

**Estudio experimental de los perfiles conformados a frío:  
Comparación con el Eurocódigo**

**Estudo experimental de perfis enformados a frio:  
Comparação com o Eurocódigo**

Relatório da Unidade Curricular de Projecto  
**Licenciatura em Engenharia Mecânica**  
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

---

(Maria Lourdes Garcia Herrero)

Junio 2012

A Escola Superior de Tecnologia e Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

Certifico que li este relatório e que na minha opinião, é adequado no seu conteúdo e forma como demonstrador do trabalho desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular de Projecto.

---

Luis Manuel Ribeiro de Mesquita Orientador

Certifico que li este relatório e que na minha opinião, é adequado no seu conteúdo e forma como demonstrador do trabalho desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular de Projecto.

---

Paulo Alexandre Gonçalves Piloto Arguente

Aceite para avaliação da Unidade Curricular de Projecto

# Resumen

Este proyecto estudia el estudio de perfiles de acero conformados en frío según el reglamento europeo y experimental para determinar la resistencia a tracción y compresión según el Eurocodigo son analizadas dos secciones distintas, secciones C y Z a temperatura ambiente y temperatura elevada.

Para una mejor comprensión del tema son presentados argumentos teóricos esenciales, proceso de fabricación, ventajas e inconvenientes de la utilización de los estos perfiles, o su comportamiento estructura y las diferencias entre los distintos tipos de inestabilidad.

Es presentado la metodología de verificación de seguridad en relación con los estados límite últimos de las secciones de clase 4 a temperatura ambiente y temperaturas elevadas.

También es incluida la metodología de calculo de las propiedades efectivas de las secciones C y Z y su implementación numérica en el programa Matlab.

Experimentalmente son representados los resultados de las propiedades mecánicas de los perfiles utilizados, basados en los ensayos de tracción.

Es presentado y desarrollado un montaje experimental para el estudio de los perfiles conformados en frío cortos sujetos a esfuerzos de compresión. Este montaje es utilizado para realizar los ensayos compresión de los perfiles de sección C de diferentes dimensión y espesura. Durante los ensayos son medidos los desplazamientos axiales y los desplazamientos del alma y de los banzos de la sección central de los perfiles a través de LVDTs.

Los resultados de los ensayos de compresión son comparados con los resultados de la formulación simplificada en el Eurocodigo.

En la parte final del proyecto y también presentado se desarrollado un nuevo montaje experimental con líneas de futuro para la medición de imperfecciones geométricas de los perfiles y un montaje experimental que permite la realización de los ensayos de los perfiles a compresión en condiciones de temperatura ambiente e incendio.





**Maria Lourdes Garcia Herrero**

**Estudio experimental de los perfiles conformados a frío:  
Comparación con el Eurocódigo**

**Junio 2012**

**Licenciatura em Engenharia Mecânica**

**Estudio experimental de los perfiles conformados a frío:  
Comparación con el Eurocódigo**

**Estudo experimental de perfis enformados a frio:  
Comparação com o Eurocódigo**

Relatório da Unidade Curricular de Projecto  
**Licenciatura em Engenharia Mecânica**  
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

---

(Maria Lourdes Garcia Herrero)

Junio 2012

A Escola Superior de Tecnologia e Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

Certifico que li este relatório e que na minha opinião, é adequado no seu conteúdo e forma como demonstrador do trabalho desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular de Projecto.

---

Luis Manuel Ribeiro de Mesquita Orientador

Certifico que li este relatório e que na mmminha opinião, é adequado no seu conteúdo e forma como demonstrador do trabalho desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular de Projecto.

---

Paulo Alexandre Gonçalves Piloto Arguente

Aceite para avaliação da Unidade Curricular de Projecto

# Resumen

Este proyecto estudia el estudio de perfiles de acero conformados en frío según el reglamento europeo y experimental para determinar la resistencia a tracción y compresión según el Eurocodigo son analizadas dos secciones distintas, secciones C y Z a temperatura ambiente y temperatura elevada.

Para una mejor comprensión del tema son presentados argumentos teóricos esenciales, proceso de fabricación, ventajas e inconvenientes de la utilización de los estos perfiles, o su comportamiento estructura y las diferencias entre los distintos tipos de inestabilidad.

Es presentado la metodología de verificación de seguridad en relación con los estados límite últimos de las secciones de clase 4 a temperatura ambiente y temperaturas elevadas.

También es incluida la metodología de calculo de las propiedades efectivas de las secciones C y Z y su implementación numérica en el programa Matlab.

Experimentalmente son representados los resultados de las propiedades mecánicas de los perfiles utilizados, basados en los ensayos de tracción.

Es presentado y desarrollado un montaje experimental para el estudio de los perfiles conformados en frío cortos sujetos a esfuerzos de compresión. Este montaje es utilizado para realizar los ensayos compresión de los perfiles de sección C de diferentes dimensión y espesura. Durante los ensayos son medidos los desplazamientos axiales y los desplazamientos del alma y de los banzos de la sección central de los perfiles a través de LVDTs.

Los resultados de los ensayos de compresión son comparados con los resultados de la formulación simplificada en el Eurocodigo.

En la parte final del proyecto y también presentado se desarrollado un nuevo montaje experimental con líneas de futuro para la medición de imperfecciones geométricas de los perfiles y un montaje experimental que permite la realización de los ensayos de los perfiles a compresión en condiciones de temperatura ambiente e incendio.

# Resumo

Este projeto aborda o estudo de perfis de aço formados a frio segundo a regulamentação europeia e experimentalmente para determinar a resistência à tração e compressão. Segundo o Eurocódigo são analisadas duas secções distintas, secções C e Z, à temperatura ambiente e temperaturas elevadas.

Para uma melhor compreensão do tema são apresentados os tópicos teóricos essenciais, os processos de fabrico, vantagens e desvantagens da utilização destes perfis, o seu comportamento estrutural e as diferenças entre os diferentes tipos de instabilidades.

É apresentada a metodologia de verificação de segurança em relação aos estados limite últimos das secções de classe 4 à temperatura ambiente e temperaturas elevadas. Adicionalmente é implementada a metodologia de cálculo das propriedades efectivas das secções C e Z, e sua implementação numérica no software Matlab.

Experimentalmente são apresentados os resultados de caracterização das propriedades mecânicas dos perfis utilizados, baseados nos ensaios de tração.

É apresentado o desenvolvimento do setup experimental para estudo de perfis enformados a frio curtos sujeitos à esforços de compressão. Este setup experimental é utilizado para realizar os testes de compressão de perfis de secção C de diferentes dimensões e espessuras. No decorrer dos ensaios são medidos os deslocamentos axiais e os deslocamentos da alma e dos banzos da secção central dos perfis através de LVDTs.

Os resultados dos ensaios de compressão são comparados com os resultados da formulação simplificada do Eurocódigo.

Na fase final do relatório é ainda apresentado o desenvolvimento de um novo setup experimental com vista à medição das imperfeições geométricas dos perfis e o setup experimental que permite a realização de ensaios de perfis longos à compressão, em condições de temperatura ambiente e de incêndio.

# Abstract

This project focuses on the study of cold-formed steel sections using the European structural Eurocodes and experimental tests. Two different sections are studied, C and Z, both in tensile and compression tests, at ambient and elevated temperatures.

Some theoretical background is also covered due to its importance to a better understanding this research. The main topics covered are the manufacturing processes, steel characteristics as manufacturing material, structural behavior and differences between different instability types.

The safety verification in relation to the ultimate limit states of class 4 sections is presented at ambient and elevated temperatures. The effective properties determination is presented for both sections and implemented in Matlab.

Experimentally, tensile tests are presented to quantify the steel mechanical properties: Elastic modulus and yield strength.

A new experimental setup is developed to study cold-formed short profiles in compression. A set of tests using different sections and steel thicknesses are presented. During the tests the axial displacements and the central web and flanges displacements are measured using LVDTs. These results are compared with the Eurocode results.

Regarding future developments of this study, two new experimental setups are developed and presented. One to measure the initial geometric imperfections of cold-formed sections and other one to study cold-formed members in compression at ambient temperatures and fire conditions.

# Agradecimientos

Quiero agradecer a mi tutor Luis Mesquita por su orientación y dedicación en la ejecución del proyecto demostrando siempre mucha disponibilidad y por su trato amable y cercano. Igualmente quiero agradecer a los técnicos de laboratorio Luisa Barreira y Jorge Meireles por su entrega, ayuda y sentirme con ellos como una compañera mas.

También quiero expresar mi agradecimiento a mi familia y amigos durante todos estos años.

# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>15</b>
1.1	Tipos de elementos estructurales .....	17
1.2	Comportamiento estructural.....	20
1.3	Estabilidad de elementos de sección de pared delgada .....	23
1.3.1	Modo Local de Placa (MLP).....	26
1.3.2	Modo Distorsional (MD).....	27
1.3.3	Modos Globales (de flexión y flexión-torsión) .....	28
1.4	Organización del documento.....	29
<b>2</b>	<b>CONFORMADOS EN FRÍO EN SITUACIÓN DE INCENDIO</b> .....	<b>30</b>
2.1	Comportamiento del acero .....	30
2.2	Estado de arte .....	32
<b>3</b>	<b>VERIFICACIÓN DE SEGURIDAD SEGÚN LOS EUROCÓDIGOS</b> .....	<b>35</b>
3.1	Verificación de seguridad de los perfiles conformados en frío a temperatura ambiente.....	35
3.1.1	Resistencia da sección transversal a compresión .....	35
3.1.2	Resistencia de los elementos a pandeo.....	36
3.2	Verificación de seguridad de los perfiles conformados en frío a temperaturas elevadas.....	41
3.2.1	Resistencia de la sección transversal a compresión.....	41
3.2.2	Resistencia de los elementos a pandeo.....	43
3.3	Determinación de las propiedades efectivas de los elementos de clase 4 sujetos à compresión .....	44
3.4	Aplicación de la metodología Matlab .....	55
3.5	Determinación de las propiedades efectivas y resistencia de secciones C y Z.....	55
3.5.1	Propiedades geométricas:.....	56
3.5.2	Propiedades de la sección bruta: .....	57
3.5.3	Propiedades efectivas a compresión.....	58
3.5.4	Verificación de la seguridad de los perfiles conformados en frio temperatura ambiente .....	66
3.5.5	Verificación de la seguridad de los perfiles conformados en frio a elevadas temperaturas .....	68
3.5.6	Propiedades geométricas .....	75
3.5.7	Propiedades de la sección bruta .....	75
3.5.8	Propiedades efectivas a compresión.....	76
3.5.9	Verificación de la seguridad de los perfiles conformados en frío .....	84
3.5.10	Verificación de la seguridad de los perfiles conformados en frio a elevadas temperaturas .....	87
<b>4</b>	<b>ENSAYOS EXPERIMENTALES DE LOS PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO</b>	

<b>4.1</b>	<b>Caracterización de las propiedades geométricas</b> .....	<b>93</b>
4.1.1	Elementos de sección C.....	93
4.1.2	Elementos de Sección Z: .....	97
<b>4.2</b>	<b>Caracterización de las propiedades mecánicas</b> .....	<b>100</b>
4.2.1	Dimensiones de las probetas .....	100
4.2.2	Proceso de extracción de las probetas: .....	102
4.2.3	Elementos de sección C.....	103
4.2.4	Elementos de Sección Z.....	107
<b>4.3</b>	<b>Setup experimental de los ensayos a compresión:</b> .....	<b>111</b>
<b>4.4</b>	<b>Resultados de los ensayos a temperatura ambiente:</b> .....	<b>113</b>
4.4.1	Elementos de sección C para espesor de 2mm: .....	114
4.4.2	Elementos de sección C para espesor de 1,5mm: .....	125
<b>5</b>	<b>COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONSIDERACIONES FINALES: .....</b>	<b>136</b>
5.1	Trabajos futuros.....	138
	<b>CODIGO MATLAB DE VERIFICACIÓN DE SEGURIDAD A TEMPERATURA AMBIENTE:.....</b>	<b>144</b>
	<b>CODIGO MATLAB DE VERIFICACIÓN DE SEGURIDAD A TEMPERATURA ELEVADA .....</b>	<b>157</b>

# Lista de Tablas

Tabla 1-Factores de imperfección para curvas de pandeo .....	37
Tabla 2- Escoger la curva de pandeo en función de la sección transversal.....	38
Tabla 3-Factores de reducción de acero para secciones de clase 4 .....	42
Tabla 4- Elementos de compresión interna.....	47
Tabla 5- Medidas geométricas del perfil C .....	93
Tabla 6- Medidas efectivas del perfil C.....	94
Tabla 7- Valores de los Estados Límite del perfil C .....	95
Tabla 8- Medidas efectivas del perfil C.....	96
Tabla 9-- Valores de los Estados Límite del perfil C.....	96
Tabla 10- Medidas geométricas del perfil Z .....	97
Tabla 11-Medidas efectivas del perfil Z.....	98
Tabla 12- Valores del los Estados Límite del perfil Z .....	98
Tabla 13- Medidas efectivas del perfil Z.....	99
Tabla 14- Valores de los Estados Límite del perfil Z .....	100
Tabla 15– Dimensiones de las probetas.....	102
Tabla 16- Dimensiones de las probetas C14 y C10.....	103
Tabla 17-Resultados de las probetas C14 y C10.....	103
Tabla 18- Dimensiones de las probetas C3 y C5.....	105
Tabla 19-Resultados de C3 y C5.....	105
Tabla 20- Dimensiones de las probetas de Z1 y Z7 .....	107
Tabla 21- Resultados de las probetas de Z1 y Z7 .....	108
Tabla 22- Dimensiones de las probetas .....	109
Tabla 23- Resultados de las probetas .....	110

# Lista de Figuras

Figura 1- Proceso de laminación en frío [2].	16
Figura 2- Proceso de laminación en frío [3]	16
Figura 3- Proceso de doblado y plegado [3]	17
Figura 4- Perfiles de conformación en frío	18
Figura 5- Paneles de chapa perfiladas en acero conformado en frío	18
Figura 6- Aplicación de perfiles conformados en frío en la construcción.	19
Figura 7- Inestabilidad local, torsión y desplazamiento	21
Figura 8-Evolución de la tensión crítica con el número de refuerzos	21
Figura 9-Colapso del alma junto a los apoyos	22
Figura 10- Tipos de equilibrios: a) Estable b) inestable c) neutro.	22
Figura 11-Tipos de estructuras sujeta a inestabilidad por bifurcación:	23
Figura 12- Trayectoria de equilibrio asociada a la inestabilidad por bifurcación[6].	23
Figura 13- Variación de la configuración del modo de inestabilidad con la longitud de la columna[6]	24
Figura 14- configuración de los modos de inestabilidad de una columna simplemente apoyada con sección C: a) local de placa(MLP), (b) distorsional (MD), (c) flexión-torsión e (d) flexión (MGFT), [5].	24
Figura 15- Configuración del MLP en un trozo de columna con sección tubular cuadrada, [7].	26
Figura 16- Configuraciones a) Perfil en C inicial b) Perfil C con un Modo distorsional aplicado, [7].	27
Figura 17- Ejemplo de un perfil ensayado a compresión	28
Figura 18-Acción de incendio en el edificio del edificio Windsor (2005).	31
Figura 19- Acción de un incendio del WTC (2001)	31
Figura 20- Factores de reducción para la relación de tensión extensión de secciones de acero de clase 4.	43
Figura 21- Modelo real con banzo a compresión.	46
Figura 22- Modelo equivalente de banzo a compresión (paso 1)	46
Figura 23- Modelo equivalente de banzo a compresión (paso 2)	49
Figura 24-Área reducida según el eje a-a	51
Figura 25- Representación del proceso iterativo	51
Figura 26- Área efectiva del perfil C	65
Figura 27 –Variación del esfuerzo resistente de la sección con la temperatura.	69
Figura 28 – Variación de la resistencia a pandeo con la temperatura.	74
Figura 29-Área efectiva del perfil Z	84
Figura 30-Variación de la tensión de pandeo en función con la temperatura.	88
Figura 31-Valores de la Resistencia de pandeo para los ejes y, z	92
Figura 32- Dimensiones de la probeta	101

