesor”.

Los flujos de referencia de cada análisis son 1 m² de placa de yeso estándar de 15 mm para el caso del prefabricado tradicional y 1 m² de placa de yeso-PU de 15 mm de espesor para el caso del nuevo prefabricado con poliuretano reciclado.

Se selecciona un parámetro de superficie dada la funcionalidad específica del producto, el cual se dispone en techos suspendidos discontinuos con un objetivo estético y de aislamiento. La unidad de referencia se establece en 1 m², en lugar de la superficie nominal de la unidad de placa, de forma que este análisis pueda compararse de manera más sencilla con los de otros productos de aplicaciones y funciones similares, independientemente de sus dimensiones.

A9.1.3.Límites del sistema

Los límites geográficos tienen en cuenta la distancia entre los proveedores de materias primas y la planta para la fabricación de los prefabricados de yeso, el emplazamiento de la fábrica, la distancia media de transporte para el suministro del producto al cliente y la distancia media de transporte a vertedero.

En cuanto a los límites temporales, los datos utilizados relativos a la producción de placas de yeso son proporcionados por el fabricante y se corresponden con los registros de datos reales tomados en el año 2018 y 2019. En cuanto a los datos de ensayos y pruebas de placas a nivel de funcionalidad, éstos se corresponden con los años 2018, 2019 y 2020.

Las etapas del ciclo de vida consideradas son el suministro de materias primas, el transporte de materias primas hasta el lugar de fabricación, el proceso de fabricación de las placas y su embalaje, el transporte de las placas hasta el cliente, el uso de las mismas por el cliente y el fin de vida de las placas.

El tipo de ACV realizado es de la “cuna a la tumba” (Tabla 9.2).

Etapas de producto	A1	Suministro de materias primas	X
	A2	Transporte a fábrica	X
	A3	Fabricación	X
Construcción	A4	Transporte a obra	X
	A5	Instalación / Construcción	X
Uso	B1	Uso	NR
	B2	Mantenimiento	MNE
	B3	Reparación	MNE
	B4	Sustitución	MNE
	B5	Rehabilitación	MNE
	B6	Uso de energía en servicio	MNE
	B7	Uso de agua en servicio	MNE
Fin de vida	C1	Deconstrucción / Demolición	NR
	C2	Transporte	X
	C3	Tratamiento de los residuos	MNE
	C4	Eliminación	MNE
	D	Reutilización, recuperación y/o reciclaje	MNE

X = módulo incluido; NR = módulo no relevante; MNE: módulo no evaluado

Tabla 9.2. Módulos de información considerados en el análisis de ciclo de vida de la fase industrial

A9.1.4. Requisitos de calidad de los datos

Los datos principales son proporcionados por el fabricante y corresponden al periodo de 2018 y 2019. El mix eléctrico considerado es del año 2018. Los datos secundarios se obtienen de bases de datos del software SimaPro. También se utilizan otras fuentes bibliográficas que se detallan a medida que se desarrolla el análisis (Tabla 9.3).

Adquisición de materias primas	Bases de datos y bibliografía
Transporte de materias primas	Datos reales y bibliografía
Fabricación	Datos reales y bibliografía
Transporte del producto	Datos reales y bibliografía
Uso del producto	Datos reales y bibliografía
Final de vida	Datos reales y bibliografía

Tabla 9.3. Calidad de los datos utilizados en el análisis de ciclo de vida de la fase industrial

A9.1.5. Metodología de evaluación de impacto

Los cálculos se realizan con ayuda del software SimaPro. El modelo de impacto utilizado se corresponde con el CML 2001⁸.

A9.1.6. Categorías de impacto

Las categorías de impacto seleccionadas proceden de la metodología CML 2.001 y están reconocidos internacionalmente por diversas instituciones, utilizándose habitualmente en los estudios de análisis de ciclo de vida realizados conforme a la norma ISO 14044⁹. Las categorías de impacto estudiadas son:

- Impactos por emisiones:
 - o Calentamiento global: evalúa la cantidad de energía que pueden absorber las emisiones de gas a la atmósfera y que provocan el calentamiento del planeta. Los gases que más contribuyen a esta categoría son principalmente el vapor de agua, el CO₂ y otros gases como CH₄, N₂O, y CFCs.
 - o Agotamiento de la capa de ozono: analiza la cantidad de ozono que se degrada o agota.
 - o Acidificación del suelo y del agua: estudia la cantidad de ácidos que se emiten a la atmósfera y que, como consecuencia, pueden depositarse posteriormente en el suelo y en el agua acidificándolas y afectando a la flora y fauna.
 - o Eutrofización: determina el estado de contaminación de los sistemas acuáticos, en los cuales el exceso de fertilización del agua y del suelo (nutrientes) provoca un incremento en el crecimiento de biomasa.

⁸ Universiteit Leiden. (2023, julio). CML-IA Characterisation Factors. <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>

⁹ Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices (ISO 14044:2006).

- Formación de ozono fotoquímico: cuantifica la capacidad de compuestos orgánicos volátiles (COVs) que producen ozono troposférico.
- Agotamiento de recursos abióticos (ADP-elementos): evalúa la disminución de la disponibilidad de recursos naturales, y, en concreto, de los elementos disponibles en la naturaleza.
- Agotamiento de recursos abióticos (ADP-combustibles fósiles): estudia la disminución de la disponibilidad de recursos naturales, y, en concreto, de los combustibles de origen fósil que se encuentran en el planeta.
- Impactos por uso de recursos:
 - Uso de energía primaria renovable excluyendo recursos utilizados como materia prima.
 - Uso de energía primaria renovable utilizada como materia prima.
 - Uso total de energía primaria renovable (Energía primaria y recursos de energía primaria renovable utilizada como materia prima).
 - Uso de energía primaria no renovable excluyendo recursos energéticos no renovables utilizada como materia prima.
 - Uso de energía primaria no renovable como materias primas.
 - Uso total de energía primaria no renovable.
 - Uso de materiales secundarios.
 - Uso de combustibles secundarios renovables.
 - Uso de combustibles secundarios no renovables.
 - Uso neto de recursos de agua dulce.
- Impactos por residuos generados:
 - Residuos peligrosos eliminados/vertidos.

- Residuos no peligrosos eliminados/vertidos.
- Residuos radiactivos eliminados/vertidos.
- Impactos por otros flujos de salida:
 - Materiales para el reciclaje.
 - Materiales para la reutilización.
 - Materiales para la valorización energética.
 - Energía exportada.

La Tabla 9.4 recoge las categorías de impacto finalmente analizadas del ACV junto con su nomenclatura y unidad.

Categoría de impacto	Clave	Unidad
Calentamiento global	GWP	Kg CO ₂ eq
Acidificación del suelo y del agua	AP	Kg SO ₂ eq
Eutrofización	EP	Kg (PO ₄) ³⁻ eq
Formación de ozono fotoquímico	POCP	Kg C ₂ H ₂ eq
Agotamiento de recursos abióticos (ADP-elementos)	ADPE	Kg Sb eq
Agotamiento de recursos abióticos (ADP-combustibles fósiles)	ADPF	MJ
Uso total de energía primaria no renovable excluyendo recursos utilizados como materia prima	PENRE	MJ
Uso neto de recursos de agua dulce	FW	L
Residuos no peligrosos eliminados/vertidos	NHWD	Kg
Materiales para el reciclaje	MFR	Kg
Energía exportada	EE	MJ

Tabla 9.4. Detalle de las categorías de impacto empleadas en el análisis de ciclo de vida de la fase industrial

Varias de las categorías de impacto se excluyen al no haber identificado en el ICV sustancias y/o productos que tenga influencia sobre las mismas. Las categorías de impacto excluidas son: agotamiento de la capa de ozono, uso de energía primaria renovable excluyendo recursos utilizados como materia prima, uso de energía primaria renovable utilizada como materia prima, uso total de energía primaria

renovable (energía primaria y recursos de energía primaria renovable utilizada como materia prima), uso de energía primaria no renovable como materia prima, uso total de energía primaria no renovable, uso de materiales secundarios, uso de combustibles secundarios renovables, uso de combustibles secundarios no renovables, residuos peligrosos eliminados/vertidos, residuos radiactivos eliminados/vertidos, materiales para la reutilización y materiales para la valorización energética.

A9.2. Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV)

En este apartado se describen los procesos unitarios del sistema de producto, cuantificando sus entradas y salidas, y las consideraciones realizadas para cada etapa del ciclo de vida. Los flujos de materia y energía en el caso de los dos modelos de placas objeto del presente estudio son prácticamente idénticos a nivel cualitativo pudiendo variar a nivel cuantitativo, pues ambas placas siguen el mismo proceso productivo, con la excepción del proceso de trituración del residuo de poliuretano en la placa de yeso-PU.

En el estudio de los transportes existe una variabilidad inherente a este tipo de procesos. Con el fin de minimizar estas variables y hacer el estudio lo más objetivo posible, se confirma que los vehículos reales utilizados en el transporte de materias primas son de categoría N3, según el Reglamento (UE) 2018/858 del Parlamento Europeo y del Consejo¹⁰, y clasificados como Euro IV, según la Directiva 2005/55/CE del Parlamento Europeo y del Consejo¹¹. En cuanto a las emisiones, se considera el límite máximo establecido para esta categoría de vehículos. Asimismo, se

¹⁰ Reglamento (UE) 2018/858 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, sobre la homologación y la vigilancia del mercado de los vehículos de motor y sus remolques y de los sistemas, los componentes y las unidades técnicas independientes destinados a dichos vehículos, por el que se modifican los Reglamentos (CE) n° 715/2007 y (CE) n° 595/2009 y por el que se deroga la Directiva 2007/46/CE (DOUE L núm. 151/1, de 14 de junio de 2018).

¹¹ Directiva 2005/55/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de septiembre de 2005, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre las medidas que deben adoptarse contra la emisión de gases y partículas contaminantes procedentes de motores de encendido por compresión destinados a la propulsión de vehículos, y contra la emisión de gases contaminantes procedentes de motores de encendido y chispa alimentados con gas natural o gas licuado del petróleo destinados a la propulsión de vehículos (DOUE L núm. 275/1, de 20 de octubre de 2005)

asume que el transporte del producto terminado al cliente y del residuo de placa tras su uso se realiza con este mismo tipo de vehículo cuyo consumo medio es de 35 litros cada 100 Km, según el Observatorio de Costes de Transportes de Mercancías por Carretera de fecha 31 de octubre de 2018¹².

