Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

TESIS DE MÁSTER

Máster

Máster en Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

Estudio de ductilidad en elementos metálicos tubulares sometidos a flexo-compresión

Autor

Berríos Pestana, Carlos Eduardo

Tutor

Chacón Flores, Rolando

Intensificación

Tecnología y Construcción de Estructuras

Fecha

Junio de 2016

Estudio de ductilidad en elementos metálicos tubulares circulares sometidos a flexo-compresión

Resumen

En este estudio se presenta el análisis del comportamiento estructural de 1760 pilares metálicos tubulares de sección circular (CHS) bajo solicitaciones de compresión y desplazamiento de cabeza. El objetivo principal es valorar la respuesta estructural y ductilidad de los pilares sometidos a un desplazamiento en uno de sus apoyos variando sus aspectos geométricos y mecánicos mediante un estudio paramétrico. De tal manera las solicitaciones totales a las cuales estarán sometidos los elementos a analizar en el estudio representan el escenario de pilares cargados a axil en situación de servicio sometidos a desplazamiento de cabeza en situación accidental.

El análisis del comportamiento estructural se realiza con el uso de una herramienta de análisis por elementos finitos (Simulia - Abaqus CAE 6.12) incluyendo en el análisis el comportamiento no lineal del material y de la geometría; dicho análisis se realiza sobre un grupo de pilares generado a partir de la variación de parámetros geométricos, mecánicos y de solicitaciones, que permiten abarcar un abanico de posibilidades reales y representativas a las cuales pueden estar sometidos. De tal manera se analizan los resultados obtenidos para determinar la ductilidad de los elementos estudiados en función de los parámetros modificados durante el estudio, de igual manera se analizan los posibles modos de fallo, el ángulo de la rama post-agotamiento, la influencia de la clasificación seccional y el comportamiento del conjunto de elementos CHS, logrando generar conclusiones y expresiones de cálculo que permitan a los proyectistas predecir la capacidad última de un pilar para una configuración paramétrica conocida.

Ductility study of Steel circular hollow section elements subjected to bending-compression action

Summary

This study presents the analysis of the structural behavior in steel circular hollow section pillars (CHS) under bending-compression action. The main objective is to estimate the structural response of compressed elements subjected to a transversal displacement on its top, considering a variation on its geometrical and mechanical properties. In that way the total of actions to be applied in the elements would be the compression forces in serviceability and an accidental top displacement; which represents the state of solicitations that can be presented in a common pillar.

The analysis of the structural behavior is made using a finite element analysis software (Simulia - Abaqus CAE 6.12), including the nonlinear response of the material and the geometry; such analysis is made on a group of pillars generated with the combination of different geometrical, mechanical and action parameters, that allows encompassing a broad spectrum of real possibilities that can be seen during a pillar design.

In such way the obtained results are analyzed in order to determine the ductile capacity of the structural elements as a function of the defined parameters. In the same way the failure modes, the influence of the transversal section classification and the overall behavior of the CHS elements are analyzed, allowing the achievement of conclusions and expressions that let the designers to predict the ultimate load displacement.

Agradecimientos

La investigación presentada en este documento se enmarca en el ámbito del trabajo final de mi master en Ingeniería Estructural y de la Construcción, de la Universidad Politécnica de Cataluña; en él se resume, sin necesidad de mostrarse explícitamente, una parte de mi vida de grandes sacrificios y esfuerzos, que para mí dan mayor peso y valor a cada palabra escrita en este documento, y que representan un escalón más en mi historia profesional, uno de los más exigentes hasta ahora.

De tal manera hago saber mi más profundo y sincero agradecimiento a cada una de las personas que de alguna manera u otra lograron aportarme algo positivo que me ayudó a mantenerme en el camino para alcanzar esta meta.

Agradezco ampliamente al Dr. Rolando Chacón, por mostrarme una filosofía de trabajo, investigación y de hacer ingeniería a uno de los niveles más avanzado en este arte; su aporte, acompañamiento y apoyo fueron fundamentales para la estructuración, análisis y desarrollo de esta investigación.

Agradezco especialmente a mi familia, a los que les debo mis mayores éxitos, sin ellos no hubiera podido llegar al punto de escribir estas palabras, ni llegaría a los lugares a donde me llevará mi carrera profesional.

Gracias a todos.

Barcelona, Junio de 2016

Índice

I. Índice de figuras 8
II. Índice de tablas 10
III. Índice de ecuaciones 11
1 INTRODUCCIÓN 13
1.1 Introducción 13
1.2 Objetivos 14
1.3 Metodología 15
1.4 Alcance 16
2 ESTADO DEL ARTE 17
2.1 Introducción 17
2.2 Pilares metálicos tubulares circulares (CHS). 18
2.3 Antecedentes 18
2.4 Valor estético 31
3 ESTUDIO PARAMÉTRICO 34
3.1 Aspectos generales 34
3.1.1 Geometría de los elementos CHS 34
3.1.2 Comportamiento estructural de los elementos CHS 35
3.1.3 Otros aspectos de los elementos CHS 40
3.1.4 Acero Estructural 41
3.1.5 Criterios de evaluación de comportamiento estructural 43
3.1.6 Clasificación de secciones transversales 45
3.2 Esquema Estructural 47
3.2.1 Planteamiento del grupo de elementos 47
3.2.2 Validación del grupo de elementos 49
3.2.3 Condiciones de contorno. 52
3.2.4 Material 52
4 MODELIZACIÓN NUMÉRICA 54
4.1 Elementos Finitos 54
4.2 Mallado 55
4.3 Análisis RIKS 57
4.3.1 Colapso Inestable y Análisis Post-Pandeo 57
4.4 Scripting 60
4.4.1 Scripting de Abaqus 61
4.5 Macros 63

4.5.1 Macros de Abaqus 64
4.5.2 Macros de Excel/Visual Basic 65
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS 67
5.1 Planteamiento del análisis 67
5.2 Mecanismo de fallo 69
5.2.1 Flexo-compresión 69
5.2.2 Flexión 72
5.3 Influencia de parámetros 77
5.3.1 Influencia de t 77
5.3.2 Influencia de L 79
5.3.3 Influencia de $\%N_{PL}$ 81
5.3.4 Influencia de f_y 83
5.4 Comportamiento general de subgrupos de elementos CHS 85
5.5 Ductilidad de subgrupos de elementos CHS para clases 1 y 4 87
5.6 Comportamiento de subgrupos de elementos CHS en función de f_y 88
5.6.1 Longitud de 4000 mm 89
5.6.2 Longitud de 6000 mm 90
5.6.3 Longitud de 8000 mm 91
5.6.4 Longitud de 10000 mm 92
5.7 Elemento CHS $90\%N_{PL}$ 94
6 CONCLUSIONES 97
7 REFERENCIAS 99

I. Índice de figuras

Fig. 1. Curva de M_y/M_{PL} y deflexión. (Kiymaz, 2005). 21
Fig. 2. Equipo para ensayo de flexo-compresión. 22
Fig. 3. Comparación de ensayo de laboratorio con modelo numérico. 23
Fig. 4. Desarrollo de momento plástico en función del axil de compresión aplicado. 25
Fig. 5. Comparación de métodos CSM y EN 1993-1-4. 26
Fig. 6. Elemento en Cantilever. (Lanhui Guoa, 2013). 27
Fig. 7. Curva V – Deflexión en elementos Cantilever. (Lanhui Guoa, 2013). 28
Fig. 8. Elementos Cantilever. (a) DT100-3. (b) DT100-4. (Lanhui Guoa, 2013). 28
Fig. 9. (a) DT200-1. (b) DT200-2. (c) DT200-2. (d) DT300-2. (Lanhui Guoa, 2013). 29
Fig. 10. Aeropuerto de Barajas Terminal 4. (Brajovic, 2013). 31
Fig. 11. Kings Station, Londres. (Bortoluzzi, 2012). 32
Fig. 12. Turbina eólica-Nueva Zelanda. (METAEFFICIENT, s.f.). 32
Fig. 13. Terminal 1, aeropuerto de Stuttgart. (gmp, 2014). 33
Fig. 14. Curvas europeas de pandeo (EN, 2005). 37
Fig. 15. Líneas de flujo en secciones abiertas y CHS. (ITEA, 2014). 40
Fig. 16. Resistencia y Ductilidad vs porcentaje de carbono en aceros. 42
Fig. 17. Diagrama Carga-Desplazamiento y criterio de ductilidad. 44
Fig. 18. Diagrama Carga-Desplazamiento y criterio de ángulo α. 45
Fig. 19. Momento – Rotación para distintas clases. (Ministerio de Fomento, 2012). 46
Fig. 20. Distribución (%) de clases en los elementos CHS. 50
Fig. 21. Curva de σ-ϵ con comportamiento elasto – plástico perfecto. 53
Fig. 22. Elementos finitos Shell S4 y S3. 54
Fig. 23. Elemento CHS, vista general del mallado y modelo. 56
Fig. 24. Elemento CHS, modelo de elementos finitos y sección longitudinal. 57
Fig. 25. Elemento CHS, Empotramiento - placa base. 57
Fig. 26. Carga proporcional con respuesta inestable. (Simulia, 2012). 58
Fig. 27. Interfaz gráfica de usuario (GUI). 61
Fig. 28. Organización del grupo de elementos CHS. 62
Fig. 29. Script/Subrutina de Abaqus. 63
Fig. 30. Segmento de macro base en Abaqus. 64
Fig. 31. Segmento de macro modificada en Abaqus, contador y directorio. 65
Fig. 32.Segmento de macro base en Abaqus, nombre del reporte. 65
Fig. 33.Segmento de macro modificada en Abaqus, nombre del reporte con contador. 65
Fig. 34. Segmento de macro base en EXCEL. 66
Fig. 35. Segmento de macro base en EXCEL, contador y directorio. 66
Fig. 36. Segmento de macro base en EXCEL, nombre de hojas. 66
Fig. 37. Segmento de macro base en EXCEL, nombre de hojas con contador. 66
Fig. 38. Diagrama Carga - desplazamiento, L6000275 t=40mm 50%N_{PL}. 69
Fig. 39. Evolución de las tensiones de Von Mises, flexo - compresión. 70
Fig. 40. Desviación de tensiones de compresión. 71
Fig. 41. Distribución de tensiones en el fallo, incremento (f).. 72
Fig. 42. Clasificación seccional (L6000275, t=15-80mm). 73
Fig. 43. Deformada Clase 4 vs Clase 1. 73
Fig. 44. Deformada y flujo de tensiones (Clase 4). 74

Fig. 45. Deformada y flujo de tensiones (Clase 1). 75
Fig. 46. Apertura de zona afectada en secciones Clase 4 y Clase 1. 76
Fig. 47. Carga-desplazamiento (t). 77
Fig. 48. δ_3/δ_1 vs t. 77
Fig. 49. α vs t. 77
Fig. 50. Carga-desplazamiento (L). 79
Fig. 51. δ_3/δ_1 vs L. 79
Fig. 52. α vs L. 79
Fig. 53. Carga-desplazamiento (%N_{PL}). 81
Fig. 54. δ_3/δ_1 vs (%N_{PL}). 81
Fig. 55. α vs %N_{PL}. 81
Fig. 56. Recuperación de deformación plástica. 82
Fig. 57. Carga-desplazamiento (f_y). 83
Fig. 58. δ_3/δ_1 vs $f_{y.}$ 83
Fig. 59. α vs f_y. 83
Fig. 60. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α, (D/t/ε). 86
Fig. 61. Ductilidad de subgrupos para las clases 1 y 4. 87
Fig. 62. Comportamiento general de subgrupos. 88
Fig. 63. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α (D/t/ε) – L4000. 89
Fig. 64. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α (D/t/ε) – L6000. 90
Fig. 65. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α (D/t/ε) – L8000. 91
Fig. 66. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α (D/t/ε) – L10000. 92
Fig. 67. δ_3/δ_1 vs D/t/ϵ a 90%N_{PL} (L, f_y). 94

II. Índice de tablas

Tabla 1. Especímenes y esbelteces. (Kiymaz, 2005).....19
Tabla 2. Propiedades mecánicas en probetas. (Kiymaz, 2005). 20
Tabla 3. Resumen de resultados. (Kiymaz, 2005). 20
Tabla 4. Dimensiones de especímenes de ensayo. 23
Tabla 5. Caracterización de materiales utilizados. 23
Tabla 6. Materiales del estudio paramétrico. 24
Tabla 7. Dimensiones CHS. (Lanhui Guoa, 2013). 27
Tabla 8. Propiedades del material. (Lanhui Guoa, 2013). 27
Tabla 9. Capacidad a flexión de los elementos. (Lanhui Guoa, 2013). 30
Tabla 10. Investigaciones recientes. (Lanhui Guoa, 2013). 30
Tabla 11. Coeficientes β para el cálculo de la longitud crítica de pandeo. 36
Tabla 12. Curvas europeas de pandeo de acuerdo con los procesos de fabricación. 37
Tabla 13. Resistencia torsional de varios tipos de secciones transversales. 39
Tabla 14. Aceros y sus correspondientes valores f_y y f_u. 42
Tabla 15. Longitudes de elementos CHS. 47
Tabla 16. Espesores de elementos CHS. 47
Tabla 17. Calidades de acero de elementos CHS. 48
Tabla 18. Parámetros para el estudio de elementos CHS. 48
Tabla 19. Desplazamientos de compresión (%N_{PL}). 49
Tabla 20. Clasificación de secciones transversales. 50
Tabla 21. Valores del coeficiente de reducción χ para las secciones CHS. 51
Tabla 22. Tipo de elementos Shell - Abaqus. 55
Tabla 23. Ajuste de mallado seleccionado para los modelos estructurales. 56
Tabla 24. Parámetros establecidos para el análisis RIKS. 60
Tabla 25. Valores de ε. 67
Tabla 26. Clases en función de t (f_y=275). 78
Tabla 27. Criterios de clasificación de secciones. 84
Tabla 28. Clasificación de secciones del elemento L6000 t=40mm. 84
Tabla 29. Expresiones de diseño (90%N_{PL}). 95

III. Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Ramberg-Osgood. (NASA, 1965). 20
Ecuación 2. Excentricidad de axil de compresión. 24
Ecuación 3. Inercia CHS. 34
Ecuación 4. Módulo elástico CHS. 34
Ecuación 5. Módulo plástico CHS. 34
Ecuación 6. Espesor de chapa. 34
Ecuación 7. Área de Sección CHS. 34
Ecuación 8. Radio de giro. 34
Ecuación 9. Capacidad de sección transversal (Squash Load). 35
Ecuación 10. Carga y Longitud crítica de pandeo. 36
Ecuación 11. Esbeltez mecánica. 36
Ecuación 12. Resistencia de cálculo a pandeo del elemento comprimido. 38
Ecuación 13. Coeficiente de reducción para el modo de pandeo considerado. 38
Ecuación 14. Expresión para el cálculo de Φ. 38
Ecuación 15. Esbelteces adimensionales en función del tipo de clase. 39
Ecuación 16. Criterio de ductilidad. 44
Ecuación 17. Desplazamiento de compresión. 49
Ecuación 18. Deformación unitaria 49
Ecuación 19. Carga total RIKS. (Simulia B. , 2012). 59
Ecuación 20. Incremento inicial RIKS. (Simulia B. , 2012). 59
Ecuación 21. Relación paramétrica. 67
Ecuación 22. Cortante para M_{PL}. 80
Ecuación 23. Rigidez de elemento a cortante. 82
Ecuación 24. Expresión de diseño, desplazamiento último. 95
Ecuación 25. Cálculo de δ_1. 95

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

A lo largo de la historia de la ingeniería estructural, se ha hecho uso de secciones, piezas y elementos en donde una determinada geometría y material permiten usos óptimos y provechosos; es el caso de los pilares metálicos de sección tubular. Parte del uso generalizado de estos elementos en la ingeniería estructural se debió a la rápida compresión de sus excelentes propiedades y comportamiento ante efectos de inestabilidad global y esfuerzos de compresión, torsión y flexión; lo cual permite que sean utilizados como soportes para sistemas estructurales. Un ejemplo de la longevidad de este tipo de elementos en el sector de la construcción es el uso del bambú como pieza estructural.

Seleccionar un perfil de acero para su uso estructural está sujeto a varios factores, entre los que cabe destacar: propiedades mecánicas, estética, costes de fabricación, transporte, recubrimiento y mantenimiento, precio unitario del material, entre otros. Por tal razón es de gran importancia que los profesionales involucrados en la selección de elementos estructurales comprendan profundamente el comportamiento de estos perfiles para su correcto aprovechamiento, ya que el diseño es un proceso interactivo entre los requerimientos funcionales y arquitectónicos y los aspectos de resistencia y fabricación; de tal manera, un buen diseño es aquel en el que todos estos aspectos se pueden considerar en equilibrio. (Wardenier, 2010).

También es de gran importancia que los resultados y análisis permitan obtener conclusiones y herramientas de uso práctico que permitan agilizar los procesos de diseño en un mercado profesional exigente y de rápida evolución; es por esta razón que herramientas desarrolladas hace algunas décadas han evolucionado y han sido popularizadas entre los ingenieros para lograr tal fin; es el caso de la programación y el análisis por elementos finitos, a través de los cuales se amplía el potencial de estudio de elementos estructurales, logrando realizar diseños más eficientes, todo unido al crecimiento exponencial de la capacidad de procesamiento y cálculo computacional, y al desarrollo de modernas herramientas de asistencia ingenieril por ordenador (CAE - computer aided engineering).

Vincular estas herramientas para generar procesos de diseño que permitan mejorar la comprensión del comportamiento estructural de los elementos, los criterios de diseño y la eficiencia estructural, es una tendencia en la ingeniería actual y en donde este estudio pretende contribuir, específicamente en el diseño de pilares metálicos circulares huecos, a partir de este punto llamados **elementos CHS (Circular Hollow Section)**, sometidos a flexo-compresión.

1.2 Objetivos

A continuación se muestran los objetivos del presente estudio:

Objetivos generales

- Análisis de la ductilidad de elementos CHS, generados a través de un estudio paramétrico, y sometidos a axiles de compresión y desplazamiento de cabeza.
- Estudio del comportamiento a flexo-compresión de los elementos CHS.
- Generar expresión de cálculo que permita estimar la ductilidad de elementos CHS para una configuración paramétrica conocida.

Objetivos específicos

- Revisión de bibliografía relativa a elementos CHS y su comportamiento estructural.
- Definir los parámetros geométricos y mecánicos para la generación de un grupo de elementos CHS representativo de condiciones de diseño reales.
- Realizar un análisis elástico lineal del grupo de elementos para calcular la carga axil de compresión que origina la plastificación del material (Squash Load – N_{PL}) y la verificación del estado límite último de inestabilidad para garantizar la no inclusión de este efecto en el estudio.
- Realizar un análisis no lineal (RIKS) con una hipótesis de material elasto-plástico perfecto utilizando el software (Simulia - Abaqus CAE 6.12) y Scripts/Subrutinas en lenguaje Python para automatizar el proceso de modelado estructural y obtención de datos según la variación paramétrica definida para cada caso de estudio.
- Obtención y representación de resultados del comportamiento estructural utilizando Scripts/Subrutinas en lenguaje Visual Basic (VBA) para generar curvas de carga-desplazamiento en función de los diferentes parámetros considerados, gráficos de dispersión de datos en función de la clasificación de subgrupos, y curvas de ductilidad y ángulo de rama post-agotamiento para representar el comportamiento del conjunto de elementos CHS.
- Analizar la respuesta estructural de los elementos CHS en función de los parámetros seleccionados, la tendencia en la respuesta dúctil y ángulo de rama post-agotamiento en cada caso y globalmente, así como los posibles modos de fallo para esbelteces extremas.
- Obtención de relaciones gráficas y/o analíticas que permitan estimar de manera fiable la ductilidad, carga última y desplazamiento asociado para un elemento CHS ante esfuerzo de flexo-compresión, conociendo los parámetros geométricos y mecánicos que lo definen.

1.3 Metodología

Se analizó la respuesta estructural de 1760 pilares, mediante un método que sigue las siguientes indicaciones:

- Revisión y análisis de la literatura reciente y relevante sobre el comportamiento no lineal de secciones tubulares sometidas a esfuerzos de compresión, flexión o combinados. Con el objeto de obtener un marco de referencia para el presente estudio y poder valorar los resultados obtenidos.

- Propuesta preliminar de la geometría de los elementos CHS a analizar, la cual será posteriormente verificada para mantener la respuesta estructural de los pilares dentro de los objetivos y alcances de este estudio. Para la definición geométrica se tienen en cuenta los parámetros más relevantes que condicionan las propiedades mecánicas seccionales y globales de los pilares, siendo estos el espesor de chapa (t), calidad de acero (f_y), diámetro (D) y longitud (L). El espesor será determinado por los valores de uso comercial, ya que se pretende mantener los elementos generados dentro de un rango de geometrías razonables y posibles, de igual manera ocurre con la calidad del acero. Por otro lado, el diámetro y longitudes a seleccionar estarán en función de conservar la mayor parte de la respuesta estructural libre de efectos de inestabilidad global, por lo que se evitará relaciones de esbeltez que puedan derivar en pandeo global de los elementos y en la correspondiente disminución de sus capacidades seccionales.

- Los esfuerzos aplicados sobre la estructura serán de flexión y compresión, y junto a los descritos en el punto anterior, son los últimos parámetros a considerar para el estudio. La compresión se presentará en cada configuración geométrica de los pilares en forma de un porcentaje de la capacidad seccional total de cada elementos CHS ($\%N_{PL}$), mientras que la flexión será generada por un desplazamiento de cabeza de magnitud variable, dicha variación corresponde al método análisis escogido y explicado más adelante, por lo que el desplazamiento de cabeza al ser una variable controlada por el método de análisis no formará parte de la matriz de parámetros que genere el grupo de elementos a analizar.

- El estudio se realizará mediante análisis por elementos finitos asistido por ordenador, para el cual se deberá modelar cada elemento del grupo definido incluyendo cada parámetro involucrado en el estudio, así como las condiciones de contorno, para ello se hará uso del software Abaqus CAE 6.12. Sin embargo, es impráctico la generación manual de un grupo tan grande de elementos, por lo que se utilizará la definición de Scripts/Subrutinas en lenguaje Python que permitan generar la totalidad de modelos estructurales de los elementos CHS a partir de la matriz de parámetros seleccionados. Los modelos obtenidos serán organizados en función del parámetro con menor cantidad de valores, en este caso la longitud o la calidad de acero, generando subgrupos y haciendo más sencilla la posterior presentación de resultados.

- Los modelos ya definidos serán ejecutados en modo CMD de Windows para la obtención de los resultados del post-proceso en cada modelo estructural de elementos CHS, de los cuales se obtendrán los valores de reacciones y desplazamientos haciendo uso de macros definidas internamente en el software Simulia Abaqus CAE 6.12. De igual manera se utilizarán macros de Excel VBA (Visual Basic) para gestionar esos resultados y generar curvas que permitan estudiar el comportamiento de la respuesta estructural.

- Se analizará la influencia de cada variable del estudio paramétrico en el comportamiento de la ductilidad de los elementos CHS, la tendencia de la ductilidad y ángulo de rama post-agotamiento de los subgrupos en función de la relación $D/t/\varepsilon$, así como los posibles mecanismos de fallo para casos extremos de esbeltez (máxima y mínima).

- Finalmente se establecen expresiones de cálculo con enfoque de diseño, que permitan estimar la ductilidad de un elemento CHS conociendo su configuración paramétrica.

1.4 Alcance

El presente estudio se enfoca únicamente en elementos CHS de acero estructural, por lo que queda excluido de este trabajo los siguientes aspectos:

- Pilares metálicos de sección tubular no circular.
- Pilares metálicos rigidizados.
- Estudio de las uniones de los elementos para garantizar el comportamiento de empotramiento en los extremos.
- Pilares rellenos de hormigón (CFT).
- Determinación de los límites de esbelteces para la clasificación seccional de elementos CHS según los posibles estados tensionales.

Así como las siguientes indicaciones con carácter limitativo en el estudio paramétrico:

- El estudio se basa en aceros de grados S235 hasta S460, excluyendo aceros de grado superior.
- Los parámetros que se considerarán en el estudio serán únicamente el desplazamiento de cabeza, carga axil de compresión, espesor de chapa, calidad de acero y longitud total del elemento.
- El estudio considera esbelteces tales que la inestabilidad global no afecte la capacidad seccional de los elementos CHS.
- El comportamiento de la curva tensión-deformación del material es elasto-plástico perfecto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

El comportamiento estructural de un elemento depende fundamentalmente del material y la geometría de éste, ya que esta última va a condicionar la distribución de tensiones internas ante esfuerzos externos, la capacidad y respuesta global.

La correcta selección de la geometría del elemento va a permitir a los proyectistas alejarse o acercarse a un mayor aprovechamiento del material utilizado, lo cual se traduce en una disminución de todos los costos que implica su reducción, como: transporte, montaje, longitudes de soldadura, tamaño de uniones, maquinaria a utilizar, cantidad de recubrimiento o pintura, entre otros.

Una limitante a la hora de aprovechar la resistencia de un material es su cambio de comportamiento de lineal a no lineal en la curva de tensión-deformación, lo que dificulta la predicción de la respuesta estructural para estados de esfuerzos que soliciten al elemento por encima de su límite elástico de tensión. Muchas veces el diseño se limita a mantenerse dentro del régimen elástico para simplificar los cálculos y permitir obtener resultados de manera más expedita, habilidad de gran valor en los procesos de diseño, sin embargo esto conlleva la aceptación del desprecio de parte de la capacidad resistente del material, lo que da lugar a elementos sobredimensionados y a todos los costos que esto implica, por lo que a medida que el mercado se ha hecho más exigente y las herramientas computacionales más eficientes, los ingenieros han podido avanzar en la generación de métodos prácticos de análisis no lineal que permiten ajustar las estructuras a las necesidades reales.

Una herramienta de gran utilidad y confiabilidad es el análisis por elementos finitos asistido por ordenador, a través del cual se logra la discretización de sistemas estructurales en partes de dimensiones mucho más pequeñas, lo cual permite el cálculo y la posterior visualización del flujo tensional en el material de una manera próxima al comportamiento real, que por métodos manuales sería prácticamente imposible de realizar. El nivel de exactitud y precisión en este tipo de simulaciones, más la gran capacidad de procesamiento computacional actual, permiten sustituir los ensayos de laboratorio por una cantidad mucho mayor de modelos numéricos que representen el fenómeno de estudio, con lo que se puede obtener información de interés o modificar parámetros para nuevos estudios con gran rapidez.

En el presente capítulo se presentarán algunas investigaciones realizadas por otros autores para analizar la capacidad y ductilidad de los elementos CHS ante distintos tipos de esfuerzos, valoración de los usos y ventajas de las secciones tubulares, así como el cuerpo teórico en el que se basa el posterior análisis estructural de este estudio.

2.2 Pilares metálicos tubulares circulares (CHS).

Los elementos CHS presentan un comportamiento ventajoso debido a su geometría regular alrededor de su eje, lo que permite un buen desempeño ante esfuerzos de torsión y una capacidad de respuesta estructural igual indiferentemente del lado de aplicación de la carga. Además, las secciones tubulares presentan una ventaja de durabilidad al aislar el interior de agentes ambientales que pueden activar procesos de corrosión y desgaste de la estructura.

La fabricación de perfiles tubulares tuvo que superar el establecimiento y consolidación en la manufacturación de los perfiles tradicionales laminados en calientes, en I, en L y en U, durante la revolución industrial, hasta llegar a métodos de fabricación que permitieran su producción, empezando con la sección tubular rectangular en 1952 (por Stewarts & Lloyds en el Reino Unido) (Wardenier, 2010).

El proceso de fabricación de las CHS puede dividirse en dos grandes grupos, uno en donde el perfil se genera a partir de un bloque de acero extruido o trefilado para generar un elemento tubular sin soldadura y el otro mediante el doblado de una lámina de acero (roll-forming) y soldadura de sus bordes.

2.3 Antecedentes

Durante los últimos años varios estudios de investigación han sido realizados para contrastar los resultados obtenidos con los criterios de diseño en normativas de uso internacional como la AISC y Eurocódigo, así como para estimar con mayor precisión la respuesta estructural de elementos tubulares metálicos ante diferentes tipos de esfuerzos.

En estos estudios se pueden observar dos tendencias importantes, los elementos CHS y CFT (Concrete Filled Tube) (Schneider, 1998). Ambos casos son de interés investigativo ya que las prestaciones estructurales y posteriores condiciones de diseño están sujetas al esquema estructural analizado, con lo que se justifica profundizar los estudios para encontrar una tendencia fiable en los resultados para los distintos planteamientos estructurales. Se puede destacar que las investigaciones actuales para elementos CHS se enfocan principalmente en aspectos relativos al comportamiento con aceros de alta resistencia y aceros inoxidables, los aceros de alta resistencia son cruciales para el futuro de las estructuras de acero, debido al potencial en la reducción de peso de los elementos (Ummenhofer, 2014). Sin embargo los aceros de alta resistencia presentan menor ductilidad con lo que también se ha tenido la necesidad de verificar la esbeltez mínima que pueden tener los componentes que forman la sección del elemento para evitar problemas por abolladura local, Desde que el precio del acero está en aumento, se requieren elementos con secciones más esbeltas. Cuando se trata de optimizar la chapa de estos elementos, aparece que el uso de aceros de alta resistencia está restringido debido a esbelteces de chapa altas. (Ummenhofer, 2014).

Por otro lado los aceros inoxidables son estudiados por sus prestaciones resistentes ante ambientes corrosivos, lo que permite evitar la necesidad de recurrir a recubrimientos especiales que eleven el costo de diseño; la valoración de este material en elementos tubulares es de gran importancia para estructuras off-shore y torres eólicas, en donde la

exposición y el ambiente determinan la durabilidad del material y por lo tanto la respuesta estructural con el paso del tiempo.

Un estudio a destacar es el realizado por Guven Kiymaz en el 2004 en el laboratorio de ingeniería de estructuras del Imperial College, Londres. Donde analizó la respuesta estructural a flexión de elementos CHS divididos en dos grupos de diferentes aceros inoxidables (304 y Duplex2205), El grado 304 es uno de los aceros inoxidables más comunes y definido como el acero austenítico estándar, el cual provee una buena combinación de resistencia a la corrosión, conformado y fabricación. Duplex2205 es la designación usada en UK, la correspondiente en US es UNS S31803 (Kiymaz, 2005), y con distintas relaciones de diámetro y espesor de chapa para cada uno de los elementos. Con el fin de evaluar la influencia de la esbeltez en la capacidad última del elemento estructural, así como las zonas de plastificación e inestabilidad local. La relación D/t al aumentar implica mayor esbeltez en la chapa que conforma el elementos CHS lo que puede llevar a problemas de abolladura, sin embargo hay que considerar también la longitud total del elemento, ya que si se mantiene constante y aumenta la esbeltez D/t se produce una disminución en la inercia de la sección y el radio de giro, con lo que disminuye el axil crítico y se observarían modos de fallo diferentes, activados por inestabilidad global del elemento y/o abolladura de la chapa.

El estudio fue realizado buscando generar sólo esfuerzos de flexión, para lo cual una carga fue aplicada en la mitad de la longitud del elemento e incrementada de manera constante hasta alcanzar el fallo, tanto las imperfecciones iniciales como el comportamiento mecánico del material alterado por el proceso de conformado en frio fueron considerados. A continuación se muestran las relaciones de esbeltez y resistencia utilizadas en los especímenes del estudio.

Specimen	Slenderness (D/t) (F_y/E)
TB01	0.173
TB02	0.269
TB03	0.272
TB04	0.204
TB05	0.137
TB06	0.150
TB07	0.219
TB08	0.162

Tabla 1. Especímenes y esbelteces. (Kiymaz, 2005).

La caracterización del material se realizó fijando la tensión del material para distintos niveles de deformación en un ensayo de tracción, *Las propiedades tomadas del proceso de ensayo de tensión-deformación fueron Rp0.01, Rp0.2, Rp1.0, Rm, E y n (valores de tensión para varios niveles de deformación, módulo de elasticidad inicial e índice de no linealidad)* (Kiymaz, 2005). El índice de no linealidad n permite tener una estimación del nivel de no

linealidad del material, y junto al valor K, son constantes que describen el endurecimiento plástico del material y que permiten calcular a través de la ecuación de Ramberg-Osgood el comportamiento de la curva de tensión-deformación en el entorno no lineal. *Una simple formula es sugerida para describir la curva de tensión-deformación en términos de tres parámetros: el módulo de elasticidad y dos límites elásticos secantes* (NASA, 1965)*;* Las propiedades mecánicas de los materiales usados se muestran en la siguiente tabla junto con la expresión de cálculo para la estimación del comportamiento no lineal:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + K\left(\frac{\sigma}{E}\right)^{n}$$

Ecuación 1. Ramberg-Osgood. (NASA, 1965).

Specimen	E_0 (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_{p1.0}$ (MPa)	$R_{p0.01}$ (MPa)	R_m (MPa)	n
TB01, 103.0×1.50	204,000	469	554	228	783	4.33
TB02, 153.0×1.50	201,000	458	547	247	800	4.91
TB03, 203.0×1.50	200,000	375	434	231	744	6.33
TB04, 219.0×2.00	201,000	337	404	185	623	5.03
TB05, 114.3×3.05	204,000	643	703	368	836	5.37
TB06, 168.3×3.40	200,000	602	686	348	811	5.47
TB07, 219.1×2.50	200,000	598	664	385	824	7.01
TB08, 219.1×3.76	200,000	560	638	318	782	5.29

Tabla 2. Propiedades mecánicas en probetas. (Kiymaz, 2005).

Los resultados obtenidos por Guven Kiymaz en los ensayos de los distintos especímenes se muestran a continuación en la tabla 3:

Specimen	Slenderness (D/t) (F_y/E)	Peak load (kN)	Remarks on failure mode
TB01	0.173	17.4	Central inwards bulge in compression portion
TB02	0.269	35.8	Central inwards bulge in compression portion
TB03	0.272	46.6	Outward bulge in compression portion adjacent to loading point collar
TB04	0.204	74.2	Outward bulge in compression portion adjacent to loading point collar
TB05	0.137	58.6	Central plastic hinge without visible cross-section distortion
TB06	0.150	162.0	Central inwards bulge in compression portion
TB07	0.219	162.7	Bearing failure underneath loading point collars
TB08	0.162	277.6	Outward bulge in compression portion adjacent to loading point collar

Tabla 3. Resumen de resultados. (Kiymaz, 2005).

Se puede observar que los elementos con la mayor relación $(D/t)(f_y/E)$ (TB03 y TB04) presentan el comportamiento menos dúctil con respecto a los otros elementos. Mientras que los elementos con menores relaciones $(D/t)(f_y/E)$ logran alcanzar la plastificación sin pérdida de su capacidad seccional.

