



UNIVERSIDAD DE BURGOS

TESIS DOCTORAL

**CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL
ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES
ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS,
MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Autor

José Antonio Chica Páez

Directores

Dr. D. José Tomás San José Lombera

Dr. D. Juan Manuel Manso Villalain

Burgos, Mayo de 2008



Unidad de Construcción y Desarrollo del Territorio

TESIS DOCTORAL

**CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL
ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES
ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS,
MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Autor

José Antonio Chica Páez

Directores

Dr. D. José Tomás San José Lombera

Dr. D. Juan Manuel Manso Villalaín

Burgos, Mayo de 2008

“Las formas de acero se mezclan con las fuerzas y los aspectos de la naturaleza, dialogan con ellos, son preguntas y afirmaciones”.

Eduardo Chillida.

Escritos, La Fábrica Editorial y Museo Chillida – Leku, Madrid, 2005, p. 78.

*A mi mujer M^a José, sin cuyo apoyo esta
Tesis Doctoral nunca hubiera sido.*

RESUMEN

La aplicación de las secciones armadas en puentes de acero y mixtos, del tipo viga de alma llena, proporciona soluciones competitivas empleando aceros de mayores límites elásticos. Sin embargo, las vigas esbeltas exigen minimizar la rigidización de las placas solicitadas a compresión para no penalizar los ahorros en material con incrementos en costes de fabricación.

En la actualidad, el Eurocódigo 3 *“Proyecto de estructuras de acero”* constituye el consenso europeo sobre metodologías de cálculo y diseño de estructuras de acero, incluido el caso de las placas cargadas en su plano, la comprobación del comportamiento a compresión de placas esbeltas y el diseño de su rigidización.

Además, el empleo de métodos de cálculo basados en el Método de los Elementos Finitos, MEF, se está implantando como alternativa a los métodos analíticos en el análisis estructural de estructuras o partes de las mismas que exigen una verificación más realista que la ofrecida por los primeros.

El Eurocódigo 3 proporciona unas breves recomendaciones sobre el análisis de placas de acero mediante el MEF en el Anexo C de la Parte 1-5, pero no con el detalle suficiente que requieren las personas involucradas en el diseño de este tipo de estructuras para definir modelos con calidad que proporcionen resultados realistas.

Esta Tesis Doctoral desarrolla una propuesta para la consideración de las imperfecciones iniciales, imprescindibles para la obtención de resultados realistas en el análisis de placas de acero mediante la aplicación del MEF. Para ello, se ha investigado tanto la influencia de las imperfecciones geométricas, originadas principalmente por las tolerancias de fabricación, como de las tensiones residuales, producidas por el proceso de soldadura empleado en la unión de las placas.

Los resultados ofrecen un conjunto de recomendaciones, alternativas a las actualmente existentes en el Eurocódigo 3, que no proporciona información explícita sobre tensiones residuales, orientadas a personas en ejercicio competentes en diseño estructural empleando el MEF.

La investigación se ha desarrollado en el marco del proyecto COMBRI, financiado por la Comisión Europea; esto ha permitido el contraste de las recomendaciones finales con expertos internacionales y resultados experimentales, ensayos, del citado proyecto.

ABSTRACT

The use of plated structures in steel and steel and concrete composite bridges provides competitive solutions thanks to the use of steel of higher yield strength. However, in case of slender sections, is required an additional effort in the design stage to minimize the number of stiffeners in steel plates submitted to compression to avoid the increase of fabrication costs.

Currently, the Eurocode 3 "*Design of steel structures*" provides the European harmonised state of the art on design methodologies for steel structures, including steel plates subjected to in plane forces and the verification of the behaviour of slender plates submitted to compression and the design of the stiffeners, if needed.

In addition, the use of advanced calculation methods based on the Finite Elements Methods of analysis, FEM, is becoming an alternative procedure to analytical methods for the design of structures or parts of them for which is necessary a more realistic approach, than that provided by existing analytical methods.

The Eurocode 3 gives a brief guidance on the use of FEM for the design of plated structures in the Annex C, "*Finite Element Methods of analysis (FEM)*", of the Part 1-5 "*Plated structural elements*", but it lacks of enough detailed information for practicing designers on how to build a model able to provide realistic and accurate results.

This Doctoral Thesis develops a proposal to consider the initial imperfections on the use of FEM for the assessment of bridge plated structures. The use of initial imperfections in the FEM model is very important to obtain reliable results. To do that, in this Doctoral Thesis, research works have been developed to determine the influence of the initial imperfections: geometric imperfections, mainly due to fabrication tolerances, and residual stresses, related to the welding procedure of the plates for the fabrication of the plated sections and the stiffeners to the plates.

The research results provide alternative recommendations to those currently available in the Eurocode 3, where there is not explicit information about residual stresses, and are aimed to practising engineers trained on FEM for structural design.

The research has been developed in the frame of the Project COMBRI, funded by the European Commission; thanks to that is has been possible to discuss the results with international experts and tests performed during the project duration.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos de investigación y posterior redacción de la Tesis Doctoral han supuesto una auténtica prueba tanto a nivel profesional como personal que sin duda alguna me ha enriquecido. Sin embargo, la exigencia de compaginar mi actividad profesional con el desarrollo de la Tesis Doctoral ha supuesto un esfuerzo adicional para el que ha sido imprescindible contar con el apoyo de muchas personas e instituciones. A todas ellas deseo expresar mi agradecimiento.

En primer lugar, agradezco especialmente a mis directores, José Tomás San José y Juan Manuel Manso, su dedicación y generoso compromiso personal durante todo este tiempo, sus observaciones, consejos y planificación general de los trabajos han sido claves para contar con la adecuada orientación, especialmente en la fase de redacción final de los resultados de la investigación.

Pero, obviamente, la idea de emprender los estudios de doctorado surgió hace años, en 2004, gracias a Fernando Espiga, entonces Director de la Unidad de Mecánica de *LABEIN-Tecnalia*, cuando me confió el desarrollo de las investigaciones sobre la consideración de imperfecciones en estructuras mixtas de acero y hormigón.

En cuanto a las investigaciones desarrolladas, han demandado una dedicación especial para la realización de numerosas simulaciones numéricas mediante elementos finitos que no habría podido acometer sin la ayuda de mis compañeros de *LABEIN-Tecnalia*, Francisco Rey, Jaime Grijalvo, Julio César Herrero y Gorka Uria.

También, parte de la labor de investigación realizada ha sido posible gracias a *APTA, Asociación para la Promoción Técnica del Acero*, que me ha ayudado a establecer el estado del arte de los puentes mixtos en España, Concepción Velando, Javier Rípodas y Genaro Seoane siempre estuvieron dispuestos a facilitarme la información y los contactos necesarios.

Además, las oficinas de ingeniería *Carlos Fernández Casado*, especialmente Antonio Martínez Cutillas, e *IDEAM*, en concreto Francisco Millanes, y Pilar Crespo Rodríguez, del *Ministerio de Fomento*, me han proporcionado información sobre realizaciones recientes de puentes mixtos que han servido para ilustrar el objeto de la investigación y su aplicación práctica.

En cuanto a la validación y discusión de los trabajos de investigación desarrollados, siempre he contado con el apoyo de los socios del proyecto COMBRI, financiado por el

Programa de Investigación de la Comisión Europea del Fondo para la Investigación del Carbón y el Acero, quienes han puesto a mi disposición toda la información que he precisado, y que cito a continuación:

- *FOSTA Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.*, Alemania.
- *Institute of Structural Design, University of Stuttgart*, Alemania.
- *Institute of Steel Construction, RWTH Aachen*, Alemania.
- *Aktiengesellschaft Dillinger Hüttenwerke*, Alemania.
- *CTICM Centre Technique Industriel de la Construction Métallique*, Francia.
- *SETRA Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes*, Francia.
- *Division of Steel Structures, Luleå University of Technology*, Suecia.
- *Department Mechanics of Materials and Structures, University of Liège*, Bélgica.

Finalmente, mi agradecimiento a *LABEIN-Tecnalia*, a la Unidad de Construcción, al Director de la Unidad, Javier Ignacio Urreta y a Azucena Cortés, Gerente de Campo de Aplicación donde trabajo, por su interés y apoyo en la realización de esta Tesis Doctoral. Y de nuevo a José Tomás San José, por las numerosas conversaciones durante las jornadas de trabajo en *LABEIN-Tecnalia*, me han proporcionado el ánimo necesario para seguir, siempre.

ÍNDICE DE LA TESIS DOCTORAL

Resumen	i
Abstract	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice.....	iv
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas	viii

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.1.1. COMBRI “Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures”	1
1.1.2. Eurocódigos e innovación en los puentes de acero y mixtos	8
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA TESIS DOCTORAL	17
1.2.1. Objetivos	17
1.2.2. Alcance	18
1.3. METODOLOGÍA	21
1.3.1. Aproximación a la consideración de las imperfecciones	21
1.3.2. Metodología y estructuración de la Tesis Doctoral.....	22

Capítulo 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN EL ÁMBITO DEL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PLACAS DE ACERO PARA PUENTES MIXTOS

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN EL ÁMBITO DEL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PLACAS DE ACERO PARA PUENTES DE ACERO Y MIXTOS	27
2.1. APLICACIÓN DE LAS PLACAS DE ACERO EN LAS SECCIONES ARMADAS DE ESTRUCTURAS DE PUENTES.....	27
2.2. COMPORTAMIENTO DE LAS PLACAS DE ACERO SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN	42
2.2.1. Métodos de análisis de las placas de acero.....	42
2.2.2. Influencia de las imperfecciones en la estabilidad de las placas de acero.....	50
2.3. NORMATIVAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA IMPERFECCIONES INICIALES PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE PLACAS DE ACERO MEDIANTE EL MEF.....	57
2.3.1. Tratamiento de las imperfecciones para MEF según el Eurocódigo 3.	57

2.3.2. Tratamiento de las imperfecciones en normas nacionales Europeas.....	61
2.4. NORMAS DE PRODUCTO Y DE EJECUCIÓN DE ESTRUCTURAS SOBRE TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN	67
2.4.1. Normas de productos de acero para la construcción	67
2.4.2. Norma de ejecución de estructuras de acero.....	69
2.5. DEFINICIÓN DE LAS TENSIONES RESIDUALES EN SECCIONES FABRICADAS A PARTIR DE PLACAS DE ACERO SOLDADAS	75
2.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	81
Capítulo 3. APLICACIÓN A ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN CON COMPORTAMIENTO DE TIPO “COLUMNNA”.	
3. APLICACIÓN A ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN CON COMPORTAMIENTO DE TIPO “COLUMNNA”.....	85
3.1. INTRODUCCIÓN	85
3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE EXPERIMENTACIÓN.....	88
3.2.1. Propiedades de la sección y descripción del ensayo.	88
3.2.2. Propiedades del material, acero.....	88
3.2.3. Tensiones residuales.	90
3.2.4. Imperfecciones geométricas.	91
3.2.5. Secuencia de carga experimental y carga máxima.....	91
3.2.6. Resultados del ensayo.....	92
3.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO SOBRE LA INFLUENCIA DE LAS IMPERFECCIONES INICIALES	94
3.3.1. Imperfecciones geométricas	95
3.3.2. Tensiones residuales	97
3.3.3. Resultados del análisis paramétrico.....	98
3.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	101
Capítulo 4. APLICACIÓN A VIGAS ARMADAS, RIGIDIZADAS Y NO RIGIDIZADAS, SOMETIDAS CORTANTE Y FLEXIÓN.	
4. APLICACIÓN A VIGAS ARMADAS, RIGIDIZADAS Y NO RIGIDIZADAS, SOMETIDAS CORTANTE Y FLEXIÓN.....	105
4.1. INTRODUCCIÓN	105
4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE EXPERIMENTACIÓN.....	108
4.2.1. Propiedades de la sección y descripción del ensayo.	108

4.2.2. Propiedades del material, acero.....	109
4.2.3. Tensiones residuales.	110
4.2.4. Imperfecciones geométricas.	110
4.2.5. Secuencia de carga experimental y carga máxima.....	111
4.2.6. Resultados del ensayo.....	111
4.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO SOBRE LA INFLUENCIA DE LAS IMPERFECCIONES INICIALES	114
4.3.1. Imperfecciones geométricas	115
4.3.2. Tensiones residuales	116
4.3.3. Resultados del análisis paramétrico.....	119
4.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	127
Capítulo 5. APLICACIÓN A VIGAS ARMADAS SOMETIDAS A CARGA CONCENTRADA.	
5. APLICACIÓN A VIGAS ARMADAS SOMETIDAS A CARGA CONCENTRADA	131
5.1. INTRODUCCIÓN.....	131
5.2. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE EXPERIMENTACIÓN.....	134
5.2.1. Propiedades de la sección y descripción del ensayo.	134
5.2.2. Propiedades del material, acero.....	135
5.2.3. Tensiones residuales.	136
5.2.4. Imperfecciones geométricas.	137
5.2.6. Resultados del ensayo.....	138
5.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO SOBRE LA INFLUENCIA DE LAS IMPERFECCIONES INICIALES	143
5.3.1. Imperfecciones geométricas	146
5.3.2. Tensiones residuales	148
5.3.3. Resultados del análisis paramétrico.....	153
5.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	161
Capítulo 6. CONCLUSIONES	
6. CONCLUSIONES	165
6.1. INTRODUCCIÓN	165
6.2. BREVE PRESENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	166
6.3. RECOMENDACIONES PARA PLACAS DE ACERO RIGIDIZADAS SOMETIDAS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN COMBINADAS.	169

6.4. RECOMENDACIONES PARA VIGAS ARMADAS RIGIDIZADAS Y SIN RIGIDIZAR SOLICITADAS A CORTANTE Y FLEXIÓN COMBINADOS	172
6.5. RECOMENDACIONES PARA VIGAS ARMADAS SOMETIDAS A CARGA CONCENTRADA.....	175
6.6. CONCLUSIONES GENERALES	179
6.7. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	181
BIBLIOGRAFÍA	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	183

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. 1. Logotipo del Programa de Investigación del Fondo de Investigación del Carbón y el Acero, RFCS.
- Figura 1. 2. Entidades involucradas en las investigaciones realizadas en COMBRI.
- Figura 1. 3. Instrucciones de construcción del Ministerio de Fomento para el proyecto de puentes de acero y mixtos.
- Figura 1. 4. Portada de la versión ENV del Eurocódigo 3 Parte 1.1. "Reglas generales y reglas para la edificación" [UNE-ENV 1993-1-1:1996]
- Figura 1. 5. Relaciones entre las 10 normas que constituyen el conjunto de los Eurocódigos.
- Figura 1. 6. Familia de normas europeas de la construcción en la que se integran los Eurocódigos. Fuente: *Eurocodes - Building the Future*, <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>
- Figura 1. 7. Ejemplo de aplicación de la familia de normas europeas de la construcción a un puente. Fuente: *Eurocodes - Building the Future*, <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>
- Figura 1. 8. Agrupación por "paquetes" de las partes del Eurocódigo 3: "Proyecto de Estructuras de Acero". Fuente: *Eurocodes - Building the Future*, <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>
- Figura 1. 9. Esquema de la innovación propuesta en la Tesis Doctoral.
- Figura 2. 1. Sección transversal del "Viaducto Arroyo las Piedras", [Millanes, 2007].
- Figura 2. 2. Viga armada con "células triangulares" a la altura de las alas, [Millanes, 2007].
- Figura 2. 3. Empuje del puente y unión de tramos durante la construcción, [Millanes, 2007].
- Figura 2. 4. "Viaducto Arroyo las Piedras" finalizado, [Millanes, 2007].
- Figura 2. 5. Alzado general del "Viaducto de Tina Menor", [Martínez Cutillas, 2001].
- Figura 2. 6. Planta general del "Viaducto de Tina Menor", [Martínez Cutillas, 2001].
- Figura 2. 7. Detalle de sección transversal (acero empleado S 355 J0), [Martínez Cutillas, 2001].
- Figura 2. 8. Interior de la sección en cajón, [Martínez Cutillas, 2001].
- Figura 2. 9. "Puente sobre el río Leysse", Chambéry (Francia), [Arcelor, 2007].
- Figura 2. 10. Sección transversal del "Puente sobre el río Leysse", [Arcelor, 2007]

- Figura 2. 11. Detalle de unión en apoyos del "Puente sobre el río "Oder" (Alemania), [Arcelor, 2007].
- Figura 2. 12. Perfiles laminados en caliente embebidos en el tablero. Puentes ferroviarios franceses, [Arcelor, 2007].
- Figura 2. 13. Evolución de las secciones armadas en los puentes mixtos, [Bernabeu, 2004].
- Figura 2. 14. Esquema simplificado de diseño de la sección de una viga mixta, [Kulhmann, 2008].
- Figura 2. 15. Curvas de comportamiento elástico post-crítico para elementos comprimidos. [Galambos, 1998]
- Figura 2. 16. Sección eficaz de un elemento esbelto, Clase 4, sometido a compresión [EN 1993-1-5: 2006]
- Figura 2. 17. Placa apoyada en los cuatro lados sometida a compresión y distribución real de tensiones debida al pandeo local en la etapa post-crítica, [Johansson, 1998].
- Figura 2. 18. Influencia de la amplitud de la imperfección inicial en la tensión última de las placas de acero sometidas a compresión uniforme, [Martínez Cutillas, 2001].
- Figura 2. 19. Variación de la tensión crítica en función de las tensiones residuales, [Paik, 2003].
- Figura 2. 20. Variación de la anchura eficaz en función de las tensiones residuales, [Paik, 2003].
- Figura 2. 21. Imperfecciones geométricas equivalentes, Tabla C.2 [EN 1993-1-5: 2006]
- Figura 2. 22. Imperfecciones geométricas equivalentes, Tabla 5.1 del Eurocódigo 3 Parte 1.1 [EN 1993-1-1:2005]
- Figura 2. 23. Modelización de imperfecciones geométricas equivalentes, Figura C.1 [EN 1993-1-5: 2006]
- Figura 2. 24. Imperfecciones geométricas establecidas en la norma alemana de diseño de estructuras de acero en relación con el análisis de seguridad frente a pandeo de las placas de acero, [DIN, 18800-3].
- Figura 2. 25. Patrones de tensiones residuales proporcionados en la norma nacional sueca, BSK 99, para el proyecto de estructuras de acero, [BSK, 1999].
- Figura 2. 26. Imperfección inicial en forma de arco e imperfección inicial de traslación para 1. Pilar de estabilización y 2. Pilar articulado, [BSK, 1999].

- Figura 2. 27. Tabla L-1.1: Tolerancias de fabricación para secciones armadas [prEN1090-2:2004]
- Figura 2. 28. Tabla L-1.3: Tolerancias de fabricación para placas rigidizadas [prEN1090-2:2004]
- Figura 2. 29. Ejemplos esquemáticos de distribuciones de tensiones residuales en elementos de acero soldados [Paik, 2003]
- Figura 2. 30. Idealización de las tensiones residuales introducidas por efecto de los cordones de soldadura, en los cuatro lados, en una placa, en las direcciones x e y [Paik, 2003]
- Figura 2. 31. Mediciones de distribución de tensiones residuales en dos placas de acero, $b=600$ mm. y $b=500$ mm., limitadas por rigidizadores longitudinales soldados [Paik, 2003]
- Figura 3. 1. Vista isométrica de la placa rigidizada y esquema del ensayo, [Grondin, 1998].
- Figura 3. 2. Curva tensión deformación del acero.
- Figura 3. 3. Tensiones residuales medidas en la probeta, [Grondin, 1998].
- Figura 3. 4. Imperfecciones geométricas medidas en la probeta, [Grondin, 1998].
- Figura 3. 5. Curva carga deformación de la probeta, [Grondin, 1998].
- Figura 3. 6. Formas de fallo previsible de la placa rigidizada, [Grondin, 1998].
- Figura 3. 7. Detalle del modelo en los apoyos extremos para la aplicación de la carga.
- Figura 3. 8. Primer modo de pandeo de la placa rigidizada, ampliado por un factor de escala de 60.
- Figura 3. 9. Modelos deformados para diferentes casos de imperfecciones iniciales: imperfección global (izquierda) y combinación de imperfección global y local (derecha). Representación con factor de escala de 60.
- Figura 3. 10. Patrón de tensiones residuales simplificado propuesto para el análisis mediante el MEF.
- Figura 3. 11. Forma de fallo obtenida para el caso de análisis: T.R. / I.G.=0,2mm / Carga máxima =1134 kN. Representación con factor de escala de 10.
- Figura 3. 12. Curvas carga deformación para diferentes combinaciones de I.G. con T.R.
- Figura 3. 13. Comparación de la curva carga deformación obtenida con el Eurocódigo 3 y con la resultante del ensayo.
- Figura 4. 1. Alzados y detalles constructivos de las vigas armadas a ensayar, [COMBRI, 2005a].

- Figura 4. 2. Ubicación de los apoyos y puntos de introducción de la carga en el caso de ménsula larga a) y de ménsula corta b), [COMBRI, 2005a].
- Figura 4. 3. Viga de acero con rigidizador longitudinal trapezoidal fabricado a partir de las placas de acero suministradas por Dillinger Hütte AG, [COMBRI, 2005a].
- Figura 4. 4. Equipo de fotogrametría y resultados de la medición de imperfecciones geométricas iniciales realizadas en el alma del espécimen 2 A, [COMBRI, 2005a].
- Figura 4. 5. Disposición del ensayo 2 A en las instalaciones de RWTH Aachen, [COMBRI, 2005b].
- Figura 4. 6. Deformadas en los especímenes tras la realización de los ensayos, [COMBRI, 2005b].
- Figura 4. 7. Curva carga deformación del ensayo 2 A, [COMBRI, 2005b].
- Figura 4. 8. Modelos empleados para el análisis paramétrico con el MEF, caso 1 A) a la izquierda y caso 2 B) a la derecha.
- Figura 4. 9. Ensayo 1A – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G. pero no T.R. Caso 1 (1MP, verde -■-), caso 5 (EC3, rojo -●-) y ensayo (azul ---).
- Figura 4. 10. Ensayo 1A – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G. y T.R. Caso 4 (1MP, verde -X-), caso 8 (EC3, rojo -—-) y ensayo (azul ---).
- Figura 4. 11. Ensayo 1A – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G., afectadas de coeficiente, pero no T.R. Caso 9 (1MP x 0,50, verde -■-), caso 13 (EC3 x 0,50, rojo -●-) y ensayo (azul ---).
- Figura 4. 12. Ensayo 1A – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G., afectadas de coeficiente, pero no T.R. Caso 12 (1MP x 2,00, verde -X-), caso 16 (EC3 x 2,00, rojo -—-) y ensayo (azul ---).
- Figura 4. 13. Comparación entre las formas de fallo obtenidas mediante el MEF y el ensayo, imágenes superiores, para los casos: Caso 4 (Izquierda) y Caso 12 (derecha). Deformación máxima fuera del plano en carga máxima: 22 mm. y 17 mm., respectivamente.
- Figura 4. 14. Ensayo 2B – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G. y los diferentes casos de T.R. recogidos en la Tabla 4.7.
- Figura 4. 15. Ensayo 2B – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G., afectadas de distintos coeficientes, pero no T.R. véase la Tabla 4.7.

- Figura 4. 16. Comparación entre las forma de fallo obtenidas mediante el MEF y el ensayo, imágenes superiores, la izquierda corresponde a la zona posterior al plano del rigidizador, para los casos: Caso 4 (Izquierda) y Caso 12 (derecha). Deformación máxima fuera del plano en carga máxima: 14 mm. y 8 mm., respectivamente.
- Figura 5. 1. Alzados y detalles constructivos de la viga armada a ensayar [COMBRI, 2006a].
- Figura 5. 2. Detalle del ensayo y de las placas empleadas para variar longitud de introducción de la carga concentrada, [COMBRI, 2006a].
- Figura 5. 3. Resultado del ensayo de tracción en la dirección de laminación (“*rolling*”) y transversal (“*transverse*”) de las placas de acero empleadas en la viga armada, [Gozzi, 2007].
- Figura 5. 4. Ensayo P200. Imperfecciones geométricas iniciales, desplazamiento transversal del alma de la viga en el plano de aplicación de la carga concentrada, [Gozzi, 2007].
- Figura 5. 5. Sistema de recogida de datos en los ensayos, imagen del ensayo P1400, las flechas señalan los puntos del sistema LVDT para la medida de desplazamientos verticales, [Gozzi, 2007].
- Figura 5. 6. Curvas carga deformación de los ensayos P200, P700 y P1400, [Gozzi, 2007].
- Figura 5. 7. Imágenes en carga última de las vigas de los ensayos P200, arriba, P700, centro, y P1400, abajo, [Gozzi, 2007].
- Figura 5. 8. Deformadas del alma en diferentes situaciones de carga de las vigas de los ensayos P200, arriba, P700, centro, y P1400, abajo, [COMBRI, 2006a].
- Figura 5. 9. Detalles del ensayo del proyecto [S240, 1999] empleado como *benchmark* para definir la estrategia de modelización.
- Figura 5. 10. Análisis de sensibilidad del modelo en función de la densidad del mallado.
- Figura 5. 11. Propuesta de modelización del dispositivo de aplicación de cargas concentradas.
- Figura 5. 12. Sensibilidad del modelo frente a diferentes valores de las imperfecciones iniciales.
- Figura 5. 13. Deformada resultante tras la etapa de equilibrado de las tensiones residuales. Amplitud de la imperfección geométrica inicial: 1,00 mm. Factor de escala: 15,00.

- Figura 5. 14. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos siguientes: 1MP+T.R.3 (rojo -■-), 1MP+T.R.2 (naranja -▲-), 1MP+T.R.1 (amarillo -X-), 1MP+NO (verde -●-), EC3+NO (verde claro -|-) y ensayo (azul ---). Considerando valores nominales del acero.
- Figura 5. 15. Ensayo P200 – Deformadas de la placa del alma en el momento de alcanzar la carga máxima. Representación según sección transversal. Considerando valores nominales del acero.
- Figura 5. 16. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos siguientes: FF+T.R.3 (rojo -■-), FF+T.R.2 (naranja -▲-), FF+T.R.1 (amarillo -X-), FF+NO (verde -●-), EC3+NO (verde claro -|-) y ensayo (azul ---). Considerando valores nominales del acero.
- Figura 5. 17. Ensayo P200 – Deformadas de la placa del alma en el momento de alcanzar la carga máxima. Representación según sección transversal. Considerando valores nominales del acero.
- Figura 5. 18. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos en los que se han considerado imperfecciones geométricas iniciales con la forma del primer modo de pandeo pero no tensiones residuales. Considerando valores del ensayo de tracción del acero.
- Figura 5. 19. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos en los que se han considerado imperfecciones geométricas iniciales con la forma del primer modo de pandeo y tensiones residuales. Considerando valores del ensayo de tracción del acero.
- Figura 5. 20. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos en los que se han considerado imperfecciones geométricas iniciales con la forma de fallo pero no tensiones residuales. Considerando valores del ensayo de tracción del acero.
- Figura 5. 21. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos en los que se han considerado imperfecciones geométricas iniciales con la forma de fallo y tensiones residuales. Considerando valores del ensayo de tracción del acero.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. 1. Contenidos de los Eurocódigos. Títulos oficiales en español según [UNE-EN 1990:2002]
- Tabla 1. 2. Relación de partes del Eurocódigo 3. Títulos oficiales en español según el AEN/CTN-140/SC3
- Tabla 2. 1. Análisis de las tipologías bjacena y cajón, [Bernabeu, 2004].
- Tabla 2. 2. Consideración de las imperfecciones en varias normas nacionales de Europa, [Chica, 2007a].
- Tabla 2. 3. Coeficientes para el cálculo de la imperfección de acuerdo al factor α de las curvas de pandeo del Eurocódigo, [RPX-95], [RPM-RPX, 2000].
- Tabla 2. 4. Imperfecciones iniciales y traslaciones iniciales ficticias para el diseño de estructuras de acuerdo a la teoría de segundo orden, [BSK, 1999].
- Tabla 2. 5. Extracto de tolerancias suplementarias del anexo informativo L2 “*Geometrical tolerances - Supplementary tolerances*”, [prEN1090-2:2004]
- Tabla 3. 1. Propiedades del rigidizador de sección transversal en T, [Grondin, 1998].
- Tabla 3. 2. Características del acero del rigidizador de sección en T, [Grondin, 1998].
- Tabla 3. 3. Valores de carga máxima del ensayo y del análisis mediante el MEF, [Grondin, 1998].
- Tabla 3. 4. Imperfecciones geométricas equivalentes según Anexo del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].
- Tabla 3. 5. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero, rigidizadas, solicitadas a compresión y flexión, susceptibles de comportamiento a pandeo tipo columna.
- Tabla 4. 1. Características de las placas de acero suministradas por Dillinger Hütte AG, [COMBRI, 2005a].
- Tabla 4. 2. Imperfecciones geométricas equivalentes según Anexo del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2005].
- Tabla 4. 3. Resumen de las tensiones residuales incluidas en el análisis paramétrico inicial.
- Tabla 4. 4. Valores de las tensiones residuales en función de grado de afección esperado del proceso de soldadura, [Paik, 2003].

- Tabla 4. 5. Análisis paramétrico sobre la consideración de imperfecciones iniciales desarrollado sobre los cuatro ensayos realizados por RWTH Aachen.
- Tabla 4. 6. Resultados de carga máxima obtenidos mediante el análisis paramétrico aplicando el MEF y comparación con los resultados del ensayo 1 A.
- Tabla 4. 7. Resultados de carga máxima obtenidos mediante el análisis paramétrico aplicando el MEF y comparación con los resultados del ensayo 2 B.
- Tabla 4. 8. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero en almas de vigas armadas, rigidizadas y no rigidizadas, sometidas cortante y flexión.
- Tabla 5. 1. Características de los ensayos desarrollados por LTU, [Gozzi, 2007].
- Tabla 5. 2. Características de las placas de acero según ensayo de tracción, [Gozzi, 2007].
- Tabla 5. 3. Carga máxima obtenida en los ensayos de carga concentrada, [Gozzi, 2007].
- Tabla 5. 4. Amplitud máxima de la imperfección geométrica resultante tras el equilibrado de las tensiones residuales.
- Tabla 5. 5. Posición del punto de máxima imperfección inicial en el alma tras el equilibrado de las tensiones residuales en el modelo deformado.
- Tabla 5. 6. Concepción del análisis paramétrico sobre la consideración de imperfecciones iniciales en los ensayos de LTU.
- Tabla 5. 7. Carga máxima obtenida mediante el MEF en el análisis paramétrico realizado empleado los valores del ensayo de tracción del acero y comparación con los resultados de los ensayos.
- Tabla 5. 8. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero en almas de vigas armadas, no rigidizadas, sometidas a carga concentrada.
- Tabla 6. 1. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero, rigidizadas, solicitadas a compresión y flexión, susceptibles de comportamiento a pandeo tipo columna.
- Tabla 6. 2. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero en almas de vigas armadas, rigidizadas y no rigidizadas, sometidas cortante y flexión.

Tabla 6. 3. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero en almas de vigas armadas, no rigidizadas, sometidas a carga concentrada.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. COMBRI “Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures”

Los trabajos de investigación que se presentan en esta Tesis Doctoral se han desarrollado en el marco del proyecto de investigación cooperativa europeo, COMBRI, “*Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures*” (puentes de acero y puentes mixtos competitivos mediante estructuras de placas de acero innovadoras), [COMBRI, 2003], financiado por el Programa de Investigación de la Comisión Europea del Fondo para la Investigación del Carbón y el Acero (*Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel – RFCS*)¹, véase la Figura 1. 1.



Figura 1. 1. Logotipo del Programa de Investigación del Fondo de Investigación del Carbón y el Acero, RFCS.

El proyecto COMBRI comenzó los trabajos de investigación en Septiembre de 2003, con un plazo de ejecución de 36 meses, hasta Agosto de 2006. Tras la finalización de la investigación, los resultados obtenidos por el consorcio de COMBRI han sido de nuevo reconocidos por el programa RFCS, que ha proporcionado una financiación adicional para la divulgación de los mismos mediante el proyecto COMBRI+, “*Valorisation of knowledge for competitive steel and composite bridges*” (valorización de conocimiento sobre puentes competitivos de acero y mixtos” [COMBRI+, 2007], cuyas actividades comenzaron el mes de Julio de 2007 y se prevé finalicen en Diciembre de 2008.

El proyecto COMBRI tiene el objetivo de promover y estimular un uso amplio de las estructuras de secciones armadas de acero, esto es, realizadas a partir de placas de

¹ Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, <http://cordis.europa.eu/coal-steel-rtd/steel/home.html>

acero soldadas, en puentes. Para ello, es necesario incrementar la competitividad de los puentes de acero y mixtos mediante el empleo de secciones transversales mejoradas no sólo a efectos de condiciones de servicio sino también en relación con los procesos de fabricación y montaje de las mismas.

Para ello, COMBRI plantea simplificar las secciones de los puentes mixtos mediante la reducción del número de rigidizadores en las placas de acero. Esta simplificación tiene impacto tanto en la fabricación como en los procesos de montaje.

Una reducción de los trabajos necesarios para la rigidización de las placas de acero empleadas en las secciones armadas de los puentes proporciona una mejora de la competitividad gracias a la reducción de los trabajos de fabricación de la estructura, con el consecuente aumento de la productividad y reducción de costes asociados a la soldadura de los rigidizadores a las placas de acero.

Sin embargo, para conseguir esa reducción del número de rigidizadores en las secciones de los puentes, es necesario desarrollar y proporcionar a los proyectistas formulaciones y métodos de diseño que permitan el empleo de secciones esbeltas de forma segura.

Por lo tanto, las investigaciones de COMBRI persiguen proporcionar los conocimientos que permitan:

- Minimizar el número de rigidizadores acudiendo a otros de mayor tamaño y mejores propiedades resistentes que los tradicionales de sección plana, por ejemplo trapezoidales.
- Emplear aceros de mayor límite elástico que los tradicionalmente usados en la actualidad.

El proyecto COMBRI incluye investigaciones tanto teóricas como experimentales, organizadas en diferentes paquetes de trabajo, denominados Work Packages, WP, atendiendo al idioma oficial de trabajo, el inglés. A continuación se describen de forma breve los WP de COMBRI;

WP 1.1: “*Bending Resistance*” (resistencia a flexión)

Cubre las investigaciones necesarias para proporcionar un diseño optimizado del alma y las alas de las vigas armadas en I y de las vigas en cajón, sometidas a tensiones longitudinales, mediante un correcto posicionamiento de los rigidizadores y la selección adecuada del tipo de acero para minimizar el número de rigidizadores.

WP 1.2: “*Shear resistance*” (resistencia a cortante)

Las investigaciones de este paquete de trabajo tienen el mismo objetivo que el WP 1.1. pero en este caso se estudia la sollicitación de cortante para conocer la mejor forma de optimizar la sección.

WP 2.1: “*Patch loading resistance of longitudinally stiffened girder webs*” (resistencia de vigas de almas longitudinalmente rigidizadas frente a cargas concentradas)

El objetivo de este WP es el de desarrollar procedimientos que permitan determinar con la máxima exactitud la resistencia frente a cargas concentradas de vigas con almas longitudinalmente rigidizadas.

Es importante destacar que el estudio de este tipo de sollicitación es especialmente relevante debido a su incidencia en el proceso de lanzamiento del puente. El lanzamiento es un proceso de construcción de puentes que consiste en empujar la estructura desde los apoyos exteriores: la estructura se desplaza en voladizo hasta que alcanza su posición definitiva en las pilas o apoyos interiores o el extremo opuesto del vano que salva el puente.

WP 2.2: “*Launching of bridge girders*” (lanzamiento de puentes)

Este WP desarrolla recomendaciones para el lanzamiento de puentes de secciones armadas, competitivo y seguro, cuando la hipótesis de cálculo que gobierna el diseño de la sección es el lanzamiento.

WP 3.1: “*Imperfections for FEM calculations*” (imperfecciones para el cálculo mediante el Método de los Elementos Finitos, MEF)

El empleo de programas de diseño basados en el Método de los Elementos Finitos, MEF, está ampliamente extendido entre los ingenieros dedicados al diseño estructural pero aún es necesario profundizar en los procedimientos y estrategias para considerar las imperfecciones iniciales para el diseño y comprobación mediante MEF de estructuras de placas de acero. La consideración correcta de las imperfecciones iniciales es imprescindible para obtener unos resultados realistas.

Los conocimientos y resultados fruto de los trabajos desarrollados en este WP constituyen la contribución fundamental a esta Tesis Doctoral. Más adelante, finalizada esta

presentación general de los WP proyecto COMBRI, se detallará tanto el WP 3.1. como la participación y papel del Autor en el mismo.

WP 3.2: “Elastic plate buckling assessment” (comprobación del pandeo elástico de placas de acero)

Como paso previo a una mejora del diseño de placas rigidizadas es necesario proporcionar a los diseñadores una herramienta que les permita determinar las cargas críticas, en régimen elástico, de las placas.

Este WP tiene como misión el desarrollo de un programa que proporcione las cargas de pandeo elástico que permitan una determinación realista de la resistencia de las placas y, por tanto, facilite el diseño de secciones armadas.

WP 3.3: “Cross sections susceptible to member buckling” (secciones transversales susceptibles de pandeo global)

Hasta ahora, todos los WP que se han presentado tratan sobre fenómenos de inestabilidad asociados a partes localizadas de la sección armada: alas, almas o placas constituyentes de las mismas; el objetivo de este WP es desarrollar procedimientos que permitan determinar de forma realista la resistencia de elementos estructurales de secciones muy esbeltas, secciones Clase 4, susceptibles de pandeo global.

WP 4: “Recommendations” (recomendaciones)

Este último WP tiene por objeto recoger los resultados del resto de WP de forma que, tratados de forma integral, se desarrollen unas recomendaciones para el diseño de puentes de acero y mixtos mediante secciones armadas competitivas.

El consocio del proyecto COMBRI, responsable del desarrollo de las actividades presentadas en los WPs, esta constituido por las siguientes entidades, véase Figura 1. 2:

- FOSTA Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Alemania.
- Institute of Structural Design, University of Stuttgart, Alemania.
- Institute of Steel Construction, RWTH Aachen, Alemania.
- Aktiengesellschaft Dillinger Hüttenwerke, Alemania.
- CTICM Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, Francia.
- SETRA Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Francia.

- Division of Steel Structures, Luleå University of Technology, Suecia.
- Department Mechanics of Materials and Structures, University of Liège, Bélgica.
- Fundación LABEIN, España.



Figura 1. 2. Entidades involucradas en las investigaciones realizadas en COMBRI.

La coordinación del proyecto recae en la entidad promoción técnica del acero alemana FOSTA; no obstante, la coordinación de los aspectos científicos y de los resultados de las investigaciones los realiza el Instituto de Diseño Estructural de la Universidad de Stuttgart, más concretamente la profesora Dra. Ulrike Kuhlmann, de reconocido prestigio en el ámbito de la investigación sobre el diseño de estructuras de acero y mixtas de acero y hormigón en Alemania y en Europa y también por su contribución al desarrollo de los Eurocódigos relacionados con el diseño de puentes de acero y mixtos.

Cabe destacar también la participación en COMBRI del Dr. Joel Raoul, responsable técnico para los temas relacionados con el control de los puentes bajo responsabilidad de la entidad pública francesa SETRA y con numerosas contribuciones en congresos internacionales así como en el desarrollo de normativa francesa y contribuciones a los Eurocódigos relacionados con el diseño de puentes de acero y mixtos.

Finalmente, merece también mención especial el profesor Dr. Bernt Johansson, de la Universidad de Lulea en Suecia; acumula aún mayores reconocimientos que las personas anteriormente presentadas, valga como simple muestra su papel de coordinador del equipo científico responsable del desarrollo de la Parte 1.5 “Placas planas cargadas en su plano” del Eurocódigo 3: “Proyecto de Estructuras de Acero”, [EN 1993-1-5: 2006], documento que sirve de referencia para los trabajos de COMBRI.

Una vez presentado el proyecto COMBRI en cuanto a objetivos, plan de trabajo y consorcio, es posible profundizar en los trabajos de investigación desarrollados en él que

han servido al Autor para llevar a cabo las investigaciones que constituyen el fundamento de esta Tesis Doctoral.

Como se ha apuntado, el proyecto COMBRI incluye dentro de sus paquetes de trabajo el WP 3.1: “*Imperfections for FEM calculations*” (imperfecciones para el cálculo mediante el Método de los Elementos Finitos, MEF). Para su realización, la Fundación LABEIN fue designada como entidad del consorcio líder de las actividades de investigación de este paquete de trabajo; la Fundación LABEIN, a su vez, designa al Autor de esta Tesis Doctoral como investigador responsable de estos trabajos así como de cualquier otra actividad de investigación relacionada con en proyecto COMBRI que pudiera competirle.

A continuación se pasa a describir detalladamente este paquete de trabajo:

WP 3.1: “*Imperfections for FEM calculations*” (imperfecciones para el cálculo mediante el Método de los Elementos Finitos, MEF)

Objetivo:

Establecer estrategias adecuadas para la consideración de las imperfecciones iniciales en el diseño de estructuras de placas de acero mediante programas de diseño basados en el MEF.

Descripción de los trabajos de investigación propuestos:

Desarrollo de una metodología, en forma de recomendaciones y reglas sencillas, adecuada en cuanto a la forma (local, global, combinada) y magnitud de las imperfecciones geométricas a considerar en el diseño de secciones armadas, formadas por placas de acero soldadas, mediante el MEF.

Además, se generan reglas sencillas, en forma de patrones idealizados, de geometría rectangular, para la modelización de las tensiones residuales en los modelos empleados en el diseño de secciones de placas de acero empleando el MEF.

Los desarrollos se validan mediante el contraste de los resultados ofrecidos por los modelos analizados según el MEF con los resultados experimentales de los ensayos previstos en otros WPs del proyecto, así como también de otras fuentes bibliográficas.

Los trabajos de investigación de este WP se estructuran en las siguientes tareas:

- Recopilación y evaluación de resultados numéricos y experimentales de proyectos de investigación previos y de otras fuentes bibliográficas.

- Evaluación y comparación de los datos de las imperfección de las estructuras y secciones armadas de acero, esto es fabricadas a partir de placas de acero soldadas, con las tolerancias de fabricación recogidas en las normas de producto.
- Investigación mediante experimentación numérica, empleando programas paramétricos basados en el MEF, orientada a comprobar la influencia de las formas, magnitudes y patrones de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en el comportamiento de las estructuras de placas de acero.
- Establecimiento de conclusiones y desarrollo de una estrategia de modelización para la consideración de forma y magnitud de las imperfecciones geométricas así como de los patrones y magnitudes de las tensiones residuales en el análisis mediante el MEF de las secciones de placas de acero para puentes.

Interacciones del WP 3.1. con el resto de WPs del proyecto COMBRI:

Los ensayos programados en los paquetes de trabajo WP 1.1., WP 1.2., WP 2.1. proporcionan la validación de los resultados de las investigaciones del WP 3.1. Y los resultados preliminares de este WP sirven de entrada a las simulaciones numéricas de los paquetes de trabajo WP 1.1., WP 1.2., WP 2.1. y WP 2.2. así como para la validación de los resultados proporcionados por el programa a desarrollar en WP 3.2.

Finalmente los resultados de las investigaciones del WP 3.1. se integran en las recomendaciones generales de COMBRI previstas en el in WP 4.

Para concluir este apartado de introducción, reiterar que los conocimientos y resultados fruto de los trabajos de investigación desarrollados por el Autor en el marco del proyecto de investigación europeo COMBRI, en el WP 3.1, constituyen la base de la investigación de esta Tesis Doctoral.

La participación del Autor en COMBRI proporciona una contribución original sobre la consideración de las imperfecciones en el diseño de placas de acero mediante el MEF al Informe Final generado por el consorcio, [COMBRI, 2007].

Los resultados que se presentan en esta Tesis Doctoral han sido debatidos por los participantes de COMBRI y aceptados para su inclusión en el Informe Final del proyecto, a la fecha de esta Tesis Doctoral aún pendiente de publicación por la Comisión Europea.

A través del proyecto de proyecto COMBRI+, además de la divulgación de los resultados obtenidos en las investigaciones desarrolladas en COMBRI, se dirigirá una propuesta al

Comité Europeo de Normalización, CEN², a través del órgano correspondiente, el Comité Técnico de CEN/TC 250, para la consideración de los resultados de COMBRI en futuras actualizaciones de los Eurocódigos. Los Eurocódigos y su relevancia para una implementación efectiva de los resultados de las investigaciones en el campo del diseño estructural se tratan en el siguiente apartado.

No obstante, el desarrollo de la Tesis Doctoral ha proporcionado un marco externo al proyecto COMBRI en el que ha sido posible profundizar con mayor detalle en la temática de las imperfecciones iniciales, en los fundamentos que justifican la necesidad de su conocimiento, en la evolución de las tipologías de puentes que exigen modelizaciones cada vez más realistas, incluyendo las imperfecciones, en el contexto normativo donde pudieran ser consideradas y en la aplicación práctica de los resultados.

1.1.2. Eurocódigos e innovación en los puentes de acero y mixtos

Los puentes no sólo generan un valor importante para la sociedad a través de las infraestructuras de transporte de las que forman parte, además suponen, en el caso del acero, un mercado importante para la industria siderúrgica especializada en productos planos laminados en caliente de espesores importantes, [UNE-EN10079:1994]. En el caso de España, se puede estimar en un 3%, respecto del total de puentes construidos anualmente, el porcentaje correspondiente a puentes de acero y mixtos.

Actualmente, las soluciones de acero tienen unos magníficos competidores: el hormigón armado *in – situ* y el hormigón prefabricado. Por tanto, para mantener su posición en el mercado, las soluciones de acero tienen que ser competitivas frente a las basadas en hormigón.

En esta Tesis Doctoral se presentan investigaciones que proporcionan resultados, en forma de recomendaciones de diseño, para la mejora de la competitividad de los puentes de acero y mixtos a través del diseño mediante métodos avanzados de cálculo, mediante el MEF, ¿pero como se logra que los resultados de las investigaciones lleguen a la ingeniería y se plasmen en proyectos reales con impacto en la industria, en este caso en la relacionada con la construcción en acero?

La respuesta que goza de mayor consenso es la del desarrollo normativo. Una investigación del Instituto Alemán de Normalización, DIN³, [DIN, 2000], en el que se

² Comité Européen de Normalisation (European Standardisation Organisation), <http://www.cen.eu/cenorm/homepage.htm>

³ DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. <http://www.din.de>

recabó información de 707 empresas de Alemania, Austria y Suiza, llega a las siguientes conclusiones:

- Las empresas obtienen una reducción del coste y del riesgo económico de sus actividades de I+D mediante su participación en la normalización.
- La innovación no es suficiente para mantener la competitividad, es necesario una amplia y eficiente implantación de la misma a través de las normas para que haya impacto económico. Las políticas de innovación deberían apoyar la normalización
- Entendida la normalización como una forma de transferencia tecnológica, las normas constituyen un estímulo positivo para la innovación y por tanto para el desarrollo económico.
- En cuanto al ámbito geográfico de aplicación, las normas internacionales, más que las nacionales, favorecen la competitividad internacional de las empresas y por lo tanto la exportación de productos y servicios.

Son estas razones las que motivan que los trabajos de investigación presentados en esta Tesis Doctoral tengan una interacción muy estrecha con las normas relacionadas con el proyecto de puentes de acero y mixtos: a nivel de España, las recomendaciones para el proyecto de puentes de acero y mixtos, [RPM-95], [RPX-95] y a nivel de Europa, los Eurocódigos⁴.

En lo que se refiere al ámbito de aplicación nacional es importante señalar que los documentos normativos relacionados con el proyecto de puentes no son, en sentido estricto, normas, esto es documentos desarrollados por una entidad de normalización, en el caso de España sería AENOR⁵. Nos referimos a las Instrucciones de Construcción desarrolladas por el Ministerio de Fomento⁶, véase la Figura 1. 3:

- *“Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras”*, [RPM-95]
- *“Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras”*, [RPX-95]
- *“Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera”*. [IAP, 1998]
- *“Manual de aplicación de las recomendaciones RPM-RPX/95”*, [RPM-RPX, 2000]

⁴ Eurocodes – Building the future, <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/>

⁵ AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, <http://www.aenor.es>

⁶ Ministerio de Fomento, <http://www.fomento.es>



Figura 1. 3. Instrucciones de construcción del Ministerio de Fomento para el proyecto de puentes de acero y mixtos.

Estos documentos fueron desarrollados en la década de los 90 y, como se verá a continuación, coincidieron con la publicación de las versiones experimentales de los Eurocódigos; esto dio lugar a la convergencia de estas instrucciones de construcción con la filosofía de los Eurocódigos, [Crespo, 2001], [ACHE, 2006].

Otros documentos normativos, de ámbito nacional, relevantes con el proyecto de estructuras de acero, son la Instrucción de Estructuras de Acero, (EAE)⁷, [EAE, 2004], y el Documento Básico del Código Técnico de la Edificación para Estructuras de Acero (CTE)⁸, [CTE, 2006], éste último restringido al ámbito de la edificación. El CTE entró en vigor en 2007 y la EAE se espera para 2008, ambos se basan en los Eurocódigos.

Pero esta Tesis Doctoral se centra en los Eurocódigos. En el ámbito de Europa, los Eurocódigos constituyen la referencia normativa más actual e importante para el diseño estructural y, además, tal y como se ha señalado anteriormente, sus contenidos y desarrollos han influido notablemente en las recomendaciones para puentes de acero y mixtos del Ministerio de Fomento; por lo tanto, considerando los Eurocódigos, se está considerando también los fundamentos de los documentos normativos de España.

En estos momentos, los Eurocódigos se encuentran de actualidad debido a su inminente publicación en español pero es importante destacar que el proceso de desarrollo de los mismos hasta alcanzar el estado actual ha supuesto muchos años, [EC, 2003]:

- 1975, la Comisión de la Comunidad Europea lanza un programa en el ámbito de la construcción, basado en el artículo 95 del Tratado de Roma⁹, [CEE, 1957], con el

⁷ Instrucción de Acero Estructural, EAE, <http://www.fomento.es/MFOM/LANG%5FCASTELLANO/DIRECCIONES%5FGENERALES/ORGANOS%5FCOLEGIADOS/CPA/EAE/>

⁸ Código Técnico de la Edificación, CTE, <http://www.codigotecnico.org>

⁹ Tratado constitutivo de la Comunidad Económica Europea, CEE, http://www.europa.eu/scadplus/treaties/eec_es.htm

objetivo de eliminar los obstáculos técnicos al comercio en el sector y armonizar las especificaciones técnicas.

- 1984, la Comisión, ayudada por un comité formado por representantes de los Estados Miembros, publica los primeros Eurocódigos: conjunto de reglas técnicas armonizadas para el diseño estructural de proyectos de construcción alternativas a las de obligado cumplimiento de ámbito nacional de los Estados Miembros.
- 1989, se publica la Directiva de Productos de la Construcción¹⁰, [EC, 1989], en la que se establecen los requisitos básicos, seis, que han de cumplirse en el ámbito de la construcción: resistencia mecánica y estabilidad; seguridad en caso de incendio; higiene, salud y medio-ambiente; seguridad de uso; protección contra el ruido; eficiencia energética. La Directiva tiene efectos no solo a nivel de producto o proyecto sino también a efectos de la armonización de las normas con las que se verifican el cumplimiento de los requisitos esenciales, los Eurocódigos.
- 1992 - 1998, CEN publica los Eurocódigos en forma de 62 “pre-normas” o normas experimentales europeas (denominación ENV). En España no se llegan a publicar todos los Eurocódigos en español, sí los más requeridos por los proyectistas, véase Figura 1. 4.
- 2007 - 2008, Fecha prevista para la finalización de la conversión de los Eurocódigos de norma experimental (ENV) a norma europea (denominación EN).
- 2010, Final del periodo de coexistencia de los Eurocódigos con la normas nacionales (DIN, NF, BS, UNE...) que pudieran entrar en contradicción con aquellos y retirada de éstas.

Estas normas europeas son sin duda singulares y diferentes al resto de las normas europeas; no sólo por su contenido, no normalizan un producto concreto, sino también por su proceso de elaboración, y el hecho de que constituirán una herramienta fundamental de reconocido prestigio en el proyecto de las obras de edificación e ingeniería civil en el territorio de la Unión Europea.

¹⁰ Construction Products Directive - CPD (89/106/EEC), <http://ec.europa.eu/enterprise/construction/internal/cpd/cpd.htm>



Figura 1. 4. Portada de la versión ENV del Eurocódigo 3 Parte 1.1. "Reglas generales y reglas para la edificación" [UNE-ENV 1993-1-1:1996]

Una vez cumplimentado todo el programa de desarrollo de los Eurocódigos se dispondrá de un conjunto de 10 normas, véase Tabla 1. 1, armonizadas para los proyectos de construcción en la Unión Europea.

Tabla 1. 1. Contenidos de los Eurocódigos. Títulos oficiales en español según [UNE-EN 1990:2002]

CONTENIDOS DE LOS EUROCÓDIGOS	
NORMA	TÍTULO
EN 1990	Eurocódigo 0: Bases de cálculo de estructuras
EN 1991	Eurocódigo 1: Acciones en estructuras
EN 1992	Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón
EN 1993	Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero
EN 1994	Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas
EN 1995	Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera
EN 1996	Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica
EN 1997	Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico
EN 1998	Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes
EN 1999	Eurocódigo 9: Proyecto de estructuras de aluminio

Como puede deducirse de los títulos de las normas que constituyen el conjunto de los Eurocódigos, existen unas que tratan aspectos generales del proyecto de estructuras y otras específicas para diferentes materiales estructurales, la Figura 1. 5 pretende ilustrar las relaciones entre las normas de Eurocódigos.

Para finalizar esta introducción general a los Eurocódigos, es importante presentar el contexto normativo europeo en el que se integran. Los Eurocódigos forman parte de un conjunto de normativas relacionadas con la construcción más amplio que está formado por las normas de productos y materiales para la construcción, los ensayos de caracterización, los procesos de ejecución y el proyecto estructural, este último aspecto es el que compete a los Eurocódigos. La relación entre todas estas normas queda ilustrada en la Figura 1. 6. y la aplicación al proyecto del un puente en la Figura 1. 7.

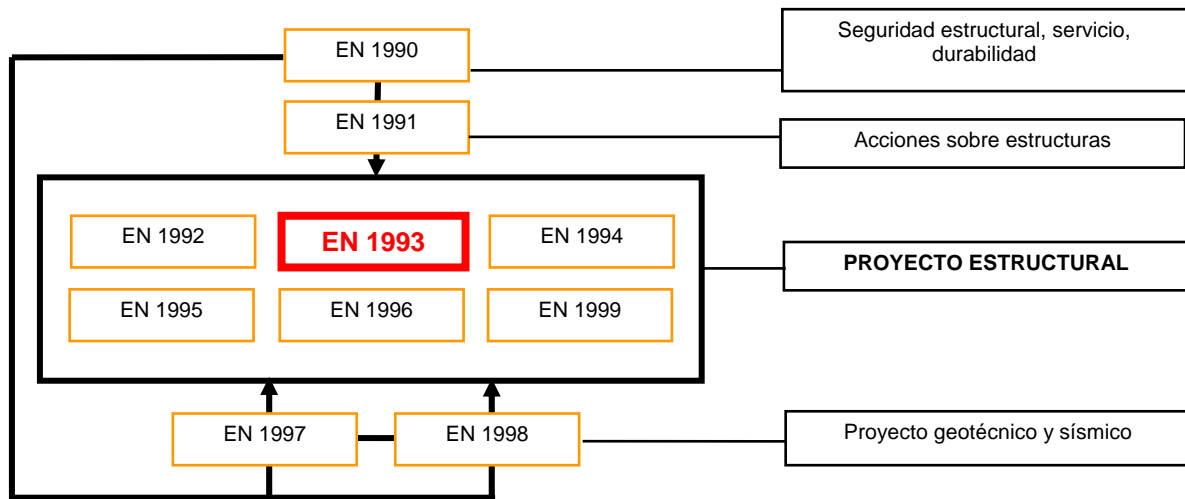


Figura 1. 5. Relaciones entre las 10 normas que constituyen el conjunto de los Eurocódigos.