A9.2.1. Adquisición de materias primas (A1)

Las entradas correspondientes a esta fase son las materias primas necesarias para fabricar la unidad funcional establecida. Se tienen en cuenta los proveedores habituales de la fábrica. La Tabla 9.5 incluye la composición detallada de los modelos evaluados.

	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Materias Primas		
Yeso (Kg/m²)	6,190	4,230
Poliuretano (Kg/m²)	-	0,350
Agua (Kg/m²)	8,190	6,090
Fibra de vidrio (Kg/m²)	0,059	0,059
Aditivo fluidificante (Kg/m²)	-	0,0408
Cal (Kg/m²)	0,060	0,250
Embalaje		
Pallet de madera (Kg/m²)	0,140	0,140
Cartón (Kg/m²)	0,040	0,040
Plástico retráctil (Kg/m²)	0,028	0,028
Plástico estirable (Kg/m²)	0,0057	0,0057

Tabla 9.5. Composición de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional

Se observa una considerable reducción en la cantidad de yeso y agua incorporada en la nueva placa, por el contrario, la cantidad de cal aumenta y se introducen nuevas materias primas como el poliuretano y el aditivo. En cuanto al embalaje, se emplea el mismo en ambos casos.

En el residuo de poliuretano no se tiene en cuenta ningún impacto relativo a su fabricación dado que se trata de un desecho que, de no

¹² Ministerio de Fomento de España. (2018). Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera.

reutilizarse, se depositaría directamente en vertedero, por lo que la carga ambiental del ciclo de vida completo del poliuretano queda asignada al material primario del que resulta.

A9.2.2. Transporte de materias primas (A2)

Se consideran como entradas las materias primas desde las instalaciones del proveedor y el combustible necesarios para el vehículo de transporte. Las materias primas dentro de la planta de fabricación y las emisiones de gases de los vehículos constituyen las salidas.

Para calcular los consumos de combustible es preciso conocer la distancia entre los proveedores de materias primas y la fábrica, así como, la cantidad transportada en cada viaje (Tabla 9.6).

El centro de producción (Yesyforma) se ubica en Sástago (Zaragoza), en la Crta. de la Zaida a Sástago, Polígono Industrial nº 1.

	Distancia (Km)	Capacidad del vehículo (T)	Carga real (T)	Vuelta en vacío
Materias Primas				
Yeso	19	30	26	Si
Poliuretano	468	2,1	2,1	No
Agua	- (in situ)	-	-	-
Fibra de vidrio	350	12	10	Si
Aditivo fluidificante	300	24	5	No
Cal	19	12	8,25	Si
Embalaje				
Pallet de madera	60	12	5	Si
Cartón	300	24	6	No
Plástico	250	24	5	No

Tabla 9.6. Detalle del transporte de materias primas

En aquellos transportes cuyo retorno es en vacío, el cálculo del kilometraje se realiza contabilizando tanto el viaje de ida como el de vuelta, incluyéndose así el consumo y las emisiones de esos trayectos en el cómputo global. La razón que motiva su computo es que éstos no existirían en el caso de que no se hubiera hecho el transporte de ida. Si la vuelta no es en vacío no se tiene en cuenta este trayecto.

La Tabla 9.7 incluye el detalle del consumo de combustible para el transporte de cada materia prima referenciado a la unidad funcional.

	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Yeso (L/m ²)	0,0032	0,0022
Poliuretano (L/m ²)	-	0,0273
Agua (L/m ²)	-	-
Fibra de vidrio (L/m ²)	0,0012	0,0012
Aditivo fluidificante (L/m ²)	-	0,0002
Cal (L/m ²)	0,0001	0,0004
Pallet de madera (L/m ²)	0,0055	0,0055
Cartón (L/m ²)	0,0002	0,0002
Plástico (L/m ²)	0,0012	0,0012
Consumo total de gasóleo (L/m²)	0,0064	0,0332

Tabla 9.7. Consumos de combustible del proceso de transporte de materias primas de la placa de yeso estándar y de la placa de yeso-PU

A9.2.3.Fabricación (A3)

Se describen y cuantifican las entradas y salidas necesarias para la consecución de cada proceso unitario que forma parte de la etapa de fabricación.

En el proceso unitario de descarga de materias primas se consideran las entradas relativas a las materias primas y la electricidad consumida por la carretilla elevadora y el compresor, éste último únicamente se emplea para la descarga del yeso. En cuanto a las salidas se tienen en cuenta las materias primas reubicadas en la fábrica y las emisiones de gases consecuencia del consumo de electricidad o combustible.

Las entradas relativas al proceso de trituración son el residuo de poliuretano en su formato de recepción y la electricidad consumida por el equipo de corte. Las salidas están constituidas por el residuo de poliuretano en polvo y las emisiones debidas al consumo energético. Este proceso únicamente sucede en la fabricación de la placa de yeso-PU.

La electricidad necesaria para triturar los 0,35 Kg de poliuretano que precisa 1 m² de placa de yeso-PU es de 0,47 Kw o 1,692 MJ.

El rendimiento del proceso es del 100 % por lo la cantidad de poliuretano procesado que sale es la misma que entra en forma de bloque. No se consideran embalajes, ya que el polímero se recepciona sin éstos.

En cuanto al proceso de mezclado, las entradas se corresponden con las materias primas de cada tipo de placa y la electricidad. Las salidas son la pasta de yeso en estado fresco, los residuos de envases y embalajes de las materias primas y las emisiones por el consumo de electricidad.

Las cantidades de materias primas por metro cuadrado se describen en la Tabla 9.6. Se obtienen 14,50 Kg/m² de mezcla en estado fresco para el proceso de fabricación de la placa estándar y 11,02 Kg/m² de pasta en el caso de la placa de yeso-PU. La cantidad de residuos de embalajes inventariados se muestran en la Tabla 9.8.

	Tipo de residuo	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Yeso (Kg/m²)	-	0,00	0,00
Poliuretano (Kg/m²)	-	0,00	0,00
Agua (Kg/m²)	-	0,00	0,00
Fibra de vidrio (Kg/m²)	Plástico	0,000089	0,000089
	Cartón	0,000395	0,000395
	Madera	0,001073	0,001073
Aditivo fluidificante (Kg/m²)	-	0,00	0,00
Cal (Kg/m²)	Plástico	0,000044	0,001818
	Cartón	0,000480	0,002000
	Madera	0,000836	0,003485
Total residuos por tipo (Kg/m²)	Plástico	0,001907	0,000133
	Cartón	0,002395	0,004430
	Madera	0,004558	0,001909
Total residuos (Kg/m²)	No peligrosos	0,006472	0,008860

Tabla 9.8. Cantidad de residuos que salen del proceso unitario de la mezcladora

En el proceso de dosificación de moldes se tienen en cuenta las entradas de la pasta de yeso en estado fresco y la electricidad del proceso. Como salida se considera la pasta vertida en los moldes y las

emisiones debidas al consumo eléctrico. La cantidad de masa es la misma que la obtenida del proceso de mezcladora dada una eficacia del sistema del 100 %. El número de placas por unidad funcional es el mismo para ambos productos y es de 2,84 placas/m².

En el proceso de caldera se consideran como entradas el gas natural y la electricidad y como salidas la energía en forma de calor, emisiones de gases, electricidad de uso en la fábrica y electricidad vendida a la compañía suministradora.

La cantidad de gas natural consumido se calcula a partir de los datos anuales de consumo para el año 2018 y teniendo en cuenta la producción anual de placas de yeso estimada en 595.521 m². El consumo de gas natural de la caldera para el nuevo modelo se calcula teniendo en cuenta que precisa un 20,3 % menos de tiempo de secado, lo que se traduce en una reducción de la demanda de gas del 14,21 %. Es preciso mencionar que de ese consumo el 85 % se destina a la fabricación de placas de techo y el 15 % restante a calefacción (Tabla 9.9).

	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Consumo de gas natural (m³)	1.288.000	1.104.973
Consumo de gas natural (MJ)	50.025.920	42.917.161
Producción anual de placas (m²)	595.521	595.521
Consumo de gas natural (m³/m²)	2,1628	1,8555
Consumo de gas natural (MJ/m²)	84,0036	72,0666

Tabla 9.9. Consumo de gas natural de placa de yeso estándar y de la placa de yeso-PU

La fábrica cuenta con un sistema de cogeneración de energía eléctrica, la energía que no se utiliza se vende a la red. Se estima la misma producción de energía para ambos modelos en proporción al volumen de gas utilizado, en consecuencia, la producción de energía se ve reducida en un 14,21 %. El computo del consumo de energía eléctrica de la planta se realiza de manera global, con excepción del proceso de trituración del residuo. En consecuencia, la medición anual resultante se reparte entre la producción de placas (Tabla 9.10).

	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Energía eléctrica total cogenerada (Kw)	5.604.956	4.809.052
Energía eléctrica cogenerada utilizada en la planta (Kw)	566.566	866.424
Energía eléctrica cogenerada vendida a la red (Kw)	5.038.400	3.942.628
Energía eléctrica cogenerada vendida a la red (Kw/m²)	8,46	6,62
Consumo eléctrico anual (Kw)	847.901	869.859
Consumo eléctrico anual (Kw/m²)	1,424	1,461
Consumo eléctrico de red (Kw/m²)	0,472	0,006
Consumo eléctrico por cogeneración (Kw/m²)	0,952	1,455

Tabla 9.10. Balance de energía eléctrica cogenerada y consumo eléctrico de placa de yeso estándar y de placa de yeso-PU por unidad funcional

En el proceso unitario de secado se consideran las entradas correspondientes a los moldes con la masa húmeda, electricidad, agua para la limpieza de moldes y el calor de la caldera. Las salidas son las placas de yeso secas, las emisiones debidas al consumo eléctrico y el vertido de agua por el lavado de los moldes.

La cantidad de masa que entra es la misma que en el proceso de dosificación, mientras que la mezcla seca que sale es de 9,925 Kg/m² para el proceso de fabricación de la placa de yeso estándar y de 7,109 Kg/m² para el caso de la placa de yeso-PU.