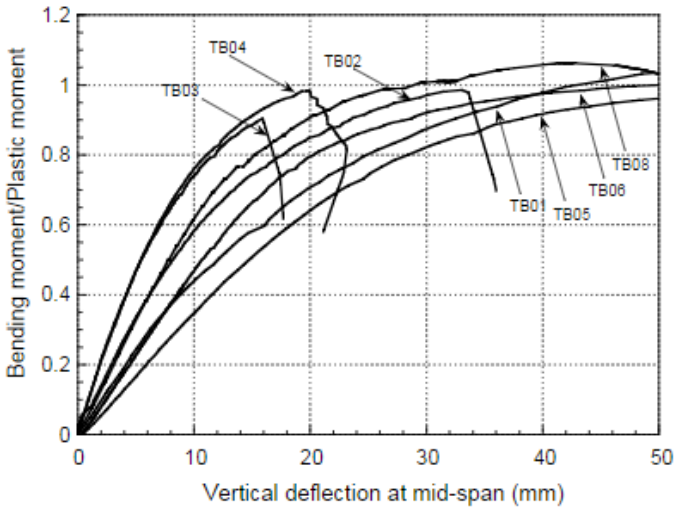


Fig. 1. Curva de M_y/M_{PL} y deflexión. (Kiymaz, 2005).

En estos tres ejemplares (TB02, TB03 y TB04) ocurre abolladura del elemento, aquellos donde las esbelteces eran altas, perdiendo capacidad resistente. Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que se puede alcanzar el momento plástico para la mayoría de los elementos ensayados y sus distintas esbelteces, *la esbelteces seleccionadas permitieron generar distintos modos de fallo desde rotulas plásticas sin abolladura local apreciable hasta abolladura local elasto-plástica de la chapa* (Kiymaz, 2005). Sin embargo las esbelteces que permitieron alcanzar la capacidad seccional de los elementos son mayores a las máximas sugeridas por las normas Europeas/Australianas y ASCE 8-02; con lo que se fortalece la necesidad de mantener líneas de investigación de estos elementos sometidos a este y otros esfuerzos, para consolidar el entendimiento de su respuesta estructural y mejorar los criterios de diseño.

La investigación de Ou Zhao, Leroy Gardner, Ben Young desarrollada conjuntamente entre el departamento de ingeniería civil y ambiental del Imperial College London, y el departamento de ingeniería civil de la universidad de Hong Kong, plantea el análisis del desempeño estructural de elementos CHS de acero inoxidable sometidos a esfuerzos combinados de compresión y flexión. La justificación de ampliar el entendimiento de la respuesta estructural utilizando acero inoxidable deviene de la reducción de costo de mantenimiento e inspección que este material implica a lo largo de la vida útil de la estructura, a pesar de presentar un mayor coste inicial, lo que lo hace competitivo al considerar el ciclo de vida del proyecto; así como la limitada cantidad de investigaciones realizadas sobre estos elementos considerando esfuerzos combinados, *para la fecha, no han habido investigaciones en el comportamiento de la sección circular hueca (CHS) de acero inoxidable sometida a esfuerzos combinados de compresión y momento flector, y por esto es el tema del presente estudio* (Zhao, Gardner, & Young, Structural performance of

stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part1: Experiments and numerical modelling, 2016).

El método utilizado por Ou Zhao, Leroy Gardner, Ben Young, incluye el ensayo de elementos CHS de acero inoxidable sometidos a esfuerzos combinados de axil de compresión y momento flector, seguido de un estudio numérico en donde el modelo de elemento finitos es validado comparando sus resultados con los ensayos de laboratorio realizados, para posteriormente realizar un estudio paramétrico y evaluar con los datos obtenidos la exactitud de las indicaciones de diseño actuales de los códigos: American specification SEI/ASCE-8 y Australia/ New Zealand standard AS/NZS 4673. Además, se plantea la mejora de las consideraciones de diseño de los elementos CHS sometidos a esfuerzos combinados, utilizando el método de resistencia continua "continuous strength method" (CSM) basado en la deformación. A continuación se presenta la disposición del equipo y espécimen para la ejecución de los ensayos

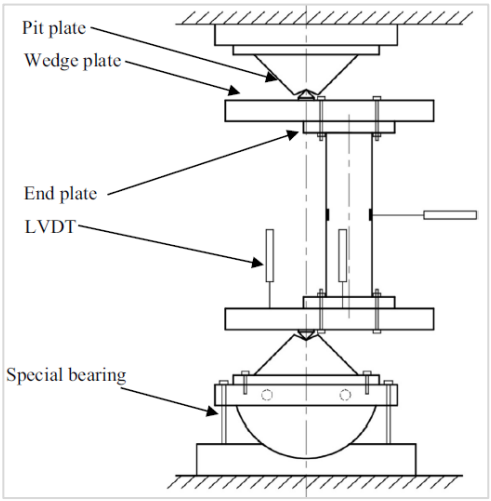


Fig. 2. Equipo para ensayo de flexo-compresión.

Los especímenes utilizados para la experimentación incluyen cuatro secciones transversales CHS: CHS 60.5 x 2.8 (Clase 1), CHS 76.3 x 3 (Clase 1), CHS 114.3 x 3 (Clase 2) y CHS 139.4 x 3 (Clase 3), clasificadas de acuerdo a la especificación EN 1993-1-4, todas de acero inoxidable austenítico grado EN 1.4301 (AISI 304). Los ensayos incluyen cuatro especímenes sometidos a compresión pura y veinte cargados excéntricamente para generar esfuerzo combinado de compresión y momento flector. A continuación en la tabla 4 y tabla 5 se muestran los especímenes utilizados y las propiedades del material. Los especímenes seleccionados son los suficientemente cortos para evitar fenómenos de inestabilidad global, pero lo suficientemente largos para incluir patrones de imperfección geometría local y tensiones residuales por el proceso de conformado en frio.

Cross-section	L (mm)	D (mm)	t (mm)	A (mm^2)
CHS 60.5 × 2.8	200.2	60.40	2.78	503.2
CHS 76.3 × 3	240.0	76.42	2.98	687.5
CHS 114.3 × 3	360.1	114.52	2.89	1013.5
CHS 139.4 × 3	434.8	139.80	2.92	1255.7

Tabla 4. Dimensiones de especímenes de ensayo.

Cross-section	E	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{1.0}$	σ_u	ε_u	ε_f	R–O coefficient		
	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	n	$n'_{0.2,1.0}$	$n'_{0.2,u}$
CHS 60.5 × 2.8	190	355	396	780	47	55	5.3	2.4	1.9
CHS 76.3 × 3	195	302	347	784	48	56	7.3	2.0	1.9
CHS 114.3 × 3	187	290	324	799	45	53	7.8	1.7	1.6
CHS 139.4 × 3	188	323	361	757	52	60	4.9	2.2	1.8

Tabla 5. Caracterización de materiales utilizados.

Los análisis de la primera parte de la investigación Ou Zhao, Leroy Gardner, Ben Young permitieron demostrar la capacidad de los modelos de elementos finitos desarrollados en replicar los resultados, curvas carga-desplazamiento y modos de fallo local de los especímenes ensayados, como se puede observar en la Fig 3, con lo que se pudo realizar el estudio paramétrico de los elementos CHS de acero austenítico inoxidable conformados en frio sometidos a esfuerzos combinados de compresión y momento flector.

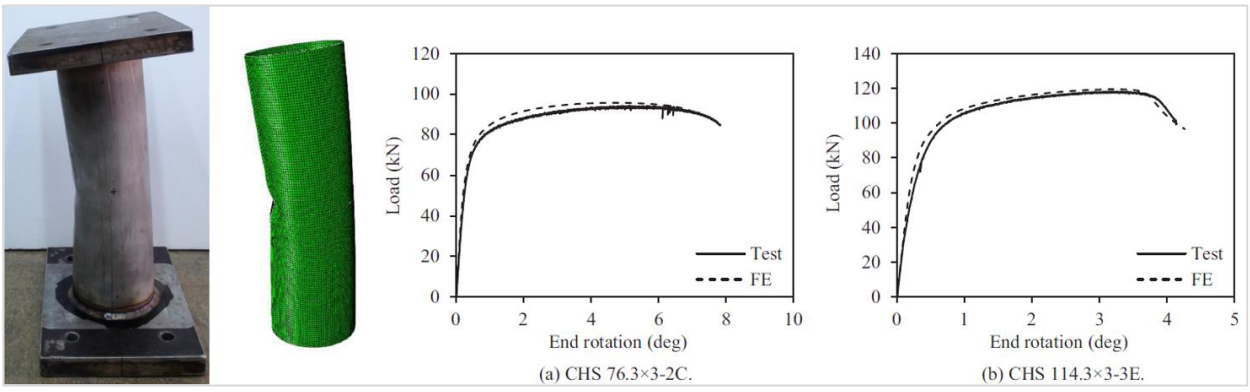


Fig. 3. Comparación de ensayo de laboratorio con modelo numérico.

De esta manera, el estudio se amplió en una segunda parte para cubrir un rango mayor de materiales, tabla 6, esbelteces de secciones transversales y combinaciones de carga. *En términos de las dimensiones geométricas de las secciones circulares huecas modeladas, el diámetro exterior D es variado entre 40 mm y 150 mm, mientras que la sección transversal de espesor t varía de 0,7 mm a 10 mm. Las resultantes relaciones* $D/t\varepsilon^2$ *varían entre 15 y*

88, cubriendo secciones transversales de Clases 1-3, según los límites de esbeltez en EN1993-1-4 (Zhao, Gardner, & Young, Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part 2: Parametric studies and design, 2016). Se consideró una longitud de elemento, igual para cada espécimen, con valor de tres veces el diámetro externo; la excentricidad fue definida con la expresión de la ecuación 2, se determinaron los coeficientes n, $n`_{0.2,\ 1.0}$ y $n`_{0.2,\ u}$ para representar el comportamiento no lineal del material y su endurecimiento por deformación mediante la ecuación 1 de Ramberg–Osgood (NASA, 1965), se incluyeron las correspondientes imperfecciones en el elemento y la variación de excentricidad de aplicación de esfuerzo de compresión, *oscilado entre 2 mm y 600 mm, lo que lleva a una amplia gama de condiciones de carga. En total, se generaron 472 elementos, incluyendo 182 para el acero inoxidable austenítico, 145 para el acero inoxidable dúplex y 145 para el acero inoxidable ferrítico, los cuales son analizados y discutidos en las siguientes secciones* (Zhao, Gardner, & Young, Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part 2: Parametric studies and design, 2016).

Grade	E	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{1.0}$	σ_u	ε	R–O coefficient		
	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		n	$n'_{0.2,1.0}$	$n'_{0.2,u}$
Austenitic	195	302	347	784	0.85	7.3	2.0	1.9
Duplex	199	519	578	728	0.65	5.3	2.8	3.7
Ferritic	190	466	508	515	0.68	6.6	7.6	7.6

Tabla 6. Materiales del estudio paramétrico.

$$\varepsilon = \sqrt{(235/\sigma_{0.2})(E/210,\ 000)}$$

Ecuación 2. Excentricidad de axil de compresión.

Ya que la presente tesina utiliza acero ferrítico como material para el estudio de la ductilidad de elementos CHS sometidos a esfuerzos de flexo-compresión, y basa la clasificación seccional en los límites de esbeltez establecidos en Eurocódigo, sólo los resultados de la investigación de Ou Zhao, Leroy Gardner, Ben Young asociados a dicho material y código de diseño serán presentados a continuación.

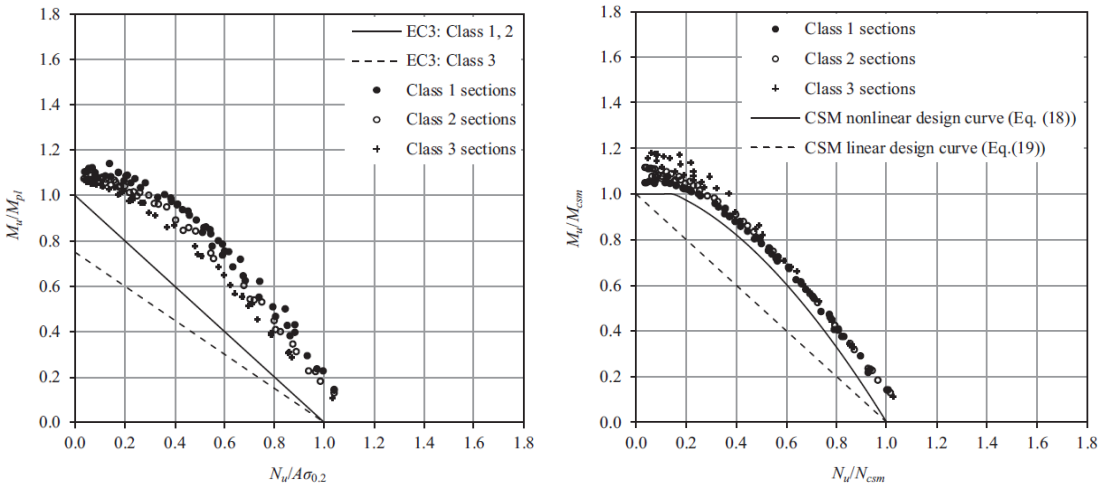


Fig. 4. Desarrollo de momento plástico en función del axil de compresión aplicado.

La investigación de Ou Zhao, Leroy Gardner, Ben Young, en su segunda parte, permite observar el carácter conservador de las consideraciones de diseño de Eurocódigo sobre el comportamiento de las secciones transversales CHS, según clasificaciones de sección transversal. Se puede apreciar en la Fig 4 que a medida que aumenta la carga de compresión las secciones pierden capacidad de desarrollar su momento plástico, lo que implica una reducción en la incursión en rango no lineal del elemento, aparición de fenómenos de inestabilidad local y una subsecuente disminución en la ductilidad; También se observa que para un mismo esfuerzo de compresión, la clase 1 es la que logra una mayor aproximación al momento plástico de la sección, seguida por la clase 2 y 3.

La predicción de Eurocógido en la respuesta estructural para las clases 1,2 y 3 se aleja de los datos obtenidos en el estudio paramétrico, incluso más para la clase 3, haciéndola conservadora y desaprovechando la capacidad seccional real del elemento para las distintas clasificaciones seccionales; *Esto es principalmente a la aplicación de una curva de interacción lineal y la adopción de puntos de finalización conservadores que ignoran la influencia beneficiosa del endurecimiento por deformación* (Zhao, Gardner, & Young, Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part 2: Parametric studies and design, 2016), estas consideraciones en Eurocódigo *generalmente limitan la tensión de diseño al 0.2% de la resistencia de prueba, sin considerar la predicción del pronunciado endurecimiento por deformación en secciones compactas, y omitiendo la interacción del elemento en la respuesta a inestabilidad local* (Zhao, Gardner, & Young, Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part1: Experiments and numerical modelling, 2016).

Por otro lado, en la Fig 4, se observa que la predicción de la respuesta estructural en los elementos CHS mediante el método propuesto por Ou Zhao, Leroy Gardner, Ben Young, método de resistencia continua “continuous strength method” (CSM), presenta un mejor ajuste al comportamiento de los datos obtenidos en el estudio paramétrico, con lo que se logra un mayor aprovechamiento de la capacidad seccional en comparación al previsto por Eurocódigo. Las conclusiones presentadas en esta investigación permiten replantear el enfoque del desempeño de las secciones transversales con una clasificación discreta como

la utilizada actualmente. A continuación se muestra la comparación entre los resultados obtenidos por los ensayos y modelos de elementos finitos con respecto a las predicciones de resistencia de CSM y EN 1993-1-4, esta última mostrando mayor dispersión de resultados.

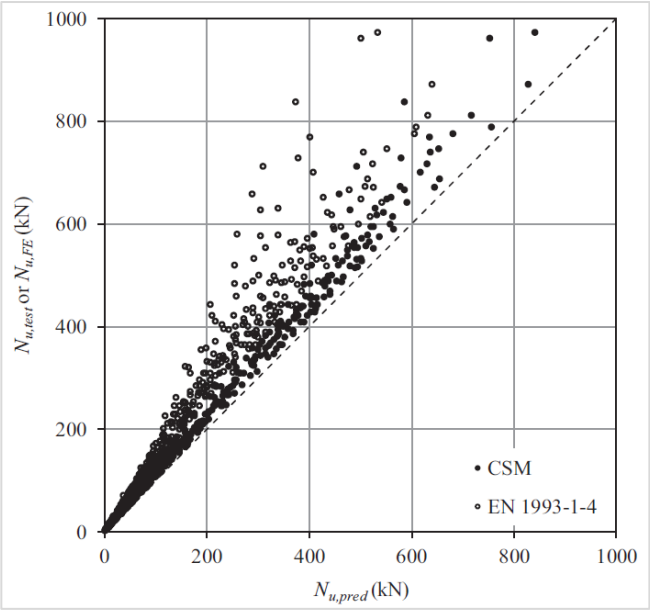


Fig. 5. Comparación de métodos CSM y EN 1993-1-4.

Otro estudio similar fue el realizado por Lanhui Guoa, Shijun Yang, Hui Jiao. Sobre el comportamiento de elementos CHS de pared delgada frente a esfuerzos de flexión, enfocado principalmente al comportamiento estructural esperado en torres de generadores eólicos, en donde las acciones sísmicas y de viento generan esfuerzos predominantes de flexión en la base del pilar, cuyo momento resistente y efectos de abolladura están vinculados de igual manera a la relación D/t. La justificación de este estudio se basa en la poca investigación realizada en este tipo de elementos sometidos a flexión, *la mayoría de investigaciones se ha enfocado en secciones circulares huecas sometidas a esfuerzo axil. Las investigaciones de secciones circulares huecas sometidas a momento flector son mucho menos extensas* (Lanhui Guoa, 2013).

En este caso los parámetros de determinación de los especímenes fueron el diámetro y el espesor de chapa; para ser sometidos a una carga incremental de flexión considerando las respectivas imperfecciones iniciales. Se incluyeron relaciones D/t mayores a 150 debido a las pocas investigaciones realizadas, *Pocas investigaciones pueden ser encontradas en la literatura para el comportamiento de las secciones circulares huecas con ratios D/t superiores a 150* (Lanhui Guoa, 2013). Sin embargo también se incluyeron esbelteces entre 75 – 150, cercanas a las utilizadas en el presente estudio. A continuación se muestran los especímenes utilizados en los ensayos de Lanhui Guoa, Shijun Yang, Hui Jiao.

No.	Se.	*D*/mm	*t*/mm	*L*/mm	*D*/*t*	Test beams
1	DT75-1	150	2.00	3000	75	Simply-supported
2	DT75-2	150	2.00	3000	75	Simply-supported
3	DT100-1	200	2.00	3000	100	Simply-supported
4	DT100-2	200	2.00	3000	100	Simply-supported
5	DT125-1	250	2.00	3600	125	Simply-supported
6	DT125-2	250	2.00	3600	125	Simply-supported
7	DT150-1	300	2.00	3600	150	Simply-supported
8	DT150-2	300	2.00	3600	150	Simply-supported
9	DT100-3	200	2.00	1500	100	Cantilever
10	DT100-4	200	2.00	1500	100	Cantilever
11	DT200-1	400	2.00	2000	200	Cantilever
12	DT200-2	400	2.00	2000	200	Cantilever
13	DT300-1	600	2.00	3000	300	Cantilever
14	DT300-2	600	2.00	3000	300	Cantilever
15	DT200-R	400	2.00	2000	200	Cantilever
16	DT300-R	600	2.00	3000	300	Cantilever

Tabla 7. Dimensiones CHS. (Lanhui Guoa, 2013).

Como se puede observar se estudiaron dos grupos bien definidos, elementos simplemente apoyados donde la carga se aplicó con cuatro puntos de apoyo para generar flexión pura en la zona central del elemento y en cantiléver, incluyendo dos elementos en el grupo de cantiléver con rigidizadores (DT300-R & DT200-R) para aumentar la capacidad estructural y controlar fenómenos de abolladura. Las relaciones de esbeltez utilizadas para los elementos en cantiléver son un poco mayores, por lo que los resultados de relevancia para el presente estudio son los de los elementos DT100-3 y DT100-4, por ser los más similares en parámetros geométricos y condiciones de contorno a los que se analizarán en capítulos siguientes.

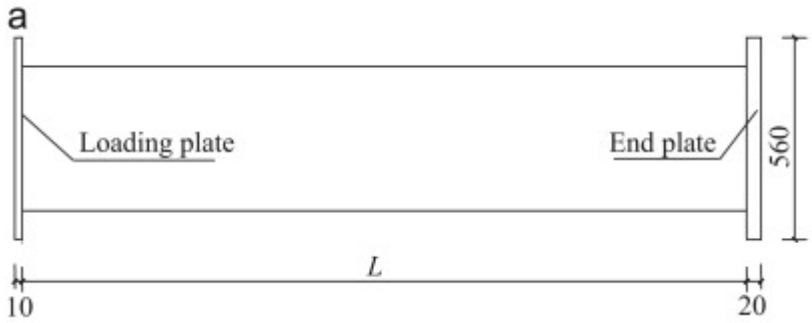


Fig. 6. Elemento en Cantilever. (Lanhui Guoa, 2013).

t/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/MPa	v	δ
2.0	190	315	1.88×10^5	0.36	0.51

Tabla 8. Propiedades del material. (Lanhui Guoa, 2013).

Los resultados obtenidos en la investigación de Lanhui Guoa, Shijun Yang, Hui Jiao, demuestran que los elementos DT100-3 y DT100-4 presentaron la menor capacidad de carga y la mayor ductilidad, como puede observarse en la Fig. 7, con un modo de fallo similar al

del elemento DT100-1, el cual corresponde al grupo de elementos simplemente apoyados y cuyo fallo ocurrió en la zona de mayor flexión y cortante, activando un mecanismo de plastificación en el panel comprimido. *En las pruebas de Cantilever, los especímenes DT100-3 y DT100-4 tenían la misma sección transversal y espesor, y sus modos de fallo fueron similares al del espécimen DT100-1.* (Lanhui Guoa, 2013).

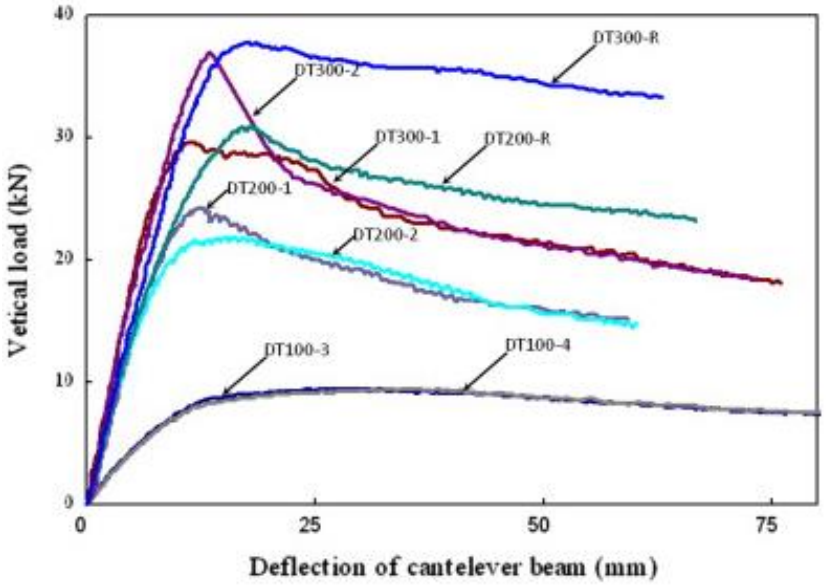


Fig. 7. Curva V – Deflexión en elementos Cantilever. (Lanhui Guoa, 2013).

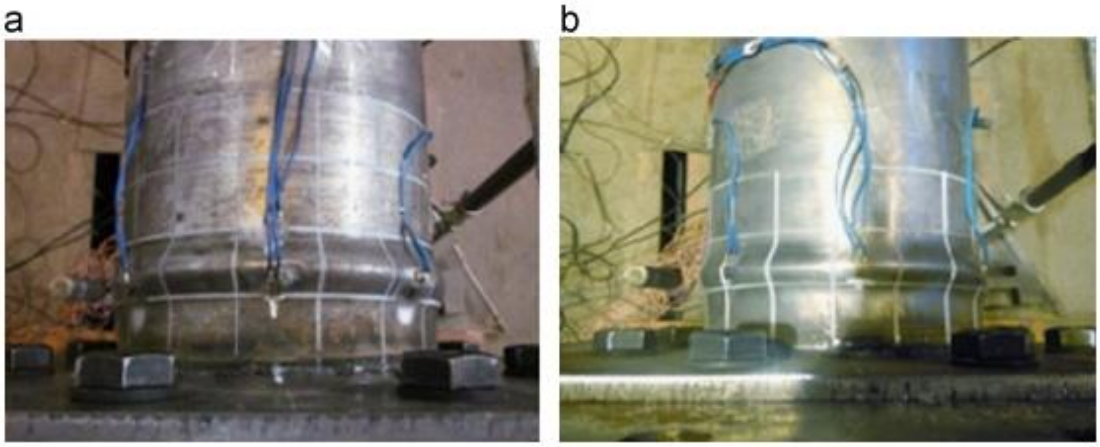


Fig. 8. Elementos Cantilever. (a) DT100-3. (b) DT100-4. (Lanhui Guoa, 2013).

Se puede observar cómo a medida que la relación D/t disminuye también lo hace la capacidad de carga a cortante del elemento pero aumenta la ductilidad, y toda la sección logra plastificar presentando una capacidad de carga estable una vez superado el límite elástico. Los modos de fallo en elementos con esbelteces en el rango de 200-300 presentaron abolladura más severa con mayor número de ondulaciones, diferenciándose en gran medida del modo de fallo de elementos de menor esbeltez como los DT100-3 y DT100-4. Con lo que se pudo concluir que a mayor D/t aumenta la presencia de estos modos de fallo frágiles con caídas violentas en la capacidad de carga y menor ductilidad, a pesar de lograr una

capacidad de carga mayor. A continuación se presentan los modos de fallo obtenidos en los elementos con grandes esbelteces.

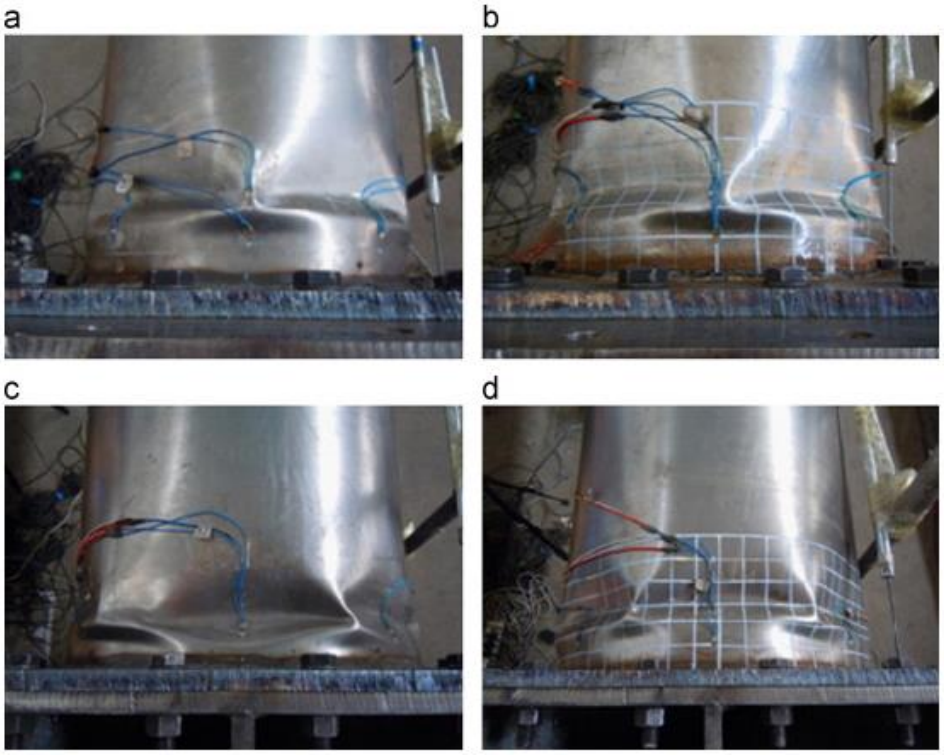


Fig. 9. (a) DT200-1. (b) DT200-2. (c) DT200-2. (d) DT300-2. (Lanhui Guoa, 2013).

También se relacionaron los resultados obtenidos entre los dos métodos de ensayo utilizados, *Los especímenes DT100-1 y DT100-2, simplemente apoyados, mostraron una capacidad a flexión similar a los especímenes en DT100-3 y DT100-4. Este resultado ilustra que ambos métodos de ensayo son viables para obtener la capacidad seccional de elementos CHS sometidos a esfuerzos de flexión. (Lanhui Guoa, 2013).* De igual manera se obtuvo la relación entre el momento elástico y plástico con el máximo alcanzado por cada elemento, para determinar qué secciones lograron plastificar y en qué porcentaje. Los resultados de estas relaciones se presentan a continuación en la tabla 9, donde se observa que en promedio la capacidad última alcanzada se estima entre 20% - 30% por encima del momento resistente elástico, dependiendo del espécimen y sus parámetros geométricos y mecánicos.

No.	Se.	λ	D (mm)	t (mm)	S (mm^3)	Z (mm^3)	M_T (kN m)	M_T/M_y	M_T/M_p
1	DT75-1	67.4	150	2	33,937	43,811	8.72	1.35	1.05
2	DT75-2	67.4	150	2	33,937	43,811	8.58	1.33	1.03
3	DT100-1	89.9	200	2	60,941	78,411	14.91	1.29	1.00
4	DT100-2	89.9	200	2	60,941	78,411	15.23	1.31	1.02
5	DT125-1	112.4	250	2	95,795	123,011	23.61	1.30	1.01
6	DT125-2	112.4	250	2	95,795	123,011	23.69	1.30	1.01
7	DT150-1	134.9	300	2	138,499	177,611	31.91	1.21	0.95
8	DT150-2	134.9	300	2	138,499	177,611	31.56	1.20	0.94
9	DT100-3	89.9	200	2	60,941	78,411	15.24	1.32	1.02
10	DT100-4	89.9	200	2	60,941	78,411	15.32	1.32	1.03
11	DT200-1	179.8	400	2	247,457	316,811	51.54	1.10	0.86
12	DT200-2	179.8	400	2	247,457	316,811	46.32	1.00	0.77
13	DT300-1	269.8	600	2	559,573	715,211	115.67	1.09	0.85
14	DT300-2	269.8	600	2	559,573	715,211	92.80	0.87	0.68
15	DT200-R	179.8	400	2	247,457	316,811	65.57	1.42	1.09
16	DT300-R	269.8	600	2	559,573	715,211	124.64	1.17	1.00

Tabla 9. Capacidad a flexión de los elementos. (Lanhui Guoa, 2013).

Debido a que hay gran diferencia entre los límites de esbeltez propuestos por distintas normativas para las CHS al igual que pocos estudios de investigación (Elchalakani M. Z., 2002), así como la necesidad de profundizar en la determinación de estas esbelteces para nuevos materiales como el acero inoxidable y de alta resistencia; varios investigadores han continuado realizando estudios en este campo de los elementos CHS, fabricados y/o conformados en frio (cold formed), incluso ampliando los parámetros geométricos que intervienen en la definición de los especímenes a ensayar, generando la sección elíptica y abriendo así nuevas líneas de investigación. A continuación se presenta una tabla resumen de algunos de los estudios más recientes para los elementos CHS.

No.	D/t	f_y (MPa)	Fabrication type	Loading type	Reference
1	17–87	279–429	Fabricated	Simply-supported beam Cantilever beam	Sherman
2	17–32	365–460	Cold-formed	Simply-supported beam	Elchalakani et al.
3	36–122	365–410	Cold-formed	Pure bending beam	Elchalakani et al.
4	19–48	1327–1398	Cold-formed	Simply-supported beam Pure bending beam	Jiao and Zhao
5	43–121	375–602	Fabricated	Simply-supported beam	Kiymaz

Tabla 10. Investigaciones recientes. (Lanhui Guoa, 2013).

De manera general las investigaciones presentadas en este apartado muestran que los mecanismos de fallo son más controlados y regulares a medida que disminuye la esbeltez de la chapa, presentando menos efectos de inestabilidad global o abolladura; por otro lado también se demuestra que la ductilidad aumenta a medida que decrece la esbeltez, debido a que al no presentarse fenómenos de abolladura no hay perdidas de capacidad seccional y la posterior respuesta estructural ante solicitaciones mayores cuenta con un sistema resistente integro.

Otra conclusión común en ambas investigaciones se asocia a los límites máximos de esbeltez permitidos en las normas de diseño como Eurocódigo & AN/Australianas y ASCE 8-02, las cuales, a consideración de los autores, son conservadores ante la aparición de fenómenos de inestabilidad local en elementos CHS, lo cual genera elementos sobredimensionados con respectos a las solicitaciones aplicadas.

2.4 Valor estético

El diseño estructural incluye la valoración del aspecto estético de las estructuras, en donde los elementos CHS presentan la capacidad de adaptarse a distintos entornos como el urbano y las edificaciones, agregando un estilo moderno y agradable a la vista de los usuarios de tales estructuras. A continuación se presentan algunos ejemplos de aplicaciones reales de elementos CHS.