Figura 1. 6. Familia de normas europeas de la construcción en la que se integran los Eurocódigos. Fuente: Eurocodes - Building the Future, <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>

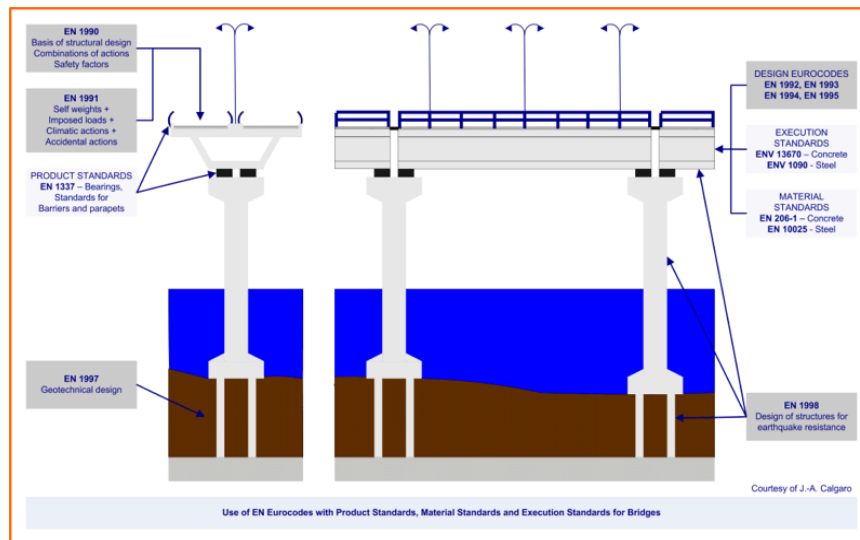


Figura 1. 7. Ejemplo de aplicación de la familia de normas europeas de la construcción a un puente. Fuente: Eurocodes - Building the Future, <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>

En cuanto a esta Tesis Doctoral respecta, el Eurocódigo 3: “Proyecto de estructuras de acero” es el documento que ha servido de referencia para desarrollar las investigaciones. El Eurocódigo 3 consta de 17 partes, véase Tabla 1. 2.

Tabla 1. 2. Relación de partes del Eurocódigo 3. Títulos oficiales en español según el AEN/CTN-140/SC3

EUROCÓDIGO 3	
PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ACERO	
PARTE	TÍTULO
Parte 1-1	Reglas generales y reglas para edificios
Parte 1-2	Estructuras expuestas al fuego
Parte 1-3	Perfiles y chapas de paredes delgadas conformadas en frío
Parte 1-4	Aceros inoxidables
Parte 1-5	Placas planas cargadas en su plano
Parte 1-6	Láminas
Parte 1-7	Placas planas cargadas transversalmente
Parte 1-8	Uniones
Parte 1-9	Fatiga
Parte 1-10	Tenacidad de fractura y resistencia transversal
Parte 1-11	Cables y tirantes
Parte 1-12	Reglas adicionales para la aplicación de la norma EN 1993 hasta aceros de grado S700

Tabla 1. 2. Relación de partes del Eurocódigo 3. Títulos oficiales en español según el AEN/CTN-140/SC3 (cont.)

EUROCÓDIGO 3	
PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ACERO	
PARTE	TÍTULO
Parte 2	Puentes
Parte 3	Torres, mástiles y chimeneas
Parte 4	Silos, depósitos y conducciones
Parte 5	Pilotes y tablestacas
Parte 6	Vigas Carril

Como se puede observar, las partes del Eurocódigo 3 aparecen agrupadas en 6 paquetes, véase la Figura 1. 8, una agrupación semejante se da en los Eurocódigos 2 al 6 y 9:

- Paquete 1: Reglas generales y reglas para la edificación.
- Paquete 2: Puentes
- Paquete 3: Torres, mástiles y chimeneas
- Paquete 4: Silos, depósitos y conducciones
- Paquete 5: Pilotes y tablestacas
- Paquete 6: Vigas Carril

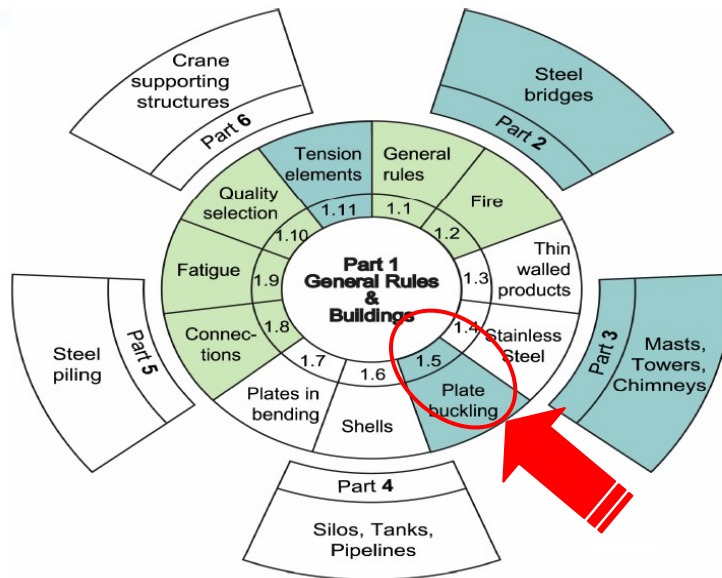


Figura 1. 8. Agrupación por “paquetes” de las partes del Eurocódigo 3: "Proyecto de Estructuras de Acero". Fuente: Eurocodes - Building the Future, <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>

Llegados a este punto es posible concretar la parte del Eurocódigo 3 que esta Tesis Doctoral ha empleado como punto de partida de las investigaciones: *“Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-5: Plated Structural Elements”*. [EN 1993-1-5: 2006].

Este documento aún no se ha publicado en español, se espera para 2008, su título oficial, de acuerdo con el Comité Técnico de Normalización de AENOR para el Eurocódigo 3, AEN/CTN-140/SC3, cuya tareas de secretaría técnica desempeña CALSIDER¹¹, véase Tabla 1. 2, es *“Eurocódigo 3: “Proyecto de estructuras de acero – Parte 1-5: Placas planas cargadas en su plano”*.

Esta Parte 1-5 del Eurocódigo contempla en su ámbito de aplicación el diseño de las placas de acero rigidizadas o sin rigidizar, cargadas en su plano, de elementos de sección en I o cajón para puentes. Su Anexo C *“Finite Element Methods of Análisis - FEM”* trata del empleo del MEF y de las imperfección iniciales recomendadas a considerar en los modelos.

Los contenidos del Anexo C suponen el consenso actual a nivel de Europa, en cuanto a documentos normativos se refiere, sobre la definición de las imperfecciones iniciales para los modelos a diseñar mediante el MEF. Esta Tesis Doctoral presenta recomendaciones adicionales al Anexo C tanto en relación a consideración de las imperfecciones geométricas como de las tensiones residuales.

Presentada la importancia de los Eurocódigos como herramienta de diseño y cálculo de estructuras y su relevancia en el ámbito de toda la Unión Europea, queda planteado el contexto de partida y de futura divulgación de los resultados de esta Tesis Doctoral y es posible comenzar con la exposición de la investigación realizada en relación con la CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

¹¹ CALSIDER, Calidad Siderúrgica, <http://www.calsider.es>

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA TESIS DOCTORAL

1.2.1. Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es proporcionar recomendaciones sobre la consideración de las imperfecciones iniciales para el análisis de placas de acero, de secciones armadas de puentes de acero y mixtas, mediante el MEF.

Se establece una condición a este objetivo principal, que estas recomendaciones se elaboren en un formato que sirva para facilitar a los proyectistas el diseño de secciones armadas de acero de puentes de acero o mixtos competitivas, seguras y económicas, mediante:

- Información específica sobre las tensiones residuales a considerar en los modelos,
- información de las imperfecciones geométricas basadas en tolerancias de fabricación realistas y
- discusión del efecto de las imperfecciones iniciales en diferentes tipos de secciones armadas y solicitaciones.

La información sobre las imperfecciones iniciales a considerar, tensiones residuales e imperfecciones geométricas, constituye la base de una metodología simplificada, como hemos avanzado, para su uso por los proyectistas, alternativa a los contenidos actuales del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1.5., [EN 1993-1-5: 2006], y que ofrecerá soluciones basadas en una modelización más realista.

La alternativa, respecto del citado Anexo C, de los trabajos desarrollados en esta Tesis Doctoral consiste en proporcionar información por separado de las imperfecciones iniciales, esto es, se presentan por separado las imperfecciones geométricas y las tensiones residuales. De esta forma se persigue una definición más exacta de las imperfecciones iniciales a considerar en el análisis mediante FEM.

El Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1.5. sólo proporciona información sobre imperfecciones geométricas equivalentes. Constituye la aproximación actual del Eurocódigo para considerar el efecto conjunto de las geométricas y de las tensiones residuales.

Para alcanzar el objetivo principal se establecen una serie de objetivos secundarios que se enumeran a continuación:

- Identificación y evaluación de la información existente sobre las imperfecciones empleadas en los reglamentos y normas para el diseño de estructuras de acero armadas, esto es, fabricadas a partir de placas de acero soldadas, y comparación de esta información con los datos de tolerancias de fabricación recogidos en normas de ejecución de estructuras y de productos de acero para la construcción.
- Análisis de la influencia de las imperfecciones iniciales en los resultados obtenidos en modelos MEF de diferentes tipologías de secciones armadas de acero y, además, sometidas a diferentes tipos de sollicitación.

Es importante aclarar que no es objeto de esta Tesis Doctoral discutir sobre los programas especializados para el análisis mediante el MEF ni sobre los procedimientos y rutinas de trabajo con los mismos. En la actualidad, el empleo de programas de diseño basados en el MEF está ampliamente extendido entre las personas tituladas en ingeniería dedicadas al diseño estructural y, por ello, se entiende que es posible centrar los desarrollos en uno de los aspectos más relevantes para el colectivo ya formado en el empleo de estos programas, el de disponer de recomendaciones para una modelización realista de las estructuras.

En resumen, la Tesis Doctoral se centra en profundizar en los procedimientos y estrategias para una correcta consideración de las imperfecciones iniciales a tener en cuenta en el diseño y comprobación mediante el MEF de estructuras de placas de acero. Que, como se demuestra en los capítulos siguientes, es imprescindible para obtener unos resultados realistas.

1.2.2. Alcance

El título de la Tesis Doctoral aspira a establecer una acotación clara del ámbito de trabajo de las investigaciones y, como resultados de las mismas, de las recomendaciones derivadas de las conclusiones obtenidas: CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

Desde el comienzo de este capítulo se ha empleado la denominación de “*secciones armadas*” para referirse a los elementos estructurales fabricados mediante placas de acero soldadas. Y es que esa denominación es la tradicionalmente empleada en el sector por los proyectistas y fabricantes de estructuras de acero, o estructuristas, para referirse a esos elementos estructurales fabricados “*a medida*” a partir de chapas de acero soldadas.

Las placas de acero se emplean en secciones armadas de estructuras de edificación, ampliamente en pórticos de inercia variable de edificios industriales y, más excepcionalmente, en estructuras singulares; para las cuales, caso de grandes luces, cargas importantes u otros condicionantes arquitectónicos, los perfiles laminados en caliente comercializados no pueden proporcionar una solución competitiva. También se emplean en la construcción naval, donde los espesores de las placas y su rigidización es aún más compleja que en el caso de los puentes. Pero esta Tesis Doctoral se centrará en la aplicación de las placas de acero a las estructuras de **puentes de acero y puentes mixtos de acero y hormigón**.

Aún existe una acotación más que es imprescindible para establecer el alcance, las investigaciones que se han desarrollado se focalizan en las **placas de acero cargadas en su plano**. Esto es, no se consideran placas sometidas a cargas fuera de su plano. Esta limitación de las investigaciones de la Tesis Doctoral no constituye ninguna merma de la aplicación de los resultados al proyecto de puentes ya que tanto las alas como las almas de las secciones armadas se comportan idealmente como placas cargadas en su plano.

Una vez centrado el ámbito de las investigaciones, también es importante concretar el alcance de los resultados obtenidos y su aplicabilidad.

El punto de partida de las investigaciones es el **Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1.5.**, [EN 1993-1-5: 2006], centrado en el análisis de placas de acero cargadas en su plano mediante el MEF. Los resultados de esta Tesis Doctoral proporcionan información adicional y, en algunos aspectos, alternativa al Anexo C sobre la definición de las imperfecciones iniciales a considerar en los modelos:

- Los resultados proporcionan **valores de imperfecciones geométricas relativos a las tolerancias de fabricación y normas de producto**.
- Se incluyen valores de las **tensiones geométricas y patrones de distribución** en las placas, actualmente no incluidos en el Anexo C.
- Además, se propone como alternativa a las deformadas iniciales propuestas en el Anexo C, una **deformada basada en la “forma de fallo” prevista del componente estructural ante las acciones específicas a las que se halle sometido**.

Para finalizar, los resultados se presentan de una forma que pretende ser de utilidad para los proyectistas, se propone una metodología simplificada, alternativa a los contenidos actuales

del Anexo C, y que ofrece soluciones realistas y validadas experimentalmente para los casos investigados.

No obstante, las recomendaciones son resultado de unos trabajos limitados a los casos investigados y su extrapolación u aplicación a otros casos podría no ofrecer un grado de seguridad adecuado.

Por lo tanto, estas recomendaciones no se pretenden de aplicación general, por ejemplo a casos diferentes de los presentados; esto es, modelos con diferentes tipos de carga o diferentes tipologías de componentes estructurales, incluyendo otros aceros, tipos de rigidización, esbelteces o variaciones en cualquier otro parámetro que pudiera afectar a las acciones o a la respuesta estructural; ya que la utilización de los resultados de esta Tesis Doctoral podría llevar a la obtención de resultados no realistas.

1.3. METODOLOGÍA

1.3.1. Aproximación a la consideración de las imperfecciones

Como ya se ha avanzado, el análisis de secciones armadas de acero, de las placas que las constituyen, mediante el empleo de programas basados en el MEF se está convirtiendo en una práctica habitual para el análisis y diseño de componentes estructurales seguros y competitivos para los puentes de acero y mixtos. En especial para el análisis de la estabilidad de placas de secciones armadas en I o en cajón solicitadas a compresión.

En la actualidad, el nivel de sofisticación de los ordenadores y de los programas de análisis numérico hacen posible que prácticamente cualquier estructura de secciones armadas de acero puede analizarse sin limitación a causa de la complejidad de la geometría, la sensibilidad a la influencia de las imperfecciones o las no linealidades del comportamiento de los componentes estructurales o del material.

Sin embargo, la persona encargada del proyecto estructural debe aún resolver, sólo sobre la base de su conocimiento, los siguientes aspectos:

- Definir un modelo numérico correcto, adecuado para representar el problema estructural que se pretende estudiar.
- Obtener los resultados numéricos capaces de proporcionar la información necesaria para caracterizar la resistencia y comportamiento, frente a los estados límite último y de servicio previstos, de los componentes estructurales y así conseguir un diseño seguro y competitivo.

Uno de los aspectos clave para resolver de manera correcta esos retos es, en el caso del análisis de las placas de acero, la correcta definición, en forma y magnitud, de la imperfección inicial. De esta forma se conseguirá un correcto análisis del fenómeno de pandeo, que se da en las placas solicitadas a compresión, y que es fundamental para una correcta predicción de su resistencia última.

La investigación toma como punto de partida el Anexo C “*Métodos de análisis basados en el MEF*” del Eurocódigo 3 Parte 1.5., [EN 1993-1-5: 2006], que proporciona unas recomendaciones breves basadas en el empleo de unas imperfecciones geométricas equivalentes.

En definitiva, el Anexo C no proporciona información exhaustiva sobre cómo considerar las tensiones residuales, por ello proporciona unas sencillas recomendaciones de imperfecciones iniciales denominadas “*imperfecciones geométricas equivalentes*”. Por lo tanto, las tensiones residuales se consideran de forma implícita en las imperfecciones geométricas iniciales. Además, el Anexo C carece de recomendaciones detalladas sobre las formas y amplitudes más adecuadas que los proyectistas deben emplear en los componentes estructurales de acuerdo con las solicitaciones específicas estudiadas.

En esta Tesis Doctoral, se proporcionan unas recomendaciones para definir de forma correcta las imperfecciones iniciales en los modelos MEF de los componentes de placas de acero cargadas en su plano. Estas recomendaciones han sido desarrolladas atendiendo a un planteamiento práctico: que sean de aplicación por la ingeniería de puentes.

Atendiendo a las tres formas de considerar las imperfecciones iniciales identificadas por H. Schmidt, [Schmidt, 2002]:

- Realista: Requiere una modelización basada en estudios estadísticos de las imperfecciones en los componentes estructurales. Esta aproximación no es práctica en ingeniería.
- Pesimista: Se basa en la selección del patrón pésimo de imperfección. La práctica habitual es emplear el primer modo de pandeo, o combinaciones de varios modos de pandeo. Puede dar lugar a resultados muy conservadores.
- Estimuladora: Consiste en seleccionar un patrón imperfección geométrica equivalente, tan simple como sea posible, capaz de estimular un comportamiento realista del pandeo de la placa de acero. En la práctica se trata de emplear formas obtenidas de los modos de pandeo, pero las amplitudes de las mismas deben calibrarse.

En esta Tesis Doctoral se presenta una metodología basada en la aproximación “*estimuladora*”. De esta forma se puede desarrollar una metodología sencilla y práctica para los proyectistas pero que exige una investigación para definir de manera correcta las amplitudes y formas o patrones a emplear para las imperfecciones.

1.3.2. Metodología y estructuración de la Tesis Doctoral

La metodología seguida en los trabajos de investigación para el desarrollo de las recomendaciones para la CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS

DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, se puede presentar en unos bloques que agrupan trabajos claramente diferenciados:

PRIMER BLOQUE: Estado del conocimiento en el ámbito del análisis y diseño de estructuras de placas de acero para puentes de acero y mixtos

Como punto de partida es imprescindible establecer claramente el estado actual del conocimiento sobre el comportamiento estructural de las placas de acero cargadas en su plano. Este bloque recoge las investigaciones orientadas a presentar el estado del conocimiento sobre el comportamiento de las placas de acero sometidas a cargas de compresión, incluyendo el análisis de la influencia de las imperfecciones en su comportamiento, principalmente pandeo.

Por otro lado, es importante identificar las fuentes, principalmente procedente de la normativa de ejecución de estructuras de acero y normas de producto, que sirven para establecer las imperfecciones geométricas, en forma de tolerancias de fabricación, que son previsibles en los componentes fabricados a partir de placas de acero soldadas. Para ello, se plantea un estudio sobre la normativa y procedimientos relacionados con el control de las tolerancias de fabricación, en especial para puentes.

Finalmente, se plantea una investigación, semejante a la descrita para las imperfecciones geométricas, para identificar las tensiones residuales previsibles en los componentes estructurales de acero de los puentes, atendiendo principalmente a los efectos producidos por los trabajos de soldadura de las placas.

Estos trabajos se presentan en el Capítulo 2 de la Tesis Doctoral.

SEGUNDO BLOQUE: Investigación, mediante análisis numéricos y contraste con resultados experimentales, sobre la influencia de las imperfecciones iniciales en el comportamiento de las placas de acero cargadas en su plano.

Este bloque es el fundamental y recoge los trabajos de investigación más importantes que se presentan en la Tesis Doctoral.

Como ya se ha presentado con anterioridad, el Anexo C “*Métodos de análisis basados en el MEF*” del Eurocódigo 3 Parte 1.5., [EN 1993-1-5:2006], proporciona unas breves recomendaciones sobre el análisis de placas de acero, cargadas en su plano, mediante programas basado en el MEF.

El Anexo C destaca la importancia de la consideración de las imperfecciones iniciales, tanto las imperfecciones geométricas, principalmente debidas a las tolerancias de fabricación, como las tensiones residuales, ocasionadas fundamentalmente por los procesos de soldadura de las placas de acero. Sin embargo, sólo proporciona unas imperfecciones geométricas equivalentes como método para considerar los efectos conjuntos de las imperfecciones geométricas y de las tensiones residuales.

Es por ello que en este segundo Bloque de la Tesis Doctoral se pone en práctica una alternativa al Anexo C mediante una innovación basada en la consideración por separado de imperfecciones geométricas y tensiones residuales, para la definición de las imperfecciones iniciales en los modelos para el análisis mediante el MEF, véase un sencillo esquema de la innovación en la Figura 1. 9.

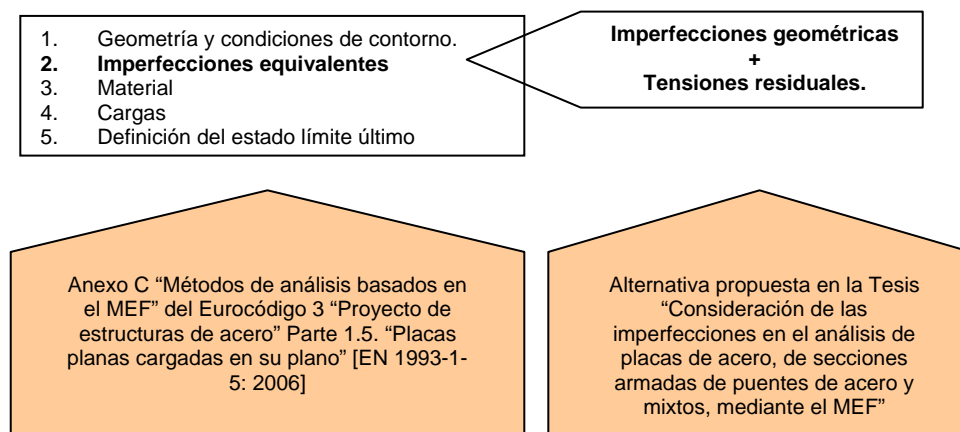


Figura 1. 9. Esquema de la innovación propuesta en la Tesis Doctoral

Con el objeto de establecer la viabilidad de la alternativa propuesta, se investiga la influencia de las imperfecciones iniciales en placas de acero de configuraciones típicas de puentes de acero y mixtos sometidas a sollicitaciones también típicas de estas estructuras.

La investigación consta de dos partes:

- Investigación numérica mediante análisis paramétricos, empleando un programa basado en el MEF, para la evaluación de la influencia de las imperfecciones geométricas y tensiones residuales: amplitudes, formas y efecto de su consideración conjunta o por separado.
- Contraste de la investigación numérica con resultados experimentales de ensayos realizados en el marco del proyecto COMBRI, [COMBRI, 2003].

Este segundo Bloque esta dividido en tres Capítulos que tratan tres casos de solicitaciones típicos de las placas de acero empleadas en estructuras de puentes:

- Capítulo 3. Aplicación a elementos sometidos a compresión y flexión con comportamiento de tipo “*columna*”.
- Capítulo 4. Aplicación a vigas armadas, rigidizadas y no rigidizadas, sometidas cortante y flexión.
- Capítulo 5. Aplicación a vigas armadas sometidas a carga concentrada.

TERCER BLOQUE: Conclusiones y líneas de investigación futuras.

En este último Bloque se evalúa los resultados de la investigación resultantes de la aplicación de la propuesta alternativa en los tres casos del Segundo Bloque mediante el contraste de los resultados obtenidos mediante los análisis paramétricos mediante el MEF con los resultados experimentales.

Como resultado final se proporciona las recomendaciones, presentadas en el Capítulo 6, para la CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN EL ÁMBITO DEL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PLACAS DE ACERO PARA PUENTES DE ACERO Y MIXTOS

2.1. APLICACIÓN DE LAS PLACAS DE ACERO EN LAS SECCIONES ARMADAS DE ESTRUCTURAS DE PUENTES

Como paso previo a la presentación del estado del conocimiento en el ámbito del análisis de las placas de acero cargadas en su plano, se considera interesante establecer el contexto de su aplicación en estructuras de puentes de acero y mixtos.

Las placas de acero constituyen el componente de partida más sencillo para llevar a cabo el análisis del comportamiento estructural de las secciones armadas. Sin embargo, se asume necesario partir de la aplicación estructural, puente, pasando por la sección transversal armada, esto es, compuesta por placas soldadas, para presentar correctamente el problema de las placas cargadas en su plano.

Este apartado pretende ilustrar la tipología de puente en la que el conocimiento sobre las placas de acero es más relevante para lograr un diseño competitivo de las secciones armadas de su estructura.

De la variedad de tipologías de puentes existentes, las investigaciones que se presentan en esta Tesis Doctoral están especialmente orientadas a los **puentes viga mixtos de tablero superior**, aunque los resultados también son aplicables a los de acero y se pueden extender al estudio de secciones armadas de otras tipologías. Los trabajos no serán de aplicación, obviamente, a puentes viga resueltos mediante celosías sino sólo a aquellos de **vigas de alma llena**.

Para la definición de “*puente viga mixto*” se toma el siguiente extracto de la Tesis Doctoral “*Evolución tipológica y estética de los puentes mixtos en Europa*” de Jorge Bernabeu Larena, [Bernabeu, 2004]:

“...aquella estructura que, con la función principal de materializar una plataforma de paso con el fin de salvar un determinado obstáculo o la interferencia con otra vía, presenta en

su estructura secciones resistentes en las que el acero estructural y el hormigón trabajan solidariamente...tipología estructural de los puentes viga, para los que el tablero y, por tanto, la sección mixta están solicitados principalmente a flexión.... dinteles de tablero superior...[en] los que la losa superior de hormigón definirá el camino de rodadura.”

Para ilustrar a qué tipo de estructuras se refiere la Tesis Doctoral, se presentan a continuación algunos ejemplos de puentes viga mixtos de tablero superior correspondientes a secciones tipo **bijácena**, o de doble viga, **cajón** y de **perfiles laminados**.

La estructura de sección tipo bijácena, o de doble viga, se presenta a continuación con el “Viaducto sobre el Arroyo las Piedras” en la Línea de Alta Velocidad entre Córdoba y Málaga, el primer viaducto mixto de las Líneas de Alta Velocidad Españolas, [Millanes, 2003] ,[Millanes, 2007]. La sección transversal del puente se observa en la Figura 2. 1.



Figura 2. 1. Sección transversal del “Viaducto Arroyo las Piedras”, [Millanes, 2007]

Como se aprecia, este tipo de sección transversal bijácena está constituida por dos vigas armadas de acero que, en este viaducto, alcanzan los 3,85 metros de canto. Sobre las vigas, cuyos conectadores se aprecian en el ala superior, véase Figura 2. 1, se conecta la losa superior, de 14,00 metros de anchura y espesor variable desde los 0,41 metros, en el eje longitudinal, hasta los 0,22 metros en el borde de los voladizos. La losa superior

también apoya y se conecta a unos perfiles laminados en caliente, de sección tipo IPN, colocados cada 2,00 metros perpendicularmente las alas superiores.

El acero empleado es el denominado comercialmente "*Corten*", S-355 J2G2W, de prestaciones mejoradas para su exposición a la intemperie sin necesidad de otros revestimientos de protección anticorrosiva.

La estructura resultante es una sección mixta de acero y hormigón de canto constante, 4,26 metros, cuya estabilidad se garantiza mediante diafragmas transversales, cada 8 metros, y la rigidez a torsión mediante una losa inferior, que sustituye a la tradicional celosía de acero, para generar una sección cerrada frente a las solicitaciones de torsión.

Se adopta una solución de doble acción mixta, la referencia [Martínez Calzón, 1978] presenta de forma muy didáctica este tipo de solución estructural, tanto a nivel del tablero superior como a la altura de las alas inferiores, en las inmediaciones de las pilas.

Como anticipo a los estudios que se presentan en esta Tesis Doctoral, es interesante resaltar la ausencia de rigidizadores longitudinales en las almas de las vigas. En este caso el proyectista ha optado por una solución original basada en unas "*células triangulares*" que se pueden apreciar en las alas de las vigas, Figura 2. 2.



Figura 2. 2. Viga armada con "células triangulares" a la altura de las alas, [Millanes, 2007]

Estas células “...sustituyen a la rigidización longitudinal de almas... [y]...mejoran la estabilidad de alas y almas comprimidas en montaje y estados de servicio”, [Millanes, 2007]. La rigidización de las almas queda reducida a unos rigidizadores verticales cada cuatro metros.

Como ya se presentará más adelante, en este mismo capítulo, la rigidización de las almas de las vigas armadas es un aspecto clave de la seguridad estructural de las placas frente a solicitaciones de compresión y de la competitividad económica de la solución estructural.

De este ejemplo, podemos identificar el alma, en los apoyos, y el ala inferior, en el centro de los vanos, como las que exigen un estudio detallado del comportamiento ante solicitaciones de compresión: el ala inferior ante las cargas de servicio y el alma durante el proceso de empuje y, en servicio, en los apoyos.

De ahí, las placas cargadas en su plano a estudiar serian dos: alma y ala inferior, en una longitud delimitada por los rigidizadores verticales, en las zonas e hipótesis relativas de sollicitación pésima. Se consideran los rigidizadores suficientemente rígidos como para adoptar la hipótesis de comportamiento de la placa aislada entre apoyos rígidos: los rigidizadores transversales y las alas, caso del alma.

Las alas superior, en el centro del plano, e inferior, en la zona de los apoyos, también están sometidas a compresión en su plano pero la acción mixta con el hormigón hace que el pandeo de la placa de acero sea menos probable que los casos previos identificados.

Las figuras siguientes, véase Figura 2. 3 y Figura 2. 4, ayudan a visualizar la importancia de la estructura del Viaducto: una viga continua con luces $50,40 + 17 \times 63,50 + 44,00 + 35,00$ metros, que en el momento de su proyecto y construcción constituyó el viaducto de mayor luz de su tipología en el ámbito de los puentes de ferrocarril de alta velocidad.



Figura 2. 3. Empuje del puente y unión de tramos durante la construcción, [Millanes, 2007]



Figura 2. 4. "Viaducto Arroyo las Piedras" finalizado, [Millanes, 2007]

A continuación, para ilustrar los puentes viga mixtos de sección tipo cajón, se presenta el "Viaducto de Tina Menor", [Martínez Cutillas, 2001], [Manterola, 2003], construido cerca de San Vicente de la Barquera (Cantabria), en la Autovía del Cantábrico.

Este viaducto, diseñado por los ingenieros Javier Manterola Armisen y Antonio Martínez Cutillas, de la oficina de ingeniería Carlos Fernández Casado, tiene una longitud total de 378,50 metros y está formado por cuatro vanos con luces de 64,25, 125,00, 125,00 y 64,25 metros, véanse Figura 2. 5 y Figura 2. 6.

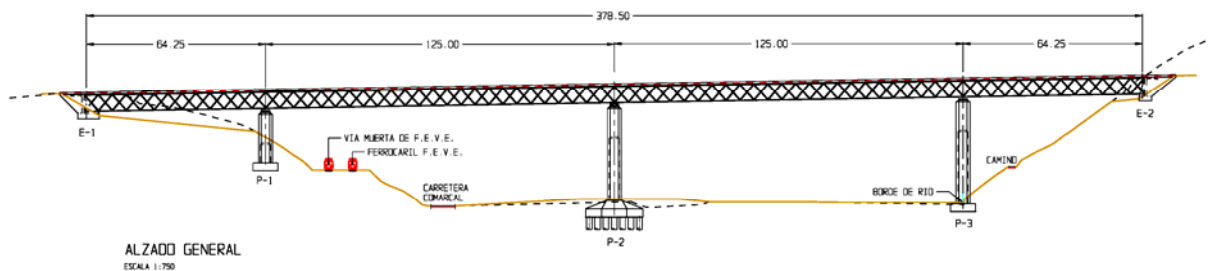


Figura 2. 5. Alzado general del "Viaducto de Tina Menor", [Martínez Cutillas, 2001].

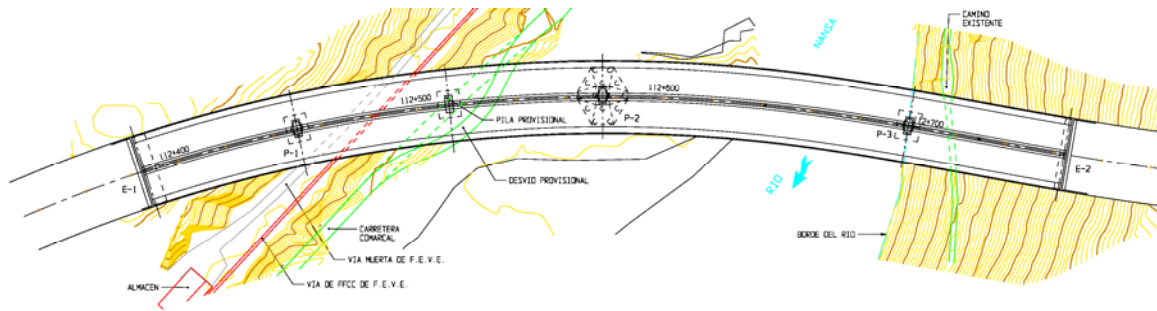


Figura 2. 6. Planta general del "Viaducto de Tina Menor", [Martínez Cutillas, 2001].

El tablero es continuo, formado por una sección en cajón mixta, con un canto constante de 6,50 metros, una anchura de 10,00 metros y una celosía de acero, en cruz de San Andrés, para apuntalamiento de los vuelos, que permite que la sección transversal alcance los 30,00 metros de anchura necesarios para las dos calzadas de la autovía, véase la Figura 2. 7 y Figura 2. 8.

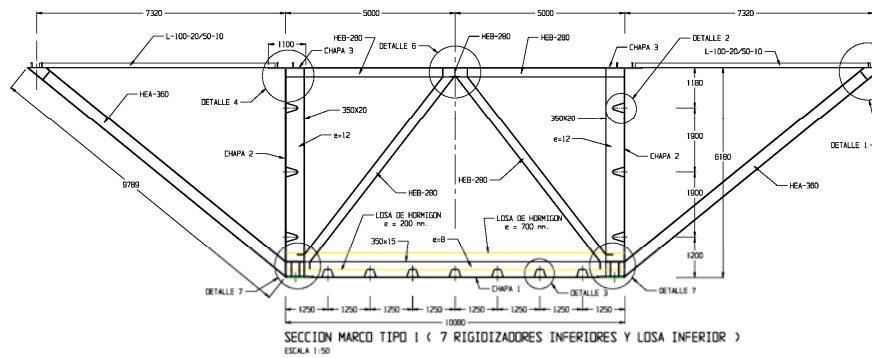


Figura 2. 7. Detalle de sección transversal (acero empleado S 355 J0), [Martínez Cutillas, 2001].



Figura 2. 8. Interior de la sección en cajón, [Martínez Cutillas, 2001].

La sección mixta del Viaducto de Tina Menor se beneficia de las sinergias debidas al trabajo conjunto del acero y el hormigón:

- El acero con una elevada relación resistencia / peso posibilita una sección con chapas delgadas y esbeltas pero susceptibles de tener problemas de inestabilidad cuando se solicitan a compresión; este problema se resuelve eficazmente mediante el empleo de rigidizadores, en este caso se puede observar el empleo de rigidizadores longitudinales, trapezoidales, y rigidizadores transversales, de sección en T, véase Figura 2. 7 y Figura 2. 8.
- El hormigón, por el contrario, tiene una resistencia elevada a compresión que, combinada con elementos poco esbeltos, no presenta problemas de estabilidad; estas características ayudan a resolver eficazmente las zonas de la sección en compresión, el tablero superior y, gracias a la solución de doble acción mixta, el ala inferior en las zonas de apoyo.

La diferencias entre el “*Viaducto de Arroyo las Piedras*” y el “*Viaducto de Tina Menor*” son muchas y no es correcto comparar las soluciones dado que los problemas que resuelven son muy diferentes, tanto en lo que se refiere a luces como a solicitaciones en las secciones, no obstante, es importante destacar que las soluciones de rigidización de las placas de acero que configuran las almas son radicalmente distintas.

En este caso, las placas cargadas en su plano cuya estabilidad frente a solicitaciones de compresión en su plano, es preciso estudiar durante la fase de diseño, son las almas rigidizadas, en los apoyos, y el ala en la sección del centro del vano. De nuevo las placas a estudiar quedarían limitadas por los rigidizadores transversales.

En el “*Viaducto de Arroyo las Piedras*”, con un canto menor, 3,85 metros, se evita el empleo de rigidizadores longitudinales, en el caso del “*Viaducto de Tina Menor*”, con un alma de 6,50 metros, es preciso contar con tres rigidizadores longitudinales de sección trapezoidal.

Más adelante se ampliará la discusión sobre la estabilidad de las placas de acero cargadas en su plano y el diseño competitivo de las mismas.

Para finalizar esta presentación del contexto de aplicación de las placas de acero, se presenta la tercera y última tipología incluida en este apartado, el puente viga resuelto mediante perfiles laminados.

En realidad, esta tipología estructural se presenta como contraste respecto de las dos anteriores ya que emplea secciones de acero de mayor espesor y por tanto no presentan una problemática tan importante de la estabilidad de las placas de acero como las dos previas. Además, la sección esta formada por varios perfiles laminados en caliente comerciales, esto es, no se fabrican a partir de placas de acero soldadas para configurar secciones armadas.

Este tipo de soluciones tiene su aplicación en puentes de luces pequeñas ya que el empleo de perfiles laminados en caliente las hace demasiado pesadas para luces mayores.

El caso del “*Puente sobre el río Leysse*” en Chambéry (Francia), [Arcelor, 2007], sirve para ilustrar una aproximación completamente distinta a la de los dos casos anteriores. En la Figura 2. 9 se puede observar el puente desde una vista inferior. La sección transversal se presenta en la Figura 2. 10.



Figura 2. 9. “Puente sobre el río Leysse”, Chambéry (Francia), [Arcelor, 2007].

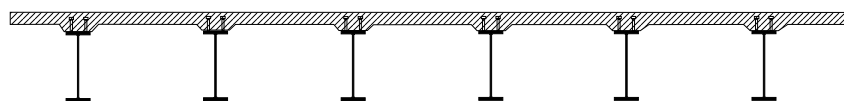


Figura 2. 10. Sección transversal del “Puente sobre el río Leysse”, [Arcelor, 2007]

Se trata de un puente de 34,20 metros de luz, con un tablero de 14,48 metros de anchura que se resuelve, mediante 6 perfiles laminados en caliente de sección tipo HL 1100, 1100

mm. de canto, y acero tipo S 460, denominado comercialmente por ArcelorMittal¹ como HISTAR.

Los perfiles laminados en caliente proporcionan un alto grado de industrialización de la estructura del puente ya que, a diferencia de las secciones bijácena o cajón, no es necesaria su fabricación en taller por parte de los estructuristas sino que es suministrada directamente por la industria siderúrgica.

Además, su compacidad, relación espesor / canto, hace que el perfil HL empleado, de entre 30 y 40 mm. en las alas y 1100 mm. de canto, no requiera ninguna rigidización para garantizar la estabilidad de alma o alas. En definitiva, no existen problemas de inestabilidad de las placas cargadas a compresión en su plano y por lo tanto no serán objeto de aplicación de los resultados de esta Tesis Doctoral.

La parte negativa de esta tipología es el elevado peso de acero por m² construido respecto de las secciones armadas. Con el objeto de aumentar la competitividad de estas soluciones, básicamente de reducir su peso por m², se ha desarrollado una solución que permite un cierto empotramiento en los apoyos, Figura 2. 11, lo cual reduce el momento y flecha en el centro del vano y permite secciones de menor canto.



Figura 2. 11. Detalle de unión en apoyos del "Puente sobre el río "Oder" (Alemania), [Arcelor, 2007]

El empleo de perfiles laminados en caliente tiene una aplicación especialmente extendida en Francia para puentes mixtos de ferrocarril, a través de una tipología de sección en la que los perfiles quedan totalmente embebidos en el tablero de hormigón, Figura 2. 12.

¹ ArcelorMittal, con sede en Luxemburgo y numerosas plantas en España, es líder mundial en producción de acero, www.arcelormittal.com la información sobre sus productos de acero para la construcción está disponible en www.constructalia.com

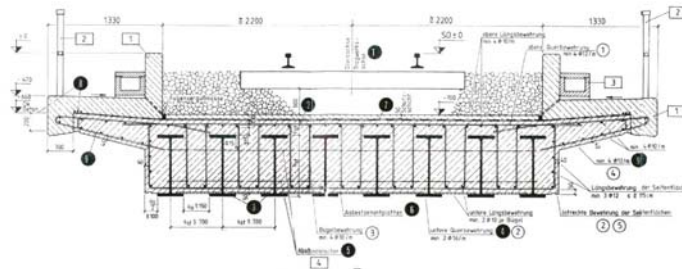


Figura 2. 12. Perfiles laminados en caliente embebidos en el tablero. Puentes ferroviarios franceses, [Arcelor, 2007].

Finalizada la presentación de los puentes viga mixtos de tablero superior correspondientes a secciones tipo **bijácena**, o de doble viga, **cajón** y de **perfiles laminados** es posible presentar una serie de consideraciones que soportan la necesidad de los trabajos de investigación de esta Tesis Doctoral.

En cuanto al empleo de secciones armadas o de perfiles laminados en caliente.

Como se ha presentado los perfiles laminados en caliente proporcionan soluciones sencillas y fácilmente industrializables para puentes de único vano y luces en el entorno de 30,00 metros. La compacidad de los perfiles laminados en caliente hace sencillo el diseño ya que no se esperan fallos de estabilidad en el alma o en las alas, sin embargo dan lugar a soluciones con altos consumos de acero que difícilmente compiten con las soluciones basadas en vigas prefabricadas de hormigón.

La menor importancia de los fenómenos de inestabilidad de placas en esta tipología hace que no se estudie en esta Tesis Doctoral.

Para luces mayores, las secciones armadas, fabricadas a partir de placas de acero soldadas, ofrecen soluciones más competitivas que los perfiles laminados en caliente. El diseño “a medida” de la sección permite una optimización de la misma de forma que se reduce el consumo de acero, sin embargo exige un mayor esfuerzo de diseño y comprobación de los componentes más esbeltos sometidos a compresión, alma y alas.

En cuanto al empleo de secciones armadas bijácena o cajón.

Salvo el caso de los puentes de perfiles laminados en caliente empleados principalmente en Francia, las soluciones de puentes mixtos más extendidas son la bijácena y el cajón.

En cuanto al empleo de las secciones tipo bijácena o cajón, es más competitiva la bijácena para puentes rectos, también incluso en caso de radios de curvatura altos. En cuanto al cajón, será la opción óptima en puentes con luces importantes o requisitos de rigidez torsional importante, caso de radios cerrados.

En definitiva, la diferenciación básica entre ambas tipologías se puede resumir de forma sencilla en base a las ventajas e inconvenientes que ofrece, por un lado, la simplicidad constructiva de la sección bijácena y, por otro, la excelente rigidez a torsión de la sección en cajón, véase la Tabla 2. 1.

Sin embargo, a pesar de que técnicamente es posible precisar la idoneidad de una u otra tipología, existen aspectos más subjetivos que también influyen en la selección. Por ejemplo de ámbito geográfico o cultural, en Francia se prefiere la solución bijácena mientras que en España está más extendida la sección en cajón, con tipologías y aplicaciones tales como las basadas en la doble acción mixta y el cajón estricto que han alcanzado un grado de desarrollo reconocido internacionalmente, [Martínez Calzón, 1995], [Millanes, 2001], [Rui-Wamba, 2003], [Millanes, 2006].

Para el objeto de esta Tesis Doctoral, el estudio de las dos tipologías es relevante para las investigaciones desarrolladas y las conclusiones obtenidas les son de aplicación a ambas.

Tabla 2. 1. Análisis de las tipologías bijnácena y cajón, [Bernabeu, 2004]

VENTAJAS	INCONVENIENTES
SECCIÓN TIPO BIJÁCENA	
Construcción en taller muy industrializada	Duplicación del frente de viento
Transportes y ensamblajes en obra muy simples	Peor respuesta resistente frente a cargas asimétricas
Facilidad de montaje mediante empuje o grúas	Difícil adaptación a montajes por voladizos sucesivos
Facilidad y rapidez de las uniones en taller y obra	Mayor superficie de pintura
Facilidad de ejecución de la losa mediante carros móviles	Mayor dificultad de inspección y mantenimiento
Gran garantía de calidad por la limpieza de sus uniones	Dificultad de controlar la inestabilidad de las platabandas inferiores en zonas de momentos negativos
Máximo aprovechamiento del ancho eficaz de las alas inferiores	Imposibilidad de trazados muy curvos o muy esviados
Supresión de los rigidizadores de fondo	Menores posibilidades estéticas
Máxima rapidez de ejecución y montaje	
SECCIÓN TIPO CAJÓN	
Perfecta adecuación a puentes curvos y esviados	Mayor dificultad de despiece y de ejecución en taller
Mínima incidencia de los efectos de cargas asimétricas	Condiciones de transporte y ensamblaje en obra más desfavorables
Reducción del frente de viento	Mayor mano de obra
Mayor facilidad de mantenimiento e inspección	Mayores dificultades de ejecución en obra
Óptimo aprovechamiento de la doble acción mixta	Mayor necesidad de soldadura en obra
Posibilidad de incluir apoyos interiores longitudinales de la losa	Dificultad de ejecución de la losa mediante carros móviles
Idoneidad para conducciones internas	Necesidad de rigidización de la chapa de fondo
Mayores posibilidades estéticas	

En cuanto a la competitividad de los puentes mixtos.

El acero es un material estructural ampliamente utilizado en la edificación y la obra civil en general. No obstante, existen aspectos técnicos tales como:

- el desarrollo de nuevos aceros de límites elásticos más altos;

- las técnicas de fabricación de productos de acero relacionadas con los procesos de soldadura y conformado en frío y en caliente;
- las nuevas posibilidades de ejecución y montaje de estructuras de acero;
- el empleo de métodos de diseño avanzados mediante el uso de ordenadores;

y, por otro lado, económicos:

- la competencia de otros materiales estructurales;
- los costes de fabricación y ejecución, medios y plazos;

que conducen al empleo de soluciones estructurales cada vez más ligeras y más esbeltas. Este hecho plantea la necesidad del estudio de la estabilidad de los elementos y estructuras de acero, [IABSE, 2005].

En el caso particular de los puentes de acero y mixtos, éstos deben competir con las soluciones basadas en hormigón. Los puentes viga de alma llena mixtos presentados en este apartado proporcionan una solución competitiva en el rango de luces comprendido entre los 50 y 125 m; no se ha encontrado en la bibliografía un acuerdo en unos rangos concretos.

Por el contrario, sí se pueden presentar unas estrategias generalmente aceptadas para garantizar la competitividad de las soluciones estructurales basadas en acero:

- Minimización de material empleado en la estructura; aceros de límites elásticos más elevados.
- Optimización del diseño estructural; considerando tanto la fase de final como la de ejecución o lanzamiento, en el caso de lanzamiento, la reducción del peso propio disminuye las solicitaciones,
- Reducción de costes de fabricación; simplificación de las secciones armadas con una disminución del número de rigidizadores para abaratar la fabricación,

En definitiva, soluciones más esbeltas y de ejecución más sencilla, véase Figura 2. 13, que exigen un estudio detallado de estabilidad de la solución estructural adoptada para garantizar su seguridad en servicio, más específicamente, frente a las acciones que generen solicitaciones de compresión.

Es por ello, que diversos proyectos de investigación a nivel europeo han tratado y tratan de desarrollar nuevos conocimientos y herramientas, en ámbitos muy concretos, para

incrementar la competitividad: aplicación en luces cortas y medias, [S&MSpans, 1998], consideración de fenómenos relacionados con la inestabilidad como el pandeo lateral torsional, [LTB, 1999] y empleo de aceros de límites elástico más elevados, [S460, 1999], [HighStrength, 2001].

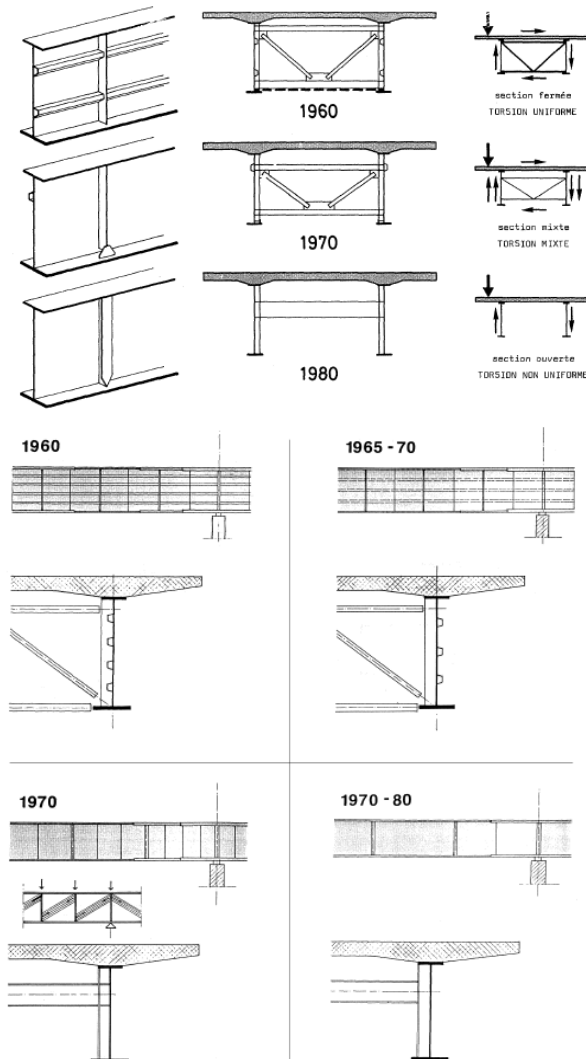


Figura 2. 13. Evolución de las secciones armadas en los puentes mixtos, [Bernabeu, 2004].

Es esta necesidad de garantizar la competitividad de los puentes mixtos la que soporta la investigación planteada en esta Tesis Doctoral: ayudar a producir diseños más competitivos a través de una predicción más realista del comportamiento de las secciones mediante la correcta CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

2.2. COMPORTAMIENTO DE LAS PLACAS DE ACERO SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN

2.2.1. Métodos de análisis de las placas de acero

En el apartado anterior se ha presentado el contexto de aplicación de los resultados de los trabajos de esta Tesis Doctoral, los puentes viga de alma llena resueltos mediante estructuras armadas mixtas de acero y hormigón. Más concretamente, se han presentado las secciones armada tipo cajón y bijácena.

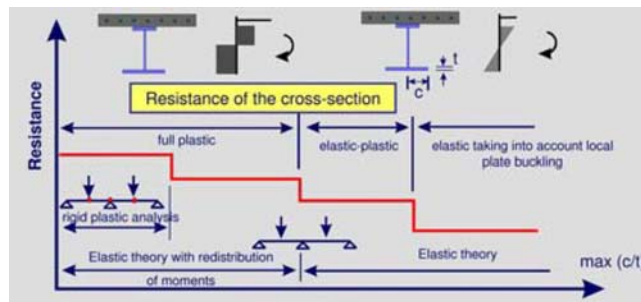
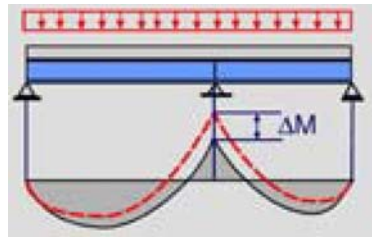
Para el diseño de estas estructuras, existen instrucciones de construcción específicas, elaboradas, en España, por el Ministerio de Fomento:

- *“IAP. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera”, [IAP, 1998].*
- *“RPM. Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras”, [RPM-95].*
- *“RPX. Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras”, [RPX-95].*
- [RPM-RPX, 2000] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2000). *“Manual de aplicación de las recomendaciones RPM-RPX/95”*. Madrid, España.

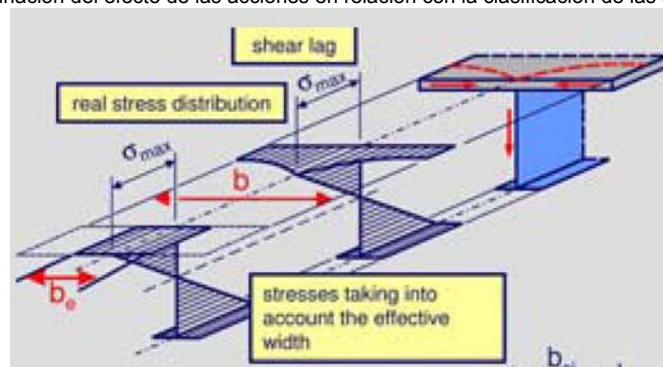
A nivel de Europa, las metodologías y formulaciones quedan recogidas en los Eurocódigos estructurales relacionados con el proyecto de puentes:

- Eurocódigo 3: *“Proyecto de estructuras de acero” – Parte 2: “Puentes de acero”, [EN 1993-2:2006].*
- Eurocódigo 3: *“Proyecto de estructuras de acero” – Parte 1-5: “Placas planas cargadas en su plano”, [EN 1993-1-5: 2006].*
- Eurocódigo 4: *“Proyecto de estructuras de mixtas de acero y hormigón” – Parte 2: “Reglas para puentes”, [prEN 1994-2:2005].*

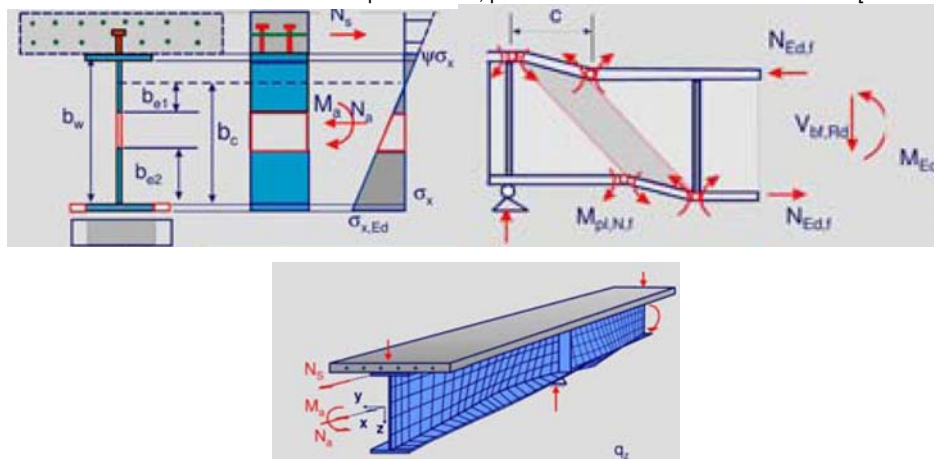
Para ilustrar de manera sencilla el procedimiento de diseño de las secciones de una viga armada de un puente, el diseño global no es objeto de la presente Tesis Doctoral, se propone el esquema simplificado de la Figura 2. 14. En la figura no se incluyen las comprobaciones frente a cargas concentradas, se presentarán más adelante en este mismo apartado.



Determinación del efecto de las acciones en relación con la clasificación de las secciones



Sección efectiva atendiendo efectos de arrastre por cortante, pandeo e interacción de ambos efectos [Johansson, 2007]



Comprobaciones en estado límite último (ELU) flexión, cortante, pandeo lateral torsional

Figura 2. 14. Esquema simplificado de diseño frente a ELU de la sección de una viga mixta, [Kulmann, 2008].