Figura 33 – Localización de extracción de las probetas.....	103
Figura 34 – Relación tensión-deformación de las probetas C14.....	104
Figura 35 – Relación tensión-deformación de las probetas C10.....	105
Figura 36 – Relación tensión-deformación de las probetas de C3.....	106
Figura 37 – Relación tensión deformación de las probetas de C5.....	107
Figura 38 – Relación tensión-deformación Z1.....	108
Figura 39 – Relación tension-deformación de Z7.....	109
Figura 40 – Relación tension deformación de Z3.....	110
Figura 41 – Relación tension deformación de Z6.....	111
Figura 42- Apoyo simple para el ensayo de compresión.....	111
Figura 43- Setup para los ensayos a compresión.....	112
Figura 44- Colocación de LVDT en el perfil.....	113
Figura 45- perfiles ensayados a compresión.....	113
Figura 46- desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo.....	114
Figura 47- fuerza aplicada a lo largo del tiempo.....	114
Figura 48- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada.....	115
Figura 49- Estado 1 del perfil C2 a compresión.....	116
Figura 50 Estado 2 del perfil C2 a compresión.....	116
Figura 51. Estado 3 del perfil C2 a compresión.....	117
Figura 52- Estado 4 del perfil C2 a compresión.....	117
-Figura 53- desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo.....	118
Figura 54- fuerza aplicada a lo largo del tiempo.....	118
Figura 55- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada.....	119
Figura 56 Estado 1 del perfil C7 a compresión.....	119
Figura 57- Estado 2 del perfil C7 a compresión.....	120
Figura 58- Estado 3 del perfil C7 a compresión.....	121
Figura 59- Estado 4 del perfil C7 a compresión.....	121
Figura 60- desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo.....	122
Figura 61- fuerza aplicada a lo largo del tiempo.....	122
Figura 62- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada.....	122
Figura 63- Estado 1 del perfil C8 a compresión.....	123
Figura 64 Estado 2 del perfil C8 a compresión.....	123
Figura 65- Estado 3 del perfil C8 a compresión.....	124
Figura 66- Estado 4 del perfil C8 a compresión.....	124
Figura 67- desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo.....	125
Figura 68- fuerza aplicada a lo largo del tiempo.....	126
Figura 69- desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo.....	126
Figura 70 - Estado 1 del perfil C11 a compresión.....	127
Figura 71- Estado 2 del perfil C11 a compresión.....	127
Figura 72- Estado 3 del perfil C11 a compresión.....	128

<b>Figura 73- Estado 4 del perfil C11 a compresión .....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 74- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada.....</b>	<b>129</b>
<b>Figura 75- fuerza aplicada a lo largo del tiempo .....</b>	<b>129</b>
<b>Figura 76- desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo.....</b>	<b>130</b>
<b>Figura 77- Estado 1 del perfil C12 a compresión .....</b>	<b>130</b>
<b>Figura 78- Estado 2 del perfil C12 a compresión .....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 79- Estado 3 del perfil C12 a compresión .....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 80- Estado 4 del perfil C12 a compresión .....</b>	<b>132</b>
<b>Figura 81- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada.....</b>	<b>132</b>
<b>Figura 82- fuerza aplicada a lo largo del tiempo .....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 83- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada.....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 84- Estado 1 del perfil C 16a compresión .....</b>	<b>134</b>
<b>Figura 85- Estado 2 del perfil C16 a compresión .....</b>	<b>134</b>
<b>Figura 86- Estado 3 del perfil C16 a compresión .....</b>	<b>135</b>
<b>Figura 87- Estado 4 del perfil C16 a compresión .....</b>	<b>135</b>
<b>Figura 88- deformación del perfil después de un ensayo de compresión .....</b>	<b>137</b>
<b>Figura 89- Setup de medición de imperfecciones .....</b>	<b>139</b>
<b>Figura 90- Setup de analise de elementos a compresión .....</b>	<b>140</b>

# Capítulo 1

## 1 Introducción

Las secciones de acero utilizados en la construcción se puede dividir en tres grupos: laminados en caliente, soldadura fría y perfiles conformados. Desde el punto de vista de diseño, el frío perfiles formado, obtenido por chapa de acero doblado de espesor reducido se denominan perfiles de luz. Las placas de laminado en caliente y soldadas están hechas del grupo de secciones pesadas.

El esfuerzo realizado para producir una determinada pieza de acero en frío en forma depende en gran medida la forma de la sección, el espesor de la chapa y la ductilidad del acero. El proceso de fabricación de acero conformado en frío, hay dos tecnologías mecánicas: la laminación en frío y flexión.

El proceso de laminación en frío, Figura 1 es el más utilizado en la fabricación de perfiles, donde el propósito es obtener un perfil rectilíneo y de sección constante. La sección deseada y obtenida a partir de una tira de chapa plana que está ganando forma gradualmente y se mantiene a medida que avanza a través de uno o más pares de rodillos que comprimen y flexionan. El número de pares de rodillos sucesivos depende de la complejidad de la forma de la sección que se producirá. Este proceso permite la producción de partes económicamente secciones de rollos de anchura de la hoja de 900 mm y longitudes de hasta 900m. Además, en el caso de rodadura de la placa de espesores relativamente alta, puede ser necesario llevar a cabo el plegado de la hoja en varias etapas (varios rodillos sucesivos están cerrando ángulo entre las dos paredes del perfil). Este método se utiliza en la producción a gran escala, y tiene una velocidad de trabajo que varía entre 6-100 metros por minuto. Sin embargo, la velocidad normal es del orden de 30 metros por minuto, la Figura 2.

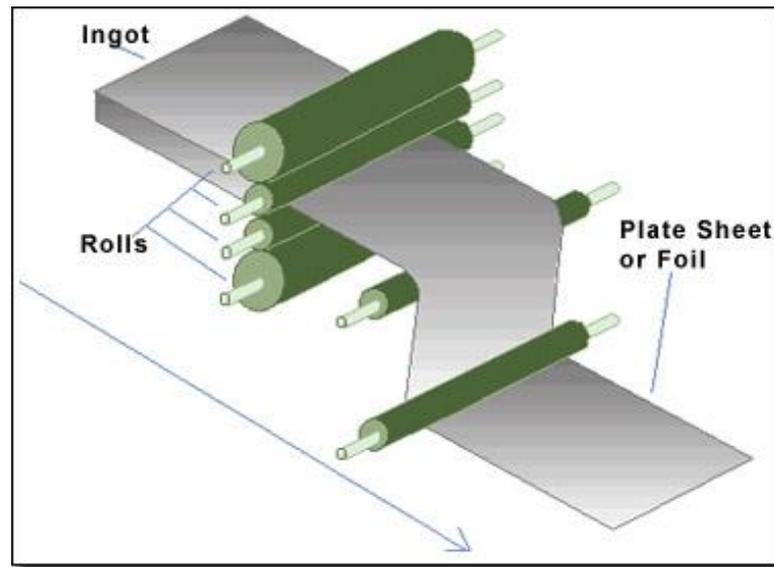


Figura 1- Proceso de laminación en frío [2].

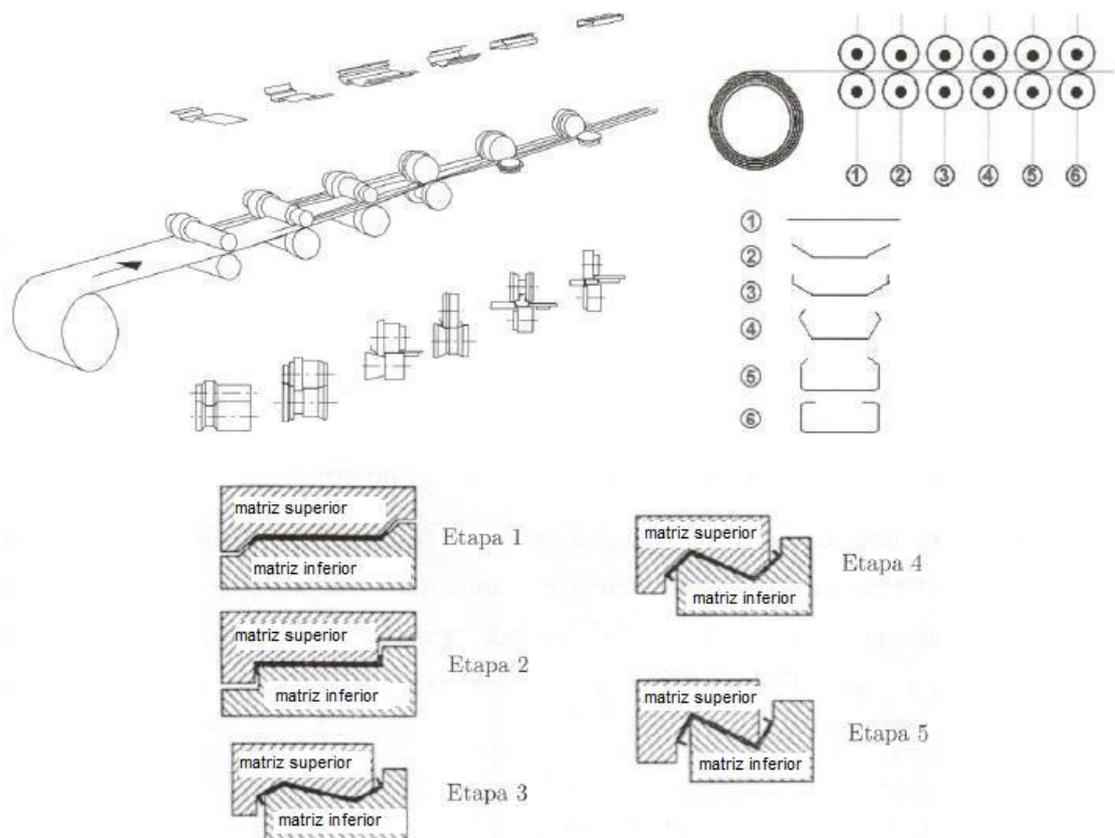
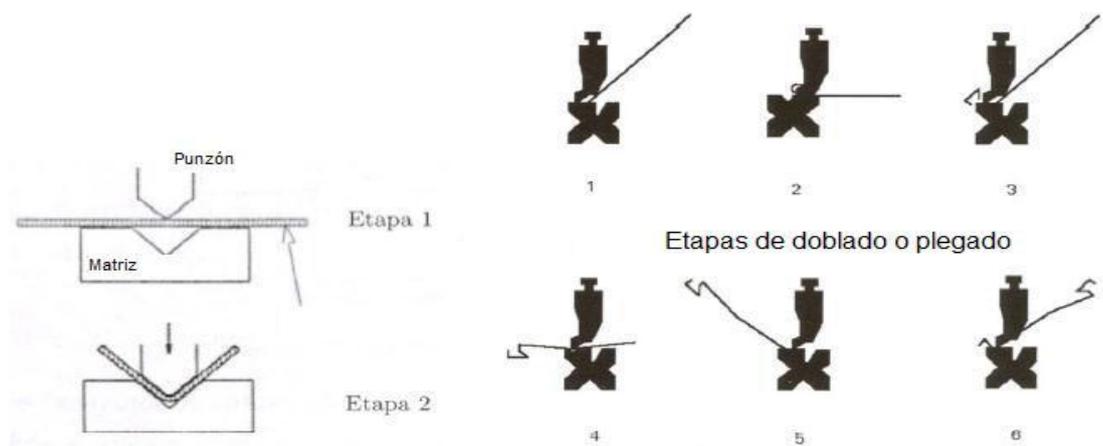


Figura 2- Proceso de laminación en frío [3]

El doblado o plegado, Figura 3 , es un proceso de fabricación que por lo general una ventaja en las pequeñas producciones (lotes pequeños) de los elementos con respecto a menos de 6 metros. La fabricación de las secciones de esta tecnología

consiste en doblar una porción de placa, de longitud limitada (en el caso de rodadura de la longitud de la parte sólo está limitado por la longitud de la hoja de rodillo) presionando contra una negativa con la forma deseada o plegado de la placa. Cada proceso tiene un ámbito de aplicación es diferente y cada una ha asociado ventajas y desventajas. La laminación esta normalmente automatizada, por lo que es más rápido y barato. Así mismo, el proceso utiliza normalmente para la fabricación de perfiles de acero conformado en frío. El proceso de laminación en frío es entonces el más utilizado ya que la producción que lleva a un enfoque sistemático, estandarizado y altamente eficiente. Se utiliza cada vez que quiere conseguir las cantidades de producción y los perfiles de alta complejidad. Además, el proceso de plegado es menos industrializado y por lo tanto utiliza principalmente para la realización de las secciones asociadas con las cantidades de producción relativamente simples y pequeñas [2].



**Figura 3- Proceso de doblado y plegado [3]**

## 1.1 Tipos de elementos estructurales

Los tipos de elementos estructurales se pueden clasificar en dos: perfiles y paneles. Los perfiles son piezas lineales, hechos de chapas de acero con un espesor entre 1,2 y 6,4 mm. Las configuraciones geométricas son los más comunes U, I, C y Z

Los paneles de placa y las placas se perfilan medio piezas laminares cuya superficie es generalmente poligonal se fabrican a partir de chapa de acero con un espesor entre 0,5 y 1,9 mm, y se utilizan en placas de acero y hormigón [2]

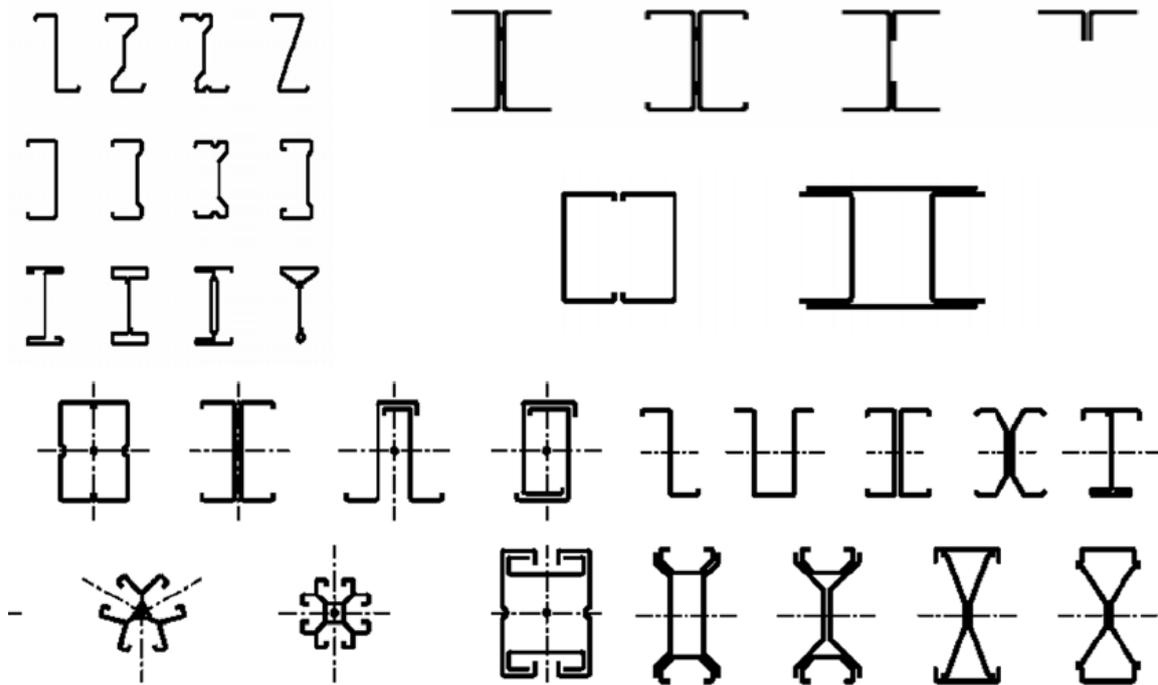


Figura 4- Perfiles de conformación en frío

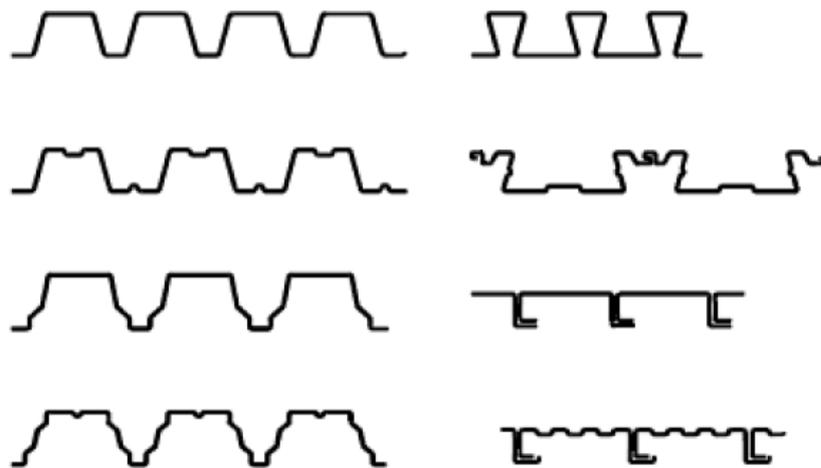


Figura 5- Paneles de chapa perfiladas en acero conformado en frío

Los perfiles conformados en frío tiene un uso creciente en la industria de la construcción, y es producido a partir de hoja de pequeño espesor (0,4 mm a 6,0 mm) doblándola por medios mecánicos (Figura 2, Figura 3) para dar así típicamente la forma deseada definida por pliegues que definen el ala y el alma, y los pliegues intermedios o final para aumentar la rigidez de sus paredes [3].