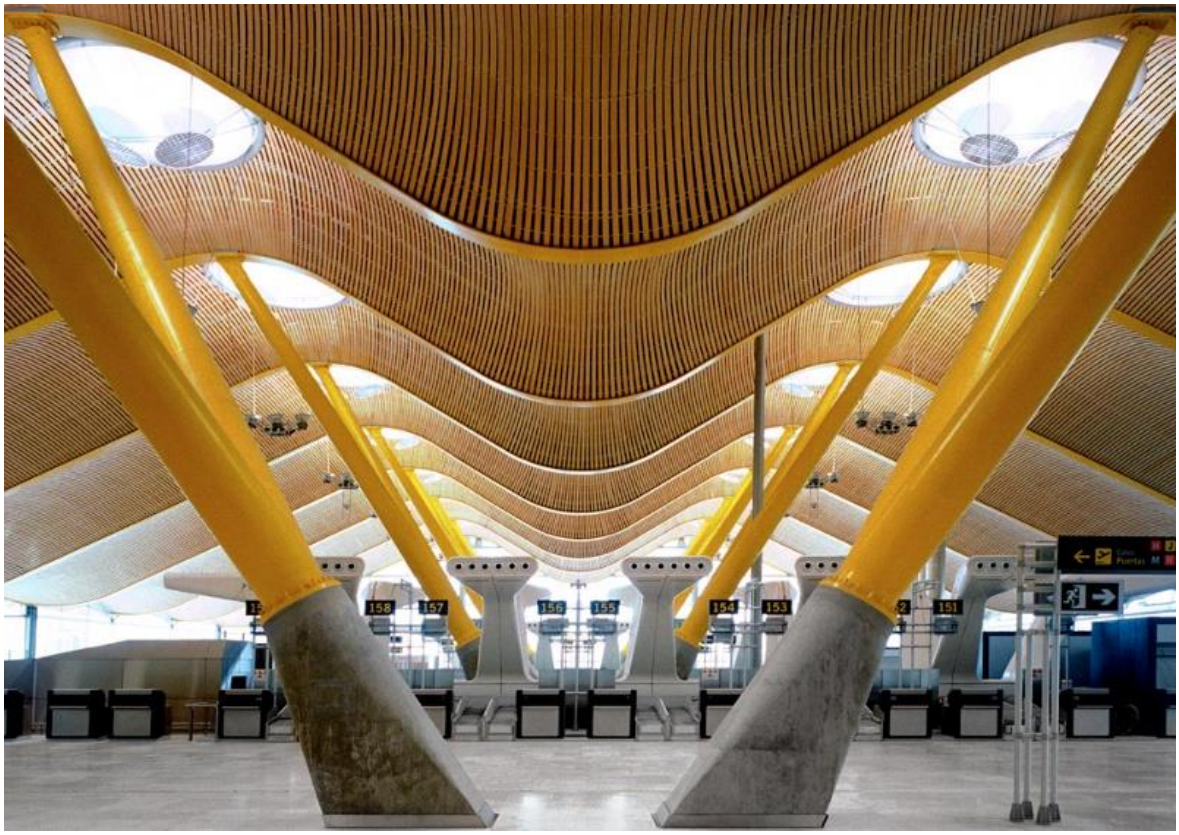


Fig. 10. Aeropuerto de Barajas Terminal 4. (Brajovic, 2013).

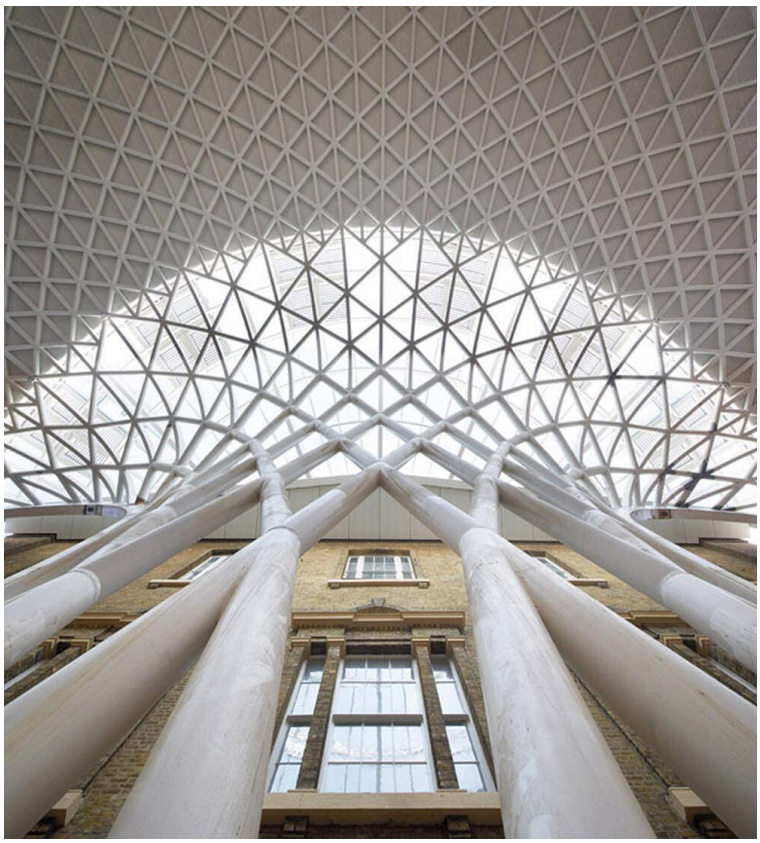


Fig. 11. Kings Station, Londres. (Bortoluzzi, 2012).

Fig. 12. Turbina eólica-Nueva Zelanda. (METAEFFICIENT, s.f.).

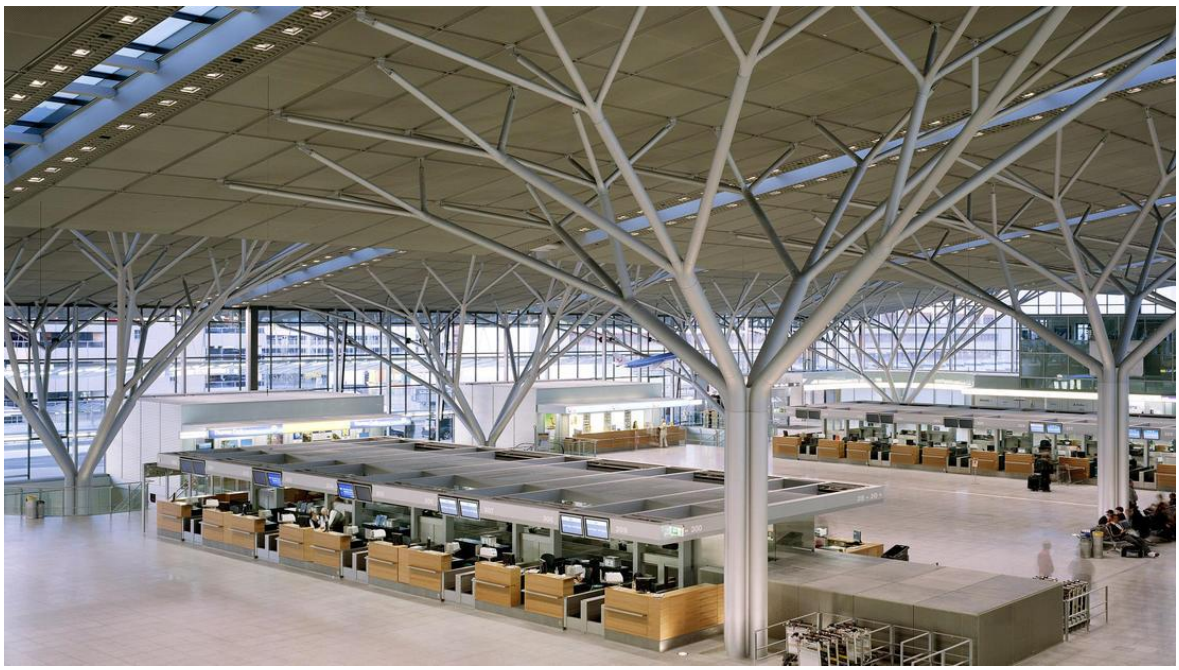


Fig. 13. Terminal 1, aeropuerto de Stuttgart. (gmp, 2014).

3 ESTUDIO PARAMÉTRICO

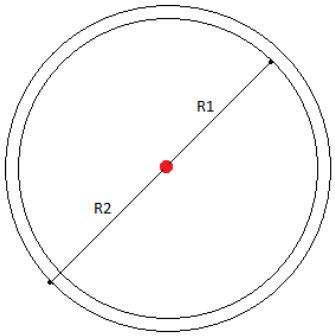
En el presente capítulo se define el espectro de elementos CHS a analizar y las variables paramétricas que lo definen. Para ello se realiza un primer planteamiento tentativo de los rangos posibles de las magnitudes paramétricas, y posteriormente se verifica la validez de éste con respectos a los alcances definidos para el presente estudio.

3.1 Aspectos generales

3.1.1 Geometría de los elementos CHS

Como ya se ha adelantado en el apartado 2.3, los elementos CHS presentan una serie de parámetros geométricos de gran importancia para la determinación del posterior comportamiento estructural. La relación de los distintos parámetros geométricos condiciona la respuesta estructural y el modo de fallo final, por lo que mantener presente la definición de estas variables a lo largo del estudio y cómo están relacionadas es de gran importancia para la posterior valoración de los resultados obtenidos.

A continuación se presentan las principales expresiones de cálculo que definen algunas propiedades de la sección a partir de su geometría, y que serán básicas para la definición de los elementos a analizar y la comprensión de los resultados, se presentan a modo de referencia práctica más no se considera relevante profundizar en estos conceptos.



$$I_X, I_Y, I_Z = \frac{\pi}{4}(R_2^4 - R_1^4)$$

Ecuación 3. Inercia CHS.

$$S = \frac{\pi(R_2^4 - R_1^4)}{4R_2} = \frac{\pi(D_2^4 - D_1^4)}{32D_2}$$

Ecuación 4. Módulo elástico CHS.

$$Z_P = \frac{D_2^3 - D_1^3}{6}$$

Ecuación 5. Módulo plástico CHS.

$$t = R_2 - R_1$$

Ecuación 6. Espesor de chapa.

$$A = \pi\,(R_2^2 - R_1^2)$$

Ecuación 7. Área de Sección CHS.

$$i = \sqrt{\frac{I_{X,Y,Z}}{A}}$$

Ecuación 8. Radio de giro.

3.1.2 Comportamiento estructural de los elementos CHS

3.1.2.1 Tracción

Es bien conocido el buen comportamiento de los elementos estructurales metálicos bajo esfuerzos de tracción debido a la mayor ductilidad que presentan en comparación con otros materiales de construcción como el hormigón. La respuesta del material es inicialmente elástica hasta llegar a alcanzar el escalón de fluencia en donde ocurre un reacomodo entre los granos que conforman la matriz del material, lo que aumenta el área superficial de contacto entre ellos y el material se endurece por deformación hasta alcanzar su resistencia máxima, posteriormente pierde resistencia en estados superiores de deformación hasta la rotura. La capacidad de resistir esfuerzos en el sentido del eje de los elementos estructurales CHS está ligada a la calidad de acero y al área neta de la sección, lo cual determina la cantidad de material y los límites de deformación y resistencia alcanzados por el elemento.

Esta relación entre la deformación de fallo estructural y el inicio del comportamiento plástico es lo que se conoce como ductilidad, como se mencionó en apartados anteriores, y es la principal ventaja del acero estructural ante acciones que lo soliciten a tracción, ya que el modo de fallo al ser dúctil permite ser controlado. Los elementos CHS al ser simétricos alrededor de su eje presentan una distribución de tensiones ante acciones axiles homogénea, si consideramos condiciones ideales; lo que evita concentraciones indeseadas de tensiones que generen gradientes de deformación en una misma sección.

Es importante destacar que el comportamiento en el sentido de la compresión es crítico en elementos metálicos, ya que varios aspectos influyen en la respuesta estructural de manera negativa, por lo que el diseño ante acciones de compresión, flexión o flexo-compresión es de mayor rigor que la tracción simple.

3.1.2.2 Compresión

La capacidad global a compresión de un elemento CHS va a estar condicionada por dos escenarios, la capacidad seccional y el comportamiento del elemento frente a efectos de inestabilidad global.

Capacidad de sección (Squash Load):

$$N_{PL} = Af_y$$

Ecuación 9. Capacidad de sección transversal (Squash Load).

Por otro lado, los factores determinantes en la inestabilidad del elemento son el material, su longitud y relación D/t; parámetros que definen la esbeltez del elemento y de la chapa que conforma la sección. *El radio de giro de las secciones huecas (relativo a la masa del perfil) es generalmente mucho mayor que el correspondiente al eje débil de los perfiles abiertos. Para longitud y carga dadas, esta diferencia da lugar a una menor esbeltez para los perfiles*

tubulares, y por tanto a un menor peso al compararlos con los perfiles abiertos. (ITEA, 2014). De igual manera, este radio de giro mayor disminuye la esbeltez y aumenta la carga crítica que activa el pandeo global del elemento CHS, por lo que para elementos de igual longitud se obtiene un mejor comportamiento a pandeo con elementos CHS sin aumentar las dimensiones de la sección con respecto al equivalente perfil abierto, alma/diámetro, con lo que uniones y cimentaciones no varían significativamente de dimensiones. Este comportamiento entre secciones CHS vs H o I se debe a que hay una mejor distribución geométrica del material que conforma la sección para efectos de inestabilidad global. A continuación se presentan las expresiones que gobiernan la respuesta inestable de elementos comprimidos.

Carga crítica de Euler y longitud crítica de pandeo. (Ministerio de Fomento, 2012):

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 EI}{L_{CR}^2} = L_{CR} = \beta L$$

Ecuación 10. Carga y Longitud crítica de pandeo.

La esbeltez λ depende de la longitud de pandeo L_{CR} y del radio de giro (i). (ITEA, 2014):

$$\lambda = \frac{L_{CR}}{i}$$

Ecuación 11. Esbeltez mecánica.

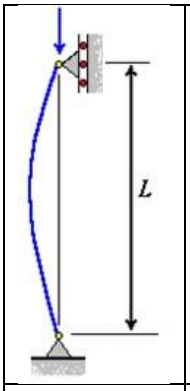
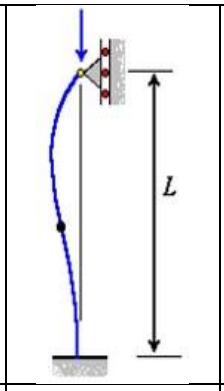
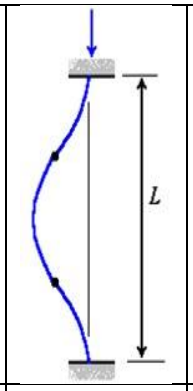
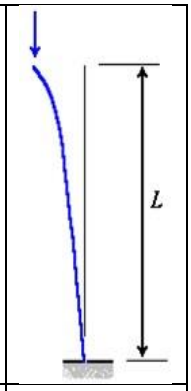
			
$L_{CR} = L$	$L_{CR} = 0.699L$	$L_{CR} = 0.5L$	$L_{CR} = 2L$
$\beta = 1$	$\beta = 0.699$	$\beta = 0.5$	$\beta = 2$

Tabla 11. Coeficientes β para el cálculo de la longitud crítica de pandeo.

El comportamiento de un perfil ante el pandeo está influido por las excentricidades iniciales de las cargas, la rectitud, las tolerancias geométricas, las tensiones residuales, la no homogeneidad del acero y por la relación tensión-deformación. (ITEA, 2014). Para mantener el grupo de elementos CHS a analizar dentro del alcance de este estudio, se tendrá que verificar el estado límite de inestabilidad con el fin de garantizar que la capacidad seccional no se comprometa.

Basadas en una investigación exhaustiva efectuada por la Convención Europea para la Construcción Metálica, se han establecido las "Curvas Europeas de Pandeo" para los distintos perfiles de acero, en los cuales se incluyen los perfiles tubulares. Estas curvas se encuentran incorporadas al Eurocódigo 3. (ITEA, 2014). Las cuales permiten asociar los parámetros mecánicos y geométricos de un elemento a la susceptibilidad ante efectos de inestabilidad global.

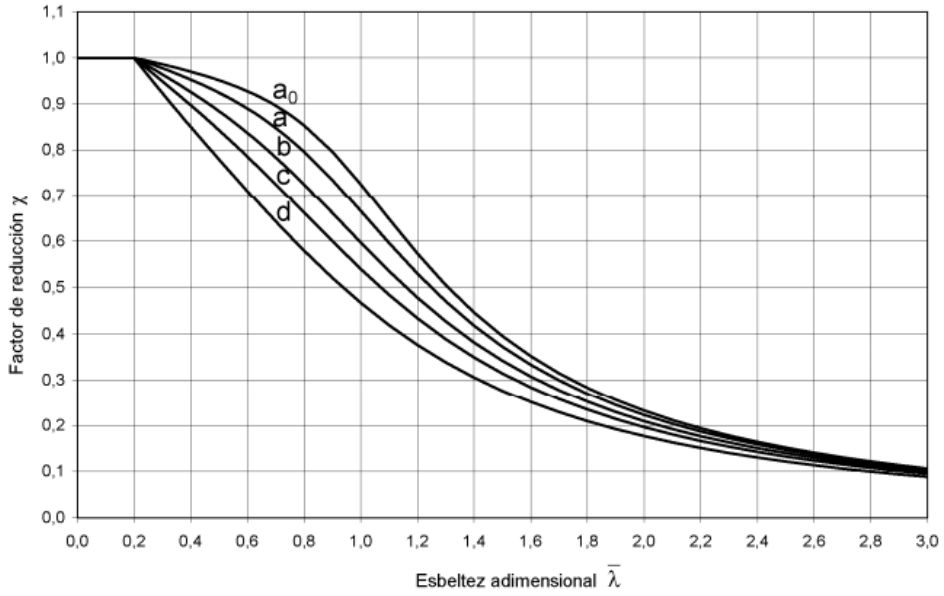


Fig. 14. Curvas europeas de pandeo (EN, 2005).

Elección de las curvas de pandeo

Sección transversal		Límites	Pandeo alrededor del eje	Curva de pandeo	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Secciones de perfiles huecos		Acabados en caliente	Cualquiera	a	a_0
		Conformados en frío	Cualquiera	c	c

Tabla 12. Curvas europeas de pandeo de acuerdo con los procesos de fabricación.

Casi la totalidad de las secciones comerciales abiertas corresponden a las curvas “b” y “c”. De tal manera, el uso de perfiles tubulares conformados en caliente aporta una reducción en la cantidad de material, ya que para una esbeltez dada el factor de reducción χ para el modo de pandeo considerado está más cercano a 1.00 que el resto de las curvas de pandeo, con lo que se puede reducir más el área de la sección en comparación al perfil abierto de igual esbeltez adimensional.

Una vez planteados los parámetros geométricos que definirán las secciones de los elementos CHS a analizar, se realizará la verificación del estado límite de inestabilidad, iniciando con la clasificación de las secciones transversales de los elementos CHS, en nuestro caso según la tabla 20.3.c de la norma EAE, con el fin de estimar la capacidad seccional ante posibles efectos de inestabilidad; esta capacidad será afectada por un coeficiente de reducción χ para el modo de pandeo considerado, que tendrá un valor menor a 1.00 de presentarse posibles efectos de inestabilidad. Ya que el estudio no tiene como objetivo incluir la inestabilidad global en el análisis, debido a que se busca estimar la capacidad seccional sin factores que la comprometan, se verificará que las geometrías planteadas presenten un coeficiente de reducción χ mayor a 1.00.

De tal manera, a continuación se muestran los lineamientos establecidos en la norma EAE, iguales a los presentes en la norma EN 1993-1-1:2005, para la verificación del estado límite de inestabilidad.

La capacidad de la sección transversal se calcula mediante las siguientes expresiones:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \qquad \text{para secciones transversales de clase 1, 2 y 3.}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \qquad \text{para secciones transversales de clase 4.}$$

Ecuación 12. Resistencia de cálculo a pandeo del elemento comprimido.

En donde el factor de reducción χ para el modo de pandeo considerado se determina conforme a:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \qquad \text{siendo} \qquad \chi \leq 1{,}0$$

Ecuación 13. Coeficiente de reducción para el modo de pandeo considerado.

Donde:

$$\Phi = 0{,}5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0{,}2) + \bar{\lambda}^2]$$
$$\alpha = \text{Coeficiente de imperfección.}$$

Ecuación 14. Expresión para el cálculo de Φ.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad \text{en secciones de clase 1, 2 y 3.}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{ef}f_y}{N_{cr}}} \quad \text{en secciones de clase 4.}$$

Ecuación 15. Esbelteces adimensionales en función del tipo de clase.

Por lo tanto, se puede verificar fácilmente la influencia de efectos de inestabilidad global en elementos estructurales con parámetros geométricos y mecánicos conocidos. El control de estos fenómenos en elementos metálicos como los CHS sometidos a compresión dan origen a la necesidad de acortar las longitudes de pandeo, con lo que para un radio de giro dado se puede disminuir la esbeltez y aumentar la carga crítica, evitando así posibles inestabilidades; de esta necesidad nacen soluciones como rigidizar lateralmente los elementos o cambiar sus condiciones de apoyo.

3.1.2.3 Torsión

Las secciones tubulares circulares presentan un comportamiento estructural más eficaz ante solicitaciones por momentos torsores, debido a que el material de la sección esta uniformemente distribuido alrededor del eje polar, aumentando el brazo asociado a la reacción de la sección sobre tensiones coplanares que giren alrededor del mismo eje polar, haciendo más eficiente su mecanismo resistente. A continuación se presenta una tabla comparando distintos perfiles de secciones abiertas y tubulares con peso por metro lineal aproximado, donde se puede observar que el valor del módulo de torsión de los perfiles tubulares es 200 a 300 veces mayor que el de los perfiles de sección abierta.

Perfil	Peso, kg/m	Módulo de torsión I_t (cm^4)
HEB 120	26,7	14,9
IPE 220	26,2	9,1
UPN 200	25,3	12,6
120 · 7	24,7	1010,0
ϕ 175 · 6	25,0	2280,0

Tabla 13. Resistencia torsional de varios tipos de secciones transversales.

3.1.2.4 Flexión

En general, las secciones I y H son más económicas ante flexión alrededor de sus ejes fuertes (I_{max} es mayor que en las secciones huecas). Solo en los casos en los que la resistencia de diseño de las secciones abiertas es ampliamente reducida por inestabilidad por pandeo lateral (LTB- Lateral Torsional Buckling), las secciones huecas ofrecen una ventaja (Wardenier, 2010). Esto se debe a la distribución geométrica del material en la sección, ya que mientras en los elementos CHS la distribución es homogénea alrededor del

eje polar, dando una inercia igual en cualquier eje posible de la sección, en los perfiles abiertos el material se distribuye de tal manera que se concentra la mayor parte de la inercia en un solo eje, haciéndolo altamente eficaz a soportar flexión alrededor de dicho eje.

El otro aspecto referente a los efectos en elementos a flexión es que en general, la resistencia al pandeo lateral por torsión no necesita ser verificada para las secciones circulares y rectangulares huecas normalmente usadas en la práctica ($b/h \geq 0.5$). *Esto se debe al hecho de que su momento de inercia polar It es muy grande en comparación a los perfiles abiertos.* (Rondal, 1992).

Una manera de hacer competitivo el elemento CHS ante acciones de flexión es aprovechar la resistencia del material en régimen de no linealidad, sin embargo la flexión conlleva a que parte de la sección este traccionada mientras que la otra comprimida, y como se mencionó anteriormente, la compresión en el acero en régimen no lineal puede causar problemas de abolladura local del panel comprimido si no se controla la relación D/t, por lo que el diseño debe contemplar las verificaciones pertinentes para lograr que la sección alcance el momento de plastificación.

3.1.3 Otros aspectos de los elementos CHS

3.1.3.1 Comportamiento aerodinámico

Las secciones de perfiles tubulares presentan un comportamiento muy favorable al interactuar con flujos de agua o aire, situación que se puede presentar en estructuras expuestas a la intemperie. Los coeficientes aerodinámicos de estos perfiles son menores a los de las secciones abiertas, con lo que se evitan solicitaciones mayores por acciones de fluidos sobre la estructura, disminuyendo vibraciones, problemas de fatiga y serviciabilidad, y costos.

A continuación se muestra un esquema de las líneas de flujo sobre diferentes secciones, donde se puede apreciar la turbulencia y vórtices que se originas en las secciones abierta, dando origen a nuevas solicitaciones y menor desempeño. Se observa la sección circular permitiendo el paso del flujo de una manera menos turbulenta, obteniendo una mejor respuesta estructural.

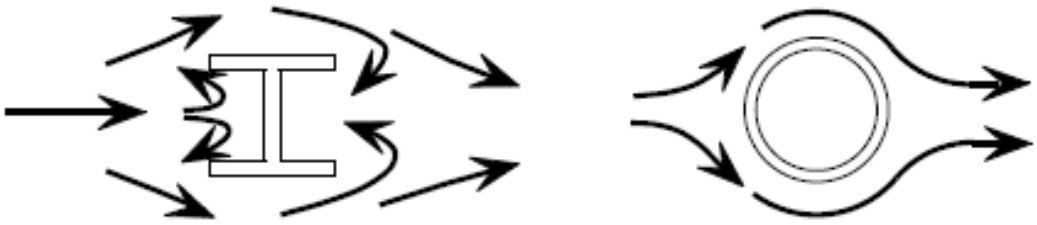


Fig. 15. Líneas de flujo en secciones abiertas y CHS. (ITEA, 2014).

3.1.3.2 Protección frente a la Corrosión

Los elementos estructurales tubulares presentan varias ventajas ante los ataques por corrosión. La geometría de las secciones aportan parte de estas ventajas, ya que en comparación a las secciones abiertas con esquinas agudas y lugares donde se pueden depositar agentes corrosivos, las secciones tubulares presentan esquinas redondeadas en el caso de las rectangulares y especialmente en el caso de las circulares, en donde se generan suaves transiciones entre secciones y uniones; estas condicionantes geométricas ayudan a evitar la acumulación de agua que da lugar al inicio del proceso de corrosión.

Además, al tener su interior aislado del ambiente es menor la superficie a proteger en comparación a los perfiles abiertos, *obteniendo una reducción de entre 20% a 50% en la cantidad de revestimiento a utilizar*. (Wardenier, 2010)

La ventaja de las secciones tubulares de mantener su interior sellado y aislado del exterior es que de esta manera también se evita la condensación de agua dentro del perfil, evitando posible corrosión interna.

3.1.3.3 Uso del espacio interno

La principal propuesta en este aspecto ha sido rellenar los elementos tubulares con hormigón, (CFT), por muchas razones prácticas y de rendimiento estructural. Desde hace tiempo se ha apostado al uso de estructuras compuestas que aprovechen las ventajas de los materiales de construcción predominantes, es el caso del hormigón armado. En los perfiles tubulares rellenos de hormigón se busca aumentar la capacidad de carga con un material que se desempeñe mejor a compresión, con la ventaja de estar confinado por el perfil de acero estructural, el cual sirve de encofrado y de cuantía mecánica para soportar los esfuerzos de flexión sobre el pilar, con lo que se obtiene una solución mixta, económica y de alto desempeño.

Otros usos del espacio interior de las secciones tubulares incluyen el paso de servicios, ventilación, sistemas de abastecimiento y drenaje.

3.1.4 Acero Estructural

El acero estructural es un material compuesto por hierro más metaloides (C, S, P, Si), más metales variables (Mn, Cr, Ni, ...) los cuales aportan propiedades especiales. El rango de contenido de carbono para que el material sea considerado un acero estructural debe estar comprendido entre 0.03% y 2%; materiales compuestos hierro-carbono con porcentajes de carbono superiores a 2% son conocidos como aleaciones.

A continuación se presentan dos curvas que muestran el comportamiento mecánico del acero en función de su contenido de carbono. Se puede observar que a medida que el porcentaje de carbono aumenta también lo hace la resistencia del acero, sin embargo la ductilidad disminuye, con lo que el material pierde capacidad de deformación y su mecanismo de fallo pasa de dúctil a frágil. Por otro lado, si se disminuye el porcentaje de carbono se pierde

resistencia y se gana ductilidad en un comportamiento casi lineal en las curvas de la Fig. 16, con lo que el material alcanza deformaciones mayores ante la carga última, dando lugar a la posibilidad de análisis plásticos en las estructuras y las subsecuentes redistribuciones de esfuerzos por grandes cambios geométricos en los elementos estructurales debido a grandes deformaciones plásticas, como es el caso de las rótulas plásticas.

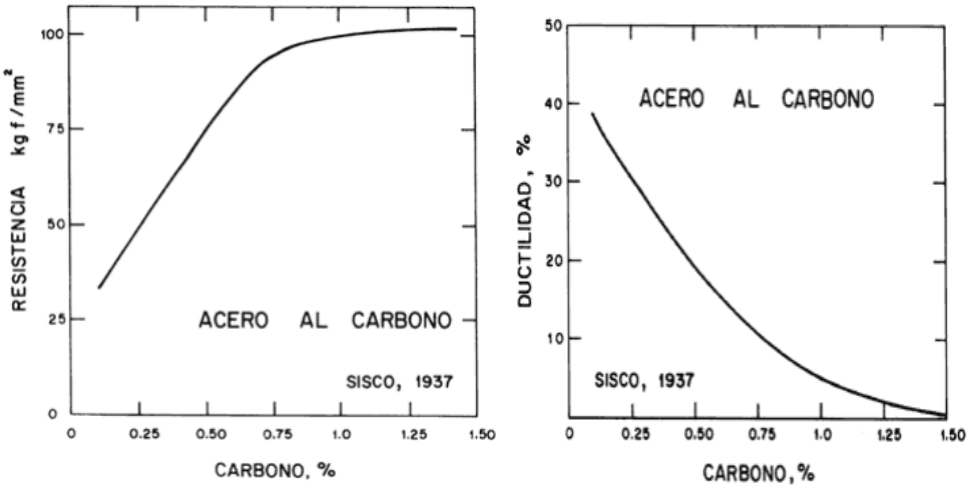


Fig. 16. Resistencia y Ductilidad vs porcentaje de carbono en aceros.

3.1.4.1 Calidad de acero

Las calidades de acero más comunes son: S235, S275, S355 y S450, siendo sus posibles grados: JR, J0, J2 y K2, donde el número significa el límite elástico en Mpa (N/mm2) y el grado indica la resiliencia exigida, determinada por el ensayo Charpy. La clasificación de estos aceros se encuentra en la norma UNE-EN 10020:200, y serán los considerados para el diseño y análisis estructural de los elementos estructurales CHS de este estudio.

Tipos de acero	Límite de fluencia f_y (N/mm^2)	Resistencia última a tracción f_u (N/mm^2)
S 235	235	340-470
S 275	275	410-560
S 355	355	490-630
S 460*	460	550-720

Tabla 14. Aceros y sus correspondientes valores f_y y f_u.

3.1.5 Criterios de evaluación de comportamiento estructural

3.1.5.1 Ductilidad δ_3/δ_1

La ductilidad es la capacidad que tiene un material de presentar deformaciones dentro del rango plástico sin romperse. Por lo tanto, la medida de ductilidad está en función de qué tanto el material puede mantener el incremento de deformación antes del fallo, teniendo así una estrecha relación con la absorción y disipación de energía. La ductilidad, al plantearse como la capacidad de incursionar en deformaciones plásticas de manera sostenida sin el fallo inmediato, se puede asociar por lo tanto no solo al comportamiento del material, sino también al de la sección de un elemento y/o la estructura completa.

La ductilidad del material se refiere, como su nombre indica, a la ductilidad de los materiales que componen la estructura, como el acero. Estos materiales tienen una determinada capacidad de deformarse plásticamente para un determinado ensayo, como el de tracción, por ejemplo. Es bien conocido la alta ductilidad que presenta el acero, al menos cuando no está sujeto a estados de tensión triaxial o cuando no se activan mecanismos de inestabilidad, u otros fallos frágiles.

La ductilidad de sección se refiere a la capacidad de deformarse de una determinada sección de un elemento frente a esfuerzos que la soliciten, es de gran importancia a la hora de diseñar rótulas plásticas para la redistribución de esfuerzos en la estructura.

La ductilidad global es la capacidad de deformación plástica que tiene toda la estructura, este tipo de ductilidad es de especial importancia en el diseño sismorresistente, ya que con ella se logra disipar la energía proveniente del cortante basal a través de grandes desplazamientos y deformaciones, evitando incrementos de tensión en los elementos que puedan conducir al fallo, además ayuda a aproximar mejor la magnitud de la acción sísmica al poder estimar el amortiguamiento de la estructura.

Las expresiones que buscan representar el valor de la ductilidad en función del comportamiento de las curvas de tensión-deformación o carga-desplazamiento, buscan calcular un ratio de plastificación o energía disipada a partir del límite elástico del comportamiento estructural. Varias hipótesis se plantean para calcular este valor, no obstante, debido a que el modo de fallo no es constante por su dependencia con varios factores, como la velocidad de aplicación, magnitud y no linealidad de la carga, muchas de las expresiones tienen carácter empírico o se aplican mejor que otras dependiendo de la condiciones de contorno a las que está sujeto el análisis. A continuación se presenta el modelo de ductilidad adoptado en este estudio y utilizado de igual manera en otras investigaciones (Chacon, Mirambell, & Real, 2013).

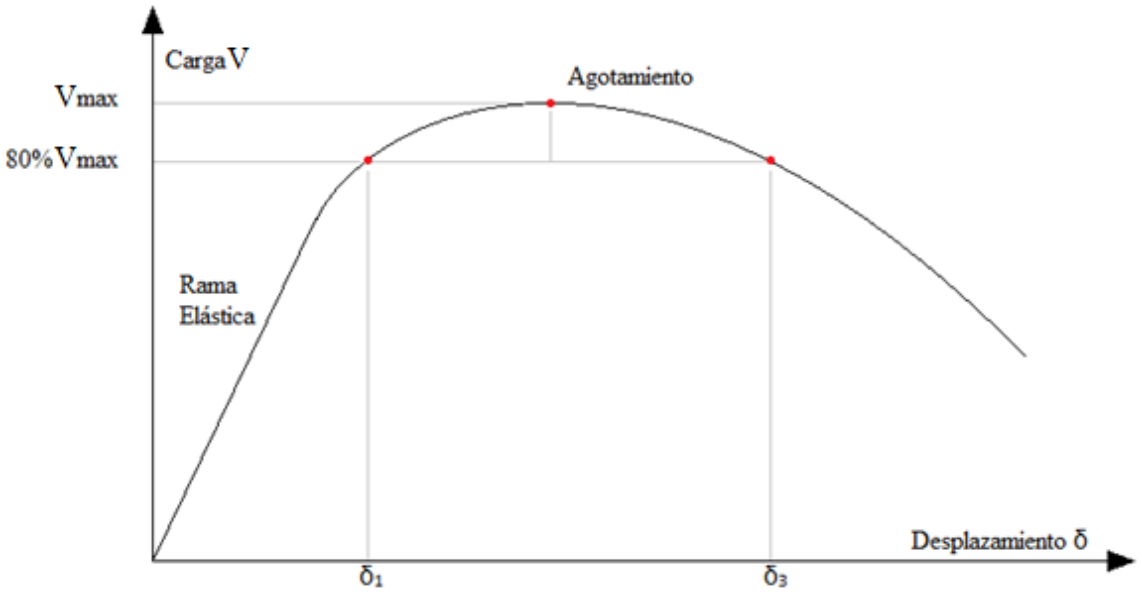


Fig. 17. Diagrama Carga-Desplazamiento y criterio de ductilidad.

$$\mu = \delta_3/\delta_1$$

Ecuación 16. Criterio de ductilidad.

Donde,

δ_3= desplazamiento asociado a la carga 80% V_{max} antes del agotamiento

δ_1= desplazamiento asociado a la carga 80% V_{max} superado el agotamiento

Este criterio para la determinación de la ductilidad representa qué tanto desplazamiento en régimen no lineal alcanzó el elemento en el fallo con respecto al desplazamiento asociado al final del comportamiento elástico lineal (Chacon, Mirambell, & Real, 2013), y será el utilizado para el cálculo de la ductilidad a partir de las curvas de carga-desplazamiento de los resultados del análisis estructural de los elementos CHS.