El calor de secado procede del proceso de caldera en el que ya se computa la reducción en el consumo de gas natural y electricidad que tiene la placa de yeso-PU con respecto a la placa de yeso estándar.

Se considera un vertido de agua procedente de los procesos de limpieza de 175 L/turno para ambas placas que referenciado a la unidad funcional se traduce en 0,138 L/m².

En cuanto al proceso de acabado, no se considera ninguno diferente al aspecto natural que muestran las placas tras su secado.

En el proceso de empaquetado se consideran como entradas las placas secas, las cajas de cartón, el pallet de madera, los plásticos para embalaje y la electricidad. Las salidas son las placas embaladas y las emisiones por el consumo eléctrico. Las entradas de embalaje se recogen en la Tabla 9.5 y no se consideran residuos a este respecto.

El almacenaje y carga supone la entrada de placas embaladas y electricidad, mientras que las salidas son las placas embaladas y cargadas y las emisiones debidas al consumo eléctrico.

A9.2.4. Transporte del producto (A4)

En este proceso unitario se consideran como entradas las placas embaladas y cargadas en la fábrica y el combustible del vehículo de transporte. Las salidas están constituidas por las placas embaladas y cargadas en las instalaciones del cliente y las emisiones de gases de combustión.

Con el propósito de minimizar la subjetividad que puede presentar la variabilidad de los clientes de los que se dispone, así como su diferente ubicación y elección de un producto frente a otro de los que se pretenden comparar en este estudio, se ha supuesto un cliente tipo ubicado a una distancia de 300 Km de la planta de producción y un suministro de un camión completo para cada modelo de placa. De esta manera se puede realizar el cálculo comparativo entre ambos modelos de placa estimando un consumo de gasóleo de 0,047 L/m² para la placa de yeso estándar y de 0,035 L/m² para la placa de yeso-PU.

A9.2.5. Construcción e instalación (A5)

La descarga de placas comprende como entrada las placas embaladas en las instalaciones del cliente y como salida las placas embaladas, descargadas y almacenadas en las instalaciones del cliente.

No se supone ningún consumo de electricidad ni emisiones dado que no se disponen de datos reales y las particularidades de los clientes son muy variables en cuanto al uso de diferentes mecanismos de descarga. No obstante, este gasto energético sería el mismo en ambos casos o incluso más reducido para la placa de yeso-PU dado su menor peso.

En cuanto al proceso de instalación de placas, los prefabricados embalados y recepcionados son los mismos que posteriormente se colocan. Se considera la misma perfilera primaria y secundaria y accesorios de anclaje para ambos modelos, aunque es muy posible que el modelo más innovador requiera de menor perfilera o más ligera dado su mejor peso. Los residuos generados procedentes de los embalajes se corresponden con las mismas cantidades utilizadas en el proceso de fabricación de embalaje detallados en la Tabla 9.5.

A9.2.6.Uso (B1)

Se estima que la vida útil es de 30 años para ambos modelos de placa, ya que la diferencia que pudiera haber entre éstos no es significativa en comparación con la vida útil del edificio.

Como resultado de las pruebas de campo se determina que no es posible llevar a cabo un cálculo objetivo de la cuantificación de las entradas de combustible consumido en los sistemas de climatización ni de las emisiones de gases a la atmósfera, ya que el cálculo de todos estos parámetros depende, no sólo de las propiedades de las placas en estudio, sino de otros factores como el resto de cerramientos que forman la envolvente térmica del edificio, el tipo de combustible empleado en cada caso, el régimen de uso, la temperatura y humedad de confort establecidas, las condiciones climáticas externas, etc. Tampoco se pueden cuantificar los parámetros relativos al aislamiento acústico pues van a depender de nuevo, no sólo de las placas instaladas, sino también del resto de paramentos.

Finalmente, no es posible establecer una cuantificación de las entradas y salidas de esta fase, por lo que a efectos del presente ACV su contribución a las categorías de impacto estudiadas se considera nula.

A9.2.7.Desmontaje o demolición (C1)

En este proceso se considera como entrada las placas instaladas y como salida las placas retiradas.

Al igual que sucede en el proceso de montaje, no se tienen datos reales de esta fase dada la variedad de equipos que pueden ser utilizados para el desmontaje de los prefabricados, la perfilera y los

accesorios. En cuanto a la generación de residuos procedente de la retirada de las placas, éstos se detallan en la Tabla 9.11.

	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Residuos de placas (Kg/m²)	9,925 (±5 %)	7,109 (±5 %)

Tabla 9.11. Residuos del proceso de desmontaje o demolición

A9.2.8. Transporte (C2)

Las entradas a este proceso son las placas retiradas del proceso anterior y el combustible del transporte. Las salidas son de nuevo el residuo y las emisiones de gases debidas al consumo de combustible.

A nivel de gestión de residuos, se establece que la distancia media a vertedero para el transporte de los residuos de ambos modelos una vez retirados es de 50 Km.

De esta manera, se estima un consumo de gasóleo de 0,0079 L/m² para la placa estándar y de 0,0073 L/m² para la placa de yeso-PU.

En cuanto al sistema de gestión del residuo, investigaciones previas demuestran la posibilidad de reciclar placas de yeso con residuos poliméricos¹³, al igual que se demuestra en el presente documento con la placa de yeso-PU, sin embargo, ambos estudios se desarrollan a nivel de laboratorio y se desconoce la existencia de empresas que lo lleven a cabo a escala industrial. En consecuencia, se omite la recuperación, reciclado y valorización del producto al final de su ciclo de vida.

A9.2.9. Ciclo de vida (A1-C2)

Los inventarios de ciclo de vida según el sistema de producto para la placa de techo de yeso estándar y la placa de techo de yeso-PU se muestran en las Figura 9.2 y Figura 9.3, respectivamente. Esta infografía recoge un resumen de los datos y cálculos desarrollados.

¹³ Alameda, L., Calderón, V., Gadea, J., & Gutiérrez-González, S. (2015). Reciclado de placas de yeso laminado aligeradas con residuos de poliuretano = Recycling of gypsum plasterboard lightened with polyurethane waste. *Anales de Edificación*, 1(1), 33. <https://doi.org/10.20868/ade.2015.3037>

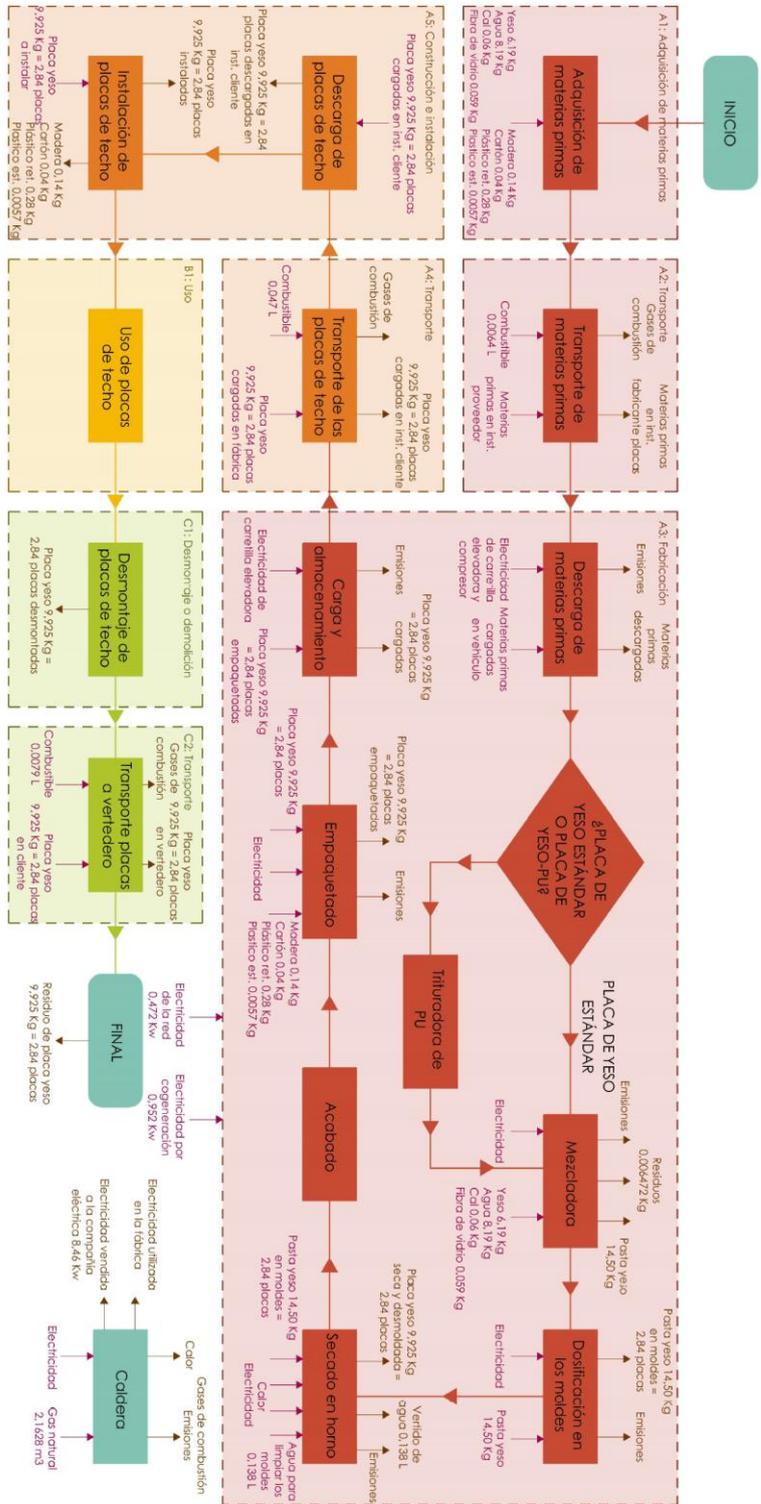


Figura 9.2. Inventario de ciclo de vida de la placa de techo de yeso estándar según el sistema de producto

A9.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) e interpretación

La EICV se realiza a partir de los datos obtenidos en la fase de ICV y con ayuda del software de análisis de ACV SimaPro.

La Tabla 9.12 incluye los resultados obtenidos referenciados a la unidad funcional, de forma que de su análisis se pueda concluir que modelo de placa presenta un mejor desempeño en cada categoría de impacto analizada.