**Figura 6- Aplicación de perfiles conformados en frío en la construcción.**

Las principales ventajas de utilizar el perfil de acero se conforma en frío que tienen una alta eficiencia estructural que expresa la relación entre la fuerza óptima de alto y bajo peso, pueden construido para soportar cargas reducido y por tanto optimizar el material utilizado . Por el contrario, los elementos de acero laminado en caliente tienen geometrías mínimas, que a menudo requiere el sobredimensionamiento de las piezas para cargas pequeñas. Tiene la versatilidad de fabricación, representada por la posibilidad de producir económicamente elementos con una amplia gama de geometrías y dimensiones, algunas secciones se producen con la capacidad para adaptarse sucesivamente uno dentro de otro, permitiendo una mayor economía en su transporte y almacenamiento que proporciona un prefabricado en gran escala, de alta velocidad de instalación, mantenimiento más fácil. No hay ninguna contracción y o fluencia a temperatura ambiente, y la susceptibilidad a los ataques de hongos. Presenta una calidad uniforme, este tipo de acero y es totalmente reciclable y por lo tanto con una alta viabilidad [2].

El conformado en frío también tienen desventajas, tales como su comportamiento estructural implica diversos fenómenos de inestabilidad, algunos. No existen o son poco importantes en los perfiles de acero laminado en caliente, el cálculo de la resistencia de las secciones y los bares más complejos que otros tipos de elementos estructurales de acero. Las relaciones geométricas comprendidos en las pruebas incluyen secciones para asociados tipificado y limitada [6].

## 1.2 Comportamiento estructural

El comportamiento de los perfiles estructurales de acero conformado en frío es bastante complejo y susceptible a un número de fenómenos, que se citan a continuación:

La inestabilidad local de la naturaleza y / o en general, que son debidas a las placas de alta esbeltez (paredes) que constituyen las paredes de dichos perfiles y en el caso de secciones de pared delgada abiertas, de baja rigidez torsional, diferentes tipos de ocurriendo inestabilidad, se refieren a la Figura 7.

Deformación de alta torsión debido a la baja rigidez torsional mencionado en el párrafo anterior, y que para diferentes tipos de secciones, el centro de corte no coincide con el centro de gravedad.

Deformación que afecta a diversos tipos de sección de pared delgada abierta cuando se someten a la torsión. El tipo de condiciones de contorno de una barra para este modo de deformación tiene una gran influencia en su resistencia mecánica.

La existencia de refuerzos (en extremos o zonas intermedias), que permiten mejorar el comportamiento de las secciones estructurales que limitan su susceptibilidad a la deformación local. Estos proporcionan puntos de apoyo elástico en las sección reduciendo la longitud libre para flexionar la misma y aumentando el valor de tensión crítica de inestabilidad local, véase en la Figura 8.

El endurecimiento del acero a lo largo de los bordes longitudinales en la zona de plegado de la hoja, se traduce en un aumento de la tensión de cedencia y una disminución de la ductilidad del acero Figura 8

El colapso del alma en las secciones donde están aplicadas las fuerzas concentradas en las zonas de los apoyos, un fenómeno que se debe a la elevada esbeltez

de las paredes que constituyen las almas. Este comportamiento puede ser evitado mediante la aplicación de refuerzos en esas zonas. En el proceso de construcción aplicada a los edificios de pequeño tamaño, se aplica chapas en la zona de los apoyos que sirven simultáneamente para aportar rigidez a torsión y aumentar la resistencia de las alas para cargas Figura 9 [1].

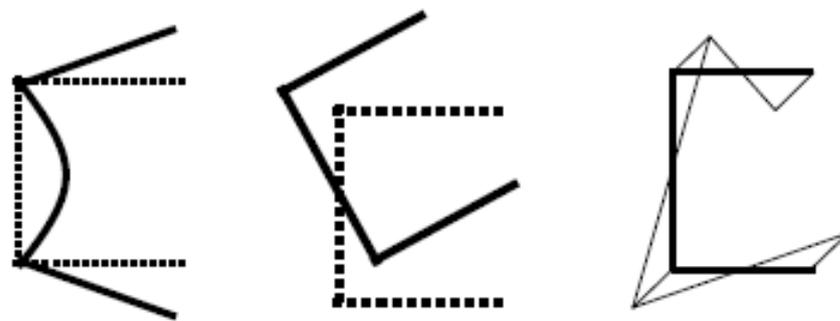


Figura 7- Inestabilidad local, torsión y desplazamiento

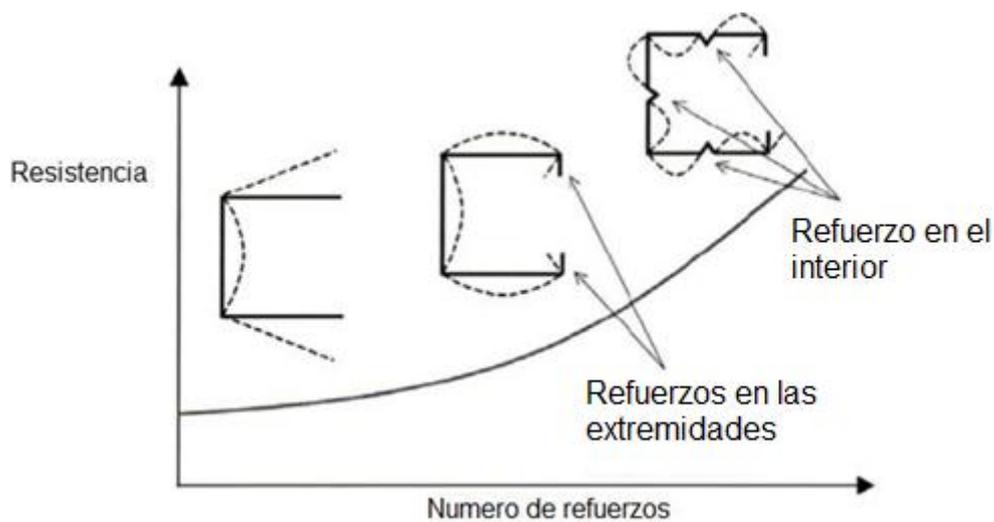


Figura 8-Evolución de la tensión crítica con el número de refuerzos



Figura 9-Colapso del alma junto a los apoyos

### 1.1 Conceptos fundamentales y tipos de inestabilidad estructural

El concepto de estabilidad estructural a largo plazo está relacionado con la capacidad de una estructura capaz de establecer una posición de equilibrio después de la introducción de una perturbación externa (fuerzas o desplazamientos).

Para los cuerpos rígidos el concepto de estabilidad puede ser representado mediante una esfera en un plano. Si la esfera está en reposo sobre la superficie cóncava se desplaza de su posición, y comienza a oscilar alrededor de su posición de equilibrio, pero con el tiempo se detendrá en su proximidad. Este equilibrio es estable, la Figura 10 a). Cuando un pequeño movimiento provoca el desarrollo de grandes desplazamientos y velocidades, es decir, cuando la esfera no se encuentra en una posición, este tipo de equilibrio se llama inestable, Figura 10 b). Cuando la esfera está en reposo en un plano horizontal y después de sufrir un desplazamiento se mantiene en reposo, la posición de equilibrio es neutra, Figura 10 c).

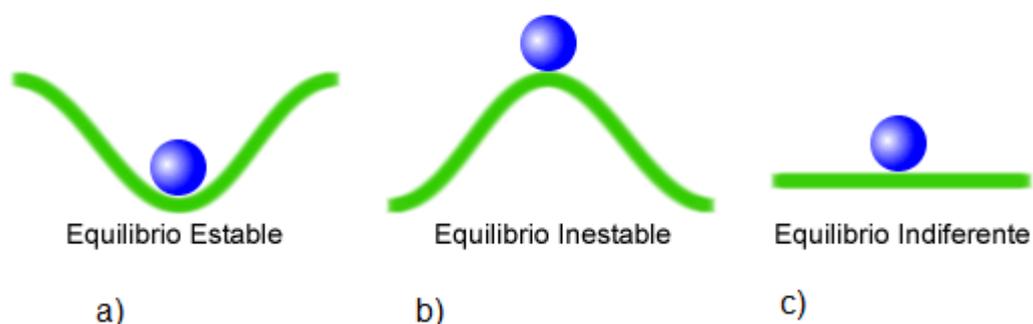
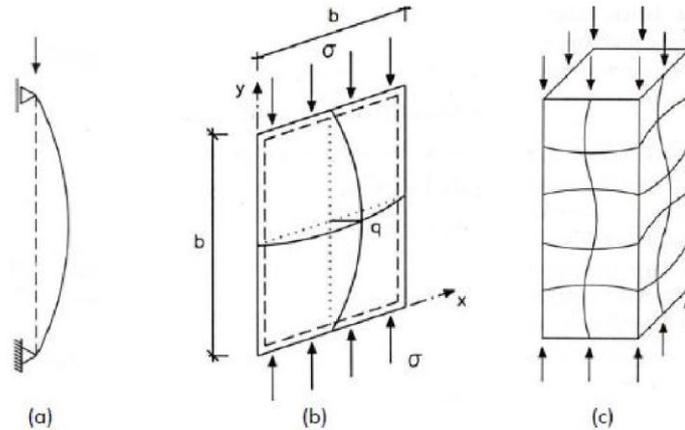


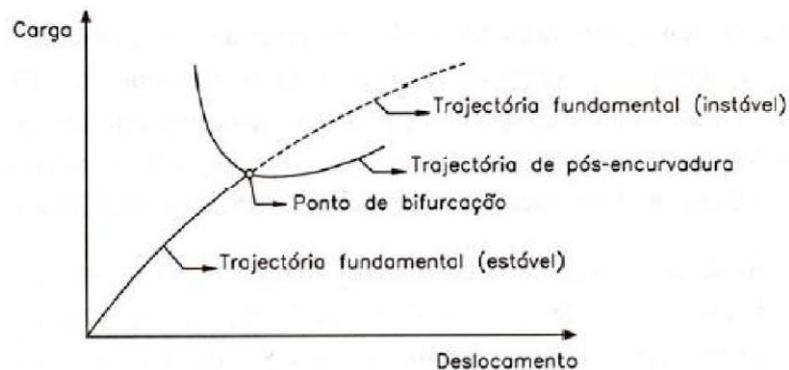
Figura 10- Tipos de equilibrios: a) Estable b) inestable c) neutro.

Las transiciones entre las configuraciones de equilibrio estable e inestable de un equilibrio, en relación con la carga-desplazamiento corresponde a la inestabilidad de la misma estructura, El modo más común es cuando sucede una bifurcación del equilibrio, llamado inestabilidad por bifurcación representado en Figura 11 para los casos de columna, placa y columna estructural [6].



**Figura 11-Tipos de estructuras sujeta a inestabilidad por bifurcación:**

a) columna; b) placa; c) columna tubular, [6]



**Figura 12- Trayectoria de equilibrio asociada a la inestabilidad por bifurcación[6].**

### 1.3 Estabilidad de elementos de sección de pared delgada

El comportamiento estructural y resistencia a la rotura con sección de pared delgada y abierta (columnas, vigas o columnas de vigas) se ve muy afectada por la ocurrencia de diversos fenómenos de inestabilidad, cuya naturaleza no es lineal (es decir, no linealidad geométrica). La determinación precisa del comportamiento geométrico no lineal de una barra con sección de pared delgada y abierta, implica,

necesariamente, la consideración simultánea de los fenómenos de inestabilidad de global y local.

En cuanto a los modos de inestabilidad global, estas se caracterizan por la ocurrencia de deformación del eje de la barra, sufriendo sus secciones transversales únicamente de desplazamientos de un cuerpo rígido en su propio plano. Normalmente, ocurre en elementos estructurales largos. Como por ejemplo la inestabilidad de las columnas (comprimido) por flexión o flexión-torsión, o bien como la inestabilidad lateral de las vigas (doblada) por flexión-torsión (ver Figura 14).

Los modos de inestabilidad local envuelven esencialmente deformaciones de las paredes de la barra, permaneciendo su eje en la configuración inicial. Normalmente ocurre en elementos de longitud corta o media. También es apropiado distinguir entre los modos de inestabilidad locales asociados a los desplazamientos de flexión transversal de las paredes sin los bordes longitudinales (pliegues) sufran desplazamiento, llamados modos locales de la placa (MLP) y los desplazamientos de los bordes longitudinales, llamado modo distorsional (MD), como se muestra en la Figura 13 y Figura 14 [6][7].

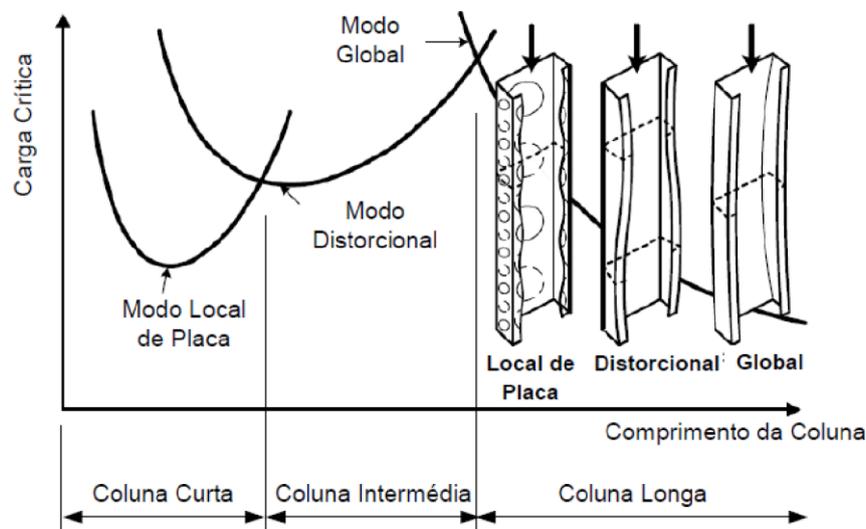


Figura 13- Variación de la configuración del modo de inestabilidad con la longitud de la columna[6]

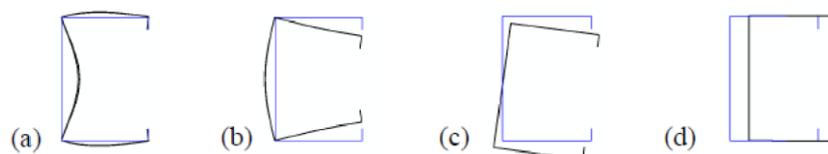


Figura 14- configuración de los modos de inestabilidad de una columna simplemente apoyada con sección C: a) local de placa(MLP), (b) distorsional (MD), (c) flexión-torsión e (d) flexión (MGFT), [5].

Dependiendo de su geometría (forma y dimensiones de la sección transversal y longitud), el comportamiento estructural de un perfil de acero conformado en frío puede ser fuertemente influenciado por cualquiera de estos tipos de fenómenos de inestabilidad.

Para determinar el comportamiento geoméricamente no lineal de un elemento estructural se recurre habitualmente a: Análisis Lineales de Estabilidad (ALE) -. Determinación del valor de la tensión crítica de bifurcación y la forma del respectivo modo de inestabilidad; Análisis no Lineales de Estabilidad (ANLE) – Determinación de la longitud de post-pandeo; Esta subdivisión en dos tipos de análisis se debe esencialmente al hecho de, desde el punto de vista práctico, no ser necesaria la caracterización integral del comportamiento de post-pandeo del elemento, bastando para eso los resultados de un análisis lineal de estabilidad. En el análisis lineal de estabilidad (ALE), se admite que la barra es geoméricamente perfecta, o sea, sin imperfecciones iniciales y, siendo rigurosos, es necesario resolver un problema de valores propios (tensiones de bifurcación) y funciones propias (modos de inestabilidad). Sin embargo, en una gran mayoría de los casos, el campo de desplazamientos de la barra es desglosado en un cierto número de grados de libertad y, entonces, es trasladado a un problema de valores y vectores (en vez de funciones) propios. En el análisis no lineal de estabilidad (ANLE), la determinación de la trayectoria de equilibrio (comportamiento post-pandeo) obliga, invariablemente, a recurrir a técnicas numéricas relativamente sofisticadas (métodos incrementales-iterativos).