3.1.5.2 Angulo α

Además del valor de ductilidad δ_3/δ_1 para definir el grado de incursión del elemento en una respuesta estructural no lineal, conocer el ángulo α de la rama post-agotamiento permite saber la magnitud de perdida de resistencia en función del desplazamiento alcanzado.

Como se ha mencionado anteriormente, los mecanismos de fallo frágiles implican una perdida violenta en la capacidad de carga del elemento, como es el caso de la inestabilidad local de paneles comprimidos o abolladura, en los cuales se afecta la capacidad seccional del elemento; mientras que en los fallos dúctiles esta pérdida de carga es menos pronunciada y la deformaciones/desplazamientos incrementan en una respuesta estructural que sigue siendo resistente. De tal manera en el primer caso la rama post-agotamiento presentará una

pendiente más pronunciada y menor ángulo (α) con respecto a la vertical a medida que los fenómenos de fallo presentes en el elemento sean mayores, mientras que en el caso contrario el ángulo (α) aumenta y el modo de fallo es más controlado.

A continuación se presenta en la Fig 18 el esquema representativo del ángulo (α) para las distintas curvas de carga-desplazamiento "1", "2" y "3".

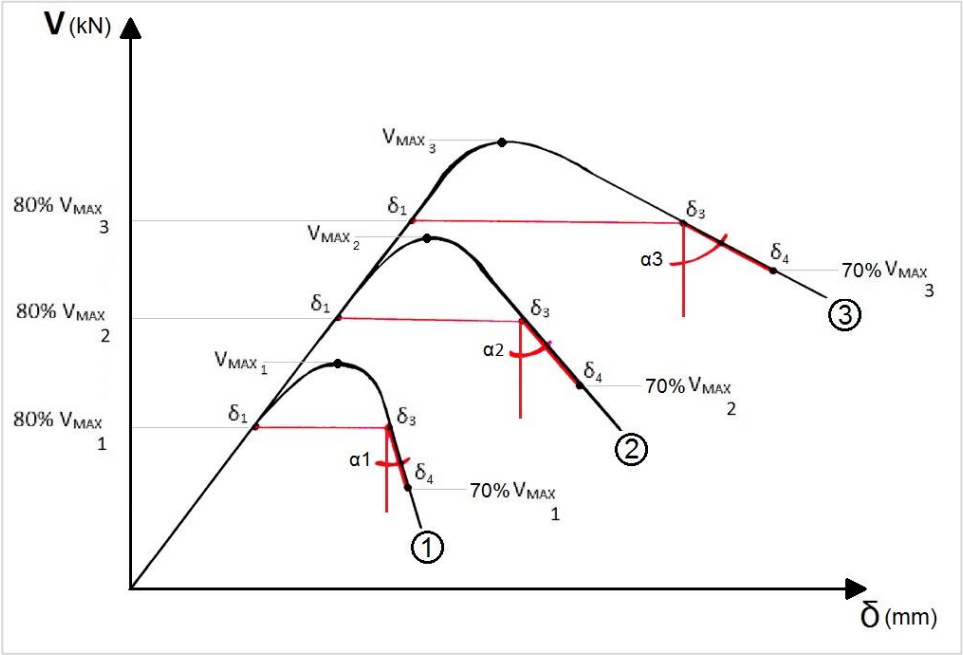


Fig. 18. Diagrama Carga-Desplazamiento y criterio de ángulo α.

El ángulo α se calcula entre la recta de la rama post-agotamiento definida por los puntos de esta asociados a los valores de 80% V_{max} y 70%V_{max}, y la vertical.

En la Fig 18 se puede observar el comportamiento que podrían presentar elementos CHS con diferentes configuraciones paramétricas. En la curva 1 la pendiente de la rama post-agotamiento es más pronunciada que en las curvas 2 y 3, con lo que la pérdida de capacidad por desplazamiento es mayor y el ángulo (α) menor. De tal comportamiento se puede concluir que la respuesta estructural del caso 1 presenta más probabilidad de estar afectado por fenómenos de abolladura que los casos 2 y 3.

Con los valores de d_3/d_1 se puede conocer de esta manera la ductilidad y con el ángulo (α) el modo de fallo probable una vez agotada dicha ductilidad, con lo que los ingenieros proyectistas pueden prever la resistencia, desplazamiento y modo me fallo estructural.

3.1.6 Clasificación de secciones transversales

Esta clasificación es útil para la determinación de qué configuraciones geométricas en una sección permiten alcanzar el momento plástico y qué capacidad de rotación tienen, con lo que se pueden realizar hipótesis para la redistribución de esfuerzos mediante rótulas plásticas

y consideraciones sobre la cantidad de sección efectiva para el cálculo de las capacidades resistentes, como es el caso de la sección clase 4, la cual falla por abolladura antes de alcanzar el momento plástico, lo que se interpreta a nivel normativo como la perdida de parte de la sección, generando la necesidad de calcular una nueva área efectiva y sus propiedades mecánicas/geométricas. Sin embargo este artificio no será necesario considerarlo en este estudio ya que la simulación por elementos finitos ya contempla el comportamiento debido a estos efectos y la respuesta estructural que generan.

A continuación se presenta la clasificación de secciones transversales definidas en Eurocódigo y en la EAE:

- *Secciones de clase 1 (plásticas) son aquéllas que alcanzan, sin verse afectadas por fenómenos de abolladura en sus zonas comprimidas, su capacidad resistente plástica, y permiten desarrollar, sin reducción de la misma, la capacidad de rotación exigible a las rótulas en un análisis global plástico.*

- *Secciones de clase 2 (compactas) son aquéllas que pueden alcanzar su momento resistente plástico, pero en las que los fenómenos de abolladura limitan su capacidad de rotación por debajo de las exigencias de aplicabilidad del análisis global plástico.*

- *Secciones de clase 3 (semicompactas) son aquéllas en las que la tensión en la fibra más comprimida, estimada a partir de una distribución elástica de tensiones, puede alcanzar el límite elástico del acero, pero en las que los fenómenos de abolladura impiden garantizar la deformación necesaria para alcanzar el momento resistente plástico de la sección.*

- *Secciones de clase 4 (esbeltas) son aquéllas en las que los fenómenos de abolladura limitan incluso el desarrollo de su capacidad resistente elástica, no llegando a alcanzarse el límite elástico del acero en la fibra más comprimida.* (Ministerio de Fomento, 2012).

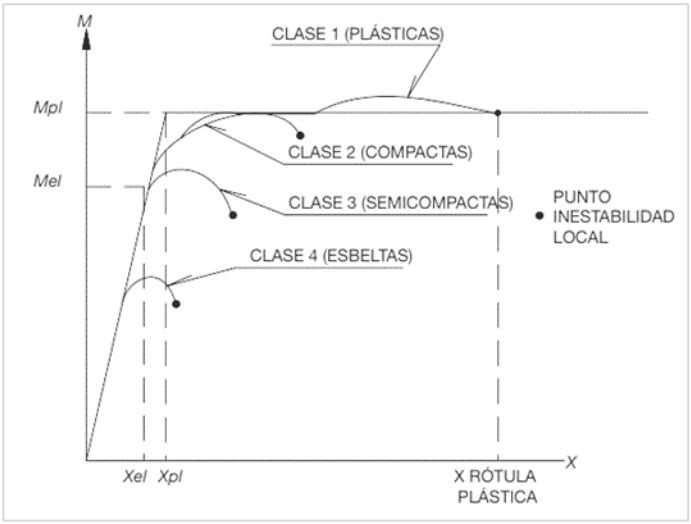


Fig. 19. Momento – Rotación para distintas clases. (Ministerio de Fomento, 2012).

3.2 Esquema Estructural

3.2.1 Planteamiento del grupo de elementos

A continuación se muestra el proceso de estudio para el planteamiento y determinación de los parámetros de los elementos CHS a considerar en la ejecución del análisis estructural; a ser contrastados y validados posteriormente con las exigencias impuestas en los objetivos y alcances de este estudio en el apartado 3.2.2.

Se plantean cuatro longitudes y un único diámetro; los parámetros se seleccionaron en función de evitar que los efectos por inestabilidad causados por el N_{PL} (squah load) afecten la capacidad seccional. Los resultados finales podrán ser extrapolados a pilas con diferentes longitudes y diámetros a los seleccionados en el presente estudio mientras se mantengan las relaciones de esbeltez geométrica estudiadas.

El diámetro seleccionado es de 1600mm y las longitudes planteadas son las siguientes:

Longitud L (mm)
4000
6000
8000
10000

Tabla 15. Longitudes de elementos CHS.

De esta manera se abarca un grupo de esbelteces geométricas comunes en los sistemas estructurales.

Posteriormente se plantearon los espesores de chapa para determinar la sección de los distintos elementos CHS a utilizar en el estudio, y las propiedades geométricas y mecánicas de sus secciones transversales. Para ello se propuso el uso de diez espesores de chapa, abarcando los principales espesores comerciales y sin llegar a dimensiones que no permitan el uso de elementos Shell en el posterior análisis por elementos finitos.

Espesores t (mm)									
15	22	25	30	35	40	50	60	70	80

Tabla 16. Espesores de elementos CHS.

No se superan espesores de 80mm por la poca probabilidad de ser considerados durante el diseño, ya que de necesitar más sección probablemente la alternativa de rellenar el elemento CHS con hormigón sea más económica. Por otro lado, para espesores tan grandes el comportamiento del elemento finito a utilizar no es compatible, ya que intervienen aspectos de deformación normal al plano.

Se seleccionaron los aceros estructurales comerciales más comunes establecidos en UNE-EN 10020:

Calidades de acero fy (N/mm2)			
S235	S275	S355	S460

Tabla 17. Calidades de acero de elementos CHS.

Ya que el presente estudio busca analizar el comportamiento dúctil de los elementos bajo la acción de flexo-compresión, se toma en cuenta la adición de una carga axil de compresión representada como el desplazamiento generado por un porcentaje de la capacidad de la sección en análisis; de esta manera se escogieron once desplazamientos a partir de las cargas axiles de compresión correspondientes, un desplazamiento para cada incremento del 10% en el axil de compresión (%N_{PL}) desde 0% hasta 100%.

El último aspecto a agregar en el estudio es el desplazamiento de cabeza de los pilares para generar la flexión del elemento, el cual tendrá valor unitario en el modelo de análisis de Abaqus CAE y aumentará automáticamente en una serie de pasos definidos para el análisis RIKS constantes, por lo que este parámetro no se considera para la definición de los elementos.

Con los anteriores parámetros se realizó un modelo numérico para el análisis por elementos finitos de cada combinación posible, dando origen a 1760 modelos de elementos CHS, abarcando un rango lo suficientemente amplio para relacionar la configuración geométrica y mecánica de los pilares con el comportamiento estructural frente a flexo-compresión, y determinación de las tendencias en la ductilidad.

A continuación se presentan los parámetros que combinados dan origen al grupo de pilares:

Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Acero	Espesor (mm)	%Npl Squash load
4000	1600	S235, S275, S355, S460	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 80	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
6000				
8000				
10000				

Total
1760

Tabla 18. Parámetros para el estudio de elementos CHS.

Con los parámetros definidos anteriormente se pueden determinar los valores de desplazamientos asociados a los diferentes porcentajes de axil de compresión ($\%N_{PL}$) para todas las secciones según el material utilizado y la longitud del elemento CHS. Estos desplazamientos son los aplicados en cada caso de estudio, para que junto al desplazamiento de cabeza del elemento se genere el comportamiento de flexo-compresión en el pilar; las magnitudes de los desplazamientos son independientes del espesor del elemento, ya que tanto N_{PL} como la rigidez a axil del elemento incluyen el área de la sección en su definición, variable que se elimina en el proceso de cálculo de la deformación unitaria. A continuación se presenta la tabla de desplazamientos de axil de compresión para las secciones pertenecientes al planteamiento del grupo de elementos CHS y las expresiones de cálculo utilizadas.

		Desplazamiento por axil de compresión para porcentajes de N_{pl}										
		δ (δ=ε*L) (mm)										
Longitud	Acero	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
4000	235	0,0	0,4	0,9	1,3	1,8	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0	4,5
6000		0,0	0,7	1,3	2,0	2,7	3,4	4,0	4,7	5,4	6,0	6,7
8000		0,0	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	6,3	7,2	8,1	9,0
10000		0,0	1,1	2,2	3,4	4,5	5,6	6,7	7,8	9,0	10,1	11,2
4000	275	0,0	0,5	1,0	1,6	2,1	2,6	3,1	3,7	4,2	4,7	5,2
6000		0,0	0,8	1,6	2,4	3,1	3,9	4,7	5,5	6,3	7,1	7,9
8000		0,0	1,0	2,1	3,1	4,2	5,2	6,3	7,3	8,4	9,4	10,5
10000		0,0	1,3	2,6	3,9	5,2	6,5	7,9	9,2	10,5	11,8	13,1
4000	355	0,0	0,7	1,4	2,0	2,7	3,4	4,1	4,7	5,4	6,1	6,8
6000		0,0	1,0	2,0	3,0	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1
8000		0,0	1,4	2,7	4,1	5,4	6,8	8,1	9,5	10,8	12,2	13,5
10000		0,0	1,7	3,4	5,1	6,8	8,5	10,1	11,8	13,5	15,2	16,9
4000	460	0,0	0,9	1,8	2,6	3,5	4,4	5,3	6,1	7,0	7,9	8,8
6000		0,0	1,3	2,6	3,9	5,3	6,6	7,9	9,2	10,5	11,8	13,1
8000		0,0	1,8	3,5	5,3	7,0	8,8	10,5	12,3	14,0	15,8	17,5
10000		0,0	2,2	4,4	6,6	8,8	11,0	13,1	15,3	17,5	19,7	21,9

Tabla 19. Desplazamientos de compresión ($\%N_{PL}$).

$$\delta_{\%} = \varepsilon_{\%} L$$

Ecuación 17. Desplazamiento de compresión.

$$\varepsilon_{\%} = \frac{\%N_{PL}}{EA}$$

Ecuación 18. Deformación unitaria

3.2.2 Validación del grupo de elementos

Los elementos CHS generados fueron clasificados siguiendo las especificaciones en la norma EAE, en su apartado 20.2. El objetivo de esta clasificación es verificar que existe una variedad de clases de secciones suficiente para poder observar resultados distintos en el comportamiento del fallo estructural.

Como ya se estudió en apartados anteriores, esbelteces D/t entre 200 – 300 pueden activar mecanismos de inestabilidad local, con lo que se espera que las relaciones D/t mayores en las secciones planteadas se acerquen a este modo de fallo y sean Clase 4; mientras que valores de D/t menores logren un mayor nivel plastificación y rotación de la sección, sosteniendo una capacidad resistente con el aumento de las deformaciones, siendo clasificadas como Clases 1 o 2. A continuación se presentan las clasificaciones obtenidas en función de D/t y la calidad de acero, esta clasificación es igual para todos los casos de longitud de los elementos a analizar.

	Acero			
D/t	**235**	**275**	**355**	**460**
106,7	Clase 4	Clase 4	Clase 4	Clase 4
72,7	Clase 3	Clase 3	Clase 4	Clase 4
64,0	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 4
53,3	Clase 2	Clase 2	Clase 3	Clase 4
45,7	Clase 1	Clase 2	Clase 2	Clase 3
40,0	Clase 1	Clase 1	Clase 2	Clase 3
32,0	Clase 1	Clase 1	Clase 1	Clase 2
26,7	Clase 1	Clase 1	Clase 1	Clase 2
22,9	Clase 1	Clase 1	Clase 1	Clase 1
20,0	Clase 1	Clase 1	Clase 1	Clase 1

Tabla 20. Clasificación de secciones transversales.

Como se puede observar las Clases con mayor capacidad de plastificación y rotación son aquellas con menor esbeltez. Valores de esbeltez menores a D/t=32 con los aceros considerados generan secciones Clase 1, y para valores superiores a D/t=72.7 las secciones comienzan a ser Clase 4. La distribución de clases muestra que el 42.5% de las secciones son Clase 1, el 20% Clase 2, el 15% Clase 3 y un 22.5% Clase 4. De esta manera se obtiene un rango de clases heterogéneo que permitirá observar distintos modos de fallo estructural en las simulaciones.

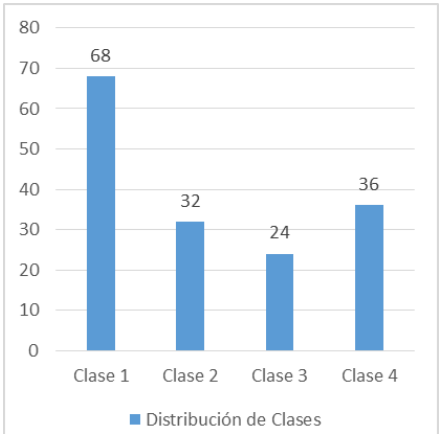


Fig. 20. Distribución (%) de clases en los elementos CHS.

Esta distribución es válida para enriquecer los resultados que se obtendrán del análisis. Sin embargo para mantener a los especímenes dentro de las condiciones que enmarcan los objetivos del presente estudio es necesario la comprobación del estado límite de inestabilidad de todas las secciones planteadas con el fin de asegurar que los efectos de inestabilidad global no comprometen la capacidad seccional de los elementos CHS, o de otra manera, que el valor χ para el modo de pandeo analizado (empotrado-empotrado) en la verificación del estado límite de Inestabilidad del artículo 35 de la norma EAE supere el valor de la unidad en todos los casos, con lo que la capacidad seccional se mantiene integra. Los valores obtenidos para χ siguiendo las especificaciones indicadas se muestran en la siguiente serie de tablas:

		χ			
	D/t	235	275	355	460
4000,00	106,7	1,04	1,03	1,03	1,02
	72,7	1,04	1,03	1,03	1,02
	64,0	1,04	1,03	1,03	1,02
	53,3	1,04	1,03	1,03	1,02
	45,7	1,04	1,03	1,03	1,02
	40,0	1,04	1,03	1,03	1,02
	32,0	1,04	1,03	1,03	1,02
	26,7	1,04	1,03	1,03	1,02
	22,9	1,03	1,03	1,03	1,02
	20,0	1,03	1,03	1,03	1,02

		χ			
	D/t	235	275	355	460
6000	106,7	1,03	1,02	1,02	1,01
	72,7	1,03	1,02	1,02	1,01
	64,0	1,03	1,02	1,02	1,01
	53,3	1,03	1,02	1,02	1,01
	45,7	1,03	1,02	1,02	1,01
	40,0	1,03	1,02	1,02	1,01
	32,0	1,03	1,02	1,02	1,01
	26,7	1,03	1,02	1,02	1,01
	22,9	1,03	1,02	1,02	1,01
	20,0	1,03	1,02	1,02	1,01

		χ			
	D/t	235	275	355	460
8000,00	106,7	1,02	1,02	1,01	1,01
	72,7	1,02	1,02	1,01	1,01
	64,0	1,02	1,02	1,01	1,01
	53,3	1,02	1,02	1,01	1,01
	45,7	1,02	1,02	1,01	1,01
	40,0	1,02	1,02	1,01	1,01
	32,0	1,02	1,02	1,01	1,01
	26,7	1,02	1,02	1,01	1,01
	22,9	1,02	1,02	1,01	1,01
	20,0	1,02	1,02	1,01	1,01

		χ			
	D/t	235	275	355	460
10000	106,7	1,01	1,01	1,01	1,00
	72,7	1,01	1,01	1,01	1,00
	64,0	1,01	1,01	1,01	1,00
	53,3	1,01	1,01	1,01	1,00
	45,7	1,01	1,01	1,01	1,00
	40,0	1,01	1,01	1,01	1,00
	32,0	1,01	1,01	1,01	1,00
	26,7	1,01	1,01	1,01	1,00
	22,9	1,01	1,01	1,01	1,00
	20,0	1,01	1,01	1,01	1,00

Tabla 21. Valores del coeficiente de reducción χ para las secciones CHS.

Esta verificación implica una gran cantidad de variables a considerar, desde el método de fabricación de los elementos CHS, calidad del material, selección de las correspondientes curvas de pandeo europeas, coeficientes de imperfección, condiciones de contorno, carga crítica de Euler y cálculo de la esbeltez adimensional. Con lo que se obtuvo que la totalidad de elementos CHS planteados presentan un valor de χ igual a 1.00 para todas las configuraciones seccionales y calidades de acero en este estudio, por lo tanto se asegura que los efectos de inestabilidad global quedan aislados de la respuesta estructural a obtener en el análisis. Se puede observar también que a medida que aumenta la longitud del elemento también lo hace la longitud crítica y disminuye la carga critica de pandeo, con lo que también lo hace el coeficiente de reducción χ, como es el caso de la longitud 10000mm, ya que los efectos de inestabilidad global comienzan a cobrar importancia en estos casos; de manera contraria ocurre cuando se acorta la longitud del elemento, disminuyendo la longitud crítica y aumentando la carga critica de pandeo junto con el valor χ, lo que aleja el efecto de este fenómeno sobre la capacidad seccional, como es el caso de la longitud 4000mm.

Se observa de igual manera que a medida que aumenta la calidad del acero para una relación D/t y longitud de elemento dada, disminuye el valor de χ, con lo que se puede considerar que el aumento de la resistencia hace al elemento más susceptible a efectos de inestabilidad global, esto ocurre debido a que la esbeltez adimensional aumenta, generando la disminución de χ por el consecuente incremento de Φ. Sin embargo ninguno de los casos presentó valores de χ menores a 1.00.

De esta manera la selección de elementos CHS con los parámetros seleccionados se considera válida para proceder con el estudio dentro de los alcances y objetivos propuestos.

3.2.3 Condiciones de contorno.

Ya que se plantea el estudio de elementos que funcionen principalmente como pilares, las condiciones de vinculación de estos en sus extremos serán perfectamente empotradas. Para ello se restringen los posibles desplazamientos de los nodos que forman las placas de apoyo de los pilares pero se liberan sus rotaciones. La placa de apoyo seleccionada es de espesor lo suficientemente grande para que su deformación por flexión sea insignificante y no afecte el comportamiento estructural de los elementos CHS.

Las acciones de compresión sobre los elementos serán impuestas a través de un desplazamiento inicial, generado por un determinado % N_{PL} en un análisis elástico, como se muestra en la tabla 19, y posteriormente se agrega el desplazamiento de cabeza del elemento con valor unitario e incremental para el análisis no lineal.

3.2.4 Material

Los materiales utilizados en el estudio son: S235, S275, S355 y S460. Definidos en los códigos (UNE EN 10025-2:2002, UNE-EN 10020:200), como se ha explicado en apartados anteriores.

Para la representación del material en los modelos de análisis estructural, se hará uso de una curva de tensión-deformación con comportamiento elasto-plástico perfecto, definida únicamente por el valor del límite elástico de cada material (f_y), como se muestra a continuación:

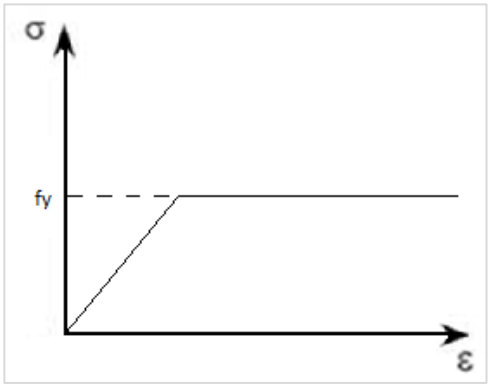


Fig. 21. Curva de σ-ϵ con comportamiento elasto – plástico perfecto.

Por otro lado el material se define con propiedades homogéneas y comportamiento mecánico isotrópico.

Aunque esta hipótesis de material elasto-plástico perfecto no representa la realidad de la curva tensión-deformación de las calidades de acero indicadas, permite aproximar la respuesta estructural en el régimen no lineal de manera satisfactoria para el estudio de tendencias globales de los elementos CHS analizados, teniendo un comportamiento conservador al evitar representar el endurecimiento por deformación del material. De esta manera los resultados obtenidos del análisis estructural estarán del lado de la seguridad con la posibilidad de ser ajustados a curvas de tensión-deformación que representen con mayor exactitud la respuesta del material.

4 MODELIZACIÓN NUMÉRICA

En el presente capítulo se busca explicar los aspectos más relevantes y la estructura metodológica del modelo numérico a utilizar para el análisis.

De igual manera se establecerá el esquema organizativo de los elementos CHS en función de las variables paramétricas escogidas, el criterio de modelización estructural por elementos finitos, densidad de mallado óptima, así como la estrategia de automatización del proceso de modelado, análisis, obtención y gestión de resultados mediante el uso de Scripts/subrutinas en lenguaje Python y VBA.

El análisis realizado se divide en dos etapas, un análisis lineal estático para cargar el elemento con su axil de compresión correspondiente (Step 1), representando el estado en servicio del pilar, y posteriormente inicia un desplazamiento de cabeza incremental, representando una acción accidental, analizada de manera no lineal con el método RIKS (Step 2), hasta alcanzar el número de incrementos suficientes para representar la respuesta estructural del elemento. Los aspectos que definen este proceso y sus consideraciones para el análisis se profundizan a continuación.

4.1 Elementos Finitos

Ya que el análisis es realizado a través del método de elementos finitos, previamente se debe seleccionar el tipo de elemento a utilizar para modelar los elementos CHS.

Los elementos Shell son usados para modelar estructuras en donde una dimensión (el espesor) es significativamente más pequeña que las otras dimensiones y las tensiones en la dirección del espesor son despreciables. Los elementos Shell se nombran en Abaqus iniciando con la letra "S". (Simulia B., 2012), y el primer número después de la letra indica el número de nodos del elemento, por lo que los elementos Shell cuadriláteros y triangulares serán S4 y S3 respectivamente.

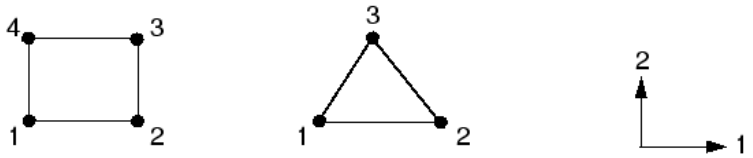


Fig. 22. Elementos finitos Shell S4 y S3.

A continuación se presentan las opciones de elementos finitos disponibles en Abaqus:

General-Purpose Shells	Thin-Only Shells	Thick-Only Shells
S4, S4R, S3/S3R, SAX1, SAX2, SAX2T, SC6R, SC8R	STRI3, STRI65, S4R5, S8R5, S9R5, SAXA	S8R, S8RT

Tabla 22. Tipo de elementos Shell - Abaqus.

Ya que los elementos CHS estarán formados por chapas con las condiciones necesarias para utilizar elementos tipo Shell, espesor delgado en relación a sus otras dos dimensiones, se utilizarán dos tipos de elementos finitos pertenecientes al grupo "General-Purpose Shells", los cuales se presentan a continuación:

Shells de orden geométrico lineal:

S4R: A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains.

S3: A 3-node triangular general-purpose shell, finite membrane strains.

Se utilizarán dos tipos de elementos finitos debido a que el mallado de modelos estructurales que presentan curvatura conlleva la formación de elementos triangulares para ajustar mejor la malla a la geometría, lo cual ocurre en la unión de los modelos de los elementos CHS con sus respectivas placas base.

4.2 Mallado

El objetivo del mallado es la discretización de las partes que conforman el modelo estructural en los elementos finitos definidos anteriormente, asignando previamente un tamaño máximo para cada elemento finito. De esta manera la malla generada se ajustará con mayor o menor exactitud al modelo estructural planteado, representando en mayor o menor medida la respuesta estructural esperada.

Lo que ocurre durante el proceso de mallado es que se sustituye el modelo estructural con geometría perfecta por uno alternativo formado por elementos finitos, los cuales mientras más pequeños sean se ajustarán mejor a la geometría del modelo estructural inicial. De tal manera a menor tamaño de elemento finito se obtendrá una mejor aproximación al comportamiento estructural de la geometría planteada, sin embargo no se puede realizar una discretización asignando un tamaño de elemento infinitamente pequeño, ya que la gran cantidad de grados de libertad generados y las subsecuentes ecuaciones constitutivas demandarían una capacidad de procesamiento computacional excesiva, ralentizando el proceso de cálculo sin obtener una mejora en los resultados en un orden de magnitud significativo para los propósitos de un ingeniero estructural, con lo que la manera correcta de proceder es generar un mallado lo suficientemente denso para ajustarse a la geometría sin comprometer la capacidad de cálculo de los ordenadores a utilizar ni el tiempo disponible para el análisis.

La limitante en la capacidad de procesamiento de cálculo es cada vez menor, por lo que se puede evitar la realización del estudio de convergencia y optimización del mallado, y pasar directamente a resolver los modelos estructurales asignando una densidad de mallado muy alta, con la que se tenga la seguridad de que el ajuste necesario es ampliamente superado; es el caso del presente estudio, donde se define un tamaño máximo de elemento finito de 80mm, lo cual para las dimensiones de los elementos CHS a analizar genera un mallado considerablemente denso. A continuación se muestra el ajuste entre la sección del modelo estructural inicial y el discretizado en elementos finitos, con el fin de ejemplificar la densidad de la malla escogida; se puede observar que el ajuste entre secciones es prácticamente perfecto.

	Secc. CHS
Geometria	Circular
D (mm)	1600
t (mm)	25
Area 1 (mm")	125664,0

	Secc. Discretizada
Geometria	Poligonal
n	63
a (mm)	80
Area 2 (mm")	126000,0

A1/A2
0,997

Tabla 23. Ajuste de mallado seleccionado para los modelos estructurales.

De esta manera se procede a establecer estas condiciones de mallado a todos los modelos de elementos CHS generados en este estudio para su posterior análisis. A continuación se muestran una serie de imágenes con la visualización del modelo de elementos finitos, en este caso para un elemento tipo de longitud 10000mm.

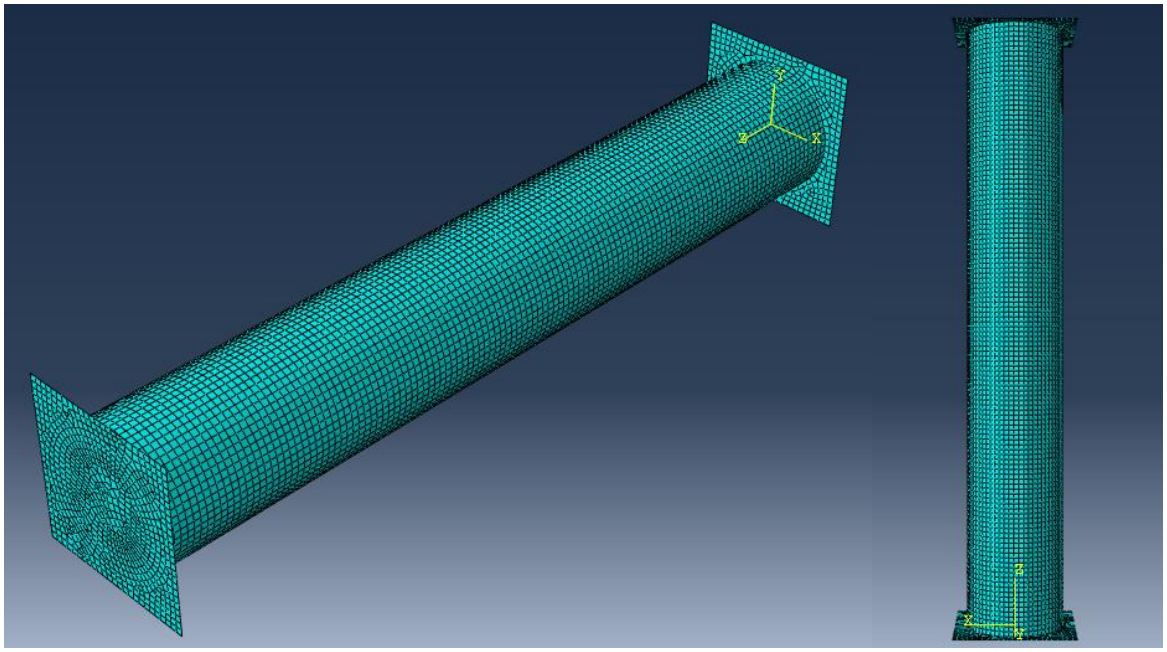


Fig. 23. Elemento CHS, vista general del mallado y modelo.

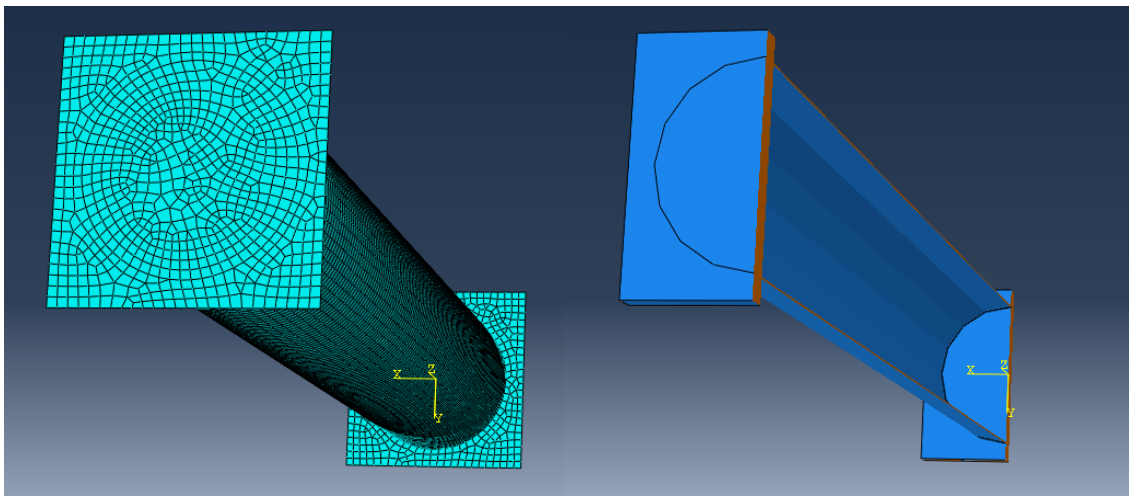


Fig. 24. Elemento CHS, modelo de elementos finitos y sección longitudinal.