Para todas las comprobaciones a efectuar en las secciones existe un factor común que determina su resistencia última, el nivel de inestabilidad provocado por las sollicitaciones de compresión. En el primer apartado del Capítulo, se ha presentado la necesidad de

producir diseños competitivos de puentes mixtos mediante secciones más esbeltas, con menos consumo de acero y de operaciones de rigidización.

Es por ello, que el correcto tratamiento de los problemas de estabilidad en placas de acero es trascendental en el diseño de puentes. Las investigaciones y desarrollos de la presente Tesis Doctoral se centran en proporcionar unas recomendaciones para el análisis mediante el MEF.

Antes de tratar el diseño mediante el MEF, que será objetivo exclusivo de los siguientes capítulos, es importante sentar las bases del comportamiento de las placas solicitadas a compresión y los principios para analizar como se produce la inestabilidad o pandeo.

El problema de la estabilidad de elementos estructurales no es nuevo, Leonard Euler publicó su famosa fórmula sobre la estabilidad de las columnas en 1744, [Euler, 1744]. El denominado **problema de la estabilidad** trata del estudio de los elementos sometidos a compresión, la relación entre la acción de compresión y la deformación producida en el elemento hasta alcanzar el máximo valor de la acción, **carga crítica**, a partir de la cual se produce la **inestabilidad**: disminución de la capacidad de resistir la acción aplicada acompañada de una importante deformación del elemento comprimido.

En este apartado se presenta de forma detallada la justificación del interés de la profundización en el estudio de la estabilidad de placas, para ello, en primer lugar, se introduce brevemente el comportamiento de las placas sometidas a compresión en su plano y se definen algunos conceptos que se emplearán a lo largo de esta Tesis Doctoral.

De manera simplificada, se puede describir el comportamiento de los elementos sometidos a compresión en dos etapas: una etapa en la que el elemento está sometido a valores de compresión inferiores al valor de la carga crítica, en la que el comportamiento del elemento es estable y sigue una curva carga – deformación previsible, y una segunda etapa post-crítica, superada la carga crítica, en la cual el comportamiento del elemento cambia respecto de la etapa inicial y además depende de aspectos tales como qué tipo de elemento se esté considerando y las imperfecciones iniciales existentes en el mismo.

El punto donde se alcanza la carga crítica se denomina punto de bifurcación. Éste señala el comportamiento carga – deformación de un elemento perfecto, sin deformaciones iniciales, sometido a compresión centrada, sin excentricidad alguna, sometido a la carga crítica. En el punto de bifurcación, el elemento sometido a la carga crítica puede permanecer sin deformación apreciable o ligeramente deformado, pero para cargas

superiores a la carga crítica, existen dos soluciones posibles de progreso de la curva carga –deformación.

Como ya se ha apuntado, el comportamiento post-crítico depende, entre otros aspectos, del tipo de elemento sometido a compresión en su plano que estemos considerando. Acudiendo a la referencia [Galambos, 1998] es posible ilustrar este hecho de forma gráfica en mediante la Figura 2. 15.

En la Figura 2. 15 se representan las curvas carga-deformación de tres tipos de elementos considerados perfectamente elásticos, sin imperfecciones iniciales, sin tensiones residuales y sometidos a una carga aplicada sin excentricidad, uniforme y aplicada progresivamente; para todos los casos las curvas en trazo fino representan el comportamiento ante una situación determinada de un elemento tipo “perfecto”, idealización; las curvas en trazo grueso representan el comportamiento del elemento considerando imperfecciones, aproximación realista.

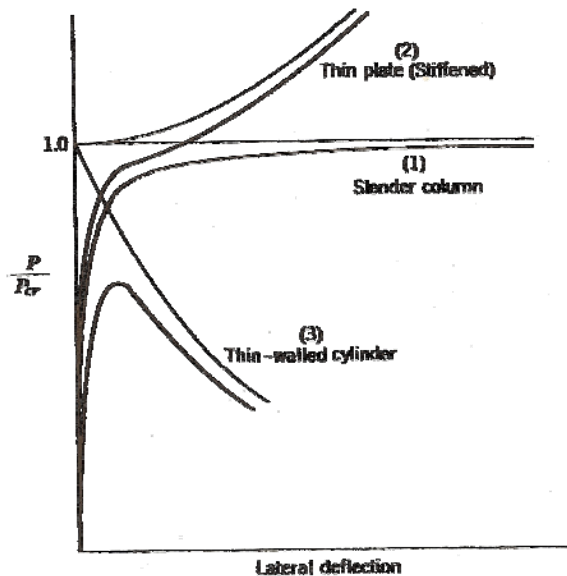


Figura 2. 15. Curvas de comportamiento elástico post-crítico para elementos comprimidos. [Galambos, 1998]

Como puede observarse se distinguen tres tipos de elementos estructurales que representan a su vez tres evoluciones distintas una vez alcanzada la carga crítica:

- (1) Columna esbelta: la carga crítica, ideal, y la carga máxima de la columna real, son próximas y por tanto el empleo de métodos analíticos basados en el cálculo de la carga crítica constituyen una herramienta de cálculo segura para determinar su resistencia última.

- (2) **Placa rigidizada:** en el caso de que sean aceptables pequeñas deformaciones fuera del plano de la placa, **la placa puede soportar cargas de compresión muy superiores a la carga crítica**, esto es debido a que las deformaciones hacen que aparezcan tensiones de membrana que incrementan la rigidez de la placa y la capacidad de resistir nuevos incrementos de carga.
- (3) **Lámina cilíndrica:** la máxima carga que puede ser soportada depende mucho de las imperfecciones iniciales y puede llegar a ser varias veces inferior a la carga crítica, por tanto esta, la carga crítica, no constituye un método fiable de cálculo para determinar su resistencia última.

La aproximación realista será tanto más próxima a la ideal cuanto menores sean las imperfecciones consideradas. Cuando hablamos de imperfecciones, se detallan más adelante en este Capítulo, nos referimos a dos grupos principales:

- **Imperfección inicial:** desviación inevitable respecto de la geometría ideal: falta de rectitud, planeidad... cuya magnitud no excede la tolerancias determinadas para la aplicación estructural del elemento estudiado.
- **Tensiones residuales:** son la tensiones existentes en un elemento no sometido a carga alguna, causadas por los procesos de fabricación del mismo: conformado en frío, laminación, operaciones de corte o soldadura...

Es muy importante destacar que imperfecciones iniciales de gran magnitud, podrían dar lugar a cargas de compresión máximas, **cargas de pandeo**, inferiores a la carga crítica. Se define carga de pandeo como *aquella que provoca una deformación elástica o plástica que da lugar a la pérdida de la forma original de un elemento y lo lleva a la inestabilidad, condición alcanzada durante el pandeo en la cual, ante nuevos incrementos de carga, el elemento comprimido agota su capacidad de resistir cargas y deformaciones adicionales y sufre una reducción de su capacidad resistente*, [Galambos, 1998].

La inestabilidad provocada por la carga de pandeo ocurre en el punto máximo de la curva de carga – deformación, véase la Figura 2. 15. En el caso de considerar comportamiento no sólo elástico del acero, por ejemplo elastoplástico, la representación de la Figura 2. 15 podría no ser válida ya que las cargas máximas podrían darse en el rango plástico y por lo tanto las líneas de referencia que parten del punto de bifurcación $\frac{P}{P_{cr}} = 1,0$ tendrían diferentes pendientes a las presentadas.

Por lo tanto, para el caso de placas de acero rigidizadas es factible considerar resistencias últimas superiores a la crítica y, por lo tanto, el diseño de secciones más esbeltas para lograr soluciones de acero más competitivas asumiendo resistencias post-críticas. Pero, ¿cómo se puede determinar la resistencia última de una placa de acero rigidizada?

Como se ha ilustrado esquemáticamente en la Figura 2. 14, partiendo del análisis global de la viga, en el que se determinan también las solicitaciones en las secciones, se debe proceder a la identificación de aquellas secciones donde es relevante la verificación de ausencias de fallos locales provocados por las solicitaciones de compresión que pueden dar lugar a la aparición de inestabilidades en algunas placas; segmentos de alas o almas entre partes rígidas (diafragmas, mamparos, arriostramientos interiores...), o rigidizadores de la viga, sometidos a compresión y susceptibles de pandear.

En esta Tesis Doctoral, como ya se ha avanzado, son los fenómenos de inestabilidad local, no el diseño global, el objetivo principal de análisis para poder proporcionar una metodología basada en la aplicación del MEF.

Pero, como paso previo a la aplicación de análisis basados en el MEF, se considera imprescindible presentar el comportamiento de las placas de acero mediante métodos de diseño analíticos ampliamente establecidos y reconocidos que, además, son de utilidad para comprender en amplitud y profundidad el comportamiento de las placas de acero ante solicitaciones de compresión.

El primer paso para el análisis del comportamiento de las placas de acero comprimidas es el de determinar la carga crítica. Para ello se recomienda el método presentado por Timoshenko y Gere, [Timoshenko, 1961], en su libro *"Theory of elastic stability"*, a partir de la solución proporcionada por Bryan en 1891, [Bryan, 1891], para determinar la tensión crítica elástica de pandeo de una placa rectangular, simplemente apoyada en todos sus extremos, no rigidizada y sometida a compresión longitudinal uniforme en su plano.

El método de Timoshenko y Gere ha sido adoptado por manuales de diseño de estructuras de acero y textos normativos actuales, [Galambos, 1998], [Paik, 2003], [Argüelles, 2005], [EN 1993-1-5: 2006], [RPM-95], [RPM-RPX, 2000]. En esta Tesis Doctoral se empleará, salvo que se indique otra fuente de manera expresa, la nomenclatura y formulaciones ofrecidas por el Eurocódigo 3, concretamente para placas, la información se tomará de la referencia [EN 1993-1-5: 2006].

Atendiendo a las referencias citadas, el valor de la tensión crítica en una placa simplemente apoyada en sus cuatro extremos y sometida a compresión uniforme aplicada en dos lados opuestos, véase Figura 2. 17, se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2}$$

E: Módulo elástico ν : Coeficiente de Poisson a: Canto de la placa t: Espesor de la placa

Para poder considerar diferentes geometrías y condiciones de contorno, la ecuación anterior se modifica con la introducción de un factor $k_{\sigma,p}$, denominado coeficiente de pandeo, véase Anexo A de la referencia [EN 1993-1-5: 2006].

Incluso es posible generalizar la formula para trabajar más allá de la zona elástica del acero, por encima del límite de proporcionalidad, incluyendo el factor $\sqrt{\frac{E_t}{E}}$, [Galambos, 1998].

Pero como se ha presentado con la Figura 2. 15, las placas de acero pueden proporcionar resistencias superiores a las determinadas por la tensión crítica elástica de pandeo, es posible realizar un diseño considerando el comportamiento post-crítico de la placa.

El Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006], presenta dos métodos; en la publicación de referencia [Johansson, 2007] se explica el alcance de ambos, véase la Figura 2. 17:

- El método de la sección eficaz: considera que una vez superada la tensión crítica, la mayor parte de la carga será soportada por aquellas zonas de la placa más rígidas, despreciándose las zonas que debido a pandeos locales pudieran haber perdido resistencia y rigidez, véase la Figura 2. 16. Para la sección eficaz resultante se considera la capacidad para soportar carga hasta alcanzar el límite elástico del acero. Los pasos seguidos por el método, de forma muy simplificada, son los siguientes:

1. Cálculo del coeficiente de reducción, se presenta el caso de elementos internos sometidos a compresión:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{siendo} \quad \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad \text{la esbeltez adimensional de la placa}$$

$$\psi: \text{Relación de tensión en la sección} \quad \bar{b}: \text{Anchura del elemento} \quad k_\sigma: \text{Coeficiente de pandeo} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y \left[\frac{N}{mm^2} \right]}}$$

2. Cálculo de la sección eficaz:

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c \text{ siendo } A_c \text{ la sección bruta comprimida}$$

3. Verificación, para el caso de una placa sometida a compresión pura:

$$\frac{N_{Ed}}{f_y \cdot A_{eff}} \leq \frac{1}{\gamma_{M0}}$$

N_{Ed} : Axil de diseño actuante f_y : Límite elástico del acero γ_{M0} : Coeficiente de seguridad del acero

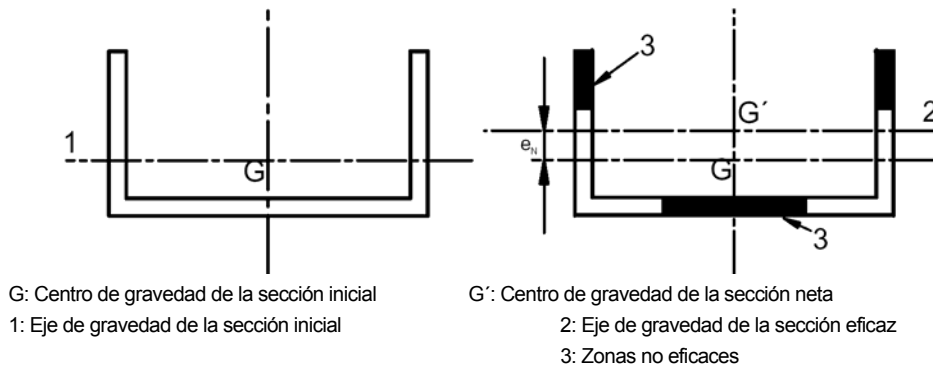


Figura 2. 16. Sección eficaz de un elemento esbelto, Clase 4, sometido a compresión [EN 1993-1-5: 2006]

- **El método de la tensión reducida:** en este lo que se calcula es la tensión máxima hasta la cual no se produce el fallo. El Eurocódigo, [EN 1993-1-5: 2006], propone la fórmula de verificación siguiente:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2$$

$\alpha_{ult,k}$: Mínimo amplificador para que las cargas de diseño alcancen el valor característico de la resistencia del punto más crítico de la placa.

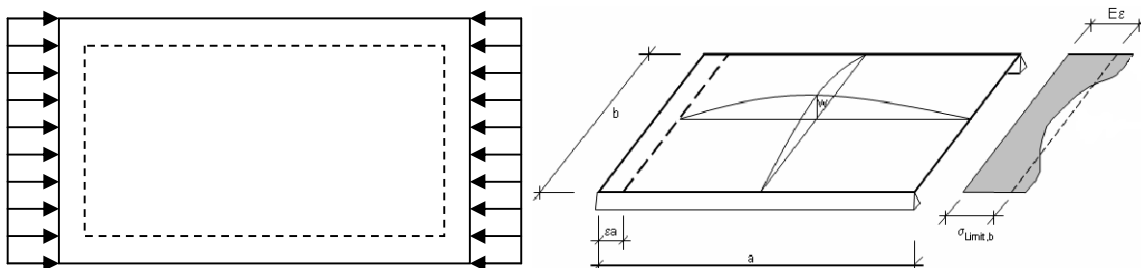


Figura 2. 17. Placa apoyada en los cuatro lados sometida a compresión y distribución real de tensiones debida al pandeo local en la etapa post-crítica, [Johansson, 1998].

En ambos métodos los efectos de las imperfecciones en el fenómeno de la inestabilidad, y por tanto en el valor de la resistencia última de la placa, son tenidos en cuenta de manera directa mediante, por ejemplo en el caso del método de la sección eficaz, el coeficiente de reducción, ρ .

Para valorar realmente la influencia de las imperfecciones en la resistencia última, el apartado siguiente presenta formulaciones que expresan de forma explícita su influencia en la resistencia última de las placas de acero solicitadas a compresión.

2.2.2. Influencia de las imperfecciones en la estabilidad de las placas de acero

En el apartado anterior se ha partido de la consideración de una placa ideal para la cual se ha determinado su tensión crítica, mediante el método de Timoshenko y Gere a partir de la solución proporcionada por Bryan, con la que las formulaciones del Eurocódigo 3 permiten evaluar el comportamiento post-crítico asumiendo unas imperfecciones iniciales. ¿Pero cuán importante es la influencia de las imperfecciones iniciales?

Como ya se ha presentado, el comportamiento en régimen elástico y lineal de las placas de acero se describe mediante la fórmula de la tensión crítica y el comportamiento post-crítico se explica mediante la definición de una sección eficaz que mantiene su capacidad resistente hasta alcanzar el límite elástico del acero:

$$b_{eff} = \frac{b}{\lambda_p} = \rho \cdot b \text{ de ahí } b_{eff} \cdot f_y = b \cdot \sigma_{av,b}$$

b : Ancho de la placa, véase la Figura 2. 16

$\sigma_{av,b}$: Tensión media equivalente en la anchura b , véase la Figura 2. 17

La expresión anterior fue formulada por von Kármán, [von Kármán, 1932], sin embargo, como resultado de numerosos ensayos para determinar la resistencia post-crítica en placas de acero concluyeron que era necesario incluir un coeficiente corrector en la fórmula de von Kármán que tuviera en cuenta las imperfecciones iniciales existentes en las placas. Es por ello que Winter, [Winter, 1947], [Winter, 1950], propuso una corrección la siguiente corrección para el cálculo del coeficiente de reducción ρ :

$$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0,25) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p^2}$$

Esta expresión fue posteriormente modificada por el *American Iron and Steel Institute*, [AISI, 1996], y es la que actualmente proporciona el Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006], para el caso de distribución uniforme de tensiones, $\psi = 1,0$:

$$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0,22) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p^2}$$

Toda esta evolución del conocimiento sobre el comportamiento de las placas de acero comprimidas está presentada de forma detallada en numerosas referencias, [Galambos, 1998], incluso de manera muy didáctica, incluyendo ayudas al cálculo, [Martínez Calzón, 1978], [Argüelles, 2005], [RPM-RPX, 2000].

Por lo tanto, queda patente la relevancia de las imperfecciones iniciales en la resistencia última. La introducción de las imperfecciones iniciales en las placas de acero, y los elementos de acero en general, es fundamental en el cálculo no lineal, situación post-crítica y no-linealidades del material, zona plástica, ya que son ellas las que dan lugar a que los fenómenos de inestabilidad se den a valores mayores o menores de la carga aplicada y en modos que dependen de su forma y amplitud.

Cómo se incluyan las imperfecciones, dará lugar a resultados con niveles de seguridad equivalentes a los de los criterios generales de cálculo recogidos en la normativa existente para la comprobación de secciones, o no.

A continuación se cuantificará su influencia en función de las amplitudes de las desviaciones respecto de la geometría inicial. Es posible establecer una relación entre la tensión media, $\sigma_{av,b}$, el desplazamiento inicial, fuera del plano, en el centro de la placa, $W_{0,M}$, y el desplazamiento obtenido para la tensión aplicada, W_M , [Dubas, 1986]:

$$\frac{\sigma_{av,b}}{\sigma_{cr,c}} = \frac{W_M}{W_{0,M} + W_M} + 0,17 \cdot \frac{W_M^2 + 2 \cdot W_{0,M} \cdot W_M}{t^2}$$

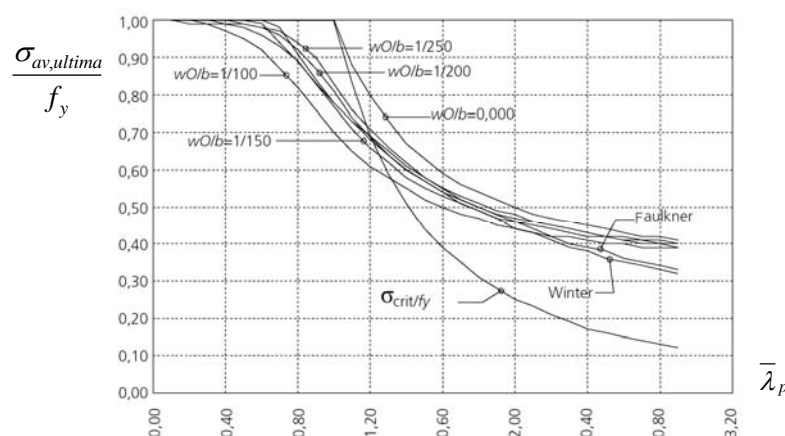
Teniendo en cuenta que, como ya se ha indicado anteriormente, la distribución de tensiones no es uniforme en la etapa de comportamiento post-crítico y que la tensión última se puede considerar alcanzada cuando la sección eficaz alcanza el límite elástico del acero, la ecuación anterior queda, [Martínez Cutillas, 2001]:

$$\frac{\sigma_{av,última}}{f_y} = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \frac{W_M}{W_{0,M} + W_M} \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p^2}$$

A su vez, la esbeltez adimensional de la placa se puede expresar en función de los desplazamientos, [Martínez Cutillas, 2001]:

$$\bar{\lambda}_p^2 = \frac{W_M}{W_{0,M} + W_M} + 0,51 \cdot \frac{W_M^2 + 2 \cdot W_{0,M} \cdot W_M}{t^2}$$

Es por tanto posible representar la relación entre $\frac{\sigma_{av,última}}{f_y}$, la tensión media última frente a límite elástico, y $\bar{\lambda}_p^2$, esbeltez adimensional de la placa para distintos valores de las imperfecciones iniciales, véase la Figura 2. 18.



Imperfección nula, $\frac{W_0}{b} = 0$, aproximadamente fórmula de von Kármán, [Dubas, 1986].

Imperfección inicial, $\frac{W_0}{b} = 150$, fórmula de Winter, adoptada en la normativa [EN 1993-1-5: 2006], [RPM-95]

Curva de imperfección inicial, $\frac{W_0}{b} = 200$, corresponde con fórmula de Faulkner, [Faulkner, 1986].

Figura 2. 18. Influencia de la amplitud de la imperfección inicial en la tensión última de las placas de acero sometidas a compresión uniforme, [Martínez Cutillas, 2001].

La Figura 2. 18 presenta claramente cómo mayores imperfecciones afectan sensiblemente la tensión media última en las placas y también la importante resistencia presentada por las placas más esbeltas en la fase post-crítica, muy superior a la determinada por la curva que representa $\sigma_{av,última} = \sigma_{cr,c}$. Finalmente, atendiendo a la fórmula de Winter, se puede asumir una imperfección inicial $\frac{W_0}{b} = 150$ en la normativa de diseño de puentes de acero en Europa [EN 1993-1-5: 2006] y en España, [RPM-95].

Hasta este punto sólo se han presentado los efectos de las imperfecciones geométricas, en lo relativo a las tensiones residuales también existen referencias que permiten evaluar el impacto, por ejemplo, en cuanto a la tensión crítica se refiere, [Paik, 2003]:

$$\sigma_{cr,c,re,x} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} - \sigma_{re,x}$$

$$\sigma_{re,x} = \sigma_{rcx} + \frac{2}{b} \cdot (\sigma_{rtx} - \sigma_{rcx}) \cdot \left(b_t - \frac{b}{2 \cdot \pi} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot b_t}{b} \right)$$

En definitiva, consiste en la tensión crítica de Bryan reducida por la distribución de tensiones residuales. La notación y patrón de distribución de tensiones se presentan en la Figura 2. 30.

De forma más gráfica, el efecto de las tensiones residuales en tensión crítica lo ofrece la Figura 2. 19, en ordenadas se representa la relación $\frac{\sigma_{cr,c,re}}{\sigma_{cr,c}}$ y las dos gráficas presentan

los casos de placa gruesa, $\frac{b}{t} = 50$, y de placa delgada, $\frac{b}{t} = 100$, respectivamente.

Se observa claramente que a mayores tensiones residuales de compresión, expresadas como porcentaje del límite elástico del acero, $\frac{\sigma_{rc}}{f_y}$, menor es el valor de la tensión crítica;

siendo este efecto más pronunciado en las placas delgadas, $\frac{b}{t} = 100$.

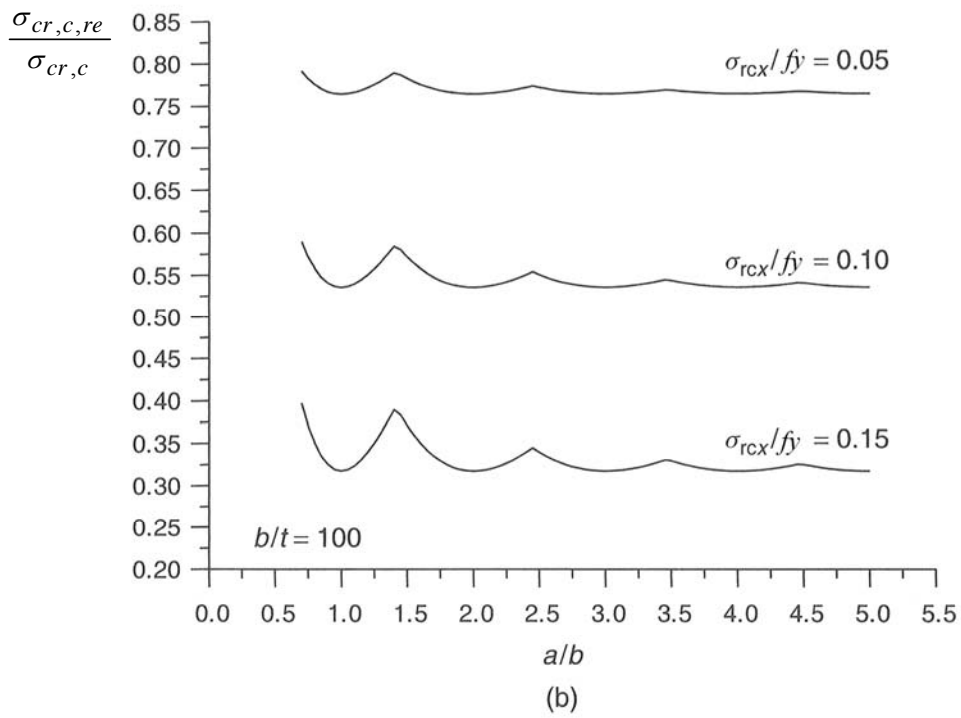
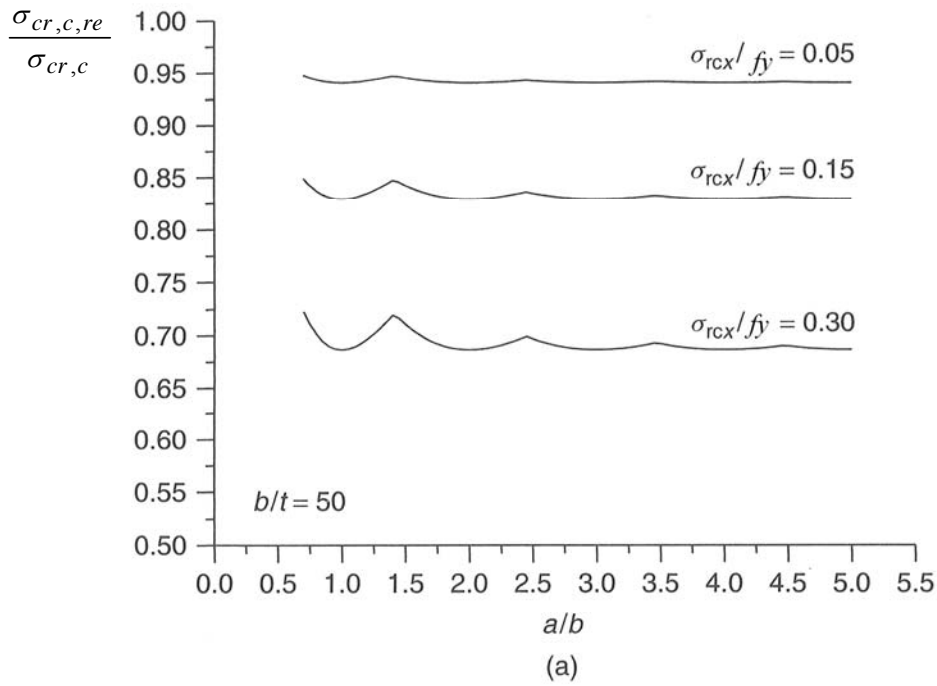


Figura 2. 19. Variación de la tensión crítica en función de las tensiones residuales, [Paik, 2003].

Para finalizar la presentación de la influencia de las tensiones residuales en la resistencia de las placas de acero, es imperativo hacer referencia al estado post-crítico. Para ello se presenta la Figura 2. 20. Aunque la nomenclatura de esta referencia no coincide con la empleada en este capítulo, la del Eurocódigo, se considera sumamente esclarecedora del efecto de las tensiones residuales en el comportamiento post-crítico de las placas de acero.

En la citada Figura 2. 20 se observa como la anchura eficaz, expresada de forma adimensional como $\frac{b_e}{b}$, se reduce por efecto de las tensiones residuales, véase gráfico b)

que considera una tensión residual en las zonas comprimidas de $\frac{\sigma_{rcx}}{\sigma_y} = 0,1$, siendo

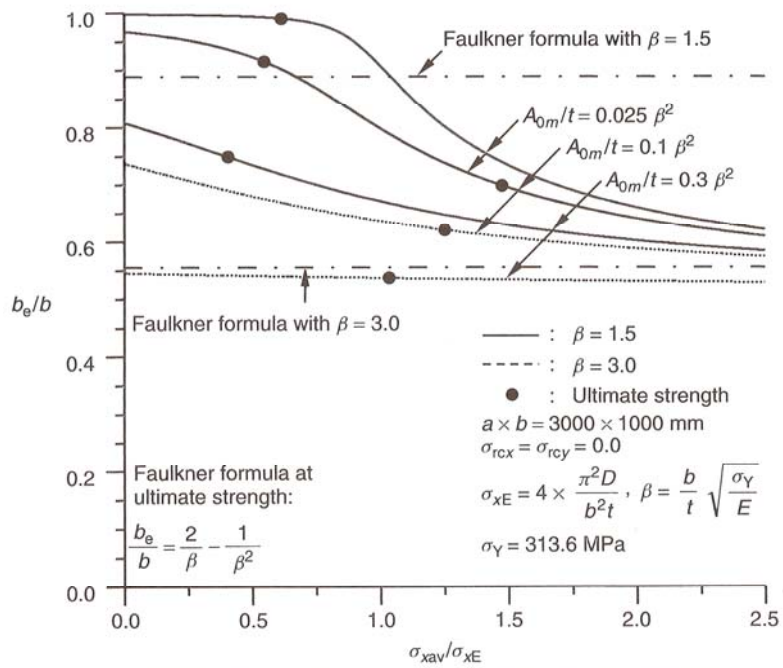
$\sigma_y = f_y$, véase Figura 2. 30. Para facilitar la comparación con el caso sin tensiones residuales, en el gráfico a) se presenta la variación de las anchuras eficaces para diferentes valores de las imperfecciones iniciales, expresadas también de forma adimensional como $\frac{A_{0m}}{t}$, siendo $A_{0M=0}$ cuando no existen deformaciones iniciales, en función de la tensión media de compresión existente en la placa, $\sigma_{x,ac}$.

La tensión se expresa de forma adimensional, $\frac{\sigma_{x,ac}}{\sigma_{x,E}}$, siendo $\sigma_{x,E}$ la tensión crítica,

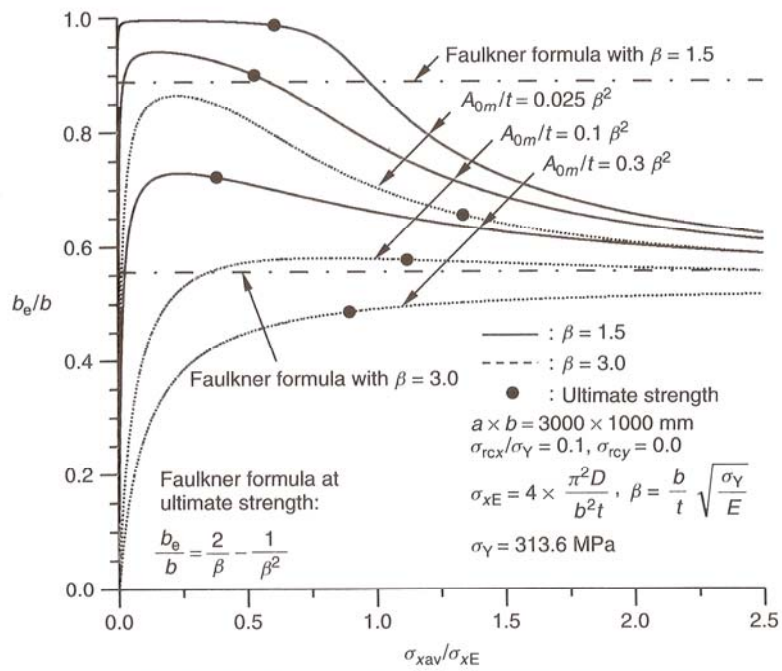
identificada siempre en esta Tesis Doctoral como $\sigma_{cr,c}$. Por otro lado, la influencia de la esbeltez de las placas se tienen en cuenta mediante el parámetro β que indica la relación entre anchura y espesor, se presentan dos casos.

De forma resumida, se pueden establecer las siguientes conclusiones a partir del análisis de la Figura 2. 20:

- Las tensiones residuales producen una reducción de la anchura eficaz.
- La reducción de la anchura eficaz es mayor en placas más esbeltas.
- La anchura eficaz no es constante y depende del nivel de tensión de la placa.
- Dado que la tensión última es proporcional a la anchura eficaz de la placa, la existencia de tensiones residuales reduce la resistencia última de las placas de acero sometidas a compresión.



(a) Effect of initial deflection, no welding-induced residual stresses



(b) Effect of initial deflection and welding-induced residual stresses

Figura 2. 20. Variación de la anchura eficaz en función de las tensiones residuales. [Paik, 2003].

2.3. NORMATIVAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA IMPERFECCIONES INICIALES PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE PLACAS DE ACERO MEDIANTE EL MEF

2.3.1. Tratamiento de las imperfecciones para MEF según el Eurocódigo 3.

En el Eurocódigo 3, [EN 1993-1-1:2005], las imperfecciones iniciales de los elementos estructurales son modelizadas como unas imperfecciones geométricas equivalentes que tienen en cuenta los siguientes efectos:

- Imperfecciones geométricas de los elementos estructurales debidas a las tolerancias de los productos, definidas en las normas de producto, y de ejecución de estructuras, definidas en las normas de ejecución.
- Imperfecciones estructurales, debidas a la fabricación de los productos y a la fabricación y montaje de las estructuras.
- Tensiones residuales.
- Variaciones en el límite elástico del acero.

El Eurocódigo 3, en cuanto a las tolerancias de geométricas se refiere, se remite a las normas de producto y, en lo relacionado con la fabricación y ejecución de estructuras, a la parte 2 de la norma de ejecución de estructuras de acero y aluminio, [prEN1090-2:2004], que trata los requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero. Más adelante, en este mismo capítulo se presenta esa norma.

Para el caso concreto de las estructuras armadas, de las placas de acero, el Eurocódigo 3 Parte 1.5, [EN 1993-1-5: 2006], presenta en su Anexo C: “Métodos de *análisis basados en Elementos Finitos (MEF)*” una guía para el empleo del MEF en la verificación del estado límite de servicio, estado límite último y fatiga de estructuras de placas cargadas en su plano.

El Anexo C presenta los siguientes contenidos:

C.1 General.

C.2 Empleo de los MEF.

C.3 Modelización para verificaciones con MEF.

C.4 Elección del software y la documentación.

C.5 Consideración de las imperfecciones.

C.6 Propiedades del material.

C.7 Cargas.

C.8 Criterios de estado límite.

C.9 Coeficientes de seguridad.

Este Anexo se dirige a personas con formación y experiencia en el uso del MEF y por tanto la información proporcionada se centra principalmente en ofrecer recomendaciones para un correcto modelizado del material, el acero, y de las imperfecciones iniciales a considerar en la geometría del modelo.

Dado el ámbito de la investigación de esta Tesis Doctoral, este apartado se centra exclusivamente en presentar las recomendaciones del Anexo C sobre la consideración de las imperfecciones, aspecto detectado anteriormente en este Capítulo como clave para la predicción fiable de la carga de pandeo o carga última de una placa de acero, cargada en su plano, en compresión.

Es por tanto el punto C.5 del Anexo C el que tratamos dado que proporciona información sobre la definición de la amplitud y formas en relación con la consideración de imperfecciones iniciales en el estudio mediante el MEF. Las recomendaciones generales del Anexo C sobre la consideración de las imperfecciones son las siguientes:

- Debe tratarse con especial cuidado la introducción de las imperfecciones en los modelos de diseño mediante el MEF.
- Las imperfecciones iniciales deben incluir tanto imperfecciones geométricas como imperfecciones estructurales, tensiones residuales:
 - Las imperfecciones geométricas pueden estar basadas en las formas de los modos críticos de pandeo de la placa con amplitudes recomendadas en torno al 80 % de las **tolerancias geométricas de fabricación**.
 - Las imperfecciones estructurales, en términos de **tensiones residuales**, pueden ser representadas mediante una distribución de tensiones representativas del proceso de fabricación y con amplitudes equivalentes a valores medios esperados.
- La dirección de la amplitud de las imperfecciones se debe seleccionar de forma que de lugar a que se obtengan los menores valores de resistencia del elemento en estudio.
- A menos que se lleve a cabo un análisis más exacto de las imperfecciones geométricas y tensiones residuales, se pueden emplear **imperfecciones geométricas equivalentes**. El Anexo C proporciona esas imperfecciones

equivalentes, sus formas y amplitudes. Son las presentadas en la Figura 2. 21, Figura 2. 22 y Figura 2. 23.

type of imperfection	component	shape	magnitude
global	member with length ℓ	bow	see EN 1993-1-1, Table 5.1
global	longitudinal stiffener with length a	bow	min (a/400, b/400)
local	panel or subpanel with short span a or b	buckling shape	min (a/200, b/200)
local	stiffener subject to twist	bow twist	1 / 50

Figura 2. 21. Imperfecciones geométricas equivalentes, Tabla C.2 [EN 1993-1-5: 2006]

Buckling curve acc. to Table 6.1	elastic analysis	plastic analysis
	e_0 / L	e_0 / L
a_0	1 / 350	1 / 300
a	1 / 300	1 / 250
b	1 / 250	1 / 200
c	1 / 200	1 / 150
d	1 / 150	1 / 100

Figura 2. 22. Imperfecciones geométricas equivalentes, Tabla 5.1 del Eurocódigo 3 Parte 1.1 [EN 1993-1-1:2005]

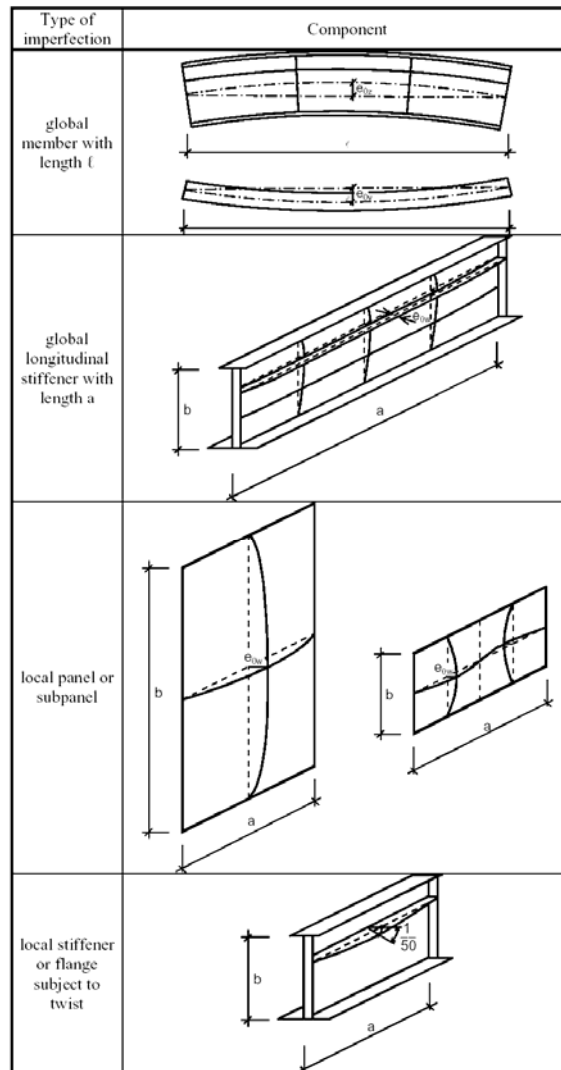


Figura 2. 23. Modelización de imperfecciones geométricas equivalentes, Figura C.1 [EN 1993-1-5: 2006]

- Es posible combinar formas de imperfecciones, para ello se debe elegir una imperfección principal, con su amplitud correspondiente, mientras que sólo se considerará el 70% de la amplitud de cada una de las acompañantes. Cualquier tipo de imperfección puede considerarse principal.
- Las imperfecciones se pueden sustituir por fuerzas equivalentes actuando sobre los elementos.

De la información presentada en el Anexo C, se pueden presentar las siguientes conclusiones:

- La consideración de imperfecciones es imprescindible para una correcta modelización del análisis mediante MEF.
- Se deben considerar tanto imperfecciones geométricas como tensiones residuales.

Sin embargo, la información proporcionada es muy limitada ya que no se ofrecen recomendaciones sobre el tipo de imperfección a considerar en función de la sollicitación del elemento y, por lo tanto, del fallo esperado: carga concentrada, compresión uniforme sobre el ala, sollicitación principal de cortante, interacción de cortante y flector...

Se entiende crucial el conocimiento y experiencia de la persona involucrada en el empleo del MEF para el estudio de los elementos estructurales, esto es, la selección del tipo de imperfección a considerar, forma y amplitud, dependerán principalmente del caso en estudio: tipo de carga actuante, geometría de la sección, esbeltez, sensibilidad a la imperfección... En definitiva, aspectos para los que es muy difícil proporcionar pautas generales y, para los que, la persona involucrada en el análisis debe emplear su criterio "*ingenieril*" y conocimiento sobre el empleo de los MEF para actuar correctamente.

Además, el Anexo C no ofrece reglas o recomendaciones para poder realizar una definición por separado de las imperfecciones geométricas y tensiones residuales. No obstante, es posible acudir a fuentes de información alternativas al empleo de las imperfecciones geométricas equivalentes proporcionadas en el Anexo C, que ayuden a la definición más adecuada a cada caso en estudio de las imperfecciones a considerar.

La información necesaria para el planteamiento de esa propuesta alternativa se presenta detalladamente en los Capítulos 3 al 6 de esta Tesis Doctoral.

2.3.2. Tratamiento de las imperfecciones en normas nacionales Europeas.

En efecto, el Eurocódigo 3 representa el consenso actual para la proyecto de estructuras de acero, no obstante, hasta 2010 seguirán en vigor las normas nacionales, véase Capítulo 1. Es por tanto pertinente investigar cómo consideran las imperfecciones para el análisis de placas de acero. La Tabla 2. 2 presenta de forma resumida la información sobre las imperfecciones iniciales en las norma nacionales de cuatro países de Europa, Alemania, Bélgica, Suecia y España. A continuación de la Tabla 2. 2 se presenta ampliada la información.

Tabla 2. 2. Consideración de las imperfecciones en varias normas nacionales de Europa, [Chica, 2007a]

NORMA	PAÍS	FILOSOFÍA	IMPERFECCIONES	TENSIONES RESIDUALES
DIN-Fachbericht 103 "Stahlbrücken", [DIN, 103], puentes de acero y DIN 18800-3 "Stahlbau; Stabilitätsfälle; Plattenbeulen", [DIN, 18800-3], análisis de la seguridad a pandeo de las estructuras de acero.	ALEMANIA	Solamente define tolerancias de fabricación, sin embargo, éstas NO se deben interpretar como imperfecciones geométricas equivalentes (esto es, no tienen en cuenta las tensiones residuales como las definidas en el Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1.5, [EN 1993-1-5: 2006])	Imperfecciones geométricas → Véase información detallada de Alemania	No proporciona información sobre tensiones residuales.
No existe información disponible sobre la material en ninguna norma nacional de Bélgica.	BELGICA	Véase información detallada de Bélgica.	No existe información disponible sobre la material en ninguna norma nacional.	No proporciona información sobre tensiones residuales.
"Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras RPM – 95", [RPM-95]	ESPAÑA	Consideración de las imperfecciones del material, tensiones residuales, y tolerancias de fabricación, imperfecciones geométricas, mediante imperfecciones geométricas equivalentes.	Para elementos → I+II (véanse la información detallada de España) I) Imperfección en forma de arco con amplitud máxima e_0 II) Sólo en elementos sin arriostramiento lateral en uno de los apoyos, imperfección inicial de traslación ϕ Para imperfecciones locales → métodos analíticos basados en la sección efectiva con la correspondiente reducción mediante el factor de las curvas de pandeo del Eurocódigo χ .	No proporciona información sobre tensiones residuales.

Tabla 2. 2. Consideración de las imperfecciones en varias normas nacionales de Europa, [Chica, 2007a]. (cont.)

NORMA	PAÍS	FILOSOFÍA	IMPERFECCIONES	TENSIONES RESIDUALES
"Dimensionering av stålkonstruktioner, K18" y "Stålkonstruktioner, BSK 99", [BSK, 1999], manual de diseño de estructuras de acero y norma de diseño de estructuras de acero.	SUECIA	Un método tiene en cuenta tanto imperfecciones iniciales como tensiones residuales mediante el incremento de las imperfecciones iniciales y las deformaciones debidas a la traslacionalidad de la estructura. Otro método alternativo, proporciona imperfecciones geométricas y tensiones residuales definidas por separado.	<p>Para elementos → I + II (véase la información detallada de Suecia)</p> <p>I) Imperfección en forma de arco con amplitud máxima, e_0, resultado de una imperfección ficticia, e_c, y la imperfección geométrica real</p> <p>II) Imperfección de traslación, α, que incluye tanto la imperfección geométrica de traslación real, α_d, y la imperfección ficticia, α_c</p> <p>Para imperfecciones locales → No existen recomendaciones específicas en las normas nacionales.</p>	Proporciona unos patrones para incluir las tensiones residuales en elementos estructurales. Véase información detallada de Suecia.

Información detallada de Alemania

En la Figura 2. 24 se presentan las tolerancias de fabricación citadas en la Tabla 2. 2.

	1	2	3	4
1	unversteifte Beulfelder	allgemein		$f = \frac{l_m}{250}$ $l_m = a$, wenn $a \leq 2b$ $l_m = 2b$, wenn $a > 2b$
2		mit Druckbeanspruchung in Querrichtung		$f = \frac{l_m}{250}$ $l_m = b$, wenn $b \leq 2a$ $l_m = 2a$, wenn $b > 2a$
3	Längssteifen in längsversteiften Beulfeldern			$f = \frac{a}{400}$
4	Quersteifen in längs- und querversteiften Beulfeldern			$f = \frac{a}{400}$ $f = \frac{b}{400}$
Das Maß f ist senkrecht zur Plattenebene gerichtet. l_m Meßlänge				

Figura 2. 24. Imperfecciones geométricas establecidas en la norma alemana de diseño de estructuras de acero en relación con el análisis de seguridad frente a pandeo de las placas de acero, [DIN, 18800-3].

Información detallada de Bélgica

A continuación se amplía la información presentada en la columna de imperfecciones de la Tabla 2. 2.

Para elementos:

Las curvas de pandeo europeas se aplican en Bélgica desde 1988, por lo tanto la imperfección global es también la propuesta en el Eurocódigo 3 para elementos tipo barra sometidos a compresión, [EN 1993-1-1:2005]. Como es sabido, esta imperfección geométrica está calibrada para considerar también los efectos relacionados con las imperfecciones del material, del acero.

En el caso de elementos no solicitados a compresión, no se prescribe ninguna imperfección salvo en caso de que estén unidos a elementos comprimidos para proporcionarles estabilización. En ese caso, deben comprobarse considerando una fuerza de compresión igual a 1/100 de la fuerza axial que actúa en el elemento comprimido a estabilizar. Es una forma implícita de considerar las imperfecciones geométricas en los elementos secundarios, sin embargo, no se define explícitamente una amplitud.

Para imperfecciones locales:

No se propone nada específicamente para secciones armadas, para placas. Se asume la imperfección incluida implícitamente en la fórmula de Winter.

Información detallada de España

A continuación se amplía la información presentada en la columna de imperfecciones de la Tabla 2. 2.

l) Según la normativa relevante en vigor en España, [RPM-95], en el caso de emplear el método de cálculo elástico para realizar las comprobaciones en el Estado Límite Último, ELU, solicitaciones y resistencias de la sección:

$$e_0 = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot k_\gamma \cdot \frac{W_{el}}{A}$$

En caso de emplear el método de cálculo elástico para calcular las solicitaciones en ELU y el método plástico o elasto-plástico para determinar las resistencias de las secciones en ELU:

$$e_0 = 1,33 \cdot \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot k_\gamma \cdot \frac{W_{pl}}{A} \quad \text{para el eje y-y} \qquad e_0 = 2,0 \cdot k_\gamma \cdot \frac{e_{eff}}{\eta} \quad \text{para el eje z-z y}$$

$$e_0 = 1,5 \cdot k_\gamma \cdot \frac{e_{eff}}{\eta} \quad \text{para perfiles tubulares circulares.}$$

Finalmente, en caso de emplear el método de cálculo elasto-plástico tanto para el cálculo de solicitaciones como de resistencias de las secciones en ELU, véase las formulaciones siguientes y la Tabla 2. 3:

$$e_0 = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot k_\gamma \cdot \frac{W_{pl}}{A} \quad \text{para el eje y-y} \quad e_0 = k_\gamma \cdot \frac{e_{eff}}{\eta} \quad \text{para el eje z-z y perfiles tubulares circulares.}$$

$$\text{con: } k_\gamma = (1 - k_\delta) + 2 \cdot k_\delta \cdot \bar{\lambda} > 1,0$$

Tabla 2. 3. Coeficientes para el cálculo de la imperfección de acuerdo al factor α de las curvas de pandeo del Eurocódigo, [RPX-95], [RPM-RPX, 2000].

Factor de imperfección α de acuerdo a las curvas de pandeo del Eurocódigo	e_{eff}	k_δ
0,21	I/600	0,23
0,34	I/380	0,15
0,49	I/270	0,11
0,76	I/180	0,08

II) Según la normativa relevante en vigor en España, [RPM-95], se debe considerar una imperfección correspondiente a un desplazamiento inicial de aquellos elementos sin arriostramiento lateral en uno de sus soportes:

$$\phi = k_c \cdot k_s \cdot \phi_0$$

$$\text{siendo } \phi_0 = \frac{1}{200}; \quad k_c = \sqrt{0,5 + \frac{1}{n_c}} < 1,0; \quad k_s = \sqrt{0,2 + \frac{1}{n_s}} < 1,0$$

n_c : número de pilares en el plano de pandeo considerado.

n_s : número de tramos verticales de pilares en dicho plano.

Información detallada de Suecia

I) Según la normativa relevante en vigor en Suecia, [BSK, 1999], la imperfección inicial en forma de arco, e_0 , se define como la mayor separación entre un elemento perfectamente recto y un elemento real imperfecto, véase la Figura 2. 26. e_0 consta de dos sumandos, la imperfección geométrica real $0,0015 \cdot L$ y una imperfección ficticia e_c , que tienen en cuenta la influencia de las tensiones residuales en función del tipo de sección transversal, véase la Tabla 2. 1:

$$e_0 = 0,0015L + e_c$$

Como alternativa, las tensiones residuales pueden considerarse adoptando los patrones proporcionados en la Figura 2. 25. El empleo de este método hace que se tome $e_c = 0$ en el cálculo de e_0 presentado anteriormente.

II) Según la normativa relevante en vigor en Suecia, [BSK, 1999], la imperfección inicial de traslación, α , de acuerdo a la denominación definida en la Figura 2. 26, es el resultado de dos imperfecciones, la imperfección de traslación real, α_d , y la imperfección de traslación ficticia, α_c :

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c \quad \text{siendo} \quad \alpha_d = \frac{0,005}{\sqrt{n}} \quad \text{donde } n \text{ es el número de alturas}$$

En cuanto a α_c , tiene en cuenta la influencia de las tensiones residuales en función del tipo de sección transversal, véase la Tabla 2. 4.

Tabla 2. 4. Imperfecciones iniciales y traslaciones iniciales ficticias para el diseño de estructuras de acuerdo a la teoría de segundo orden, [BSK, 1999].

Tipo de sección	e_c	α_c
Perfiles laminados en caliente de sección en I ó H –con $h/b > 1,2$ Perfiles tubulares de sección rectangular, grupo a.	$0,0003 \cdot L$	0,0006
Perfiles laminados en caliente de sección en I ó H con $h/b < 1,2$ Vigas armadas de sección en I ó H Perfiles tubulares de sección rectangular, grupo b	$0,0013 \cdot L$	0,0026
Vigas de sección en I ó H de espesor $t \geq 40$ mm. Perfiles tubulares de sección rectangular, grupo c	$0,0025 \cdot L$	0,0050

Nota: Definición de los diferentes grupos de perfiles tubulares

Grupo a. Laminados en caliente o no aleados

Grupo b. Soldados con espesor de garganta $a \leq 0,5 \cdot t$ o fabricados a partir de dos secciones tipo UPN

Grupo c. Otros

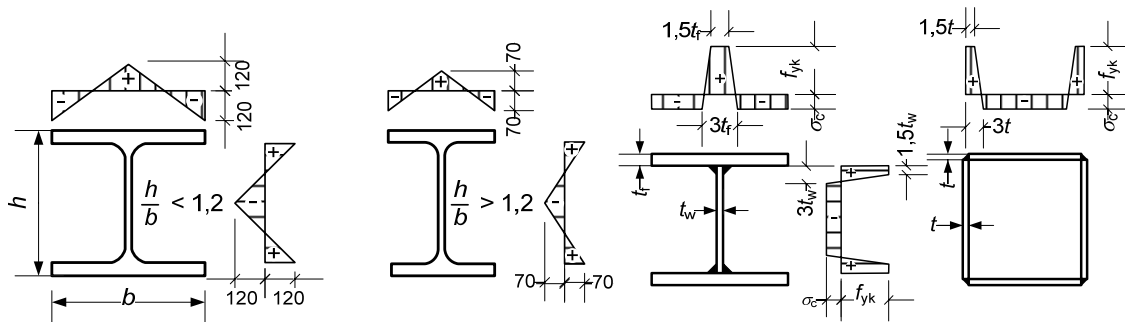


Figura 2. 25. Patrones de tensiones residuales proporcionados en la norma nacional sueca, BSK 99, para el proyecto de estructuras de acero, [BSK, 1999].

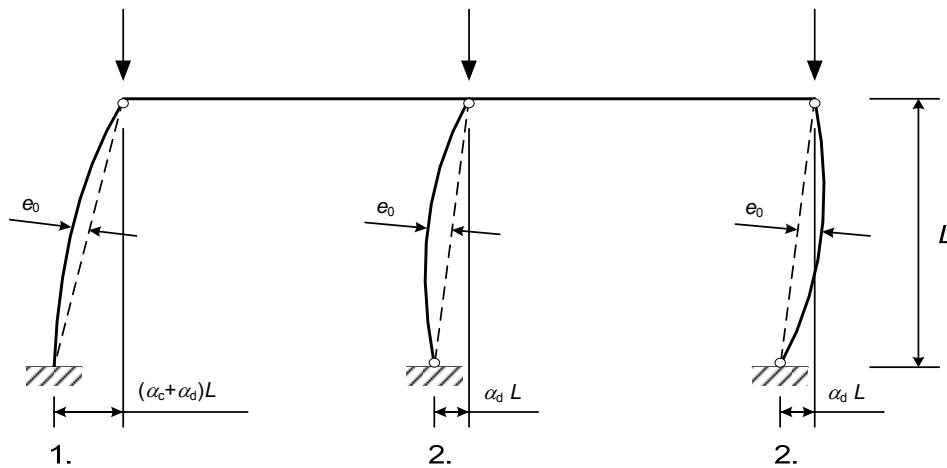


Figura 2. 26. Imperfección inicial en forma de arco e imperfección inicial de traslación para 1. Pilar de estabilización y 2. Pilar articulado, [BSK, 1999].