La fase de fabricación (A3) de las placas de yeso-PU representa el 91 % de las emisiones de CO₂ de calentamiento global (GWP), el 85 % de la categoría de acidificación del suelo y del agua (AP) y del potencial de eutrofización (EP), el 93 % del agotamiento de recursos abióticos de elementos (ADPE), el 91 % del agotamiento de recursos abióticos de combustibles fósiles (ADPF) y el uso de energía primaria no renovable (PENRE) y el 100 % del uso neto de recurso de agua dulce (FW) y la energía exportada (EE).

En la categoría de impacto de formación de ozono fotoquímico (POCP) y materiales para el reciclaje (MFR) es la fase construcción con un 37 % y 96 %, respectivamente, la que muestra un impacto más relevante.

En cuanto a los residuos no peligrosos eliminados/vertidos (NHWD) la fase de fin de vida representa el 97%.

Por otra parte, los procesos de transporte (A2, A4 y C2) tienen una relevancia significativa. Para la placa de yeso-PU, las emisiones debidas a los vehículos representan el 3 % de las emisiones de CO₂ de calentamiento global (GWP), el 15 % de la categoría de acidificación del suelo y del agua (AP) y del potencial de eutrofización (EP), el 72 % en la formación de ozono fotoquímico (POCP), el 7 % del agotamiento de recursos abióticos de elementos (ADPE), el 3 % del agotamiento de recursos abióticos de combustibles fósiles (ADPF) y uso de energía primaria no renovable (PENRE) y el 97% de los residuos no peligrosos eliminados/vertidos (NHWD). Estos valores son ligeramente superiores a los del modelo estándar, principalmente debido al transporte de materias primas entre las que se encuentra el residuo de poliuretano.

A nivel medioambiental, la incorporación de residuo de poliuretano en el prefabricado de yeso implica una reducción en la cantidad de materias primas demandadas, el uso de conglomerante se reduce en un 32 % y el del agua en un 25 % con respecto al modelo tradicional. También desciende el consumo de energía en un 14% dado que precisa un menor tiempo de secado. La reducción del peso de la placa conlleva un menor consumo de combustible en el transporte del prefabricado. Por otro lado, surgen procesos nuevos que acarrearán impactos como el transporte del residuo de poliuretano y del aditivo y el proceso de trituración.

Categoría de impacto (Clave)	Tipo de placa	Etapas del ciclo de vida									
		A1	A2	Tritur. PU	A3	A4	A5	B1	C2	A1-C4	
GWP (Kg CO₂ eq)	Estándar	0,468	0,016	0,00	5,866	0,118	0,00	0,00	0,02	6,488	
	Yeso-PU	0,320	0,083	0,163	4,911	0,086	0,00	0,00	0,018	5,581	
AP (Kg SO₂ eq)	Estándar	-	1,77 · 10 ⁻⁵	0,00	1,52 · 10 ⁻³	1,30 · 10 ⁻⁴	0,00	0,00	2,18 · 10 ⁻⁵	1,68 · 10⁻³	
	Yeso-PU	-	9,19 · 10 ⁻⁵	0,00	1,30 · 10 ⁻³	1,22 · 10 ⁻⁴	0,00	0,00	2,02 · 10 ⁻⁵	1,53 · 10⁻³	
EP (Kg (PO₄)³⁻ eq)	Estándar	-	0,33 · 10 ⁻⁵	0,00	2,81 · 10 ⁻⁴	2,42 · 10 ⁻⁵	0,00	0,00	4,06 · 10 ⁻⁶	3,12 · 10⁻⁴	
	Yeso-PU	-	1,71 · 10 ⁻⁵	0,00	2,41 · 10 ⁻⁴	2,26 · 10 ⁻⁵	0,00	0,00	3,76 · 10 ⁻⁶	2,85 · 10⁻⁴	
POCP (Kg C₂H₂ eq)	Estándar	-	0,68 · 10 ⁻⁶	0,00	4,00 · 10 ⁻⁶	5,02 · 10 ⁻⁶	0,00	0,00	8,42 · 10 ⁻⁷	1,05 · 10⁻⁵	
	Yeso-PU	-	3,55 · 10 ⁻⁶	0,00	3,51 · 10 ⁻⁶	4,70 · 10 ⁻⁶	0,00	0,00	7,80 · 10 ⁻⁷	1,25 · 10⁻⁵	
ADPE (Kg Sb eq)	Estándar	2,7 · 10 ⁴	0,0024	0,00	0,4644	0,0174	0,00	0,00	2,90 · 10 ⁻³	0,48737	
	Yeso-PU	1,9 · 10 ⁴	0,0123	0,00	0,3984	0,0163	0,00	0,00	2,70 · 10 ⁻³	0,42989	
ADPF (MJ)	Estándar	6,730	0,2278	0,00	85,168	1,6727	0,00	0,00	0,2812	94,0797	
	Yeso-PU	4,599	1,1816	1,692	72,089	1,2457	0,00	0,00	0,2598	81,0671	

Categoría de impacto (Clave)	Tipo de placa	Etapas del ciclo de vida									
		A1	A2	Tritur. PU	A3	A4	A5	B1	C2	A1-C4	
PENRE (MJ)	Estándar	6,73	0,2278	0,00	85,168	1,6727	0,00	0,00	0,2812	94,0797	
	Yeso-PU	4,599	1,1816	1,692	72,089	1,2457	0,00	0,00	0,2598	81,0671	
FW (L)	Estándar	-	0,00	0,00	0,00	8,328	0,00	0,00	0,00	8,328	
	Yeso-PU	-	0,00	0,00	0,00	6,228	0,00	0,00	0,00	6,228	
NHWD (Kg)	Estándar	-	0,00	0,00	0,00647	0,00	0,2137	0,00	9,925	10,1452	
	Yeso-PU	-0,35	0,00	0,00	0,00886	0,00	0,2137	0,00	7,109	6,9816	
MFR (Kg)	Estándar	-	0,00	0,00	0,00647	0,00	0,2137	0,00	0,00	0,2202	
	Yeso-PU	-	0,00	0,00	0,00886	0,00	0,2137	0,00	0,00	0,2226	
EE (MJ)	Estándar	-	0,00	0,00	30,458	0,00	0,00	0,00	0,00	30,458	
	Yeso-PU	-	0,00	0,00	23,832	0,00	0,00	0,00	0,00	23,832	

Tabla 9.12. Resultados obtenidos en la fase de EICV del análisis de ciclo de vida

La Figura 9.4 muestra la contribución de las fases del ciclo de vida a cada categoría de impacto.

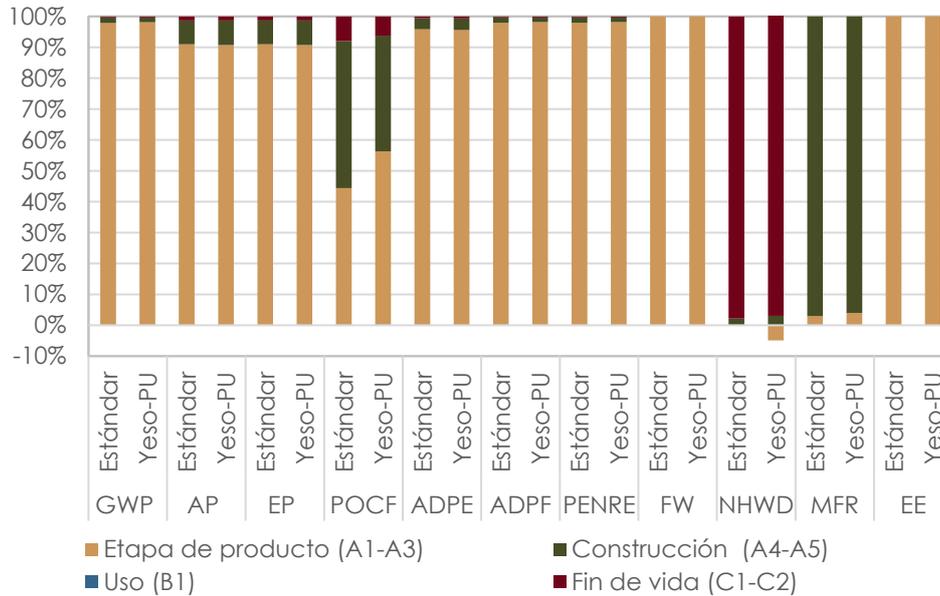


Figura 9.4. Contribución de las fases de ciclo de vida a cada categoría de impacto de la placa de techo de yeso estándar y la placa de techo de yeso-PU

Se observa que la implicación de cada fase es muy similar en ambos modelos para todas las categorías, con excepción de la categoría de formación de ozono fotoquímico (POCF) en la que la fase de producto tiene un mayor peso en la placa de yeso-PU.

La etapa de producto, que incluye la adquisición y transporte de materias primas y la fabricación de las placas, genera el mayor impacto ambiental en 9 de las 11 categorías analizadas.

La fase de uso carece de impactos dado el carácter pasivo de los materiales evaluados dentro del edificio. Además, para el tiempo de vida útil establecido no precisan de tareas de mantenimiento o conservación.

La Tabla 9.13 muestra un resumen de los resultados totales para cada una de las categorías de impacto, así como el porcentaje de diferencia entre ambos modelos usando como referencia la placa estándar.