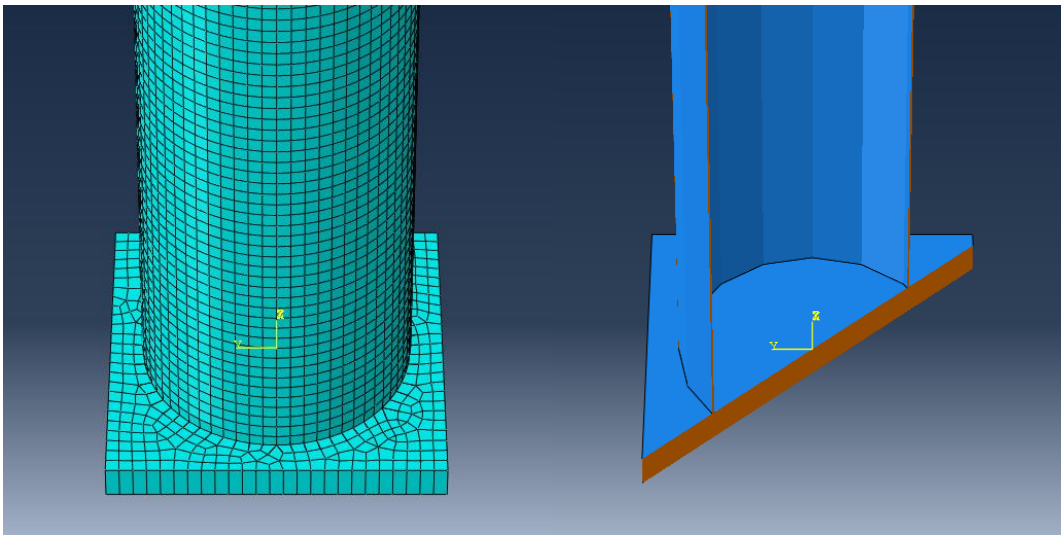


Fig. 25. Elemento CHS, Empotramiento - placa base.

4.3 Análisis RIKS

4.3.1 Colapso Inestable y Análisis Post-Pandeo

4.3.1.1 Método RIKS

Es un tipo de análisis disponible en el software Abaqus CAE 6.12 usado generalmente para predecir el colapso inestable y con no linealidad geométrica de una estructura; basado en el método de longitud de arco (arc-length) desarrollado originalmente por (Riks, The application of Newton's method to the problem of elastic stability, 1972), (Riks, An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, 1979) y (Wempner, 1971).

Puede incluir no linealidad del material y condiciones de apoyo, y suele continuar con un análisis de pandeo por autovalores (eigenvalues) para ofrecer información completa sobre el colapso de la estructura.

4.3.1.2 Respuesta inestable:

Los problemas estáticos con no linealidad geométrica a veces pueden presentar pandeo o un comportamiento de colapso, donde la respuesta de carga-desplazamiento muestra rigidez negativa y la estructura debe liberar energía de tensión para mantener el equilibrio. Varias aproximaciones son posibles para modelar dicho comportamiento, una es tratar la respuesta a pandeo de forma dinámica, con lo cual se suele modelar la respuesta con efectos de inercia incluida mientras la estructura falla. Esta aproximación es alcanzada fácilmente reiniciando el proceso estático terminado y cambiando a un proceso dinámico cuando la solución estática se vuelva inestable. En algunos casos el control de desplazamientos puede proveer la solución, incluso cuando la fuerza de reacción disminuye mientras el desplazamiento aumenta.

Alternativamente, los estados de equilibrio estático durante la fase inestable de la respuesta pueden ser encontrados usando el método RIKS. Este método es usado para casos donde la carga es proporcional; eso es, donde las magnitudes de carga están gobernadas por un solo parámetro de escala. El método puede proveer soluciones incluso en casos de respuesta compleja e inestable, como se muestra en la Fig. 26.

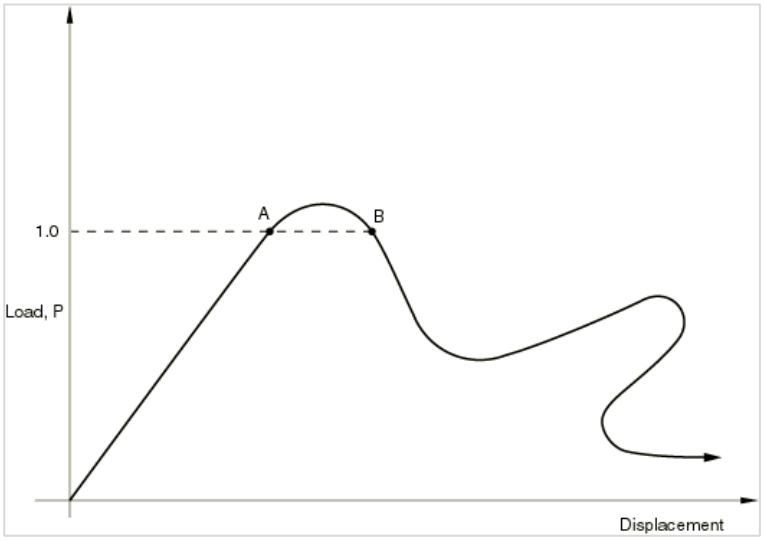


Fig. 26. Carga proporcional con respuesta inestable. (Simulia, 2012).

En casos simples el análisis lineal de autovalores puede ser suficiente para la evaluación del diseño; pero si hay incertidumbre sobre la no linealidad del material, no linealidad del material anterior al pandeo, o respuesta inestable post-pandeo, un análisis RIKS de carga-desplazamiento se puede realizar para investigar el problema a profundidad.

El método RIKS usa la magnitud de carga como una variable adicional; resuelve la respuesta estructural simultáneamente para cargas y desplazamientos. Por lo tanto, otra magnitud debe ser usada para medir el progreso de la solución; Abaqus usa el método de longitud de arco (arc length) a lo largo del camino de equilibrio estático en el espacio de carga-desplazamiento, esta aproximación provee soluciones sin importar si la respuesta es estable o inestable.

4.3.1.3 Carga proporcional

Si el análisis RIKS es la continuación de un análisis previo, lineal estático en el caso del presente estudio, cualquier carga que exista al principio del análisis no se redefine y se trata como cargar permanente con magnitud constante, es el caso de la carga debida al desplazamiento de axil de compresión ($\%N_{PL}$). Una carga cuya magnitud es definida en el análisis RIKS se etiqueta como carga referencia y son intensificadas a partir de la carga permanente inicial al valor de referencia especificado; en el presente estudio el desplazamiento de cabeza de los elementos CHS vendría a presentar esta etiqueta de carga de referencia.

La carga durante un paso del análisis RIKS es siempre proporcional. La magnitud de carga es definida por:

$$P_{total} = P_0 + \lambda(P_{ref} - P_0)$$

Ecuación 19. Carga total RIKS. (Simulia B. , 2012).

Donde P_0 es la carga permanente, $Pref$ es el vector de carga de referencia, y λ es el factor de proporcionalidad de carga, Load Proportional Factor (LPF). El factor de proporcionalidad de carga se encuentra como parte de la solución y Abaqus lo muestra para cada incremento, con lo que se puede observar que tanta carga o desplazamiento se está aplicando con respecto al inicial.

4.3.1.4 Incremento

Abaqus usa el método de Newton para resolver la ecuación del equilibrio no lineal. El método RIKS utiliza únicamente el 1% de extrapolación para el incremento de tensión.

Se define un incremento inicial para el método de longitud de arco (arc length) en el camino del equilibrio estático, Δl_{in}, cuando se define el análisis; y el factor de proporcionalidad de carga inicial, $\Delta\lambda_{in}$, se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta\lambda_{in} = \frac{\Delta l_{in}}{l_{period}}$$

Ecuación 20. Incremento inicial RIKS. (Simulia B. , 2012).

Donde l_{period} es el factor de escala de longitud de arco definido por el usuario (normalmente 1) y el valor de $\Delta\lambda_{in}$ es usado sólo durante la primera iteración del análisis RIKS. Para las posteriores iteraciones e incrementos el valor de λ es calculado automáticamente, por lo que no se tiene control sobre el valor de la magnitud de carga. Los valores máximos y mínimos de longitud de arco, $\Delta\lambda_{min}$ y $\Delta\lambda_{max}$, pueden ser utilizados para controlar el incremento automático. A continuación se presentan los parámetros definidos para el análisis RIKS del presente estudio.

$\Delta\lambda_{in}$	0.05
$\Delta\lambda_{min}$	1E-009
$\Delta\lambda_{max}$	1E+036
Estimated total arc length	1.00

Tabla 24. Parámetros establecidos para el análisis RIKS.

4.3.1.5 Finalización del Análisis RIKS

Desde el momento que la magnitud de carga es parte de la solución, se necesita un método para especificar cuándo se finaliza el análisis. Se puede especificar un valor máximo del factor de proporcionalidad de carga, $\Delta\lambda_{end}$, o un valor de desplazamiento máximo para un grado de libertad específico. El análisis terminará cuando alguno de los valores sea sobrepasado. Si ninguna de estas condiciones de finalización es definida, el análisis va a continuar para el número de incrementos especificado en la definición del análisis, en el proceso de análisis para los elementos CHS de este estudio, se fija una cantidad de cuarenta incrementos para la finalización del análisis RIKS.

Los resultados obtenidos del análisis RIKS corresponden a todos los parámetros que definen el estado estático del elemento modelado para cada uno de los pasos que se generaron en el análisis. Con lo que se puede representar fácilmente el comportamiento no lineal de las variables involucradas, en nuestro caso reacciones y desplazamientos.

4.4 Scripting

Existen dos tendencias en la programación, la primera es conocida como la programación tradicional o programación de sistemas, la cual está abocada a la realización de aplicaciones normalmente grandes, robustas y con su rango de propósitos bien definido, la cual suele utilizar leguajes de programación cómo *Fortran1, C, C++, C#, o Java* (Langtangen, 2008) para la escritura de tales aplicaciones; y por otro lado el Scripting o Script language, la cual es una forma de lenguaje de programación que soporta Scripts, guiones o subrutinas, los cuales son programas escritos para correr en un ambiente definido con el propósito de automatizar la ejecución de comandos, acciones en sistemas operativos, procesamiento de texto o escritura de reportes sobre otro sistema, que de otra manera serian ejecutados paso a

paso por un usuario. Muchos lenguajes están disponibles para la escritura de Scripts, tales como *Perl, Python, Ruby, Scheme, or Tcl* (Langtangen, 2008), por lo que un sistema basado o abierto a la interpretación de Scripts podrá estar sujeto a la automatización de los comandos o tareas escritos en él.

El software de análisis estructural Abaqus usa el lenguaje de Scripting Python, de código abierto y orientado a objetos, para la ejecución de subrutinas y líneas de comando establecidas en un archivo Script.

El planteamiento paramétrico del total de elementos para el estudio debe ser ejecutado de una manera práctica, reproducible y eficiente que permita la formación de los 1760 modelos estructurales para su posterior análisis, y ya que es inviable realizar manualmente cada uno de estos modelos con sus correspondientes propiedades, condiciones de contornos y esfuerzos aplicados, así como la posterior extracción de resultados, es necesario hacer uso de un Script que permita automatizar el proceso. Dicho Script/subrutina redactado en un archivo de texto, contiene todos los comandos necesarios para que a partir de un modelo estructural base/Template de los elementos CHS (con parámetros aleatorios) se puedan generar el resto de elementos del estudio paramétrico.

4.4.1 Scripting de Abaqus

Abaqus utiliza subrutinas Python para comunicarse entre distintos módulos como Abaqus/CAE, Abaqus/Viewer y otros solvers para generar tareas que serían prácticamente imposibles de realizar a través de la GUI (Graphic User Interface), la cual puede observarse en la Fig 27. *Si se analiza un pequeño número de simulaciones no se justifica realmente programar, la interfaz gráfica es mejor en estos casos, quizás la mejor opción. Pero por el contrario, si se analizan numerosas simulaciones,* ***estudios paramétricos*** *o cualquier tipo de problema que sea preferible automatizar, entonces las subrutinas de Python son la mejor opción.* (Charleux, 2009-2010). Las referencias correspondientes a los Scripts en Abaqus 6.12 pueden encontrarse en (Simulia B., 2012).

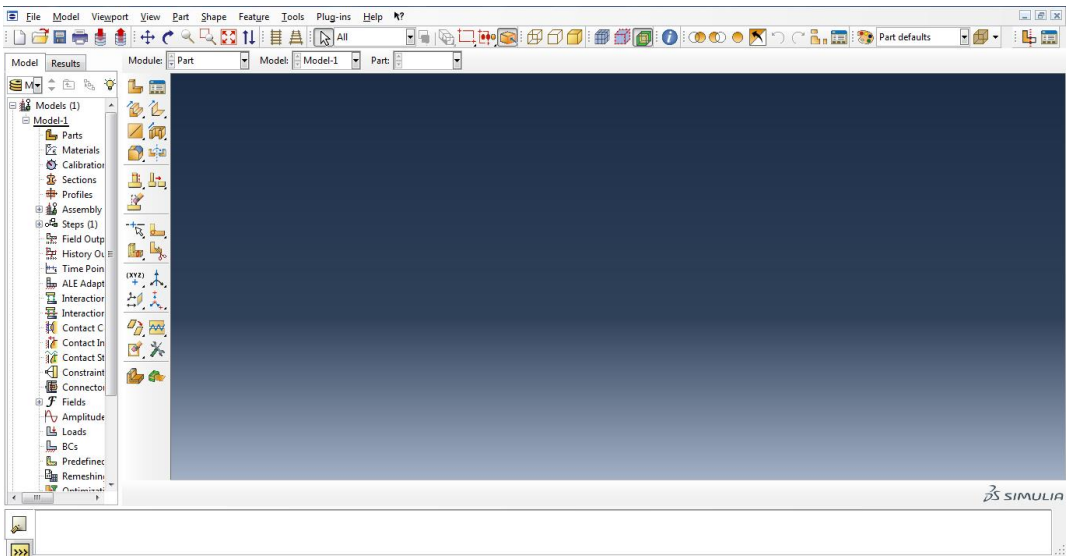


Fig. 27. Interfaz gráfica de usuario (GUI).

Al modelar un elemento estructural en Abaqus se generan una serie de archivos .DAT .FIL .INP .ODB .PAR .PES .PMG .PRT .SIM y .STA, en los cuales se encuentra toda la información del modelo. Los archivos .INP y .ODB son de especial interés en este estudio ya que en el archivo .INP se definen todos los aspectos del modelo estructural referentes a sus propiedades geométricas, mecánicas, solicitaciones, condiciones de contorno, tipo de análisis, entre otros; mientras que en el archivo .ODB se encuentra toda la información del post-proceso, como reacciones, desplazamientos y tensiones, por mencionar algunos.

Para continuar el estudio considerando la utilización de esta herramienta, se organizarán los elementos CHS en subgrupos y con una nomenclatura que permita la fácil numeración de cada elemento para el uso de los Scripts y más adelante para la obtención de los resultados. De esta manera se crearán cuatro subgrupos principales a partir de las longitudes, ya que va a ser un parámetro de pocos valores en el estudio paramétrico y variarlo a través de una subrutina es más laborioso; dentro de cada subgrupo de longitud se presentan cuatro calidades de acero utilizado, ya que cada acero va a tener su vector correspondiente de desplazamiento por axil de compresión (% N_{PL}), como se muestra en el apartado 3.2.1.

Una vez separados los 1760 elementos CHS en función de sus longitudes y aceros, es sencillo generar las subrutinas variando el resto de parámetros de estudio en el modelo base/Template (espesor y vector de desplazamientos de compresión). A continuación se muestra la organización planteada para los elementos CHS y su correspondiente nomenclatura.

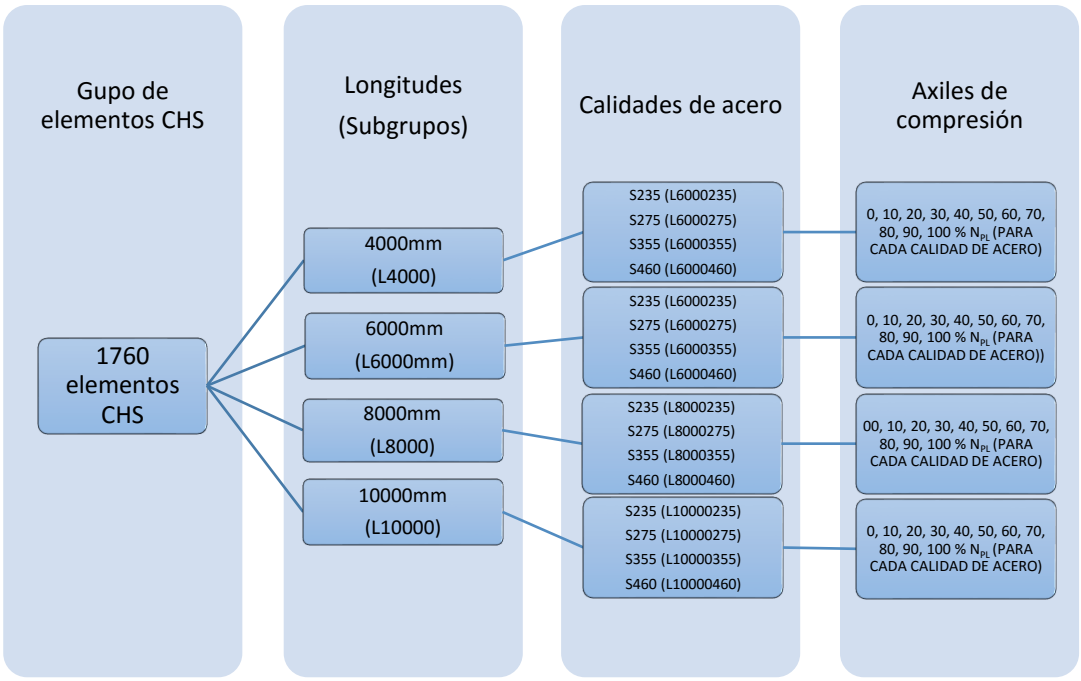


Fig. 28. Organización del grupo de elementos CHS.

De la matriz de parámetros en la Fig 28 se genera la totalidad de elementos CHS a analizar. Esta combinación vincula cuatro longitudes, cada una con cuatro calidades de acero y cada acero con once axiles de compresión (0%-100% N_{PL}) en función de su valor de f_y, generando un total de 1760 casos.

El Script/Subrutina desarrollado es de sencilla modificación para aplicarlo a los distintos casos de la organización planteada. Su estructura parte de definir el estudio paramétrico, sus variables, sobre qué archivo base/template se va a ejecutar, definición de los rangos en los que pueden existir los parámetros definidos y sus posibles valores, así como el método de combinación paramétrica, el cual en este caso de estudio es MESH para garantizar la generación de todas las posibles combinaciones entre los valores de las variables paramétricas definidas.

Una vez generados todos los Scripts se ejecutan en modo CMD de Windows para la obtención de los archivos .INP del total de elementos y, más importante aún, de los archivos .ODB con los resultados de cada uno de los análisis estructurales. A continuación se presenta uno de los Scripts utilizados, en este caso el modelo estructural base/template es un elemento CHS de 10000mm a partir del cual se generaron los 110 elementos del grupo L10000235.

```
parametr= ParStudy(par=('t','fy','a'), name='L10000')
parametr.define(CONTINUOUS, par='t', domain=(15,80))
parametr.define(CONTINUOUS, par='fy', domain=(235))
parametr.define(CONTINUOUS, par='a', domain=(0.0,-11.2))
valores_t = (15,22,25,30,35,40,50,60,70,80)
valores_fy = (235)
valores_a = (0.0,-1.1,-2.2,-3.4,-4.5,-5.6,-6.7,-7.8,-9.0,-10.1,-11.2)
parametr.sample(VALUES, par='t', values=valores_t)
parametr.sample(VALUES, par='fy', values=valores_fy)
parametr.sample(VALUES, par='a', values=valores_a)
parametr.combine(MESH)
parametr.generate(template='L10000')
parametr.execute(ALL)
import odbAccess
```

Fig. 29. Script/Subrutina de Abaqus.

Repitiendo el procedimiento para el resto de subgrupos y calidades de acero con sus correspondientes Scripts, se logra modelar y ejecutar el análisis estructural de la totalidad elementos CHS de manera automática y eficiente, almacenando los archivos generados en los directorios correspondientes para la posterior extracción y gestión de resultados.

4.5 Macros

Una vez obtenidos los archivos .ODB es necesario extraer los resultados y gestionarlos para generar información de valor con respecto al comportamiento estructural de los elementos CHS. Las macros se convierten en este punto en otra herramienta conveniente para agilizar tales procesos.

Las macros son aplicaciones internas de un sistema que permiten grabar una serie de comandos ejecutados por el usuario a través de la GUI (Graphical User Interface) con el fin de poder reproducirlos posteriormente de manera automática. La serie de comandos queda registrada por la macro en un archivo de órdenes escrito en un lenguaje Scripting y que permite ser modificado dentro del sistema, si éste presenta un editor, o de manera externa

con un editor de texto. De tal manera se pueden entender las macros como un asistente de programación dentro del sistema para escribir Scripts/subrutinas mediante los comandos ejecutados a través de la GUI. El propósito de utilizar macros en este estudio es que a partir de una macro base se puede modificar su código para que se ejecute en el total de archivos (debidamente numerados) dentro de un directorio específico, para extraer y gestionar los resultados de interés.

4.5.1 Macros de Abaqus

Abaqus presenta de manera interna la posibilidad de generar macros, las cuales quedan registradas en un archivo *abaqusMacros.py*c para su posterior ejecución. En dicho archivo se puede encontrar el código del Script/Subrutina generado que perímete correr la macro, y se puede modificar a voluntad del usuario utilizando un editor de texto externo.

Este estudio requiere de la extracción de las reacciones y desplazamientos asociados al desplazamiento de cabeza de los elementos flexo-comprimidos CHS, por lo que a partir del archivo .ODB de un elemento CHS perteneciente a alguno de los subgrupos, se activó la creación de una macro a través de la GUI para generar el Script de la serie de comandos necesarios en la generación de dos reportes, uno de reacciones en la parte superior del pilar y otro para los desplazamientos asociados, cada reporte incluye los valores de cada incremento del análisis RIKS para ese elemento CHS.

Una vez obtenido el Script de la macro se pueden agregar contadores para que el proceso se ejecute al siguiente archivo de una secuencia de numeración dentro de un directorio especifico, modificar de manera sencilla dicho directorio para ejecutar la macro en otros subgrupos de elementos CHS y calidades de acero, e incluir la etiqueta correspondiente para cada reporte en función del archivo .ODB al cual pertenece. A continuación se muestran algunas de las modificaciones principales ejecutadas sobre un archivo Script de una macro base para la extracción de reportes de resultados.

```
import visualization
import xyPlot
import displayGroupOdbToolset as dgo
import connectorBehavior
session.mdbData.summary()
o1 = session.openOdb(
    name='C:/Users/usuario/Desktop/Work/460/L6000/L6000_p1_c1.odb')
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=o1)
odbName=session.viewports[session.currentViewportName].odbDisplay.name
```

Fig. 30. Segmento de macro base en Abaqus.

```
import visualization
import xyPlot
import displayGroupOdbToolset as dgo
import connectorBehavior
for i in range (0,111):
        session.mdbData.summary()
        o1 = session.openOdb(
            name='C:/Users/usuario/Desktop/Work/460/L6000/L6000_p1_c'+str(i)+'.odb')
        session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=o1)
        odbName=session.viewports[session.currentViewportName].odbDisplay.name
```

Fig. 31. Segmento de macro modificada en Abaqus, contador y directorio.

```
session.xyDataObjects.changeKey(tmpName, 'RX')
x0 = session.xyDataObjects['RX']
session.writeXYReport(fileName='RX_c1.rpt', xyData=(x0, ))
x0 = session.xyDataObjects['RX']
session.writeXYReport(fileName='RX.rpt', xyData=(x0, ))
```

Fig. 32.Segmento de macro base en Abaqus, nombre del reporte.

```
session.xyDataObjects.changeKey(tmpName, 'RX')
x0 = session.xyDataObjects['RX']
session.writeXYReport(fileName='RX_c'+str(i)+'.rpt', xyData=(x0, ))
x0 = session.xyDataObjects['RX']
session.writeXYReport(fileName='RX.rpt', xyData=(x0, ))
```

Fig. 33.Segmento de macro modificada en Abaqus, nombre del reporte con contador.

De esta manera se obtiene la totalidad de reportes de reacciones y desplazamientos de cabeza de los elementos CHS, ordenados debidamente por subgrupo y calidad de acero, así como numerados en función del caso que representan, para proceder a la interpretación del comportamiento estructural.

4.5.2 Macros de Excel/Visual Basic

Una vez se obtienen los reportes de resultados se gestionarán en Excel para la generación de curvas de carga-desplazamiento, obtención de la relación de ductilidad δ_3/δ_1, ángulo α y la relación paramétrica $D/t/\epsilon$, para cada caso de estudio. Así como gráficos de dispersión de datos vinculando los elementos CHS para poder observar el comportamiento de la ductilidad δ_3/δ_1 y ángulo α de los subgrupos.

Este proceso se realiza de igual manera con macros para automatizar la ejecución de la línea de comandos en cada caso, por lo que se sigue un procedimiento similar al planteado en el apartado anterior, con la excepción de que Excel incorpora su propio editor de programación en lenguaje Visual Basic (VBA), con lo que una vez generada la macro base se puede modificar directamente en el editor del sistema para agregar los correspondientes contadores, que al igual que en el caso de Abaqus, buscan continuar la ejecución de la marco o subrutina en el siguiente archivo de datos (reportes) de la secuencia de numeración

establecida y dentro del directorio seleccionado. A continuación se muestran algunas de las modificaciones principales ejecutadas sobre una macro base para la gestión de resultados.

```
ChDir "C:\Users\usuario\Desktop\Work\L6000\L6000235\Reacc vs Desp\RXvsUX\RX"
Workbooks.OpenText Filename:= _
    "C:\Users\usuario\Desktop\Work\L6000\L6000235\Reacc vs Desp\RXvsUX\RX\RX_c1.rpt" _
    , Origin:=xlMSDOS, StartRow:=1, DataType:=xlDelimited, TextQualifier:= _
```

Fig. 34. Segmento de macro base en EXCEL.

```
For i = 1 To 110
ChDir "C:\Users\usuario\Desktop\Work\L6000\L6000235\Reacc vs Desp\RXvsUX\RX"
Workbooks.OpenText Filename:= _
    "C:\Users\usuario\Desktop\Work\L6000\L6000235\Reacc vs Desp\RXvsUX\RX\RX_c" & i & ".rpt" _
    , Origin:=xlMSDOS, StartRow:=1, DataType:=xlDelimited, TextQualifier:= _
```

Fig. 35. Segmento de macro base en EXCEL, contador y directorio.

```
Sheets("L6000_p1_c1").Select
Sheets("L6000_p1_c1").Move Before:=Workbooks("Plantilla.xlsx").Sheets(1)
Sheets("Plantilla").Select
Sheets("Plantilla").Copy Before:=Sheets(1)
Sheets("Plantilla (2)").Select
Sheets("Plantilla (2)").Name = "Caso_L6000_p1_c1"
Range("B2:D2").Select
```

Fig. 36. Segmento de macro base en EXCEL, nombre de hojas.

```
Sheets("L6000_p1_c" & i).Select
Sheets("L6000_p1_c" & i).Move Before:=Workbooks("Plantilla.xlsx").Sheets(1)
Sheets("Plantilla").Select
Sheets("Plantilla").Copy Before:=Sheets(1)
Sheets("Plantilla (2)").Select
Sheets("Plantilla (2)").Name = "Caso_L6000_p1_c" & i & ""
Range("B2:D2").Select
```

Fig. 37. Segmento de macro base en EXCEL, nombre de hojas con contador.

De esta manera se obtiene la totalidad de curvas de carga-desplazamientos de cabeza de todos los elementos CHS, así como sus relaciones paramétricas, ángulos α y comportamiento dúctil; debidamente ordenados dentro del subgrupo y calidad de acero al que pertenece cada caso, y con las respectivas numeraciones en función del elemento que representan, para proceder a la interpretación del comportamiento estructural.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Planteamiento del análisis

En el presente capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las 1760 simulaciones realizadas en Abaqus, correspondientes al estudio paramétrico de los elementos CHS sometidos a compresión y desplazamientos de cabeza para la determinación de la ductilidad en función de las variables paramétricas: espesor (t), longitud (L), axil de compresión (% N_{PL}) y calidad de acero (f_y).

La ductilidad será estimada acorde a lo explicado en el apartado 3.1.3, en donde la expresión δ_3/δ_1 representa la proporcionalidad de incursión del elemento estructural en un comportamiento no lineal una vez superado el 80% de la carga máxima (V_{max}) hasta llegar al mismo valor post-agotamiento, a partir del cual ya se considera el fallo estructural.

El ángulo α será medido según lo indicado en el apartado 3.1.4, en donde α representa el ángulo en grados que forma la rama post-agotamiento de la curva carga-desplazamiento con la vertical, utilizando para su medición la recta que une a los puntos de la rama post-agotamiento asociados al 80% V_{max} y 70%V_{max}. Este valor indica la tasa de disminución de resistencia a cortante en función del desplazamiento de cabeza.

Por otro lado, para vincular los valores de ductilidad δ_3/δ_1 y ángulo α con los parámetros seccionales de los elementos CHS, se hará uso de la relación:

$$\frac{\frac{D}{t}}{\epsilon}$$

Ecuación 21. Relación paramétrica.

Donde D es el diámetro del elemento, 1600 mm en todos los casos, t es el espesor y ε viene dado por la siguiente expresión:

$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	f_y(N/mm²)	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Tabla 25. Valores de ε.

La ecuación 21 se refiere a la esbeltez de chapa del elemento, la misma que en los estudios de investigación de (Kiymaz, 2005) y (Lanhui Guoa, 2013) presentados en el apartado 2.3, con la diferencia de estar relacionada a la calidad del acero utilizado a través del término ε de la tabla 25, con lo que se logra vincular la ductilidad a los parámetros que definen las propiedades geométricas y mecánicas de las secciones CHS.

El comportamiento global del grupo de elementos CHS no es de gran significado si no se comprende cómo cada parámetro condiciona la ductilidad δ_3/δ_1, ángulo α y en qué medida, ya que para un ingeniero proyectista es de interés conocer qué acción durante el diseño es más eficaz para obtener un comportamiento estructural esperado. De tal manera, para desarrollar el análisis se inicia presentando el mecanismo de fallo estructural para un elemento singular cuya configuración paramétrica no diste en exceso del resto de elementos simulados, con el fin de familiarizar al lector con la respuesta estructural obtenida; para ello se hará uso del elemento CHS con parámetros de longitud=6000mm, f_y= 275 N/mm2, t=40mm, desplazamiento de compresión asociado al 50% de N_{PL} para observar el comportamiento a flexo-compresión y desplazamiento de compresión asociado al 0% de N_{PL} para observar el comportamiento a flexión pura.

Seguidamente se analiza la influencia de las variables paramétricas: espesor (t), longitud (L), axil de compresión (% N_{PL}) y calidad de acero (f_y), sobre la ductilidad δ_3/δ_1 y el ángulo α para el mismo elemento singular, presentando de igual manera las curvas de carga-desplazamiento en función de cada parámetro vinculado. Dicho comportamiento es similar para todos los elementos CHS, por lo que se utilizará de referencia para continuar con el análisis de los subgrupos.

Posteriormente se presenta la ductilidad δ_3/δ_1 y ángulo α de los subgrupos (L4000, L6000, L8000 y L10000) a través de gráficas de dispersión de datos, para analizar el comportamiento general en función de la relación paramétrica ($D/t/\varepsilon$) para longitudes fijas. Los datos representados en cada subgrupo excluyen aquellos valores que a juicio del autor desvirtúan la tendencia apreciable en cada subgrupo y no aportan valor a los resultados por representar situaciones de diseño improbables, como es el caso de 0% y 100% de N_{PL}.

Finalmente se plantean expresiones de diseño con las tendencias observadas a lo largo del análisis, pudiendo estimarse la ductilidad en función de la esbeltez geométrica del pilar (elemento CHS) conociendo su diámetro, espesor y f_y del material.

5.2 Mecanismo de fallo

5.2.1 Flexo-compresión

La evolución de la respuesta estructural a flexo-compresión se presenta para el elemento CHS con L=6000mm, f_y=275 N/mm2, t=40mm y 50% N_{PL} de compresión. La etapa inicial en este comportamiento estructural corresponde a la finalización del análisis estático lineal en Abaqus y el inicio del análisis RIKS, en donde el elemento presenta la totalidad del axil de compresión (50% N_{PL}), simulando el estado de servicio con tensiones distribuidas uniformemente en todo el elemento, y posteriormente comienza a someterse al cortante impuesto por el desplazamiento de cabeza con carácter incremental, simulando la carga accidental.

A continuación se presenta en la Fig 38 la curva carga-desplazamiento con los distintos incrementos del análisis RIKS para el desplazamiento de cabeza del pilar.

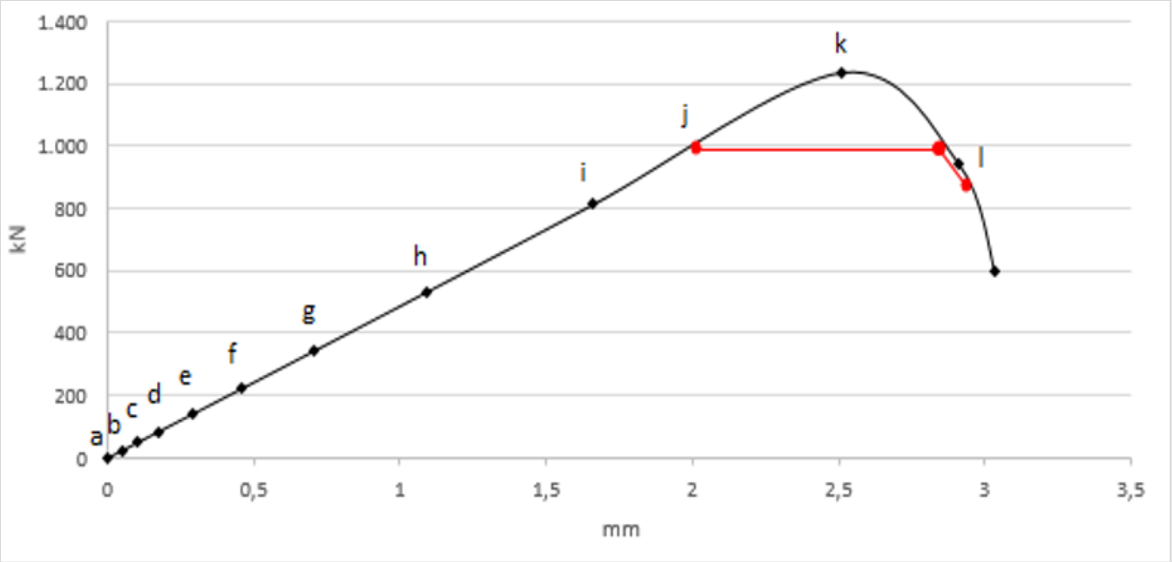


Fig. 38. Diagrama Carga - desplazamiento, L6000275 t=40mm 50%N_{PL}.