Para finalizar este apartado en el que se han investigado cuatro normas nacionales europeas diferentes, podemos concluir que existe un tratamiento armonizado de los elementos tipo pilar sometidos a compresión en base a las curvas de pandeo del Eurocódigo 3, [EN 1993-1-1:2005]. Esto no es casual dado que este consenso se ha conseguido gracias a numerosas investigaciones que se han desarrollado para establecer un conocimiento exhaustivo sobre la materia, [ECCS, 2006], contemplado incluso investigaciones específicamente desarrolladas para elementos estructurales muy concretos, caso por ejemplo de los perfiles tubulares conformados en frío, [HOLLOW, 2000].

Sin embargo, en lo que respecta al interés principal de las investigaciones de esta Tesis Doctoral, sólo la norma de Suecia proporciona información detallada sobre la consideración de las tensiones residuales para su tratamiento independiente de las imperfecciones geométricas iniciales. En el caso de estas últimas, la información más detallada y su tratamiento como imperfecciones geométricas equivalentes en el diseño de placas de acero, el Eurocódigo 3, [EN 1993-1-5: 2006], proporciona la información más completa de todas las normas investigadas.

2.4. NORMAS DE PRODUCTO Y DE EJECUCIÓN DE ESTRUCTURAS SOBRE TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN

En el apartado precedente se han presentado las recomendaciones ofrecidas para la consideración de las imperfecciones geométricas ofrecidas por las normas para el proyecto estructuras de acero. Pero, dado lo aleatorio de las imperfecciones geométricas que pueden afectar a un elemento estructura de acero, ¿ofrecen unos valores adecuados en relación a las imperfecciones previsibles?

Para responder a la pregunta anterior, este apartado proporciona la información relevante sobre las tolerancias de fabricación de los productos de acero y de las estructuras de acero para establecer cuáles son las desviaciones geométricas, respecto de la forma ideal, previsibles.

Aunque existen estudios sobre las imperfecciones reales en las placas de acero, [Komatsu, 1983a], [Komatsu, 1983b], no es la pretensión de esta Tesis Doctoral proponer la introducción de los valores reales de las imperfecciones en los modelos de análisis realizados mediante el MEF. Se pretende definir unas formas y valores sencillos de obtener y de utilizar en el diseño de secciones y elementos armados de puentes pero capaces de “estimular” el modelo de forma que proporcione resultados acordes con la realidad.

Para cumplir con ese objetivo, se presentan a continuación las normas de tolerancias de fabricación que han de satisfacer los productos de acero y la norma de ejecución de estructuras de acero.

2.4.1. Normas de productos de acero para la construcción

Aunque, como se ha indicado anteriormente, las imperfecciones geométricas asociadas a los productos de acero para la construcción son aleatorias, gracias a las normas de producto que establecen unas exigencias relacionadas con las tolerancias de fabricación respecto a parámetros tales como la longitud, canto, espesor, planeidad..., es posible afirmar que se pueden prever unos valores máximos para las imperfecciones geométricas iniciales asociadas a los productos para la construcción de acero.

El Eurocódigo 3 nos remite en el apartado 1.2.2. “Normas de referencia de aceros estructurales soldables” de la Parte 1-1, [EN 1993-1-1:2005], a las siguientes normas de producto:

- EN 10025-1:2004 Productos laminados en caliente de aceros estructurales. Condiciones técnicas generales de suministro.
- EN 10025-2:2004 Productos laminados en caliente de aceros estructurales. Condiciones técnicas de suministro para aceros estructurales no aleados.
- EN 10025-3:2004 Productos laminados en caliente de aceros estructurales. Condiciones técnicas de suministro para aceros estructurales soldables normalizados/normalizados de grano fino.
- EN 10025-4:2004 Productos laminados en caliente de aceros estructurales. Condiciones técnicas de suministro para aceros estructurales soldables de grano fino obtenido por conformado termomecánico.
- EN 10025-5:2004 Productos laminados en caliente de aceros estructurales. Condiciones técnicas de suministro para aceros estructurales con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica.
- EN 10025-6:2004 Productos laminados en caliente de aceros estructurales. Condiciones técnicas de suministro para productos planos de aceros estructurales de alto límite elástico en las condiciones de templado y revenido.
- EN 10164:1993 Productos de acero con características mejoradas respecto de la deformación en dirección perpendicular a la superficie del producto – Condiciones técnicas de suministro.
- EN 10210-1:1994 Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado de grano fino – Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.
- EN 10219-1:1997 Perfiles huecos para construcción conformados en frío de acero no aleado y de grano fino – Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.

Otras normas de perfiles de acero, habitualmente empleados en las estructuras de acero, en las que se presenta información sobre las tolerancias de fabricación de los mismos son las siguientes:

- EN 10029:1991 Chapas de acero laminadas en caliente, de espesor igual o superior a 3 mm. Tolerancias dimensionales sobre la forma y sobre la masa.
- EN 10034:1993 Perfiles I y H de acero estructural. Tolerancias dimensionales y de forma.

- EN 10051:1991 Chapas, bandas y flejes laminados en caliente en continuo, de acero aleado y no aleado, no recubiertos. Tolerancias dimensionales y sobre la forma.
- EN 10055:1995 Perfil T de acero con alas iguales y aristas redondeadas laminado en caliente. Medidas y tolerancias dimensionales y de forma.
- EN 10056-1:1995 Angulares de lados iguales y desiguales de acero estructural - Parte 1: Medidas.
- EN 10056-2:1993 Angulares de lados iguales y desiguales de acero estructural - Parte 2: Tolerancias dimensionales y de forma.

Por lo tanto, en lo relativo a las imperfecciones geométricas iniciales de los productos de acero de partida existe información detallada y fiable a través de los fabricantes y suministradores de aquéllos, [Arcelor, 2004], además, asegurada por los sistemas de calidad que aseguran la conformidad con las normas de producto de aplicación, en Europa esto lo asegura el mercado CE².

Sin embargo, las secciones investigadas en esta Tesis Doctoral se fabrican a partir de los productos cuyas normas aparecen citadas, principalmente a partir de chapas de acero laminadas en caliente, [EN10051:1991]. Por tanto, las imperfecciones pertinentes son las resultantes del proceso de fabricación de las secciones armadas a partir de chapas soldadas. El apartado siguiente presenta las fuentes de información necesarias para determinar las tolerancias de las secciones armadas.

2.4.2. Norma de ejecución de estructuras de acero

Efectivamente, las investigaciones de esta Tesis Doctoral se centran en desarrollar una propuesta para la CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. Por lo tanto, las normas de producto presentadas anteriormente no son la fuente de información de partida para establecer las imperfecciones geométricas iniciales de las placas.

Las tolerancias de fabricación relevantes serán las relacionadas con la fabricación y montaje de las secciones armadas de los puentes de acero. Esa información se presenta en la norma de ejecución de estructuras de acero, prEN1090-2:2004: *“Execution of steel*

² El mercado CE asegura el cumplimiento de los requisitos establecidos en el la DPC y, como consecuencia, los productos con dicho mercado tienen garantizada la libre circulación en la UE, véase <http://europa.eu/scadplus/leg/es/vb/l21184.htm>.

structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for the execution of steel structures”, [prEN1090-2:2004].

A la fecha de publicación de esta Tesis Doctoral sólo se disponía del borrador del proyecto de norma prEN1090-2 y las normas en vigor eran las versiones experimentales, [ENV 1090-1:1997] y [ENV 1090-5:1999], y aunque en España también era posible acudir a otra referencia, el manual de ENSIDESA con *“Recomendaciones para el proyecto de puentes de acero”*, [Viñuela, 1992], el grado de avance del borrador, ya estable, ha aconsejado emplear la información del proyecto de norma.

A diferencia de las normas de producto presentadas en el apartado anterior, la norma prEN1090 proporciona las tolerancias, esto es, las desviaciones máximas permitidas en las estructuras ejecutadas. Proporciona valores relacionados con las tolerancias de fabricación y desviaciones relacionadas tanto con aspectos dimensionales principales como con otros tales como la planeidad, rectitud, desplome...que son considerados como máximos admisibles para la recepción de elementos de la estructura o de la estructura en su conjunto.

De la información presentada en la norma prEN1090-2, es especialmente interesante para el estudio de las imperfecciones geométricas iniciales en las placas de acero el Anexo L1, *Annex L1 “Geometrical tolerances - Essential tolerances”*, en el que se ofrecen las tolerancias máximas admisibles en estructuras armadas, fabricadas a partir de placas soldadas, y en sus componentes.

Las tolerancias esenciales relevantes para el diseño de puentes son las más interesantes para las investigaciones que se desarrollarán en los capítulos siguientes esta Tesis Doctoral y se presentan en la Tabla L-1.1, *“Fabrication tolerances for welded sections”*, y en la Tabla L-1.3: *“Fabrication tolerances for stiffened plating”*, de la norma prEN1090-2, véanse Figura 2. 27 y Figura 2. 28.

En el Anexo L2, *Annex L2 “Geometrical tolerances - Supplementary tolerances”*, de la misma norma prEN1090-2, también se proporcionan, a título informativo, no obligatorio, tolerancias de fabricación adicionales para vigas armadas de sección en I, Tablas L-2.1 y L-2.2, para vigas armadas en cajón, Tabla L-2.3, para almas de vigas armadas, tanto de sección en I como en cajón, Tabla L-2.4, para rigidizadores de alma, Tabla L-2.5, y para placas rigidizadas, Tabla L-2.11. En la Tabla 2. 5 se presenta un extracto de las más relevantes para el ámbito de trabajo esta Tesis Doctoral.

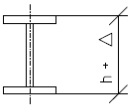
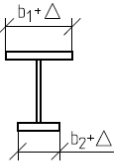
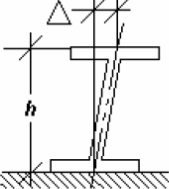
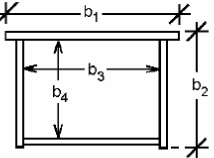
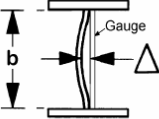
1	<p>Depth</p> 	<p>Overall depth h:</p>	<p>$-\Delta = h/50$ (note negative sign)</p>
2	<p>Flange width</p> 	<p>Width b_1 or b_2:</p>	<p>$-\Delta = b/100$ (note negative sign)</p>
3	<p>Squareness at bearings:</p> 	<p>Verticality of web at supports, for components without bearing stiffeners:</p>	<p>$\Delta = h/200$ but $\Delta \geq t_w$</p>
4	<p>Plate widths:</p> 	<p>Internal or external dimensions: where $b = b_1 b_2 b_3$ or b_4</p>	<p>$-\Delta = b/100$ (note negative sign)</p>
5	<p>Web curvature over supports</p> 	<p>Web alignment over the web depth b:</p>	<p>$\Delta = b/100$ but $\Delta \geq t_w$</p>

Figura 2. 27. Tabla L-1.1: Tolerancias de fabricación para secciones armadas [prEN1090-2:2004]

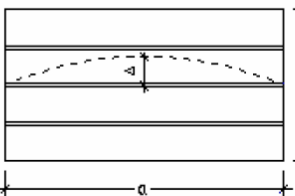
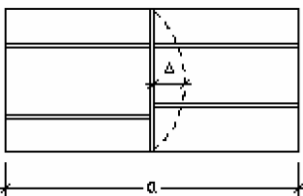
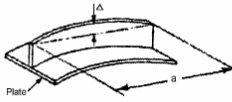
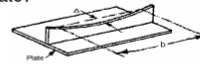
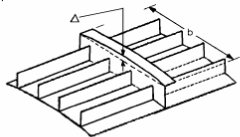
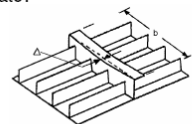
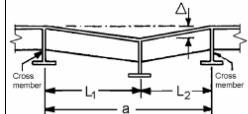
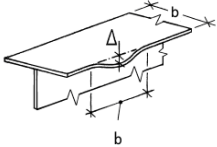
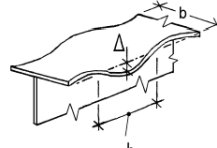
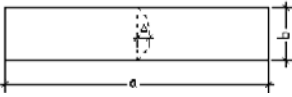
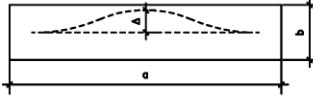
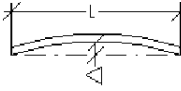
No	Criterion	Parameter	Permitted deviation Δ
		 <p>Longitudinal stiffeners in longitudinally stiffened plating</p>	
		 <p>Transverse stiffeners in longitudinally and transversely stiffened plating</p>	
1	Straightness of longitudinal stiffeners in longitudinally stiffened plating:	Deviation Δ perpendicular to the late: 	$ \Delta = a/400$
2		Deviation Δ parallel to the plate: 	$ \Delta = a/400$
3	Straightness of transverse stiffeners in transversely and longitudinally stiffened plating:	Deviation Δ perpendicular to the plate: 	$ \Delta = a/400$ $ \Delta = b/400$
4		Deviation Δ parallel to the plate: 	$ \Delta = b/400$
5	Levels of cross components in stiffened plating:	Level relative to the adjacent members: 	$ \Delta = a/400$

Figura 2. 28. Tabla L-1.3: Tolerancias de fabricación para placas rigidizadas [prEN1090-2:2004]

Tabla 2. 5. Extracto de tolerancias suplementarias del anexo informativo L2 "Geometrical tolerances - Supplementary tolerances", [prEN1090-2:2004]

Criterio	Parámetro	Desviación permitida
Distorsión del ala en secciones armadas en I		Distorsión Δ en función de la anchura $ \Delta = b/100$
Ondulación del ala en secciones armadas en I		Distorsión Δ en función de la anchura $ \Delta = b/100$
Imperfecciones fuera del plano de paneles de placas de acero entre almas o rigidizadores. Caso general.		Distorsión Δ perpendicular al plano de la placa Si $a \leq 2 \cdot b$ aplica $ \Delta = a/250$ Si $a > 2 \cdot b$ aplica $ \Delta = b/125$
Imperfecciones fuera del plano de paneles de placas de acero entre almas o rigidizadores. Caso especial de compresión en la dirección transversal, se debe aplicar el caso general salvo que se especifique éste.		Distorsión Δ perpendicular al plano de la placa Si $b \leq 2 \cdot a$ aplica $ \Delta = b/250$ Si $b > 2 \cdot a$ aplica $ \Delta = a/125$
Rectitud		Rectitud en ambos ejes $ \Delta = L/400$ pero $ \Delta \geq 5mm.$

De forma breve se puede afirmar que las tolerancias de la norma prEN1090-2:2004 presentan los valores máximos admisibles, tanto en secciones como en componentes de estructuras de puentes, en relación a aspectos tales como:

- Los métodos y niveles de control de los procesos empleados en la fabricación de los componentes de las secciones armadas, en el caso de los puentes, principalmente chapas.
- Los métodos y procesos de fabricación y montaje de las secciones: corte, soldadura...

Por lo tanto, estos valores pueden proporcionar una fuente alternativa al Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006], para su aplicación en la definición de las

imperfecciones geométricas iniciales en el análisis mediante el MEF de placas de estructuras de puentes.

Es importante recordar que el **Anexo C** proporciona **imperfecciones geométricas equivalentes**: consideran tanto las **imperfecciones geométricas iniciales** como las **tensiones residuales**. A diferencia de la **prEN1090-2:2004**, que **solamente** se puede considerar como punto de partida para la definición de las **imperfecciones geométricas**, eso sí, ésta constituye la fuente más ampliamente consensuada a nivel de Europa y la más realista por lo ajustada a los procedimientos de fabricación de estructuras de acero.

Por lo tanto, la definición de las tensiones residuales se debe hacer por separado, el procedimiento recomendado se recoge en el apartado siguiente.

2.5. DEFINICIÓN DE LAS TENSIONES RESIDUALES EN SECCIONES FABRICADAS A PARTIR DE PLACAS DE ACERO SOLDADAS

En el apartado 2.3. se ha presentado cómo el Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5:2006], proporciona recomendaciones para incluir las imperfecciones geométricas equivalentes, que consideran tanto las imperfecciones geométricas como las tensiones residuales, en los modelos para el análisis mediante el MEF de placas de acero. Sin embargo, no proporciona información alguna sobre cómo establecer las tensiones residuales, de ahí que proponga unas imperfecciones geométricas equivalentes que contemplan tanto las imperfecciones geométricas como las tensiones residuales.

Con el objeto de determinar de forma más realista las imperfecciones iniciales, en el apartado 2.4. se apunta a la norma de ejecución de estructuras, [prEN1090-2:2004], como fuente de información de partida preferente para obtener valores de las amplitudes de las imperfecciones geométricas.

Para proporcionar una alternativa completa al Eurocódigo 3 sólo resta el tratamiento de las tensiones residuales. Al igual que en el caso de las imperfecciones geométricas, la distribución de los valores de las tensiones residuales en las secciones armadas tiene también un grado de aleatoriedad. La diferencia con las imperfecciones geométricas es que no existen normas de referencia en las que podamos tomar valores y distribuciones de las mismas.

En realidad sí existe una norma en Europa que proporciona información sobre las tensiones residuales. Es la norma sueca para el proyecto de estructuras de acero, [BSK, 1999], de la que la Figura 2. 25, incluida en el apartado 2.3.2. de este Capítulo, proporciona los patrones recomendados. No obstante, esa información es muy limitada y es necesario poder disponer de información adicional más adecuada al tipo de secciones empleadas en los puentes: de gran esbeltez y con mayor complejidad, por la existencia de rigidizadores en alas y almas.

Siguiendo la filosofía expresada para las imperfecciones geométricas, aunque existen resultados de ensayos y mediciones de las tensiones residuales en secciones armadas de acero, que se presentarán en capítulos siguientes, no se pretende proponer la consideración de los valores reales durante el proceso de diseño; además sería inviable,

dado que para ello se deberían ensayar los elementos estructurales a analizar para determinar sus tensiones residuales reales.

Es por ello que se pretende definir unos patrones de tensiones residuales sencillos de calcular y de incluir en los modelos empleados en el análisis mediante el MEF y que representen de la manera realista la distribución de tensiones residuales en las secciones armadas fabricadas a partir de placas de acero soldadas.

Es posible encontrar referencias bibliográficas con propuestas para la definición de las tensiones residuales derivadas de los procesos de fabricación de los elementos estructurales: laminación, conformado en frío, soldadura... En el caso de las secciones armadas, piezas compuestas por placas de acero soldadas, es el proceso de soldadura de las diferentes placas el que introduce las tensiones residuales relevantes que pueden afectar a la respuesta estructural.

Paik y Thayamballi en su manual "*Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures*", [Paik, 2003], proponen unos patrones, véase la Figura 2. 29, basados en la consideración de tensiones de membrana, esto es, constantes a lo largo del espesor de la placa y que en las proximidades de los cordones de soldadura presentan tracciones, debido al enfriamiento posterior de la zona afectada por el calor de la soldadura, estando en compresión el resto de la placa.

Para la completa definición de estos patrones y su posterior introducción en el modelo de análisis mediante el MEF, es necesario determinar:

- La amplitud o valor de las tensiones de compresión y de tracción.
- El área de la sección afectada por tensiones de tracción y de compresión.

Paik y Thayamballi, [Paik, 2003], proponen patrones rectangulares con valores para las tensiones de tracción cercanos al límite elástico del acero de la placa. Se recomienda un valor del 80% del límite elástico en la zona traccionada para la evaluación del efecto de las tensiones residuales en la resistencia a pandeo.

Sobre las mediciones realizadas en placas de acero, se recomiendan los siguientes valores para las tensiones residuales, considerados representativos para la evaluación de la influencia del proceso de soldadura en la resistencia a pandeo de las placas:

- para tracción, entre $0,80 \cdot f_y$ y $1,00 \cdot f_y$

- para compresión, entre $0,05 \cdot f_y$ y $0,30 \cdot f_y$, con las siguientes recomendaciones:
 0,05 para un estado de tensiones residuales reducidas.
 0,15 para un estado de tensiones residuales medio.
 0,30 para un estado de tensiones residuales importante,

siendo f_y el valor del límite elástico del acero de la placa considerada.

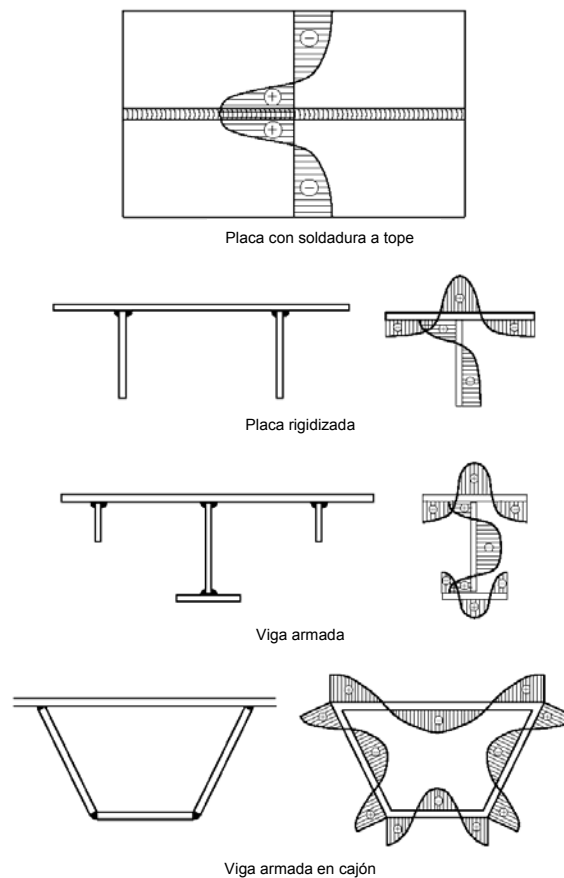


Figura 2. 29. Ejemplos esquemáticos de distribuciones de tensiones residuales en elementos de acero soldados [Paik, 2003]

Para definir las anchuras de la sección de la placa afectadas por las tensiones residuales de tracción o compresión, véase ilustrado en la Figura 2. 30, la formula propuesta es la siguiente:

$$2b_t = \frac{\sigma_{rcx}}{\sigma_{rcx} - \sigma_{rtx}} b \qquad 2a_t = \frac{\sigma_{rcy}}{\sigma_{rcy} - \sigma_{rty}} a$$

Siendo	a	longitud de la placa
	b	canto de la placa
	a_t	longitud de la placa sometida a tensión de tracción
	b_t	canto de la placa sometida a tensión de tracción
	σ_{rc}	valor de la tensión de compresión (con su signo)
	σ_{rt}	valor de la tensión de tracción (con su signo)

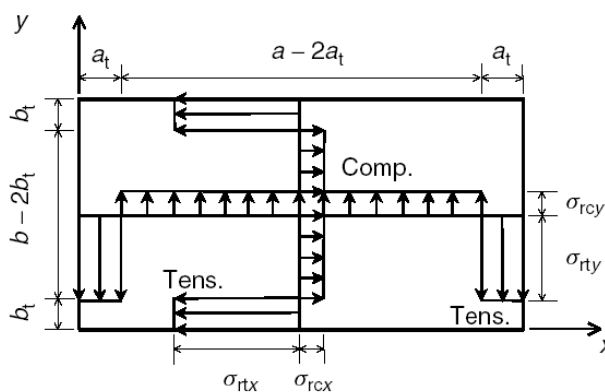


Figura 2. 30. Idealización de las tensiones residuales introducidas por efecto de los cordones de soldadura, en los cuatro lados, en una placa, en las direcciones x e y [Paik, 2003]

Se debe observar siempre que:

- en las inmediaciones de los cordones de soldadura (zonas afectadas por el calentamiento) se desarrollen tensiones de tracción,
- que el resto de la placa esté sometido a tensiones de compresión y
- que en la sección, la resultante de las tensiones de tracción y de compresión, esté en equilibrio.

Las tensiones residuales propuestas por Paik y Thayamballi, [Paik, 2003], alcanzan valores realmente importantes, llegando hasta el límite elástico del acero en las zonas adyacentes a los cordones de soldaduras. Sin embargo, tanto las magnitudes como las formas propuestas se corresponden correctamente con los resultados de mediciones realizadas en placas de secciones armadas soldadas.

A modo de ejemplo, la Figura 2. 31, presenta los resultados de las mediciones realizadas en dos placas de acero, $b=500$ mm. y $b= 600$ mm., limitadas por dos rigidizadores longitudinales soldados.

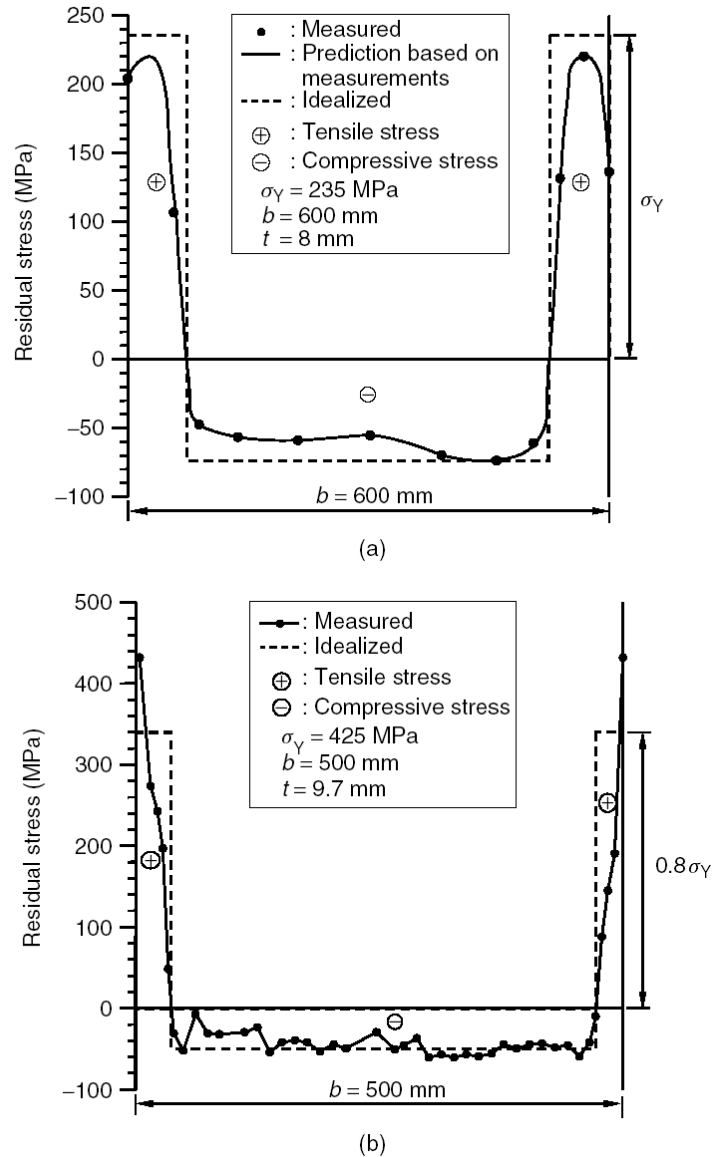


Figura 2. 31. Mediciones de distribución de tensiones residuales en dos placas de acero, $b=600$ mm. y $b= 500$ mm., limitadas por rigidizadores longitudinales soldados [Paik, 2003]

Como conclusión de este apartado, se puede afirmar que mediante el empleo de la propuesta de Paik y Thayamballi es posible definir unos patrones de tensiones residuales mediante unas formulaciones sencillas pero realistas.

En la actualidad, a nivel de Europa, sólo la norma sueca, [BSK, 1999] de diseño de estructuras de acero, [BSK, 1999], presenta información sobre las tensiones residuales, aunque más limitada que la aquí presentada. En cuanto al Eurocódigo 3, anteriormente ya se ha informado que apuesta por proporcionar unas imperfecciones geométricas equivalentes para considerar de manera conjunta tanto las imperfecciones geométricas iniciales como las tensiones residuales.

2.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El interés de la aplicación de las placas de acero en los puentes de acero y mixtos tipo viga de alma llena, de sección bijácena o cajón, ha sido presentada en el primer apartado del Capítulo, así como la tendencia a secciones más esbeltas y con menos rigidizadores para aumentar la competitividad de los puentes de acero y mixtos mediante una reducción del acero empleado y de la mano de obra, para la reducción de su coste. Esto conlleva cálculos más exigentes para conseguir el máximo aprovechamiento de los materiales empleados.

El estudio del comportamiento post-crítico de las placas de acero es muy interesante para el diseño de estructuras más esbeltas y, por lo tanto, más competitivas frente a soluciones basadas en otros materiales estructurales. De ahí el interés de profundizar en métodos más exactos, menos conservadores, pero seguros para el cálculo de la resistencia post-crítica.

En el apartado segundo se han presentado métodos de cálculo de placas de acero que permiten aprovechar la capacidad resistente de las placas de acero en situación post-crítica, esto es, una vez que aparecen pequeñas deformaciones en la placa al alcanzar la tensión crítica aún es capaz de seguir soportando incrementos de carga.

A través de los métodos presentados, se ha demostrado la influencia de las imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la reducción de la resistencia última, post-crítica. Concluyéndose que es imprescindible para una predicción realista del comportamiento post-crítico de las placas de acero la consideración correcta tanto de imperfecciones geométricas como tensiones residuales, Figura 2. 20.

En cuanto a tratamiento de las placas de acero en la normativa en vigor, se han presentado, en el apartado tercero, los métodos de cálculo actuales, a nivel de Europa y de España, Eurocódigo 3, [EN 1993-1-5: 2006], y RPM & RPX, [RPM-95],[RPX-95], respectivamente, que permiten un diseño muy competitivo de las placas de acero capaz de aprovechar la reserva de resistencia de las mismas una vez superada la tensión crítica, esto es, en situación de resistencia post-crítica. Pero, las imperfecciones geométricas se consideran de forma implícita y constantes, y, por tanto, no se modifican en función de las particularidades del caso en estudio.

En cuanto a lo que se refiere a la consideración de las tensiones residuales, a nivel de Europa, sólo se han encontrado breves recomendaciones en la norma sueca de diseño de estructuras de acero, [BSK, 1999], y ninguna en el Eurocódigo 3, [EN 1993-1-5: 2006], a pesar de que explícitamente reconoce la importancia de considerarlas, adopta una solución basada en unas imperfecciones geométricas equivalentes para tenerlas en cuenta implícitamente, junto con las imperfecciones iniciales, en el Anexo C, específicamente dedicado al cálculo de placas de acero mediante el MEF.

Adicionalmente a la normas de diseño estudiadas en el apartado tercero, en los apartados cuarto y quinto se han identificado fuentes de información que permitan calcular por separado las imperfecciones geométricas y tensiones residuales a considerar en el cálculo de la resistencia última de las placas de acero.

La norma europea de ejecución de estructuras de acero, [prEN1090-2:2004], proporciona información de las tolerancias de fabricación de estructuras de acero que suponen un punto de partida fiable para determinar las imperfecciones geométricas iniciales previsibles en las placas de acero.

Finalmente, en el apartado quinto, en cuanto a las tensiones residuales se refiere, la información proporcionada por Paik y Thayamballi, [Paik, 2003], se considera muy detallada y capaz de ofrecer de forma sencilla y realista el cálculo de los patrones de las tensiones residuales en secciones de placas de acero soldadas.

Tras la presentación del estado del arte relevante para el desarrollo de esta Tesis Doctoral, es posible afirmar el interés en una predicción más realista del comportamiento de las secciones estructuras armadas, fabricadas a partir de placas soldadas, para diseñar puentes de acero y mixtos seguros y más competitivos.

Para ello, además de los métodos analíticos, ofrecidos mediante las formulaciones y metodologías presentadas en los documentos normativos, es posible emplear métodos de cálculo avanzados, por ejemplo el MEF, que permitan predicciones más realistas del comportamiento en la fase post-crítica.

Dado que existen fuentes de información suficientes para proponer imperfecciones geométricas y tensiones residuales iniciales para el estudio de placas de acero mediante el empleo de MEF, es posible desarrollar una alternativa a la propuesta de imperfecciones geométricas equivalentes planteada en el Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1.5, [EN 1993-1-5: 2006], a considerar en los modelos a estudiar.

La alternativa propuesta en esta Tesis Doctoral consiste en:

- Considerar de manera explícita y por separado las imperfecciones iniciales, tensiones residuales e imperfecciones geométricas, de las placas para el estudio de su estabilidad y respuesta estructural post-crítica de forma más realista, mediante el análisis basado en el MEF.
- Basar las imperfecciones geométricas en las tolerancias de ejecución de la norma europea de ejecución de estructuras, [prEN1090-2:2004].
- Basar las tensiones residuales en tensiones de membrana, constantes en el espesor de la placa, de acuerdo a una distribución según la metodología descrita por Paik y Thayamballi, [Paik, 2003].

Esta alternativa al Eurocódigo 3, presenta ventajas tales como:

- Modelización realista del elemento a estudiar, considerando incluso efectos derivados del proceso de fabricación particular aplicado (soldadura), mediante la introducción de las tensiones residuales en el modelo del MEF.
- Evaluación de la influencia por separado de las imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la respuesta de la placa de acero.
- Aproximación orientada al problema en función del tipo de sollicitación al que estaría sometida la placa y a su esbeltez.

Obviamente la alternativa planteada debe ser desarrollada y contrastada con las recomendaciones presentadas en el Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006], y con resultados de ensayos que demuestren su validez o que ayuden en la calibración de los valores a considerar tanto para las imperfecciones geométricas como para las tensiones residuales.

El desarrollo y validación de esta alternativa se realiza en los Capítulos 3 al 5 de esta Tesis Doctoral; las conclusiones finales se presentan en el Capítulo 6.

3. APLICACIÓN A ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN CON COMPORTAMIENTO DE TIPO “COLUMNA”

3.1. INTRODUCCIÓN

En el Capítulo 2 *“Estado del conocimiento en el ámbito del análisis y diseño de estructuras de placas de acero para puentes de acero y mixtos”* se concluye que existe conocimiento suficiente para plantear una alternativa al tratamiento actual del Anexo C de la Parte 1-5 del Eurocódigo 3, [EN 1993-1-5:2006], basado en el empleo de unas imperfecciones geométricas equivalentes, para la CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, MEF.

La alternativa propuesta consiste en:

- Considerar de manera explícita y por separado las imperfecciones iniciales, tensiones residuales e imperfecciones geométricas, de las placas para el estudio de su estabilidad y respuesta estructural post-crítica de forma más realista, mediante el análisis basado en el MEF.
- Basar las imperfecciones geométricas en las tolerancias de ejecución de la norma europea de ejecución de estructuras, [prEN1090-2:2004].
- Basar las tensiones residuales en tensiones de membrana, constantes en el espesor de la placa, de acuerdo a una distribución según la metodología descrita por Paik y Thayamballi, [Paik, 2003].

Con el objeto de desarrollar la alternativa planteada, en este capítulo se presenta, en el apartado 3.2., un caso de aplicación sobre el que realiza un análisis paramétrico, apartado 3.3., que es contrastado con las recomendaciones presentadas en el Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006], y con resultados de ensayos.

Finalmente, en las conclusiones, del apartado 3.4., se discuten los valores a considerar, tanto en relación con las imperfecciones geométricas como con las tensiones residuales, para ayudar a establecer el rango de la validez de las imperfecciones recomendadas así como la manera de calibrarlas respecto de las recomendaciones del Eurocódigo 3 y de las tolerancias de ejecución de estructuras de acero, [prEN1090-2:2004].

Adicionalmente al caso de aplicación de este capítulo, para el desarrollo y validación de la alternativa presentada en esta Tesis Doctoral, los Capítulos 4 y 5 presentan otros casos que sirven para fundamentar las conclusiones del Capítulo 6.

En cuanto a la validación de las investigaciones que se presentan en este Capítulo, se basan en los resultados de los ensayos descritos en la referencia siguiente:

"Stiffened Steel Plates Under Compression and Bending". G.Y. Grondin, Q. Chen, A.E. Elwi, J.J. Cheng. J. Construct. Steel Res. Vol. 45 No. 2, pp. 125-148. 1998, [Grondin, 1998].

Los ensayos que se detallan en el citado artículo tratan de una placa rigidizada con un rigidizador de sección en T. El artículo se centra en la carga máxima de compresión de la placa rigidizada en función de existencia o no de cargas perpendiculares al plano de la placa, junto con la carga de compresión en el plano.

El programa experimental además trata el efecto de las condiciones de apoyo en los lados no cargados de la placa y de las deformaciones iniciales, considerando incluso posibles daños de golpes, en el comportamiento a pandeo de las placas rigidizadas.

Para desarrollar las investigaciones presentadas en el artículo se fabricaron trece probetas, de las cuales una se empleó para obtener valores de las tensiones residuales, que se consideran representativas para el resto de las probetas, y las doce muestras restantes fueron ensayadas, midiéndose para cada una de ellas sus imperfecciones geométricas iniciales.

En este Capítulo de la Tesis Doctoral se trata la probeta denominada SP 1.5. Con la información presentada en el artículo, es posible desarrollar un análisis paramétrico sobre el efecto de las imperfecciones inicial, las magnitudes y formas a ser incluidas en los modelos para del MEF, sobre los resultados relacionados con el cálculo de la carga última de la placa rigidizada.

El análisis paramétrico, cuyos resultados se presentan en este capítulo, contempla tanto un análisis de las formas de las imperfecciones geométricas iniciales como de su amplitud.

La forma de la imperfección geométrica inicial se ha obtenido a través del cálculo de los modos de pandeo elásticos y se han estudiado diferentes valores de la amplitud; estos valores se han seleccionado siguiendo las recomendaciones encontradas en las normas de productos de acero para la construcción y en la norma de ejecución de estructuras de acero, [prEN1090-2:2004]: 0,20 mm., 2,00 mm. y 20,00 mm. (esto es, 0,01%, 0,10% y 1,00% de la longitud de la placa respectivamente).

En cuanto a las tensiones residuales, se ha empleado un patrón rectangular de tensiones de membrana, tal y como se presenta en el Capítulo 2 según la referencia [Paik, 2003]. Las amplitudes máximas de tensiones residuales de compresión y de tracción se han definido atendiendo a las medidas de las muestras sometidas a experimentación.

Además del contraste con el ensayo, se presenta una comparación de los resultados obtenidos en el análisis paramétrico aplicado al modelo del MEF con los resultantes de aplicar el Anexo C, [EN 1993-1-5:2006].

Finalmente, en el apartado de conclusiones se presentan unas recomendaciones basadas en los resultados del análisis paramétrico.

Es importante resaltar que además de la información presentada en este Capítulo 3, es posible encontrar información adicional en los informes semestrales primero, segundo, [COMBRI, 2004a], [COMBRI, 2004b], intermedio, [COMBRI, 2005a], e informe final del proyecto COMBRI, [COMBRI, 2007], en los que el que el autor contribuyó en los aspectos relacionados con la influencia de las imperfección iniciales mediante trabajos sobre la materia que se han recogido tanto en los citados informes del proyecto como en anejos específicos del informe final sobre imperfecciones, [Chica, 2007b], [Chica, 2007c].

Señalar a este respecto que tanto el informe final, [COMBRI, 2007], como los anejos específicos sobre imperfecciones, [Chica, 2007b], [Chica, 2007c], están disponibles a través de la web de la Comisión Europea <http://bookshop.europa.eu/>.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE EXPERIMENTACIÓN

3.2.1. Propiedades de la sección y descripción del ensayo.

La probeta empleada en el ensayo considerado para la realización del análisis paramétrico posterior tiene las siguientes dimensiones: placa de 2.000 mm. x 500 mm. x 10 mm. rigidizada mediante una sección en T de tipo WT 125 x 12,5 (ASTM A6/A 6M), denominación de perfiles canadiense, véanse los detalles en la Tabla 3. 1 y Figura 3. 1.

Tabla 3. 1. Propiedades del rigidizador de sección transversal en T, [Grondin, 1998].

UNIDADES SISTEMA MÉTRICO INTERNACIONAL	Kg/m ²	A (mm ²)	d (mm)	t w (mm)	b f (mm)	t f (mm)	R (mm)	UNIDADES IMPERIALES
W250x10x25	25	3219	257	6.10	102	8.4	8	W10x4x17
WT125x12.5	12.5	1609.5	128.5	6.10	102	8.4	8	WT5x4x8

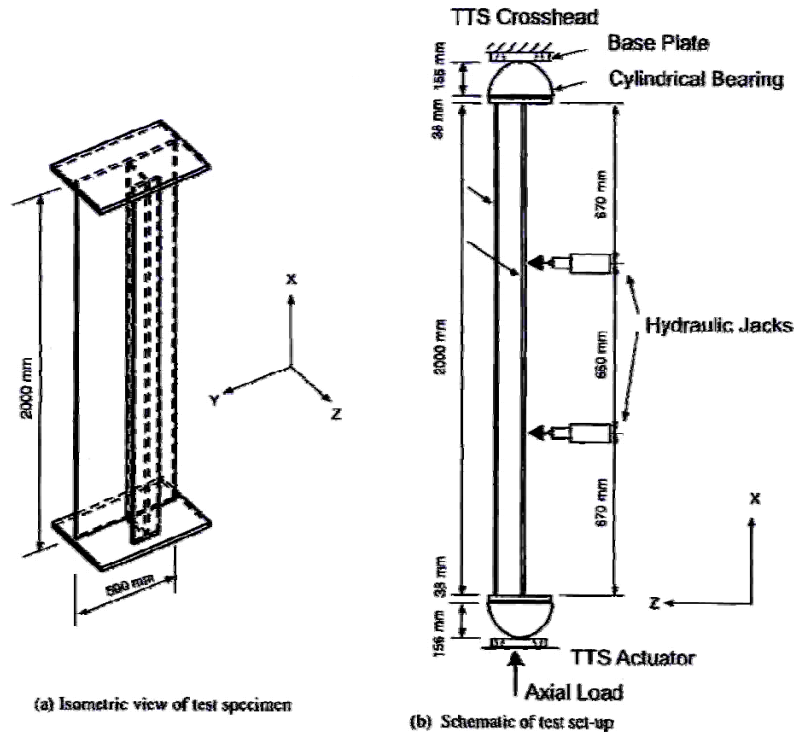


Figura 3. 1. Vista isométrica de la placa rigidizada y esquema del ensayo, [Grondin, 1998].

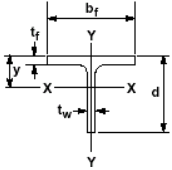
3.2.2. Propiedades del material, acero.

Tanto la placa como la sección en T empleada como rigidizador están fabricadas mediante acero estructural laminado en caliente. Ambas curvas tensión - deformación muestran la típica zona de fluencia común en los aceros estructurales laminados en caliente.

▪ Características mecánicas reales.

La sección en T laminada en caliente, de acero de clase 350 W, en nomenclatura canadiense (CAN/CSA-G40.20-M Grade 350W) fue sometida a ensayos de tracción mediante probetas extraídas tanto del ala como del alma para poder calcular la curva tensión deformación real del acero, véase Tabla 3. 2.

Tabla 3. 2. Características del acero del rigidizador de sección en T, [Grondin, 1998].

	COMPONENTE	σ_1 (MPa)	ϵ_1	σ_2 (MPa)	ϵ_2	σ_3 (MPa)	ϵ_3
	ALA	395	0,00198	396	0,012	529	0,077
ALMA	410	0,00205	412	0,018	532	0,077	
PLACA	425	0,00212	428	0,028	509	0,073	

▪ Curva tensión deformación del acero.

Con los resultados de la Tabla 3. 2 es posible calcular la curva tensión deformación real del acero. Para ello se emplea la formulación ofrecida por el Anexo C de la Parte 1-5 del Eurocódigo 3, [EN 1993-1-5:2006]:

$$\sigma_{real} = \sigma \cdot (1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_{real} = l_n \cdot (1 + \epsilon)$$

En el análisis paramétrico se emplea la curva tensión deformación real del acero, véase la Figura 3. 2, para evitar alteraciones de los resultados derivados de las características de acero, respecto de las del ensayo, para, de esa forma, centrar el análisis sólo en las imperfecciones iniciales.

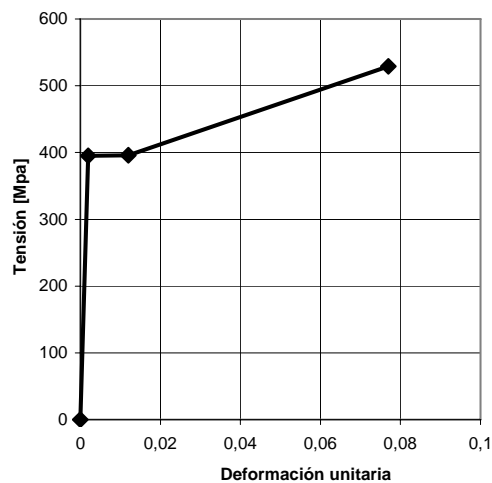


Figura 3. 2. Curva tensión deformación del acero.

3.2.3. Tensiones residuales.

De las trece probetas tratadas en el artículo que sirve de base para el análisis paramétrico posterior, [Grondin, 1998], se tomaron medidas de las tensiones residuales de una de ellas que se establecieron como referencia para el resto. La distribución y magnitudes de las tensiones residuales medidas se presentan en la Figura 3. 3.

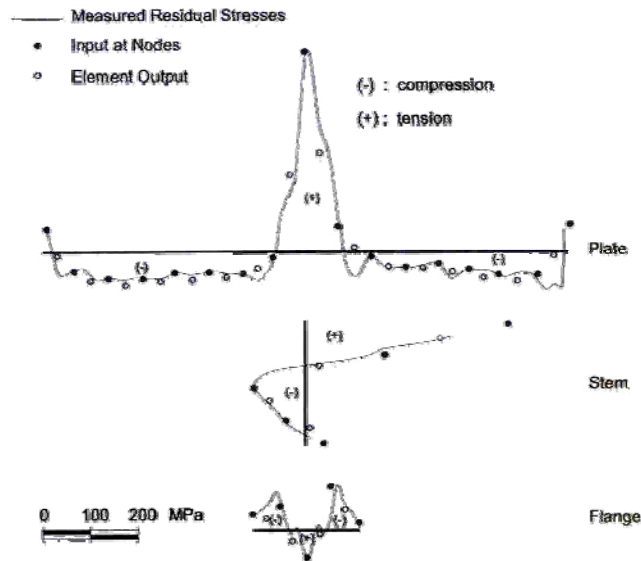


Figura 3. 3. Tensiones residuales medidas en la probeta, [Grondin, 1998].

Las mediciones coinciden con las características generales establecidas en el Capítulo 2 para los patrones de tensiones residuales:

- Altas tensiones de tracción, del orden del límite elástico del acero, en la zona de la placa donde se encuentra la unión solada al rigidizador.
- Tensiones residuales de compresión inferiores a un 30% del límite elástico en el resto de la placa.

En cuanto a la sección en T laminada en caliente, las tensiones residuales son obviamente inferiores a la de los elementos fabricados a partir de placas soldadas, los valores de las tensiones de tracción se sitúan por debajo del 20% del límite elástico del acero y se establecen en la zona de unión del alma con el ala. Esto es consistente con la literatura científica sobre la materia, [Galambos, 1998].

También aparecen tensiones de tracción en la zona del ala de la sección en T que se suelda a la placa, debido a que queda afectada por el proceso de soldadura y a que posteriormente se establece un equilibrio de tensiones en toda la sección, placa más rigidizador.

3.2.4. Imperfecciones geométricas.

En los modelos empleados en los análisis mediante el MEF, lo más habitual es la introducción de las imperfecciones iniciales tan solo como imperfecciones geométricas, sin considerar las tensiones residuales.

Como ya se comentó en el Capítulo 2, el Eurocódigo 3, [EN 1993-1-5:2006], apuesta por la consideración de unas imperfecciones geométricas equivalentes para tratar tanto las imperfecciones geométricas como las tensiones residuales. Pero, ¿son esas imperfecciones geométricas equivalentes acordes, al menos, con las imperfecciones geométricas reales?

En el artículo de referencia para el análisis paramétrico de este capítulo, además de las tensiones residuales se presentan resultados de las imperfecciones geométricas iniciales medidas en las probetas, la Figura 3. 4 presenta los valores medidos en la placa de la probeta SP 1.2.

Se puede observar como la distribución de las imperfecciones es aleatoria y proporciona una forma que dista de la de arco propuesta por el Eurocódigo 3 Parte 1-5 en el Anexo C, sin embargo la amplitud queda dentro del rango recomendado de longitud/400.

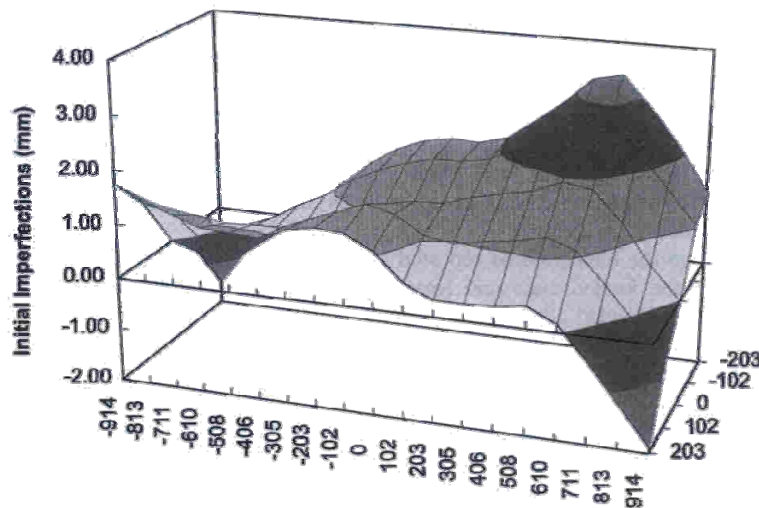


Figura 3. 4. Imperfecciones geométricas medidas en la probeta, [Grondin, 1998].

3.2.5. Secuencia de carga experimental y carga máxima.

El ensayo de la placa con el rigidizador en T consiste en la aplicación de una carga de compresión combinada con dos cargas laterales aplicadas perpendicularmente a la placa, en el plano del alma del rigidizador, mediante dos gatos hidráulicos, véase Figura 3. 1., al objeto de provocar una deformación por flexión en la probeta.

Las cargas laterales se aplican desde el inicio y se mantienen constantes durante toda la duración del ensayo. En cambio, la carga de compresión vertical, se aplica en los extremos de la placa rigidizada mediante un proceso de desplazamiento controlado. Este tipo de control permite registrar la respuesta en la etapa post-crítica, una vez comienza el pandeo.

En concreto, los datos del ensayo en la probeta a analizar, la SP 1.5, son los siguientes:

- Cargas laterales:

El espécimen se carga inicialmente con dos cargas de 25 kN.

Las cargas se aplican de forma que el rigidizador de sección en T queda inicialmente comprimido. Estas cargas se mantienen constantes mientras que se incrementa la carga de compresión.

- Carga de compresión.

La carga máxima registrada es de 1.134 kN

La carga se aplica mediante la imposición de incrementos de desplazamientos axiales en los extremos cargados hasta que se alcanza el fallo.

3.2.6. Resultados del ensayo.

El modo de fallo fue el pandeo del rigidizador, véase la Figura 3. 6. En la gráfica de la Figura 3. 5 se presenta la curva carga de formación del espécimen SP1.5 y en la Tabla 3. 3 los valores de la carga última obtenida en el ensayo y en la predicción del análisis previo realizado mediante el MEF.

Tabla 3. 3. Valores de carga máxima del ensayo y del análisis mediante el MEF, [Grondin, 1998].

PROBETA	CARGA MÁXIMA DEL ENSAYO (KN)	CARGA MÁXIMA DEL ANÁLISIS MEDIANTE EL MEF (KN)	CARGA ENSAYO / CARGA MEF
SP1.5	1.134	1.255	0,90

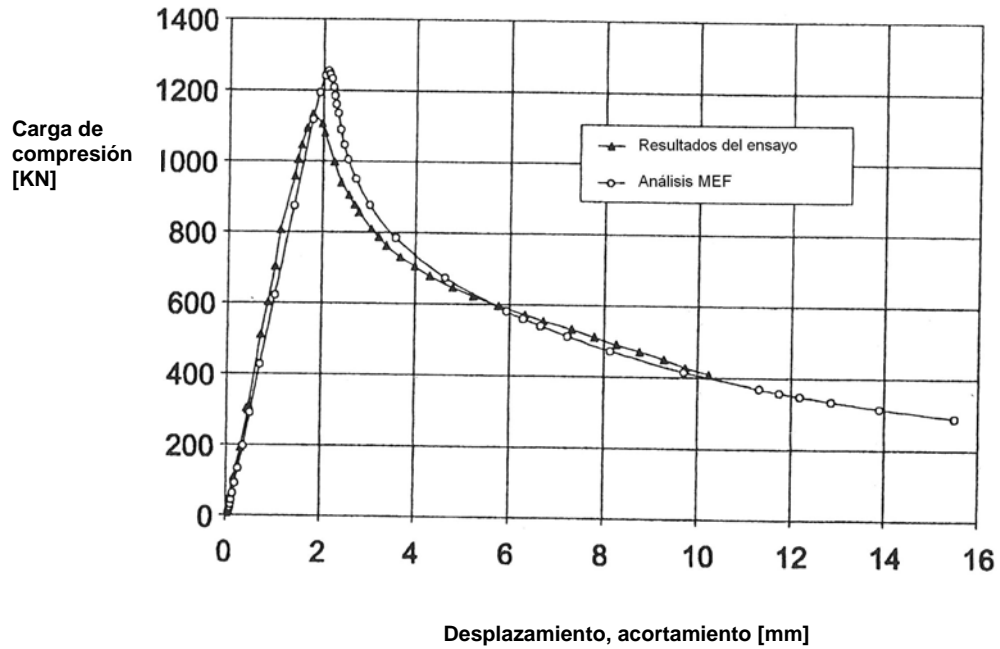


Figura 3. 5. Curva carga deformación de la probeta, [Grondin, 1998].

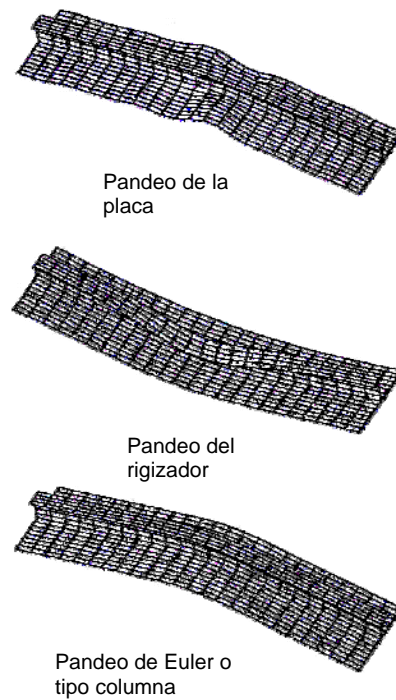


Figura 3. 6. Formas de fallo previsibles de la placa rigidizada, [Grondin, 1998].

3.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO SOBRE LA INFLUENCIA DE LAS IMPERFECCIONES INICIALES

Con la información proporcionada por el artículo de Grondin, [Grondin, 1998], presentada en el apartado anterior, se construye un modelo para la realización de análisis paramétrico mediante el MEF. Los análisis realizados son estáticos y no lineales, tanto en cuanto a material como a consideración de la etapa post-crítica.

La carga se modeliza empleando control por desplazamiento, esto es, imponiendo un desplazamiento vertical igual al desplazamiento del punto de aplicación de la carga de compresión cuyo valor se incrementa de forma progresiva hasta que ocurre el fallo.

El análisis paramétrico se ha realizado mediante el software para MEF ABAQUS, [Hibbit, 1994].

Aunque la Tesis Doctoral no se centra en los aspectos de la modelización, es interesante detallar la solución dada en el modelo al dispositivo de introducción de la carga vertical, dado que es fundamental evitar introducir efectos locales en la zona de aplicación de carga que pudieran distorsionar los resultados, véase la Figura 3. 7.