Finalmente, se deduce que los fenómenos de estabilidad pueden ocurrir tanto en fase elástica como en fase elasto-plástica. Sin embargo, y dada la elevada esbeltez que caracteriza los elementos estructurales del acero conformados en frío, estos fenómenos ocurren casi siempre en régimen elástico (la plasticidad surge solo en la fase avanzada de post-pandeo), [8].

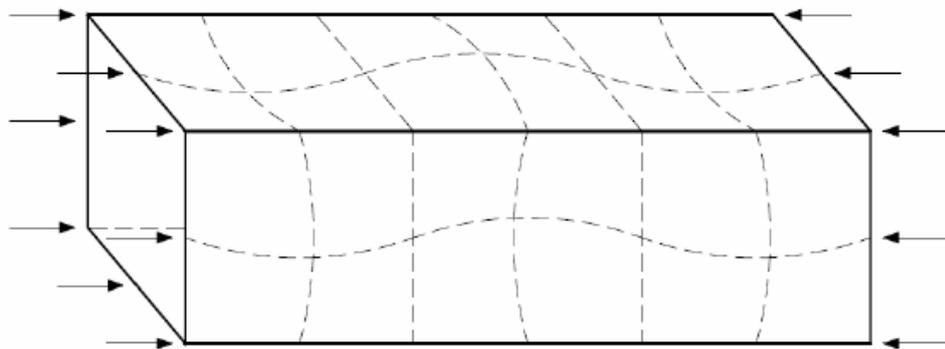
### 1.3.1 Modo Local de Placa (MLP)

En cuanto a la configuración del modo de inestabilidad, puede verificarse que los bordes longitudinales internos no sufren rotaciones, no teniendo ningún movimiento de translación, como se muestra en la Figura 15.

La deformación de las secciones se debe, exclusivamente, a la flexión de las paredes internas (las paredes externas tienen un borde libre y, por eso, sufren, sobre todo, desplazamientos de sólido rígido).

Así como para las placas cuya relación longitud/anchura es superior a 4 (“placas largas”) sometidas a compresión uniaxial, el MLP muestra semi-longitudes de onda longitudinales de mismo orden de magnitud que la anchura de la placa. De esta forma, las paredes de la barra presentan la configuración “ondulada”, correspondiente a un trozo de columna (barra sometida a compresión uniforme) con sección tubular cuadrada.

Las condiciones de frontera de la barra no afectan a la configuración del MLP y sus extremidades, sin alterar significativamente su comportamiento global.



**Figura 15- Configuración del MLP en un trozo de columna con sección tubular cuadrada, [7].**

La estabilidad de la barra está condicionada por el comportamiento de su pared (chapa o placa) más susceptible de colapsar por flexión, cuya localización depende de las dimensiones de la sección transversal (esbeltez de las múltiples placas) y de la distribución de las tensiones actuantes.

### 1.3.2 Modo Distorsional (MD)

El modo distorsional tiene una configuración que se puede verificar a través de la inestabilidad en los bordes longitudinales internos de la barra que sufren simultáneamente rotaciones y translaciones, como muestra la Figura 14:

Parte de la sección sufre distorsión y otra y en la otra predomina la deformación como sólido rígido (de las paredes internas adyacentes a los refuerzos).

El MD exhibe semi-longitudes de onda de 5 a 10 veces superiores a los del MLP, lo que causa que algunos autores no lo consideren como “modo local”. La b) muestra la configuración deformada en el MD del tronco de columna con sección en C representado en la Figura 16 a).

Al contrario que el MLP, el MD muestra elevados desplazamientos de alabeo, sobre todo en las zonas de los refuerzos. Al contrario que en el caso del MLP, el desarrollo del MD es razonablemente sensible a las condiciones de frontera de la barra, sobre todo en lo que respecta a la restricción al alabeo de las secciones extremas.

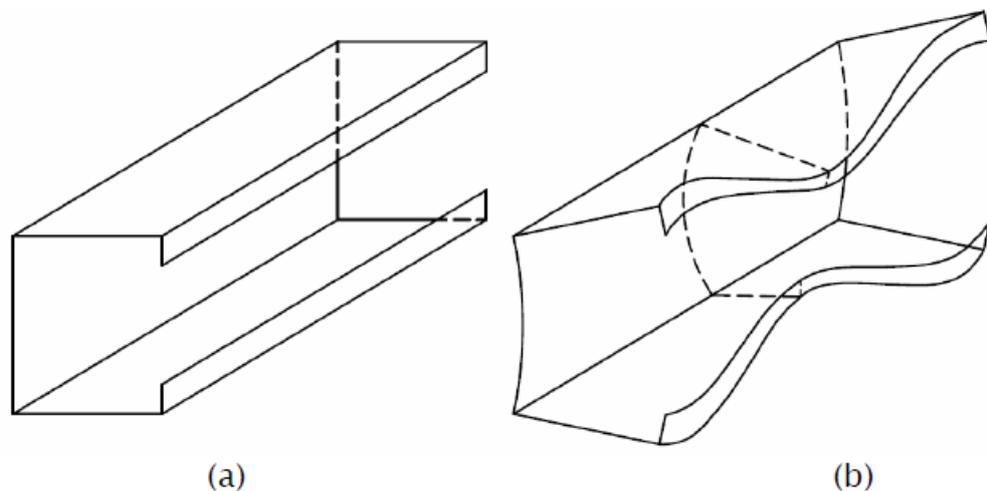
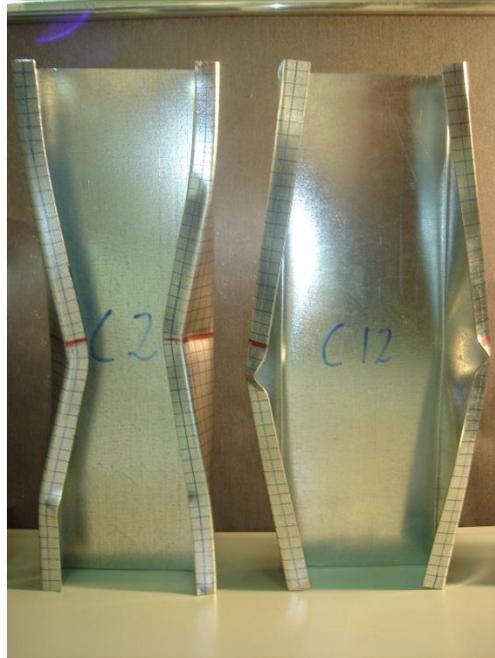


Figura 16- Configuraciones a) Perfil en C inicial b) Perfil C con un Modo distorsional aplicado, [7].



**Figura 17- Ejemplo de un perfil ensayado a compresión**

El modo distorsional resulta crítico siempre que la inestabilidad de la sub-barra preceda a todos los otros posibles fenómenos de inestabilidad, lo que implica, por un lado, la presencia de refuerzos ineficaces, y por otro lado, la existencia de contraventamientos adecuados para impedir el modo global, [6].

### **1.3.3 Modos Globales (de flexión y flexión-torsión)**

El curvado por flexión en torno a un eje principal central de inercia, de la columna de Euler y la estabilidad lateral, por flexión en torno al eje de menor inercia y torsión, de vigas (barras a flexión). En general, para los perfiles laminados en caliente, son estos los modos de inestabilidad condicionantes, razón por la cual, son los más conocidos, en general asociados a perfiles más esbeltos, como los modo de inestabilidad de torsión pura de columnas con baja rigidez de deformación.

Las secciones de las barras prácticamente no se deforman, sufriendo únicamente desplazamientos como sólido rígido (i.e.; traslaciones y/o rotaciones) en su propio plano. Ninguno de los elementos de la sección sufre algún tipo de distorsión.

Los modos críticos global es de flexión o de flexión torsión muestran una única semi-onda. En el caso de una barra simplemente apoyada en las dos direcciones, con

rotación de torsión impedida y alabeo permitido en ambos extremos, la longitud de la semi-onda corresponde la longitud de la barra. Para otras condiciones de frontera (i.e., barras con contaventamiento laterales), estos modos pueden mostrar más semi-longitudes de onda.

Tal como el MD, los modos globales son bastante sensibles a las condiciones de frontera de la barra, porque también presentan desplazamientos de alabeo apreciables.

En general, es siempre más fácil identificar los modos globales que los modos locales, pues el trozo de la curva de estabilidad es siempre descendente. No obstante, pueden existir algunas dificultades en su identificación, en la medida en que pueden ocurrir modos mixtos resultantes de la interacción de los modos globales con los MLP y/o MD, pudiendo ser difícil de identificar modos globales puros para semi-longitudes de onda de medios a largos, [8].

## **1.4 Organización del documento**

El presente trabajo tiene por base dos estudios: analítico y numéricos. En este capítulo se hace una presentación con carácter introductorio del tema, indicándose las condiciones generales acerca de los perfiles conformados en frío.

En el capítulo 2 se ilustra de algunos conceptos básicos de perfiles conformados en frío en situación de incendio así como el comportamiento del acero a elevadas temperaturas.

En el capítulo 3 se presenta la verificación de seguridad de los conformados en frío a temperatura ambiente y elevada, también se determina las propiedades efectivas de los elementos, y se adjunta la aplicación de metodología MATLAB. El capítulo termina con un ejemplo de cálculo de las propiedades efectivas y de seguridad de la resistencia a compresión y a pandeo, para una sección C y Z.

En el capítulo 4 se muestra los diferentes ensayos realizados de tensión con sus respectivos resultados y gráficas.

Por último el capítulo 5 compara resultados y conclusiones finales.

## Capítulo 2

# 2 Conformados en frío en situación de Incendio

La verificación de la resistencia al fuego es parte esencial del proyecto de elementos estructurales. Ésta es la garante de la seguridad de los ocupantes del edificio, y ahora que las plantas utilizando con conformados en frío están cada vez más en uso por el mundo, países como los Estados Unidos de América, Canadá, Australia y algunos países de Europa usan este tipo de construcción. En Portugal, este tipo de estructuras han sido utilizadas esencialmente en sustitución de perfiles laminados en caliente usualmente utilizados como madres del sistema de soporte de coberturas o fachada. Para eso es necesario validar la resistencia de las estructuras metálicas en situaciones de incendio, para evitar un posible colapso de la estructura y garantizar la seguridad de los ocupantes, además de minimizar los costes.

La seguridad contra incendios en edificios está, en los últimos años, recibiendo una atención creciente por parte de los legisladores portugueses [9].

### 2.1 Comportamiento del acero

Es comúnmente conocido, que el acero presenta un comportamiento inadecuado cuando está sujeto a altas temperaturas, como las que ocurren en situación de incendio. Por otro lado, su elevada conductividad térmica hace que la temperatura se propague rápidamente, ver Figura 18 y Figura 19, y por otro lado, sus propiedades mecánicas se reducen drásticamente con el aumento de la temperatura.



**Figura 18-Acción de incendio en el edificio del edificio Windsor (2005)**



**Figura 19- Acción de un incendio del WTC (2001)**

Así, los edificios deben poseer una resistencia al fuego que permita la evacuación de sus ocupantes y la seguridad de los equipos de intervención durante un periodo de tiempo considerado adecuado.

El primer método internacionalmente aceptado para el dimensionamiento de los elementos en situación de incendio, se basaba en ensayos normalizados de resistencia al fuego. En estos ensayos, el elemento es montado en un horno, donde la temperatura varía con el tiempo, de acuerdo con una curva normalizada de calentamiento (ISO 834). El dimensionamiento consiste en probar que el elemento estructural tiene una resistencia al fuego, determinada en el ensayo, igual o superior a la resistencia requerida habitualmente.

## **2.2 Estado de arte**

A lo largo del tiempo se han ido haciendo varios estudios relativos a la resistencia de estos materiales ya sea a temperatura ambiente, ya sea en situación de incendio. Serán presentados algunos artículos, donde se analiza la resistencia al curvado, torsión, alabeo, entre otros modos de inestabilidad, así como comparaciones entre estudios numéricos, analíticos y experimentales.

Olga Garzon, Tim Heistermann and Milan Veljkovic realizan el estudio de compresión axial en chapas de acero laminadas en frío. En donde los elementos conformados en frío tienen secciones transversales abiertas y espesores muy pequeños en relación con sus anchos. El trabajado presentado se basa en dos placas de diferente espesor de 6mm con longitudes 400 y 900, y la otra placa de 8mm espesor con longitud de 400mm de acero S355.

Para el ensayo de compresión se utiliza un pistón hidráulico aplicando una carga en el eje La carga aplicada para el ensayo de compresión consiste en un cilindro hidráulico aplicada en el eje central con el fin de tener tensiones de compresión en la sección transversal, para longitudes de 400mm se utiliza un bastidor de carga muy rígida con una capacidad de 4500kN y para longitudes de 900mm se utiliza un bastidor de carga

rígida con una capacidad de 2000kN, en ambos casos el tipo de pandeo obtenido es local debido a su pequeño espesor.

Para los ensayos de tracción se puede comprobar que en las zonas dobladas con el ángulo más pequeño ( $110^\circ$ ) incrementa el límite de elasticidad y la carga de rotura en comparación con la placa virgen [11]

Nirosha Dolamune Kankanamge and Mallen Mahendran presentan el estudio de comportamiento de pandeo lateral elevadas temperaturas. Para los ensayos fueron seleccionados nueve vigas por estampación en frío de 1,5 y 1,9 de acero G450 y 1,55 y 1,95 de aceros G250 con un rango de temperaturas entre  $20^\circ$  y  $700^\circ$ .

Comparando dichos ensayos con los Eurocódigo, se llega a la conclusión de que para el EC 3 Parte 1-3 la curva de pandeo no es adecuada para representar el comportamiento del momento último en vigas a elevadas temperaturas y por lo tanto se propuso el EC 3 Parte 1-1, y para el EC 3 Parte 1-2 el pronóstico resultó sobre conservador para las temperaturas, excepto para vigas de esbeltez muy alta. Por último estudio mostro que el pandeo lateral, está fuertemente influenciada por el nivel de no-linealidad en las curvas de tensión-deformación del acero temperaturas elevadas [12].

Eliane S. dos santos y Eduardo de M. Batista del Programa de Ingeniería civil COPPE en la Universidad Federal de Río de Janeiro (Brasil) junto con Pedro B. Dinis y Dinar Camotim del departamento de Ingeniería Civil y Arquitectura ICIST/IST en la Universidad Técnica de Lisboa (Portugal). Este trabajo presenta una investigación de pandeo local, después de hacer frente a la selección de la geometría, el artículo se centra en el rendimiento y los resultados de un programa de prueba experimental llevada a cabo en la COPPE. Su programa se compone de las propiedades iniciales del acero, imperfecciones geométricas, post-pandeo, caminos de equilibrio y cargas últimas. Las paredes delgadas del acero conformado en frío son altamente susceptibles a fenómenos de inestabilidad local, distorsional y global a la flexión o flexión-torsión. Dependiendo de la geometría de la columna y las condiciones de apoyo, su comportamiento posterior al pandeo y resistencia a la rotura puede verse afectado por los modos de pandeo [13].

J. Chen, B. Young *et al* buscan realizar una investigación experimental con una probeta, donde las temperaturas variarán de 20 a  $1000^\circ\text{C}$ . Se colocaron entonces dos tipos de muestras de canto. Los modelos relativos a un canto interno y externo, con un tipo de acero G500 y espesura de 1,9[mm] fueron testados. Los resultados de los test

fueron comparados con los modelos de la probeta. La fuerza, el módulo elástico, la fuerza máxima, el alargamiento total obtenidos en los test fueron comparados con los de la probeta de acero conformado en frío. Se llegó a la conclusión de que el alargamiento total de las piezas de canto de los conformados en frío es menos grave que el de las probetas para temperaturas por debajo de 180°C, pero parecidos al de los modelos de las probetas en temperaturas iguales o superiores a 180°C,[14].