Los valores de interés obtenidos para esta curva son: V_{max}= 1236,5 kN, 70%V_{max}= 865,6 kN, 80%V_{max}= 989,2 kN, D/t/ε=43.3, δ_3/δ_1=1.41 y α=0.042. El comportamiento de la respuesta estructural es lineal hasta el onceavo incremento del análisis RIKS, a partir del cual se pierde resistencia a cortante a medida que aumenta el desplazamiento de cabeza. A continuación se muestran las distribuciones de tensiones de Von Mises para cada uno de los incrementos de la Fig 38.

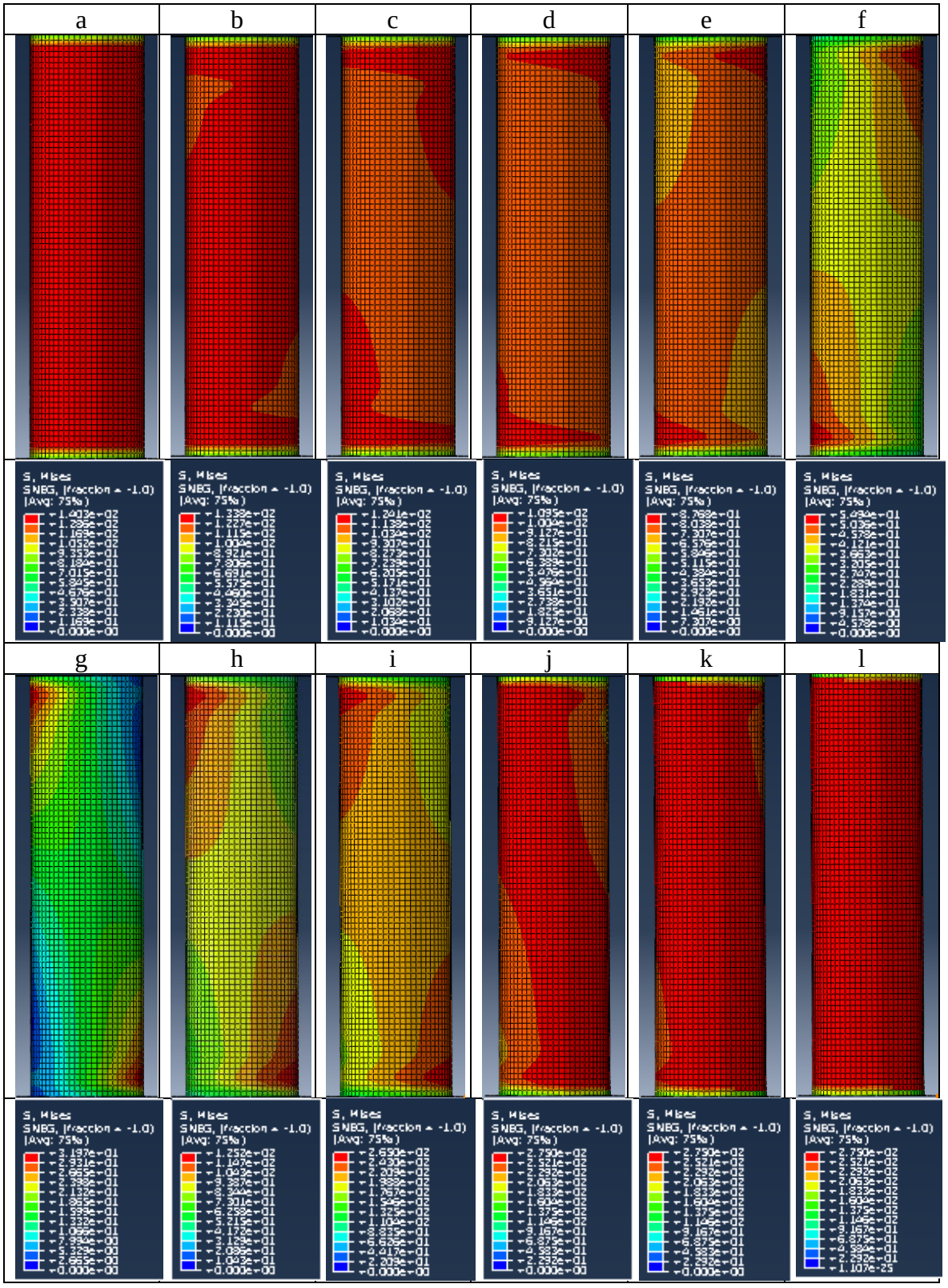


Fig. 39. Evolución de las tensiones de Von Mises, flexo - compresión.

El incremento (a) muestra la compresión de 50% N_{PL} distribuida uniformemente sin desplazamiento de cabeza aplicado sobre el pilar, corresponde de esta manera al estado final del análisis estático lineal (Step 1) e inicio del análisis RIKS (Step 2).

Se observa que a medida que el elemento CHS experimenta incremento en el desplazamiento de cabeza se desvía la compresión hacia una parte de las secciones transversales, al igual que se descomprime el elemento estructural debido al aumento en la distancia relativa entre los apoyos, al desplazar uno de ellos perpendicularmente al eje que los une.

La tensión de compresión de todo el elemento CHS disminuye por la tracción generada por la deformación longitudinal, la cual aumenta con cada desplazamiento de cabeza; de la misma manera aumenta el momento de empotramiento, el cual desvía las tensiones de compresión en las secciones transversales de los apoyos. Esa desviación además de cambiar el estado tensional sobre la secciones transversales, también condiciona gradualmente el ancho de lo que se consideraría panel comprimido en el elemento CHS y por tanto la vulnerabilidad ante fenómenos de instabilidad, ya que al disminuir la profundidad del eje neutro por el aumento del momento flector se acorta el arco de sección comprimido (b) aumentando la esbeltez del panel, como puede observarse en la Fig 40, la cual se asocia a la evolución entre los incrementos (a) y (f) de la Fig 39.

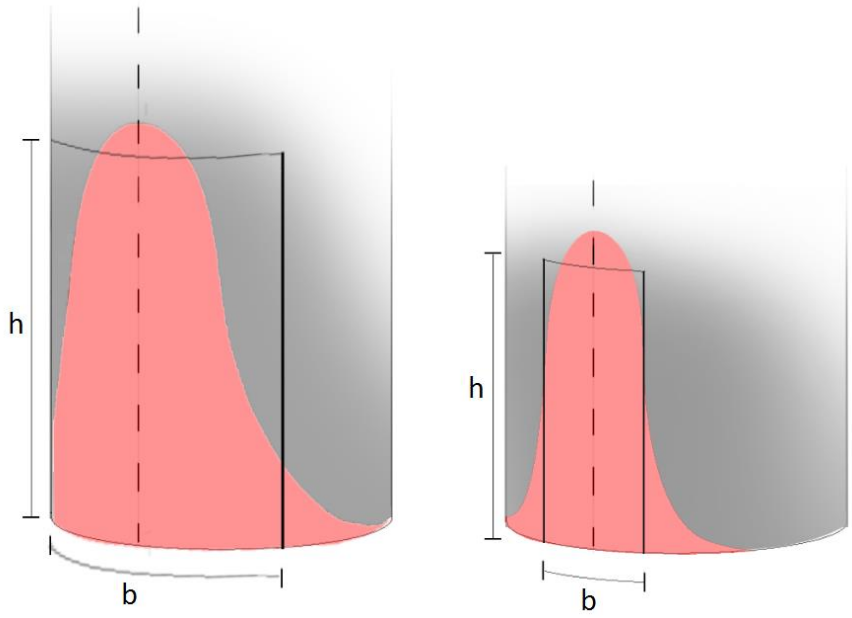


Fig. 40. Desviación de tensiones de compresión.

Ente los incrementos (a) y (f) el comportamiento del elemento CHS es el de un pilar que pasa de estar comprimido bajo su axil de servicio a flexo-comprimido, descomprimiéndose gradualmente con el aumento del desplazamiento de cabeza accidental y presentando desviación de las tensiones de compresión en las secciones transversales. Al llegar al incremento (f) la compresión y tracción se igualan en el extremo opuesto al panel comprimido, en dicho incremento se observa la descompresión de prácticamente todo el elemento menos en las zonas de tensiones de compresión desviadas por los momentos de

empotramiento, con la máxima desviación y menor arco de concentración de tensiones en la sección (b).

Seguidamente en el incremento (g) toda la sección transversal esta traccionada, y a medida que aumenta el desplazamiento de cabeza esas tensiones de tracción pasan de estar desviadas a estar uniformes y alineadas con el eje del elemento, como puede verse es los incrementos posteriores; en este punto el sistema resistente a cortante continua siendo eficaz hasta el incremento (k), asociado al agotamiento del elemento CHS. Finalmente, en el incremento (l) ocurre la desaparición del sistema resistente a cortante y el inicio de un comportamiento a tracción pura, por lo que estados de carga superiores no son considerados.

El factor importante en el mecanismo de fallo no es la magnitud de la tensión de compresión a lo largo del incremento de los desplazamientos de cabeza, la cual puede observarse en la Fig. 39, es el acortamiento en la longitud del arco de circunferencia en donde se encuentra la mayor parte de esa tensión de compresión, Fig 40. Esto origina que el panel relativo aumente gradualmente su esbeltez, lo cual, y como se ha mencionado a lo largo del estudio, está vinculado a la aparición de fenómenos de inestabilidad local y perdida de la capacidad del elemento en estados superiores de carga debido a deformaciones plásticas por abolladura, las cuales condicionan las capacidades de la sección transversal y la posterior respuesta estructural.

La deformada está en función de los efectos causados por la compresión y el cortante sobre elemento, como puede verse en la Fig 41; en el primero se observa un incremento en el radio de las secciones por efecto de la compresión, lo cual próximo al empotramiento causa tensiones cortantes coplanares entre las secciones debido al bloqueo que impone el apoyo a la deformación en el plano seccional, mientras que el cortante y su desplazamiento de cabeza asociado trasladan las secciones en sus planos, generando un momento flector y concentrando de manera gradual la compresión en un segmento de la sección transversal de los apoyos, como se ha mencionado previamente.

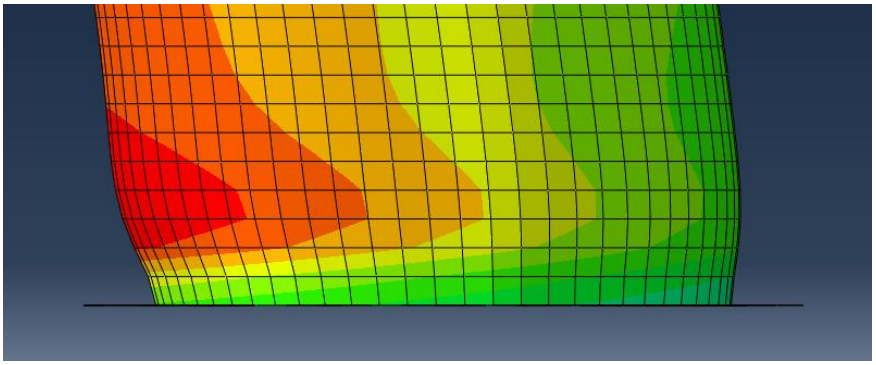


Fig. 41. Distribución de tensiones en el fallo, incremento (f)..

5.2.2 Flexión

El mecanismo de fallo en función de la esbeltez de chapa y por ende en función de la clasificación seccional según la norma EAE (Ministerio de Fomento, 2012), se analiza utilizando el elemento CHS de longitud 6000mm, f_y=275 N/mm2, para el caso de 0% N_{PL} y

los espesores t=15mm – t=80mm. La razón para evaluar la respuesta estructural con 0% N_{PL} es obtener un modo de fallo asociado a flexión pura en el elemento.

Para observar cómo D/t afecta esta respuesta estructural se seleccionan los espesores extremos que generen las secciones con mayor y menor esbeltez de chapa, y por tanto, peor y mejor clasificación en su sección transversal. De tal manera la sección con espesor

t=15mm corresponde a una clase 4 mientras que la sección con t=80mm a una clase 1, como se muestra en la siguiente tabla.

	Acero
D/t	275
106,7	Clase 4
20,0	Clase 1

Fig. 42. Clasificación seccional (L6000275, t=15-80mm).

En principio se espera que a mayor esbeltez menor capacidad de plastificación y rotación, así como una reducción en la capacidad de carga debido segmentos seccionales afectados por efectos de abolladura en el panel comprimido del elemento, mientras que a menor esbeltez mayor capacidad de plastificación y rotación sin presencia de fallo por abolladura, con lo que la integridad seccional se mantiene una vez superado el límite elástico. A continuación se presentan los modos de fallo, ampliados por un factor de escala de 5.00, para el elemento CHS (L=6000mm, f_y=275 N/mm2 y 0% N_{PL}) con los espesores t=15mm (D/t/ε =115.86 y t=80mm (D/t/ε =21.73) una vez superado el desplazamientos asociado al 80% de la carga máxima post-agotamiento.

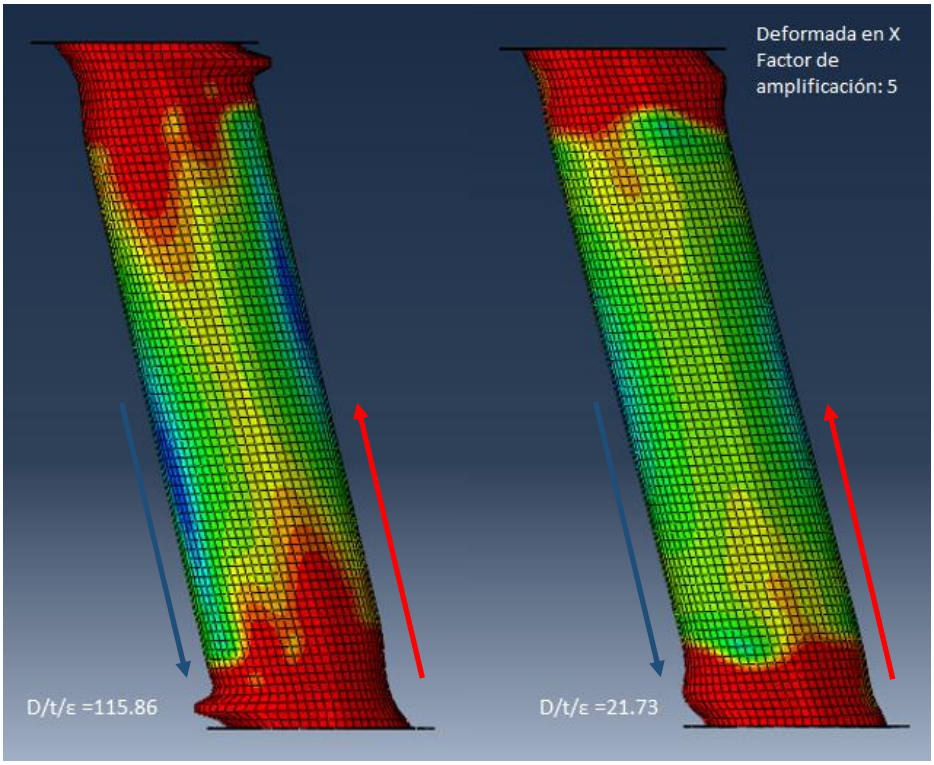


Fig. 43. Deformada Clase 4 vs Clase 1.

En el elemento con D/t/ε =115.9 se activa un mecanismo de fallo por abolladura del lado de la chapa correspondiente a la zona comprimida, presentando un pliegue en el material pronunciado; se observa que se alcanza la tensión de límite elástico del material en la misma zona donde se encuentra el mayor momento, sin embargo el elemento plastifica de manera difusa e irregular entre las partes comprimidas y traccionadas. Por otro lado, el elemento con D/t/ε =21.7 muestra un modo de fallo en la misma zona de mayor momento pero con una evolución más gradual y moderada entre secciones transversales, sin cambios bruscos en la geometría ni presencia de pliegues o abolladura en la zona comprimida, así como una deformación total en la dirección X de menor magnitud; de igual manera el material en la zona de fallo alcanza la tensión de límite elástico de manera más regular entre la zona comprimida y traccionada, y con menor difusión hacia el interior del elemento.

El comportamiento en el elemento D/t/ε =115.9 corresponde al esperado en una sección clase 4, mientras que el elemento con D/t/ε =21.7 al de una clase 1. En la sección clase 4 la hipótesis de Navier-Euler-Bernouilli, *dos secciones planas y paralelas siguen siendo planas aunque no paralelas a lo largo del proceso de deformación, incluso en la región plástica* (Canet, 2006), no se cumple, ya que en la zona de abolladura el pliegue presenta mayor rotación que el resto de la sección, mientras que en la clase 1 esta diferencia de rotación entre segmentos de una misma sección no existe.

Esta rotación genera una redirección de las tensiones, en donde la compresión se desvía debido a la geometría alterada por la abolladura, y para alcanzar el equilibrio estático aparecen nuevas tensiones de cortante coplanar en la zona del elemento con el pliegue, así como momentos flectores en los segmentos de la sección con diferenciales de rotación; esto genera un estado tensional complejo, como se observa en la Fig 43, y no considerado durante el diseño.

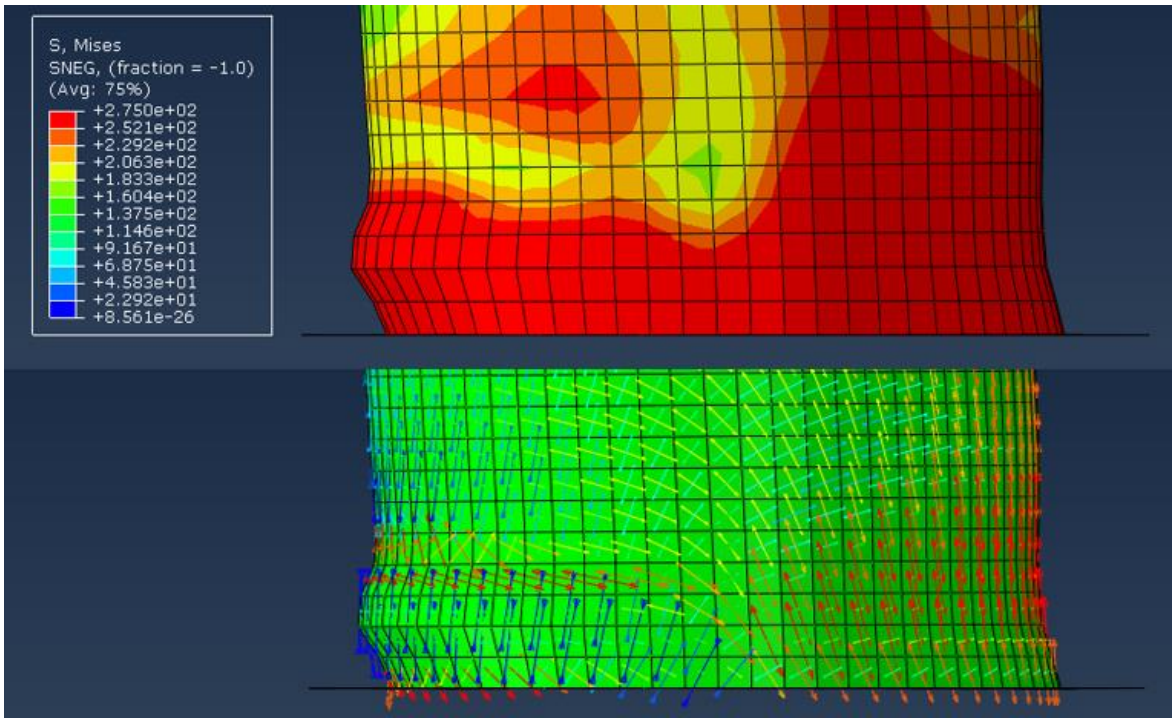


Fig. 44. Deformada y flujo de tensiones (Clase 4).

A nivel normativo la parte de la sección afectada se desprecia dando lugar a una nueva sección efectiva reducida, procedimiento planteado en el apartado 20.7 de la norma EAE (Ministerio de Fomento, 2012), buscando ser conservadores en la capacidad seccional y comportamiento de la nueva sección deformada.

Por otro lado, esta compleja redistribución de tensiones no ocurre en la clase 1 por no presentar grandes gradientes de deformaciones relativas entre las secciones transversales del elemento, ni diferenciales de rotación en una misma sección, con lo que la desviación de la compresión es casi nula y no se generan tensiones extraordinarias, como se observa en la Fig. 45, manteniéndose la respuesta estructural regular, afín a la prevista durante el diseño y efectiva para el cálculo en régimen no lineal; de igual manera se observa que la plastificación se encuentra concentrada en los extremos de mayor momento del elemento CHS, y en igual proporción para las zonas comprimidas y traccionadas de la sección transversal, debido a la activación de rotulas plásticas por la alta capacidad de rotación y plastificación de la sección.

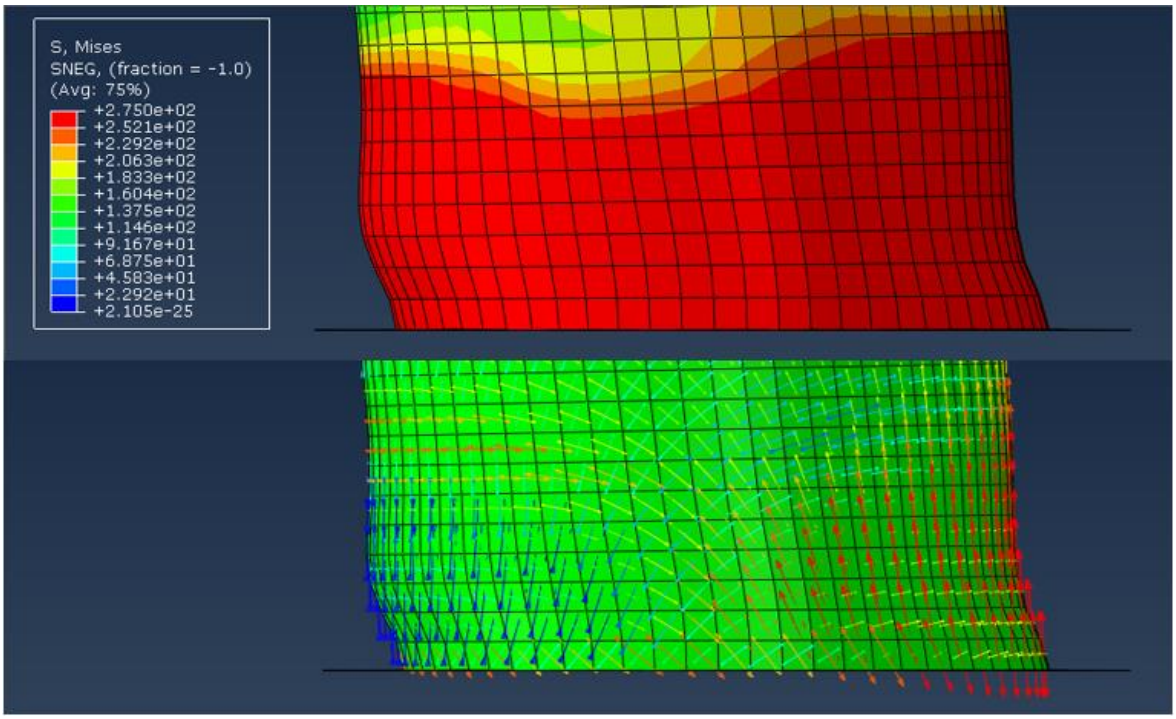


Fig. 45. Deformada y flujo de tensiones (Clase 1).

Transversalmente el comportamiento de las secciones clase 1 y clase 4 durante el fallo es notablemente diferente. Al comprimirse el elemento CHS, hasta llegar a las deformaciones presentadas anteriormente, las secciones transversales en la zona del fallo tienden a distorsionarse en mayor o menor medida según su tipo de clase. Esta deformación con respecto a la sección transversal original tiende a alejar del eje del elemento a los puntos comprimidos en una medida proporcional a la magnitud de la tensión de compresión que presentan y en la dirección de aplicación del desplazamiento de cabeza, generando excentricidades mayores en casos de abolladura; por otro lado los puntos de la sección transversal traccionados tienden a aproximarse al eje del elemento en una medida

proporcional a la magnitud de la tensión de tracción que presentan y de igual manera en el sentido del esfuerzo que causa la deformación.

La magnitud del daño está condicionada de tal manera por qué tanto se distorsionó la sección transversal con respecto a la original y la medida de propagación del efecto a lo largo de la sección partiendo de su zona de inicio. A continuación se muestran las secciones transversales en el punto de mayor deformación (factor de amplificación 5.00) de los elementos CHS analizados en este apartado.

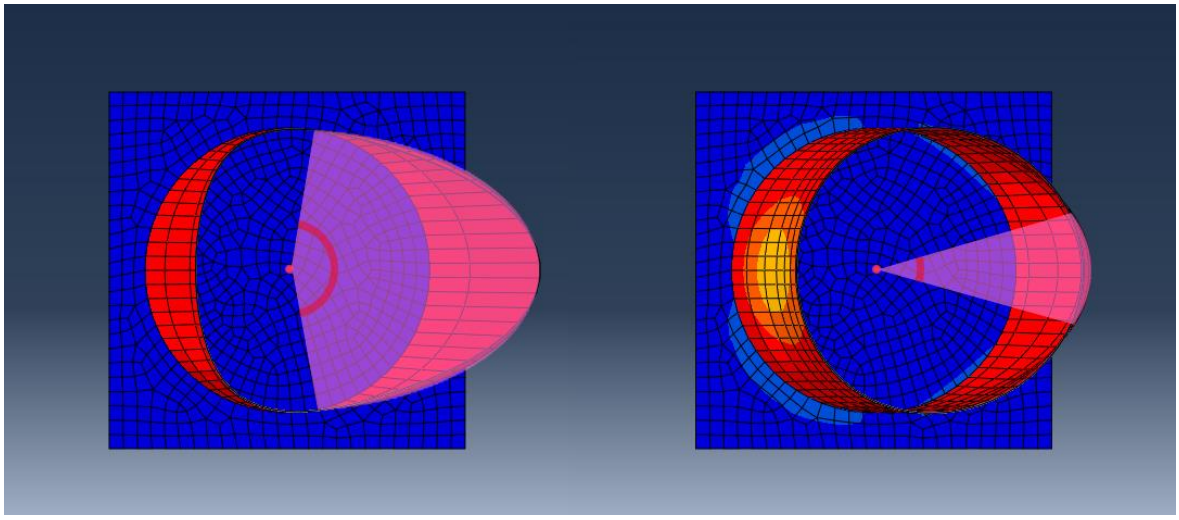


Fig. 46. Apertura de zona afectada en secciones Clase 4 y Clase 1.

En estas secciones puede observarse que para la clase 4 la excentricidad alcanzada en la zona comprimida es mucho mayor que para la clase 1, debido a la excentricidad impuesta por la gran deformación que genera la abolladura de la chapa comprimida, mientras que en la clase 1 este efecto no ocurre y en su lugar hay una ligera deformación. En la clase 4, una vez activado el mecanismo de inestabilidad local, inicia la formación del pliegue en la zona de mayor compresión y se propaga rápidamente hasta alcanzar un ángulo de apertura con respecto al eje de la sección cercano a 180°, como se puede observar en la Fig. 46, con lo que prácticamente la mitad de la sección se compromete y sufre la deformación excesiva que provoca el fenómeno de abolladura; mientras que en la clase 1 la deformación presenta un ángulo de apertura con respecto al eje de la sección cercano a 30°, manteniendo una deformación moderada y consistencia en la geometría seccional deformada con respecto a la original.

Esta deformación plástica determina la respuesta estructural del elemento ante nuevos estados de solicitaciones, por lo que a deformación plástica y ángulo de apertura mayores, menor cantidad de sección efectiva disponible para soportar nuevos esfuerzos, con lo que aumenta las tensiones y disminuye más rápido la resistencia del elemento.

5.3 Influencia de parámetros

Para analizar la respuesta estructural y ductilidad en función de las variables paramétricas espesor (t), longitud (L), axil de compresión (% N_{PL}) y calidad de acero (f_y); se utiliza como base el elemento CHS con L=6000mm, f_y=275 N/mm2, t=40mm y 50% N_{PL} de compresión, al cual se le varían sus parámetros en función del caso de estudio.

5.3.1 Influencia de t

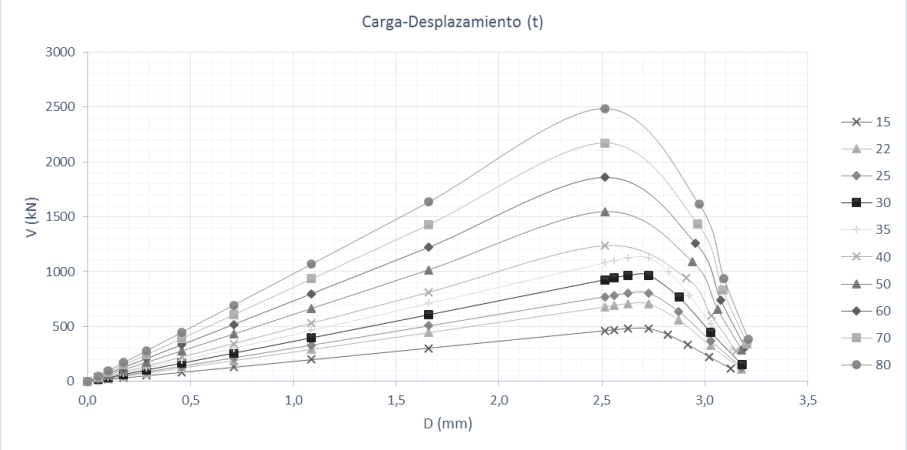


Fig. 47. Carga-desplazamiento (t).

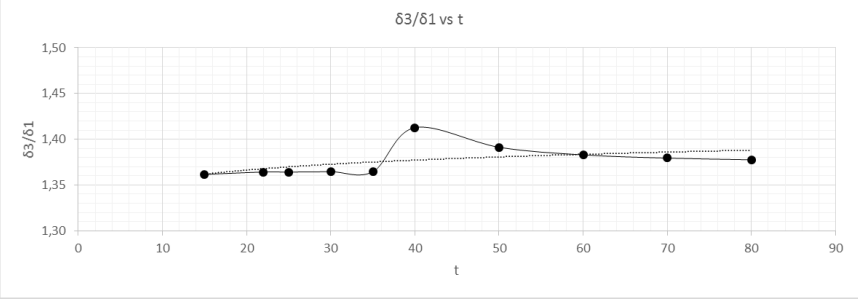


Fig. 48. δ_3/δ_1 vs t.

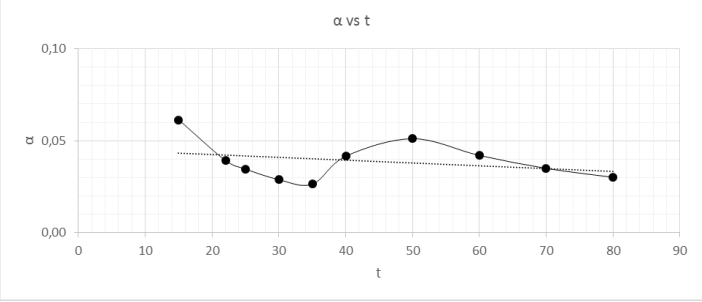


Fig. 49. α vs t.

En la Fig 47 se puede observar que la carga máxima, V_{max}, se obtiene para el mayor espesor t=80mm, con un valor de V_{max}=2500 kN, y que entre los espesores 80mm y 40mm ocurre una reducción en este valor de manera casi constante con magnitud aproximada del 15% entre espesores, para el resto de espesores este porcentaje se reduce. El desplazamiento en el punto de agotamiento o V_{max} presenta una ligera tendencia a incrementar a medida que se reduce el espesor de la sección, lo cual puede ser producto de la menor inercia y rigidez del elemento, pasando de un desplazamiento de 2.5 mm para t=80mm a 2.8 mm para t=15mm.

Existen dos grupos bien definidos en el comportamiento de las curvas de la Fig 47. El primero con los espesores entre 80 mm y 40 mm, y el segundo con los espesores entre 35mm y 15mm. Ambos grupos presentan un comportamiento similar en las curvas de los espesores que los forman, en donde el grupo 80-40 muestra curvas con ramas post-agotamiento de pendientes más pronunciadas que las del grupo 35-15. Esto se debe a que justo en el espesor de 40mm dejan de existir las secciones clase 1 para el elemento L6000275 y t=40mm, como puede observarse en la tabla 26, con lo que la respuesta estructural de la sección comienza a perder rigidez a cortante al haberse visto afectada por fenómenos de abolladura que modifican el área efectiva de la sección, lo cual en el post-agotamiento genera esa ligera disminución en la pendiente.

	Acero
D/t	275
106,7	Clase 4
72,7	Clase 3
64,0	Clase 3
53,3	Clase 2
45,7	Clase 2
40,0	Clase 1
32,0	Clase 1
26,7	Clase 1
22,9	Clase 1
20,0	Clase 1

Tabla 26. Clases en función de t (f_y=275).

La ductilidad δ_3/δ_1 presenta un valor entre un rango de 1.35-1.40 con poca variación entre espesores, pero con una tendencia a aumentar a medida que éste también lo hace. Por lo que se tiene que los elementos de mayor espesor logran cargas máximas mayores con mayor ductilidad que espesores menores, lo cual es de esperarse ya que se obtiene una mejor clasificación seccional y por ende mayor capacidad de desarrollar la totalidad del momento plástico con su cortante asociado.

El ángulo α muestra una tendencia a disminuir a medida que aumenta el espesor, debido al aumento de rigidez de la sección y a la menor probabilidad de haberse presentado fenómenos de abolladura previos que hayan condicionado la respuesta estructural del elemento. El hecho de que el valor de α se haga mayor con la disminución del espesor implica que δ_3 aumenta, sin embargo la ductilidad δ_3/δ_1 disminuye para espesores menores, con lo que se concluye que δ_1 aumenta con más rapidez que δ_3, esto se debe a la menor rigidez a cortante que presenta la sección de menor espesor.