El apoyo cilíndrico y la placa de testa de la probeta se modelizan en el MEF mediante un sistema de elementos de contacto rígidos con un elemento de contacto rígido adicional perpendicular a la placa de testa. Esta solución evita que las secciones extremas de la placa con el rigidizador se deformen. Además, el elemento rígido adicional proporciona al modelo un comportamiento articulado en los extremos igual al empleado en el ensayo.

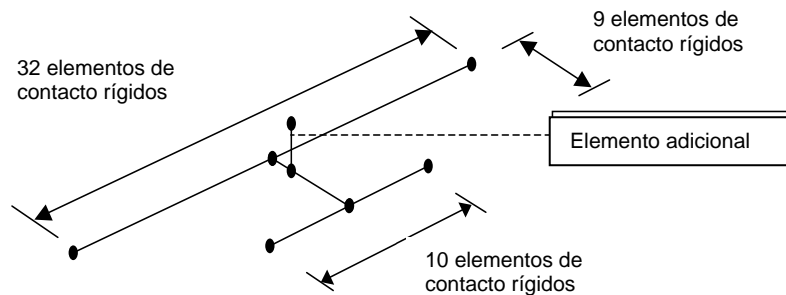


Figura 3. 7. Detalle del modelo en los apoyos extremos para la aplicación de la carga.

3.3.1. Imperfecciones geométricas

En la presentación de los datos del artículo relevantes para la realización del análisis paramétrico que se desarrolla en este capítulo, ya se ha destacado que las medidas correspondientes a las máximas amplitudes de imperfecciones geométricas iniciales se pueden considerar de acuerdo con las imperfecciones geométricas equivalentes de la Tabla C2 y Figura C1 del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5 [EN 1993-1-5:2006], véase Tabla 3. 4.

Tabla 3. 4. Imperfecciones geométricas equivalentes según Anexo del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].

TIPO DE IMPERFECCIÓN	COMPONENTE	FORMA	AMPLITUD
GLOBAL	RIGIDIZADOR LONGITUDINAL DE LONGITUD $a=2.000$ mm. (PLACA DE ANCHURA $b=500$ mm.)	Arco	$a/400$ $b/400$

Pero la filosofía de las imperfecciones geométricas equivalentes es el de considerar tanto las imperfecciones geométricas iniciales como el de las tensiones residuales. Dado que se pretende un tratamiento por separado de ambos tipos de imperfecciones iniciales, en el análisis paramétrico se proponen valores inferiores a los del Eurocódigo ya que posteriormente a estos se añadirá el efecto de las tensiones residuales.

Por lo tanto, se proponen los siguientes valores para la amplitud máxima de las imperfecciones geométricas iniciales para ser incluidas en los modelos de cálculo mediante el MEF:

- 0,20 mm. (0,01% de la luz de la placa – $a/10.000$)
- 2,00 mm. (0,10% de la luz de la placa – $a/1.000$)
- 20,00 mm. (1,00% de la luz de la placa – $a/100$)

En cuanto a la forma de la imperfección inicial, como queda de manifiesto en la Figura 3. 4, es realmente difícil de predecir, por lo tanto se propone una aproximación simplificada, que la forma sea tomada de los modos de pandeo elásticos, más concretamente de la forma del primer modo de pandeo, Figura 3. 8.

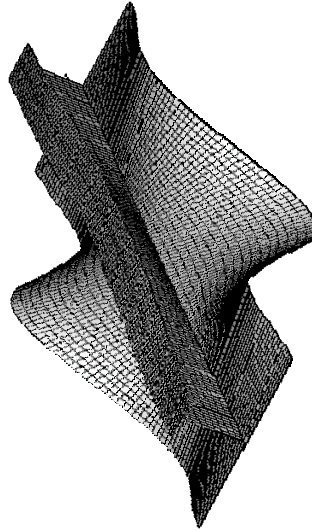


Figura 3. 8. Primer modo de pandeo de la placa rigidizada, ampliado por un factor de escala de 60.

Sin embargo, la elección de la forma de la imperfección inicial puede ser más compleja. Atendiendo a las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006], se pueden destacar para este caso especialmente las siguientes:

- La dirección de la imperfección debe ser la apropiada para obtener la menor resistencia.
- Cuando se combinen varias imperfecciones, deberá seleccionarse una imperfección principal, el resto serán acompañantes y su amplitud deberá reducirse al 70%.

Para la comparación de los resultados del análisis paramétrico con las recomendaciones del Eurocódigo 3, se ha seleccionado una imperfección principal global con una acompañante correspondiente a una imperfección local del rigidizador, véase la Figura 3. 9. El caso de considerar sólo una imperfección global no se ha estudiado dado que la combinación de la imperfección global con la local en el rigidizador es la pesimista. Estas imperfecciones, empleadas en el modelo del MEF, son las que proporcionan la curva de comparación del Eurocódigo 3, véase la Figura 3. 13.

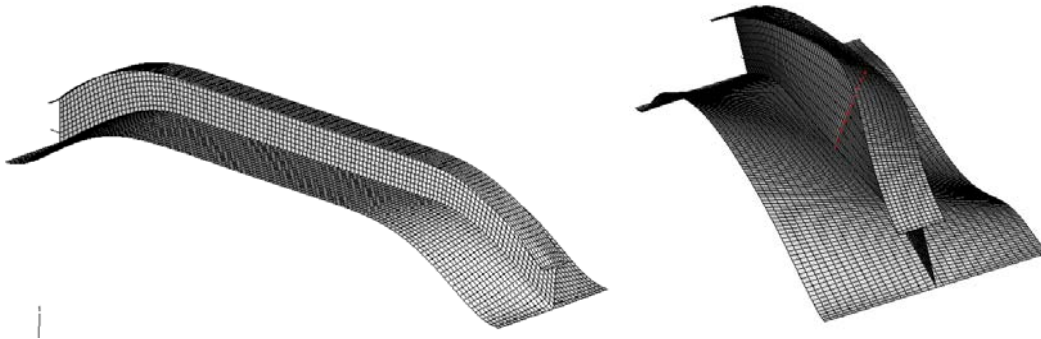


Figura 3. 9. Modelos deformados para diferentes casos de imperfecciones iniciales: imperfección global (izquierda) y combinación de imperfección global y local (derecha).

3.3.2. Tensiones residuales

Los datos proporcionados en el artículo sobre las tensiones residuales de la probeta, véase la Figura 3. 3, proporcionan información exacta sobre las amplitudes máximas que es de utilidad para utilizarlos en los modelos de cálculo del MEF; sin embargo, la complejidad del patrón real de distribución de las mismas no es aconsejable para su empleo por personas en ejercicio en el campo de la ingeniería estructural, no es práctico. Por lo tanto, se propone el empleo de un patrón simplificado de acuerdo a lo tratado en el Capítulo 2 sobre la publicación de Paik y Thayamballi, [Paik, 2003], véase el patrón de tensiones residuales propuesto la Figura 3. 10.

Además del patrón de tensiones residuales propuesto, en el modelo para el análisis paramétrico mediante el MEF, se incluirán las imperfecciones geométricas iniciales al objeto de conseguir la mejor correspondencia entre el modelo MEF y el ensayo.

Pero es muy importante tener en cuenta que la introducción del patrón de tensiones residuales en el modelo deformado, con las imperfecciones geométricas iniciales, exigirá un paso previo para que se equilibren todas las tensiones presentes en la sección antes de que ninguna carga sea aplicada. Este paso de equilibrio previo puede dar lugar a una redistribución de las tensiones residuales e incluso a la modificación de la deformada inicial del modelo, estos aspectos se discutirán extensamente en el Capítulo 5.

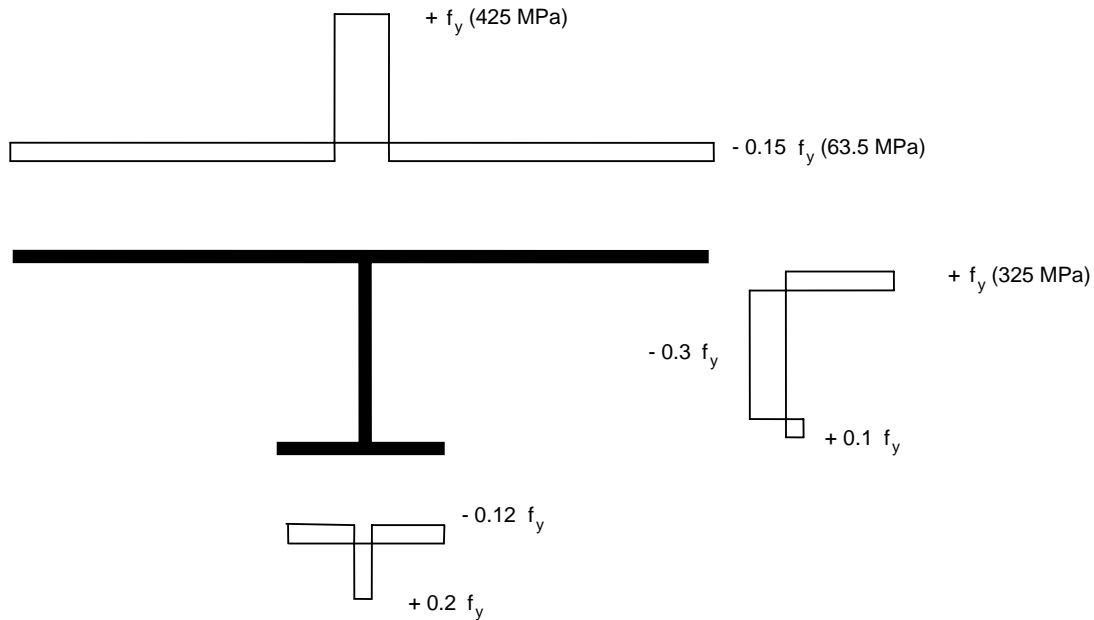


Figura 3. 10. Patrón de tensiones residuales simplificado propuesto para el análisis mediante el MEF.

3.3.3. Resultados del análisis paramétrico

Como resultado de aplicar en el modelo MEF, definido de acuerdo a las especificaciones del ensayo presentado, las consideraciones anteriores relativas a las imperfecciones geométricas y tensiones residuales iniciales, se ha llevado a cabo un análisis paramétrico cuyos resultados se presentan a continuación.

En primer lugar, se ha evaluado la influencia de consideración u omisión de las tensiones residuales en el modelo MEF; de los resultados obtenidos se concluye que en aquellos casos en los que se han considerado tensiones residuales, los resultados obtenidos para la carga máxima son más próximos a la del ensayo, aunque las diferencias con los casos en los que no se han empleado tensiones residuales son muy pequeñas.

Para valorar la calidad del modelo empleado también es importante comprobar que el modo de fallo obtenido mediante el MEF es el mismo que en el ensayo. En la Figura 3. 11 se presenta el modo de fallo en el que se aprecia el pandeo del rigidizador, el mismo que en el ensayo, según el artículo referenciado.

Pero sin duda alguna, la mejor forma de analizar los resultados obtenidos es la comparación de las curvas carga deformación obtenidas para los modelos MEF con la de ensayo.

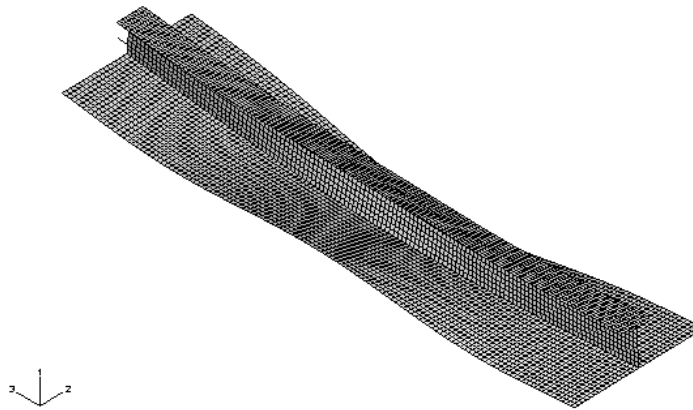
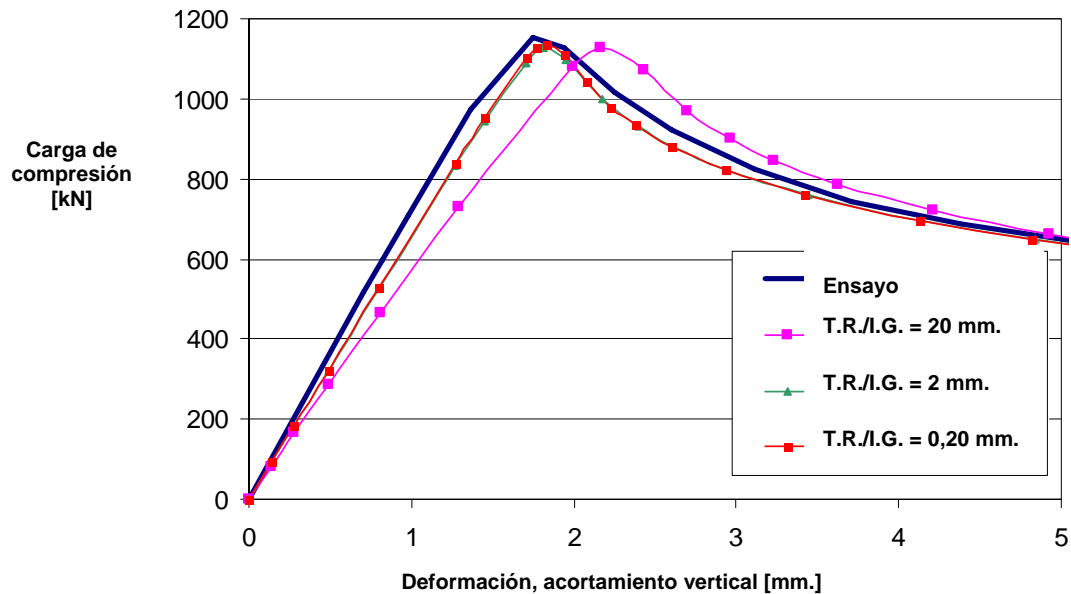


Figura 3. 11. Forma de fallo obtenida para el caso de análisis: T.R. / I.G.=0,2mm / Carga máxima =1134 kN. Representación con factor de escala de 10.

En la Figura 3. 12 se presentan las curvas carga de formación del ensayo y del modelo MEF con los resultados obtenidos mediante la consideración de tensiones residuales y tres diferentes amplitudes de imperfecciones geométricas iniciales.

La carga de compresión indicada en la curvas es la aplicada en los extremos de la placa rigidizada y el desplazamiento corresponde al acortamiento vertical, medido en el punto de aplicación de la carga vertical de compresión.



T.R. = Tensiones residuales I.G. = Imperfecciones geométricas iniciales

Figura 3. 12. Curvas carga deformación para diferentes combinaciones de I.G. con T.R.

Como se puede observar, el modelo con tensiones residuales e imperfecciones geométricas de amplitud 2,00 mm. es el que mejor se ajusta a los resultados del ensayo. En cuanto al caso de amplitud igual a 20,00 mm., aunque la carga máxima se corresponde con la del ensayo, las deformaciones son excesivamente grandes, el modelo es menos rígido que la probeta empleada en el ensayo y, por lo tanto, sufre mayores desplazamientos a igual carga.

Finalmente, la Figura 3. 13 muestra la comparación de la curva del ensayo, la resultante de aplicar las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006], y la del caso con tensiones residuales y amplitud de imperfecciones geométricas iniciales 2,00 mm. La correspondencia de la propuesta de consideración explícita de tensiones residuales e imperfecciones geométricas con las del ensayo y el Eurocódigo 3 es correcta.

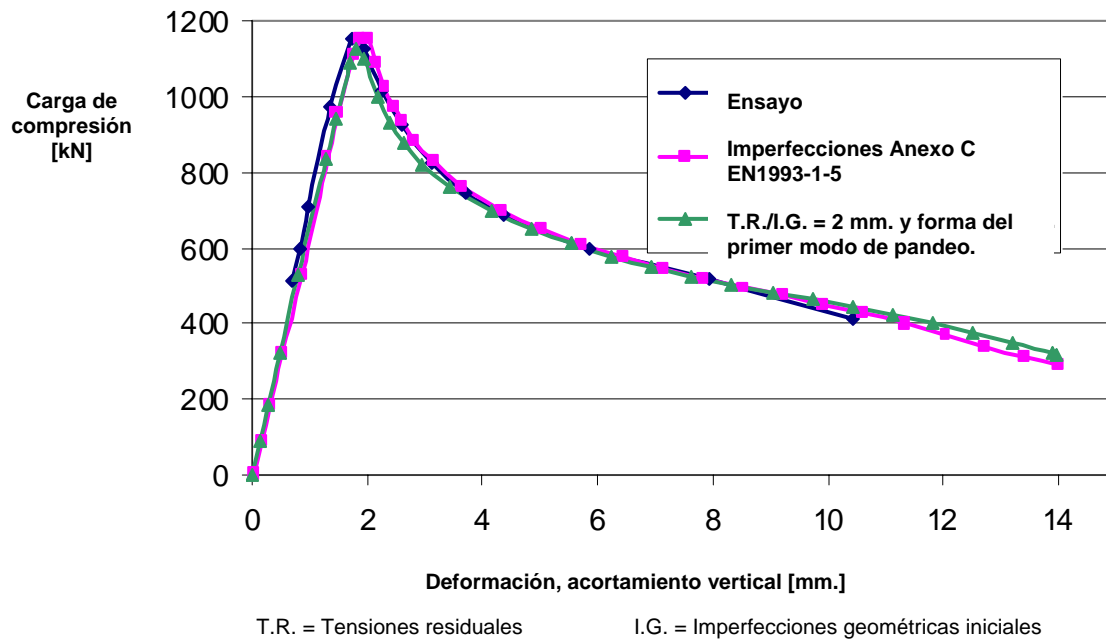


Figura 3. 13. Comparación de la curva carga deformación obtenida con el Eurocódigo 3 y con la resultante del ensayo.

3.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Como resultado de las investigaciones desarrolladas en este capítulo mediante el análisis paramétrico, aplicando el MEF, validado mediante el ensayo desarrollado sobre una placa rigidizada con un rigidizador de sección en T, susceptible de comportamiento a pandeo tipo columna, y cuyos datos experimentales se han tomado de la referencia siguiente:

“Stiffened Steel Plates Under Compression and Bending”. G.Y. Grondin, Q. Chen, A.E. Elwi, J.J. Cheng. J. Construct. Steel Res. Vol. 45 No. 2, pp. 125-148. 1998, [Grondin, 1998].

Se presentan las siguientes conclusiones:

1. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF y los ensayos.
2. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF, empleando la imperfecciones geométricas y tensiones residuales y los obtenidos siguiendo las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].
3. En relación con las imperfecciones geométricas iniciales. El uso de imperfecciones geométricas equivalentes de amplitudes del orden de las tolerancias de fabricación y ejecución de estructuras máximas, produce resultados aceptables para diseño de placas rigidizadas comprimidas, con comportamiento tipo columna. Sin embargo, es importante contrastar la información sobre las imperfecciones geométricas iniciales medidas, para obtener correspondencias correctas en el caso de comparación de simulaciones mediante el MEF y ensayos.

La descripción del comportamiento frente a pandeo global de los elementos estructurales de acero sometidos a compresión está adecuadamente tratado en Europa desde los años 70, [ECCS, 1976], [ECCS, 1977], y más recientemente a través de las curvas de pandeo del Eurocódigo 3, [EN 1993-1-1:2005]. No obstante, la aplicación de las curvas de pandeo del Eurocódigo a secciones armadas esbeltas, con comportamiento tipo columna frente a pandeo, puede dar lugar a diseños muy conservadores.

fallo en la etapa post-crítica, mediante el programa de MEF, que posteriormente se debe ajustar a la magnitud de la imperfección inicial seleccionada

4. En relación con la influencia de las tensiones residuales en la rigidez del modelo y la carga máxima obtenida aplicando el MEF. Los grados de afección estudiados no influyen a los resultados obtenidos aplicando el MEF.
5. En relación con la modelización del acero. Se considera imprescindible la correcta caracterización del acero. De otra manera no se obtendrán resultados fiables cuando se analicen comportamientos en régimen no lineal. Por ello, se recomienda el empleo de la curva real, véase Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].
6. Como conclusión final de la investigación desarrollada, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta la recomendación de CONSIDERACIÓN DE IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS Y TENSIONES RESIDUALES EN LA VERIFICACIÓN DE PLACAS DE ACERO EN ALMAS DE VIGAS ARMADAS, RIGIDIZADAS Y NO RIGIDIZADAS, SOMETIDAS CORTANTE Y FLEXIÓN.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

IMPERFECCIONES INICIALES	EN1993-1-5:2005 ANEXO C		PROPUESTA	
	FORMA	AMPLITUD	FORMA	AMPLITUD
Imperfecciones geométricas.	Forma de pandeo	Min (a/200, b/200).	Local, a nivel de panel. Forma de pandeo.	(*) a/400
Tensiones residuales.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Patrones rectangulares de tensiones de membrana.	(**) Tracción: +0,80·f _y Compresión: -0,05·f _y

(*) Aunque el análisis paramétrico ha demostrado que ni la amplitud de las imperfecciones geométricas iniciales ni de las tensiones residuales estudiadas afectan a los resultados proporcionados mediante el MEF, se recomienda emplear las tolerancias mínimas del *Annex L1 “Geometrical tolerances - Essential tolerances”*, [prEN1090-2:2004], **siendo “a” la menor dimensión de la placa, longitud o canto.**

(**) El empleo en los modelos para el cálculo con el MEF de tensiones residuales en combinación con las imperfecciones iniciales proporciona valores menores de carga máxima que los proporcionados por modelos sin tensiones residuales. Sin embargo, en todos los casos investigados, el empleo de imperfecciones geométricas de forma igual a la del modo de pandeo elástico, sin tensiones residuales, proporciona resultados satisfactorios, del lado de la seguridad. Por lo tanto, una amplitud de valor a/400 puede

(**) El empleo en los modelos para el cálculo con el MEF de tensiones residuales en combinación con las imperfecciones iniciales proporciona valores menores de carga máxima que los proporcionados por modelos sin tensiones residuales. Sin embargo, para el caso investigado, el empleo de imperfecciones de forma igual al modo de pandeo, sin tensiones residuales, proporciona resultados satisfactorios. Por lo tanto, una amplitud de valor $a/400$ puede considerarse satisfactoria como imperfección equivalente para tener en cuenta tanto imperfecciones geométricas como tensiones residuales.

NOTA: Estas recomendaciones han sido validadas únicamente con el ensayo referenciado, para otro tipo de cargas, condiciones de contorno, esbeltez del elemento estructural... estas recomendaciones podrían no ser de aplicación.

Estas recomendaciones se discuten y ponen en contexto con el resultado de otras investigaciones, presentadas en el Capítulo 4 y en el Capítulo 5, mediante las conclusiones finales ofrecidas en el Capítulo 6.

4. APLICACIÓN A VIGAS ARMADAS, RIGIDIZADAS Y NO RIGIDIZADAS, SOMETIDAS CORTANTE Y FLEXIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

Al igual que en el Capítulo 3, con el objeto de desarrollar la alternativa planteada en el Capítulo 2 para la CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, en este capítulo se presenta, en el apartado 4.2., un caso de aplicación sobre el que realiza un análisis paramétrico, apartado 4.3., que es contrastado con las recomendaciones presentadas en el Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006], y con los resultados de ensayos desarrollados en el proyecto COMBRI, [COMBRI, 2003].

En el apartado 4.4., se presentan las conclusiones ofreciendo propuestas de valores a considerar, tanto en relación con las imperfecciones geométricas como con las tensiones residuales.

Con el objeto de establecer el rango de la validez de las imperfecciones recomendadas, se analizan los valores poniéndolos en relación con las recomendaciones del Eurocódigo 3 y con las tolerancias de ejecución de estructuras de acero, [prEN1090-2:2004].

Las conclusiones finales, que se presentan en el Capítulo 6, considerarán además de los resultados de este capítulo los de los casos de aplicación de los Capítulos 3 y 5.

En cuanto a éste capítulo se refiere, las investigaciones que se desarrollan a continuación, en los siguientes apartados, se han validado con los resultados de los ensayos desarrollado proyecto COMBRI, sobre el comportamiento de vigas armadas sometidas a cortante y flexión, cuyos detalles completos se presentan en las referencias siguientes:

“Shear behaviour and bending interaction of stiffened and unstiffened welded girders”, [COMBRI, 2005a],[COMBRI, 2005b],[Feldmann, 2007],[Naumes, 2007].

Durante el desarrollo del proyecto COMBRI, se desarrollaron por parte de la RWTH Aachen, universidad de Aquisgrán en Alemania, una serie de ensayos sobre vigas armadas, fabricadas a partir de placas soldadas, para investigar la influencia de los rigidizadores en su comportamiento frente a solicitaciones de flexión y cortante.

Los ensayos que se detallan en la referencia [Naumes, 2007], tratan de dos vigas armadas sometidas a una carga puntual en el voladizo que produce la solicitación combinada de flexión y cortante. Se consideraron dos probetas, una sin rigidizar y otra con un rigidizador longitudinal de sección trapezoidal.

En este Capítulo se presentan los resultados de los análisis paramétricos, adicionales a los ensayos, que se desarrollaron en el marco del proyecto COMBRI bajo la responsabilidad del autor de la Tesis Doctoral. Estos trabajos fueron sometidos a la evaluación del consorcio del proyecto que los aprobó e incluyó en el informe final de resultados del proyecto, [COMBRI, 2007].

El análisis paramétrico contempla diferentes amplitudes y formas de las imperfecciones geométricas iniciales. La forma de la imperfección geométrica inicial se ha obtenido a través del cálculo de los modos de pandeo elásticos y se han estudiado diferentes valores de la amplitud; estos valores se han seleccionado siguiendo las recomendaciones encontradas en la norma de ejecución de estructuras de acero, [prEN1090-2:2004].

En cuanto a las tensiones residuales, se ha empleado el patrón rectangular presentado en el Capítulo 2, según la referencia [Paik, 2003]. Las amplitudes máximas de tensiones residuales de compresión y de tracción se han definido atendiendo a las recomendaciones de la referencia anterior dado que no se realizaron mediciones de las mismas en las probetas ensayadas.

Además del contraste con el citado ensayo, se presenta una comparación de los resultados obtenidos en el análisis paramétrico aplicado al modelo del MEF con los resultantes de aplicar el Anexo C, [EN 1993-1-5:2006].

Finalmente, en el apartado de conclusiones se presentan unas recomendaciones basadas en los resultados del análisis paramétrico.

Para ampliar parte de la información de este Capítulo 4, es posible acudir a fuentes del proyecto COMBRI tales como las de los informes semestrales intermedio, [COMBRI, 2005a], cuarto y quinto, [COMBRI, 2005b], [COMBRI, 2006a], e informe final del proyecto COMBRI, [COMBRI, 2007], en los que el que el autor contribuyó en los aspectos

relacionados con la influencia de las imperfecciones iniciales mediante trabajos sobre la materia que se han recogido tanto en los citados informes del proyecto como en anejos específicos del informe final sobre imperfecciones, [Chica, 2007b], [Chica, 2007c].

Tanto el informe final, [COMBRI, 2007], como los anejos específicos sobre imperfecciones, [Chica, 2007b], [Chica, 2007c], están disponibles a través de la web de la Comisión Europea <http://bookshop.europa.eu/>.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE EXPERIMENTACIÓN

4.2.1. Propiedades de la sección y descripción del ensayo.

Como ya se ha indicado en la introducción de este capítulo, la información completa de los ensayos desarrollados por RWTH Aachen en el proyecto COMBRI, en cuanto a la descripción del mismo, se puede encontrar en el informe intermedio de seguimiento de las actividades del proyecto [COMBRI, 2005a].

Estos ensayos, que sirven de validación de los resultados de la investigación desarrollada mediante el análisis paramétricos empleando el MEF, se centran en el estudio del comportamiento cortante y flexión combinadas de vigas armadas con rigidizador longitudinal y sin rigidizador longitudinal. Las dimensiones de las probetas se presentan en la Figura 4. 1 y la descripción de los ensayos en la Figura 4. 2.

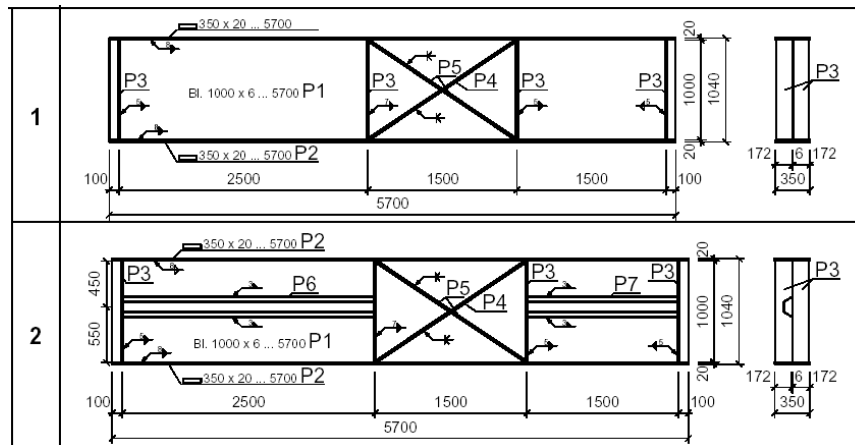


Figura 4. 1. Alzados y detalles constructivos de las vigas armadas a ensayar, [COMBRI, 2005a].

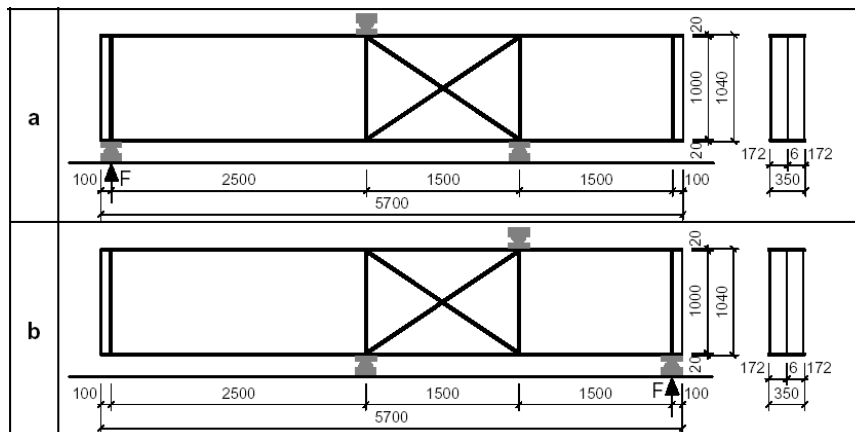


Figura 4. 2. Ubicación de los apoyos y puntos de introducción de la carga en el caso de ménsula larga a) y de ménsula corta b), [COMBRI, 2005a].

4.2.2. Propiedades del material, acero.

Las vigas armadas se fabricaron a partir de placas suministradas por otro de los socios del proyecto COMBRI, el acerista alemán Dillinger Hütte AG, a partir de estas placas se fabrican las vigas anteriormente descritas mediante uniones soldadas, véase la Figura 4. 3.



Figura 4. 3. Viga de acero con rigidizador longitudinal trapecoidal fabricado a partir de las placas de acero suministradas por Dillinger Hütte AG, [COMBRI, 2005a].

Con el objeto de caracterizar correctamente el acero de las vigas se realizaron ensayos de tracción en probetas extraídas tanto del alma como de las alas de las vigas armadas, Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de Dillinger Hütte AG de acuerdo con la norma de ensayo de materiales metálicos a temperatura ambiente, [EN10002-1:2001]. Los resultados de los ensayos se presentan en la Tabla 4. 1.

Tabla 4. 1. Características de las placas de acero suministradas por Dillinger Hütte AG, [COMBRI, 2005a].

PLACA DE ACERO	ESPESOR NOMINAL t (mm.)	LÍMITE ELÁSTICO NOMINAL f_y (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO MEDIDO f_y (MPa)	RESISTENCIA ÚLTIMA A TRACCIÓN f_u (MPa)	ALARGAMIENTO MEDIDO A (%)
ALMA	6	355	399	530	31,40
ALA/RIGIDIZADOR	20	355	433	558	31,20

Las curvas tensión deformación del acero del alma y de las alas y rigidizador, que se emplean en las simulaciones del MEF que sirven para desarrollar el análisis paramétrico, se basan en los resultados de los ensayos de tracción y se adopta una modelización tipo bilineal, considerando comportamiento elasto-plástico del acero, [EN 1993-1-5:2006], con

un límite elástico de $f_y = 399 \text{ N/mm}^2$ en el alma y $f_y = 433 \text{ N/mm}^2$ en las alas y rigidizadores.

4.2.3. Tensiones residuales.

Ninguna de las probetas empleadas en los ensayos desarrollados por RWTH Aachen fue sometida a medición de tensiones residuales producidas por el proceso de fabricación de las vigas armadas. Por lo tanto, se aplicarán patrones de tensiones residuales siguiendo las recomendaciones de Paik y Thayamballi, [Paik, 2003], tanto en relación con determinación de las tensiones máximas de tracción y compresión como con el cálculo de las áreas afectadas.

4.2.4. Imperfecciones geométricas.

Las imperfecciones geométricas iniciales sí han sido medidas en las vigas ensayadas por RWTH Aachen. Se empleó medición mediante la tecnología de fotogrametría, véase la Figura 4. 4, gracias a la cual se obtuvo el patrón de distribución de las imperfecciones geométricas iniciales junto con sus amplitudes máximas.

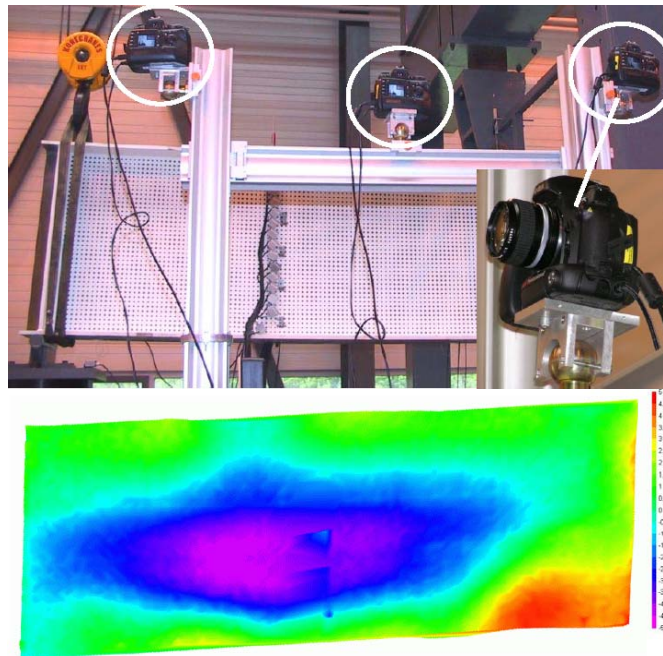


Figura 4. 4. Equipo de fotogrametría y resultados de la medición de imperfecciones geométricas iniciales realizadas en el alma del espécimen 2 A, [COMBRI, 2005a].

Para el caso de la viga 2 A se obtuvo una imperfección geométrica inicial de 5,18 mm., que se sitúa dentro del rango de imperfecciones geométricas iniciales equivalentes propuestas en el Anexo C de la Parte 1-5 del Eurocódigo 3, [EN 1993-1-5: 2006], que

establece una amplitud de imperfección local, para el caso de un panel, de valor igual al mínimo de $(a/200, b/200)$ y forma la del modo de pandeo elástico. Para el caso 2 A, el canto de la viga es de 1.000 mm., con lo que la amplitud obtenida de las recomendaciones del Eurocódigo 3 sería de 5,00 mm.

Aunque, la amplitud de las imperfecciones iniciales es acorde con las recomendaciones del Anexo C Eurocódigo 3 Parte 1-5, se puede observar, véase la Figura 4. 4, cómo la distribución de las mismas es aleatoria y, cómo se podrá constatar en los siguientes apartados, dista de la de la forma de pandeo elástica propuesta. Además, sin considerar las tensiones residuales, la imperfección geométrica equivalente es prácticamente igual a las imperfecciones geométricas existentes.

4.2.5. Secuencia de carga experimental y carga máxima.

Como ya se ha presentado en el esquema de la Figura 4. 2., los ensayos en las dos vigas armadas consisten en la introducción de una carga, mediante un gato hidráulico, en el extremo libre, ménsula, de la viga. Con el objeto de agilizar los ensayos, cada viga armada consta de dos extremos, uno de menor luz 1.500 mm. y otros de mayor luz, 2.500 mm., unidos por un panel rigidizado. De esta forma, cada viga puede ser sometida a dos ensayos, la disposición del caso 2 A se muestra en la Figura 4. 5.



Figura 4. 5. Disposición del ensayo 2 A en las instalaciones de RWTH Aachen, [COMBRI, 2005b].

Todos los ensayos se realizaron mediante deformación controlada, aplicando una velocidad constante de deformación de 2 mm. por minuto.

4.2.6. Resultados del ensayo.

En todos los ensayos se registraron grandes deformaciones en el alma de las vigas armadas, con formas de pandeo típicas de las distribuciones de los campos de tensiones

de placas sometidas a cortante, método de los campos de tensiones rotacionales desarrollado por Höglund, [Höglund, 1981], [Johansson, 2007].

En cuanto al efecto del rigidizador longitudinal trapezoidal, su rigidez ha sido suficiente como para asegurar un comportamiento diferenciado de los paneles superior e inferior, de forma que el pandeo se ha producido por separado a ambos lados de la placa del alma dividida por el rigidizador. Los resultados de los ensayos se muestran en la Figura 4. 6.

En cuanto a las curvas carga deformación obtenidas en los ensayos, en la Figura 4. 7. se presenta la obtenida para el ensayo 2 A, ménsula larga con rigidizador. Se entiende que esta curva es representativa de las obtenidas en todos los ensayos, por ello se ha elegido para explicar en detalle el comportamiento de las vigas armadas durante los ensayos.



Figura 4. 6. Deformadas en los especímenes tras la realización de los ensayos, [COMBRI, 2005b].

Tal y como se presenta en la Figura 4. 7, la placa que configura el alma de las vigas ensayadas sufre una progresión en su deformación que se puede dividir en tres etapas claramente diferenciadas: una primera etapa 1), en la que presenta una deformación elástica y lineal hasta alcanzar unos valores no despreciables, para el caso 2 A hasta alcanzar aproximadamente un 60% de la carga máxima, donde entonces pandea y tiene un comportamiento post-crítico hasta alcanzar la carga máxima, 2), a partir de la cual

sufre grandes deformaciones y pierde la capacidad de soportar incrementos adicionales de la carga, 3).

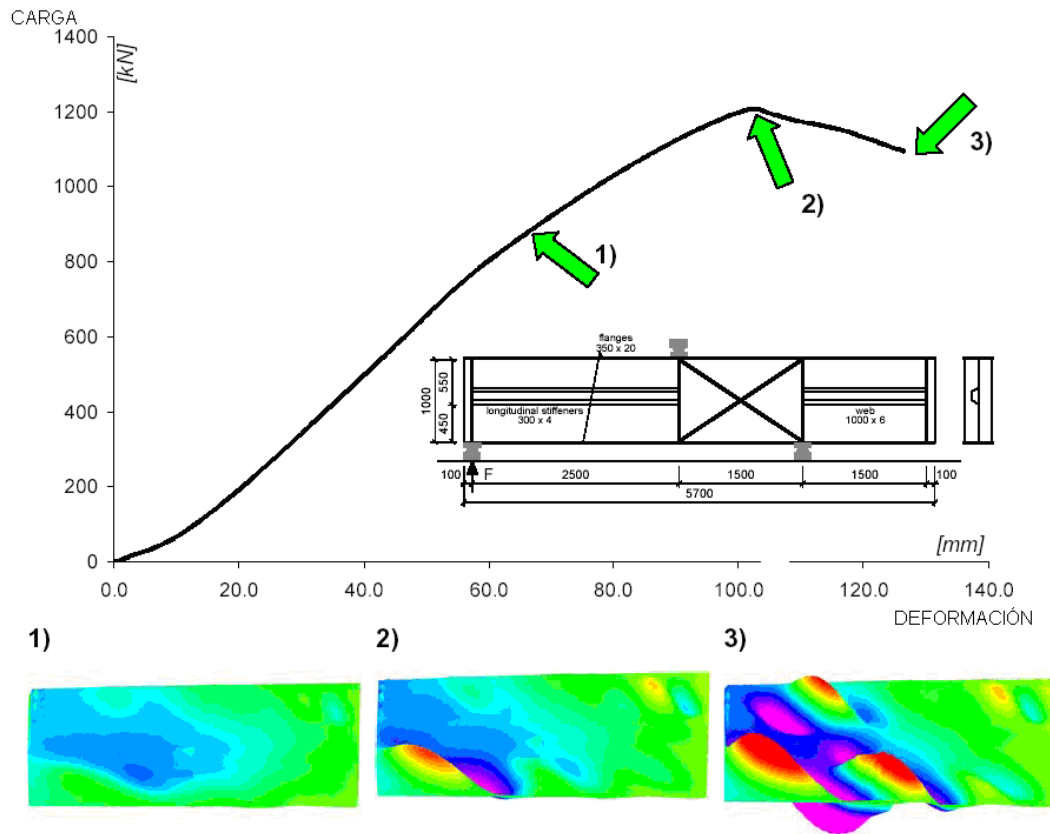


Figura 4. 7. Curva carga deformación del ensayo 2 A, [COMBRI, 2005b].

4.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO SOBRE LA INFLUENCIA DE LAS IMPERFECCIONES INICIALES

Gracias a la información proporcionada por los ensayos de RWTH Aachen, realizados en ámbito del proyecto COMBRI, es posible validar los trabajos de investigación para la determinar la influencia de las imperfecciones iniciales en los resultados de los modelos empleados en el cálculo mediante el MEF.

Para realizar el estudio paramétrico se eligen los casos extremos 1 A), ménsula larga sin rigidizador y máximo momento flector, y 2 B), ménsula corta con rigidizador y máxima influencia del cortante. Los modelos que se emplea en el análisis paramétrico mediante el MEF se pueden observar en la Figura 4. 8.

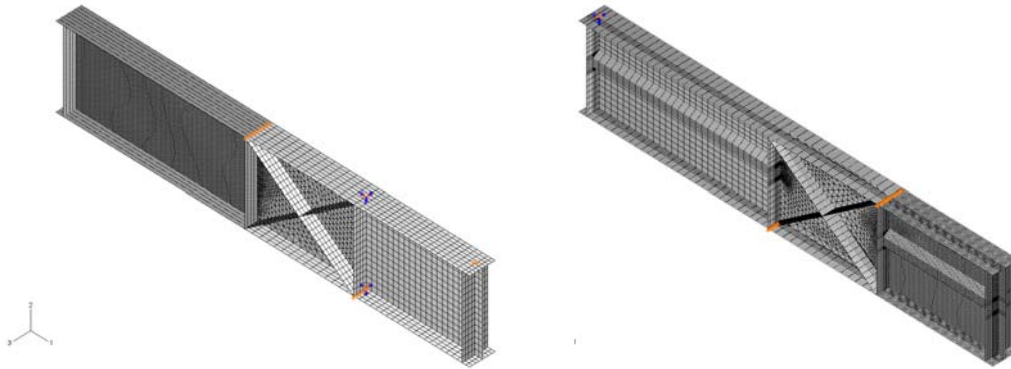


Figura 4. 8. Modelos empleados para el análisis paramétrico con el MEF, caso 1 A) a la izquierda y caso 2 B) a la derecha.

No es objeto de la presente Tesis Doctoral tratar los aspectos relacionados con operatoria de la modelización, es por ello que sólo se proporciona información pertinente para entender el modelo y sus condiciones de contorno.

Se han empleado elementos tipo placa, “S3R/S4R shell”, de la librería del software para cálculo con el MEF empleado para el análisis paramétrico, ABAQUS, [Hibbit, 1994]. Para la sección transversal de la viga armada se han utilizado 8 elementos en cada ala y 50 en el alma. En cuanto a la dirección longitudinal, el mallado es más denso en la zona del alma ensayada, por ejemplo para la caso 1 A) se emplean 125 columnas de elementos en los 2.500 mm. de longitud de la ménsula.

En cuanto a las condiciones de contorno, la introducción de la carga se ha considerado aplicada en un único nodo y los apoyos se han modelizado mediante una línea de nodos,

de anchura la del ala, véase la franja coloreada en naranja en la Figura 4. 8, a la que se ha coartado el desplazamiento vertical.

Los análisis realizados son estáticos y no lineales, tanto en cuanto a material, curva tensión deformación bilineal como a consideración de la etapa post-crítica. La carga se modeliza empleando control por desplazamiento, imponiendo un desplazamiento vertical cuyo valor se incrementa de forma progresiva hasta que ocurre el fallo.

4.3.1. Imperfecciones geométricas

En el apartado anterior se ha destacado que la medición de la amplitud máxima de las imperfecciones geométricas iniciales, 5,18 mm., está en el rango de las imperfecciones geométricas equivalentes de la Tabla C2 y Figura C1 del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5:2006], véase Tabla 4. 2.

Tabla 4. 2. Imperfecciones geométricas equivalentes según Anexo del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2005].

TIPO DE IMPERFECCIÓN	COMPONENTE	FORMA	AMPLITUD
LOCAL	PANEL O SUBPANEL DE DIMENSIONES $a \times b$ Considerando la dimensión menor $a = 1.000 \text{ mm.}$ (CANTO DEL ALMA DE LAS VIGAS)	Modo de pandeo elástico.	$a/200$ $b/200$

Es importante destacar el valor de la imperfección geométrica inicial alcanzado en el ala de la viga utilizada en el ensayo, 5,18 mm., ya que se puede afirmar que éste coincide con la imperfección geométrica equivalente recomendada por el Eurocódigo para considerar tanto el efecto de las imperfecciones geométricas iniciales como el de las tensiones residuales conjuntamente.

Dado que en esta Tesis Doctoral se propone un tratamiento por separado de ambos tipos de imperfecciones iniciales, en el análisis paramétrico se emplean valores inferiores a los del Eurocódigo ya que posteriormente a estos se añadirá el efecto de las tensiones residuales.

En concreto, las amplitudes de las imperfecciones geométricas iniciales que se proponen en la investigación llevada a cabo mediante en análisis paramétrico, se basan en las tolerancias de la norma de ejecución de estructuras de acero, actualmente está en vigor en España la versión experimental, [ENV 1090-1: 1997], [ENV 1090-5:1999], pero se ha acudido al borrador del proyecto de nueva norma, [prEN1090-2:2004], y que establece para el criterio de curvatura de las almas en los apoyos, véase la Figura 2.27. en el

Capítulo 2, un valor máximo de la tolerancia, Δ igual al máximo de los dos valores siguientes, $|\Delta| = b/100$ pero siempre que $|\Delta| \geq t_f$, siendo b el canto del alma y t_f el espesor del alma.

En los apartados siguientes se detalla cómo partiendo de este valor, mayor que la imperfección geométrica inicial propuesta en el Eurocódigo 3, es posible aplicar unos coeficientes que ayudan a ponderar el valor más adecuado de la amplitud de la imperfección geométrica, para combinarlo con las tensiones residuales.

En cuanto a la forma de la imperfección inicial, siguiendo el mismo razonamiento ya expresado en el caso del Capítulo 3, se propone una aproximación simplificada no una reproducción real de las imperfecciones geométricas. En el estudio paramétrico se estudian dos alternativas, el primer modo de pandeo elástico o la recomendada en el Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].

4.3.2. Tensiones residuales

En el apartado 4.2., en el que se ha presentado el ensayo y las características de las muestras ensayadas, ya se ha indicado que no se han realizado mediciones de las tensiones residuales presentes en las vigas armadas estudiadas.

Sin embargo, dada la adecuación a la distribución real y a la simplicidad del patrón de Paik y Thayamballi, [Paik, 2003], véase el Capítulo 2, en el análisis paramétrico, se aplica ese patrón rectangular de tensiones, con amplitudes para tracción en el rango comprendido entre los valores de $0,80 \cdot f_y$ y f_y . En cuanto a las tensiones de compresión, los valores varían entre $0,05 \cdot f_y$ y $0,30 \cdot f_y$.

Es importante destacar nuevamente la importancia de que el patrón de tensiones residuales debe estar en equilibrio, tanto en el modelo no deformado, como en el modelo deformado con las imperfecciones geométricas iniciales.

En el modelo no deformado, el cálculo de los patrones es sencillo, la anchura de la zona traccionada puede calcularse con la expresión siguiente, [Paik, 2003]:

$$2b_t = \left[\frac{\sigma_{rc}}{\sigma_{rc} - \sigma_{rt}} \right] \cdot b$$

b : anchura de la placa b_t : anchura sometida a tracción
 σ_c : tensión de compresión σ_t : tensión de tracción
 (las tensiones se introducen con su signo)

Para la zona comprimida, se consigue estableciendo el equilibrio de tensiones en la sección, de tal forma que no exista resultante alguna de las tensiones residuales, el resumen de los patrones considerados en la investigación inicialmente se muestra en la Tabla 4. 3.

Tabla 4. 3. Resumen de las tensiones residuales incluidas en el análisis paramétrico inicial.

ENSAYO	TENSIONES RESIDUALES (PATRÓN RECTANGULAR)	IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS
1A y 1B	Alas: $0,90 \cdot f_y$ (+), $0,30 \cdot f_y$ (-) Alma: $0,925 \cdot f_y$ (+), $0,30 \cdot f_y$ (-)	Forma: primer modo de pandeo Amplitud: $ \Delta = b/100$
2A y 2B	Alas: $0,83 \cdot f_y$ (+), $0,30 \cdot f_y$ (-) Alma: $0,81 \cdot f_y$ (+), $0,30 \cdot f_y$ (-) Rigidizador: $1,00 \cdot f_y$ (+), $0,23 \cdot f_y$ (-)	Forma: primer modo de pandeo Amplitud: $ \Delta = b/100$

La investigación sobre los parámetros relacionados con las imperfecciones iniciales se realiza, al igual que en el caso del Capítulo 3, mediante análisis estáticos no-lineales utilizando control de cargas, con el software de cálculo basado en el MEF ABAQUS, [Hibbit, 1994].

Es imperativo advertir que la introducción del patrón de tensiones residuales en el modelo deformado, con las imperfecciones geométricas iniciales, exige un paso previo para que se equilibren todas las tensiones presentes en la sección, antes de que ninguna carga sea aplicada.

Este paso inicial consiste en realizar un cálculo previo, sin ninguna carga aplicada en el modelo, que permita una redistribución de las tensiones residuales e incluso una modificación de la deformada inicial del modelo para garantizar la situación de equilibrio de tensiones en la sección transversal. Estos aspectos se discutirán extensamente en el Capítulo 5.

El análisis paramétrico, presentado en la Tabla 4.5., se planificó con el objeto de conseguir información que permitiera ampliar la investigación y ofrecer la información suficiente para establecer conclusiones en relación con:

1. El establecimiento de un coeficiente para las tolerancias proporcionadas por la norma EN1090, [prEN1090-2:2004] que permita obtener la amplitud de la imperfección geométrica inicial a incluir en el modelo MEF.
2. La influencia de las tensiones residuales en la rigidez y carga máxima del modelo para el cálculo con el MEF.

3. La posibilidad de establecer valores de las imperfecciones geométricas equivalentes iniciales alternativos a los proporcionados por el Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].

Por lo tanto, los resultados de la investigación que se presentan en el apartado siguiente se han conseguido gracias a un estudio paramétrico que ha considerado 64 casos diferentes de consideración de imperfecciones iniciales para el cálculo mediante el MEF de los ensayos de RWTH Aachen, presentados al inicio de este capítulo; 16 variantes para cada uno de los cuatro ensayos: 1A, 1B, 2A y 2B.

Los parámetros considerados son los siguientes:

- En cuanto a las imperfecciones geométricas iniciales, formas:
 - Modo de pandeo elástico o,
 - recomendación del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, combinando formas de pandeo local y global.
- En cuanto a las imperfecciones geométricas iniciales, amplitudes:
 - Tolerancias de ejecución de estructuras de la norma EN1090 o
 - recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5.

Las amplitudes proporcionadas por ambas fuentes se multiplicarán por coeficientes de reducción o amplificación (0.5, 0.75, 1.5 y 2.0)

- En cuanto a las tensiones residuales, se adoptan patrones rectangulares de tensiones de membrana constantes en todo el espesor de la placa, con tres diferentes niveles de afección, esto es, valores de la tensión de compresión estimada, véase la Tabla 4. 4:

Tabla 4. 4. Valores de las tensiones residuales en función de grado de afección esperado del proceso de soldadura, [Paik, 2003].

GRADO DE AFECCIÓN	TRACCIÓN	COMPRESIÓN
Bajo	$0,80 \cdot f_y$	$0,05 \cdot f_y$
Medio	$0,90 \cdot f_y$	$0,15 \cdot f_y$
Alto	$1,00 \cdot f_y$	$0,30 \cdot f_y$

Las 16 variantes de consideración de imperfecciones iniciales del análisis quedan recogidas en la Tabla 4. 5.

Tabla 4. 5. Análisis paramétrico sobre la consideración de imperfecciones iniciales desarrollado sobre los cuatro ensayos realizados por RWTH Aachen.

NÚMERO DE CASO	IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS		TENSIONES RESIDUALES
	FORMA	AMPLITUD	
1	1MP	EN1090 (x1)	NO
2	1MP	EN1090 (x1)	T.R. 1
3	1MP	EN1090 (x1)	T.R. 2
4	1MP	EN1090 (x1)	T.R. 3
5	EC3	EC3 (x1)	NO
6	EC3	EC3 (x1)	T.R. 1
7	EC3	EC3 (x1)	T.R. 2
8	EC3	EC3 (x1)	T.R. 3
9	1MP	EN1090 (x0.5)	NO
10	1MP	EN1090 (x0.75)	NO
11	1MP	EN1090 (x1.5)	NO
12	1MP	EN1090 (x2.0)	NO
13	EC3	EC3 (x0.5)	NO
14	EC3	EC3 (x0.75)	NO
15	EC3	EC3 (x1.5)	NO
16	EC3	EC3 (x2.0)	NO

Leyenda de la Tabla 4. 5 y siguientes, Tabla 4. 6 y Tabla 4. 7:

1MP: Primer modo de pandeo elástico.

EN1090: Amplitudes tomadas de la norma de ejecución de estructuras, [prEN1090-2:2004]

EC3: Amplitudes tomadas del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].

T.R. 1: Tensiones residuales con grado de afección bajo, Tabla 4. 4.

T.R. 2: Tensiones residuales con grado de afección medio, Tabla 4. 4.

T.R. 3: Tensiones residuales con grado de afección alto, Tabla 4. 4.

4.3.3. Resultados del análisis paramétrico

Una vez introducidas en el modelo MEF las diferentes imperfecciones geométricas y tensiones residuales iniciales, se ha llevado a cabo el análisis paramétrico definido en la Tabla 4. 5, cuyos resultados se presentan a continuación. Se presentan en detalle sólo los casos 1A y 2B ya que son suficientemente representativos de los 1 B y 2 A y proporcionan la suficiente información para que se contrasten fundadamente las conclusiones presentadas.

En primer lugar, se presentan la investigación sobre el ensayo 1A, correspondiente a la viga armada sin rigidizador y ménsula de 2.500 mm.

En la Figura 4. 9 se comparan las curvas carga - deformación obtenidas en el modelo MEF sin considerar tensiones residuales pero con amplitudes de la imperfección geométrica definida según la norma de ejecución de estructuras o el Eurocódigo 3.