Categoría de impacto	Unidad	Tipo de placa	Total	Diferencia (%)
Impactos por emisiones				
Calentamiento global (GWP)	Kg CO ₂ eq	Estándar	6,488	-13,98
		Yeso-PU	5,581	
Acidificación del suelo y del agua (AP)	Kg SO ₂ eq	Estándar	1,68 · 10 ⁻³	-8,93
		Yeso-PU	1,53 · 10 ⁻³	
Eutrofización (EP)	Kg (PO ₄) ³⁻ eq	Estándar	3,12 · 10 ⁻⁴	-8,65
		Yeso-PU	2,85 · 10 ⁻⁴	
Formación de ozono fotoquímico (POCP)	Kg C ₂ H ₂ eq	Estándar	1,05 · 10 ⁻⁵	19,05
		Yeso-PU	1,25 · 10 ⁻⁵	
Agotamiento de recursos abióticos (ADP-elementos) (ADPE)	Kg Sb eq	Estándar	0,48737	-11,79
		Yeso-PU	0,42989	
Agotamiento de recursos abióticos (ADP-combustibles fósiles) (ADPF)	MJ	Estándar	94,0797	-13,83
		Yeso-PU	81,0671	
Impactos por uso de recursos				
Uso total de energía primaria no renovable excluyendo recursos utilizados como materia prima (PENRE)	MJ	Estándar	94,0797	-13,83
		Yeso-PU	81,0671	
Uso neto de recursos de agua dulce (FW)	L	Estándar	8,328	-25,22
		Yeso-PU	6,228	
Impactos por residuos generados				
Residuos no peligrosos eliminados/vertidos (NHWD)	Kg	Estándar	10,1452	-31,18
		Yeso-PU	6,9816	
Impacto por otros flujos de salida				
Materiales para el reciclaje (MFR)	Kg	Estándar	0,2202	1,08
		Yeso-PU	0,2226	
Energía exportada (EE)	MJ	Estándar	30,458	-21,75
		Yeso-PU	23,832	

Tabla 9.13. Comparativa entre los resultados totales de placa de techo de yeso estándar y la placa de techo de yeso-PU

En base a los resultados del análisis comparativo se puede afirmar que hay importantes diferencias en el comportamiento de los dos modelos estudiados en cuanto a la cuantificación de las categorías de

impacto. Se identifica una menor contribución de la placa de yeso-PU en 8 de las categorías de impacto estudiadas y un mejor comportamiento de la placa de yeso estándar en las 3 restantes.

La categoría de energía exportada (EE) tiene una connotación o interpretación contraria al resto, es decir, cuanto mayor sea el valor resultante mejor es el rendimiento ambiental.

A continuación, se analiza en detalle cada una de las categorías, pudiendo observarse que no todas las diferencias detectadas son cuantitativamente igual de importantes:

- Calentamiento global: la placa de yeso-PU presenta una importante reducción de emisiones de CO₂ del 13,98 % con respecto al modelo estándar, a pesar del transporte de poliuretano a mayores. Esta diferencia se debe a dos motivos, el menor consumo de gas natural necesario en el proceso de secado y el menor consumo de combustible para el transporte, tanto del producto final como del residuo generado al final de su vida útil.
- Acidificación del suelo y agua: la placa de yeso-PU presenta un porcentaje de reducción del 8,93 % de emisiones de SO₂ eq respecto al prefabricado estándar y se debe al menor consumo de gas natural y de combustible para el transporte. Este dato se considera importante pero no significativo dadas las órdenes de magnitud de los resultados.
- Eutrofización: los valores obtenidos de Kg (PO₄)³⁻ eq para la placa de yeso-PU son un 8,65 % inferiores a los del modelo estándar, por las mismas razones mencionadas en los dos apartados anteriores.
- Formación de ozono fotoquímico: el modelo innovador presenta un impacto mayor del 19,05 % que la placa de yeso estándar, ya que esta categoría está fuertemente condicionada por las emisiones del transporte, teniendo una menor repercusión las emisiones procedentes de la combustión de gas natural.
- Agotamiento de recursos abióticos (ADP-elementos): se observa una importante reducción del 11,79 % en los valores obtenidos para la placa de yeso-PU que principalmente se debe al menor requerimiento de materias primas reduciendo así la demanda de recursos abióticos.

- Agotamiento de recursos abióticos (ADP-combustibles fósiles): la demanda de energía para la fabricación de la placa de yeso-PU se reduce en un 13,83 % con respecto a la placa estándar. Esta disminución se debe a la menor demanda de energía en el proceso de secado y en el transporte del producto acabado y del residuo de placas al final de su vida útil.
- Uso de energía primaria no renovable excluyendo recursos utilizados como materia prima: el análisis es el mismo que para la categoría de impacto de agotamiento de recursos abióticos (ADP-combustibles fósiles).
- Uso neto de agua dulce: los datos obtenidos son favorables a la placa de yeso-PU que en su elaboración demanda un 25,22 % menos de agua con respecto a la placa de yeso estándar.
- Residuos no peligrosos eliminados/vertidos: los residuos generados por la placa de yeso-PU se reducen en un 31,18 % frente al modelo tradicional. Esta diferencia se debe al reciclaje del residuo de poliuretano y a la menor generación de desechos en términos de masa.
- Materiales para el reciclaje: la placa de yeso estándar genera un 1,08 % menos de este tipo de materiales, principalmente debido a los sacos de cal que se emplean en mayor proporción en la placa de yeso-PU.
- Energía exportada: la placa de yeso estándar exporta un 21,75 % más de energía que el nuevo modelo de placa. Este prefabricado precisa una mayor cantidad de energía en el proceso de secado, lo que implica un aumento de la producción de energía en el proceso de cogeneración y posterior venta.

En la Figura 9.5 se representan los resultados obtenidos de cada modelo de placa en las 11 categorías de impacto analizadas. En algunos casos, los datos se multiplican por potencias de diez para conseguir un rango uniforme en el orden de magnitud y poder incluirlas en el mismo análisis.

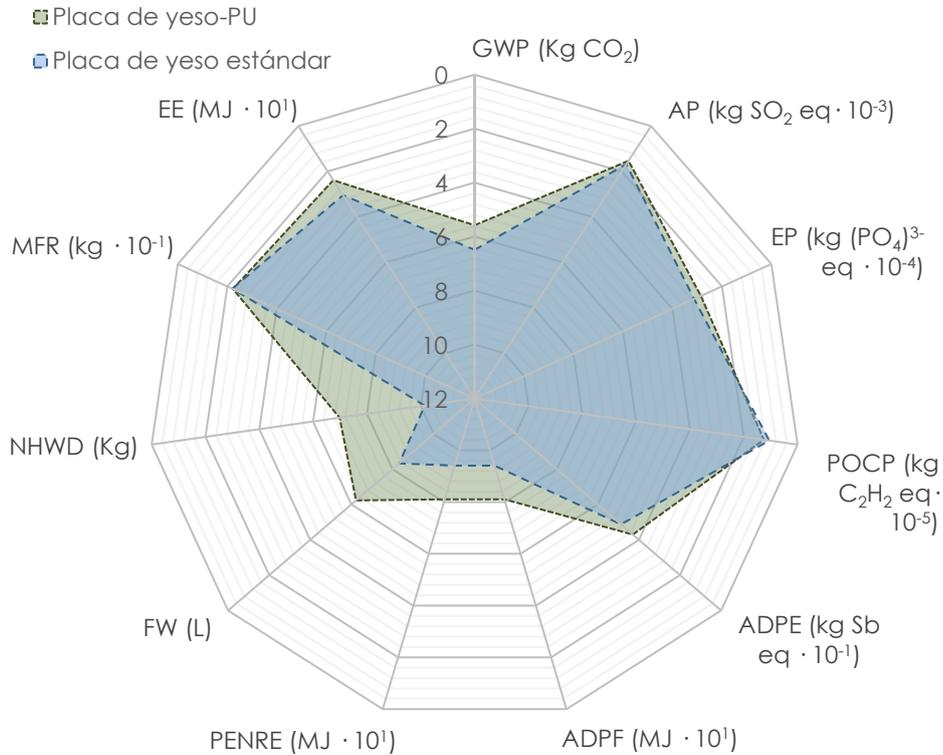


Figura 9.5. Impacto ambiental total para cada categoría de impacto de la placa de techo de yeso estándar y la placa de techo de yeso-PU

El prefabricado con mayor superficie de polígono es aquel que presenta un mejor desempeño medioambiental, dado el orden inverso del eje central. Analizando todas las categorías de impacto y otorgándolas el mismo peso el modelo de placa de yeso-PU resulta ser la más respetuosa con la naturaleza de entre las evaluadas.

A9.4. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos del análisis ambiental comparativo de ambos modelos y una vez analizados los resultados de todas las categorías de impacto, se concluye que la placa de yeso-PU presenta un comportamiento ambiental más favorable que el modelo estándar.

El nuevo prefabricado presenta mejoras en la mayor parte de las categorías de impacto, algunas de ellas sustanciales y significativas

(calentamiento global, agotamiento de recursos abióticos (ADP-elementos y ADP-combustibles fósiles), uso neto de aguadulce y residuos no peligrosos eliminados/vertidos). La relevancia de cada categoría de impacto se evalúa según el orden de magnitud de los resultados obtenidos.

De todas las fases del ciclo de vida analizadas, la etapa de producto (A1-A3) y especialmente la de producción (A3) son las de mayor contribución en 9 de las 11 categorías de impacto evaluadas.

La incorporación de residuo de poliuretano resulta positiva a nivel medioambiental en cuanto a la reducción de la cantidad de yeso y agua de la mezcla y al menor consumo de energía por su menor tiempo de secado. Por el contrario, introduce nuevos impactos debidos al transporte del polímero y del aditivo y al proceso de trituración del residuo de poliuretano.

Reducir la distancia de transporte del residuo de poliuretano, buscando un proveedor más próximo a la planta de fabricación, supondría una mejora significativa en los resultados del ACV de la placa de yeso-PU.

ANEXO 10. ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA

A10.1. Definición del objetivo y alcance del estudio

El propósito de este CCV es cuantificar y realizar una aseveración comparativa en cuanto al rendimiento económico de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU.

El público previsto para este estudio es la comunidad científica, el fabricante de los prefabricados analizados y los clientes o consumidores de dichos productos.

A10.1.1. Alcance del estudio

En el presente estudio se tienen en cuenta todos los procesos considerados en el sistema de producto, el cual se realiza teniendo en cuenta el sistema de producción habitual a nivel industrial de las placas para techo suspendido.

Los procesos evaluados, así como, el sistema de producto son los mismos que para el ACV de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU (Figura 9.1).

A10.1.2. Unidad funcional

La unidad funcional seleccionada es "1 m² de revestimiento de placa de yeso de 15 mm de espesor".

Los flujos de referencia de cada análisis son 1 m² de placa de yeso estándar de 15 mm para el caso del modelo tradicional y 1 m² de placa de yeso-PU de 15 mm de espesor para el nuevo modelo.

A10.1.3. Límites del sistema

Las fases del ciclo de vida consideradas en el análisis financiero son el suministro y transporte de materias primas, el proceso de fabricación del producto, el transporte hasta el cliente, el uso del y el fin de vida.