Se realizó otro estudio para determinar los efectos de flexión térmica haciendo un análisis del comportamiento estructural de aceros conformados en frío de paredes y paneles estructurales en condiciones de fuego, cada muestra consistió en analizar tres vigas de acero verticales con pestañas de 2000 mm (100x54x15x1.2 o 100x56x15x2) espaciadas a 750 mm del centro, con dos agujeros. Los perfiles de paneles yeso fueron fijados horizontalmente en vigas de acero con tornillos a 300mm del centro. Se realizó el ensayo a tracción, obteniendo las siguientes conclusiones acerca de las pestañas: 100x54x15x1.2  $f_y$ : 393.4 N/mm<sup>2</sup>  $f_u$ : 507.9N/mm<sup>2</sup> y el módulo de elasticidad E: 184.4 N/mm<sup>2</sup>. En cuanto al perfil 100x56x15x2 tuvo una  $f_y$ : 353.4 N/mm<sup>2</sup>,  $f_u$  497.4 N/mm<sup>2</sup> y E: 203.1 N/mm<sup>2</sup>,[14].

M. Feng, Y.C. Wang *et al* realizaron ocho test de carga a escala grande de aceros conformados en frío y paneles estructurales, dos ensayos en temperatura ambiente y seis exposiciones a condiciones de tipo fuego por un lado. Los perfiles de ensayo utilizados fueron 100x54x15x1,2 [mm] y de 100x54x15x2 [mm] cada perfil con dos agujeros. En los dos test de fuego fueron utilizados perfiles más finos. Estos test fallaron antes de 30 min, que está considerado como la validación del fuego patrón mínimo de este tipo de construcción. En el test a temperatura ambiente se notó falla por curvatura local en torno al agujero superior. La evolución de la temperatura en este tipo de construcción está afectada críticamente por la actuación del material de aislamiento del interior. El aislamiento bajo utilizado en este estudio se quemó en algunos test. Esto hizo que fallara el panel poco tiempo después. Para un comportamiento fiable del panel estructural en el fuego es mejor utilizar materiales de aislamiento no inflamables. Los test de fuego parecen sugerir que las placas de yeso del lado del incendio se cayeron como efecto del fallo del panel estructural, no como una causa de fallo estructural,[15].

## Capítulo 3

### 3 Verificación de seguridad según los Eurocódigos

#### 3.1 Verificación de seguridad de los perfiles conformados en frío a temperatura ambiente

##### 3.1.1 Resistencia da sección transversal a compresión

El valor del esfuerzo normal actuante  $N_{Ed}$  en cada sección transversal debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (1)$$

Donde  $N_{c,Rd}$  es el valor del esfuerzo normal resistente a compresión, dicho valor debe de ser calculado de acuerdo las siguientes condiciones [20]:

Sí el área efectiva  $A_{eff}$  es menor que el área bruta  $A_{br}$  su ecuación es:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{yb}}{\gamma_{Mo}} \quad (2)$$

Sí el área efectiva  $A_{eff}$  es mayor que el área bruta  $A_{br}$  su ecuación es:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g \left( f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb}) 4(1 - \lambda/\lambda_{el}) \right)}{\gamma_{Mo}} \quad (3)$$

### 3.1.2 Resistencia de los elementos a pandeo

Un elemento comprimido a pandeo deberá ser verificado mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (4)$$

Donde  $N_{b,Rd}$  es el valor de resistencia a pandeo del elemento comprimido que se define por la siguiente ecuación, según la norma EN 1993-1-1, apartado 6.2.4[19]:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (5)$$

Para calcular el  $A_{eff}$  es necesario conocer las longitudes efectivas de las alas y de las alas de refuerzo que serán calculadas en el apartado de “determinación de las propiedades efectivas de elementos de clase 4 sujetos a compresión” definida por la ecuación (64)

El coeficiente de reducción a pandeo es determinado por la siguiente fórmula:

$$X = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi + \bar{\lambda}^2}} \quad (6)$$

Donde si  $X > 1$  su valor deberá ser  $X = 1$

Dicho el coeficiente de reducción está en función de:

$$\phi = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (7)$$

Para calcular el coeficiente de reducción, hay que calcular antes el factor de imperfección mediante la Tabla 1 y la Tabla 2.

**Tabla 1-Factores de imperfección para curvas de pandeo**

Curva de encurvadura	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Factor de imperfeição $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabla 2- Escoger la curva de pandeo en función de la sección transversal

Seção transversal		Limites	Encurvadura em relação ao eixo	Curva de encurvadura	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Perfis laminados		$h/b > 1,2$	$t_r \leq 40 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_r \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	a a <sub>0</sub>
				y-y z-z	b a
		$h/b \leq 1,2$	$t_r \leq 100 \text{ mm}$ $t_r > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b a
				y-y z-z	d c
Perfis I soldados		$t_r \leq 40 \text{ mm}$ $t_r > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	
			y-y z-z	c d	
Seções tubulares		acabadas a quente enformadas a frio	qualquer	a c	
			a c		
Seções em caixão soldadas		em geral (excepto como abaixo indicado) soldaduras espessas: $a > 0,5t_r$ $b/t_r < 30$ $h/t_w < 30$	qualquer	b c	
			qualquer	c c	
Perfis U, T e seções cheias			qualquer	c c	
Cantoneiras			qualquer	b b	

Para este caso el valor del factor de imperfección es  $\alpha = 0,34$

Otro valor que depende del coeficiente de reducción es:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}} \quad (8)$$

Donde  $f_y$  es la tensión de cedencia del perfil y  $N_{cr}$  es el valor crítico del esfuerzo normal asociado al pandeo elástico basado en las propiedades de la sección transversal bruta.

El esfuerzo normal resistente a compresión del eje y viene determinado por la siguiente fórmula:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L^2} \quad (9)$$

El esfuerzo normal resistente a compresión es definido en función de  $I_y$  que para este caso la inercia del eje y, va a ser la misma para los perfiles C y Z

$$I_y = \frac{h_p^3 t}{12} + \frac{b_{p1}^3 t}{12} + \frac{b_{p2}^3 t}{12} + \frac{c_{p1}^3 t}{12} + \frac{c_{p2}^3 t}{12} + \frac{c_p^3 t}{12} + h_p \cdot t \cdot \left( c_{y1} - \frac{h_p}{2} \right)^2 + b_{p1} \cdot t \cdot c_{y1}^2 + c_{p2} \cdot t \cdot \left( c_{y1} - \frac{c_p}{2} \right)^2 + b_{p2} \cdot t \cdot c_{y2}^2 \quad (10)$$

La inercia del eje y, es función del  $C_{y2}$ :

$$C_{y2} = h_p - C_{y1} \quad (11)$$

La ecuación de  $C_{y2}$  está definida por  $C_{y1}$

$$C_{y1} = \frac{\left[ \left( h_p \cdot t \cdot \frac{h_p}{2} \right) + \left( c_{p2} \cdot t \cdot \frac{c_{p2}}{2} \right) + b_{p1} \cdot t \cdot h_p + c_{p1} \cdot t \cdot \left( h_p - \frac{c_{p1}}{2} \right) \right]}{A_{eff}} \quad (12)$$

Una vez calculadas todas estas ecuaciones se puede determinar el valor del esfuerzo normal resistente a compresión según el eje y.

El esfuerzo normal resistente a compresión del eje z viene determinado por la siguiente fórmula:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \quad (13)$$

Como en el caso anterior se tiene que calcular previamente la inercia del eje z. En este caso se debe tener en cuenta la forma del perfil a utilizar ya que cambiará en caso de ser C o Z.

Para perfiles en C la inercia del eje z se define por la siguiente formula.

$$I_z = \frac{c_{p1}t^3}{12} + (c_{p1}t)(b_{p1} - C_y)^2 + \frac{b_{p1}^3t}{12} + (b_{p1}t) \left( b_{p1} - C_y - \frac{b_{p1}}{2} \right)^2 + \frac{c_{p2}t^3}{12} + (c_{p2}t)(b_{p2} - C_y)^2 + \frac{b_{p2}^3t}{12} + (b_{p2}t) \left( b_{p2} - C_y - \frac{b_{p2}}{2} \right)^2 + \frac{h_p t^3}{12} + (h_p t)(C_z)^2 \quad (14)$$

El cálculo de la inercia del eje z depende que del centro geométrico del eje z definido por:

$$C_z = \frac{b_{p1} \cdot t \cdot \frac{b_{p1}}{2} + \frac{c_{p1} \cdot t \cdot b_{p1} + b_{p2} \cdot t \cdot b_{p2}}{2} + c_{p2} \cdot t \cdot b_{p2}}{A_{bruta}} \quad (15)$$

Para perfiles en Z la inercia del eje z se define por la siguiente formula.

$$I_z = \frac{c_{p1}t^3}{12} + (c_{p1}t)(b_{p1} - C_y)^2 + \frac{b_{p1}^3t}{12} + (b_{p1}t) \left( b_{p1} - C_y - \frac{b_{p1}}{2} \right)^2 + \frac{c_{p2}t^3}{12} + (c_{p2}t)(b_{p2} - C_y)^2 + \frac{b_{p2}^3t}{12} + (b_{p2}t) \left( b_{p2} - C_y - \frac{b_{p2}}{2} \right)^2 + \frac{h_p t^3}{12} + (h_p t)(C_y)^2 \quad (16)$$

El cálculo de la inercia del eje z depende que del centro geométrico del eje z definido por:

$$C_z = \frac{b_{p1} \cdot t \cdot \frac{b_{p1}}{2} + \frac{c_{p1} \cdot t \cdot b_{p1} - b_{p2} \cdot t \cdot b_{p2}}{2} - c_{p2} \cdot t \cdot b_{p2}}{A_{bruta}} \quad (17)$$

El valor de la resistencia a pandeo  $N_{b,Rd}$  debe de ser calculado para los ejes “y” y “z”, y de los dos el valor elegido es el menor:

$$\text{Min} (N_{b,Rd,y}, N_{b,Rd,z}) \quad (18)$$

## 3.2 Verificación de seguridad de los perfiles conformados en frío a temperaturas elevadas

### 3.2.1 Resistencia de la sección transversal a compresión

Para el cálculo de la resistencia de la sección transversal a compresión se sigue la norma EN 1993-1-2 [22], y se define por la siguiente ecuación:

$$N_{fi,c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{y,\theta}}{\gamma_{Mo}} \quad (19)$$

Para situación de incendio el valor de la tensión de cedencia del acero deberá ser considerado igual a la tensión límite convencional de proporcionalidad a 0,2% denominado por  $K_{0,2,f,\theta}$ .

La tensión de cedencia será igual a:

$$f_{y,\theta} = K_{0,2,f,\theta} f_y \quad (20)$$

El modulo de elasticidad es:

$$E_{a,\theta} = K_{E,\theta} E_a \quad (21)$$

Por lo que la resistencia de la sección transversal será igual a:

$$N_{f_i,c,Rd} = \frac{A_{eff} K_{0,2,f,\theta} f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (22)$$

4.4.1. Los valores de  $K_{0,2,f,\theta}$  y  $K_{E,\theta}$  depende de la Tabla

3 y el

Figura 20:

**Tabla 3-Factores de reducción de acero para secciones de clase 4**

Temperatura	$K_{0,2,f,\theta} = f_{0,2,f,\theta}/f_{yb}$	$K_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20,00	1	1,000
100,00	1	1,000
200,00	0,890	0,900
300,00	0,780	0,800
400,00	0,650	0,700
500,00	0,530	0,600
600,00	0,300	0,310
700,00	0,130	0,130
800,00	0,070	0,090
900,00	0,050	0,068
1000,00	0,030	0,045
1100,00	0,020	0,023
1200,00	0,000	0,000

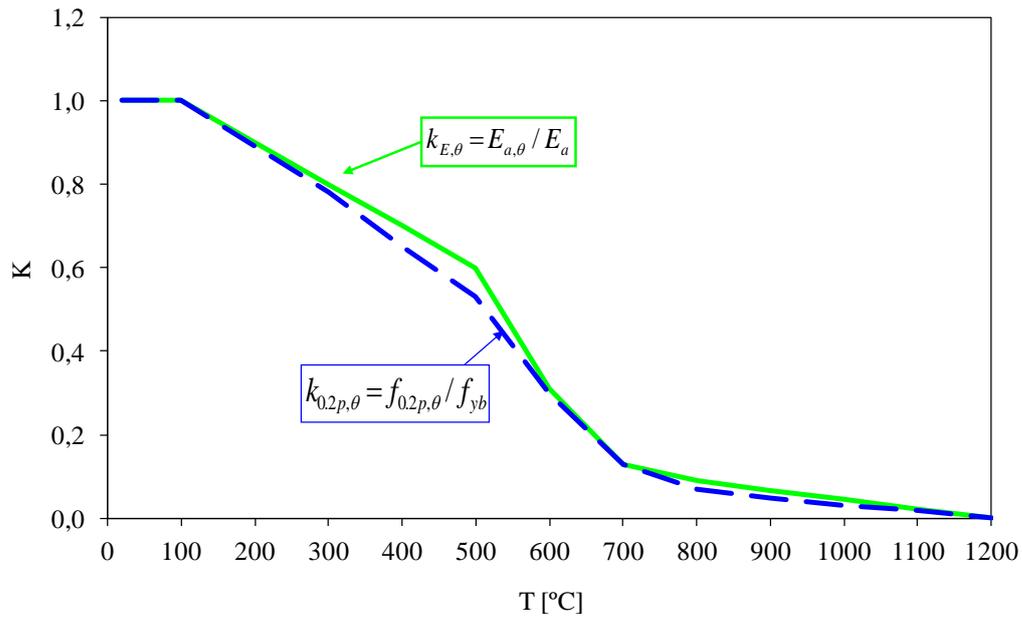


Figura 20- Factores de reducción para la relación de tensión extensión de secciones de acero de clase 4.

### 3.2.2 Resistencia de los elementos a pandeo

El valor de cálculo de la resistencia a pandeo  $N_{b,f,i,t,Rd}$  en un instante t de un elemento comprimido de sección transversal de clase 4.deberá ser determinado según la norma EN 1993-1-2 [22] a partir de la siguiente ecuación:

$$N_{b,f,i,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} \cdot A_{eff} \cdot K_{0.2,f,\theta} f_y}{\gamma_{Mfi}} \quad (23)$$

Para calcular el valor de la resistencia a pandeo se debe de calcular antes el coeficiente de flexión a pandeo:

El coeficiente de reducción a torsión es determinado por la siguiente fórmula:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 + \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (24)$$

Dicho el coeficiente de reducción está en función de:

$$\phi_{\theta} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right] \quad (25)$$

Y  $\alpha$  es:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (26)$$

La esbelteza normalizada  $\bar{\lambda}_{\theta}$  a temperatura  $\theta$  es:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left[ \frac{K_{y,\theta}}{K_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad (27)$$

Con estos cálculos ya se puede conocer el valor de la resistencia a pandeo.

### 3.3 Determinación de las propiedades efectivas de los elementos de clase 4 sujetos à compresión

#### Propiedades geométricas

La verificación de las propiedades geométricas para una sección conformada en frío, se realiza de acuerdo al EN 1993-1-3 [20], apartado 5.2 (1), tabla 5.1.