En cuanto a las formas de las imperfecciones iniciales, tanto con las amplitudes del Eurocódigo 3 como con las tolerancias de la norma de ejecución de estructuras de acero, se utiliza el modo de pandeo elástico. Ambas amplitudes proporcionan curvas carga - deformación que se ajustan correctamente a la del ensayo y quedan del lado de la

seguridad, por debajo del valor de la carga máxima, aunque en el caso de la amplitud seleccionada según la norma de ejecución es ligeramente más conservador.

Posteriormente, en la Figura 4. 10 se analiza la influencia de la consideración de las tensiones residuales sobre los resultados anteriores, esto es, adicionalmente a las imperfecciones geométricas. En ambos casos se produce una reducción de la carga máxima obtenida en el modelo para el cálculo con el MEF. Siendo más acusada para el caso de la norma de ejecución de estructuras, tanto en cuanto a carga máxima se refiere como a disminución de la rigidez del modelo, obsérvese la curva más tendida, con menor pendiente.

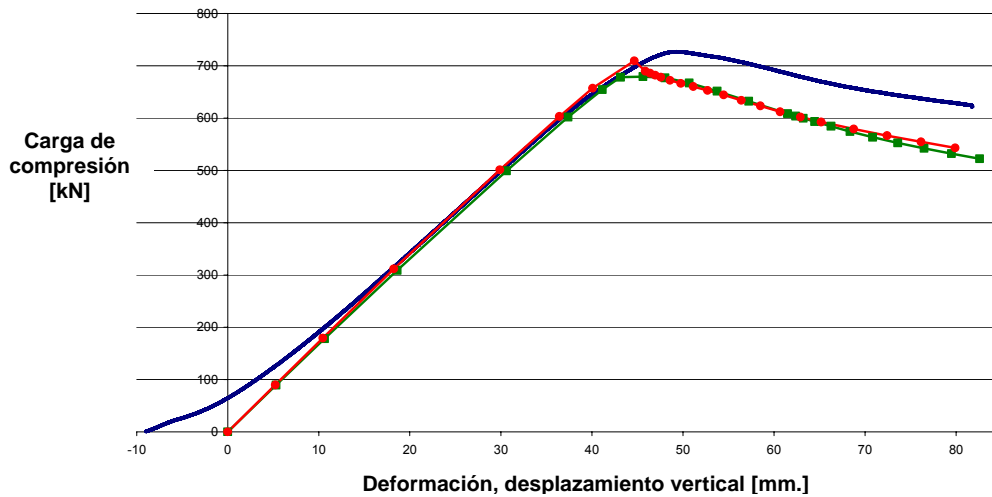


Figura 4. 9. Ensayo 1A – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G. pero no T.R. Caso 1 (1MP, verde -■-), caso 5 (EC3, rojo -●-) y ensayo (azul ---).

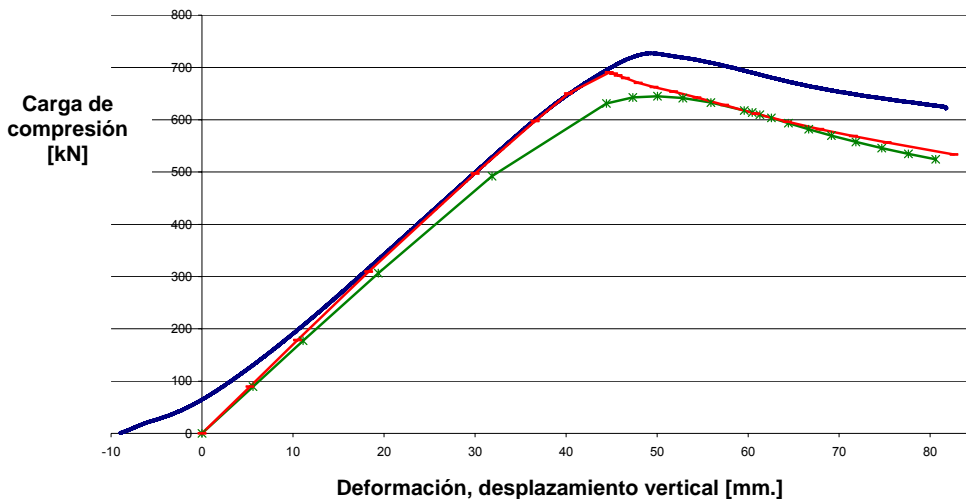


Figura 4. 10. Ensayo 1A – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G. y T.R. Caso 4 (1MP, verde -X-), caso 8 (EC3, rojo -—) y ensayo (azul ---)

Con el objeto de obtener información suficiente que permita discutir la adecuación de los valores de las amplitudes para las imperfecciones geométricas iniciales, la Figura 4. 11 y Figura 4. 12 muestran los resultados del empleo de un coeficiente de reducción, de 0,50, o de otro de ampliación, de 2,00, sobre las recomendaciones de la norma de ejecución o del Eurocódigo 3.

Con ambos coeficientes se obtienen variaciones mínimas respecto de los casos en que no se aplican. El efecto es más importante al aplicar el coeficiente de mayoración a las tolerancias de la norma de ejecución.

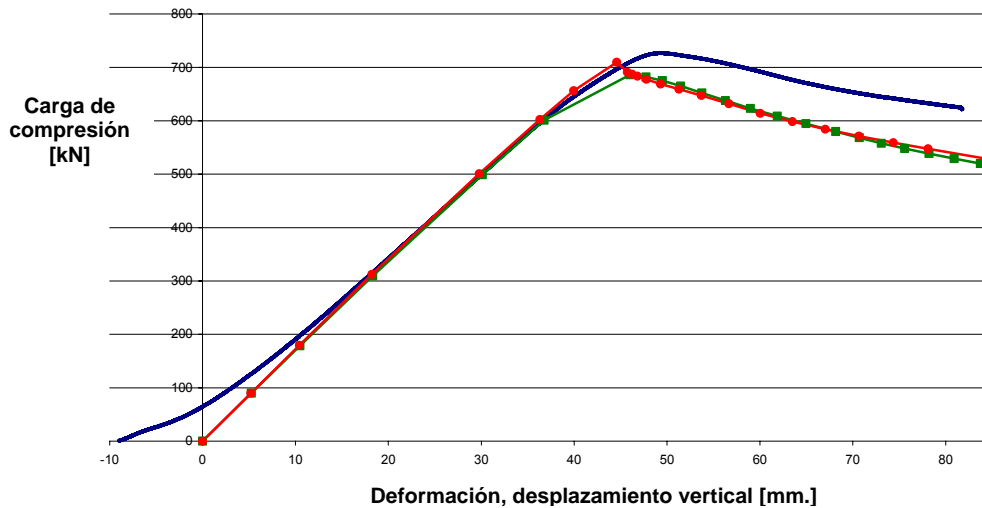


Figura 4. 11. Ensayo 1A – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G., afectadas de coeficiente, pero no T.R. Caso 9 (1MP x 0,50, verde -■-), caso 13 (EC3 x 0,50, rojo -●-) y ensayo (azul ---).

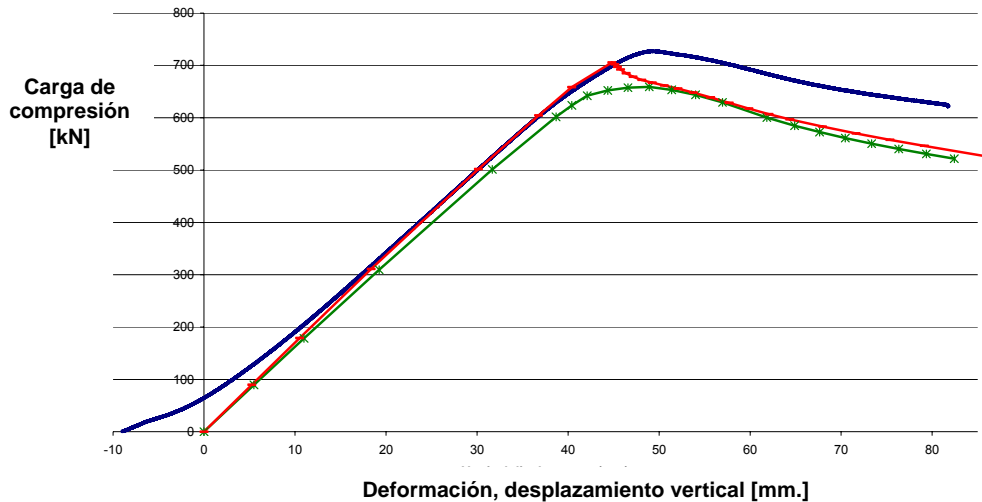


Figura 4. 12. Ensayo 1A – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G., afectadas de coeficiente, pero no T.R. Caso 12 (1MP x 2,00, verde -X-), caso 16 (EC3 x 2,00, rojo -—) y ensayo (azul ---).

En aquellos casos en los que se han considerado tensiones residuales, los resultados obtenidos para la carga máxima son más próximos a la del ensayo, aunque las diferencias con los casos en los que no se han empleado tensiones residuales son muy pequeñas.

En la Figura 4. 13 se presenta el modo de fallo obtenido para el caso 4 y para el caso 12 y se compara con el obtenido en el ensayo. Se aprecia el fallo típico de cortante, diagonales que permiten observar las zonas traccionadas y comprimidas del alma, y la calidad del modelo empleado dado que el modo de fallo obtenido mediante el MEF es el mismo que en el ensayo.

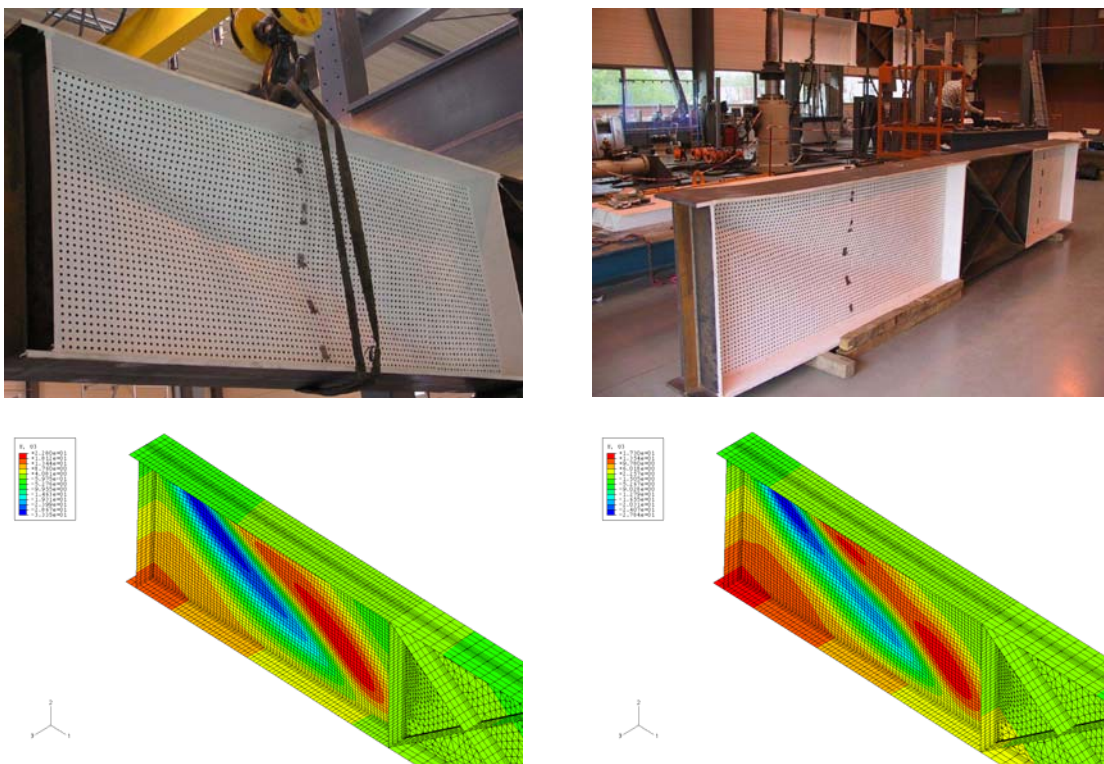


Figura 4. 13. Comparación entre las formas de fallo obtenidas mediante el MEF y el ensayo, imágenes superiores, para los casos: Caso 4 (Izquierda) y Caso 12 (derecha). Deformación máxima fuera del plano en carga máxima: 22 mm. y 17 mm., respectivamente.

Para finalizar con la presentación de los resultados del análisis paramétrico sobre el ensayo 1 A, en la Tabla 4. 6 se muestran de forma resumida los 16 casos estudiados, indicando el valor de la carga máxima obtenida mediante el cálculo con el MEF y la comparación de ese valor respecto del medido en el ensayo.

Aunque se comentará con detalle en las conclusiones de este capítulo, todos los casos proporcionan valores muy cercanos a los del ensayo, siempre del lado de la seguridad, y

se puede afirmar que el modelo es casi insensible a la variación de la amplitud de las imperfecciones iniciales o a la consideración o no de tensiones residuales.

Los casos en los que se han aplicado las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006], son los más cercanos al ensayo. Sin embargo, se observa la insensibilidad del modelo respecto de la amplitud inicial empleada en las imperfecciones geométricas, compárense el caso 5 con los casos 13 al 16 en la Tabla 4.6.

Tabla 4. 6. Resultados de carga máxima obtenidos mediante el análisis paramétrico aplicando el MEF y comparación con los resultados del ensayo 1 A.

NÚMERO DE CASO Ensayo 1A	DESCRIPCIÓN (Forma/Amplitud/Tensión residual)	CARGA MÁXIMA DEL MEF (kN)	COMPARACIÓN RESULTADO ENSAYO (%)
1	1MP / EN1090 (x1) / -	679,45	-6,50
2	1MP / EN1090 (x1) / T.R. 1	671,00	-7,70
3	1MP / EN1090 (x1) / T.R. 2	659,80	-9,20
4	1MP / EN1090 (x1) / T.R. 3	645,00	-11,20
5	EC3 / EC3 (x1) / -	709,70	-2,30
6	EC3 / EC3 (x1) / T.R. 1	686,00	-5,60
7	EC3 / EC3 (x1) / T.R. 2	685,60	-5,70
8	EC3 / EC3 (x1) / T.R. 3	690,60	-5,00
9	1MP / EN1090 (x0.5) / -	686,20	-5,60
10	1MP / EN1090 (x0.75) / -	687,40	-5,40
11	1MP / EN1090 (x1.5) / -	667,80	-8,10
12	1MP / EN1090 (x2.0) / -	658,80	-9,40
13	EC3 / EC3 (x0.5) / -	709,50	-2,40
14	EC3 / EC3 (x0.75) / -	709,70	-2,40
15	EC3 / EC3 (x1.5) / -	708,40	-2,50
16	EC3 / EC3 (x2.0) / -	705,50	-2,90

En cuanto a la investigación realizada sobre el ensayo 2 B, los resultados obtenidos son cualitativamente muy similares a los del ensayo 1 A, por ello se presentarán de forma muy esquemática con el objeto de evitar reiteraciones innecesarias respecto de lo ya presentado.

La influencia de la consideración de tensiones residuales junto con las imperfecciones geométricas se presenta en la Figura 4. 14. Las cuatro gráficas presentan las curvas carga deformación para el caso de no introducción de tensiones residuales en el modelo o consideración de tensiones residuales de grados de afección debidos a la soldadura bajo, T.R. 1, medio, T.R. 2, o alto, T.R. 3.

Al igual que en el ensayo 1A, la influencia en la carga máxima admisible y rigidez del modelo es despreciable, no obstante su efecto es mayor con amplitudes de imperfección geométricas determinadas según la norma de ejecución de estructuras.

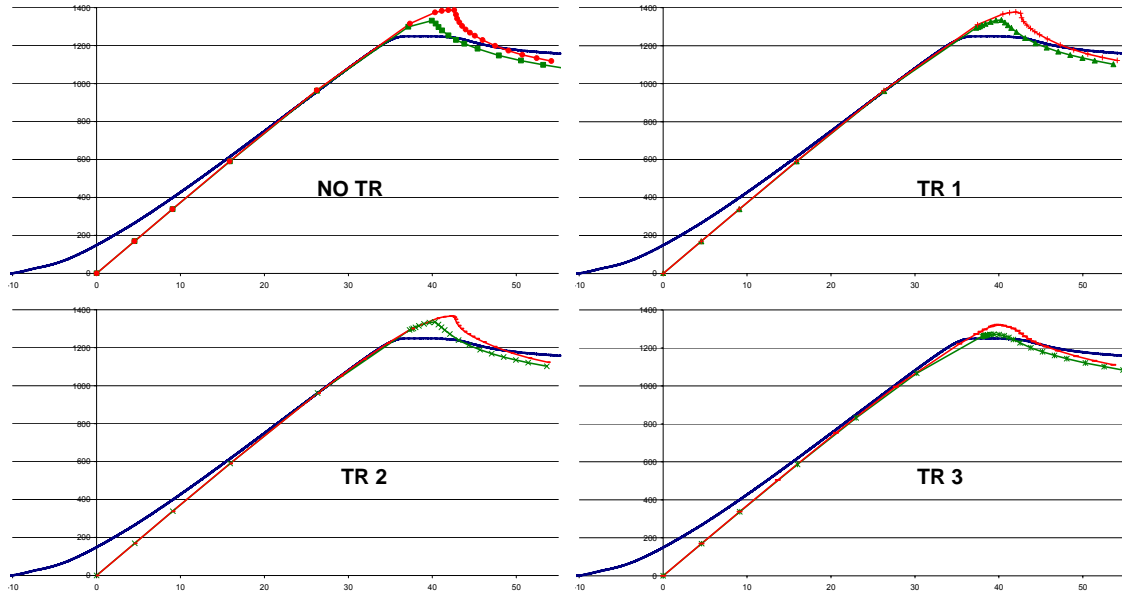


Figura 4. 14. Ensayo 2B – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G. y los diferentes casos de T.R. recogidos en la Tabla 4.7.

La discusión sobre el valor de la amplitud de las imperfecciones geométricas iniciales que se realizará en el apartado de conclusiones se soportará en la Figura 4. 15. Las cuatro gráficas presentadas muestran curvas carga deformación de modelos con imperfecciones geométricas iniciales, sin tensiones residuales, pero cuya amplitud se ha calculado con el empleo de un coeficiente de reducción, 0,50 ó 0,75, ó de ampliación, 1,50 ó 2,00, aplicado sobre las recomendaciones de la norma de ejecución o del Eurocódigo 3.

De nuevo, tal y como ocurre con el ensayo 1 A, la influencia en la carga máxima admisible y rigidez del modelo es mínima, tanto con amplitudes de imperfección geométricas determinadas según la norma de ejecución de estructuras o del Eurocódigo 3.

La principal diferencia cualitativa, con respecto a los resultados de análisis paramétrico del ensayo 1 A, es que el modelo empleado para el MEF ofrece valores para la carga máxima superiores a los del ensayo, hay una sobreestimación pero que en ningún caso supera el 11,40%, véase la Tabla 4. 7.

En cuanto a la correlación con la curva de ensayo es correcta hasta el punto de carga máxima. Es necesario explicar que el desacople en el inicio respecto de la curva de ensayo es debido al asentamiento inicial de los apoyos, no son idealmente rígidos, cuando se inicia el ensayo y comienza a aplicarse la carga. Una vez se estabiliza la viga con los apoyos, el ajuste del MEF es perfecto con el ensayo hasta carga última.

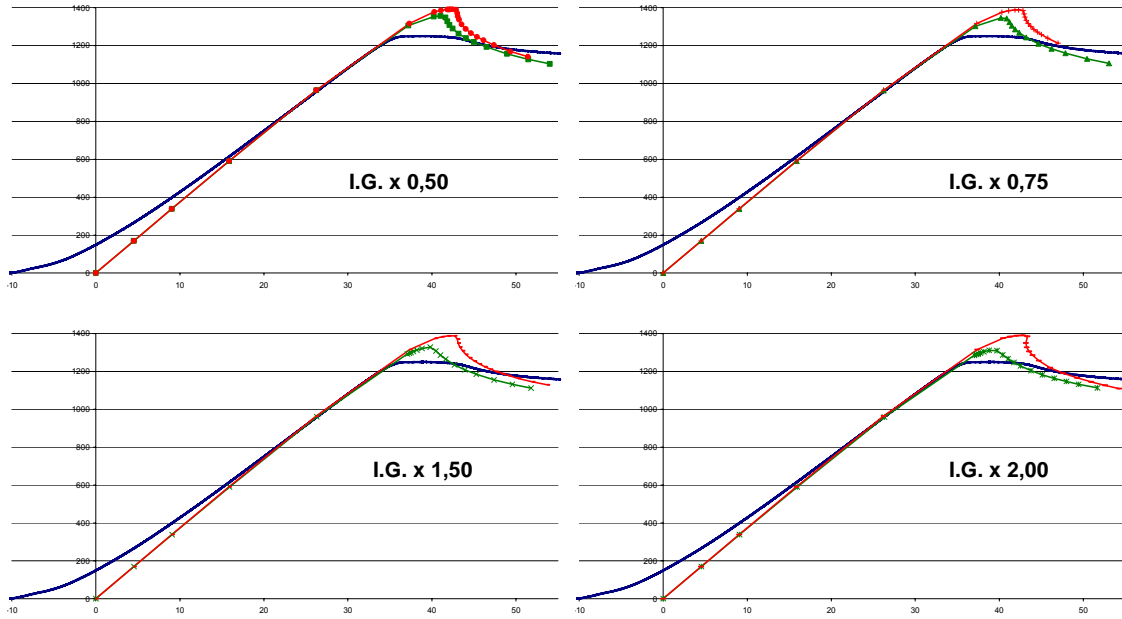


Figura 4. 15. Ensayo 2B – Curvas carga deformación para casos en los que se consideran I.G., afectadas de distintos coeficientes, pero no T.R. véase la Tabla 4.7.

La Figura 4. 16 presenta el modo de fallo del caso 4 y del caso 12 y el estado de las vigas armadas tras el ensayo. La correlación entre el modo del MEF y del ensayo es correcta.

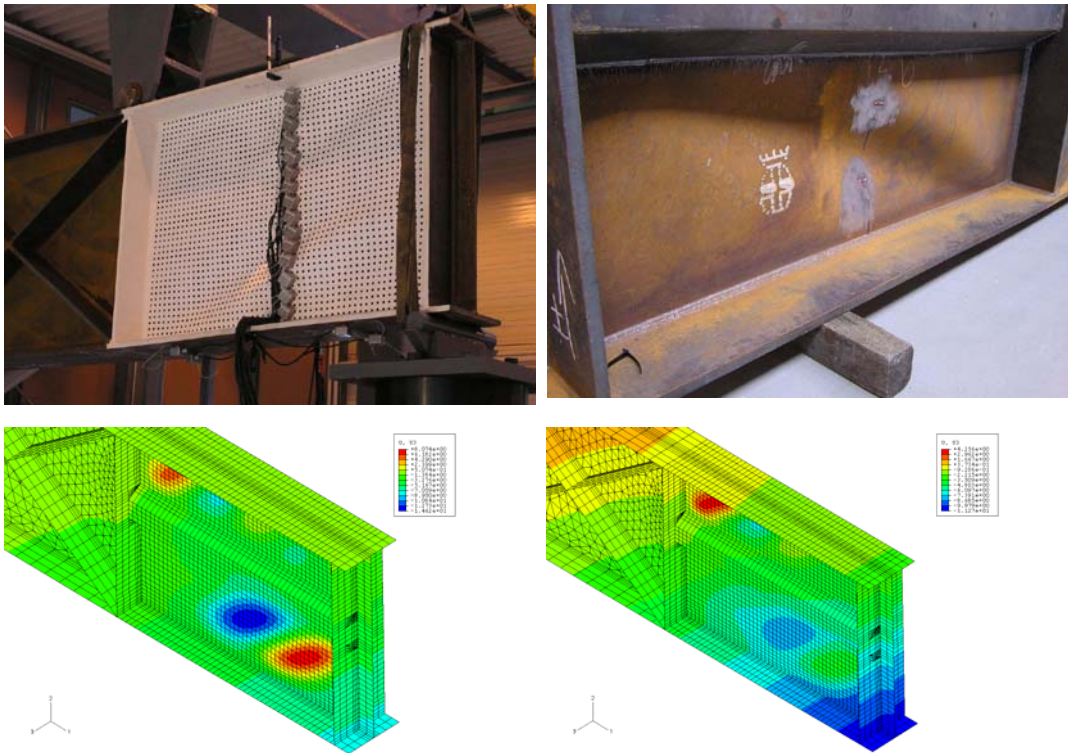


Figura 4. 16. Comparación entre las forma de fallo obtenidas mediante el MEF y el ensayo, imágenes superiores, la izquierda corresponde a la zona posterior al plano del rigidizador, para los casos: Caso 4 (Izquierda) y Caso 12 (derecha). Deformación máxima fuera del plano en carga máxima: 14 mm. y 8 mm., respectivamente.

La Tabla 4. 7 recoge el valor de la carga máxima obtenida mediante el cálculo con el MEF y la comparación de ese valor respecto del medido en el ensayo para los 16 casos estudiados en el análisis paramétrico sobre el ensayo 2 B.

Tabla 4. 7. Resultados de carga máxima obtenidos mediante el análisis paramétrico aplicando el MEF y comparación con los resultados del ensayo 2 B.

NÚMERO DE CASO Ensayo 2B	DESCRIPCIÓN (Forma/Amplitud/Tensión residual)	CARGA MÁXIMA DEL MEF (kN)	COMPARACIÓN RESULTADO ENSAYO (%)
1	1MP / EN1090 (x1) / -	1.331,50	+6,60
2	1MP / EN1090 (x1) / T.R. 1	1.335,60	+6,90
3	1MP / EN1090 (x1) / T.R. 2	1.335,60	+6,90
4	1MP / EN1090 (x1) / T.R. 3	1.272,20	+1,80
5	EC3 / EC3 (x1) / -	1.387,70	+11,10
6	EC3 / EC3 (x1) / T.R. 1	1.378,00	+10,30
7	EC3 / EC3 (x1) / T.R. 2	1.366,30	+9,40
8	EC3 / EC3 (x1) / T.R. 3	1.321,90	+5,80
9	1MP / EN1090 (x0.5) / -	1.356,90	+8,60
10	1MP / EN1090 (x0.75) / -	1.346,20	+7,80
11	1MP / EN1090 (x1.5) / -	1.328,70	+6,40
12	1MP / EN1090 (x2.0) / -	1.309,90	+4,80
13	EC3 / EC3 (x0.5) / -	1.391,70	+11,40
14	EC3 / EC3 (x0.75) / -	1.389,40	+11,20
15	EC3 / EC3 (x1.5) / -	1.388,80	+11,20
16	EC3 / EC3 (x2.0) / -	1.391,00	+11,40

4.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Las investigaciones desarrolladas en este capítulo mediante el análisis paramétrico, aplicando el MEF, sobre cuatro ensayos en vigas rigidizadas y no rigidizadas solicitadas a cortante y flector, cuyos resultados se ha contrastado con los datos experimentales de la referencia siguiente:

“Shear behaviour and bending interaction of stiffened and unstiffened welded girders”, [COMBRI, 2005a],[COMBRI, 2005b],[Feldmann, 2007],[Naumes, 2007].

Permiten establecer las siguientes conclusiones:

1. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF y los ensayos.
2. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF, empleando la imperfecciones geométricas y tensiones residuales y los obtenidos siguiendo las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006].
3. En cuanto a los coeficientes empleados sobre las amplitudes de las imperfecciones geométricas iniciales aplicados sobre las tolerancias de la norma de ejecución de estructuras de acero, [prEN1090-2:2004], y sobre las recomendaciones de imperfecciones geométricas equivalentes del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006], no afectan en ningún caso a los resultados obtenidos para carga máxima aplicando el MEF.

Esta “insensibilidad” de las vigas solicitadas a cortante estudiadas ha sido observada también por otras personas, participantes en el proyecto COMBRI, [Boissonnade, 2007a], [Boissonnade, 2007b], [Boissonnade, 2007c], que han investigado la influencia de las imperfecciones iniciales en la resistencia última frente a este tipo de sollicitación, y que han concluido que una amplitud de la imperfección inicial de valor $a/800$ podría considerarse apropiado, ya que, más que la amplitud, es la forma de la imperfección inicial la que mayor influencia tiene en la respuesta estructural. Los autores citados recomiendan el empleo de una forma denominada “*forma de fallo*”, obtenida tras un análisis no lineal, llegando hasta el

fallo en la etapa post-crítica, mediante el programa de MEF, que posteriormente se debe ajustar a la magnitud de la imperfección inicial seleccionada

4. En relación con la influencia de las tensiones residuales en la rigidez del modelo y la carga máxima obtenida aplicando el MEF. Los grados de afección estudiados no influyen a los resultados obtenidos aplicando el MEF.
5. En relación con la modelización del acero. Se considera imprescindible la correcta caracterización del acero. De otra manera no se obtendrán resultados fiables cuando se analicen comportamientos e régimen no lineal. Por ello, se recomienda el empleo de la curva real, véase Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].
6. Como conclusión final de la investigación desarrollada, la Tabla 4. 8 presenta la recomendación de CONSIDERACIÓN DE IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS Y TENSIONES RESIDUALES EN LA VERIFICACIÓN DE PLACAS DE ACERO EN ALMAS DE VIGAS ARMADAS, RIGIDIZADAS Y NO RIGIDIZADAS, SOMETIDAS CORTANTE Y FLEXIÓN.

Tabla 4. 8. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero en almas de vigas armadas, rigidizadas y no rigidizadas, sometidas cortante y flexión.

IMPERFECCIONES INICIALES	EN1993-1-5:2005 ANEXO C		PROPUESTA	
	FORMA	AMPLITUD	FORMA	AMPLITUD
Imperfecciones geométricas.	Forma de pandeo	Min (a/200, b/200).	Local, a nivel de panel. Forma de pandeo.	(*) a/400
Tensiones residuales.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Patrones rectangulares de tensiones de membrana.	(**) Tracción: +0,80·f _y Compresión: -0,05·f _y

(*) Aunque el análisis paramétrico ha demostrado que ni la amplitud de las imperfecciones geométricas iniciales ni de las tensiones residuales estudiadas afectan a los resultados proporcionados mediante el MEF, se recomienda emplear las tolerancias mínimas del *Annex L1 "Geometrical tolerances - Essential tolerances"*, [prEN1090-2:2004], **siendo "a" la menor dimensión de la placa, longitud o canto.**

(**) El empleo en los modelos para el cálculo con el MEF de tensiones residuales en combinación con las imperfecciones iniciales proporciona valores menores de carga máxima que los proporcionados por modelos sin tensiones residuales. Sin embargo, en todos los casos investigados, el empleo de imperfecciones geométricas de forma igual a la del modo de pandeo elástico, sin tensiones residuales, proporciona resultados satisfactorios, del lado de la seguridad. Por lo tanto, una amplitud de valor a/400 puede

ser recomendada como imperfección equivalente para tener en cuenta tanto imperfecciones geométricas como tensiones residuales.

NOTA: Estas recomendaciones han sido validadas únicamente con el ensayo referenciado, para otro tipo de cargas, condiciones de contorno, esbeltez del elemento estructural... estas conclusiones podrían no ser de aplicación.

Estas recomendaciones se discuten y ponen en contexto con el resultado de otras investigaciones, presentadas en el Capítulo 3 y en el Capítulo 5, mediante las conclusiones finales ofrecidas en el Capítulo 6.

5. APLICACIÓN A VIGAS ARMADAS SOMETIDAS A CARGA CONCENTRADA

5.1. INTRODUCCIÓN

Siguiendo la metodología ya empleada en el Capítulo 3 y en el Capítulo 4, con objeto de desarrollar la alternativa planteada en el Capítulo 2 para la CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, este capítulo se centra en un caso de aplicación sobre una viga sometida a carga concentrada, que se concreta en un ensayo desarrollado en el proyecto COMBRI, [COMBRI, 2003], véase el apartado 5.2., para realizar una investigación, mediante el análisis paramétrico definido apartado 5.3., que permita contrastar la alternativa del Capítulo 2 con las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006].

Las conclusiones derivadas de la investigación, que se ofrecen en el apartado 5.4, proponen nuevos valores a considerar, tanto en relación con las imperfecciones geométricas como con las tensiones residuales, respecto de los del Eurocódigo 3.

Las nuevas recomendaciones de consideración de las imperfecciones iniciales se contrastan con los valores del Eurocódigo 3 y con las tolerancias de ejecución de estructuras de acero, [prEN1090-2:2004].

Las conclusiones de este capítulo sirven para elaborar las conclusiones generales de la Tesis Doctoral en el Capítulo 6, en el que además éstas se consideraran junto los resultados de las investigaciones de los Capítulos 3 y 4.

Al igual que en el Capítulo 3 y en el Capítulo 4, los resultados de las investigaciones que se presentan a continuación se han validado con los resultados de los ensayos desarrollados en el proyecto COMBRI, sobre el comportamiento de vigas armadas sometidas a carga concentrada. La información completa sobre estos ensayos puede encontrarse en la siguiente referencia del proyecto:

“I-section girder subject to patch loading”. [COMBRI, 2006a]

Durante el proyecto COMBRI, la Universidad Politécnica de Lulea, Suecia, que en adelante denominaremos con su acrónimo, LTU, realizó una serie de ensayos para investigar la influencia de la longitud de aplicación de las cargas concentradas en el comportamiento de vigas armadas con almas no rigidizadas. En la referencia [Gozzi, 2007] se detallan tanto los ensayos como sus resultados, no obstante, para facilitar la comprensión de la investigación desarrollada en la Tesis en relación con este caso, el apartado 5.2. resume las características principales de las vigas y del procedimiento de ensayo.

El contenido fundamental de este Capítulo lo constituyen los resultados de los análisis paramétricos, adicionales a los ensayos, desarrollados en el marco del proyecto COMBRI bajo la responsabilidad del autor de la Tesis Doctoral, sometidos a la evaluación del consorcio del proyecto y finalmente aprobados e incluidos en el informe final de resultados del proyecto, [COMBRI, 2007].

La investigación se basa en el análisis de la influencia de diferentes amplitudes y formas de las imperfecciones geométricas iniciales. Para ello, se plantea un análisis paramétrico en el apartado 5.3. que contempla diferentes formas de la imperfección geométrica inicial, diferentes valores de la amplitud y, también, la influencia, o no, de la consideración de las tensiones residuales, añadidas a las imperfecciones geométricas.

La información resultante de la investigación permite establecer unas conclusiones, en forma de recomendaciones para la consideración de las imperfecciones iniciales en el caso estudiado.

Las conclusiones del apartado 5.4. se contrastan con los resultados de los ensayos de LTU y con las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006].

Es posible acudir a fuentes del proyecto COMBRI para ampliar la información de este Capítulo 5, por ejemplo el quinto informe semestral [COMBRI, 2006a] y el informe final del proyecto, [COMBRI, 2007]. El autor de la Tesis Doctoral contribuyó en estos documentos en los aspectos específicamente relacionados con la influencia de las imperfecciones iniciales en el análisis mediante el MEF.

Otras contribuciones de autor sobre la materia desarrolladas en el proyecto COMBRI son los anejos específicos sobre consideración de imperfecciones para el MEF del informe final, [Chica, 2007b], [Chica, 2007c].

El informe final del proyecto, [COMBRI, 2007], y los anejos específicos sobre imperfecciones, [Chica, 2007b], [Chica, 2007c], están disponibles a través de la web de la Comisión Europea <http://bookshop.europa.eu/>.

5.2. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE EXPERIMENTACIÓN

5.2.1. Propiedades de la sección y descripción del ensayo.

Dentro de las actividades de investigación planificadas en el proyecto COMBRI, tal y como se ha indicado en la introducción de este capítulo, se contempló la realización de ensayos orientados a la investigación del comportamiento de vigas armadas frente a carga concentrada. Estos ensayos se desarrollaron por LTU y, aunque en este apartado se realiza una breve descripción de los mismos, es posible encontrar información adicional en el quinto informe semestral de seguimiento de las actividades del proyecto [COMBRI, 2006a].

Estos ensayos se presentan con un cierto grado de detalle dado que constituyen el medio de validación de los resultados de la investigación desarrollada, mediante un análisis paramétrico empleando el MEF, para evaluar la influencia de las imperfecciones iniciales en el comportamiento de las vigas no rigidizadas frente a cargas concentradas aplicada en el plano del alma, a través del ala.

Las dimensiones de las vigas se presentan en la Figura 5. 1 y la descripción de los ensayos en la Figura 5. 2 y en la Tabla 5. 1.

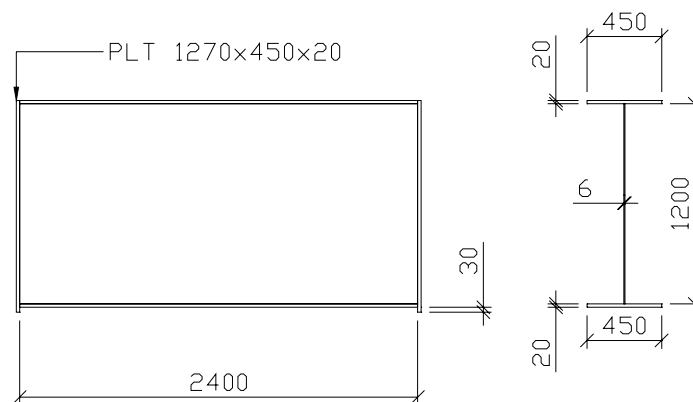


Figura 5. 1. Alzados y detalles constructivos de la viga armada a ensayar [COMBRI, 2006a].

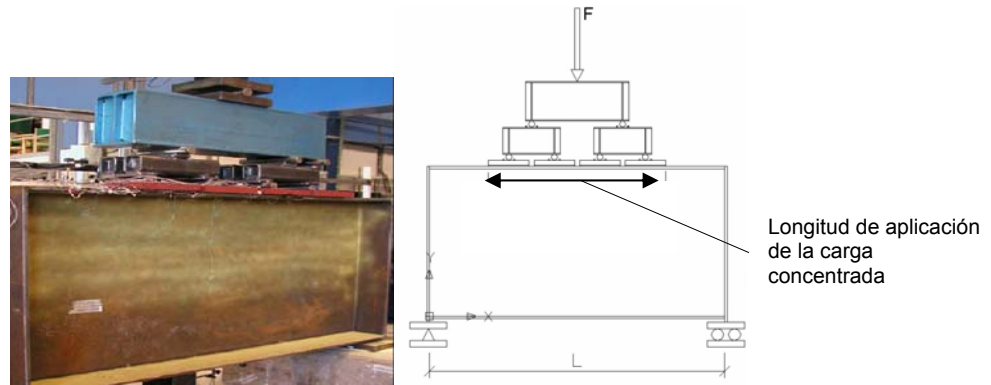


Figura 5. 2. Detalle del ensayo y de las placas empleadas para variar longitud de introducción de la carga concentrada, [COMBRI, 2006a].

Como se indica en la Tabla 5. 1, se ensayan tres longitudes de aplicación de carga, 200, 700 y 1.400 mm y para ello el dispositivo de aplicación de carga se adapta mediante el empleo de una, dos o cuatro placas, respectivamente, para la correcta introducción de las cargas en la viga.

Tabla 5. 1. Características de los ensayos desarrollados por LTU, [Gozzi, 2007].

DENOMINACIÓN DEL ENSAYO	LONGITUD DE APLICACIÓN DE LA CARGA S_s (mm.)	NÚMERO DE PLACAS PARA LA APLICACIÓN DE LA CARGA
P200	200	1
P700	700	2
P1400	1440	4

5.2.2. Propiedades del material, acero.

El acero empleado en las vigas ensayadas es del tipo S355 y se suministró en forma de chapas de 6 mm. de espesor para las almas y de 20 mm. para las alas. Dado que habitualmente chapas de acero de diferente espesor pero del mismo tipo de acero tienen diferentes características mecánicas, LTU realizó una serie de ensayos de tracción, véase la Tabla 5. 2, para evaluar la influencia del espesor de las chapas y también la posible anisotropía de las chapas mediante probetas extraídas en la dirección de laminación de la chapa y en la transversal.

Tabla 5. 2. Características de las placas de acero según ensayo de tracción, [Gozzi, 2007].

PLACA DE ACERO	ESPESOR NOMINAL t (mm.)	NÚMERO DE PROBETAS ENSAYADAS	DIRECCIÓN DE EXTRACCIÓN DE LA PROBETA	LÍMITE ELÁSTICO f_y (MPa)	RESISTENCIA ÚLTIMA A TRACCIÓN f_u (MPa)
ALMA	6	3	Laminación	371	542
		3	Transversal	394	543
ALA/RIGIDIZADOR	20	3	Laminación	354	519
		3	Transversal	354	521

Los resultados de los ensayos de tracción se presentan en la Figura 5. 3, donde se aprecia una ligera anisotropía en ambas chapas, un mayor límite elástico para la chapa de 6 mm., resultado del endurecimiento proporcionado por el proceso de laminación necesario para conseguir el espesor de la chapa final, y un mayor alargamiento último para la de 20 mm., por tanto más dúctil.

En las vigas, se han orientado las chapas considerando su dirección de laminación coincidente con la dirección longitudinal de la viga para las alas y vertical para el alma.

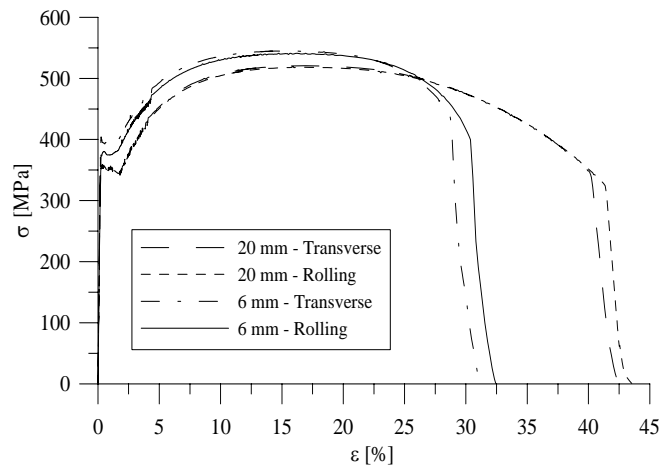


Figura 5. 3. Resultado del ensayo de tracción en la dirección de laminación (“rolling”) y transversal (“transverse”) de las placas de acero empleadas en la viga armada, [Gozzi, 2007].

En el análisis paramétrico que se detalla en el apartado 5.3 de este Capítulo, se considera también la influencia de la consideración en el modelo para las simulaciones del MEF de la curva tensión deformación en base a los valores nominales del acero o de los resultados de los ensayos de tracción.

5.2.3. Tensiones residuales.

En los ensayos desarrollados por LTU no se realizaron mediciones para determinar las tensiones residuales producidas por el proceso de fabricación de las vigas. Por lo tanto, el análisis paramétrico del apartado 5.3. se basa en los patrones de tensiones residuales, ya presentados a lo largo de varios capítulos de esta Tesis, recomendados por Paik y Thayamballi, [Paik, 2003], para determinar las tensiones máximas de tracción y compresión y las respectivas áreas afectadas.

5.2.4. Imperfecciones geométricas.

A diferencia de las tensiones residuales, las imperfecciones geométricas iniciales del alma han sido medidas con anterioridad a la realización de los ensayos. En la Figura 5. 4, se representan las imperfecciones iniciales del alma del ensayo P200 en el plano de aplicación de la carga.

El valor máximo de la imperfección es de 1,6 mm., 0,27 veces el espesor del alma, y la forma es de arco. Es una imperfección muy pequeña, aproximadamente de valor $h/4.444$, cuando el máximo admitido por la norma de ejecución de estructuras, [prEN1090-2:2004], es de $|\Delta|=b/100$ pero siempre que $|\Delta|\geq t_f$, siendo b el canto del alma y t_f el espesor del alma.

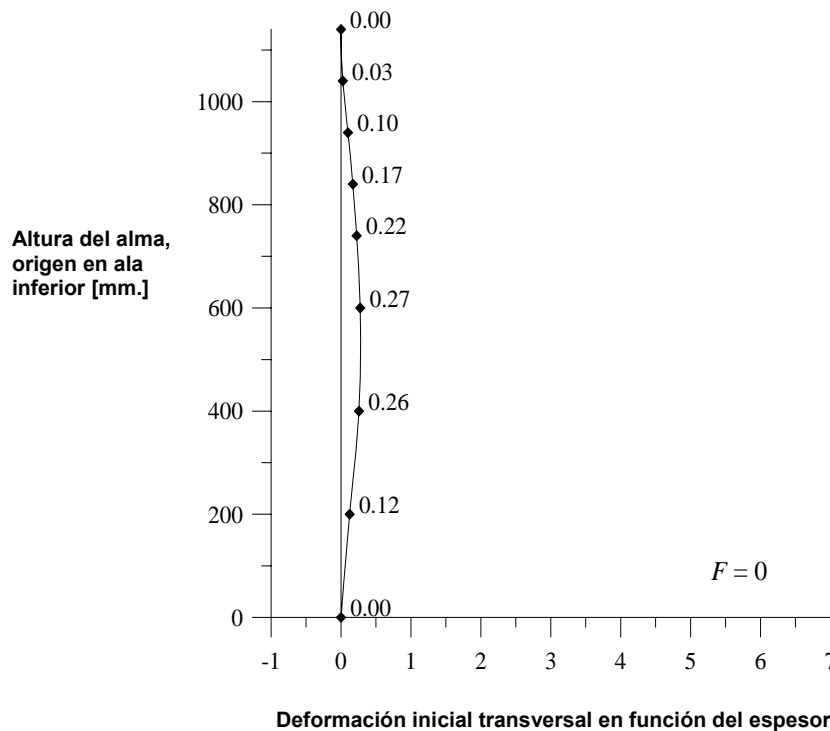


Figura 5. 4. Ensayo P200. Imperfecciones geométricas iniciales, desplazamiento transversal del alma de la viga en el plano de aplicación de la carga concentrada, [Gozzi, 2007].

Para el caso de la viga empleada para el ensayo P700, la imperfección inicial medida en el alma a la altura del plano transversal de aplicación de cargas alcanza un valor máximo de 1,07 veces el espesor del alma, 6,4 mm., que se corresponde aproximadamente con la recomendación de imperfección geométricas equivalente inicial del Anexo C Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006], esto es la magnitud obtenida de dividir el canto entre 200.

Finalmente para el caso de la viga correspondiente al ensayo P1400, se midió un valor máximo de 0,62 veces el espesor del alma, 3,7 mm., al igual que para el caso P200 es inferior a lo recogido en las norma de ejecución y Eurocódigo relevantes.

En todos los caso la forma de imperfección fue de arco.

5.2.6. Resultados del ensayo.

La recogida de datos de los ensayos se realizó mediante un sistema LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*, transductor de desplazamiento lineal variable), que permite medir desplazamientos perpendiculares al alma empleando las alas como referencia. Este sistema permite también determinar las imperfecciones iniciales del alma, una barra que guía el LVDT a lo largo de la vertical del alma sobre una malla de medición que indique los puntos de medición. La malla de la viga empleada en el ensayo P1400 se muestra en la Figura 5. 5.

Los desplazamientos verticales se miden en las placas empleadas para la aplicación de la carga en el alma superior de la viga y también en el ala inferior. Por tanto, se emplean dos LVDT (a cada lado del alma) para el ensayo P200, tres para el P700 y cinco para el P1400, véase la Figura 5. 5.

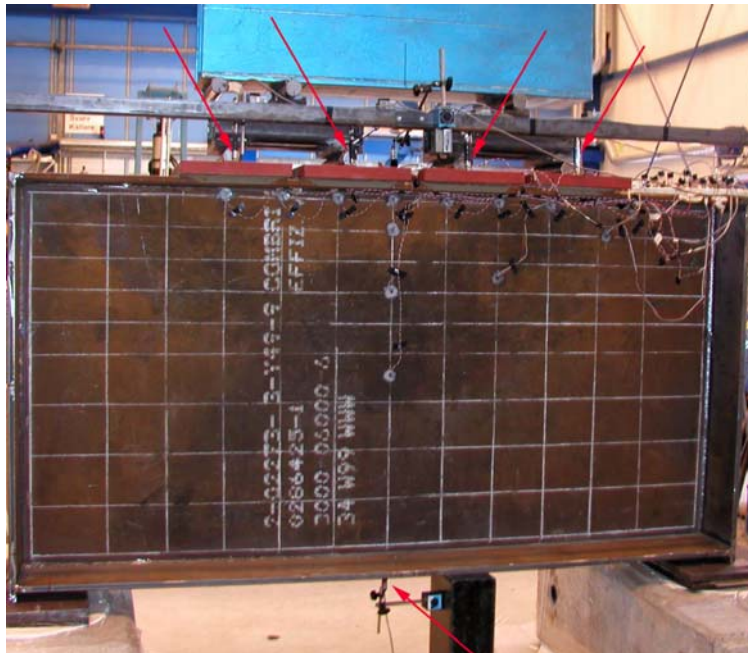


Figura 5. 5. Sistema de recogida de datos en los ensayos, imagen del ensayo P1400, las flechas señalan los puntos del sistema LVDT para la medida de desplazamientos verticales, [Gozzi, 2007].

En lo relativo a las tensiones, se midieron durante el ensayo mediante una combinación de galgas para uniaxiales y triaxiales ubicadas en la misma posición a ambos lados del alma con el objeto de obtener las tensiones de membrana. Se emplearon un total de 14 galgas uniaxiales para los ensayos P200 y P700 y 22 para el P1400. Además se necesitaron cuatro galgas triaxiales en todos los ensayos.

Las deformaciones fuera del plano del alma se midieron a diferentes estados de carga, que cuando se alcanzaban se detenía el incremento de carga para realizar la medición. Estas mediciones solo se realizaron a lo largo del plano central de aplicación de la carga.

Las curvas carga deformación obtenidas para los ensayos P200, P700 y P 1400 se presentan en la Figura 5. 6.

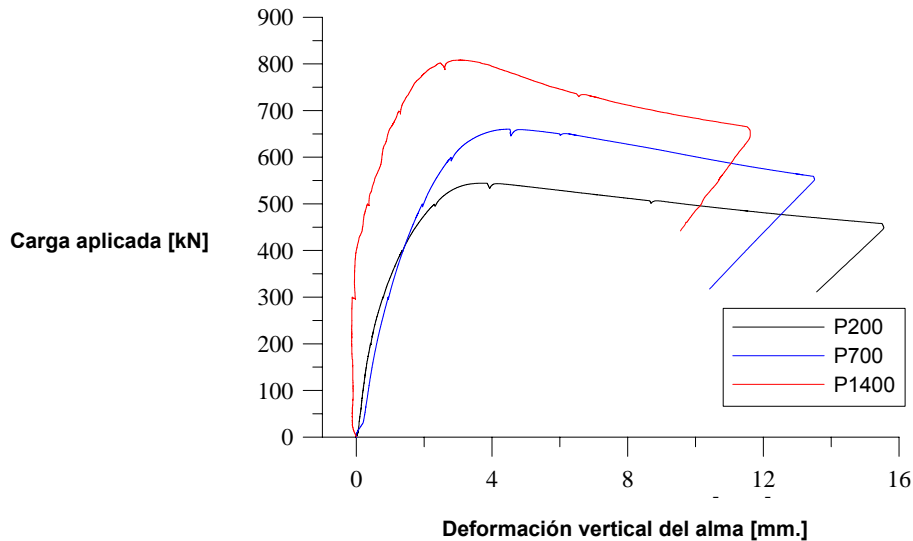


Figura 5. 6. Curvas carga deformación de los ensayos P200, P700 y P1400, [Gozzi, 2007].

La conclusión principal de los ensayos, no por previsible menos importante, es que el incremento de la longitud de aplicación de la carga proporciona un mejor comportamiento resistente de la viga.

En cuanto a la forma de fallo, para el caso de la longitud de aplicación más corta, P200, el fallo queda más localizado y se produce por plastificación de la zona del alma más cercana al ala superior.

En los casos P700 y P1400 no se produce plastificación, el fallo es por pandeo, inestabilidad del alma, siendo la forma de fallo del ensayo P1400 más próxima a un fallo de tipo columna que de tipo placa, véase la Figura 5. 7 y a modo de comparación las graficas tensión deformación presentadas en la Figura 5. 8.



Figura 5. 7. Imágenes en carga última de las vigas de los ensayos P200, arriba, P700, centro, y P1400, abajo, [Gozzi, 2007].

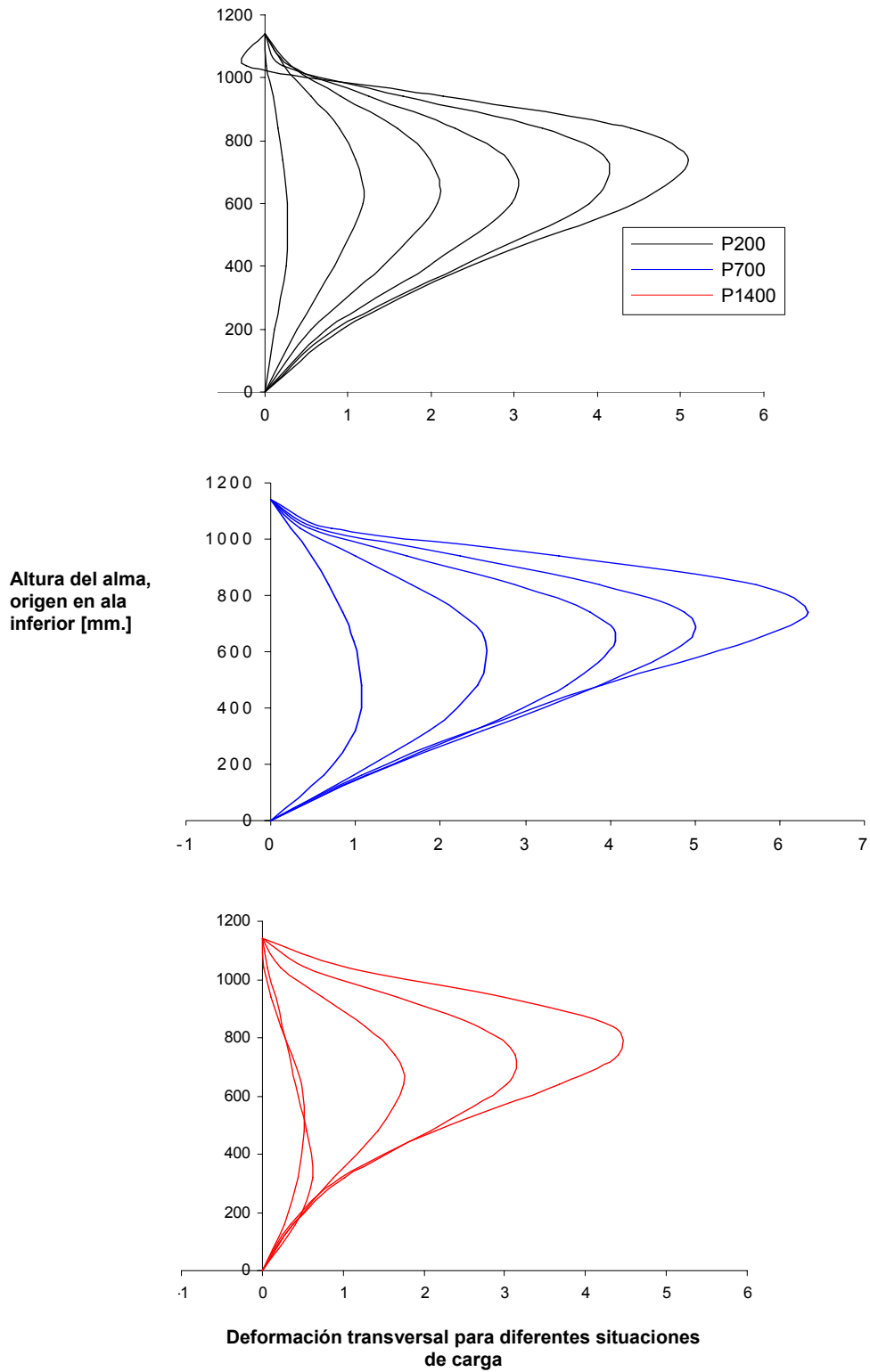


Figura 5. 8. Deformadas del alma en diferentes situaciones de carga de las vigas de los ensayos P200, arriba, P700, centro, y P1400, abajo, [COMBRI, 2006a].