5.3.2 Influencia de L

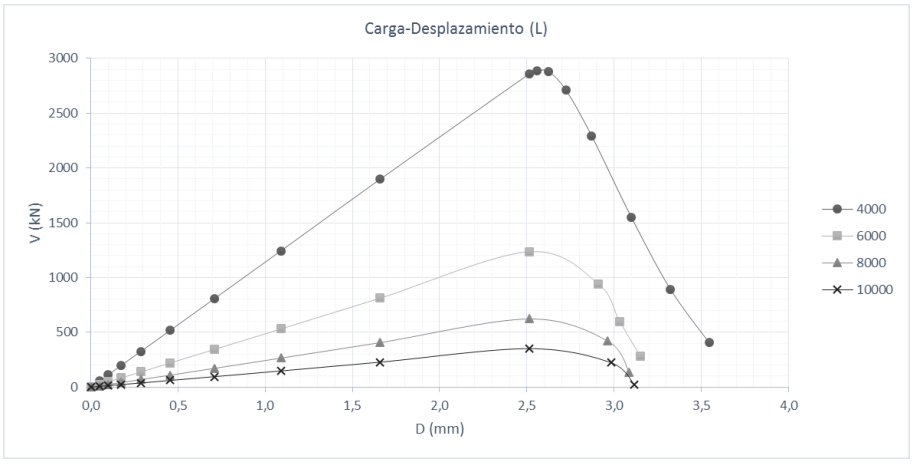


Fig. 50. Carga-desplazamiento (L).

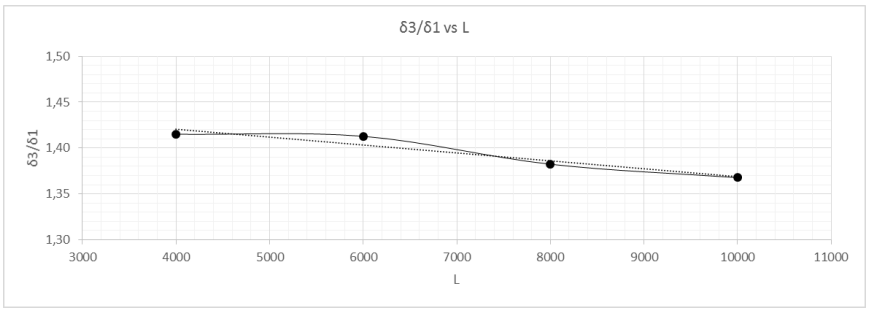


Fig. 51. δ_3/δ_1 vs L.

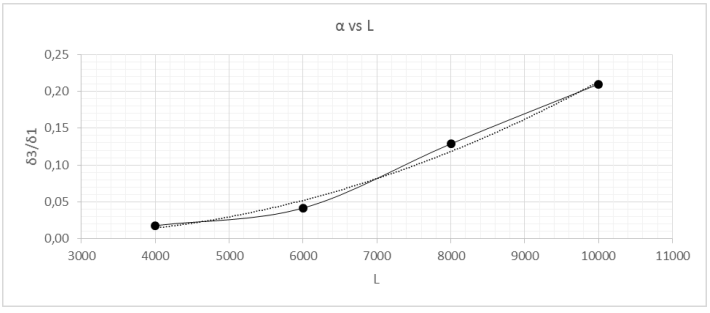


Fig. 52. α vs L.

La longitud tiene una gran influencia en la carga máxima a cortante que soportan los elementos CHS, como se muestra en la Fig 50; de manera general se puede observar que a medida que aumenta la longitud del elemento el V_{max} disminuye, con una diferencia de aproximadamente 55% menos capacidad de carga entre el elemento de 4000mm y el elemento de 6000mm. También se presenta el mismo comportamiento entre las curvas de las longitudes 6000mm-8000mm y 8000mm-10000mm, sin embargo la diferencia es gradualmente menor a medida que la longitud del elemento aumenta.

$$V_{max} = \frac{12EI}{L^3} . \Delta$$

Ecuación 22. Cortante para M_{PL}.

Como se puede apreciar en la ecuación 22, la cual desprecia el comportamiento no lineal del elemento CHS, el valor de V_{max} depende de los parámetros seccionales que condicionan la inercia, el material y la longitud; esta última con un crecimiento exponencial, por lo que una longitud igual al 200% de la original presenta una reducción en la capacidad de carga del elemento (V_{max}) al 12.5% de la obtenida con longitud original. Esta tendencia produce que el numerador de la expresión pierda relevancia con respecto al denominador, y por ese motivo ocurre la reducción en la diferencia entre capacidades de carga máxima a medida que aumenta la longitud, hasta llegar al caso extremo en el que el elemento es tan largo que no resiste cortante y empieza a comportarse como un tirante.

También se observa que el desplazamiento asociado al agotamiento se mantiene constante con una magnitud de 2.6mm, lo cual en relación a lo planteado en el apartado anterior, responde a mantener los parámetros seccionales constantes y sólo modificar la longitud, con lo que la clasificación seccional es la misma, y la inercia, capacidad de plastificación y rotación permanecen iguales para todas las curvas.

La ductilidad δ_3/δ_1 presenta un valor entre un rango de 1.42 - 1.37 con una tendencia a disminuir en un comportamiento casi lineal a medida que aumenta la longitud del elemento, Fig 51, obteniendo de tal manera una ductilidad máxima de 1.42 para el elemento de 4000m y una mínima de 1.37 para el elemento de 10000mm, tal variación al igual que en el apartado 5.3.1 es muy pequeña.

Por otro lado, el comportamiento del ángulo α presenta mayor variación con el aumento de la longitud del elemento, incrementando su valor y suavizando la pendiente de la rama post-agotamiento. El valor máximo se obtiene para el elemento de longitud 10000mm, en el cual la rigidez es menor a las otras longitudes haciendo que el desplazamiento último aumente para menores variaciones de carga, incrementando el valor de δ_3, pero al igual que en la variación del parámetro t, δ_1 aumenta con más rapidez y la ductilidad δ_3/δ_1 termina disminuyendo como se explicó anteriormente.

5.3.3 *Influencia de %N_{PL}*

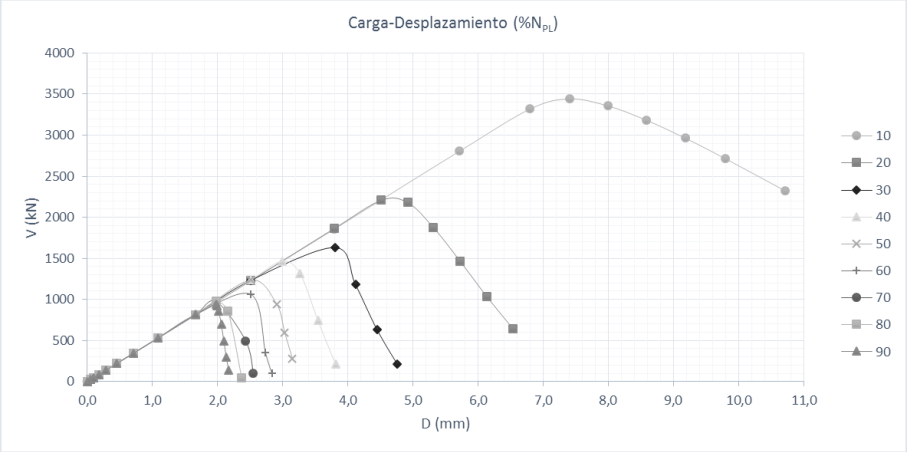


Fig. 53. Carga-desplazamiento (%N_{PL}).

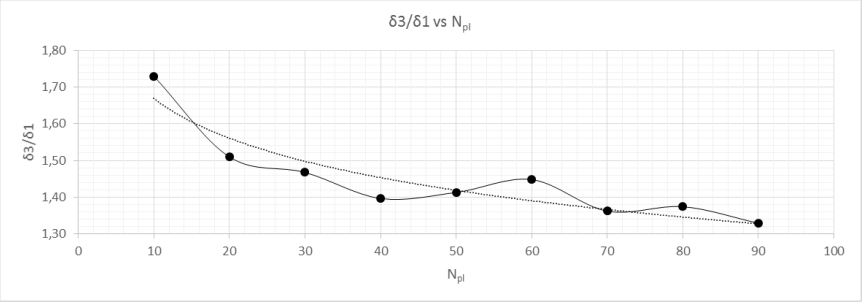


Fig. 54. δ_3/δ_1 vs (%N_{PL}).

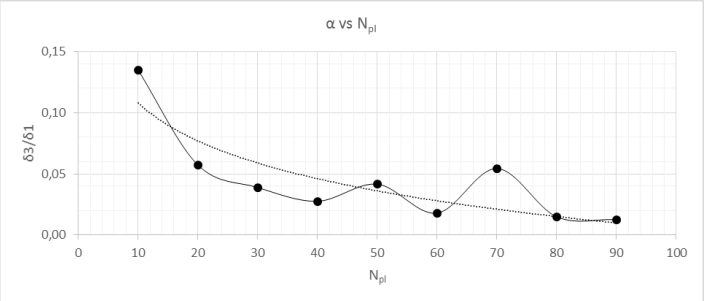


Fig. 55. α vs %N_{PL}.

El comportamiento estructural de los elementos CHS es afectado en gran medida en función del porcentaje de axil de compresión aplicado (%N_{PL}), no solo en las curvas de carga-desplazamiento, Fig 53, sino también en las ductilidades δ_3/δ_1 y ángulos α. En principio, se puede apreciar que para porcentajes de axil de compresión mayores se obtienen menores desplazamientos y capacidades de carga (V_{max}), lo cual es razonable ya que inicialmente la acción de compresión induce efectos de segundo orden por la no linealidad geométrica

durante el desplazamiento de cabeza del elemento, de esta manera se generan excentricidades en el punto de aplicación de la carga de compresión dando lugar a nuevos esfuerzos que aumentan las solicitaciones y conducen al fallo con más rapidez, el cual al generar deformaciones plásticas, como abolladura por inestabilidad local, condicionan la posterior respuesta estructural al modificar el área efectiva de la sección. Este comportamiento es más notable a medida que aumenta la carga de compresión, reduciéndose el valor de la capacidad de carga y aumentando la pendiente post-agotamiento.

Lo que ocurre es que a mayor $\%N_{PL}$ el panel comprimido del elemento se ha deformado plásticamente en mayor medida, y al aumentar el desplazamiento de cabeza las tensiones sobre la sección transversal deformada son resistidas por su parte integra hasta que se recupera la deformación plástica del pliegue, Fig 56, la cual tarda más en recuperarse dependiendo de su magnitud, por lo que se dispone de menos material para incrementos superiores de desplazamiento de cabeza y el mecanismo resistente falla con mayor rapidez.

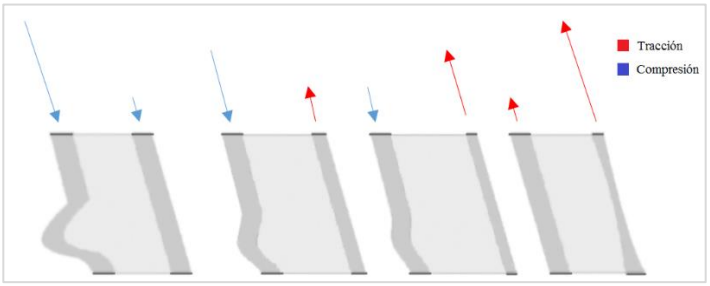


Fig. 56. Recuperación de deformación plástica.

Se puede observar que las diferencias entre desplazamientos para el agotamiento del elemento CHS se reducen a medida que se aumenta la carga, de tal manera el desplazamiento alcanzado para un axil de compresión de 20% N_{PL} representa aproximadamente el 64% del alcanzado para 10% N_{PL}, y el de 30% N_{PL} representa aproximadamente el 20% del alcanzado para 20% N_{PL}, el resto de curvas mantienen la tendencia en la disminución de esa diferencia; el mismo comportamiento se presenta para los valores de V_{max}.

El aspecto más relevante al variar los porcentajes de axil de compresión es que todas las curvas comparten la misma respuesta elástica, esto es debido a que al mantener los parámetros de material, longitud y espesor, la rigidez a cortante del elemento también se mantiene constante indiferentemente de las solicitaciones a las que esté sometido.

$$K_{cort\ x} = \frac{V_x}{\delta_x} = \frac{12EI}{L^3}$$

Ecuación 23. Rigidez de elemento a cortante.

A diferencia de los apartados 5.3.1 y 5.3.2, el comportamiento de la ductilidad δ_3/δ_1 y ángulo α se muestran fuertemente condicionados por el porcentaje de axil de compresión aplicado, observándose una tendencia a disminuir a medida que aumenta la compresión, obteniendo

un valor máximo de ductilidad de 1.73 para axil de compresión de 10% de N_{PL} y mínimo de 1.33 para axil de compresión de 90% N_{PL}. De tal manera los elementos con valores de axil de compresión altos presentan un V_{max} y desplazamiento en agotamiento δ_3 menores, así como una disminución de hasta 35% en la capacidad dúctil en comparación al mismo elemento con baja solicitación de compresión.

5.3.4 Influencia de f_y

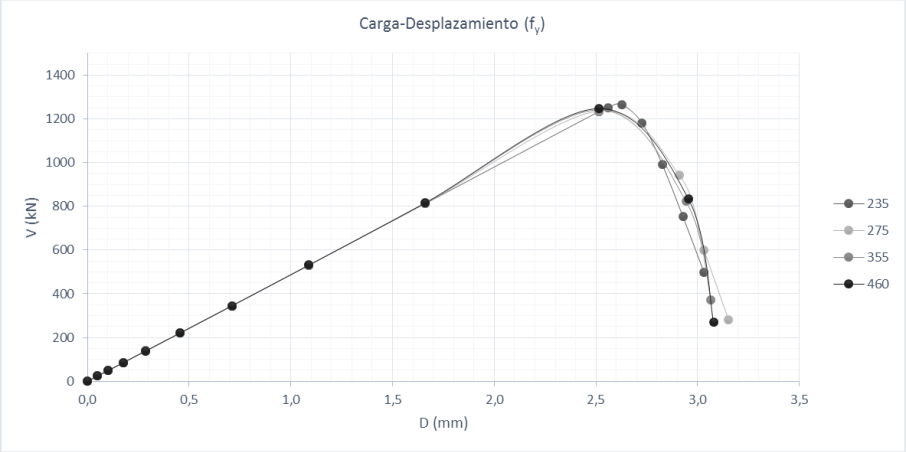


Fig. 57. Carga-desplazamiento (f_y).

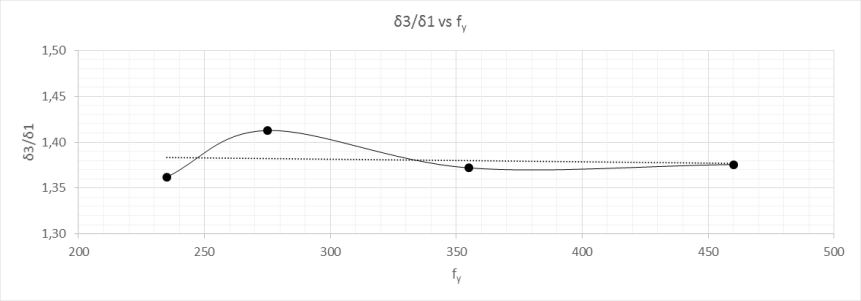


Fig. 58. δ_3/δ_1 vs f_y.

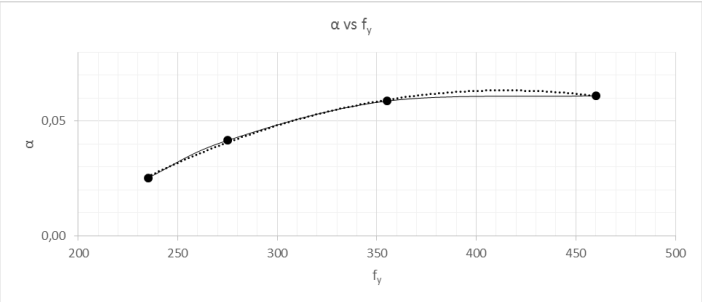
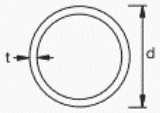


Fig. 59. α vs f_y.

La variación del parámetro f_y no afecta notablemente en la respuesta estructural del elemento CHS ya que N_{PL} se calcula en función de la calidad del acero, como se muestra en la ecuación 9, con lo que los desplazamientos de compresión asociados a cada porcentaje de N_{PL} son proporcionalmente equivalentes para cada valor de f_y, debido a esto la respuesta estructural es la misma para cada caso en régimen lineal elástico; por otro lado la rigidez del elemento a cortante sólo depende del módulo de elasticidad y no de su límite elástico, como se explicó anteriormente y se muestra en la ecuación 23, generando que las rigideces, y por ende el comportamiento elástico, sean iguales para cada curva.

A mayor calidad de acero más exigente es la esbeltez máxima para cada clase como se puede observar en la siguiente tabla, utilizada para clasificar las secciones transversales en el apartado 3.2.2.

Secciones tubulares



Clase	Sección flectada y/o comprimida					
1	$\frac{d}{t} \leq 50\varepsilon^2$					
2	$\frac{d}{t} \leq 70\varepsilon^2$					
3	$\frac{d}{t} \leq 90\varepsilon^2$					
$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	f_y(N/mm²)	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Tabla 27. Criterios de clasificación de secciones.

	Acero			
D/t	235	275	355	460
40,0	Clase 1	Clase 1	Clase 2	Clase 3

Tabla 28. Clasificación de secciones del elemento L6000 t=40mm.

El f_y afecta la esbeltez adimensional y por ende el estado límite de inestabilidad, verificado previamente en el apartado 3.2.2 y ajeno a la respuesta esperada de los elementos CHS, sin embargo modifica el valor de ε en la clasificación de secciones, como puede observarse en las tablas 27 y 28, lo que condiciona la respuesta en régimen no lineal por la capacidad de rotación y plastificación así como la tendencia a presentar fenómenos de abolladura. A medida que f_y aumenta disminuye ε y así los límites superiores de esbeltez para la clasificación de la sección, con lo que para un acero de mayor calidad la chapa debe ser menos esbelta para tener la misma clase que una chapa más esbelta pero de menor calidad, esta variación de comportamiento seccional es lo que da origen a los ligeros cambios en las curvas cerca del agotamiento e incrementos de desplazamiento de cabeza superiores.

Se observa que la ductilidad δ_3/δ_1 no presenta variación en su magnitud, manteniendo un valor constante de 1.38, esto se debe a que al ser similar el comportamiento en la rama lineal para los distintos f_y, y haber iguales V_{max} en cada caso, los valores de δ_1 asociados al 80%

V_{max} para el pre-agotamiento son iguales; además al no haber secciones transversales clase 4 para este elemento no se presentan grandes fenómenos de abolladura, por lo que el valor de los ángulos α en post-agotamiento son similares, generando que los desplazamientos δ_3 asociados al 80% V_{max} en post-agotamiento para cada curva tengan magnitudes próximas, obteniendo valores de ductilidad δ_3/δ_1 que no distan en más del 2.2% de la media global.

5.4 Comportamiento general de subgrupos de elementos CHS

Las dispersiones de datos de ductilidad δ_3/δ_1 se presentan en la Fig 60 para los subgrupos de longitudes de todos los elementos CHS (4000, 6000, 8000 y 10000mm), y posteriormente se discretizan, a partir del apartado 5.4.1, en función de la calidad de acero utilizada.

En la Fig 60 se pueden encontrar cada uno de los 440 valores de δ_3/δ_1 en función de su respectivo D/t/ε para cada subgrupo. Los datos incluidos incluyen todas las variaciones paramétrica y los distintos porcentajes de axil de compresión (% N_{PL}), excluyendo 0% y 100% de N_{PL} en todos los casos, y 20% N_{PL} para la longitud de 4000mm (S235 y S275) por desvirtuar el comportamiento del conjunto.

Existe un comportamiento común entre la dispersión de datos en los subgrupos, por lo que la descripción en este apartado se realiza de manera global para todos, determinando previamente los rangos en donde se encuentra el 75% de sus correspondientes datos, a manera de referencia de la tendencia de dispersión en cada subgrupo.

Rangos asociados al 75% de los datos:

-L4000: [1.3, 2.01] (δ_3/δ_1) y [20,101.75] (D/t/ε).

-L6000: [1.27, 1.72] (δ_3/δ_1) y [20,101.75] (D/t/ε).

-L8000: [1.22, 1.73] (δ_3/δ_1) y [20,101.75] (D/t/ε).

-L10000: [1.25, 1.74] (δ_3/δ_1) y [20,101.75] (D/t/ε).

En estos rangos los datos presentan mayor concentración hacia valores bajos de D/t/ε, cuyas magnitudes en ese extremo son generadas por la configuración paramétrica que utiliza grandes espesores t con calidades de acero f_y menores. Por otro lado el comportamiento de la ductilidad δ_3/δ_1 muestra una tendencia a disminuir a medida que se aumenta la longitud del elemento CHS. Valores de ductilidad por encima del rango de referencia de concentración de datos representan los casos con muy poco porcentaje de axil de compresión % N_{PL}, con lo que los efectos de flexo-compresión son menores y la ductilidad alcanzada para la carga por el desplazamiento de cabeza aumenta.

A continuación se presentan los gráficos de dispersión de datos de los subgrupos:

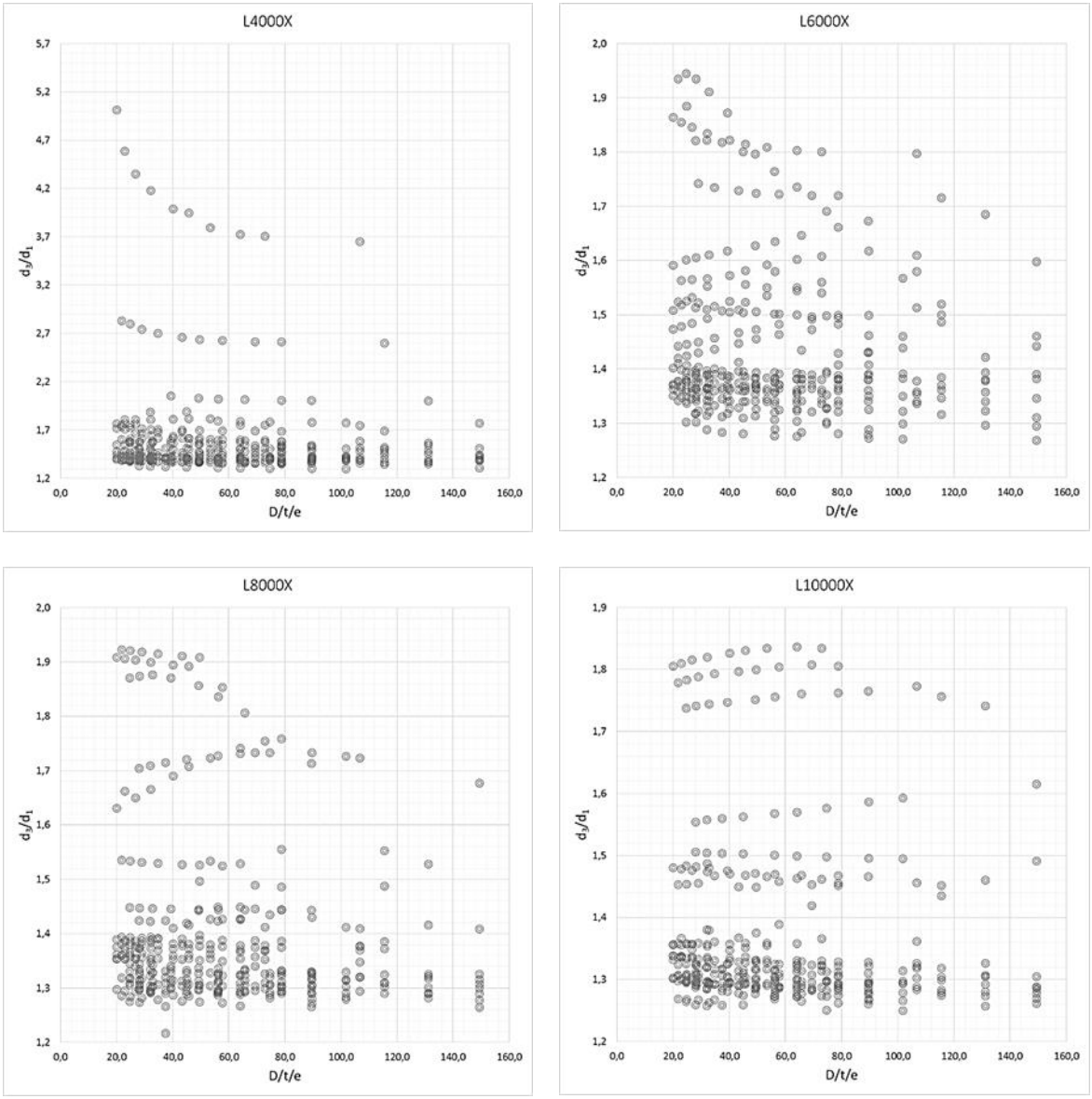


Fig. 60. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α, $(D/t/\varepsilon)$.

Los valores de ductilidad se deben estudiar de manera separada para establecer tendencias, ya que el ajuste logrado con líneas de tendencia no es suficiente para representar el comportamiento del conjunto. Aun así, se puede observar de manera general que para las distintas longitudes existe una tendencia perder ductilidad a medida que aumenta $D/t/\varepsilon$. También se observa que la ductilidad tiende a disminuir de valor a medida que aumenta la longitud del elemento.

En este punto del estudio se hace necesario analizar los resultados obtenidos fijando variables paramétricas, ya que el comportamiento global es muy disperso y no permite observar las variaciones y tendencias en la ductilidad δ_3/δ_1 y ángulo α. En el apartado 5.6 se presentan los fragmentos de datos que conforman los gráficos de cada subgrupo de la Fig 60, fijando la calidad del acero utilizada. Este procedimiento permite apreciar mejor las tendencias en el comportamiento e influencia del resto de las variables paramétricas.

5.5 Ductilidad de subgrupos de elementos CHS para clases 1 y 4

A continuación en la Fig 61, se presentan las ductilidades δ_3/δ_1 de los subgrupos L4000, L6000, L8000 y L10000, asociadas a las secciones transversales con espesor t=80mm y t=15mm, las cuales son clase 1 y 4, respectivamente, para todas las calidades de acero utilizadas en el estudio, utilizando los límites de esbeltez de elementos CHS establecidos en Eurcódigo (EN, 2005) y EAE (Ministerio de Fomento, 2012); de esta manera se pueden comparar los valores de ductilidad δ_3/δ_1 medios para cada clase y su evolución en función de la longitud.

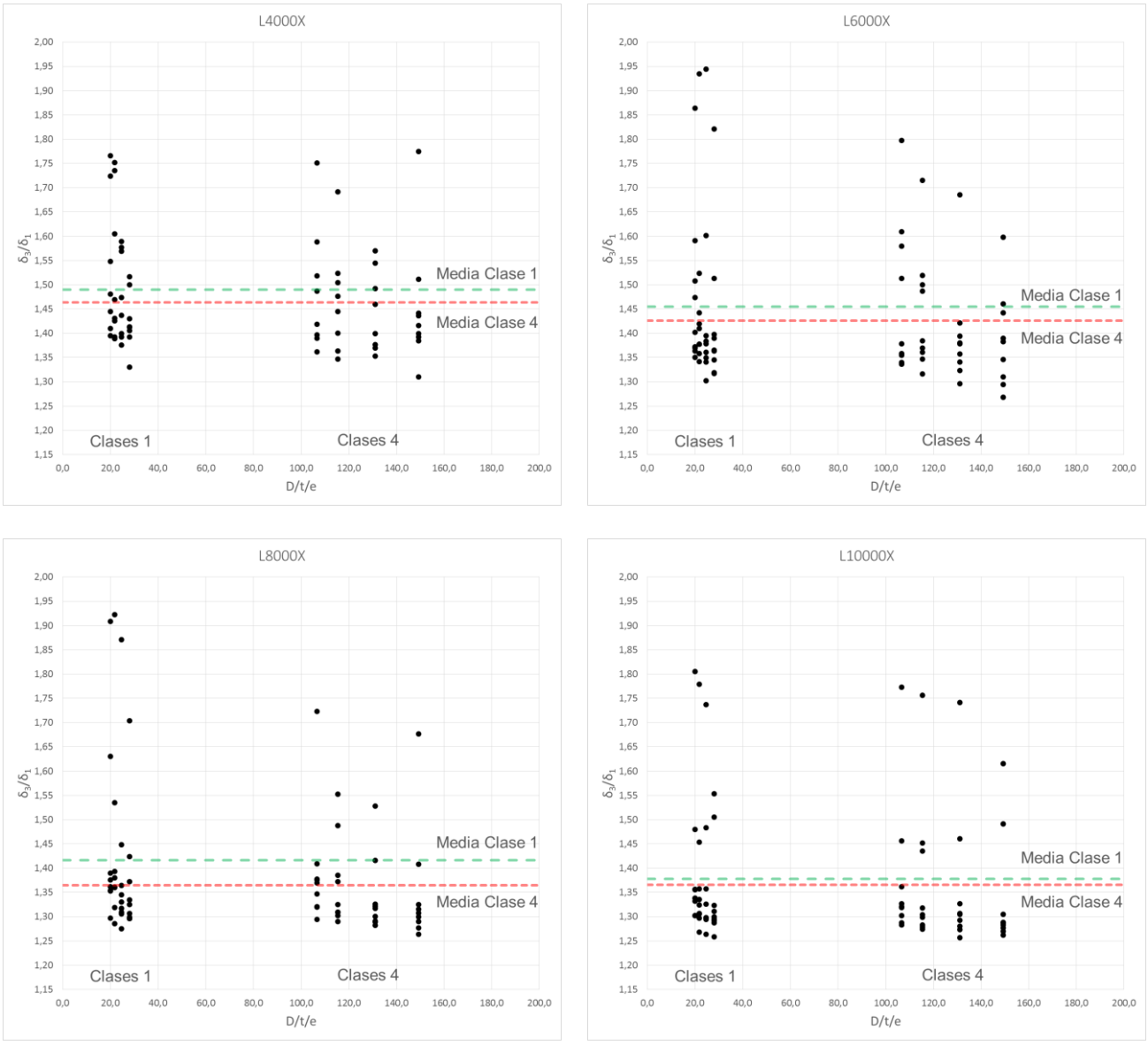


Fig. 61. Ductilidad de subgrupos para las clases 1 y 4.

Se puede observar que las secciones transversales clase 1 presentan una ductilidad δ_3/δ_1 media mayor en comparación a las clase 4, con lo que pueden alcanzar deformaciones

plásticas mayores y un mejor desempeño al limitar los fenómenos de inestabilidad local. Sin embargo, la diferencia entre las medias de ductilidad δ_3/δ_1 de las clases 1 y 4 disminuye a medida que aumenta la longitud del elemento, con lo que para la longitud de 10000mm los valores de la ductilidad δ_3/δ_1 media son prácticamente iguales indiferentemente de la clasificación de sección transversal, esto responde a la perdida de relevancia en la respuesta estructural a cortante de la geometría seccional a medida que aumenta la longitud del elemento.

5.6 Comportamiento de subgrupos de elementos CHS en función de f_y

A continuación se presentan dos gráficos en la Fig 62, con el objetivo de guiar al lector en la presentación de las dispersiones de datos a partir del apartado 5.6.1. Ambos gráficos son de carácter referencial y no representan valores de interés para el estudio, pero muestran el comportamiento general de los datos de ductilidad δ_3/δ_1 y ángulo α obtenidos para cada longitud fijando la calidad de acero.

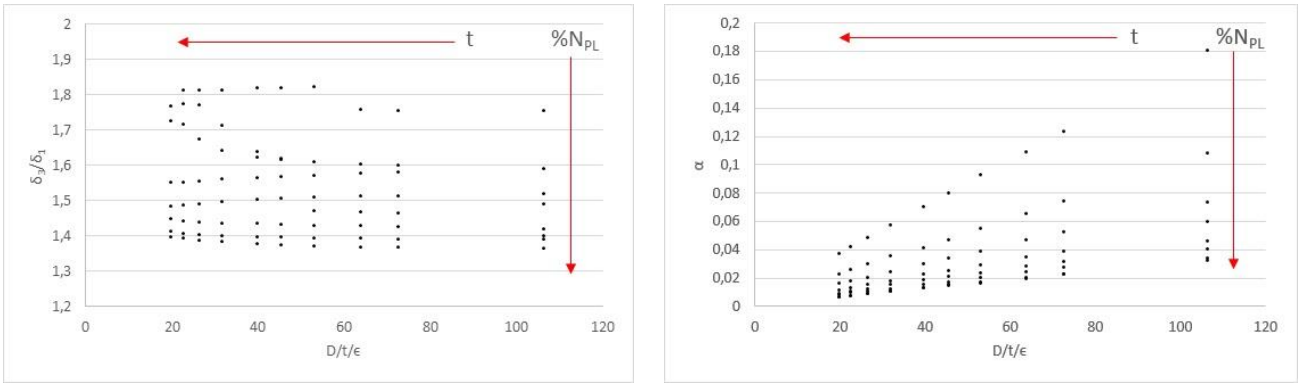


Fig. 62. Comportamiento general de subgrupos.

Como se ha explicado previamente, al aumentar el valor de t disminuye D/t/ε, y como el estudio se basa en diez espesores de chapa distintos los datos tienden a formar diez columnas en cada gráfico; por otro lado, la última variable paramétrica ($\%N_{PL}$) tiende a disminuir los valores de ductilidad con su incremento, y como se observó en el apartado 5.3.3, es el factor que más influye en la perdida de ductilidad; su influencia en la dispersión se manifiesta en sentido vertical, por lo que se obtendrán nueve filas de datos (10% a 90%N_{PL}).