El tipo de CCV realizado es de la "cuna a la tumba" (Tabla 10.1).

Etapas de producto	A1	Suministro de materias primas	X
	A2	Transporte a fábrica	X
	A3	Fabricación	X
Construcción	A4	Transporte a obra	MNE
	A5	Instalación / Construcción	MNE
Uso	B1	Uso	NR
	B2	Mantenimiento	MNE
	B3	Reparación	MNE
	B4	Sustitución	MNE
	B5	Rehabilitación	MNE
	B6	Uso de energía en servicio	MNE
	B7	Uso de agua en servicio	MNE
Fin de vida	C1	Deconstrucción / Demolición	MNE
	C2	Transporte	X
	C3	Tratamiento de los residuos	MNE
	C4	Eliminación	MNE
	D	Potencial de reutilización, recuperación y/o reciclaje	MNE

X = módulo incluido; NR = módulo no relevante; MNE: módulo no evaluado

Tabla 10.1. Módulos de información considerados en el análisis de costes de ciclo de vida

Los límites geográficos se acotan a la ubicación del centro de fabricación y a las distancias de transporte de las materias primas y al vertedero.

Los límites temporales son 2018, 2019 y 2020, momento en el que se realiza la toma de datos.

A10.1.4. Requisitos de calidad de los datos

Los datos de costes de los procesos de entrada y salida del sistema necesarios para llevar a cabo en análisis económico son proporcionados por el fabricante de ambos modelos de placas y proceden de su experiencia.

A10.1.5. Metodología de evaluación de impacto

La evaluación se lleva a cabo con ayuda de una hoja de cálculo.

A diferencia del ACV, en el CCV no existen diferentes metodologías de evaluación.

A10.1.6. Categorías de impacto

Se cuantifica una única categoría de impacto llamada costes del ciclo de vida y cuya unidad de medida es el euro (€).

A10.2. Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV)

A continuación, se describen los flujos de costes de los procesos implicados en cada una de las etapas del ciclo de vida incluidas en el estudio financiero.

A10.2.1. Adquisición de materias primas (A1) y transporte (A2)

Los datos proporcionados por el fabricante se presentan de forma global para el coste de adquisición del producto y su transporte, razón por lo que ambas etapas se agrupan a la hora de hacer el inventario.

Las entradas económicas de las fases A1 y A2 del ciclo de vida son los costes de adquisición de las materias primas y de su transporte hasta la planta de fabricación (Tabla 10.2).

La cantidad de materia prima y de embalaje viene determinada por la unidad funcional establecida. Se tienen en cuenta los proveedores habituales de la fábrica.

El coste de adquisición del residuo de poliuretano es nulo, éste presenta un valor negativo debido a las tasas de vertedero evitadas, es decir, el ahorro económico que supone su valorización.

El agua procede de la red municipal por lo que el coste asignado se debe únicamente al suministro, sin transporte.

	Cantidad (Kg/m ²)		Coste (€/Kg)
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU	
Materias Primas			
Yeso	6,190	4,230	0,0414
Poliuretano	-	0,350	-0,16
Transporte poliuretano	-	0,350	0,219
Agua	8,190	6,090	1,76 · 10 ⁻⁶
Fibra de vidrio	0,059	0,059	1,55
Aditivo fluidificante	-	0,0408	1,083
Cal	0,060	0,250	0,00
Embalaje			
Pallet de madera	0,140	0,140	0,357
Cartón	0,040	0,040	2,500
Plástico retráctil	0,028	0,028	1,560
Plástico estirable	0,0057	0,0057	1,720

Tabla 10.2. Flujos económicos de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional en las fases A1 y A2 del ciclo de vida

A10.2.2. Fabricación (A3)

Los costes relativos a la fase de fabricación se dividen en dos tipos: costes directos variables y costes directos fijos. Los primeros son proporcionales al volumen de producción, mientras que los segundos son costes fijos independientes del nivel de fabricación.

Los costes directos variables están relacionados con el consumo de energía (eléctrica, fósil u otros), la mano de obra, el transporte interno y el almacenamiento de los productos.

Los flujos económicos derivados del procesamiento previo del residuo de poliuretano se imputan exclusivamente a la placa de yeso-PU.

Se asumen las mismas consideraciones relativas a la producción de energía con el sistema de cogeneración y al consumo de gas que en el ACV. En resumen, La placa de yeso-PU consume un 14,21 % menos de gas dado que el tiempo de secado es un 20 % inferior al de la placa de yeso tradicional. La cantidad de energía producida por el sistema de

cogeneración para el nuevo modelo es un 14,21 % inferior con respecto al prefabricado tradicional, proporcional al volumen de gas utilizado.

La Tabla 10.3 incluye los flujos del sistema y sus costes considerados costes directos variables en la etapa de fabricación.

	Cantidad		Coste (€/Kwh) (€/h) (€/L)
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso- PU	
Costes directos variables			
Energía eléctrica P. Trituración (Kwh/m²)	-	0,470	0,150
Mano de obra P. Trituración (h/m²)	-	1,40 · 10 ⁻³	18,480
Energía eléctrica P. Secado (Kwh/m²)	25,305	21,709	0,01795
Energía eléctrica P. Fabricación (Kwh/m²)	0,472	5,77 · 10 ⁻³	0,150
Mano de obra P. Fabricación (h/m²)	0,013	0,013	18,480
Combustible transporte interno (L/m²)	0,047	0,035	0,390
Servicio de transporte interno (€/m²)	0,182	0,182	-

Tabla 10.3. Costes directos variables de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional en la fase A3 del ciclo de vida

Los costes directos fijos se deben a la maquinaria, terrenos, edificios, entre otros. El criterio de asignación utilizado consiste en imputar estos flujos económicos a la unidad funcional (m²) de forma que se repartan los costes de los activos entre la capacidad máxima de producción de cada modelo de placa.

La producción máxima de la placa de yeso estándar se sitúa en 595.521 m² al año mientras que la del prefabricado de yeso-PU es de 744.401 m² al año. La capacidad de producción del nuevo modelo es un 25 % superior a la del modelo tradicional, debido a que el proceso limitante del sistema de producción es la fase de secado donde el tiempo de permanencia del nuevo prefabricado se reduce en un 20 %.

La Tabla 10.4 incluye los flujos del sistema y sus costes considerados costes directos fijos en la etapa de fabricación.

	Coste total (€)	Amortización (años)	Coste (€/m ²)	
			Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Líneas de producción	6.465.861,00	30	0,362	0,290
Equipamiento extra	210.219,00	8	0,000	0,035
Elementos de transporte	46.048,00	8	0,010	0,008
Fábrica	911.861,00	33	0,046	0,037
Instalaciones nuevas	192.698,00	33	0,010	0,008
Informática	155.162,06	4	0,065	0,052
Otros activos	71.024,36	10	0,012	0,010

Tabla 10.4. Costes directos fijos de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional en la fase A3 del ciclo de vida

Por equipamiento extra se entiende a la maquinaria necesaria para adaptar la línea de producción habitual para incorporar el residuo de poliuretano en las pastas.

A10.2.3. Transporte (A4) y construcción e instalación (A5)

Establecer un coste de transporte e instalación de las placas resulta de gran dificultad dada la variedad de posibilidades que existen en cuanto al proceso comercial, distancia de transporte, sistema de descarga y colocación por parte del cliente.

Dado que se trata de una evaluación comparativa y ambos modelos tendrían los mismos costes comerciales y de distribución, no se consideran en ninguno de los dos productos los costes relacionados con la fase de transporte e instalación.

Un estudio en profundidad podría confirmar que el nuevo prefabricado requiere de una estructura más ligera y un menor consumo energético en cuanto a su descarga e instalación dada la diferencia de peso respecto al modelo tradicional. Estas mejoras implicarían un menor coste en estas etapas del ciclo de vida, sin embargo, no se tienen en cuenta en la evaluación dado que no existen datos fehacientes y concretos que respalden dicha afirmación.

A10.2.4. Uso (B1)

Se estima que la vida útil de ambos productos es de 30 años.

Varios ensayos demuestran un comportamiento térmico mejorado del modelo de placa de yeso-PU. Su conductividad térmica se reduce en un 26,7 % con la incorporación del poliuretano reciclado, por lo que el edificio que utilice este producto debería experimentar una reducción del consumo energético manteniendo las mismas condiciones de confort deseadas. Sin embargo, su influencia puede ser mínima dado que en la demanda energética influyen otros muchos factores como el resto de materiales que conforman la envolvente térmica, el tipo de combustible empleado, el uso específico del edificio, etc.

Finalmente, no es posible cuantificar el ahorro asociado a esta medida y, por lo tanto, la contribución de la fase de uso a la categoría de impacto estudiada se considera nula.

A10.2.5. Desmontaje o demolición (C1)

En esta fase de desmontaje o demolición resulta altamente complejo estimar el procedimiento habitual y asignar un coste a este proceso dada la variabilidad de equipamientos y sistemas disponibles para proceder con esta tarea.

En todo caso, ambos modelos tendrían el mismo coste de ejecución en el proceso por lo que no considerar flujos económicos en esta fase no afecta en la evaluación comparativa.

A10.2.6. Transporte (C2)

La distancia media al vertedero para el transporte de los residuos es de 50 km. La Tabla 10.5 recoge los flujos de costes de esta fase.

	Cantidad		Coste (€/L)
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU	
Combustible transporte (L/m²)	$7,90 \cdot 10^{-3}$	$7,30 \cdot 10^{-3}$	0,390
Transporte (€/m²)	0,097	0,097	-

Tabla 10.5. Flujos económicos de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional en la fase C2 del ciclo de vida

A10.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) e interpretación

Los resultados obtenidos de la evaluación financiera de los tipos de prefabricados en la fase adquisición de materias primas y su transporte hasta la planta de fabricación de las placas se muestran en la Tabla 10.6.

	Coste (€/m ²)	
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Materias primas	0,348	0,332
Yeso	0,257	0,175
Poliuretano	-	-0,056
Transporte poliuretano	-	0,077
Agua	$1,44 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$
Fibra de vidrio	0,091	0,091
Aditivo fluidificante	-	0,044
Cal	-	-
Embalaje	0,204	0,204
Pallet de madera	0,050	0,050
Cartón	0,100	0,100
Plástico retráctil	0,044	0,044
Plástico estirable	0,010	0,010
Total A1 + A2	0,552	0,535

Tabla 10.6. Evaluación económica de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional en las fases A1 y A2 del ciclo de vida

Los resultados muestran una reducción de costes del 2,98 % en la adquisición y transporte de materias primas en el modelo de yeso-PU con respecto a la placa de yeso estándar.