En la Tabla 5. 3 se presenta un resumen de los resultados de los ensayos realizados por LTU en el proyecto COMBRI.

Tabla 5. 3. Carga máxima obtenida en los ensayos de carga concentrada, [Gozzi, 2007].

ENSAYO	LONGITUD DE APLICACIÓN DE CARGA Ss, [mm]	DEFORMACIÓN MÁXIMA DEL ALMA EN CARGA ÚLTIMA, [mm.]	CARGA MÁXIMA Fu, [kN]
P200	200	5,10	544
P700	700	6,33	660
P1400	1440	4,40	808

En el Capítulo 2 se presenta el interés de esta Tesis Doctoral en una predicción más realista del comportamiento de las placas de acero, principalmente en su fase post-crítica, es por ello que en los siguientes apartados de este Capítulo se centrarán en proporcionar de forma detallada los desarrollos y conclusiones basados solamente en el ensayo P200.

Aunque los estudios paramétricos se han desarrollado sobre los tres ensayos de LTU, el de mayor interés para esta Tesis Doctoral es el P200 debido a su modo de fallo, muy localizado y sensible a las imperfecciones iniciales. Los casos P700 y P1400 tienen un modo de fallo que, especialmente para el caso P1400, es más global y menos dependiente de las imperfecciones iniciales en la zona del alma más próxima a la zona de aplicación de la carga.

5.3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO SOBRE LA INFLUENCIA DE LAS IMPERFECCIONES INICIALES

La investigación para el análisis de la influencia de las imperfecciones iniciales, consideradas en los modelos para el cálculo mediante el MEF, sobre los resultados de carga última y deformación, en los casos de carga concentrada que se presenta en este apartado, se han contrastado principalmente con los ensayos de LTU presentados en el apartado 5.2.

Adicionalmente, con el objeto de confirmar previamente las estrategias de modelización a emplear, se ha desarrollado un estudio comparativo, denominado en inglés *benchmark*, a partir de la información proporcionada por un proyecto de investigación sobre el uso de acero de tipo S460 en vigas armadas, [S460, 1999], y en el que se incluye un desarrollo sobre el comportamiento de aquellas frente a cargas concentradas, véase la Figura 5. 9.

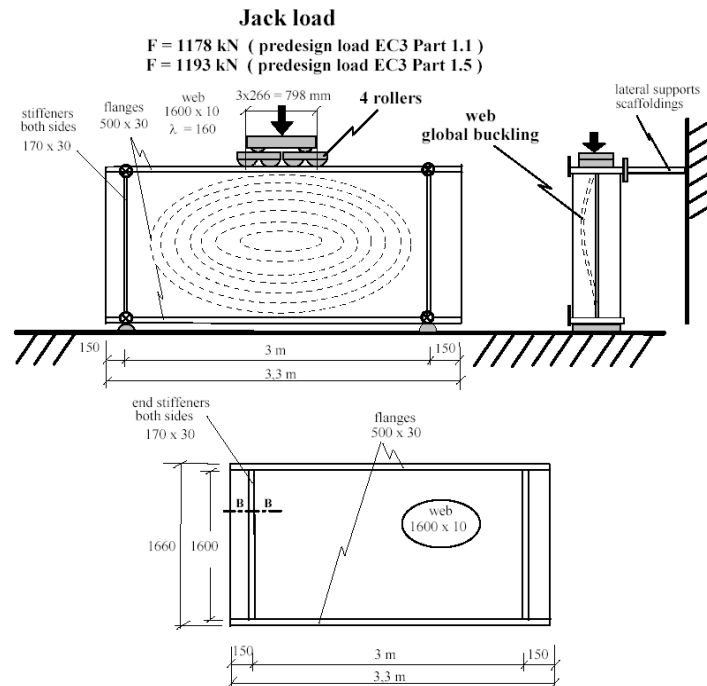


Figura 5. 9. Detalles del ensayo del proyecto [S240, 1999] empleado como *benchmark* para definir la estrategia de modelización.

El citado *benchmark* ha servido en primer lugar para definir los detalles del modelo a emplear en el estudio paramétrico mediante el MEF para conseguir una adecuada modelización que garantice conseguir resultados de calidad, realistas. Los aspectos analizados han sido:

- La selección de la densidad de mallado más adecuada.

El mallado se realiza con los elementos recomendados de la librería del software empleado, Abaqus, [Hibbit, 1994], tipo S4. Son elementos finitos tipo placa, *shell*, caracterizados por la formulación de placas flexibles ante cortante, teoría de Mindlin-Reissner, y que se recomiendan por su adecuación tanto para placas delgadas como gruesas, eficiencia computacional, no sensibilidad a la distorsión y capacidad de asumir deformaciones finitas.

No obstante, las recomendaciones sobre la densidad de mallado más adecuada no se proporcionan de forma explícita por el desarrollador del software, es la persona usuaria la que debe valorarlo. Para acotar este aspecto, se desarrolla un análisis paramétrico sobre el ensayo presentado en la Figura 5. 9 comparando tres densidades de mallado diferentes, véase la curva tensión deformación y el modelo de la Figura 5. 10:

- Mallado 1: 1900 elementos (8 elementos a lo largo de las alas y 20 en la altura del alma)
- Mallado 2: 2400 elementos (8 alas y 29 alma)
- Mallado 3: 2900 elementos (8 y 38 respectivamente)

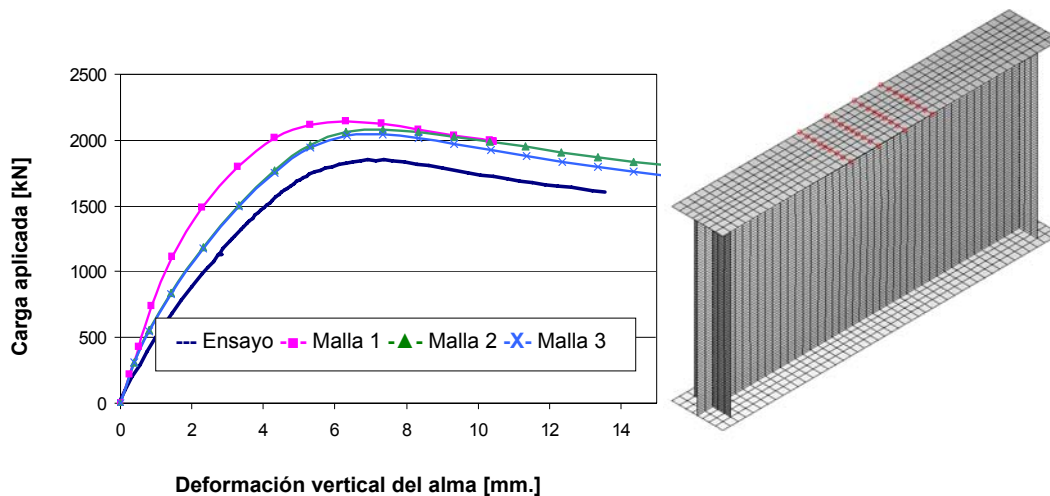


Figura 5. 10. Análisis de sensibilidad del modelo en función de la densidad del mallado.

Como se observa, es relevante establecer una densidad mínima de mallado en el alma, que es donde el modelo debe realizarse más cuidadosamente, dado que es donde se producirá el fallo por carga concentrada. La densidad de la tercera malla es la que se toma como referencia para el análisis paramétrico sobre los ensayos de LTU.

- La modelización correcta del sistema de introducción de la carga concentrada.

En los ensayos de carga concentrada se emplean una serie de placas o cilindros como medio de aplicación de las cargas concentradas en las vigas a ensayar. Por lo tanto, cuando se trata de realizar el modelo a emplear en el software para el MEF, es posible tratar de desarrollar un modelo complejo que replique todos los elementos del ensayo, véase la Figura 5. 11, o adoptar una solución más sencilla, mediante líneas de nodos, con comportamiento rígido y no susceptibles de deformaciones locales.

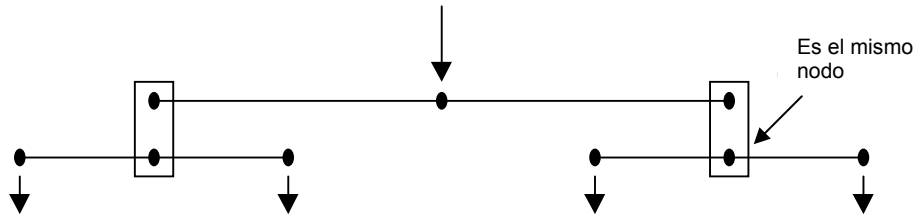


Figura 5. 11. Propuesta de modelización del dispositivo de aplicación de cargas concentradas.

Tras realizar varias simulaciones, se demuestra que el empleo de las líneas de nodos en los puntos de aplicación de carga del ala superior ofrecen resultados satisfactorios. En la Figura 5. 9 se pueden observar, en el modelo finalmente propuesto, las líneas de nodos para la introducción de cargas resaltados.

Aunque, como en el caso del Capítulo 3 y del Capítulo 4, no es objeto de la Tesis Doctoral tratar los aspectos relacionados con la modelización, se considera pertinente realizar estas consideraciones previas que son de utilidad para generar un modelo fiable.

A continuación, los siguientes apartados tratan de manera detallada los aspectos relacionados con la consideración de las imperfecciones iniciales. En estos apartados también se recurrirán a resultados de las investigaciones proporcionadas sobre el *benchmark* realizado con resultados del proyecto anteriormente citado en este apartado, [S460, 1999], con el objeto de fundamentar las estrategia finalmente adoptada para llevar a cabo el análisis paramétrico finalmente validado con los ensayos de LTU.

Finalmente, cabe reiterar por su importancia, como en los capítulos precedentes, que los análisis mediante el MEF realizados son estáticos y no lineales, tanto en cuanto a material, curva tensión deformación bilineal, como a consideración de la etapa post-crítica. La carga se modeliza empleando control por desplazamiento, imponiendo un desplazamiento vertical cuyo valor se incrementa de forma progresiva hasta que se alcanza el fallo y, por tanto, la carga última.

5.3.1. Imperfecciones geométricas

En la Tabla 5. 3 del apartado 5.2. se recogen las deformaciones máximas obtenidas para la carga última alcanzada en los ensayos P200, P700 y P1400 realizados por LTU en el proyecto COMBRI. En ese mismo apartado se han comparado los valores de las imperfecciones con las recomendaciones de consideración de imperfecciones o con las tolerancias máximas permitidas para la ejecución de estructuras de acero, resultando que, salvo para la viga empleada en el ensayo P400, son valores especialmente reducidos.

Es relevante hacer esta reflexión inicial dado que podría entenderse que la adopción de los valores correspondientes a las imperfecciones iniciales medida en las vigas a ensayar es la opción que proporcionaría los resultados más realistas.

No obstante, las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral pretenden proporcionar unas recomendaciones de aplicación general, no restringidas a unas vigas con un grado de imperfecciones iniciales pequeñas. Por lo tanto es imprescindible valorar la sensibilidad a las imperfecciones iniciales de las vigas armadas sometidas a cargas concentradas.

Con el objeto de establecer una base fundada que permita evaluar la sensibilidad del caso estudiado ante las imperfecciones iniciales, se ha realizado un amplio número de simulaciones sobre el caso informado en el proyecto de investigación sobre el uso de acero de tipo S460 en vigas armadas, [S460, 1999]. Las simulaciones se han desarrollado con el objeto de investigar las variaciones en el valor de la carga última y forma de fallo ocasionada por diferentes imperfecciones iniciales, véase la Figura 5. 12.

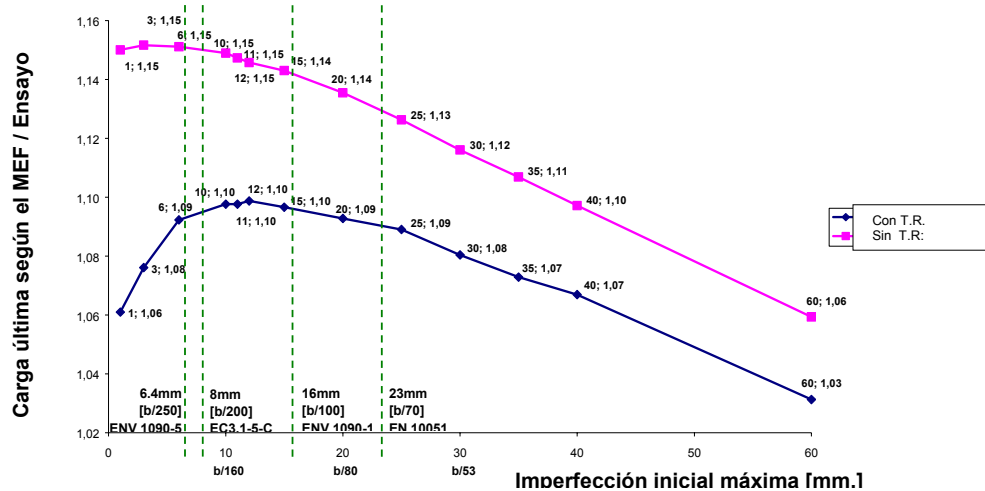


Figura 5. 12. Sensibilidad del modelo frente a diferentes valores de las imperfecciones iniciales.

Una primera conclusión es la relacionada con la consideración o no de las tensiones residuales. Los casos en los que no se consideran tensiones residuales junto con las imperfecciones geométricas iniciales, más acusadamente en casos con pequeñas amplitudes de las imperfecciones geométricas, proporcionan predicciones de la carga última mayores que en aquellos en los que se además se incluyen tensiones residuales.

Además se concluye que considerando solo imperfecciones geométricas iniciales, se obtienen valores de la carga última amplitudes de valores entorno a un 15% superior al valor obtenido en el ensayo. Este valor es aproximadamente constante para cualquier valor de la amplitud máxima de la imperfección menor que la recomendación del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5:2006]. Para amplitudes mayores, el modelo ofrece valores menores de la carga última, como es previsible.

Finalmente, en el caso de consideración adicional de tensiones residuales, los resultados proporcionados para los casos en combinación con imperfecciones geométricas pequeñas, hasta los recomendados por en Eurocódigo, se produce un incremento en la carga última obtenida a medida que se aumenta el valor de la amplitud de la imperfección geométrica inicial: de 1.966,00 kN con 1,00 mm. de amplitud de la imperfección inicial hasta 2.036,00 kN con una amplitud de 12,00 mm. Este efecto inesperado se explica en detalle en el apartado siguiente.

Las conclusiones del *benchmark* realizado se toman en cuenta para el análisis paramétrico y por ello se consideran valores de imperfecciones geométricas en el rango de las imperfecciones geométricas equivalentes proporcionadas por la Tabla C2 y Figura C1 del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5:2006], pero también valores inferiores a éstos para añadir el efecto de las tensiones residuales; en concreto en base a las tolerancias de la norma de ejecución de estructuras de acero, [prEN1090-2:2004]. En el apartado 5.3.3. se presenta en la Tabla 5. 6 todos los casos del análisis paramétrico con las amplitudes de imperfecciones iniciales consideradas.

En cuanto a la forma de la imperfección inicial, siguiendo el razonamiento ya expresado capítulos anteriores, se propone una aproximación simplificada no una reproducción real de las imperfecciones geométricas. Por ello, en el análisis paramétrico se estudiarán tanto la forma correspondiente al primer modo de pandeo como una forma correspondiente al modo de fallo previsto, que denominaremos "*forma de fallo*".

La forma de fallo se puede obtener fácilmente gracias a los programas basados en el MEF, simplemente se trata de calcular el caso con la una amplitud inicial de la

imperfección y una forma, que puede ser la del primer modo de pandeo, y tomando la *forma de fallo* resultante en la etapa de comportamiento post-crítico, incluirla en el modelo inicial con la amplitud de imperfección geométrica y tensiones residuales exactas para realizar el cálculo definitivo.

5.3.2. Tensiones residuales

En los Capítulos previos de esta Tesis Doctoral se ha presentado la metodología de Paik y Thayamballi, [Paik, 2003], para determinar un patrón simplificado de distribución de tensiones residuales en la sección armada, por ello, se remite al lector a los apartados relacionados con las tensiones residuales del Capítulo 3 y del Capítulo 4.

En este apartado se profundiza especialmente en la introducción de las tensiones residuales en los modelos para el cálculo con el MEF. Este aspecto se ha apuntado de forma muy breve en los apartados homónimos de los capítulos previos pero es especialmente relevante para un caso como el de las cargas concentradas en vigas armadas.

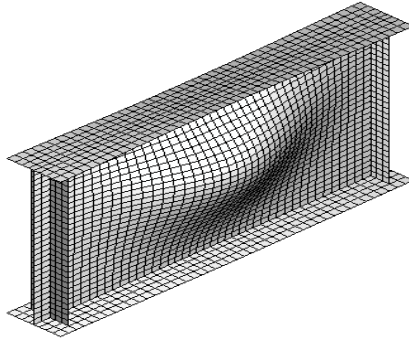
Como ya se ha en capítulos precedentes, la introducción del patrón de tensiones residuales en el modelo deformado, esto es con las imperfecciones geométricas iniciales ya incluidas, exige un paso previo para que se equilibren todas las tensiones presentes en la sección antes de que ninguna carga sea aplicada.

Este paso inicial se concreta en un cálculo previo, sin carga aplicada en el modelo, que realiza una redistribución de las tensiones residuales y que incluso puede dar lugar a una modificación de la deformada inicial del modelo para conseguir la situación de equilibrio de tensiones en la sección transversal.

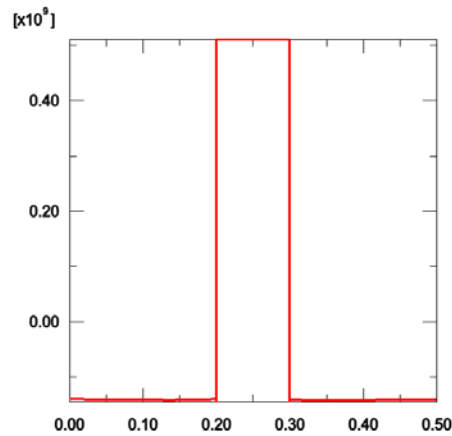
En la página siguiente se presenta de forma esquemática el procedimiento desde la obtención de la forma deformada, pasando por la introducción de la amplitud de la imperfección geométrica y las tensiones residuales, el proceso de equilibrado de tensiones en el modelo deformado para finalmente realizar el cálculo.

Es en concreto el paso número cuatro, el del equilibrado del patrón ideal de tensiones residuales sobre el modelo deformado, el que debe tratarse con especial precaución dado que puede dar lugar a una alteración importante de la deformada inicialmente incluida en el modelo. No sólo en cuanto a la amplitud de la misma sino incluso en la forma.

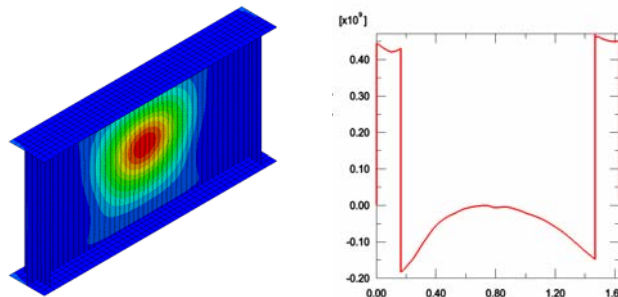
A continuación, se detallan los efectos de la introducción de tensiones residuales en modelos deformados con amplitudes de imperfecciones geométricas pequeñas.



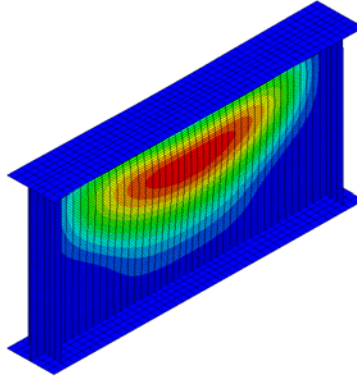
- 1) Cálculo de los modos de pandeo del componente estructural para un caso determinado de carga y selección del primer modo de pandeo o de la forma de fallo.
- 2) Introducción de la amplitud de la imperfección geométrica inicial en la forma seleccionada, primer modo de pandeo, combinación de modos de pandeo o forma de fallo. Este paso no introduce tensiones en el modelo.



- 3) Introducción del patrón ideal de tensiones residuales en el modelo deformado, la figura superior muestra el patrón idealizado para el ala.



- 4) Equilibrio del patrón ideal de tensiones residuales en el modelo deformado, la figura superior muestra la deformada definitiva y el patrón de tensiones residuales resultantes del equilibrado en el alma.



5) Análisis carga deformación y resultado final.

En la discusión sobre los resultados presentados en la Figura 5. 12, ya se ha apuntado la aparente paradoja producida para los casos de pequeñas amplitudes de deformación inicial, menores que las recomendadas por el Eurocódigo, combinados con tensiones residuales, cuyo incremento aumenta el valor de la carga última obtenida.

La explicación de este comportamiento “anómalo” está en la fase de equilibrado del patrón de tensiones residuales sobre el modelo deformado. La Figura 5. 13, correspondiente al *benchmark* realizado sobre el caso presentado en la Figura 5. 9, presenta la deformada resultante tras la fase de equilibrado de tensiones residuales, se observa como la deformada es una sinusoide con tres ondas, cuando el modo de pandeo y el modo de fallo previsto consiste en una única onda en el alma.

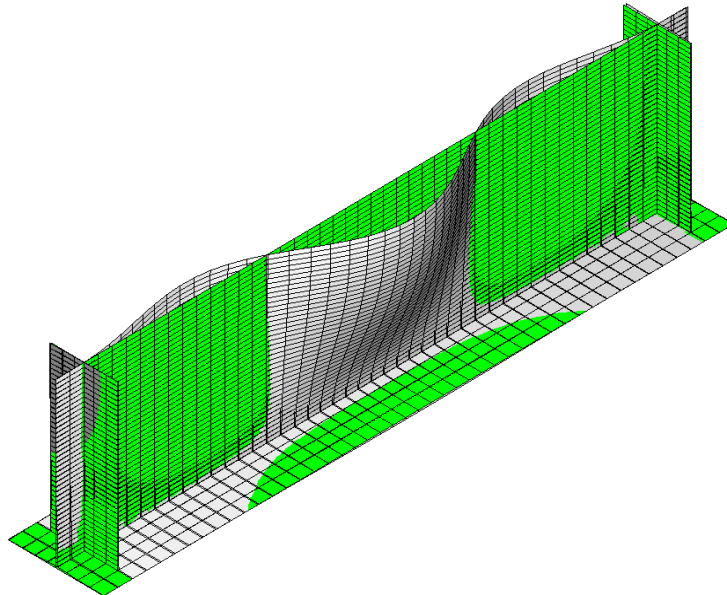


Figura 5. 13. Deformada resultante tras la etapa de equilibrado de las tensiones residuales. Amplitud de la imperfección geométrica inicial: 1,00 mm. Factor de escala: 15,00.

En definitiva, se ha producido un cambio en la forma de la imperfección inicial, que además no es coincidente con la forma de fallo prevista, pero además se produce también una variación del valor de la amplitud máxima de la imperfección geométrica inicial.

La Tabla 5. 4 presenta las deformaciones adicionales resultantes tras el equilibrado de las tensiones residuales en el modelo deformado con las imperfecciones geométricas iniciales, los datos corresponden al *benchmark*. Los valores corresponden a la amplitud máxima del arco correspondiente a la deformada inicial del alma de la viga, esto es el valor de la deformada perpendicular al plano del alma.

Como se puede observar el impacto de este efecto es más acusado para los valores de imperfecciones geométricas iniciales más bajos.

Tabla 5. 4. Amplitud máxima de la imperfección geométrica resultante tras el equilibrado de las tensiones residuales.

AMPLITUD MÁXIMA DE LA IMPERFECCIÓN INICIAL [mm.]	MÁXIMA DEFORMACIÓN ADICIONAL TRAS LA FASE DE EQUILIBRADO [mm.]	MÁXIMA DEFORMACIÓN INICIAL RESULTANTE EN EL MODELO [mm.]
1,00	+14,74	15,74
3,00	+14,91	17,91
6,00	+12,38	18,38
10,00	+10,91	20,91
11,00	+10,60	21,60
12,00	+10,31	22,31
15,00	+9,67	24,67
20,00	+8,74	28,74
25,00	+7,92	32,92
30,00	+7,22	37,22
40,00	+6,12	46,12
60,00	+4,70	64,70

Además de los efectos del equilibrado de las tensiones residuales en la amplitud máxima y en la forma general de la imperfección inicial, es importante para este caso destacar la variación ocasionada respecto de la ubicación del punto de máxima amplitud de la deformación geométrica inicial.

El caso estudiado en este Capítulo, carga concentrada, proporciona una forma de fallo de tipo local cuando la carga se aplica en una superficie reducida del alma de la viga; se produce una plastificación local del alma y/o inestabilidad en las inmediaciones de la zona de aplicación de la carga concentrada.

Por lo tanto, es relevante la imperfección geométrica inicial introducida en la zona más cercana al punto de aplicación de la carga. La Tabla 5. 5 ilustra el efecto del equilibrado de las tensiones residuales, tras el *benchmark* realizado sobre el caso presentado en la Figura 5. 9, en la posición del punto de máxima deformación lateral del alma.

Gracias a los resultados proporcionados por los estudios previos, *benchmark*, realizados sobre el caso presentado en el proyecto de investigación sobre el uso de acero de tipo S460 en vigas armadas, [S460, 1999], se han adoptado las estrategias de modelización más adecuadas para la consideración de las tensiones residuales el análisis paramétrico, que se validará sobre los ensayos de LTU en el proyecto COMBRI.

En la Tabla 5. 6 se presenta el análisis paramétrico propuesto para obtener los resultados suficientes para establecer unas recomendaciones para la CONSIDERACIÓN DE IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS Y TENSIONES RESIDUALES EN LA VERIFICACIÓN DE PLACAS DE ACERO EN ALMAS DE VIGAS ARMADAS, NO RIGIDIZADAS, SOMETIDAS CARGA CONCENTRADA.

Tabla 5. 5. Posición del punto de máxima imperfección inicial en el alma tras el equilibrado de las tensiones residuales en el modelo deformado.

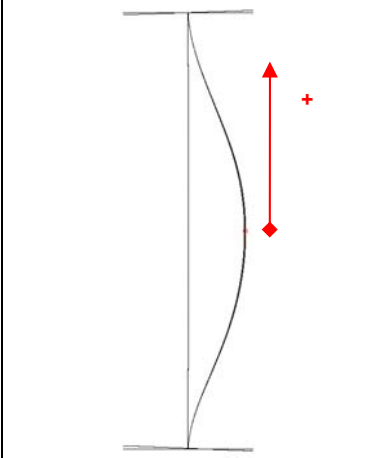
	IMPERFECCIÓN INICIAL, AMPLITUD MÁXIMA, [mm.]	DISTANCIA VERTICAL, SOBRE EL EJE DE SIMETRÍA, DEL PUNTO DE MÁXIMO DESPLAZAMIENTO LATERAL TRAS EL EQUILIBRADO DE LAS TENSIONES RESIDUALES, [mm.]
		1,00
	3,00	+65,47
	6,00	+87,24
	10,00	+87,22
	11,00	+87,21
	12,00	+87,20
	15,00	+87,20
	20,00	+87,19
	25,00	+87,18
	30,00	+108,93
	40,00	+108,91
	60,00	+108,88

Tabla 5. 6. Concepción del análisis paramétrico sobre la consideración de imperfecciones iniciales en los ensayos de LTU.

CASO DEL ANÁLISIS PARAMÉTRICO	IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS		TENSIONES RESIDUALES
	FORMA	AMPLITUD	
Tipo 1	Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5.	Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5	NO
Tipo 2 al 4	Primer modo de pandeo elástico.	Según norma de ejecución de estructuras de acero prEN1090-2	T.R. 1
			T.R. 2
			T.R. 3
Tipo 5		Coficiente sobre tolerancia según norma de ejecución de estructuras de acero prEN1090-2	NO
Tipo 6 al 8	Análisis para obtención de forma de fallo.	Según norma de ejecución de estructuras de acero prEN1090-2	T.R. 1
			T.R. 2
			T.R. 3
Tipo 9		Coficiente sobre tolerancia según norma de ejecución de estructuras de acero prEN1090-2	NO

5.3.3. Resultados del análisis paramétrico

En los apartados precedentes se han presentado una serie de estudios relacionados con la influencia del mallado de los modelos empleados para el análisis con el MEF, la influencia de la magnitud de las imperfecciones geométricas iniciales en los resultados finales y los efectos de la interacción entre la geometría deformada de los modelos y las tensiones residuales introducidas causadas por la necesidad de establecer un modelo perfectamente equilibrado antes de proceder al cálculo definitivo.

Como ya se ha informado con anterioridad, esos estudios se han realizado a partir de la información recogida en un proyecto bien documentado, [S460, 1999], para permitir un contraste fiable de los resultados obtenidos, que ha sido satisfactorio, tanto frente a los resultados experimentales como frente a las simulaciones mediante el MEF.

Por lo tanto, en el análisis paramétrico siguiente, se han seguido las pautas marcadas en los apartados anteriores en cuanto a mallado, modelización de la introducción de la carga, selección de amplitudes de imperfecciones iniciales y forma de las mismas y adopción de precauciones sobre la interacción de las tensiones residuales con el modelo deformado.

Sin más preámbulos, en primer lugar se presentan los resultados obtenidos sobre el ensayo P200 de LTU, considerando los valores nominales de las chapas de acero empleadas en la fabricación de la viga y forma de la imperfección inicial correspondiente al primer modo de pandeo. En la Figura 5. 14 se presentan las curvas tensión deformación obtenidas para las diferentes imperfecciones iniciales estudiadas, en la Figura 5. 15 se muestran las deformadas de la sección del alma, bajo el punto de aplicación de la carga, en el momento de aplicación de la carga última.

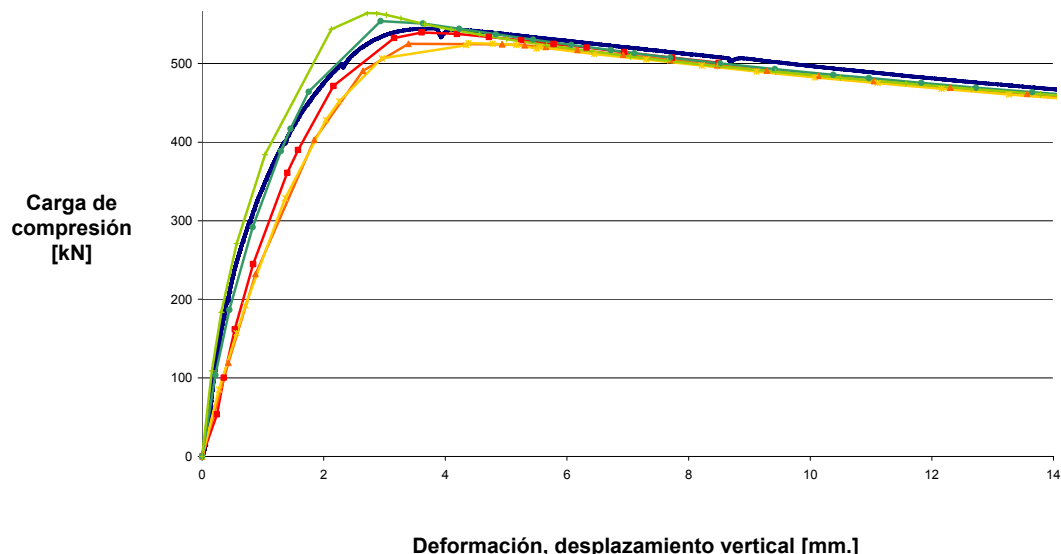
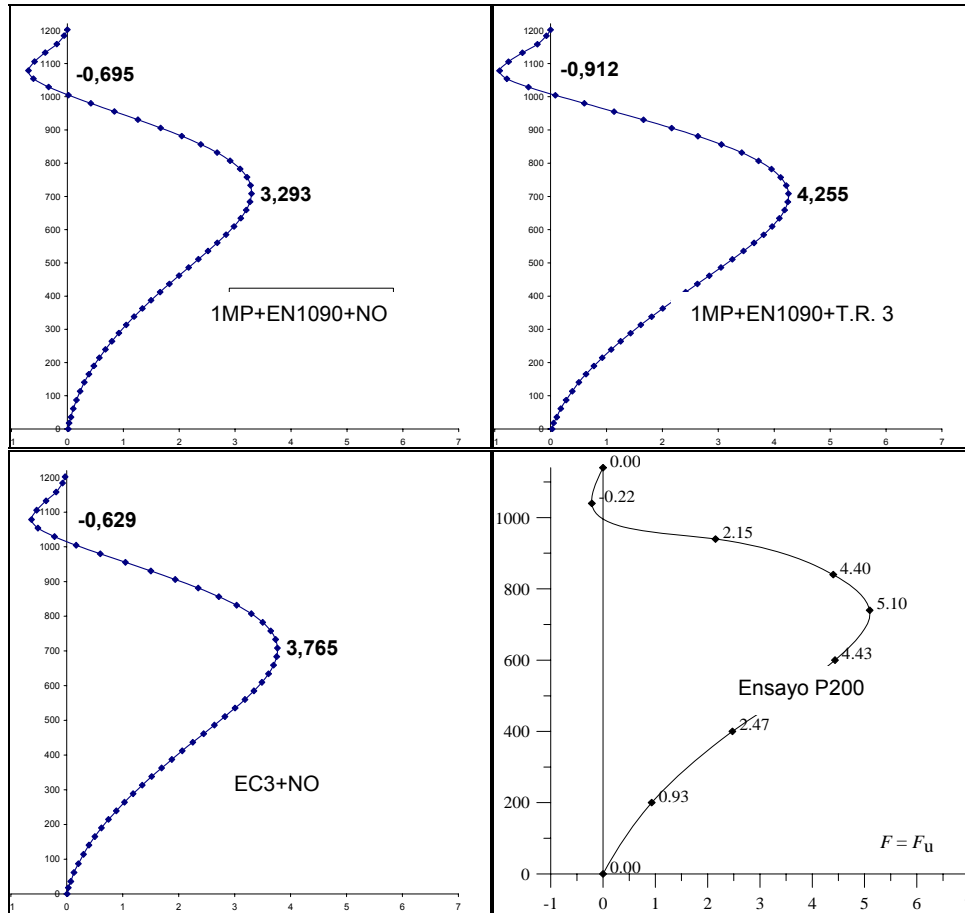


Figura 5. 14. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos siguientes: 1MP+T.R.3 (rojo -■-), 1MP+T.R.2 (naranja -▲-), 1MP+T.R.1 (amarillo -X-), 1MP+NO (verde -●-), EC3+NO (verde claro -|-) y ensayo (azul ---). Considerando valores nominales del acero.

Leyenda de la Figura 5. 14. y siguientes:

- 1MP: Primer modo de pandeo elástico con amplitudes según EN1090.
- EN1090: Amplitudes tomadas de la norma de ejecución de estructuras, [prEN1090-2:2004]
- EC3: Amplitudes tomadas del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2005].
- T.R. 1: Tensiones residuales con grado de afección bajo.
- T.R. 2: Tensiones residuales con grado de afección medio.
- T.R. 3: Tensiones residuales con grado de afección alto.
- NO: Sin tensiones residuales.



Leyenda de la Figura 5. 15 y Figura 5. 17:

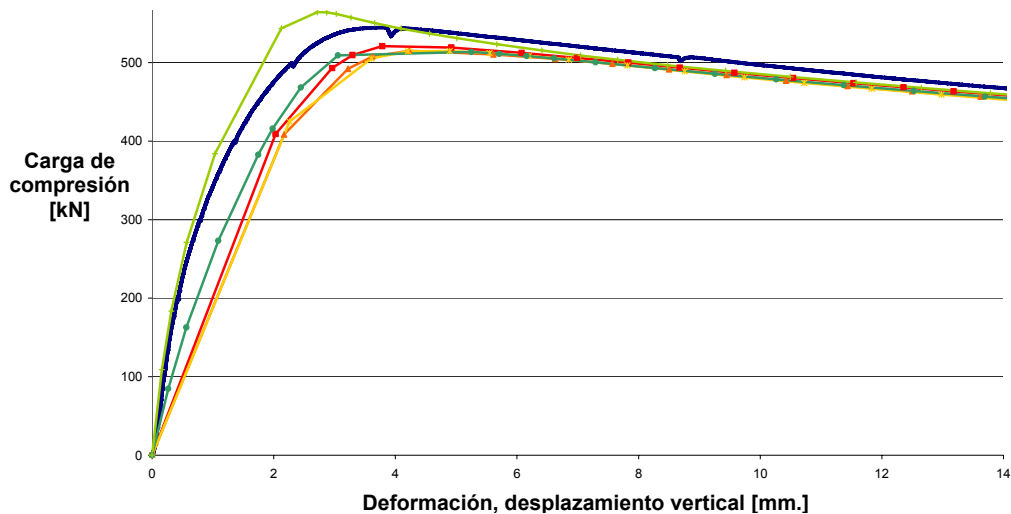
- Ordenadas: Altura del alma, origen en ala inferior [mm.]
- Abcisas: Deformación inicial transversal en función del espesor

Figura 5. 15. Ensayo P200 – Deformadas de la placa del alma en el momento de alcanzar la carga máxima. Representación según sección transversal. Considerando valores nominales del acero.

Como se puede observar la introducción de tensiones residuales hace que el modelo sea menos rígido y que por tanto la pendiente de la curva tensión deformación sea menor que en los casos que no se contemplan y que la amplitud de la deformada sea mayor.

En todos los casos se obtiene una buena correspondencia con los resultados del ensayo y por tanto la amplitud tomada de la norma de ejecución de estructuras es satisfactoria. Los resultados obtenidos aplicando las recomendaciones del Eurocódigo presentan una ligera sobreestimación de la carga última y menores amplitudes de la deformación final, es un modelo más rígido.

A continuación se presentan los resultados obtenidos empleando la *forma de fallo* en lugar del primer modo de pandeo para la introducción de las imperfecciones geométricas iniciales. La Figura 5. 16 se presenta las curvas tensión deformación obtenidas para las diferentes imperfecciones iniciales estudiadas y la Figura 5. 17 las deformadas de la sección del alma, bajo el punto de aplicación de la carga, en el momento de aplicación de la carga última.



Leyenda de la Figura 5. 16. y siguientes:

FF: Forma de la imperfección igual a la forma de fallo para carga máxima obtenida en un análisis preliminar con el software para el cálculo con el MEF. Amplitudes según EN1090.

Figura 5. 16. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos siguientes: FF+T.R.3 (rojo -■-), FF+T.R.2 (naranja -▲-), FF+T.R.1 (amarillo -X-), FF+NO (verde -●-), EC3+NO (verde claro -|-) y ensayo (azul ---). Considerando valores nominales del acero.

La adopción de la forma de fallo para la imperfección geométrica inicial tiene un claro efecto en el modelo, es menos rígido, como se aprecia en la curva tensión deformación y en la deformada del alma.

Este efecto se debe a que el modo de pandeo es prácticamente simétrico respecto del eje de simetría vertical del alma de la viga, mientras que por el contrario, la forma de fallo sitúa el punto con mayor desplazamiento respecto del plano perpendicular del alma más

cercano del ala superior, este efecto se explicó en el apartado anterior, véase la Tabla 5.5.

El efecto ocasionado por la consideración o no de las tensiones residuales es idéntico al del caso de anterior, en el que se emplea el primer modo de pandeo como forma de la imperfección geométrica inicial.

Al igual que en el caso anterior, se obtiene una buena correspondencia con los resultados del ensayo pero si en el caso anterior el error estaba en torno a un 1% respecto del valor de carga última obtenido en el ensayo, en estos casos es mayor, de entorno a un 4%; siempre del lado de la seguridad.

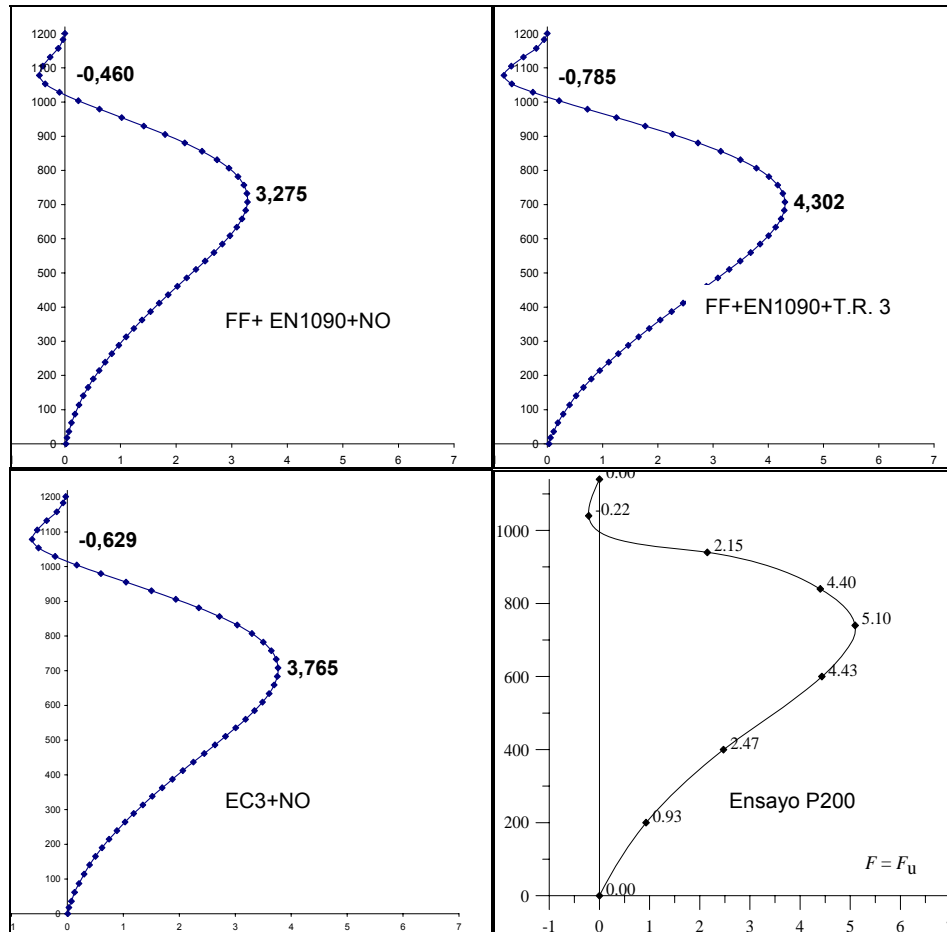
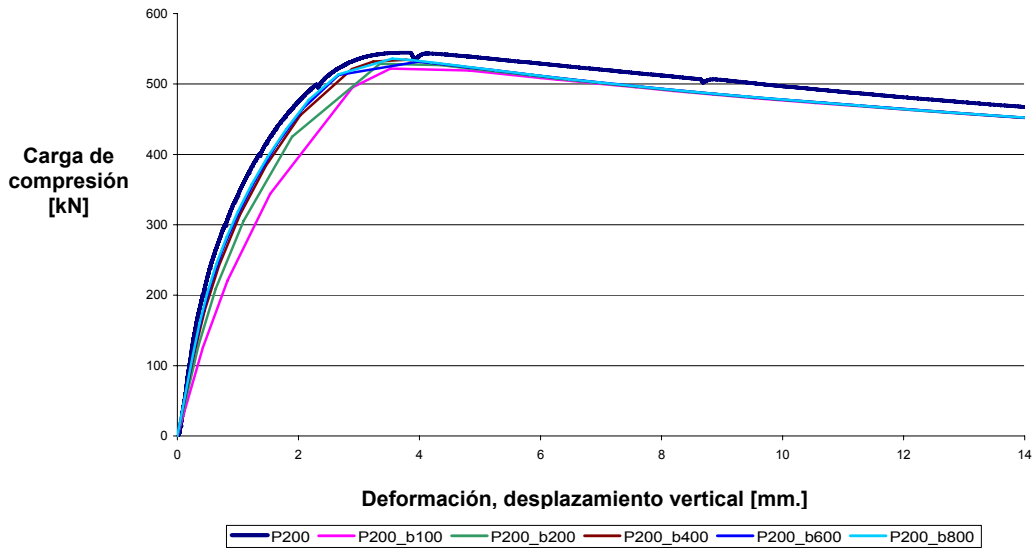


Figura 5. 17. Ensayo P200 – Deformadas de la placa del alma en el momento de alcanzar la carga máxima. Representación según sección transversal. Considerando valores nominales del acero.

Los resultados presentados hasta ahora se han obtenido considerando en el modelo los valores nominales del acero de las chapas empleadas en la fabricación de las vigas

ensayadas, no obstante, gracias a los ensayos de tracción realizados por LTU, véase Tabla 5. 2, se puede construir un modelo con los valores reales del acero empleado.

Por ello, a continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la introducción en el modelo de los valores reales del acero, para el caso de imperfecciones según la forma del primer modo de pandeo, Figura 5. 18 y Figura 5. 19, con o sin tensiones residuales, y con imperfecciones iniciales según la forma de fallo, Figura 5. 20 y Figura 5. 21, también con y sin tensiones residuales respectivamente.



Leyenda de la Figura 5. 18. y siguientes:

- P200: Curva carga deformación correspondiente al ensayo P 200.
- b100, ..., b800: Caso con imperfecciones de amplitud igual a $b/100, \dots, b/800$ en la imperfección geométrica inicial empleada en el modelo empleado en el MEF. Siendo "b" la altura del panel, canto del alma de la viga.

Figura 5. 18. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos en los que se han considerado imperfecciones geométricas iniciales con la forma del primer modo de pandeo pero no tensiones residuales. Considerando valores del ensayo de tracción del acero.

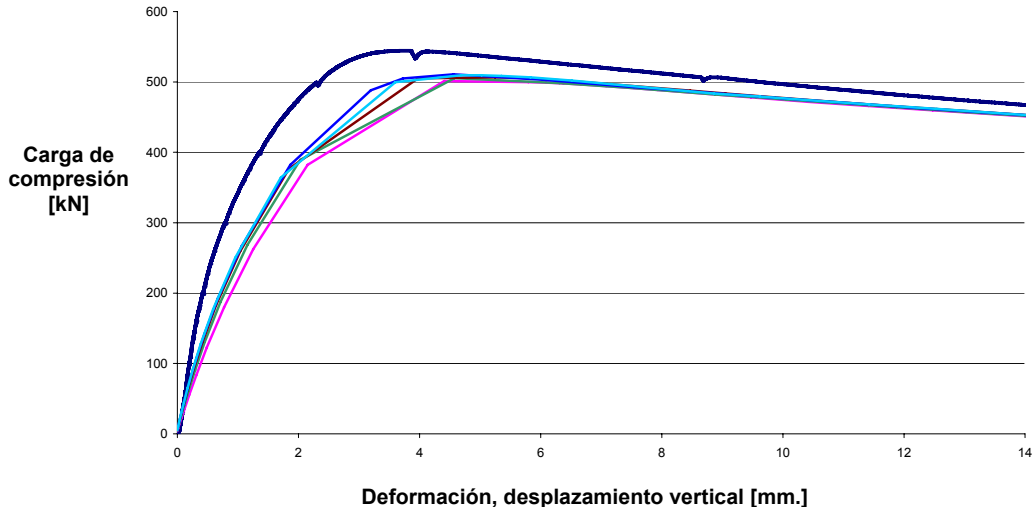


Figura 5. 19. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos en los que se han considerado imperfecciones geométricas iniciales con la forma del primer modo de pandeo y tensiones residuales. Considerando valores del ensayo de tracción del acero.

Tal y como también se da con el caso de modelización del material según los valores nominales, en este caso también ocurre que la adopción de la forma de fallo para la imperfección geométrica inicial da lugar a un modelo menos rígido, como se aprecia en las curva tensión deformación siguientes, Figura 5. 20 y Figura 5. 21.

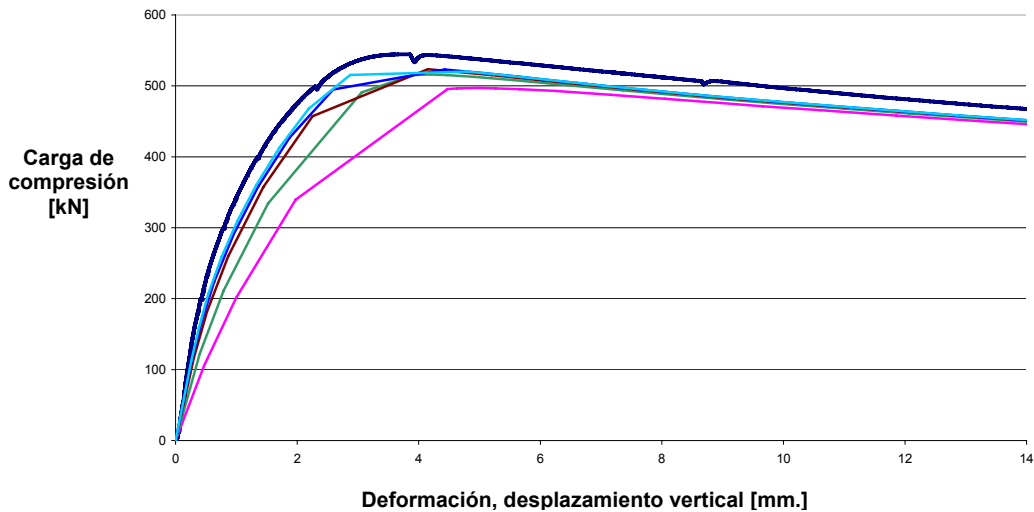


Figura 5. 20. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos en los que se han considerado imperfecciones geométricas iniciales con la forma de fallo pero no tensiones residuales. Considerando valores del ensayo de tracción del acero.

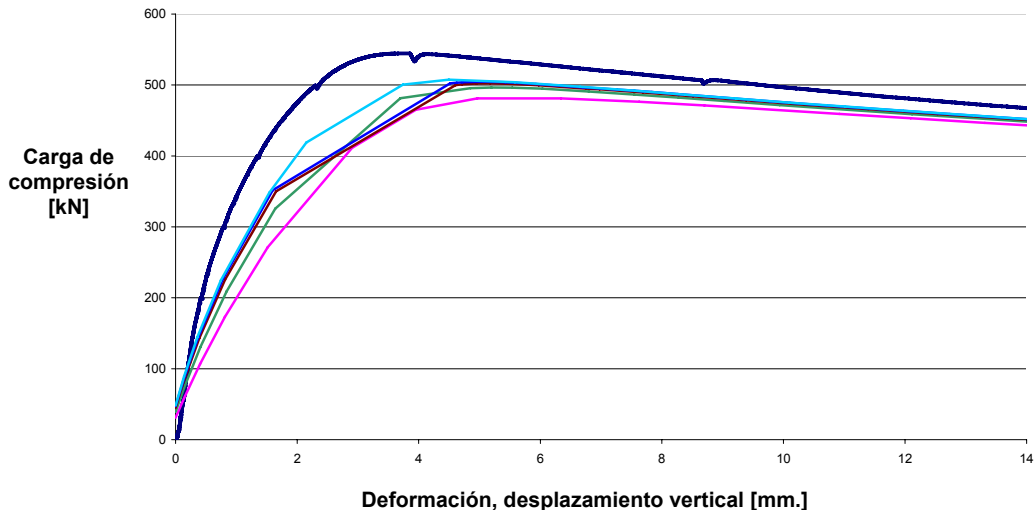


Figura 5. 21. Ensayo P200 – Curvas carga deformación para casos en los que se han considerado imperfecciones geométricas iniciales con la forma de fallo y tensiones residuales. Considerando valores del ensayo de tracción del acero.

Para facilitar el análisis de los resultados obtenidos respecto de la consideración de los diferentes parámetros analizados en la investigación, la Tabla 5. 7 presenta los valores de la carga máxima o carga última obtenidos con la caracterización del acero sobre la base de los resultados del ensayo de tracción, en una serie de casos representativos del conjunto de simulaciones realizadas.

Tabla 5. 7. Carga máxima obtenida mediante el MEF en el análisis paramétrico realizado empleado los valores del ensayo de tracción del acero y comparación con los resultados de los ensayos.

- * P200: coeficiente corrector de la amplitud calculada a partir de la tolerancia de fabricación de la EN1090: 0,10
- * P700: coeficiente corrector de la amplitud calculada a partir de la tolerancia de fabricación de la EN1090: 0,50
- * P200: coeficiente corrector de la amplitud calculada a partir de la tolerancia de fabricación de la EN1090: 0,30

ENSAYO	CARGA MÁXIMA ENSAYO [kN]	SIN CONSIDERAR TENSIONES RESIDUALES					CONSIDERANDO TENSIONES RESIDUALES	
		PRIMER MODO DE PANDEO			FORMA DE FALLO		PRIMER MODO DE PANDEO	FORMA DE FALLO
		EC3	EN1090*	EN1090	EN1090*	EN1090	Imperfecciones iniciales reales	Imperfecciones iniciales reales
P 200	544	543,27	535,40	521,77	532,91	497,10	511,76	504,60
P 700	660	702,33	715,31	710,68	684,69	668,48	664,42	653,76
P 1400	808	880,13	887,12	872,03	864,39	828,64	831,98	811,47

Como se puede observar en la Tabla 5. 7, la carga máxima obtenida por el modelo empleado para el análisis mediante el MEF de la viga armada frente a cargas concentradas aplicadas en el plano del alma, a través del ala superior, es satisfactoria en todos los casos, el error siempre es inferior al 10% respecto del obtenido en el ensayo.

Los resultados más cercanos a los del ensayo se han marcado en negrita en la Tabla 5. 7, se puede apreciar la clara influencia de valor de la amplitud inicial en el valor de la carga última obtenida en los modelos. En el ensayo P200, cuya imperfección real medida es

muy pequeña, se aprecia claramente como pequeños incrementos en la amplitud de la imperfección inicial producen descenso de la carga última.

En cuanto a efectos de alcance general, se puede afirmar que el empleo de una forma de imperfección inicial semejante a la forma de fallo esperada conduce a resultados más conservadores que en el caso de emplear la forma del primer modo de pandeo. De igual forma, la inclusión de tensiones residuales siempre produce una reducción de la carga última obtenida, siempre tomando las precauciones oportunas para evitar posibles efectos indeseados debidos a la interacción con la deformada inicial del modelo, véase el apartado 5.3.2.

Finalmente, atendiendo a la columna de la Tabla 5. 7 correspondiente a los resultados en los que se ha empleado la forma de fallo con diferentes coeficientes correctores sobre las tolerancias de fabricación máximas permitidas por la norma de ejecución de estructuras de acero, se considera viable la posibilidad de establecer unas imperfecciones geométricas equivalentes, basadas en las tolerancias de fabricación de estructuras modificadas por coeficientes que atendieran al grado de imperfección previsible, alternativas a las actuales del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN 1993-1-5: 2006].

5.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Las investigaciones desarrolladas en este capítulo mediante el análisis paramétrico, aplicando el MEF sobre tres ensayos en vigas no rigidizadas sometidas a cargas concentradas en el plano del alma, aplicadas a través del ala superior, se han contrastado con los datos experimentales de la referencia siguiente:

“I-section girder subject to patch loading”. [COMBRI, 2006a], [Gozzi, 2007].