Estas ecuaciones representan el rango por donde deben estar los valores que han sido calculados por medio de pruebas experimentales. Las secciones transversales que tienen una mayor relación de anchura y espesor, y no están dentro de los rangos proporcionados también pueden ser utilizados siempre que su resistencia en los estados límite últimos y de su comportamiento en estados límite de servicio se verifican por medio de pruebas y / o por medio de cálculos.

$$\frac{b_p}{t_{nom}} \leq 60 \quad (28)$$

$$\frac{c_p}{t_{nom}} \leq 50 \quad (29)$$

$$\frac{h_p}{t_{nom}} \leq 500 \cdot \sin \theta \quad (30)$$

A fin de proporcionar suficiente rigidez y para evitar el pandeo, el tamaño de las alas debe estar dentro de los siguientes rangos:

$$0,2 \leq \frac{c_p}{b_p} \leq 0,6 \quad (31)$$

### **Propiedades de la sección bruta**

Área de la sección bruta se calcula mediante la suma de sus longitudes interiores y exteriores (alas y alma) por el espesor del perfil:

$$A_{br} = t (c_{p1} + c_{p2} + b_{p1} + b_{p2} + h_p) \quad (32)$$

Posición del centro de gravedad en relación con el eje “y” varía en función del tipo de perfil, para este caso los perfiles que se calculan son C y Z por lo que las ecuaciones del eje neutro son las siguientes:

Para el eje y de un perfil C:

$$z_{cy} = \frac{\left[ b_{p1} \left( c_{p1} + \frac{b_{p1}}{2} \right) + b_{p2} \left( c_{p2} + \frac{b_{p2}}{2} \right) \right] t}{A_{br}} \quad (33)$$

Para el eje z de un perfil C:

$$z_{cz} = \frac{\left[ \left( h_p \frac{h_p}{2} \right) + \left( c_{p2} \frac{c_{p2}}{2} \right) + (b_{p1} h_p) + \left( c_{p1} \left( h_p - \frac{c_{p1}}{2} \right) \right) \right] t}{A_{br}} \quad (34)$$

Para el eje y de un perfil Z:

$$z_{zy} = \frac{\left[ b_{p1} \left( c_{p1} + \frac{b_{p1}}{2} \right) - b_{p2} \left( c_{p2} + \frac{b_{p2}}{2} \right) \right] t}{A_{br}} \quad (35)$$

Para el eje z de un perfil en Z el centro de gravedad es el mismo que para el eje C, es decir viene definido por la ecuación (34).

**Propiedades efectivas de los banzos y refuerzos a compresión**

Modelo de estructura para el análisis para un perfil Z o C es el que representar la Figura 21

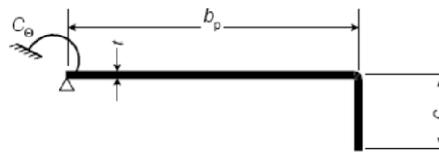


Figura 21- Modelo real con banzo a compresión

Una sección transversal con un refuerzo en la extremidad debe incluir una porción efectiva de la misma. El proceso de cálculo se realiza en tres pasos:

**Paso1:** obtener una sección efectiva inicial para el refuerzo usando anchos efectivos obtenidas como el supuesto de que el refuerzo proporciona resistencia total y por tanto  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{MO}$

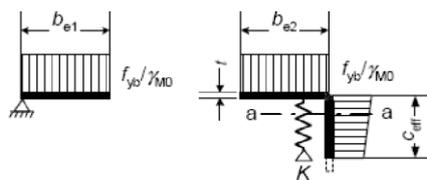


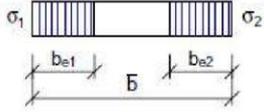
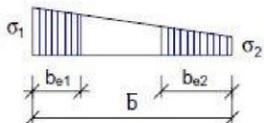
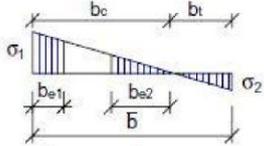
Figura 22- Modelo equivalente de banzo a compresión (paso 1)

**Largura efectiva del ala a compresión**

Las larguras efectivas de elementos de compresión planos deberán obtenerse según la norma EN 1993-1-5 [21].

Para el cálculo de la largura efectiva de los brazos de las secciones C e Z, considerados como elementos internos, a compresión, la largura efectiva deberá obtenerse mediante la Tabla 4:

**Tabla 4- Elementos de compresión interna**

Stress distribution (compression positive)				Effective <sup>p</sup> width $b_{eff}$		
				$\psi = 1$ : $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi > 0$ : $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$ : $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Buckling factor $k_\sigma$	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Si la distribución de la carga es homogénea como en el primer cuadro de la Tabla 4 el valor  $\psi$  es igual a 1 y el coeficiente de pandeo es  $k_\sigma = 4,0$ .

La area efectiva es determinada por la suma de las larguras efectivas de cada elemento:

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p \tag{36}$$

La largura efectiva es definida en función del coeficiente de reducción  $\rho$ , dado por:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,b} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b}^2} \tag{37}$$

Este coeficiente de reducción depende del coeficiente de esbeltez, definido por la ecuación:

$$\bar{\lambda}_{p,b} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_p/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (38)$$

El coeficiente  $\varepsilon$  es definido por:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \quad (39)$$

### **Largura efectiva del ala de refuerzo a compresión**

La anchura efectiva del borde plegado, se obtiene en la EN1993-1-3[20] en el apartado 5.5.3.2 (5a), que se define por la siguiente fórmula:

$$C_{\text{eff}} = \rho b_{pc} \quad (40)$$

Para calcular la anchura efectiva se debe saber el valor de  $\rho$ , definido por:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,c} - 0,188}{\bar{\lambda}_{p,c}^2} \quad (41)$$

Si  $\rho \leq 1$  considerar  $\rho = 1$ .

Dicha ecuación está en función de la esbeltez relativa  $\bar{\lambda}_{p,c}$ , que es:

$$\bar{\lambda}_{p,c} = \frac{b_{pc}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (42)$$

Para calcularla se debe conocer el coeficiente  $k_\sigma$ , teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

$$\text{Si } \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,35: \text{ Entonces } k_\sigma = 0,5 \quad (43)$$

$$\text{Si } 0,35 < \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,6: \text{ Entonces } k_\sigma = 0,5 + 0,83^3 \sqrt{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2} \quad (44)$$

Según la ecuación 5.1 (4) de EN1993-1-3[20], el área efectiva del refuerzo es:

$$A_s = t(b_e + c_{eff}) \quad (45)$$

Se debe calcular el área efectiva del refuerzo de la parte superior e inferior, denominándolas  $A_{s1}$  y  $A_{s2}$ , respectivamente

**Paso 2:** Con la sección efectiva inicial determinar el factor de reducción para el pandeo por distorsión, considerando los efectos de las restricciones:

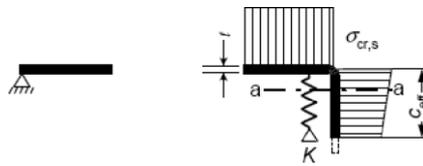


Figura 23- Modelo equivalente de banco a compresión (paso 2)

El factor de reducción para pandeo por distorsión se determina según el EN1993-1-3[20] apartado 5.5.3.1 (7)

$$\chi_d = 1,0 \quad \text{si } \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad (46)$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d \quad \text{si } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38 \quad (47)$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{si } \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad (48)$$

Para calcular el factor de reducción está en función de la esbeltez relativa mencionada en EN1993-1-3[20] en el apartado 5.5.3.2 (3):

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} \quad (49)$$

El factor de reducción depende de la tensión crítica elástica de refuerzo, para calcularla es necesario seguir la norma EN 1993-1-3[20] en el apartado 5.5.3.2 (7):

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} \quad (50)$$

Donde K es la rigidez del muelle por unidad de longitud (EN1993-1-3[20] cláusula 5.5.3.1 (5)).

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4(1 - \nu^2)} \frac{1}{b_1^2 \cdot h_p + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_p \cdot k_f} \quad (51)$$

Para calcular la rigidez del muelle se tiene que calcular antes  $k_f$  y variará en función de sí se calcula la rigidez del muelle del ala superior o inferior, que viene definido por:

$$\begin{aligned} k_{f1} &= \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \\ k_{f2} &= \frac{A_{s1}}{A_{s2}} \end{aligned} \quad (52)$$

Los valores  $A_{s1}, A_{s2}$  ya han sido calculados anteriormente en la ecuación (36).

El momento de inercia efectivo ( $I_s$ ) considerándose los áreas  $A_s$ , según el eje a-a como muestra la Figura 24, son:

$$\begin{aligned} I_{s1} &= \left( \frac{b_{e12} \cdot t^3}{12} \right) + \left( \frac{c_{eff1}^3 \cdot t}{12} \right) + \left( b_{e12} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff1}^2}{(2(b_{e12} + c_{eff1}))} \right)^2 \right) + \\ &+ c \cdot t \cdot \left( \left( \frac{c_{eff1}^3}{2} \right) - \left( \frac{c_{eff1}^2}{2(b_{e12} + c_{eff1})} \right) \right) \end{aligned} \quad (53)$$

$$I_{s2} = \left( \frac{b_{e22} \cdot t^3}{12} \right) + \left( \frac{c_{eff2}^3 \cdot t}{12} \right) + \left( b_{e22} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff2}^2}{(2(b_{e22} + c_{eff2}))} \right)^2 \right) + \quad (54)$$

$$+ c \cdot t \cdot \left( \left( \frac{c_{\text{eff}2}^3}{2} \right) - \left( \frac{c_{\text{eff}2}^2}{2(b_{e22} + c_{\text{eff}2})} \right) \right)$$

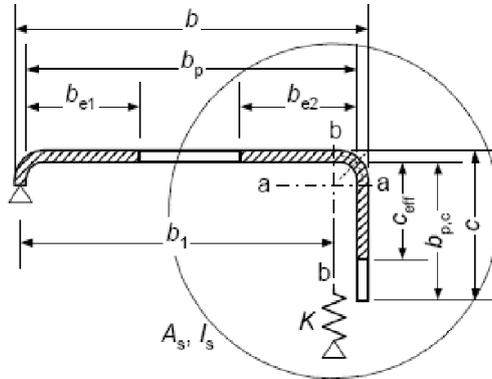


Figura 24-Área reducida según el eje a-a

**Paso 3:** Usar un proceso iterativa para refinar el valor del factor de reducción de pandeo en el banzo.

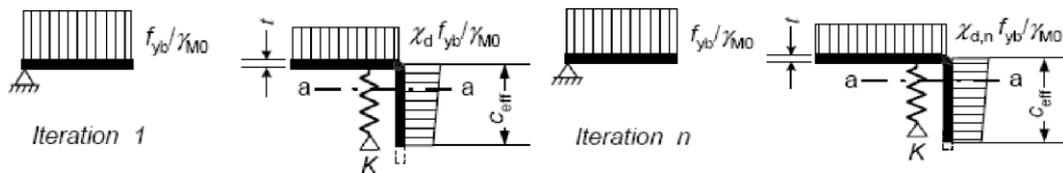


Figura 25- Representación del proceso iterativo

Si  $\chi_d < 1$  puede ser refinado iterativamente a partir de la iteración con valores modificados de  $\rho$ , obtenido a través de la norma EN1993-1-3[20] apartado 5.5.3.2 (10) así que la esbeltez relativa es:

$$\bar{\lambda}_{p,\text{red}} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} \tag{55}$$

El área reducida efectiva de los refuerzos y la espesura reducida, es tenida en cuenta y dada por EN 1993-1-3[20], apartado 5.5.3.2 (11)

$$A_{s,\text{red}} = \chi_d \cdot A_s \frac{\frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}}}{\sigma_{\text{com,Ed}}} \quad \text{pero } A_{s,\text{red}} \leq A_s \tag{56}$$

El área efectiva reducida del rigidizador está en función del esfuerzo de compresión en el eje del rigidizador definido por:

$$\sigma_{\text{com,Ed,i}} = \frac{\chi_d \cdot f_{yb}}{\gamma_{Mo}} \quad (57)$$

En la determinación de propiedades efectivas de sección, el área efectiva reducida deben ser representados mediante el espesor reducido de los elementos, teniendo en cuenta la norma EN 1993-1-3 en el apartado 5.5.3.2 (12), representado por:

$$t_{\text{red}} = t \cdot \chi \quad (58)$$

Nota:  $\chi$  es calculado a través de un proceso iterativo

### **Propiedades efectivas da alma**

Para calcular las propiedades efectivas del alma se sigue la norma EN 1993-1-5 apartado 4.4

En donde la altura efectiva  $h_{\text{eff}}$  se define por:

$$h_{\text{eff}} = \rho \cdot h_p \quad (59)$$

La altura efectiva está en función del factor de reducción:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{ph} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{ph}^2} \quad (60)$$

Para conocer el valor del factor de reducción se calcula antes el coeficiente de esbeltez por la siguiente fórmula:

$$\bar{\lambda}_{ph} = \frac{h_p}{t} \sqrt{\frac{1}{28,4\varepsilon k_\sigma}} \quad (61)$$

El valor de  $k_\sigma$  viene determinado en la EN 1993-1-5[21], apartado 4.4 y en este documento en la Tabla 4 donde su valor variará en función de la relación de tensiones  $\psi$

Si se han realizado todos los cálculos anteriores podemos saber el valor de  $h_{eff}$  y los expresados en las siguientes formulas:

$$h_{e1} = h_{eff}/2 \quad (62)$$

$$h_{e2} = h_{eff}/2 \quad (63)$$

### Propiedades efectivas de la sección

Área efectiva de la sección se define mediante la siguiente fórmula:

$$A_{eff} = t[c_p + b_{p2} + h_1 + h_2 + b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff})\chi_d] \quad (64)$$

Posición del centroide de área efectiva es:

$$Z_{G1} = \frac{t \left[ c_{eff2}\chi_{d2} \left( h_p - \frac{c_{eff2}}{2} \right) + h_p (b_{e22}\chi_{d2} + b_{e21}) + h_{e2} \left( h_p - \frac{h_{e2}}{2} \right) + \frac{h_{e1}^2}{2} + c_{eff}^2 \frac{\chi_{d1}}{2} \right]}{A_{eff}} \quad (65)$$

$$Z_{G2} = h_p - Z_{G1} \quad (66)$$

Momento de inercia efectivo según el eje paralelo al ala y pasa por el centroide es:

$$I_{eff,y} = \frac{h_{e1}^3 \cdot t}{12} + \frac{b_{e11}^3 \cdot t}{12} + \frac{b_{e12} \cdot (\chi_{d1} t)^3}{12} + \frac{c_{eff1}^3 \cdot (\chi_{d1} t)}{12} + \frac{h_{e2}^3 \cdot t}{12} + \frac{b_{e21} \cdot t^3}{12} + \frac{b_{e22} \cdot (\chi_{d2} t)^3}{12} + \frac{c_{eff2}^3 \cdot (\chi_{d2} t)}{12} + h_{e1} t \left( z_{G1} - \frac{h_{e1}}{2} \right)^2 + b_{e12} \chi_{d1} t \left( z_{G1} - \frac{h_{e1}}{2} \right)^2 + c_{eff1} \chi_{d1} t \left( z_{G1} - \frac{c_{eff1}}{2} \right)^2 + h_{e2} t \left( z_{G2} - \frac{h_{e2}}{2} \right)^2 + b_{e21} t \cdot z_{G2}^2 + b_{e22} (\chi_{d2} t) \cdot z_{G2}^2 + c_{eff2} (\chi_{d2} t) \left( z_{G2} - \frac{c_{eff2}}{2} \right)^2 \quad (67)$$

Posición del centro de gravedad del área bruta:

$$C_{z1} = \frac{\left[ \left( h_p \cdot t \cdot \frac{h_p}{2} \right) + \left( c_{p2} \cdot t \cdot \frac{c_{p2}}{2} \right) + b_{p1} \cdot t \cdot h_p + c_{p1} \cdot t \cdot \left( h_p - \frac{c_{p1}}{2} \right) \right]}{A_{\text{eff}}} \quad (68)$$

$$C_{z2} = h_p - C_{z1} \quad (69)$$

Momento de inercia del área bruta:

$$I_y = \frac{h_p^3 t}{12} + \frac{b_{p1}^3 t}{12} + \frac{b_{p2}^3 t}{12} + \frac{c_{p1}^3 t}{12} + \frac{c_{p2}^3 t}{12} + \frac{c_{p1}^3 t}{12} + h_p \cdot t \cdot \left( C_{z1} - \frac{h_p}{2} \right)^2 + b_{p1} \cdot t \cdot c_{z1}^2 + b_{p2} \cdot t \cdot c_{z1}^2 + c_{p1} \cdot t \cdot \left( c_{z1} - \frac{c_{p1}}{2} \right)^2 + b_{p2} \cdot t \cdot c_{z1}^2 \quad (70)$$

El modulo efectivo de la sección a compresión se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W_{\text{eff},y,c} = \frac{I_{\text{eff},y}}{z_{G1}} \quad (71)$$

Modulo efectivo de la sección a tracción:

$$W_{\text{eff},y,t} = \frac{I_{\text{eff},y}}{z_{G2}} \quad (72)$$

El modulo efectivo de la sección elegido es el mínimo de los dos:

$$W_{\text{eff},y} = \min(W_{\text{eff},y,c}, W_{\text{eff},y,t}) \quad (73)$$

### **3.4 Aplicación de la metodología Matlab**

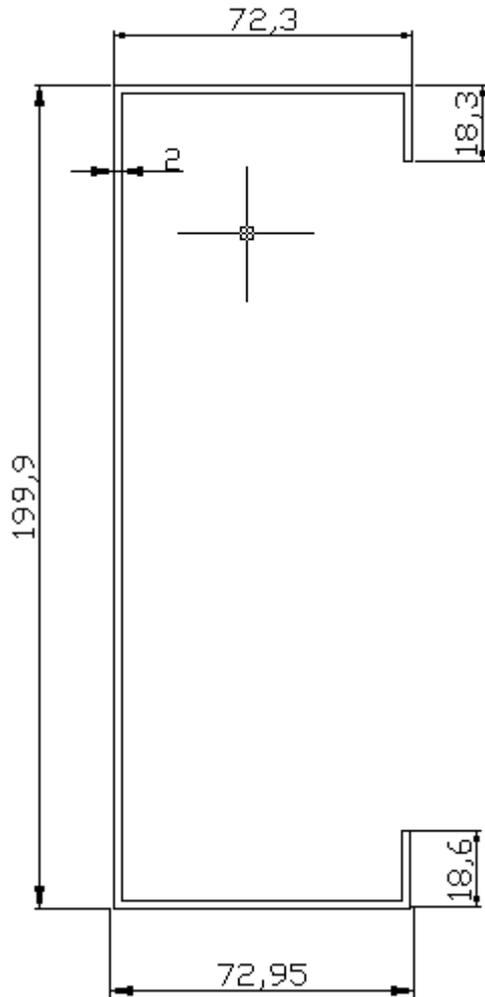
La metodología de verificación de seguridad y cuantificada de las propiedades geométricas del área bruta y efectiva fue implementada en el software Matlab.