El análisis en profundidad de los datos revela que el cambio más notable en su coste lo experimentan los procesos de adquisición y transporte del yeso, del residuo de poliuretano y del aditivo, debido a la proporción en que se incorporan en cada modelo. Los costes derivados de la incorporación de polímero y aditivo se ven compensados con la reducción en el consumo de yeso (32 %) en el modelo más innovador, el balance final presenta un ligero ahorro económico. Los costes de adquisición y transporte del embalaje son los mismos en ambos modelos.

La Tabla 10.7 incluye la evaluación económica de la etapa de fabricación (A3).

	Coste (€/m ²)	
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Costes directos variables	0,971	0,928
Energía eléctrica P. Trituración	-	0,070
Mano de obra P. Trituración	-	0,026
Energía eléctrica P. Secado	0,454	0,390
Energía eléctrica P. Fabricación	0,071	0,001
Mano de obra P. Fabricación	0,246	0,246
Combustible transporte interno	0,018	0,014
Servicio de transporte interno	0,182	0,182
Costes directos fijos	0,505	0,439
Líneas de producción	0,362	0,290
Equipamiento extra	0,000	0,035
Otros elementos de maquinaria	0,010	0,008
Fábrica	0,046	0,037
Instalaciones nuevas	0,010	0,008
TI	0,065	0,052
Otros activos	0,012	0,010
Total A3	1,476	1,367

Tabla 10.7. Evaluación económica de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional en la fase A3 del ciclo de vida

Los costes directos variables son un 4,46 % más económicos para el prefabricado de yeso-PU. El proceso de trituración sólo es necesario en este modelo, sin embargo, su coste se ve contrarrestado por el ahorro económico en el consumo energético del secadero, el consumo de electricidad en el proceso de fabricación y el consumo de combustible en el transporte interno.

La diferencia económica más significativa entre ambas placas tiene lugar en el proceso de secado, debido a la reducción del 14,21 % del consumo de energía dado que el prefabricado transcurre un 20 % menos de tiempo en el horno.

El coste del combustible disminuye dada la reducción del 28 % del peso de este prefabricado con respecto a la placa de yeso estándar.

El coste de mano de obra y del servicio de transporte interno es el mismo para ambos productos.

En cuanto a los costes directos fijos aplicados a la fase de producto, estos son un 13,01 % inferiores para el caso de la nueva placa desarrollada.

La principal diferencia de equipamiento entre ambos prefabricados es la maquinaria adicional necesaria para el proceso de trituración e incorporación del residuo poliuretano en la línea de producción.

En este caso, resulta determinante la mayor capacidad de producción de la placa de yeso-PU ya que se reduce considerablemente la repercusión de costes directos fijos por unidad funcional.

Por último, la fase de producción en su totalidad, considerando tanto los costes directos variables como los fijos, es un 6,17 % menos costosa para el modelo innovador.

En cuanto a la etapa de instalación y construcción, no es posible contabilizar ni tener en cuenta los potenciales ahorros de costes adicionales debidos a la reducción de peso del nuevo prefabricado. Tampoco se cuantifican los debidos a la mejora del rendimiento térmico del material en la etapa de uso.

Los flujos económicos derivados del transporte en la etapa de final de vida se recogen en la Tabla 10.8.

	Coste (€/m ²)	
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Combustible transporte	3,08 · 10 ⁻³	2,85 · 10 ⁻³
Transporte	0,097	0,097
Total C2	0,10000	0,09977

Tabla 10.8. Evaluación económica de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional en la fase C2 del ciclo de vida

Se observa que el nuevo producto reduce ligeramente sus costes, consecuencia del descenso de peso.

Los resultados finales del coste de ciclo de vida considerando todas las fases analizadas se muestran en la Tabla 10.9.

	Coste (€/m ²)	
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
Total A1+A2	0,552	0,535
Total A3	1,476	1,367
Total A4+A5	-	-
Total B1	-	-
Total C1	-	-
Total C2	0,10000	0,09977
Coste de ciclo de vida	2,128	2,002

Tabla 10.9. Evaluación económica de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional del ciclo de vida completo

La incorporación de poliuretano reciclado en prefabricados de yeso para techos suspendidos desmontables conlleva un descenso del coste de ciclo de vida global del producto del 5,91 %.

La Figura 10.1 incluye una infografía con los flujos de costes totales de cada fase del ciclo de vida de ambos modelos de placa.

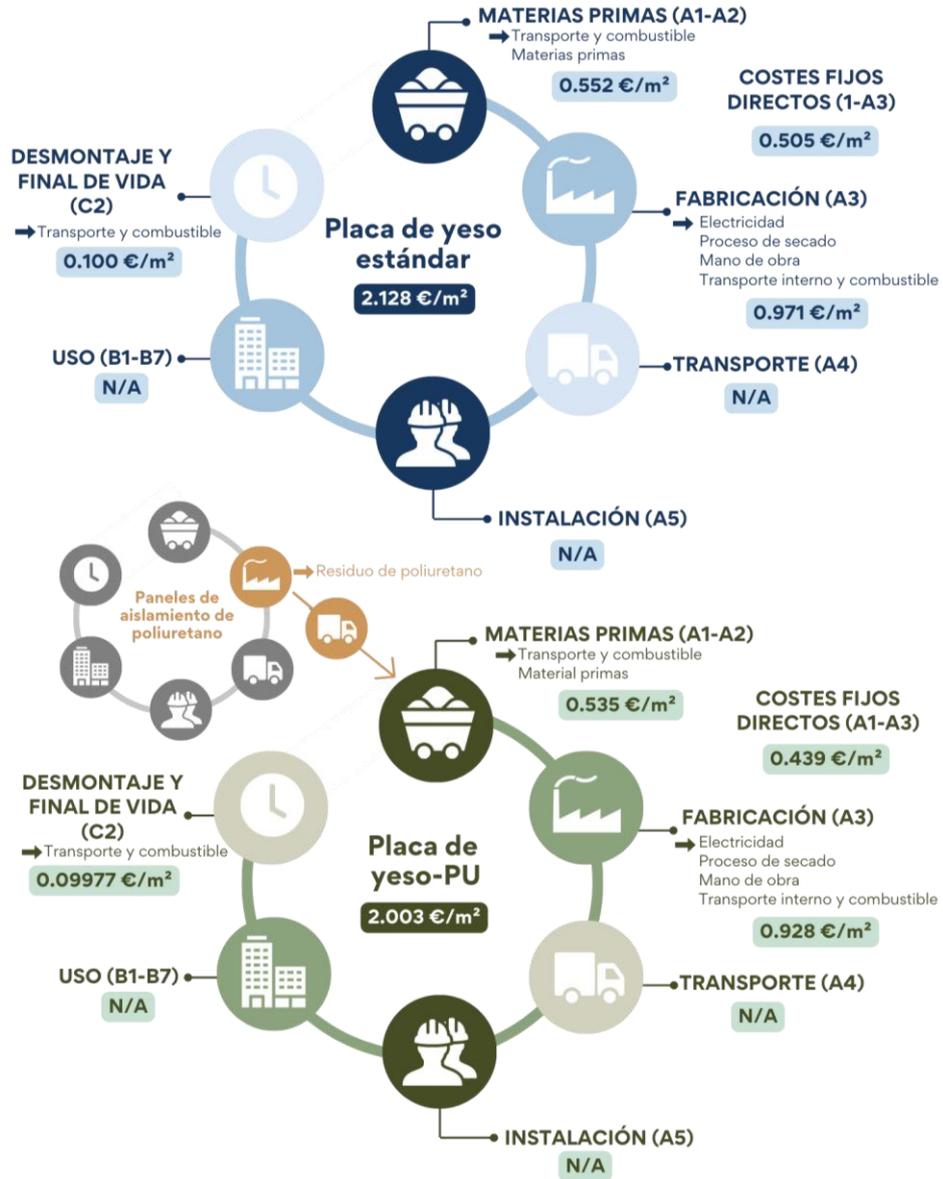


Figura 10.1. Flujos de costes de cada fase del ciclo de vida de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional

La etapa de producto (A1-A3) supone el 95 % del coste en ambos modelos. La subetapa de fabricación es la de mayor peso (Figura 10.2).

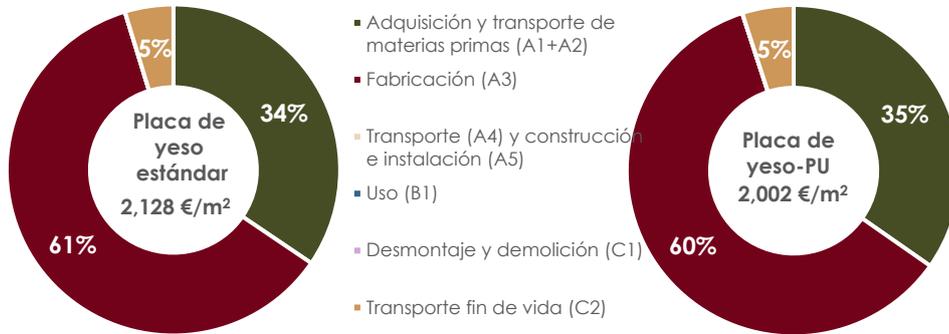


Figura 10.2. Influencia de cada fase del ciclo de vida en el coste global

La Figura 10.3 incluye los flujos económicos que modifican el coste del ciclo de vida del modelo estándar hacia el del modelo innovador. En los extremos se sitúan los costes totales de ambos prefabricados referidos a la unidad funcional. En el centro, se incluyen los materiales o procesos que provocan la diferencia económica final. En rojo se indican aquellos que suponen un aumento del coste del nuevo modelo frente al convencional y en verde los que implican una reducción.