Tras el análisis de los resultados obtenidos mediante los análisis paramétricos, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF y los ensayos.
2. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF, empleando la imperfecciones geométricas y tensiones residuales y los obtenidos siguiendo las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].
3. En cuanto a la modelización del acero, se recomienda una caracterización adecuada, realista, ya que el empleo de los valores nominales puede dar lugar a resultados conservadores o no del MEF en función de la desviación respecto del ensayo de tracción del acero empleado en el componente estructural. No obstante, en caso de suministros procedentes de fabricantes de acero con valores del límite elástico, último y alargamientos garantizados, el empleo de los valores nominales conducirá a resultados realistas.
4. En cuanto a la imperfecciones iniciales equivalentes, la adopción de una imperfección geométrica inicial que contemple tanto las tolerancias de fabricación como las tensiones residuales resultantes de la soldadura es aceptable siempre y cuando se tenga en cuenta las siguientes precauciones:

El uso de amplitudes basadas en las tolerancias máximas de fabricación ofrece resultados aceptables.

No obstante, el modelo analizado es muy sensible al valor de la amplitud de la imperfección inicial. Caso de recomendarse amplitudes pequeñas, se podrían producir resultados que sobreestimarían la carga última.

Una forma de paliar el efecto anterior es el empleo de una forma de la imperfección geométrica inicial basada en la forma de fallo, su uso da lugar valores inferiores de la carga última que los de las imperfecciones geométricas iniciales basadas en la forma del primer modo de pandeo.

5. En cuanto a las tensiones residuales, como en los otros casos analizados en esta Tesis, no es necesario la introducción de un patrón real, ya que los resultados con el patrón simplificado, basado en una distribución rectangular de tensiones de membrana, son correctos. Además, el patrón con el grado de afección más alto es el que ofrece los resultados más cercanos a los proporcionados por el ensayo.

En empleo de tensiones residuales con amplitudes de imperfecciones geométricas iguales a las medidas en las vigas ensayadas, proporciona valores de la carga última inferiores a modelos con iguales amplitudes pero sin consideración de tensiones residuales.

6. Para soportar las conclusiones presentadas, en las que se incide principalmente en la elevada sensibilidad del caso de carga concentrada respecto del valor de las imperfecciones iniciales, otros autores, [Frieze, 1975], también afirman que este comportamiento es más pronunciado en el rango de esbelteces intermedias, esto es, en aquellos casos en los que la tensión crítica de la placa y el límite elástico del acero son similares y que además, la caída de la resistencia es más marcada en placas de esbeltez intermedia sometidas a tensiones de compresión y menor para solicitaciones de cortante, siendo prácticamente despreciable en placas rectangulares solicitadas a cortante puro, [Galambos, 1998].

Además, las conclusiones obtenidas para el caso analizado son, en términos generales, convergentes con las obtenidas por otras personas que han investigado la respuesta de vigas armadas, de tipologías diferentes a la estudiada en esta Tesis Doctoral, frente a cargas concentradas:

- Caso de vigas con rigidizadores longitudinales, [Davaine, 2004], no se puede despreciar el efecto de las imperfecciones iniciales, la autora identifica resultados de entre un -2,30% y un +24,00% respecto del valor de la carga última del ensayo empleado como validación del estudio paramétrico realizado por la investigadora referenciada.

- Caso de vigas híbridas, [Chacón, 2007], según en autor, se pone de manifiesto la *influencia significativa* tanto de la forma como de la amplitud de las imperfecciones geométricas iniciales, especialmente para el caso de grandes distancias entre rigidizadores transversales, donde se producen diferencias máximas en la carga obtenida de entorno al 10% de la carga última.

7. Para resumir la investigación desarrollada, la Tabla 5. 8 presenta la recomendación de CONSIDERACIÓN DE IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS Y TENSIONES RESIDUALES EN LA VERIFICACIÓN DE PLACAS DE ACERO EN ALMAS DE VIGAS ARMADAS NO RIGIDIZADAS, SOMETIDAS A CARGA CONCENTRADA.

Tabla 5. 8. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero en almas de vigas armadas, no rigidizadas, sometidas a carga concentrada.

IMPERFECCIONES INICIALES	EN1993-1-5:2005 ANEXO C		PROPUESTA	
	FORMA	AMPLITUD	FORMA	AMPLITUD
Imperfecciones geométricas.	Forma de pandeo	Min (a/200, b/200).	Local, a nivel de panel. Forma de fallo.	(*) b/400 (b/100, para las secciones sobre los apoyos)
Tensiones residuales.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Patrones rectangulares de tensiones de membrana.	(**) Tracción: +f _y Compresión: -0,30·f _y

(*) Aunque el análisis paramétrico ha demostrado que se obtienen buenos resultados con las amplitudes de las imperfecciones geométricas iniciales comprendidas entre los valores de b/100 y b/800, ajustados a la curva tensión deformación de los ensayos, dada la importante sensibilidad del modelo de viga armada sometida a carga concentrada a la variación en la amplitud de las imperfecciones geométricas iniciales y la inclusión o no de las tensiones residuales, se recomienda emplear las tolerancias de fabricación de estructuras de acero máximas recomendadas en el *Annex L1 “Geometrical tolerances - Essential tolerances”* de la norma de ejecución de estructuras de acero, para paneles rigidizados, [prEN1090-2:2004], **siendo “b” dimensión de la placa correspondiente al canto de la viga.**

(**) La introducción de tensiones residuales en los modelos para el cálculo con el MEF, en combinación con las imperfecciones geométricas iniciales, proporciona siempre valores menores de carga máxima que los modelos sin tensiones residuales, salvo situaciones excepcionales como las presentadas en el apartado 5.3.2. Sin embargo, en todos los

casos investigados en los que se han empleado valores de las imperfecciones geométricas iniciales iguales o superiores a los de las imperfecciones medidas en las vigas, se han obtenido resultados satisfactorios, del lado de la seguridad, sin necesidad de considerar tensiones residuales. Por lo tanto, una amplitud de valor $b/100$, establecido en la norma de ejecución de estructuras de acero para la deformación lateral del alma sobre los apoyos, puede ser recomendada como imperfección equivalente para tener en cuenta tanto imperfecciones geométricas como tensiones residuales, con una forma igual a la forma de fallo.

NOTA: Estas recomendaciones han sido validadas únicamente con el ensayo referenciado, para otro tipo de cargas, condiciones de contorno, esbeltez del elemento estructural... estas recomendaciones podrían no ser de aplicación.

Estas recomendaciones se discuten y ponen en contexto con el resultado de otras investigaciones, presentadas en el Capítulo 3 y en el Capítulo 4, mediante las conclusiones finales ofrecidas en el Capítulo 6.

6. CONCLUSIONES

6.1. INTRODUCCIÓN

En este último capítulo de la Tesis Doctoral se recogen los resultados principales obtenidos de los trabajos de investigación llevados a cabo para proporcionar una metodología novedosa para la consideración de las imperfecciones iniciales que ofrezca una mejora del diseño de elementos estructurales armados, compuestos por placas de acero soldadas, básicamente las vigas, para puentes.

Como ya hemos comentado desde los capítulos iniciales, el análisis basado en MEF se está convirtiendo de manera progresiva en una herramienta de diseño imprescindible para el diseño seguro y competitivo de elementos estructurales armados, vigas y cajones, y componentes de los mismos, placas rigidizadas y sin rigidizar, de puentes de acero y puentes mixtos de acero y hormigón.

El análisis mediante MEF tiene su aplicación principal en la comprobación y estudio de la estabilidad de las placas de acero de elementos estructurales armados, vigas o cajones, solicitados a compresión. Para que estos análisis mediante MEF proporcionen unos resultados realistas, esto es, acordes al comportamiento real de los elementos estructurales en servicio, es crucial una correcta consideración de las imperfecciones iniciales.

Es por ello que en esta Tesis Doctoral se propone una metodología que contempla, de forma explícita, tanto imperfecciones geométricas como tensiones residuales para la verificación de las estructuras armadas de puentes de acero mediante la aplicación de MEF. Esta metodología se presenta en forma de guías sencillas orientadas a servir como recomendaciones de diseño prácticas a personas en ejercicio en el ámbito de la ingeniería estructural.

6.2. BREVE PRESENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Es importante resaltar una vez más, que en el análisis mediante MEF la consideración de las imperfecciones iniciales es imprescindible para obtener resultados realistas, seguros y competitivos; acordes con el comportamiento real de los elementos estructurales de acero.

El desarrollo de ordenadores cada vez más potentes y de programas para la implantación de métodos numéricos cada vez más sofisticados, ha proporcionado a la profesión de la ingeniería estructural la capacidad suficiente como para que en la actualidad se pueda diseñar prácticamente cualquier estructura compuesta por elementos estructurales de acero armados, esto es, compuestos por placas de acero soldadas y que trabajan cargadas en su plano, sin prácticamente limitación frente a la complejidad de la geometría de la sección, su sensibilidad frente a las imperfecciones iniciales (esbeltez y tipo de carga) o no-linealidades en su comportamiento (geométricas o del material).

Si embargo, esto ha hecho que los aspectos fundamentales de un correcto modelizado sean aún más complicados de resolver para la ingeniería estructural, frente a tiempos pasados:

- Desarrollar un modelo numérico correcto, esto es, ajustado al problema a estudiar.
- Obtener resultados, de los análisis numéricos, capaces de proporcionar la información suficiente para determinar el comportamiento estructural de los componentes de las estructuras de forma fiable, segura, pero también proporcionando diseños competitivos.

El aspecto clave para conseguir un diseño seguro y, a la vez, competitivo, es la simulación cuantitativa de la influencia de la imperfección en el fenómeno del pandeo de placas de acero.

El Anexo C: “Análisis mediante Métodos de Elementos Finitos – MEF” del Eurocódigo 3: “Proyecto de estructuras de acero” - Parte 1-5 “Elementos estructurales de placas de acero”, [EN1993-1-5:2006], proporciona unas guías básicas fundamentadas en el empleo de imperfecciones geométricas equivalentes.

Sin embargo, el citado Anexo C no proporciona información completa sobre cómo considerar explícitamente el efecto de las tensiones residuales combinado con las imperfecciones geométricas; la recomendación proporcionada es la de considerar unas

imperfecciones geométricas equivalentes, esto es, equivalentes a los efectos esperados de considerar de manera independiente imperfecciones geométricas además de las tensiones residuales.

Además, no existen recomendaciones para las personas involucradas en la ingeniería estructural en relación con la elección de las formas y amplitudes más adecuadas de imperfecciones referidas a los casos concretos de elementos estructurales de acero sometidos a situaciones específicas de cargas.

Son estas carencias del Anexo C las que han motivado el desarrollo de esta Tesis Doctoral cuyas investigaciones se han desarrollado dentro del marco proporcionado por el proyecto COMBRI, [COMBRI, 2006], en cuyo paquete de trabajo WP 3.1.: *“Imperfections for FE calculations”*, el autor de esta Tesis Doctoral fue responsable de establecer nuevas estrategias para considerar las imperfecciones iniciales requeridas por los modelos de estructuras armadas de acero para su análisis mediante MEF.

El punto de partida para seleccionar el tipo de planteamiento para la consideración de las imperfecciones en los análisis mediante MEF consistió en partir de una reflexión de H. Schmidt, [Schmidt, 2002], que identificó tres tipos diferentes de aproximaciones al problema:

- **REALISTA:** Considera el modelado en función de bases de datos procedentes de análisis estadísticos fruto de campañas intensivas de mediciones en probetas. Esta aproximación constituye más un deseo que una opción factible para el trabajo de proyecto de estructuras de acero de las personas en ejercicio en el campo de la ingeniería estructural.
- **PESIMISTA:** Propone la selección de la imperfección, tanto de su forma como de su amplitud, más crítica para el elemento estructural. La práctica común consiste en la selección del primer modo de pandeo o una combinación de varios modos de pandeo. No obstante, es importante señalar que en casos concretos de comportamiento no-lineal previo al pandeo del elemento, otras formas de imperfecciones pueden proporcionar resultados más conservadores que los modos de pandeo.
- **ESTIMULANTE:** Consiste en seleccionar un patrón de imperfección geométrica equivalente tan sencillo como sea posible para estimular el comportamiento característico de pandeo de la placa de acero. En la práctica, consiste en

identificar una forma basada en los modos de pandeo; en cuanto a las amplitudes de los mismos, deben ser calibradas para los casos concretos de estudio.

Esta Tesis Doctoral ha seguido la filosofía indicada por la tercera aproximación presentada, para desarrollar una estrategia que considere tanto las imperfecciones geométricas como las tensiones residuales a definir en las verificaciones de elementos estructurales armados, compuestos por placas soldadas de acero, mediante el empleo de MEF.

En los siguientes apartados se presentan de manera resumida los resultados principales de las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral y presentadas con detalle en los capítulos precedentes.

Los resultados se han estructurado de forma que sirvan de guía práctica en los proyectos de ingeniería que precisen llevar a cabo un análisis en detalle de elementos o componentes de elementos estructurales armados, orientados a su aplicación en estructuras de puentes de acero o mixtos de acero y hormigón. Para ello se proporcionan:

- Recomendaciones para la selección de la forma (local, global o combinada) y magnitud de la imperfección geométrica.
- Reglas simplificadas para la consideración de las tensiones residuales; mediante patrones rectangulares fácilmente utilizables en los modelos para el análisis mediante MEF.
- Resultados de la validación de las recomendaciones y reglas previas a través de los análisis numéricos realizados sobre los datos experimentales proporcionados por los ensayos llevados a cabo en el proyecto de I+D COMBRI, [COMBRI, 2006], y otros seleccionados a partir del estudio de la literatura técnica de reconocido prestigio.

Con el objeto de establecer unas recomendaciones definitivas, esta Tesis Doctoral proporciona los resultados de las investigaciones numéricas realizadas para comprobar la influencia de las formas, magnitudes y patrones de imperfecciones geométricas y tensiones residuales, respectivamente, en varios casos de carga y tipologías de elementos estructurales de acero armados: placa rigidizada sometida a compresión y flexión combinadas, viga armada rigidizada y sin rigidizar solicitada a cortante y viga armada sometida a carga concentrada.

Para conseguir proporcionar unas guías sencillas de aplicación a las personas de la profesión de ingeniería en ejercicio, las conclusiones definitivas de esta Tesis Doctoral para la consideración de las imperfecciones geométricas y tensiones residuales, en el análisis de elementos estructurales de acero armados, compuestos de placas de acero soldadas, de aplicación en estructuras de puentes, se presentan asociadas a casos específicos de componentes armados de acero sometidos a casos concretos de carga; validándose las recomendaciones mediante contraste con los ensayos referenciados:

1. Placas de acero rigidizadas sometidas a compresión y flexión combinadas. Comportamiento a pandeo tipo columna, [Grondin, 1998].
2. Vigas armadas rigidizadas y sin rigidizar solicitadas a cortante y flexión combinadas. Ensayos desarrollados por RWTH Aachen (Alemania), [COMBRI, 2006].
3. Vigas armadas sometidas a carga concentrada. Pandeo local del alma, placa comprimida. Ensayos desarrollados por LTU (Suecia), [COMBRI, 2006].

En los apartados siguientes de este capítulo se proporcionan las recomendaciones obtenidas como resultado de las investigaciones de esta Tesis Doctoral y que ya se han presentado en las conclusiones del Capítulo 3, Capítulo 4 y Capítulo 5.

6.3. RECOMENDACIONES PARA PLACAS DE ACERO RIGIDIZADAS SOMETIDAS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN COMBINADAS.

Como resultado de las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral mediante el análisis paramétrico, aplicando el MEF, validado mediante el ensayo desarrollado sobre una placa rigidizada con un rigidizador de sección en T, susceptible de comportamiento a pandeo tipo columna, y cuyos datos experimentales se han tomado de la referencia siguiente:

“Stiffened Steel Plates Under Compression and Bending”. G.Y. Grondin, Q. Chen, A.E. Elwi, J.J. Cheng. J. Construct. Steel Res. Vol. 45 No. 2, pp. 125-148. 1998, [Grondin, 1998].

Se presentan las siguientes conclusiones:

1. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF y los ensayos.
2. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF, empleando la imperfecciones geométricas y tensiones residuales y los obtenidos siguiendo las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].
3. En relación con las imperfecciones geométricas iniciales. El uso de imperfecciones geométricas equivalentes de amplitudes del orden de las tolerancias de fabricación y ejecución de estructuras máximas, produce resultados aceptables para diseño de placas rigidizadas comprimidas, con comportamiento tipo columna. Sin embargo, es importante contrastar la información sobre las imperfecciones geométricas iniciales medidas, para obtener correspondencias correctas en el caso de comparación de simulaciones mediante el MEF y ensayos.

La descripción del comportamiento frente a pandeo global de los elementos estructurales de acero sometidos a compresión está adecuadamente tratado en Europa desde los años 70, [ECCS, 1976], [ECCS, 1977], y más recientemente a través de las curvas de pandeo del Eurocódigo 3, [EN 1993-1-1:2005]. No obstante, la aplicación de las curvas de pandeo del Eurocódigo a secciones armadas esbeltas, con comportamiento tipo columna frente a pandeo, puede dar lugar a diseños muy conservadores.

Es por ello que las recomendaciones del Anexo C pueden dar lugar a resultados conservadores para este tipo de elementos. Por ejemplo, el empleo de diseños basados en el MEF con imperfecciones de valores en torno a $L/725$ pueden ofrecer resultados más competitivos y seguros para cajones armados solicitados a compresión, [Detzel, 2006].

4. En relación con las tensiones residuales. No se considera necesario introducir en el modelo el patrón real de distribución de las tensiones residuales. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF con patrones de tensiones residuales simplificados y los del ensayo.
5. En relación con la modelización del acero. Se considera imprescindible la correcta caracterización del acero. De otra manera no se obtendrán resultados fiables

cuando se analicen comportamientos e régimen no lineal. Por ello, se recomienda el empleo de la curva real, véase Anexo C Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].

6. Como conclusión final de la investigación desarrollada, la Tabla 6. 1. presenta la recomendación de CONSIDERACIÓN DE IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS Y TENSIONES RESIDUALES EN LA VERIFICACIÓN DE PLACAS DE ACERO, RIGIDIZADAS, SOLICITADAS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, SUSCEPTIBLES DE COMPORTAMIENTO A PANDEO TIPO COLUMNA.

Tabla 6. 2. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero, rigidizadas, solicitadas a compresión y flexión, susceptibles de comportamiento a pandeo tipo columna.

IMPERFECCIONES INICIALES	EN1993-1-5:2005 ANEXO C		PROPUESTA	
	FORMA	AMPLITUD	FORMA	AMPLITUD
Imperfecciones geométricas.	Arco.	Min (a/400, b/400).	Global. Forma de pandeo.	(*) a/400
Tensiones residuales.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Patrones rectangulares de tensiones de membrana.	(**) Tracción: +f _y Compresión: -0,30·f _y

(*) Aunque el análisis paramétrico ha obtenido buenos resultados con amplitudes de a/1000, imperfección máxima típica para perfiles laminados en caliente, según el *Annex L1 "Geometrical tolerances - Essential tolerances"*, [prEN1090-2:2004], la máxima tolerancia de fabricación permitida para placas rigidizadas es superior, a/400, **siendo "a" la longitud**, por ello se recomienda este último valor.

(**) El empleo en los modelos para el cálculo con el MEF de tensiones residuales en combinación con las imperfecciones iniciales proporciona valores menores de carga máxima que los proporcionados por modelos sin tensiones residuales. Sin embargo, para el caso investigado, el empleo de imperfecciones de forma igual al modo de pandeo, sin tensiones residuales, proporciona resultados satisfactorios. Por lo tanto, una amplitud de valor a/400 puede considerarse satisfactoria como imperfección equivalente para tener en cuenta tanto imperfecciones geométricas como tensiones residuales.

NOTA: Estas recomendaciones han sido validadas únicamente con el ensayo referenciado, para otro tipo de cargas, condiciones de contorno, esbeltez del elemento estructural... estas recomendaciones podrían no ser de aplicación.

6.4. RECOMENDACIONES PARA VIGAS ARMADAS RIGIDIZADAS Y SIN RIGIDIZAR SOLICITADAS A CORTANTE Y FLEXIÓN COMBINADOS

Las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral mediante el análisis paramétrico, aplicando el MEF, sobre cuatro ensayos en vigas rigidizadas y no rigidizadas solicitadas a cortante y flector, cuyos resultados se ha contrastado con los datos experimentales de la referencia siguiente:

“Shear behaviour and bending interaction of stiffened and unstiffened welded girders”, [COMBRI, 2005a],[COMBRI, 2005b],[Feldmann, 2007],[Naumes, 2007].

Permiten establecer las siguientes conclusiones:

1. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF y los ensayos.
2. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF, empleando la imperfecciones geométricas y tensiones residuales y los obtenidos siguiendo las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].
3. En cuanto a los coeficientes empleados sobre las amplitudes de las imperfecciones geométricas iniciales aplicados sobre las tolerancias de la norma de ejecución de estructuras de acero, [prEN1090-2:2004], y sobre las recomendaciones de imperfecciones geométricas equivalentes del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2005], no afectan en ningún caso a los resultados obtenidos para carga máxima aplicando el MEF.

Esta “insensibilidad” de las vigas solicitadas a cortante estudiadas ha sido observada también por otras personas, participantes en el proyecto COMBRI, [Boissonnade, 2007a], [Boissonnade, 2007b], [Boissonnade, 2007c], que han investigado la influencia de las imperfecciones iniciales en la resistencia última frente a este tipo de sollicitación, y que han concluido que una amplitud de la imperfección inicial de valor $a/800$ podría considerarse apropiado, ya que, más que la amplitud, es la forma de la imperfección inicial la que mayor influencia tiene en la respuesta estructural. Los autores citados recomiendan el empleo de una forma

denominada “*forma de fallo*”, obtenida tras un análisis no lineal, llegando hasta el fallo en la etapa post-crítica, mediante el programa de MEF, que posteriormente se debe ajustar a la magnitud de la imperfección inicial seleccionada

4. En relación con la influencia de las tensiones residuales en la rigidez del modelo y la carga máxima obtenida aplicando el MEF. Los grados de afección estudiados no influyen a los resultados obtenidos aplicando el MEF.
5. En relación con la modelización del acero. Se considera imprescindible la correcta caracterización del acero. De otra manera no se obtendrán resultados fiables cuando se analicen comportamientos e régimen no lineal. Por ello, se recomienda el empleo de la curva real, véase Anexo C Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].
6. Como conclusión final de la investigación desarrollada, la Tabla 6.2. presenta la recomendación de CONSIDERACIÓN DE IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS Y TENSIONES RESIDUALES EN LA VERIFICACIÓN DE PLACAS DE ACERO EN ALMAS DE VIGAS ARMADAS, RIGIDIZADAS Y NO RIGIDIZADAS, SOMETIDAS CORTANTE Y FLEXIÓN.

Tabla 6. 3. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero en almas de vigas armadas, rigidizadas y no rigidizadas, sometidas cortante y flexión.

IMPERFECCIONES INICIALES	EN1993-1-5:2005 ANEXO C		PROPUESTA	
	FORMA	AMPLITUD	FORMA	AMPLITUD
Imperfecciones geométricas.	Forma de pandeo	Min (a/200, b/200).	Local, a nivel de panel. Forma de pandeo.	(*) a/400
Tensiones residuales.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Patrones rectangulares de tensiones de membrana.	(**) Tracción: +0,80·f _y Compresión: -0,05·f _y

(*) Aunque el análisis paramétrico ha demostrado que ni la amplitud de las imperfecciones geométricas iniciales ni de las tensiones residuales estudiadas afectan a los resultados proporcionados mediante el MEF, se recomienda emplear las tolerancias mínimas del *Annex L1 “Geometrical tolerances - Essential tolerances”*, [prEN1090-2:2004], **siendo “a” la menor dimensión de la placa, longitud o canto.**

(**) El empleo en los modelos para el cálculo con el MEF de tensiones residuales en combinación con las imperfecciones iniciales proporciona valores menores de carga máxima que los proporcionados por modelos sin tensiones residuales. Sin embargo, en todos los casos investigados, el empleo de imperfecciones geométricas de forma igual a la del modo de pandeo elástico, sin tensiones residuales, proporciona resultados

satisfactorios, del lado de la seguridad. Por lo tanto, una amplitud de valor $a/400$ puede ser recomendada como imperfección equivalente para tener en cuenta tanto imperfecciones geométricas como tensiones residuales.

NOTA: Estas recomendaciones han sido validadas únicamente con el ensayo referenciado, para otro tipo de cargas, condiciones de contorno, esbeltez del elemento estructural... estas conclusiones podrían no ser de aplicación.

6.5. RECOMENDACIONES PARA VIGAS ARMADAS SOMETIDAS A CARGA CONCENTRADA

Las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral mediante el análisis paramétrico, aplicando el MEF sobre tres ensayos en vigas no rigidizadas sometidas a cargas concentradas en el plano del alma, aplicadas a través del lama superior, se han contrastado con los datos experimentales de la referencia siguiente:

“I-section girder subject to patch loading”. [COMBRI, 2006a], [Gozzi, 2007].

Tras el análisis de los resultados obtenidos mediante los análisis paramétricos, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF y los ensayos.
2. Se ha obtenido una correspondencia satisfactoria entre los resultados proporcionados por el modelo empleado en el MEF, empleando la imperfecciones geométricas y tensiones residuales y los obtenidos siguiendo las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006].
3. En cuanto a la modelización del acero, se recomienda una caracterización adecuada, realista, ya que el empleo de los valores nominales puede dar lugar a resultados conservadores o no del MEF en función de la desviación respecto del ensayo de tracción del acero empleado en el componente estructural. No obstante, en caso de suministros procedentes de fabricantes de acero con valores del límite elástico, último y alargamientos garantizados, el empleo de los valores nominales conducirá a resultados realistas.
4. En cuanto a la imperfecciones iniciales equivalentes, la adopción de una imperfección geométrica inicial que contemple tanto las tolerancias de fabricación como las tensiones residuales resultantes de la soldadura es aceptable siempre y cuando se tenga en cuenta las siguientes precauciones:

El uso de amplitudes basadas en las tolerancias máximas de fabricación ofrece resultados aceptables.

No obstante, el modelo analizado es muy sensible al valor de la amplitud de la imperfección inicial. Caso de recomendarse amplitudes pequeñas, se podrían producir resultados que sobreestimarían la carga última.

Una forma de paliar el efecto anterior es el empleo de una forma de la imperfección geométrica inicial basada en la forma de fallo, su uso da lugar valores inferiores de la carga última que los de las imperfecciones geométricas iniciales basadas en la forma del primer modo de pandeo.

5. En cuanto a las tensiones residuales, como en los otros casos analizados en esta Tesis, no es necesario la introducción de un patrón real, ya que los resultados con el patrón simplificado, basado en una distribución rectangular de tensiones de membrana, son correctos. Además, el patrón con el grado de afectación más alto es el que ofrece los resultados más cercanos a los proporcionados por el ensayo.

En empleo de tensiones residuales con amplitudes de imperfecciones geométricas iguales a las medidas en las vigas ensayadas, proporciona valores de la carga última inferiores a modelos con iguales amplitudes pero sin consideración de tensiones residuales.

6. Para soportar las conclusiones presentadas, en las que se incide principalmente en la elevada sensibilidad del caso de carga concentrada respecto del valor de las imperfecciones iniciales, otros autores, [Frieze, 1975], también afirman que este comportamiento es más pronunciado en el rango de esbelteces intermedias, esto es, en aquellos casos en los que la tensión crítica de la placa y el límite elástico del acero son similares y que además, la caída de la resistencia es más marcada en placas de esbeltez intermedia sometidas a tensiones de compresión y menor para solicitaciones de cortante, siendo prácticamente despreciable en placas rectangulares solicitadas a cortante puro, [Galambos, 1998].

Además, las conclusiones obtenidas para el caso analizado son, en términos generales, convergentes con las obtenidas por otras personas que han investigado la respuesta de vigas armadas, de tipologías diferentes a la estudiada en esta Tesis Doctoral, frente a cargas concentradas:

- Caso de vigas con rigidizadores longitudinales, [Davaine, 2004], no se puede despreciar el efecto de las imperfecciones iniciales, la autora identifica resultados de entre un -2,30% y un +24,00% respecto del

valor de la carga última del ensayo empleado como validación del estudio paramétrico realizado por la investigadora referenciada.

- Caso de vigas híbridas, [Chacón, 2007], según en autor, se pone de manifiesto la *influencia significativa* tanto de la forma como de la amplitud de las imperfecciones geométricas iniciales, especialmente para el caso de grandes distancias entre rigidizadores transversales, donde se producen diferencias máximas en la carga obtenida de entorno al 10% de la carga última.

7. Para resumir la investigación desarrollada, la Tabla 6.3. presenta la recomendación de CONSIDERACIÓN DE IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS Y TENSIONES RESIDUALES EN LA VERIFICACIÓN DE PLACAS DE ACERO EN ALMAS DE VIGAS ARMADAS NO RIGIDIZADAS, SOMETIDAS A CARGA CONCENTRADA.

Tabla 6. 4. Recomendaciones para la consideración de imperfecciones geométricas y tensiones residuales en la verificación de placas de acero en almas de vigas armadas, no rigidizadas, sometidas a carga concentrada.

IMPERFECCIONES INICIALES	EN1993-1-5:2005 ANEXO C		PROPUESTA	
	FORMA	AMPLITUD	FORMA	AMPLITUD
Imperfecciones geométricas.	Forma de pandeo	Min (a/200, b/200).	Local, a nivel de panel. Forma de fallo.	(*) b/400 (b/100, para las secciones sobre los apoyos)
Tensiones residuales.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Se asumen incluidas en las imperfecciones geométricas equivalentes.	Patrones rectangulares de tensiones de membrana.	(**) Tracción: +f _y Compresión: -0,30·f _y

(*) Aunque el análisis paramétrico ha demostrado que se obtienen buenos resultados con las amplitudes de las imperfecciones geométricas iniciales comprendidas entre los valores de b/100 y b/800, ajustados a la curva tensión deformación de los ensayos, dada la importante sensibilidad del modelo de viga armada sometida a carga concentrada a la variación en la amplitud de las imperfecciones geométricas iniciales y la inclusión o no de las tensiones residuales, se recomienda emplear las tolerancias de fabricación de estructuras de acero máximas recomendadas en el *Annex L1 “Geometrical tolerances - Essential tolerances”* de la norma de ejecución de estructuras de acero, para paneles rigidizados, [prEN1090-2:2004], **siendo “b” dimensión de la placa correspondiente al canto de la viga.**

(**) La introducción de tensiones residuales en los modelos para el cálculo con el MEF, en combinación con las imperfecciones geométricas iniciales, proporciona siempre valores

menores de carga máxima que los modelos sin tensiones residuales, salvo situaciones excepcionales como las presentadas en el apartado 5.3.2. Sin embargo, en todos los casos investigados en los que se han empleado valores de las imperfecciones geométricas iniciales iguales o superiores a los de las imperfecciones medidas en las vigas, se han obtenido resultados satisfactorios, del lado de la seguridad, sin necesidad de considerar tensiones residuales. Por lo tanto, una amplitud de valor $b/100$, establecido en la norma de ejecución de estructuras de acero para la deformación lateral del alma sobre los apoyos, puede ser recomendada como imperfección equivalente para tener en cuenta tanto imperfecciones geométricas como tensiones residuales, con una forma igual a la forma de fallo.

NOTA: Estas recomendaciones han sido validadas únicamente con el ensayo referenciado, para otro tipo de cargas, condiciones de contorno, esbeltez del elemento estructural... estas recomendaciones podrían no ser de aplicación.

6.6. CONCLUSIONES GENERALES

Las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral se han focalizado en tres casos concretos de solicitaciones en elementos armados típicos de vigas de puentes de acero y mixtos, no obstante los resultados obtenidos permiten ofrecer unas conclusiones generales para la CONSIDERACIÓN DE LAS IMPERFECCIONES EN EL ANÁLISIS DE PLACAS DE ACERO, DE SECCIONES ARMADAS DE PUENTES DE ACERO Y MIXTOS, MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

En primer lugar, se puede afirmar que el MEF ofrece correspondencias satisfactorias entre los resultados proporcionados por los modelos y los ensayos empleados para la validación de éstos.

En cuanto a la consideración de las imperfecciones iniciales, las recomendaciones del Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006], proporcionan resultados en general satisfactorios pero que, para alguno de los casos considerados pueden ser mejorados mediante las recomendaciones de esta Tesis Doctoral.

En concreto, para el caso de cargas concentradas en vigas armadas, muy sensible a las imperfecciones iniciales, por ejemplo caso de emplearse amplitudes pequeñas, se podrían producir resultados que sobreestimarían la carga última. Para este caso, se recomienda el empleo de una forma de la imperfección geométrica inicial basada en la forma de fallo y amplitudes del orden de las tolerancias de fabricación previstas.

Se ha observado que el impacto de la imperfección geométrica inicial en la disminución de carga última resultante de los modelos del MEF es importante en el caso de carga concentrada y prácticamente despreciable en el caso de la viga solicitada a cortante puro.

En cuanto a las tensiones residuales, no se considera necesario la introducción de un patrón real, ya que los resultados con el patrón simplificado empleado en esta Tesis Doctoral, basado en una distribución rectangular de tensiones de membrana, se obtienen resultados correctos.

En todos los casos estudiados, el empleo de tensiones residuales combinadas con imperfecciones geométricas iniciales, proporciona valores de la carga última inferiores a modelos con iguales imperfecciones geométricas pero sin consideración de tensiones residuales.

Finalmente, la adopción de unas imperfecciones iniciales equivalentes que incluyan tanto las imperfecciones geométricas iniciales como las tensiones residuales se considera una opción aceptable, no obstante es posible ofrecer valores alternativos a los actualmente incluidos en el Anexo C del Eurocódigo 3 Parte 1-5, [EN1993-1-5:2006], mediante una adecuada calibración que contemple tanto las tolerancias de fabricación como las tensiones residuales resultantes de los trabajos de soldadura.

6.7. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Las investigaciones de la Tesis Doctoral se han desarrollado sobre casos muy concretos pero permiten establecer una serie de conclusiones generales, no obstante, se han identificado trabajos de investigación adicionales imprescindibles para conseguir unas recomendaciones para la consideración de las imperfecciones en el análisis de placas de acero mediante el MEF de mayor alcance.

Por ejemplo, es necesario acotar las amplitudes de las imperfecciones geométricas iniciales para los casos de carga concentrada, dada su elevada sensibilidad al valor de la amplitud de la imperfección geométrica inicial.

Además, de forma general, la sensibilidad de los modelos frente a las imperfecciones geométricas iniciales es más pronunciado en el rango de esbelteces intermedias, en aquellos casos en los que la tensión crítica de la placa y el límite elástico del acero son similares. Por lo tanto, es muy interesante abordar investigaciones y análisis paramétricos en los rangos de esbelteces intermedios, para acotar las amplitudes introduciendo el parámetro de la esbeltez.

Consideración especial merece el caso de la sollicitación de cortante, que se podría considerar prácticamente insensible al valor de la imperfección inicial en caso de sollicitación de cortante puro, pero es necesario soportar adecuadamente esta afirmación con evidencias experimentales y numéricas.

Para finalizar, el empleo de nuevos aceros de altos límites elásticos, la introducción de secciones híbridas de acero y las nuevas estrategias y tipologías de rigidizadores en la rigidización de las placas de acero para puentes de acero y mixtos, proporcionan nuevas vías de investigación para el desarrollo de nuevas recomendaciones para la correcta consideración de las imperfecciones iniciales en los análisis mediante el MEF.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. [ACHE, 2006] Asociación Científico – técnica del Hormigón Estructural (2006). “Comprobación de un tablero mixto. Comisión 5”. Grupo de Trabajo 5/3 “Puentes Mixtos”, 2006. Madrid, España.
2. [AISI, 1996] American Iron and Steel Institute (1996). “*Specification for the design of cold formed steel structural members*”. American Iron and Steel Institute. Washington, D. C., U. S. A.
3. [Arcelor, 2004] Arcelor Sections Comercial (2004). “*Programa de ventas. Vigas, perfiles y comerciales*”. Luxemburgo.
4. [Arcelor, 2007] Arcelor Long Commercial S.A. (2007). “*Buildings and Bridges with Rolled Shapes in Grade 460 HISTAR*” (Presentación en MS Power Point para divulgación). Luxembourg.
5. [Argüelles, 2005] Argüelles Álvarez, R., Argüelles Bustillo, R, Arriaga, F., Argüelles, J. M., Atienza, J. R. (2005). “*Estructuras de acero. Cálculo*”. Bellisco. Ediciones técnicas y científicas. Madrid, España.
6. [Bernabeu, 2004] Bernabeu Larena, Jorge (2004). “*Tesis Doctoral: Evolución tipológica y estética de los puentes mixtos en Europa*”. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Madrid, España.
7. [Boissonnade, 2007a] Boissonnade, N.; Degee, H. (2007). “*Background Document to Work Package 1.2 - Numerical and code aspects. COMBRI project, RFCS Contract RFS-CR-03018, Document COMBRI-Report-ULIEGE-001*”. Universidad de Liege, Belgium.
8. [Boissonnade, 2007b] Boissonnade, N.; Degee, H. Naumes, J.; Oppe, M. (2007). “*Experimental and numerical investigations for I-girders in bending and shear stiffened by trapezoidal stiffeners*”. Advanced Steel Construction, international journal. (Enviado, actualmente en revision)
9. [Boissonnade, 2007c] Boissonnade, N.; Degee, H. Naumes, J.; Oppe, M. (2006). “*Experimental and numerical investigations for I-girders in bending and shear stiffened by trapezoidal stiffeners*”. ICMS 2006 Conference, Brasov, Romania.
10. [Bryan, 1891] Bryan, G. H. (1891). “*On the stability of a plane plate under thrust in its own plane with applications to the buckling of the sides of a ship*”. Proceedings London Mathematics Society, vol. 22, p. 54. London, U.K.
11. [BSK, 1999] Boverket (1999). “*Stålkonstruktioner, BSK 99*”. Sweden.

12. [CEE, 1957] CEE, Comunidad Económica Europea (1957). *“Tratado constitutivo de la Comunidad Económica Europea”*. CEE, Roma, Italia.
13. [Chacón, 2007] Chacón Flores, R., Mirambell Arrizabalaga, E., Real Saladrigas, E. (2007). “Algunas consideraciones sobre la resistencia de vigas armadas híbridas de acero ante cargas concentradas”. *Hormigón y Acero*, N° 245, 3er Trimestre 2007.
14. [Chica, 2007a] Chica, J. A.; Braun, B.; Degée, H.; Gozzi, J.; Naumes, J.; Oppe, M. (2007). *“Evaluation and comparison of the imperfection data with regard to tolerances allowed in the material and product codes”*. COMBRI project, RFCS Contract RFS-CR-03018, Document COMBRI-Report-LABEIN-003, 2007
15. [Chica, 2007b] Chica, J. A.; Rey, F.; Espiga, F.; Grijalvo, J.; Uria, G. *“Geometrical imperfections and residual stresses for the verifications of steel plated components for bridges based in Finite Element Methods of analysis”*. COMBRI project, RFCS Contract RFS-CR-03018, Document COMBRI-Report-LABEIN-001, 2007.
16. [Chica, 2007c] Chica, J. A.; Rey, F. (2007). *“Collection and evaluation of existing experimental and numerical results from previous research projects as well as literature”*. COMBRI project, RFCS Contract RFS-CR-03018, Document COMBRI-Report-LABEIN-002, 2007.
17. [COMBRI, 2003] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2003). *“COMBRI: Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures. Contract RFS-CR 03018”*. RFCS, Brussels, Belgium.
18. [COMBRI, 2004a] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2004). *“COMBRI: Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures. Six-monthly Report. Period of Reference: 01/09/03 – 31/12/03”*. RFCS, Brussels, Belgium.
19. [COMBRI, 2004b] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2004). *“COMBRI: Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures. Six-monthly Report. Period of Reference: 01/01/04 – 30/06/04”*. RFCS, Brussels, Belgium.
20. [COMBRI, 2005a] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2005). *“COMBRI: Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures. Mid-term Report. Period of Reference: 01/09/03 – 31/12/04”*. RFCS, Brussels, Belgium.
21. [COMBRI, 2005b] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2005). *“COMBRI: Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures. Six-monthly Report. Period of Reference: 01/01/05 – 30/06/05”*. RFCS, Brussels, Belgium.
22. [COMBRI, 2006a] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2006). *“COMBRI: Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures. Six-monthly Report. Period of Reference: 01/07/06 – 31/12/05”*. RFCS, Brussels, Belgium.
23. [COMBRI, 2006b] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2006). *“COMBRI: Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures. Six-monthly Report. Period of Reference: 01/01/06 – 30/06/06”*. RFCS, Brussels, Belgium.

24. [COMBRI, 2007] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2007). *"COMBRI: Competitive steel and composite bridges by innovative steel plated structures. Final Report. Period of Reference: 01/09/03 – 31/08/06"*. RFCS, Brussels, Belgium.
25. [COMBRI⁺, 2007] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2007). *"COMBRI⁺: Valorisation of knowledge for competitive steel and composite bridges"*. Contract RFS2-CT-2007-00031. RFCS, Brussels, Belgium.
26. [Crespo, 2001] Crespo Rodriguez, P. (2001). *"Verification of a composite bridge deck according to the Spanish RPX code and Eurocode 4. Comparative analysis"*. Third International Meeting on Composite Bridges, pp. 479-496, 2001. Madrid, Spain.
27. [CTE, 2006] Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda con la colaboración del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. CSIC (2006). *"CTE: Código Técnico de la Edificación"*. Madrid, España.
28. [Davaine, 2004] Davaine, L., Raoul, J., Aribert J.M. (2004). "Patch loading resistance of longitudinally stiffened bridge girders". Proceedings of the conference Steelbridge 2004. Millau, France.
29. [Detzel, 2006] Detzel, Annette (2006). *"Zum Gesamtstabilitätsversagen geschweißter Rechteckquerschnitte unter Druckbelastung"*. Institut für Konstruktion und Entwurf, Stahl-, Holz- und Verbundbau. Universität Stuttgart. Stuttgart, Deutschland.
30. [DIN, 103] DIN (2003). *"DIN-Fachbericht 103: Stahlbrücken"*. Deutschland.
31. [DIN, 2000] DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. (2000). *"Beneficios económicos de la normalización. Resumen de resultados: reporte final y ejemplos prácticos"*. DIN, Traducción al español realizada por ICONTEC, Colombia.
32. [DIN, 18800-3] DIN (1990). *"DIN18800-3: Stahlbau; Stabilitätsfälle; Plattenbeulen"*. Deutschland.
33. [Dubas, 1986] Dubas, P., Gehri, E., eds. 1986. *"Behaviour and design of steel plated structures"*. CECM.
34. [EAE, 2004] Comisión Permanente de Estructuras de Acero del Ministerio de Fomento (2004). *"Documento 0 de la Instrucción EAE: Instrucción de Estructuras de Acero"*. Madrid, España.
35. [EC, 2003] EC, European Commission (2003). *"Guidance paper L (concerning the construction products directive - 89/106/eec): Application and use of Eurocodes"*. EC, Brussels, Belgium.
36. [EC, 1989] EC, European Commission (1988) *"The Construction Products Directive"* Council Directive 89/106/EEC of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products (89/106/EEC) (OJ L 40, 11.2.1989, p.12). EC, Brussels, Belgium.
37. [ECCS, 1976] European Convention for Constructional Steelwork (1976). *"Manual of on stability of steel structures "*. ECCS, Brussels, Belgium.

38. [ECCS, 1977] European Convention for Constructional Steelwork (1977). "*Stability of steel structures. Final Report. Second International Colloquium, Liege 13th – 15th April 1977*". ECCS, Brussels, Belgium.
39. [ECCS, 2006] European Convention for Constructional Steelwork (2006). "*Rules for Member Stability in EN1993-1-1: Background documentation and design guidelines*". ECCS, Brussels, Belgium.
40. [EN 1993-1-1: 2005] CEN, European Committee for Standardisation (2005). "*EN 1993-1-1: 2005. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*". CEN, Brussels, Belgium.
41. [EN 1993-1-5: 2006] CEN, European Committee for Standardisation (2006). "*EN 1993-1-5: 2006. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-5: Plated Structural Elements*". CEN, Brussels, Belgium.
42. [EN 1993-2: 2006] CEN, European Committee for Standardisation (2006). "*EN 1993-2: 2006. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 2: Steel bridges*". CEN, Brussels, Belgium.
43. [ENV 1090-1: 1997] CEN, European Committee for Standardisation (1997). "*ENV 1090-1: Ejecución de estructuras de acero. Reglas generales y reglas para edificios*". CEN, Brussels, Belgium.
44. [ENV 1090-5: 1999] CEN, European Committee for Standardisation (1999). "*ENV 1090-5: Ejecución de estructuras de acero. Reglas suplementarias. Reglas para puentes y estructuras de placas*". CEN, Brussels, Belgium.
45. [EN 10051: 1991] CEN, European Committee for Standardisation (1991). "*EN 10051: Tolerancias dimensionales para chapas y bobinas laminadas en calientes*". CEN, Bruselas, Bélgica.
46. [Euler, 1744] Euler, Leonhard (1744). "*De curvis elasticis*". Of his book "*Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes*", Lausanne and Geneva, Switzerland.
47. [Faulkner, 1975] Faulkner, D. (1975). "*A review of effective plating for use in the analysis of stiffened plating in bending and compression*". Journal of ship research, 19 (1): 1-17.
48. [Feldmann, 2007] Feldmann, M.; Naumes, J.; Oppe, M.; Boissonnade, N.; Degee, H.; Maquoi, R. (2007) "*Experimental and numerical investigations for I-girders in bending and shear stiffened by closed trapezoidal stiffeners*". IABSE 2007 Conference. Weimar, Germany.
49. [Frieze, 1975] Frieze, P. A., Dowling, P. J., Hobbs, R. E. (1975). "*Parametric study of plates in compression*". CESLIC Rep. B-G. 39, Imperial College, University of London. London, U.K.
50. [Galambos, 1998] Theodore V. Galambos (1998). "*Guide to stability design criteria for metal structures*". Fifth Edition. Willey & Sons, New York, U.S.A.
51. [Gozzi, 2007] Gozzi, J.; Clarin, M.; Johansson, B. (2007). "*Test Report on patch loading of girders with varied loading length*". COMBRI project, RFCS Contract RFS-CR-03018, Document COMBRI-Report-LTU-001, 2007.

52. [Grondin, 1998] Grondin, G.Y., Chen, Q., Elwi, A.E. and Cheng, J.J. (1998). *“Stiffened Steel Plates Under Compression and Bending”*. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 45 No. 2, pp. 125-148.
53. [Hibbit, 1994] Hibbit, Karlsson and Sorensen (1994). *“ABAQUS/Standard, Version 5.4”*. Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc.
54. [HighStrength, 2001] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2001). *“Application of high strength steel plates to welded components for ships and bridges subjected to medium/high loads. Contract N° 7210-PR/253”*, (01/07/2001-30/06/2004). RFCS, Brussels, Belgium.
55. [Höglund, 1981] Höglund, T. (1981). *“Design of thin plate I-girders in shear and bending with special reference to web buckling”* (in Swedish). Bulletin No.94 of the Division of Building Statics and Structural Engineering, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
56. [HOLLOW, 2000] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (2000). *“HOLLOW: Design rules for cold formed structural hollow sections. Contract N° 7210-PR/253”*, (01/07/2000-30/06/2003). RFCS, Brussels, Belgium.
57. [IAP, 1998] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (1998). *“IAP. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera”*. Madrid, España.
58. [IABSE, 2005] IABSE, International Association for Bridge and Structural Engineering (2005). *“Structural Engineering Documents 8. Use and application of high-performance steels for steel structures”*. IABSE-AIPC-IVBH, Zürich, Switzerland.
59. [Johansson, 2007] Johansson, B., Maquoi, R., Sedlacek, G., Müller, C., Beg, D. (2007). *“Commentary and worked examples to en 1993-1-5, plated structural elements”*. Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. European Commission Joint Research Centre. Luxembourg.
60. [Komatsu, 1983a] Komatsu, S., Niwa, Y., Watanabe, E. (1983). *“Statistical study on imperfections of steel webs”*. ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 109, N° 2, February, 1983.
61. [Komatsu, 1983b] Komatsu, S., ASCE, M., Kitada, T. (1983). *“Statistical study on compression butt-welded plate”*. ASCE; Journal of Structural Engineering, Vol. 109, N° 2, February, 1983.
62. [Kuhlmann, 2008] Kuhlmann, Ulrike (2008). *“Design of composite beams according to Eurocode 4-1-1: Ultimate Limit States”*. EUROCODES Background and Applications “Dissemination of information for training” workshop 18-20 February 2008, Brussels, Belgium.
63. [LTB, 1999] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (1999). *“Lateral torsional buckling in steel and composite beams. Contract N° 7210-PR/183”*, (01/09/1999-31/08/2002). RFCS, Brussels, Belgium.
64. [Manterola, 2003] Manterola Armisen, Javier (2003). *“New proposals in steel bridges and footbridges”*. Proc. 5th International Symposium on Steel Bridges, Barcelona, March 5-7, 2003. European convention for Constructional Steelwork, ECCS. Brussels, Belgium.

65. [Martínez Calzón, 1978] Martínez Calzón, J., Ortiz Herrera, J. (1978). *“Construcción mixta. Hormigón – acero”*. Editorial Rueda. Madrid, España.
66. [Martínez Calzón, 1995] Martínez Calzón, J. MC 2 Estudio de Ingeniería S.L. (1995). *“Strict box composite bridges. A new design of the optimum use of composite typology”*. Proceedings of the 12th Annual International Bridge Conference, 1995. Pittsburgh, U.S.A.
67. [Martínez Cutillas, 2001] Martínez Cutillas, Antonio (2001). *“Aplicación de los métodos generales de cálculo no lineal al estudio de los puentes mixtos”*. Proceedings of the 3rd International Meeting on Composite Bridges. (Martínez Calzón, J. ed.), pp. 234-261, Madrid, España.
68. [Millanes, 2001] Millanes Mato, F; IDEAM, S.A. (2001). *“Comparative analysis of double composite action launched solutions and prestressed solutions in high speed railway viaduct”*. Proceedings of the 3rd International Meeting on Composite Bridges. (Martínez Calzón, J. ed.), pp. 383-404, 2001. Madrid, España.
69. [Millanes, 2003] Millanes, F., Pascual, J.; IDEAM, S.A. (2003). *“The viaduct across the “Arroyo de las Piedras” in the high speed line between Córdoba and Málaga: An innovative solution for the first high speed line steel concrete composite bridge in Spain”*. Proc. 5th International Symposium on Steel Bridges, Barcelona, March 5-7, 2003. European convention for Constructional Steelwork, ECCS. Brussels, Belgium.
70. [Millanes, 2006] Millanes Mato, IDEAM, S.A. (2006). Construir en acero los puentes de luces medias. http://www.apta.com.es/pdf/Jornada%202004/francisco_millanes.pdf. Asociación para la Promoción Técnica del Acero, APTA, 2006, Madrid, España.
71. [Millanes, 2007] Millanes Mato, Francisco, Pascual Santos, Javier y Ortega Cornejo, Miguel; IDEAM, S.A. (2007). *“Viaducto “Arroyo las Piedras” Primer viaducto mixto de las Líneas de Alta Velocidad Españolas”*. Hormigón y Acero N^o 243, 1.er Trimestre 2007, Madrid, España.
72. [Naumes, 2007] Naumes, J.; Oppe, M. (2007). *“Test Report - Shear Buckling Tests”*. COMBRI project, RFCS Contract RFS-CR-03018, Document COMBRI-Report-RWTH-001, 2007.
73. [Paik, 2003] Paik, J.K. and Thayamballi, A.K. (2003). *“Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures”*. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, England.
74. [prEN1090-2: 2004] CEN, European Committee for Standardisation (2004). *“prEN1090-2: 2004: “Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for the execution of steel structures — Stage 34”*. CEN, Brussels, Belgium.
75. [prEN 1994-1-1: 2003] CEN, European Committee for Standardisation (2003). *“prEN 1994-1-1: 2003. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”*. CEN, Brussels, Belgium.
76. [prEN 1994-2: 2003] CEN, European Committee for Standardisation (2003). *“prEN 1994-2: 2003. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 2: Rules for bridge”*. CEN, Brussels, Belgium.

77. [EN10002-1: 2001] CEN, European Committee for Standardisation (2001). *“EN10002-1: 2001: Metallic materials – Tensile testing – Method of test at ambient temperature”*. CEN, Brussels, Belgium.
78. [RPM-95] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (1996). *“RPM. Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras”*. Madrid, España.
79. [RPX-95] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (1996). *“RPX. Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras”*. Madrid, España.
80. [RPM-RPX, 2000] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2000). *“Manual de aplicación de las recomendaciones RPM-RPX/95”*. Madrid, España.
81. [Rui-Wamba, 2003] Rui-Wamba, J.; ESTEYCO, S.A. (2003). *“The Spanish contribution to design and construction of steel bridges”*. European convention for Constructional Steelwork, ECCS. Brussels, Belgium. Proc. 5th International Symposium on Steel Bridges. Barcelona, March 5-7, 2003, Spain.
82. [S460, 1999] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (1999). *“Use of high strength steel S460”. Final Report. Period of Reference: 01/07/1996– 30/06/1999”*. Contract N° 7210-SA/129. RFCS, Brussels, Belgium.
83. [S&MSpans, 1998] RFCS, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel (1998). *“Composite bridge design for small and medium spans. Contract N° 7210-PR/113”*, (01/07/1998-03/06/2001). RFCS, Brussels, Belgium.
84. [Tessler, XXXX] A, Tessler, D. W., Sleight, J. T., Wang (XXXX). *“Nonlinear shell modelling of thin membranes with emphasis on structural wrinkling”*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
85. [Timoshenko, 1961] Timoshenko, S. P, Gere, J. M. (1961). *“Theory of elastic stability”*. McGraw-Hill Book company, INC. New York, U.S.A.
86. [UNE-ENV 1990: 2002] AENOR Asociación española de Normalización y Certificación (2003). *“EUROCÓDIGO 0: Bases de cálculo de estructuras”*. Madrid, España.
87. [UNE-ENV 1993-1-1: 1996] AENOR Asociación española de Normalización y Certificación (1996). *“EUROCÓDIGO 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación”*. Madrid, España. Será anulada en 2008 por la UNE EN 1993-1-1.
88. [UNE-EN 10079: 1994] AENOR Asociación española de Normalización y Certificación (1994). *“Definición de los productos de acero”*. Madrid, España.
89. [Viñuela, 1992] Viñuela, L. (1992). *“Recomendaciones para el proyecto de puentes de acero”*. Manuales sobre la construcción con acero de la Empresa Nacional Siderúrgica, S.A., ENSIDESA. Madrid, España.
90. [von Kármán, 1932] von Kármán, T., Sechler, E. E., Donnell, L. H. (1932). *“Strength of thin plates in compression”*. *Trans. A.S.M.E.*, vol. 54, No. APM-54-5, p. 53.
91. [Winter, 1947] Winter, G. (1947). *“Strength of thin steel compression flanges”*. *Trans. A.S.C.E.*, vol. 112, p. 527.

92. [Winter, 1950] Winter, G., Lansing, W., McCalley, R. B. (1950). "*Four papers on the performance of thin walled steel structures*". Eng. Exp. Strn. Rep. No. 33, Cornell University, Ithaca, N.Y., pp. 27-32, 51-57. New York, U.S.A.
93. [Schmidt, 2002] Schmidt, H., Winterstetter, Th. A. (2002). "*Stability of circular cylindrical steel shells under combined loading*". Thin-Walled Structures, 2002. No. 40, pp. 893-909.