O anexo A se refiere a la implementación de las verificaciones de seguridad a temperatura ambiente, en cuanto el anexo B y presentación del código para la verificación de la seguridad a temperaturas elevadas.

### **3.5 Determinación de las propiedades efectivas y resistencia de secciones C y Z**

En este apartado se calculará las propiedades efectivas de los perfiles C y Z.

- a) Perfil C



$$h = 199,9 \text{ [mm]}$$

$$b_1 = b_s = 74,3 \text{ [mm]}$$

$$b_2 = b_i = 73,7 \text{ [mm]}$$

$$c_1 = c_s = 18,6 \text{ [mm]}$$

$$c_2 = c_i = 18,3 \text{ [mm]}$$

$$b_1 = b_s = 74,3 \text{ [mm]}$$

$$t_{nom} = 2,0 \text{ [mm]}$$

$$t = t_{nom} - 0,02 = 1,98 \text{ [mm]}$$

$$b_1 = b_s = 74,3 \text{ [mm]}$$

$$h_p = h - t_{nom} = 197,9 \text{ [mm]}$$

$$b_{p2} = b_2 - t_{nom} = 71,7 \text{ [mm]}$$

$$b_{p1} = b_1 - t_{nom} = 72,3 \text{ [mm]}$$

$$c_{p2} = c_2 - t_{nom} = 17,3 \text{ [mm]}$$

$$c_{p1} = c_1 - t_{nom} = 17,6 \text{ [mm]}$$

#### Propiedades mecánicas:

$$f_{yb} = 239,64 \text{ [MPa]}$$

$$E = 179,94 \text{ [GPa]}$$

### 3.5.1 Propiedades geométricas:

En primer lugar se calculan las propiedades geométricas del perfil C.

$$\frac{b_p}{t} \leq 60 \begin{cases} \frac{b_{p1}}{t} = \frac{72,3}{1,98} = 36,15 \rightarrow \text{Verifica} \\ \frac{b_{p2}}{t} = \frac{71,7}{1,98} = 36,21 \rightarrow \text{Verifica} \end{cases} \quad (74)$$

$$\frac{c_p}{t} \leq 50 \begin{cases} \frac{c_{p1}}{t} = \frac{17,6}{1,98} = 8,88 \rightarrow \text{Verifica} \\ \frac{c_{p2}}{t} = \frac{17,3}{1,98} = 8,73 \rightarrow \text{Verifica} \end{cases} \quad (75)$$

$$\frac{h_p}{t} \leq 500 \sin \theta \quad \frac{h_p}{t} = \frac{197,9}{1,98} = 99 \rightarrow \text{Verifica} \quad (76)$$

$$0,2 \leq \frac{c_p}{b_p} \leq 0,6 \begin{cases} \frac{c_{p1}}{b_{p1}} = \frac{17,6}{72,3} = 0,24 \rightarrow \text{Verifica} \\ \frac{c_{p2}}{b_{p2}} = \frac{17,3}{71,7} = 0,24 \rightarrow \text{Verifica} \end{cases} \quad (77)$$

### 3.5.2 Propiedades de la sección bruta:

Área de la sección bruta es:

$$A_{br} = t (c_{p1} + c_{p2} + b_{p1} + b_{p2} + h_p) = 7,4606 \cdot 10^{-4} \quad (78)$$

[m<sup>2</sup>]

Posición del centro de gravedad del eje y:

$$z_{cy} = \frac{\left[ b_{p1} \left( c_{p1} + \frac{b_{p1}}{2} \right) + b_{p2} \left( c_{p2} + \frac{b_{p2}}{2} \right) \right] t}{A_{br}} = 0,0240 \text{ [m]} \quad (79)$$

Posición del centro de gravedad del eje z:

$$z_{cz} = \frac{\left[ \left( h_p \frac{h_p}{2} \right) + \left( c_{p2} \frac{c_{p2}}{2} \right) + (b_{p1} h_p) + \left( c_{p1} \left( h_p - \frac{c_{p1}}{2} \right) \right) \right] t}{A_{br}} = 0,0992 \text{ [m]} \quad (80)$$

### 3.5.3 Propiedades efectivas a compresión

#### 3.5.3.1 Largura efectiva del ala a compresión

**Paso 1:** obtener una sección efectiva inicial para el refuerzo usando anchos efectivos obtenidas como el supuesto de que el refuerzo proporciona resistencia total

En este caso la relación de tensiones y el coeficiente de pandeo son:

$$\psi = 1$$

$$k_{\sigma} = 4,0$$

Para el ala superior:

El coeficiente  $\varepsilon$  es

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = 0,9903 \quad (81)$$

El coeficiente elbeltez:

$$\bar{\lambda}_{p,b1} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_{p1}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_{\sigma}}} = 0,6492 \quad (82)$$

El coeficiente de reducción:

$$\rho_1 = \frac{\bar{\lambda}_{p,b1} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b1}^2} = 1,0184 \quad (83)$$

Como  $\rho_1$  es  $> 1$  el valor es  $\rho_1 = 1$

La largura efectivas:

$$b_{eff1} = \rho_1 \cdot b_{p1} = 0,0723 \text{ [m]} \quad (84)$$

$$b_{e11} = \frac{b_{eff1}}{2} = 0,0361 \text{ [m]} \quad (85)$$

$$b_{e12} = \frac{b_{eff1}}{2} = 0,0361 \text{ [m]} \quad (86)$$

Para el ala inferior:

El coeficiente  $\varepsilon$  es

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = 0,9903 \quad (87)$$

El coeficiente de esbeltez:

$$\bar{\lambda}_{p,b2} = \frac{b_{p2}/t}{\sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}} = \frac{b_{p2}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,6438 \quad (88)$$

El coeficiente de reducción:

$$\rho_2 = \frac{\bar{\lambda}_{p,b2} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b2}^2} = 1,0225 \quad (89)$$

Como  $\rho_1$  es  $> 1$  el valor es  $\rho_1 = 1$

La largura efectiva:

$$b_{eff2} = \rho_2 \cdot b_{p2} = 0,0717 \text{ [m]} \quad (90)$$

$$b_{e21} = \frac{b_{eff2}}{2} = 0,0359 \text{ [m]} \quad (91)$$

$$b_{e22} = \frac{b_{eff2}}{2} = 0,0359 \text{ [m]} \quad (92)$$

### 3.5.3.2 Largura efectiva del refuerzo a compresión

El valor de  $k_\sigma$  depende de la relación entre  $\frac{b_{p,c}}{b_p}$  en el caso del refuerzo inferior como superior es menor a 0,35 por lo que  $k_\sigma = 0,5$

Para el ala del refuerzo superior:

La esbeltez relativa:

$$\bar{\lambda}_{p1,c} = \frac{b_{pc1}}{t} = 0,4470 \quad (93)$$

El coeficiente de reducción:

$$\rho_1 = \frac{\bar{\lambda}_{p1,c} - 0,188}{\bar{\lambda}_{p1,c}^2} = 1,2963 \quad (94)$$

Como  $\rho_1 \geq 1$  se considerar  $\rho_1 = 1$

Luego:

$$C_{eff1} = \rho b_{pc1} = 0,0176 \text{ [m]} \quad (95)$$

Para el ala del refuerzo inferior:

La esbeltez relativa:

$$\bar{\lambda}_{p2,c} = \frac{b_{pc2}}{t} = 0,4394 \quad (96)$$

El coeficiente de reducción:

$$\rho_2 = \frac{\bar{\lambda}_{p2,c} - 0,188}{\bar{\lambda}_{p2,c}^2} = 1,3021 \quad (97)$$

Como  $\rho_1 \geq 1$  se considerar  $\rho_1 = 1$

Luego:

$$C_{eff2} = \rho b_{pc2} = 0,0173 \text{ [m]} \quad (98)$$

Con los cálculos anteriores se puede conocer el área afectiva de refuerzo y es:

$$A_{s1} = t(b_{eff1} + c_{eff1}) = 1,0642 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]} \quad (99)$$

$$A_{s2} = t(b_{eff2} + c_{eff2}) = 1,0524 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]} \quad (100)$$

**Paso 2:** Con la sección efectiva inicial determinar el factor de reducción para el pandeo por distorsión, considerando los efectos de las restricciones:

Para el ala superior:

Lo primero que se calcula es:

$$k_{f1} = \frac{A_{s2}}{A_{s1}} = 0,9888 \quad (101)$$

Sabiendo lo anterior ya se puede calcular la rigidez del muelle:

$$K_1 = \frac{E \cdot t^3}{4(1 - \nu^2)} \frac{1}{b_1^2 \cdot h_p + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_p \cdot k_{f1}} = 2,988 \cdot 10^6 \quad (102)$$

El momento de inercia efectivo:

$$I_{s1} = \left( \frac{b_{e12} \cdot t^3}{12} \right) + \left( \frac{c_{eff1}^3 \cdot t}{12} \right) + \left( b_{e12} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff1}^2}{2(b_{e12} + c_{eff1})} \right)^2 \right) + \quad (103)$$

$$+ c \cdot t \cdot \left( \left( \frac{c_{eff1}^3}{2} \right) - \left( \frac{c_{eff1}^2}{2(b_{e12} + c_{eff1})} \right) \right) = 2,2801 \cdot 10^{-9} [m^4]$$

La tensión crítica elástica es:

$$\sigma_{cr1,s} = \frac{2\sqrt{KEI_{s1}}}{A_{s1}} = 2,2801 \cdot 10^8 \quad (104)$$

La esbeltez relativa

$$\bar{\lambda}_{d1} = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr1,s}}} = 1,0252 \quad (105)$$

En este caso el factor de reducción es: sigue la siguiente condición:

$$\text{si } 0,65 < \bar{\lambda}_{d1} \leq 1,38 \rightarrow \chi_{d1} = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_{d1} \quad (106)$$

$$\chi_{d1} = 0.7288 \quad (107)$$

Para el ala inferior:

Lo primero que se calcula es:

$$k_{f2} = \frac{A_{s1}}{A_{s2}} = 1,0113 \quad (108)$$

Sabiendo lo anterior ya se puede calcular la rigidez del muelle:

$$K_2 = \frac{E \cdot t^3}{4(1 - \nu^2) b_1^2 \cdot h_p + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_p \cdot k_{f1}} = 3,0126 \cdot 10^5 \quad (10)$$

El momento de inercia efectivo:

$$I_{s2} = \left( \frac{b_{e22} \cdot t^3}{12} \right) + \left( \frac{c_{eff2}^3 \cdot t}{12} \right) + \left( b_{e22} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff2}^2}{(2(b_{e22} + c_{eff2}))} \right)^2 \right) + \quad (110)$$

$$+ c \cdot t \cdot \left( \left( \frac{c_{eff2}^3}{2} \right) - \left( \frac{c_{eff2}^2}{2(b_{e22} + c_{eff2})} \right) \right) = 2,6063 \cdot 10^{-9} [\text{m}^4]$$

La tensión crítica elástica es:

$$\sigma_{cr2,s} = \frac{2\sqrt{KEI_{s2}}}{A_{s2}} = 2,2589 \cdot 10^8 \quad (111)$$

La esbeltez relativa es:

$$\bar{\lambda}_{d2} = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr2,s}}} = 1,0300 \quad (112)$$

En este caso el factor de reducción es: sigue la siguiente condición:

$$\text{si } 0,65 < \bar{\lambda}_{d2} \leq 1,38 \rightarrow \chi_{d2} = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_{d2} \quad (113)$$

$$\chi_{d2} = 0.7253 \quad (114)$$

### 3.5.3.3 Propiedades efectivas del alma

Para este caso la relación de tensiones y el coeficiente de pandeo son:

$$\psi = 1$$

$$k_{\sigma} = 4,0$$

El coeficiente de esbeltez es:

$$\bar{\lambda}_{ph} = \frac{\frac{h_p}{t}}{28,4\varepsilon\sqrt{k_{\sigma}}} = 1,7770 \quad (115)$$

El factor de reducción es:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{ph} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{ph}^2} = 0,4931 \quad (116)$$

Con los cálculos anteriores podemos conocer la altura efectiva y es:

$$h_{eff} = \rho \cdot h_p = 0,0976 \quad (117)$$

$$h_{e1} = \frac{h_{eff}}{2} = 0,0488 \quad (118)$$

$$h_{e2} = \frac{h_{eff}}{2} = 0,0488 \quad (119)$$

### 3.5.3.4 Propiedades efectivas de la sección

Área afectiva de la sección:

$$A_{eff} = t[c_p + b_{p2} + h_1 + h_2 + b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff})\chi_d] = 4,8966 \cdot 10^{-4} \quad (120)$$

Posición del centro geométrico de área efectiva:

$$Z_{G1} = \frac{t \left[ c_{eff2}\chi_{d2} \left( h_p - \frac{c_{eff2}}{2} \right) + h_p (b_{e22}\chi_{d2} + b_{e21}) + h_{e2} \left( h_p - \frac{h_{e2}}{2} \right) + \frac{h_{e1}^2}{2} + c_{eff}^2 \frac{\chi_{d1}}{2} \right]}{A_{eff}} = 0,0986 \quad (121)$$

$$Z_{G2} = h_p - Z_{G1} = 0,0993 \quad (122)$$

Momento de inercia efectivo según el eje y:

$$\begin{aligned} I_{\text{eff},y} &= \frac{h_1^3 \cdot t}{12} + \frac{h_2^3 \cdot t}{12} + \frac{b_{p2}^3 \cdot t}{12} + \frac{c_p^3 \cdot t}{12} + \frac{b_{e1} \cdot t^3}{12} + \frac{b_{e2} \cdot (\chi_d t)^3}{12} + \frac{c_{\text{eff}}^3 \cdot (\chi_d t)^3}{12} + c_p t \left( z_t - \frac{c_p}{2} \right)^2 + \\ & b_{p2} t \cdot z_t^2 + h_2 t \left( z_t - \frac{h_2}{2} \right)^2 + h_1 t \left( z_t - \frac{h_1}{2} \right)^2 + b_{e2} t \cdot z_c^2 + b_{e2} (\chi_d t) \cdot z_c^2 + c_{\text{eff}} (\chi_d t) \cdot z_c^2 + c_{\text{eff}} t \left( z_c - \frac{c_{\text{eff}}}{2} \right)^2 \\ & = 3,9332 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^4\text{]} \end{aligned}$$