5.6.1 *Longitud de 4000 mm*

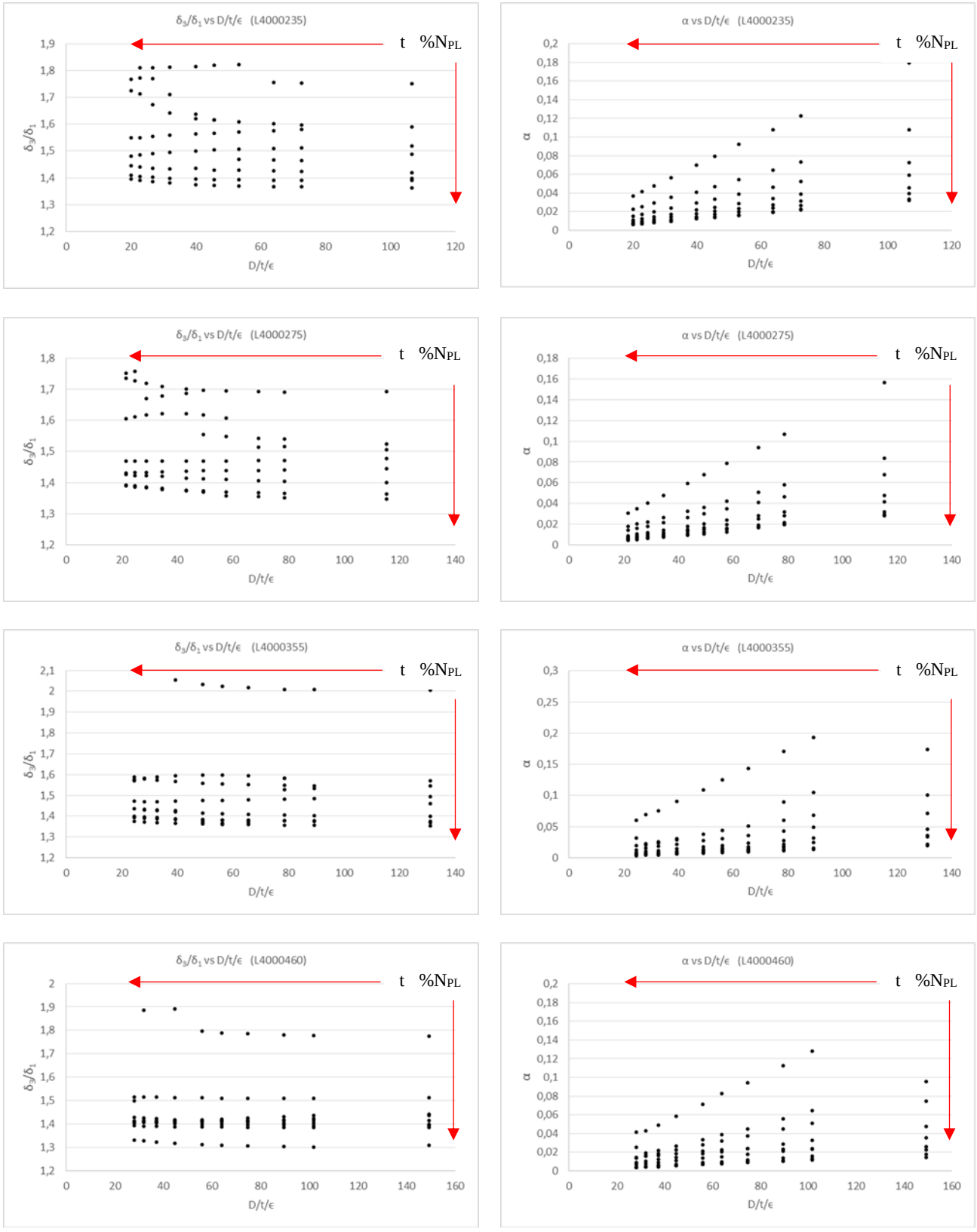


Fig. 63. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α $(D/t/\varepsilon)$ – L4000.

5.6.2 *Longitud de 6000 mm*

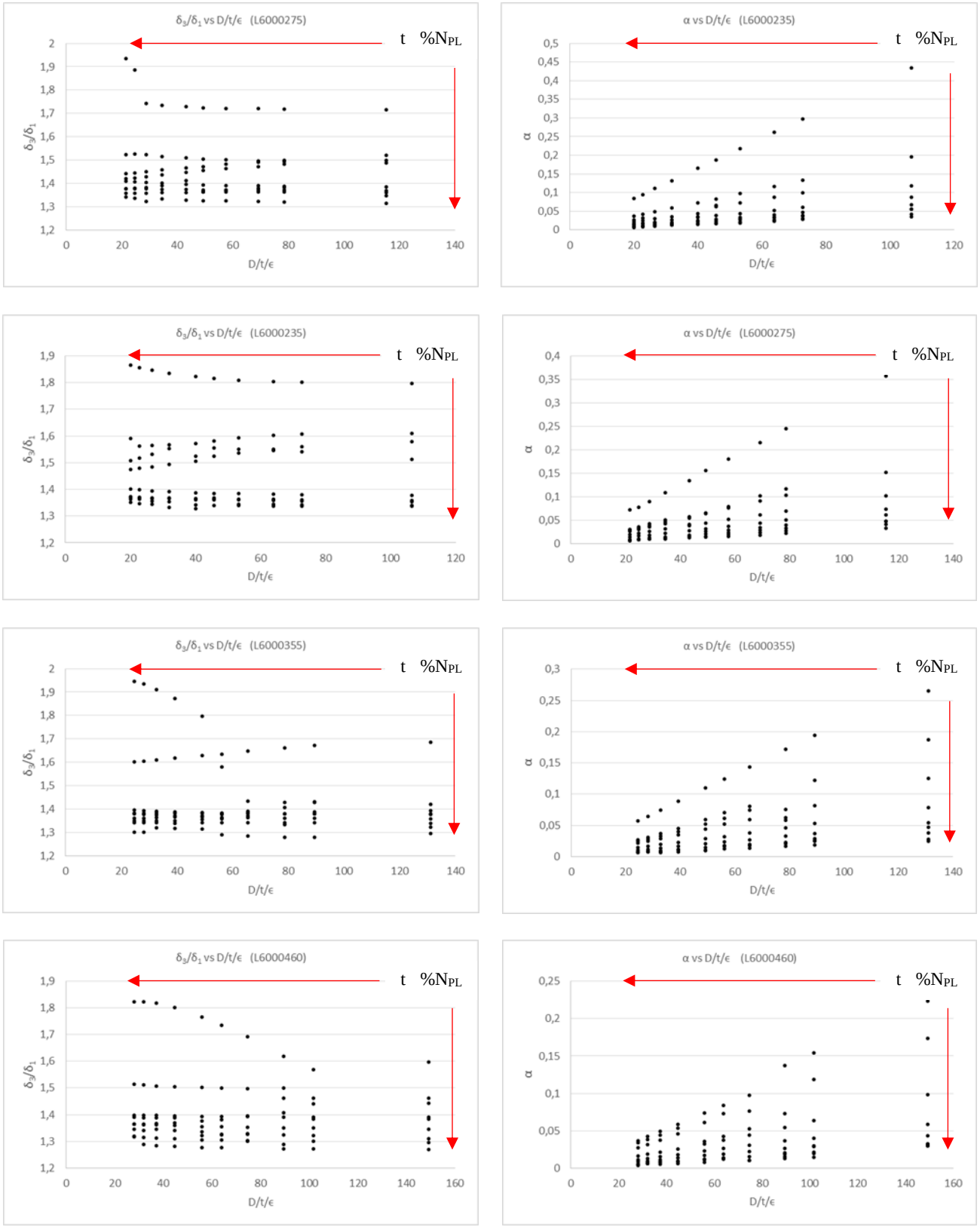


Fig. 64. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α $(D/t/\varepsilon)$ – L6000.

5.6.3 *Longitud de 8000 mm*

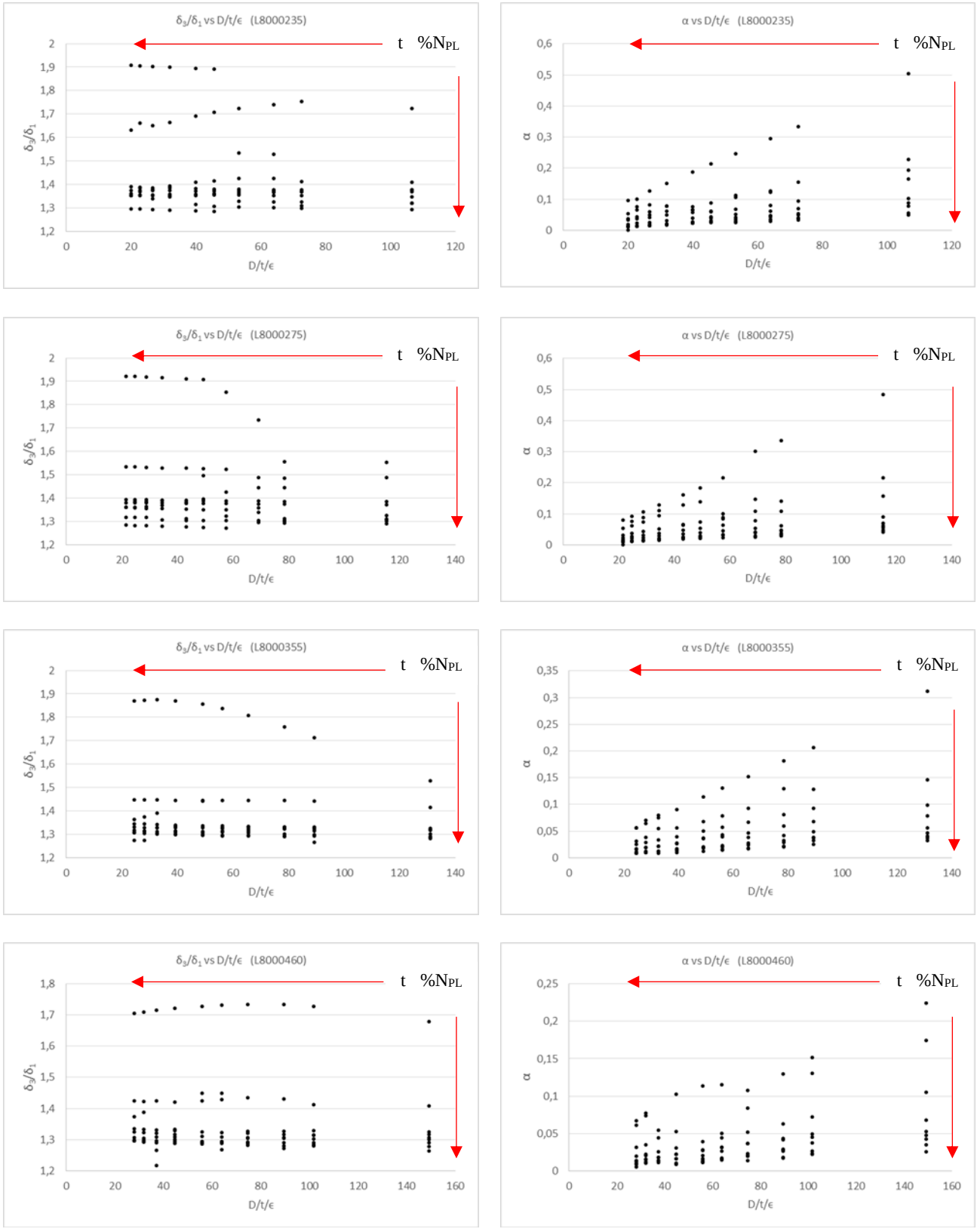


Fig. 65. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α (D/t/ε) – L8000.

5.6.4 *Longitud de 10000 mm*

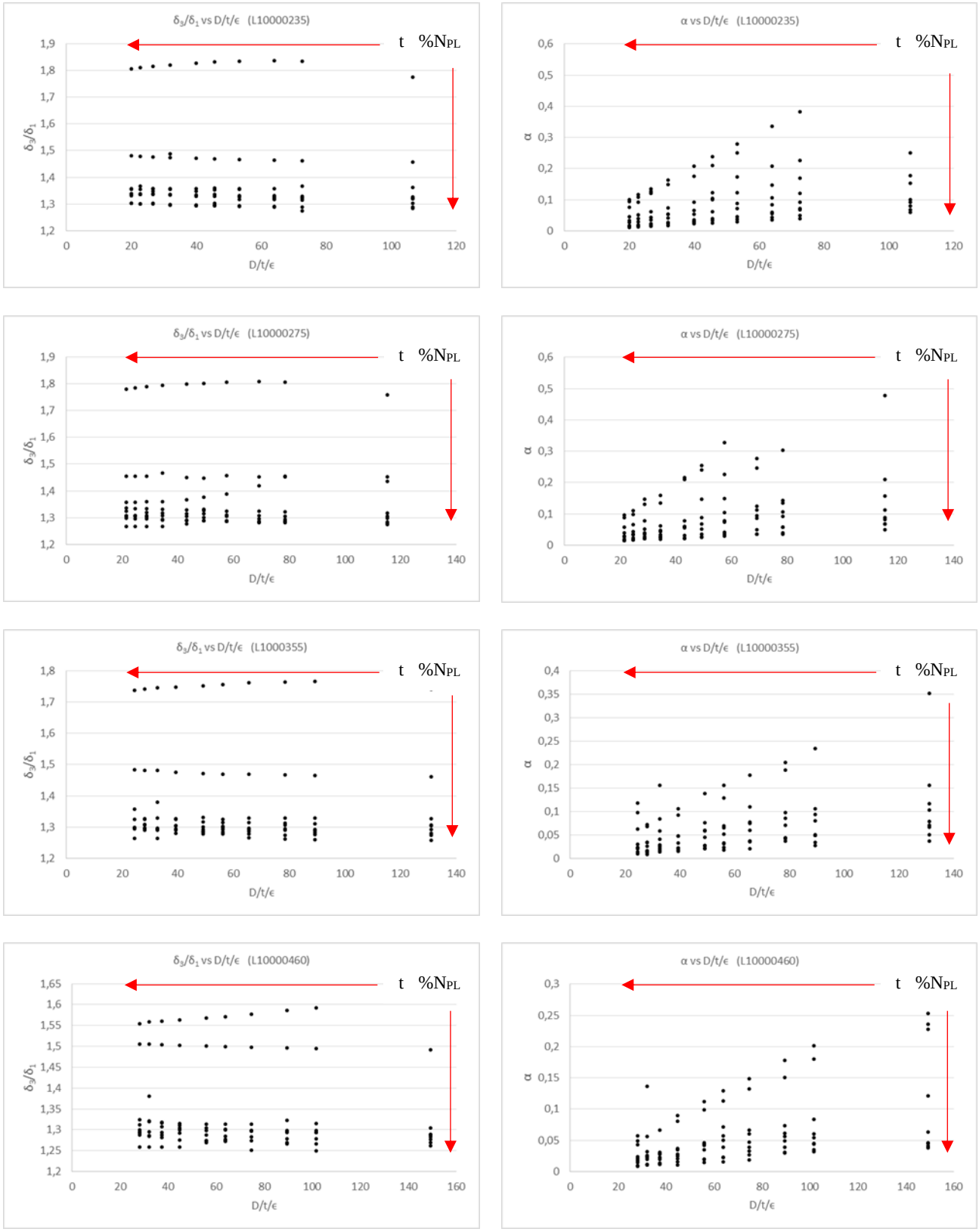


Fig. 66. Dispersión de datos de δ_3/δ_1 y α (D/t/ε) – L10000.

Se puede observar las siguientes tendencias en el comportamiento de los datos de los subgrupos en función de las calidades de acero:

- En todos los casos los valores de ductilidad δ_3/δ_1 que presentaron un comportamiento menos predecible ocurrieron con desplazamientos de axil de compresión $\%N_{PL}$ menores (10% y 20%).
- A medida que el axil de compresión aumenta, la diferencia de ductilidad δ_3/δ_1 para diferente $\%N_{PL}$ se reduce de igual manera en todos los valores de $D/t/\varepsilon$, concentrando todos los datos de ductilidad en un rango menor e igual para los diferentes $D/t/\varepsilon$.
- El aumento en la longitud disminuye la ductilidad δ_3/δ_1 de manera global para todos los valores de $D/t/\varepsilon$, comparando para un mismo acero las dispersiones a distintas longitudes.
- En todos los casos los valores de ángulo α que presentaron un comportamiento menos predecible ocurrieron con desplazamientos de axil de compresión $\%N_{PL}$ menores (10% y 20%).
- A medida que el axil de compresión aumenta los valores de ángulo α tienden a un mismo valor para los distintos $D/t/\varepsilon$.
- El aumento de espesor t reduce el rango de posibles valores del ángulo α, debido al aumento de la rigidez seccional y mejora del mecanismo resistente, el cual limita los desplazamientos post-agotamiento.
- El aumento en la longitud aumenta el valor del ángulo α de manera global para todos los valores de $D/t/\varepsilon$, comparando para un mismo acero las dispersiones a distintas longitudes. Esto se debe a que el mecanismo resistente a cortante pierde relevancia a medida que aumenta la longitud del elemento, permitiendo mayores desplazamientos últimos.

Los resultados obtenidos muestran consistencia con el comportamiento estructural analizado en los apartados anteriores. El parámetro del axil de compresión es de esta manera el determinante de la ductilidad que pueden alcanzar los elementos CHS, el resto de los parámetros del estudio varían este valor pero con una incidencia mucho menor.

5.7 Elemento CHS 90%N_{PL}

En el presente apartado se busca generar herramientas con enfoque proyectista para el diseño de elementos CHS sometidos a axil de compresión por situación de servicio, y desplazamientos de cabeza como solicitación accidental.

Como se ha observado anteriormente, el aumento de axil de compresión disminuye la ductilidad δ_3/δ_1 de todos los elementos CHS, por lo que la menor ductilidad se obtendrá para el máximo axil de compresión que pueda obtenerse en estado de servicio, considerado como 90% N_{PL}.

Este enfoque permite estudiar un caso particular de todos los elementos CHS, y generar expresiones de diseño correspondientes a ese axil de compresión, en función de la esbeltez geométrica del elemento, calidad de acero y geometría de la sección transversal; permitiendo a los proyectistas obtener el valor de ductilidad mínimo que pueda presentar el pilar flexo-comprimido; ese valor la ductilidad δ_3/δ_1 solo puede aumentar si el axil de compresión real termina siendo menor a 90%N_{PL}, obteniendo un diseño del lado de la seguridad.

De tal manera, a continuación se muestran en la Fig 67 distintos gráficos con los valores de ductilidad δ_3/δ_1 en función de D/t/ε, todos correspondientes a un desplazamiento de axil de compresión de 90%N_{PL}. Los gráficos pertenecen a los subgrupos por longitudes de elementos CHS, cada longitud con sus cuatro calidades de acero.

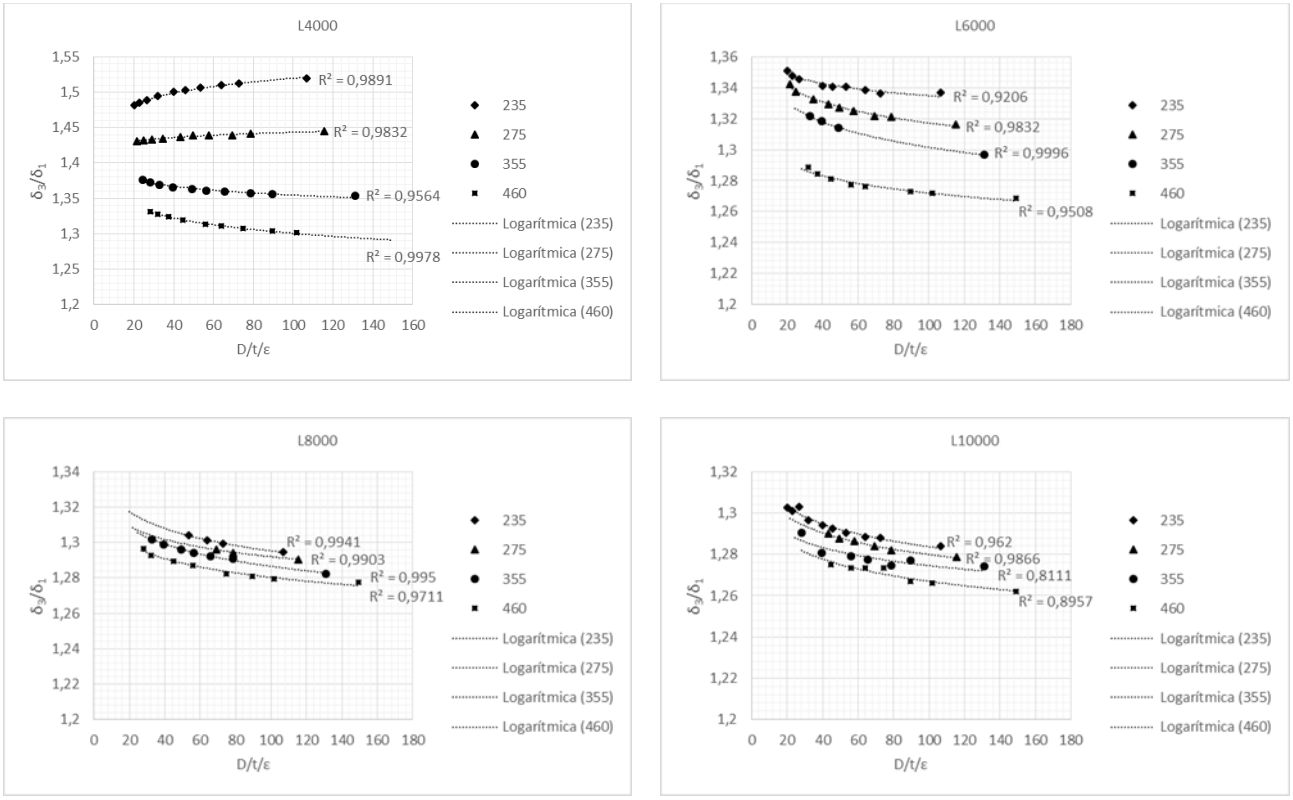


Fig. 67. δ_3/δ_1 vs D/t/ϵ a 90%N_{PL} (L, f_y).

Se observa que a medida que la longitud aumenta los datos se concentran en un rango de valores de ductilidad δ_3/δ_1 menor, y que como se explicó en el apartado anterior, también disminuye de manera generalizada en el valor de la ductilidad. Estas dispersiones de datos permitieron generar líneas de tendencia con ajuste logarítmico en función de la calidad de acero, geometría de la sección transversal y esbeltez geométrica del pilar, las cuales se muestran a continuación en la tabla 29.

λ (esbeltez geométrica)	fy			
	235N/mm2	**275N/mm3**	**355N/mm4**	**460N/mm5**
2,5	d3/d1 = 0,0229ln(D/t) + 1,4143	d3/d1 = 0,0082ln(D/t/0,92) + 1,4058	d3/d1 = -0,014ln(D/t/0,81) + 1,4176	d3/d1 = -0,024ln(D/t/0,71) + 1,409
3,75	d3/d1 = -0,009ln(D/t) + 1,3746	d3/d1 = -0,015ln(D/t/0,92) + 1,3861	d3/d1 = -0,018ln(D/t/0,81) + 1,3842	d3/d1 = -0,012ln(D/t/0,71) + 1,3336
5	d3/d1 = -0,014ln(D/t) + 1,359	d3/d1 = -0,011ln(D/t/0,92) + 1,3412	d3/d1 = -0,014ln(D/t/0,81) + 1,3492	d3/d1 = -0,012ln(D/t/0,71) + 1,3281
6,25	d3/d1 = -0,012ln(D/t) + 1,3391	d3/d1 = -0,012ln(D/t/0,92) + 1,3329	d3/d1 = -0,01ln(D/t/0,81) + 1,3189	d3/d1 = -0,012ln(D/t/0,71) + 1,321

Tabla 29. Expresiones de diseño (90%N_{PL}).

Las expresiones de la tabla 29 permiten estimar con gran precisión la ductilidad de los elementos CHS dentro del rango de variables paramétricas de longitud (L), espesor (t) y calidad de acero (f_y) utilizadas a lo largo del presente estudio, para un axil de compresión de 90% N_{PL}; sin embargo, no son de uso práctico para el proceso de diseño, por lo que se propone finalmente el uso de la siguiente expresión:

$$\delta_3 = -0.012\delta_1 \ln(D/t/0.71) + 1.32\delta_1$$

Ecuación 24. Expresión de diseño, desplazamiento último.

Donde,

$$\delta_1 = Desplazamiento\ al\ 80\%\ V_{max}\ en\ la\ rama\ elástica$$

Para secciones transversales capaces de desarrollar la totalidad de su momento plástico, δ_1 puede calcularse con la siguiente expresión:

$$\delta_1 = 0.8\frac{M_{PL}L^2}{6EI}$$

Ecuación 25. Cálculo de δ_1.

La ecuación 24 representa un límite inferior de la ductilidad que puede presentar un elemento CHS sometido a un axil de compresión de 90% N_{PL}, y corresponde al elemento de longitud L=10000mm y calidad de acero S460. La razón de utilizar esta expresión responde a las siguientes consideraciones:

- al aumentar la longitud del elemento CHS disminuye ductilidad δ_3/δ_1.
- al aumentar la calidad del acero disminuye ductilidad δ_3/δ_1.

- la diferencia entre los valores de ductilidad δ_3/δ_1 entre las calidades de acero S235 y S460, para una misma longitud y a partir de 6000mm, es de sólo 3%.

Con lo cual la ecuación 24, al corresponder al elemento de mayor longitud y mayor calidad de acero, permite determinar un valor ductilidad δ_3/δ_1 valido y con carácter conservador para cualquier sección transversal CHS sometida al 90% de N_{PL}. De tal manera, cualquier variación en el axil de compresión, longitud del elemento o calidad de acero, dentro de los parámetros establecidos en este estudio, sólo puede implicar la mejora en la ductilidad δ_3/δ_1; permitiéndole a los proyectistas conocer el aprovechamiento mínimo seguro, en régimen no lineal, que pueden obtener del elemento estructural.

6 CONCLUSIONES

En la presente tesina, se ha analizado el comportamiento estructural de elementos metálicos tubulares CHS (Circular Hollow Section) sometidos a esfuerzos de compresión y desplazamiento de cabeza incremental. El diseño de los elementos CHS, considerando su comportamiento en régimen no lineal por la geometría y el material, exige comprender cómo la variación de los parámetros geométricos y mecánicos afectan la ductilidad final del elemento, especialmente la relación de esbeltez D/t, la cual condiciona el modo de fallo estructural y la aparición de fenómenos de inestabilidad local y abolladura.

- Conclusiones relativas al modo de fallo en función de D/t y la clasificación seccional

Se logró comprobar que bajo acción de flexión pura los fenómenos de abolladura se amplifican a medida que disminuye el espesor y aumenta el límite elástico del material. Cuando $D/t/\varepsilon$ aumenta no sólo se incrementa la deformación y excentricidad del pliegue formado sino que se empieza a observar la formación de pliegues hacia el interior de la sección en los segmentos laterales de esta y en el traccionado, lo cual corresponde a la clasificación seccional sugerida en la norma EAE (Clase 4); por otro lado al disminuir $D/t/\varepsilon$ el elemento logró alcanzar el desplazamiento de cabeza activando rotulas plásticas en sus extremos, en donde el material plastifico sólo en la zona de rotación y de manera homogénea entre la parte traccionada y comprimida, presentando una deformada más leve, lo cual corresponde a la clasificación seccional sugerida en la norma EAE (Clase 1).

- Conclusiones relativas al comportamiento del elemento singular

Para t.

La ductilidad δ_3/δ_1 no presenta grandes variaciones y se mantiene en un rango entre 1.36 y 1.38 con una tendencia a incrementar a medida que lo hace el espesor de la sección. El ángulo α permanece prácticamente constante con una ligera tendencia a disminuir a medida que aumenta el espesor, el cual aumenta la rigidez y limita los desplazamientos.

Para L.

La ductilidad δ_3/δ_1 presenta de igual manera poca variación, y existe en un rango de valores entre 1.42 y 1.37, con tendencia a disminuir a medida que aumenta la longitud del elemento. La rigidez disminuye y el mecanismo resistente a cortante pierde relevancia a medida que aumenta la longitud, con lo que los desplazamientos últimos aumentan y por lo tanto el valor del ángulo α.

Para f_y.

El comportamiento de f_y no altera la ductilidad δ_3/δ_1, con valor de 1.38, ya que el desplazamiento a compresión se calcula en función de cada f_y, por lo que los valores de $\%N_{PL}$ son proporcionales entre sí para cada caso, con lo que los comportamientos elásticos son iguales y por lo tanto los δ_1, al igual que las rigideces a cortante. El ángulo α aumenta ligeramente junto a la calidad del acero, la cual implica una peor clasificación seccional, sin embargo el incremento de δ_3 no altera significativamente la ductilidad.

Para $\%N_{PL}$.

El axil de compresión $\%N_{PL}$ es el parámetro de mayor influencia sobre la ductilidad δ_3/δ_1 y el ángulo α. Generando una variación con tendencia a disminuir de valor a medida que aumenta el axil de compresión, ya que un axil mayor empeora el comportamiento a flexo-compresión e induce inestabilidad local con más rapidez, la cual compromete la posterior respuesta estructural del elemento CHS. El rango de existencia de valores de ductilidad para este caso se encuentra entre 1.74 ($10\%N_{PL}$) y 1.34 ($90\%N_{PL}$), con lo que se tiene una pérdida de hasta 35% en la ductilidad.

- Conclusiones relativas al comportamiento del grupo de elementos CHS

El estudio en el comportamiento de la respuesta estructural se discretizó en los subgrupos (L4000, L6000, L8000 y L10000) y sus correspondientes calidades de acero. De donde se obtuvo que el axil de compresión es el parámetro de mayor influencia en el comportamiento de los datos, así como que la ductilidad δ_3/δ_1 de los elementos CHS tiende a converger a un mismo valor para todos los valores de $D/t/\varepsilon$ a medida que aumenta el valor de $\%N_{PL}$ aplicado, considerando una misma longitud y calidad de acero. También se concluye que la ductilidad δ_3/δ_1 disminuye a medida que aumenta la longitud del elemento, considerando calidades de acero iguales.

El ángulo α presentó de igual manera un comportamiento consistente entre distintas longitudes y calidades de acero, disminuyendo de valor con el aumento del axil de compresión $\%N_{PL}$ aplicado, hasta alcanzar un valor similar para los distintos $D/t/\varepsilon$. También se observó un menor rango de valores de ductilidad posibles a medida que aumenta el espesor (t) de la sección y una tendencia al aumento de los valores de ángulo α con el incremento de la longitud del elemento.

Las secciones clase 1 mostraron, de manera constante, mayor ductilidad media que las secciones clase 4; presentando una tendencia a la disminución de esta diferencia a medida que aumenta la longitud del elemento.

- Conclusiones relativas al elemento CHS $90\%N_{PL}$

Se concluye que a medida que aumenta la longitud del elemento CHS la calidad de acero utilizada empieza a hacerse irrelevante y los valores de ductilidad δ_3/δ_1 se concentran en un rango menor para cada $D/t/\varepsilon$, de igual manera estos valores tienden a disminuir con dicho aumento de longitud considerando una calidad de acero fija.

Las dispersiones de datos de ductilidad δ_3/δ_1 permitieron generar líneas de tendencia con buen ajuste para la definición de expresiones de cálculo para la estimación de la ductilidad δ_3/δ_1 ($90\%N_{PL}$) en función de la geometría seccional, esbeltez geométrica del elemento y calidad de acero utilizada.

Se obtuvo una expresión de diseño para el cálculo del límite inferior de desplazamiento δ_3, la cual permite conocer la incursión en régimen no lineal que un elemento CHS en sus condiciones más desfavorables; logrando una estimación valida, conservadora y práctica para los ingenieros proyectistas.

7 REFERENCIAS

Bortoluzzi, C. (8 de Mayo de 2012). *archdaily*. Obtenido de http://www.archdaily.com.br/br/01-47630/kings-cross-station-john-mcaslan-mais-partners

Bozzo Rotondo, L. M., & Barbat, . H. (2004). *Diseño sismorresistente de edificios.* Reverté.

Brajovic, M. (14 de Mayo de 2013). *bamboo*. Obtenido de http://www.bamboonet.com.br/posts/material-de-facil-manuseio-o-bambu-e-a-estrela-dos-projetos-selecionados-pelo-arquiteto-marko-brajovic

Canet, J. M. (2006). *Cálculo de estructuras: Fundamentos y estudio de secciones.* Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya CPET.

Chacon, R., Mirambell, E., & Real, E. (2013). Strength and ductility of concrete-filled tubular piers of integral bridges. *Engineering structures, Vol. 46*, 234-246.

Charleux, L. (2009-2010). Writing Python Scripts for Abaqus.

Elchalakani, M., Zhao, X., & Grzebieta, R. (2001). Plastic slenderness limits for cold-formed circular hollow sections. *Australian Journal of Structural Engineering, 3*, 127-141.

Elchalakani, M., Zhao, X., & Grzebieta, R. (2002). Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research, 58*, 1407-1430.

EN. (2005). *EN 1993-1-1:2005 Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.* Bruselas.

gmp. (2014). *gmp-arquitetos*. Obtenido de http://www.gmp-arquitetos.com/projetos/flughafen-stuttgart-terminal-3.html

H Jiao, X. Z. (2004). Section slenderness limits of very high strength circular steel tubes in bending. *Thin-Walled Structures, 42,* 1257–1271.

ITEA. (2014). *Estructuras tubulares.* ITEA.

Kiymaz, G. (2005). Strength and stability criteria for thin-walled stainless steel circular hollow section members under bending. *Thin-Walled Structures, 43* , 1534–1549.

Langtangen, H. P. (2008). *Python scripting for computational science.* Berlin: Springer.

Lanhui, G., Shijun, Y., & Hui, J. (2013). Behavior of thin-walled circular hollow section tubes subjected to bending. *Thin-Walled Structures*.

M. Elchalakani, X. Z. (2002). Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research, 58,* 1407–1430.

METAEFFICIENT. (s.f.). *METAEFFICIENT*. Obtenido de http://www.metaefficient.com/news/two-wind-farms-get-new-zealand-closer-to-90-renewable-power.html

Ministerio de Fomento, G. d. (2012). *EAE Instruccuión de Acero Estructural.*

NASA, A. N. (1965). *DESCRIPTION OF STRESS-STRAIN CURVES BY THREE PARAMETERS.* Washington: NASA Scientific and Technical Information Facility.

Riks, E. (1972). The application of Newton's method to the problem of elastic stability. *Journal of Applied Mechanics, 39*, 1060-1065.

Riks, E. (1979). An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. *International Journal of Solids and Structuress, 15*, 529-551.

Rondal, J., Würker, K.-G., Dutta, D., Wardenier, J., & Yeomans, N. (1992). *Structural Stability of Hollow Sections.* Berlin: verlag tüv rheinland.

Schneider, S. (1998). Axially loaded concrete-filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 124, nº 10*, 1125–1138.

Sherman, D. (1976). Tests of circular steel tubes in bending. *Journal of the Structural Division, 102*, 2181–2195.

Simulia, B. (2012). *Abaqus Scripting Reference Manual*. Obtenido de University of Cambridge: https://things.maths.cam.ac.uk/computing/software/abaqus_docs/docs/v6.12/books/ker/default.htm

Simulia, B. (2012). *Abaqus/CAE User's Manual.* RI, USA.

Steel, B. (2003). *Hot Finished SHS for Multi-storey Columns.* Corby, UK: Corus .

Ummenhofer, T. (2014). Structural hollow sections – recent developments. In *Steel Construction 7.* Berlin: © Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG.

Wardenier, J., Packer, J., Zhao, X.-L., & van der Vegte, G. (2010). *HOLLOW SECTIONS IN STRUCTURAL APPLICATIONS.* Geneva, Switzerland: Bouwen met Staal.

Wempner, G. (1971). Discrete approximation related to nonlinear theories of solids. . *International Journal of Solids and Structures, 7*, 1581-1599.

Zhao, O., Gardner, L., & Young, B. (2016). Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part 2: Parametric studies and design. *Thin-Walled Structures 101*, 240-248.

Zhao, O., Gardner, L., & Young, B. (2016). Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part1: Experiments and numerical modelling. *Thin-Walled Structures 101*, 231-239.