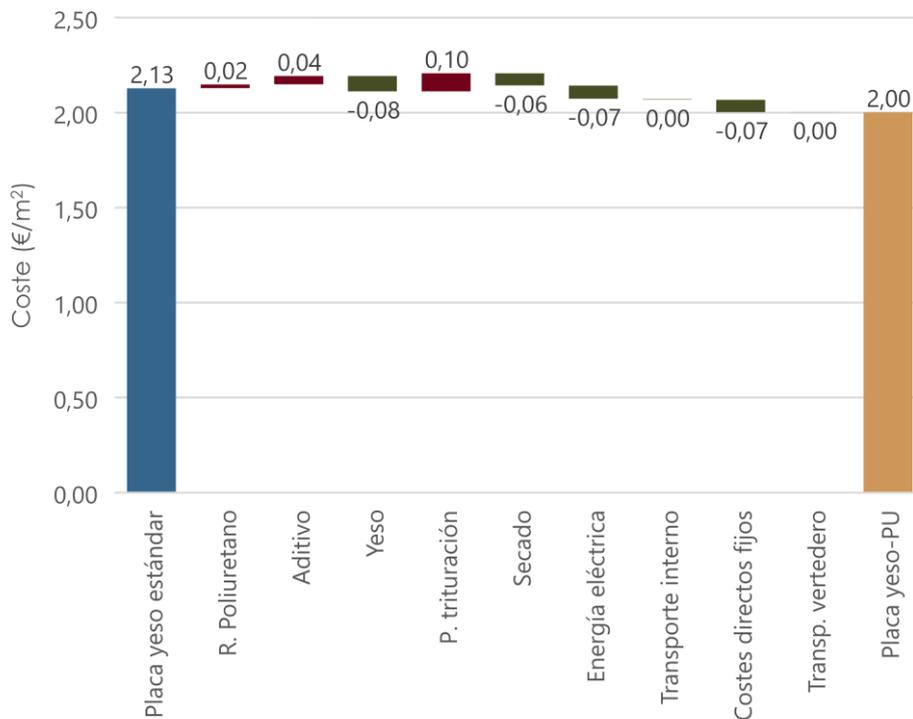


Figura 10.3. Flujos económicos de la evaluación financiera en los que difieren la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU

Los procesos que contribuyen a reducir el coste del nuevo modelo predominan frente a los que influyen en un aumento de su valor. Los más significativos son los costes de adquisición y transporte del yeso, el proceso de secado, el consumo de energía eléctrica durante la fabricación y los costes directos fijos. Por el contrario, son pocos los procesos que provocan un aumento de los costes, siendo el más relevante el proceso de trituración del polímero. La reducción global del coste de ciclo de vida se cuantifica en 0,13 €/m².

A10.4. Análisis de sensibilidad

En el CCV se identifican dos variables especialmente sensibles a modificaciones, es decir, una leve variación en éstas puede significar un impacto considerable en el resultado del indicador de costes global.

El primer parámetro es el coste relativo al transporte de los residuos de poliuretano. La segunda variable es el nivel de producción de placas. El análisis de sensibilidad que incluye ambas variables se muestra en la Figura 10.4.

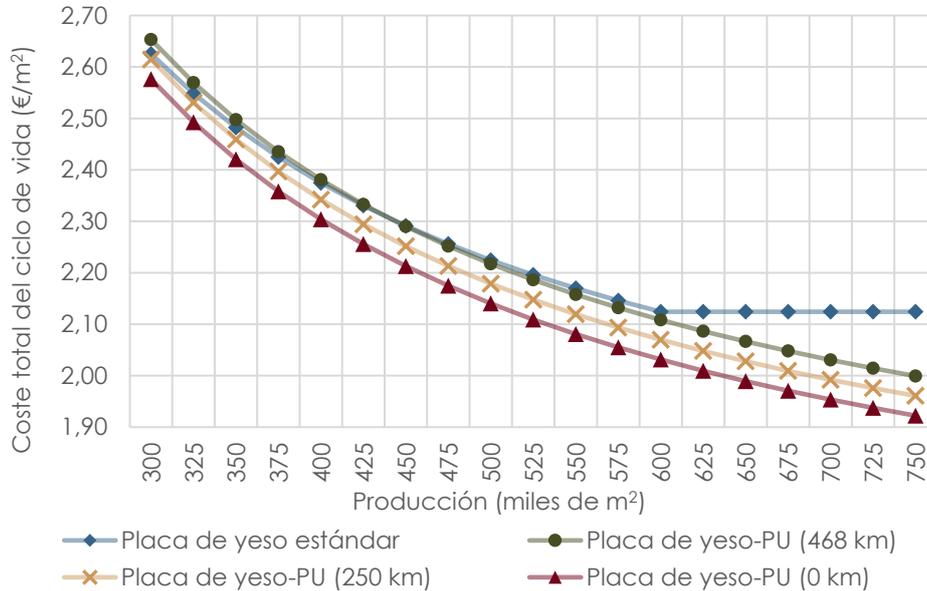


Figura 10.4. Evolución del coste del ciclo de vida de la unidad funcional en función de la distancia de transporte del poliuretano y del nivel de producción de placas

De este análisis de sensibilidad se concluye que:

- Para niveles de producción bajos (300.000 m²/año), el coste global de la placa yeso-PU es superior al de la placa de yeso estándar (2,63 €/m² frente a 2,60 €/m²) para la distancia actual. Sin embargo, en escenarios supuestos con una fuente de suministro de poliuretano más cercana (0 km), la situación cambia y es el nuevo prefabricado el que presenta un mejor rendimiento económico (2,58 €/m² frente a 2,60 €/m²).
- El coste por unidad funcional se iguala para niveles de producción de 400.000 m²/año. Ambos modelos cuestan 2,36 €/m², teniendo en cuenta la distancia actual de transporte del polímero.
- La mayor diferencia financiera se produce en niveles de producción superiores a 600.000 m²/año, la capacidad máxima de fabricación del modelo tradicional. El nuevo modelo tiene una capacidad de producción adicional (hasta 750.000 m²/año) con los mismos activos.

Se realiza un segundo análisis de sensibilidad con el propósito de evaluar en profundidad y en exclusiva la fase de producción, donde los costes directos fijos de la unidad funcional son muy sensibles al volumen de fabricación (Figura 10.5).

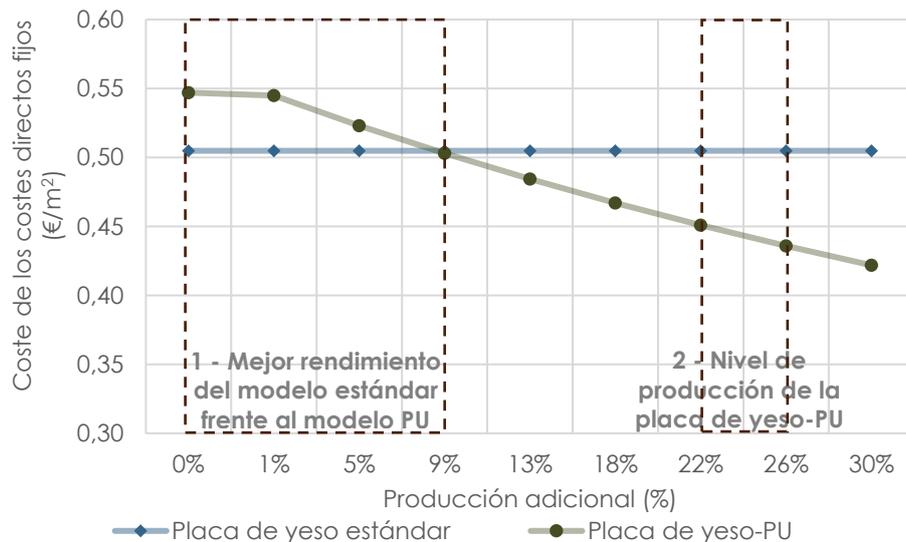


Figura 10.5. Variación del coste de los costes directos fijos de las placas de techo a medida que aumenta la diferencia de producción entre ambos modelos

Se observa la susceptibilidad del coste del ciclo de vida global al nivel de producción adicional del nuevo modelo en comparación con la placa de techo convencional.

En esta evaluación se diferencian tres fases:

- De 0 al 9 % de fabricación adicional del nuevo modelo con respecto al estándar, es este último el que presenta un mejor rendimiento económico, debido al elevado coste por unidad funcional del equipamiento necesario para la fabricación del prefabricado de yeso-PU.
- Para una sobreproducción de 53.500 m²/años adicionales (9%) de placa, se igualan los costes directos fijos de ambos modelos.
- A partir del 9 % de fabricación adicional comienza a ser rentable la inversión realizada en el equipamiento necesario incorporar el poliuretano en el nuevo modelo de prefabricado. El mejor rendimiento se presenta para una fabricación adicional de 144.000 m²/año (25%) de la placa de yeso-PU, el máximo posible dadas las condiciones del material y de las instalaciones.

A10.5.Conclusiones

Tras evaluar los resultados del CCV, se concluye que la placa de yeso-PU tiene un mejor rendimiento desde el punto de vista financiero, su ciclo de vida es 0,13 €/m² (5,91 %) menos costoso que el de la placa de yeso estándar. El mejor desempeño del nuevo modelo se debe a:

- La reducción en un 32 % del contenido de yeso en sustitución del agregado polimérico, lo que implica una disminución del coste de compra y transporte de esta materia prima.
- El menor tiempo de secado (20%) conlleva un ahorro económico en el consumo de energía eléctrica.
- La capacidad de fabricación aumenta un 25 % en el nuevo prefabricado debido al menor tiempo de estancia en el secadero, lo que supone una disminución de los costes directos fijos por unidad funcional (1 m² de placa de techo).

- El menor coste del transporte interno y a vertedero de debe a la reducción del peso en el modelo más innovador, lo que conlleva un menor consumo de combustible.

El nuevo prefabricado tiene un peor rendimiento económico en:

- El coste de transporte del residuo de poliuretano y el coste de adquisición y desplazamiento del aditivo fluidificante, dado que ambos productos son materias primas de nueva incorporación en el modelo sostenible.

- El proceso de trituración adicional y la adaptación de la línea de producción, que implican un coste extra en la adquisición de la maquinaria y en el consumo de energía eléctrica durante su uso.

Este CCV se realiza para dos productos concretos de una fábrica específica. El transporte de los residuos de espuma de poliuretano y el volumen de fabricación se identifican como puntos sensibles del sistema, una ligera modificación en sus valores puede suponer un gran cambio en los resultados finales del estudio.