Posición del centro geométrico del área bruta:

$$C_{z1} = \frac{\left[ \left( h_p \cdot t \cdot \frac{h_p}{2} \right) + \left( c_{p2} \cdot t \cdot \frac{c_{p2}}{2} \right) + b_{p1} \cdot t \cdot h_p + c_{p1} \cdot t \cdot \left( h_p - \frac{c_{p1}}{2} \right) \right]}{A_{\text{eff}}} = 0,0992 \quad (123)$$

$$C_{z2} = h_p - C_{z1} = 0,0987 \quad (125)$$

Momento de inercia del área bruta:

$$\begin{aligned} I_y &= \frac{h_p^3 t}{12} + \frac{b_{p1}^3 t}{12} + \frac{b_{p2}^3 t}{12} + \frac{c_p^3 t}{12} + \frac{c_{p1}^3 t}{12} + \frac{c_{p2}^3 t}{12} + h_p \cdot t \cdot \left( C_z - \frac{h_2}{2} \right) + b_{p1} \cdot t \cdot C_z^2 + c_p \cdot t \cdot \\ & \left( c_z - \frac{c_p}{2} \right)^2 + b_{p2} \cdot t \cdot C_{z2}^2 \\ & = 4,6350 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

El área efectiva del perfil C es como el de la Figura 26:



Figura 26- Área efectiva del perfil C

Modulo efectivo de la sección a compresión:

$$W_{\text{eff},y,c} = \frac{I_{\text{eff},y}}{z_{G1}} = 3,9891 \cdot 10^{-6} [\text{m}^3] \quad (127)$$

Modulo efectivo de la sección a tracción:

$$W_{\text{eff},y,t} = \frac{I_{\text{eff},y}}{z_{G2}} = 3,9609 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3] \quad (128)$$

El modulo efectivo elegido:

$$W_{\text{eff},y} = \min(W_{\text{eff},y,c}, W_{\text{eff},y,t}) = 3,9609 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3] \quad (129)$$

### 3.5.4 Verificación de la seguridad de los perfiles conformados en frío temperatura ambiente

#### Esfuerzo normal resistente a compresión

El valor del esfuerzo norma resistente a compresión es:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{yb}}{\gamma_{Mo}} = 1,1734 \cdot 10^5 [N] \quad (130)$$

#### Resistencia a pandeo del elemento comprimido

Para el eje y:

Lo primero que se calcula es la carga crítica para calcular la esbeltez:

Se conoce ya el valor de inercia del eje y calculado en la ecuación (126) por lo que solo se debe resolver la siguiente fórmula:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L^2} = 5,7163 \cdot 10^6 [N] \quad (131)$$

Sabiendo el valor de la carga crítica se resuelve la esbeltez y es:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,y}}} = 0,1433 \quad (132)$$

Para este caso el factor de imperfección es  $\alpha = 0,34$ , y el coeficiente de reducción es:

Ya se puede calcula  $\phi$  que es:

$$\phi_y = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_y + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5001 \quad (133)$$

El factor de reducción es:

$$X_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 + \bar{\lambda}_y^2}} = 1,0201 \quad (134)$$

Como  $X > 1$  su valor es  $X = 1$

El área afectiva ya se ha calculado anteriormente en la ecuación (120), por lo que ya se puede calcular el valor de la resistencia a pandeo y es:

$$N_{b,Rd,y} = \frac{X_y \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = 1,1734 \cdot 10^5 [\text{N}] \quad (135)$$

Para el eje z:

Lo primero que se calcula es la carga crítica que está en función de la inercia del eje z que a su vez está en función del centro geométrico calculado en la siguiente fórmula:

$$C_z = \frac{b_{p1} \cdot t \cdot \frac{b_{p1}}{2} + \frac{c_{p1} \cdot t \cdot b_{p1} + b_{p2} \cdot t \cdot b_{p2}}{2} + c_{p2} \cdot t \cdot b_{p2}}{A_{bruta}} = 0,0204 [\text{m}] \quad (136)$$

El valor la inercia del eje z será:

$$I_z = \frac{c_{p1} t^3}{12} + (c_{p1} t)(b_{p1} - C_y)^2 + \frac{b_{p1}^3 t}{12} + (b_{p1} t) \left( b_{p1} - C_y - \frac{b_{p1}}{2} \right)^2 + \frac{c_{p2} t^3}{12} + (c_{p2} t)(b_{p2} - C_y)^2 + \frac{b_{p2}^3 t}{12} + (b_{p2} t) \left( b_{p2} - C_y - \frac{b_{p2}}{2} \right)^2 + \frac{h_p t^3}{12} + (h_p t)(C_z)^2 = 3,521 \cdot 10^{-7} [\text{m}^4] \quad (137)$$

El esfuerzo normal resistente a compresión del eje z viene determinado por la siguiente fórmula:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} = 6,6255 \cdot 10^5 [\text{N}] \quad (138)$$

Sabiendo el valor de la carga crítica se calcula la esbeltez y es:

El factor de imperfección es  $\alpha = 0,34$ , y el coeficiente de reducción es:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_{eff} f}{N_{cr,z}}} = 0,4198 \quad (139)$$

Ya se puede calcular  $\phi$  que es:

El factor de imperfección es  $\alpha = 0,34$ , y el coeficiente de reducción es:

$$\phi_z = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_z + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,6255 \quad (140)$$

El factor de reducción es:

$$X_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z + \bar{\lambda}_z^2}} = 0,9181 \quad (141)$$

El área afectiva ya se ha calculado anteriormente en la ecuación (120), por lo que ya se puede calcular el valor de la resistencia a pandeo y es:

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z \cdot A_{eff} \cdot f}{\gamma_{Mo}} = 1,0774 \cdot 10^5 \text{ [N]} \quad (142)$$

El valor de la resistencia a pandeo  $N_{b,Rd}$  debe de ser calculado para los ejes “y” y “z”, y de los dos el valor elegido es el menor:

$$\text{Min} (N_{b,Rd,y}, N_{b,Rd,z}) = 1,0774 \cdot 10^5 \text{ [N]} \quad (143)$$

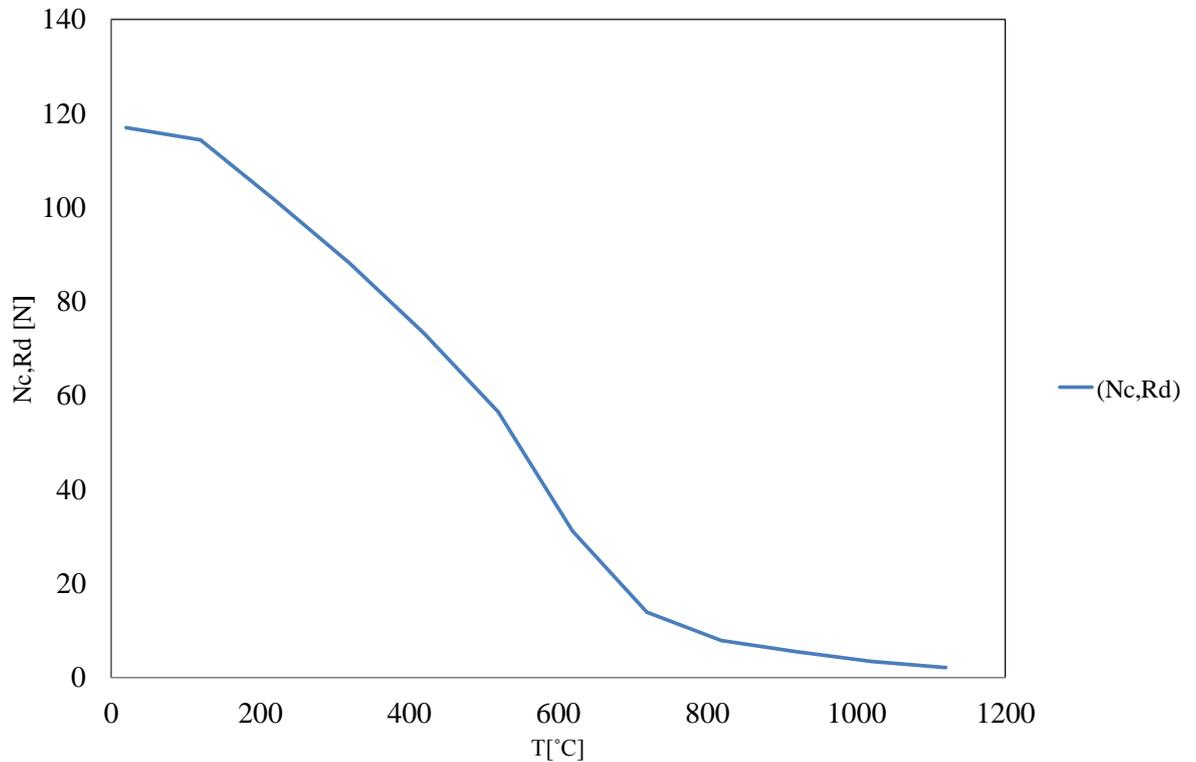
### 3.5.5 Verificación de la seguridad de los perfiles conformados en frío a elevadas temperaturas

Esfuerzo norma resistente a compresión

$$N_{fi,c,Rd} = \frac{A_{eff} K_{0.2,p,\theta} f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{A_{eff} f_{0.2,p,\theta}}{\gamma_{Mo}} \quad (144)$$

Para situación de incendio el valor de la tensión de cedencia del acero deberá ser considerado igual a la tensión límite convencional de proporcionalidad a 0,2%, es decir para este caso  $f_{0,2,p,\theta} = 237,14 \text{ [MPa]}$ .

Para las diferentes temperaturas el esfuerzo norma resistente tiene los valores del Figura 27:



**Figura 27 –Variación del esfuerzo resistente de la sección con la temperatura.**

### Resistencia a pandeo del elemento comprimido

Para el eje z:

Lo primero que se calcula es la esbeltez normalizada  $\bar{\lambda}_\theta$  a temperatura  $\theta$  es y en función de la temperatura tendremos los valores con la siguiente ecuación:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[ \frac{K_{y,\theta}}{K_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad (145)$$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \left[ \begin{array}{ll} 20^{\circ}\text{C} & 0,4189 \\ 120^{\circ}\text{C} & 0,4185 \\ 220^{\circ}\text{C} & 0,4161 \\ 320^{\circ}\text{C} & 0,4119 \\ 420^{\circ}\text{C} & 0,4020 \\ 520^{\circ}\text{C} & 0,3959 \\ 620^{\circ}\text{C} & 0,4128 \\ 720^{\circ}\text{C} & 0,4120 \\ 820^{\circ}\text{C} & 0,3681 \\ 920^{\circ}\text{C} & 0,3580 \\ 1020^{\circ}\text{C} & 0,3483 \\ 1120^{\circ}\text{C} & 0,3950 \end{array} \right]$$

Para todas las temperaturas  $\alpha$  es:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_{0,2,p}}} = 0.6457 \quad (146)$$

Para calcular el coeficiente de reducción a torsión  $\chi_{fi}$ , se tiene que conocer antes el valor  $\phi_{\theta}$  de que es el siguiente:

$$\phi_{\theta} = \left[ \begin{array}{ll} 20^{\circ}\text{C} & 0,7230 \\ 120^{\circ}\text{C} & 0,7227 \\ 220^{\circ}\text{C} & 0,7209 \\ 320^{\circ}\text{C} & 0,7178 \\ 420^{\circ}\text{C} & 0,7106 \\ 520^{\circ}\text{C} & 0,7062 \\ 620^{\circ}\text{C} & 0,7185 \\ 720^{\circ}\text{C} & 0,7179 \\ 820^{\circ}\text{C} & 0,6866 \\ 920^{\circ}\text{C} & 0,6796 \\ 1020^{\circ}\text{C} & 0,6731 \\ 1120^{\circ}\text{C} & 0,7055 \end{array} \right]$$

Con estos datos ya se puede calcular el coeficiente de reducción a torsión que es:

$$\chi_{fi} = \begin{bmatrix} 20^{\circ}\text{C} & 0,7620 \\ 120^{\circ}\text{C} & 0,7623 \\ 220^{\circ}\text{C} & 0,7636 \\ 320^{\circ}\text{C} & 0,7659 \\ 420^{\circ}\text{C} & 0,7713 \\ 520^{\circ}\text{C} & 0,7746 \\ 620^{\circ}\text{C} & 0,7654 \\ 720^{\circ}\text{C} & 0,7658 \\ 820^{\circ}\text{C} & 0,7898 \\ 920^{\circ}\text{C} & 0,7953 \\ 1020^{\circ}\text{C} & 0,8006 \\ 1120^{\circ}\text{C} & 0,7751 \end{bmatrix}$$

El valor de cálculo de la resistencia a pandeo  $N_{b,fi,t,Rd}$  para el eje z tiene los siguientes resultados:

$$N_{b,fi,t,Rd,z} = \begin{bmatrix} 20^{\circ}\text{C} & 89,4268[\text{N}] \\ 120^{\circ}\text{C} & 87,4863[\text{N}] \\ 220^{\circ}\text{C} & 77,7821[\text{N}] \\ 320^{\circ}\text{C} & 67,7685[\text{N}] \\ 420^{\circ}\text{C} & 56,6629[\text{N}] \\ 520^{\circ}\text{C} & 43,9981[\text{N}] \\ 620^{\circ}\text{C} & 23,8927[\text{N}] \\ 720^{\circ}\text{C} & 10,6048[\text{N}] \\ 820^{\circ}\text{C} & 6,1173[\text{N}] \\ 920^{\circ}\text{C} & 4,2933[\text{N}] \\ 1020^{\circ}\text{C} & 2,6306[\text{N}] \\ 1120^{\circ}\text{C} & 1,455 \end{bmatrix}$$

Para el eje y:

Lo primero que se calcula es la esbeltez normalizada  $\bar{\lambda}_{\theta}$  a temperatura  $\theta$  es y en función de la temperatura tendremos los valores con la siguiente ecuación:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left[ \frac{K_{y,\theta}}{K_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad (147)$$

$$\begin{bmatrix} 20^{\circ}\text{C} & 0,1433 \\ 120^{\circ}\text{C} & 0,1431 \\ 220^{\circ}\text{C} & 0,1423 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \begin{bmatrix} 320^\circ\text{C} & 0,1409 \\ 420^\circ\text{C} & 0,1375 \\ 520^\circ\text{C} & 0,1354 \\ \\ 620^\circ\text{C} & 0,1412 \\ 720^\circ\text{C} & 0,1409 \\ 820^\circ\text{C} & 0,1259 \\ 920^\circ\text{C} & 0,1224 \\ 1020^\circ\text{C} & 0,1191 \\ 1120^\circ\text{C} & 0,1351 \end{bmatrix}$$

Para todas las temperaturas  $\alpha$  es:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_{0.2,p}}} = 0.6457 \quad (148)$$

Para calcular el coeficiente de reducción a torsión  $\chi_{fi}$ , se tiene que conocer antes

el valor  $\phi_\theta$  de que es el siguiente:

$$\phi_\theta = \begin{bmatrix} 20^\circ\text{C} & 0,5564 \\ 120^\circ\text{C} & 0,5563 \\ 220^\circ\text{C} & 0,5559 \\ 320^\circ\text{C} & 0,5553 \\ 420^\circ\text{C} & 0,5537 \\ 520^\circ\text{C} & 0,5537 \\ \\ 620^\circ\text{C} & 0,5527 \\ 720^\circ\text{C} & 0,5554 \\ 820^\circ\text{C} & 0,5553 \\ 920^\circ\text{C} & 0,5484 \\ 1020^\circ\text{C} & 0,5469 \\ 1120^\circ\text{C} & 0,5454 \end{bmatrix}$$

Con estos datos ya se puede calcular el coeficiente de reducción a torsión que es:

$$\chi_{fi} = \begin{bmatrix} 20^\circ\text{C} & 0,9140 \\ 120^\circ\text{C} & 0,9141 \\ 220^\circ\text{C} & 0,9146 \\ 320^\circ\text{C} & 0,9154 \\ 420^\circ\text{C} & 0,9173 \\ 520^\circ\text{C} & 0,9185 \end{bmatrix}$$

620°C	0,9152
720°C	0,9154
820°C	0,9239
920°C	0,9259
1020°C	0,9278
1120°C	0,9178

El valor de cálculo de la resistencia a pandeo  $N_{b,fi,t,Rd}$  para el eje z tiene los siguientes resultados

$NN_{b,fi,t,Rd,y} =$	20°C	107,2618[N]
	120°C	104,9196[N]
	220°C	93,1600[N]
	320°C	80,9966[N]
	420°C	67,3886[N]
	520°C	52,1696[N]
	620°C	28,5690[N]
	720°C	12,6755[N]
	820°C	7,1562[N]
	920°C	4,9983[N]
	1020°C	3,0487[N]
	1120°C	1,7249[N]

En la Figura 28 se adjunta la superposición de los valores de la resistencia a pandeo para el eje “y” y para el eje “z”:

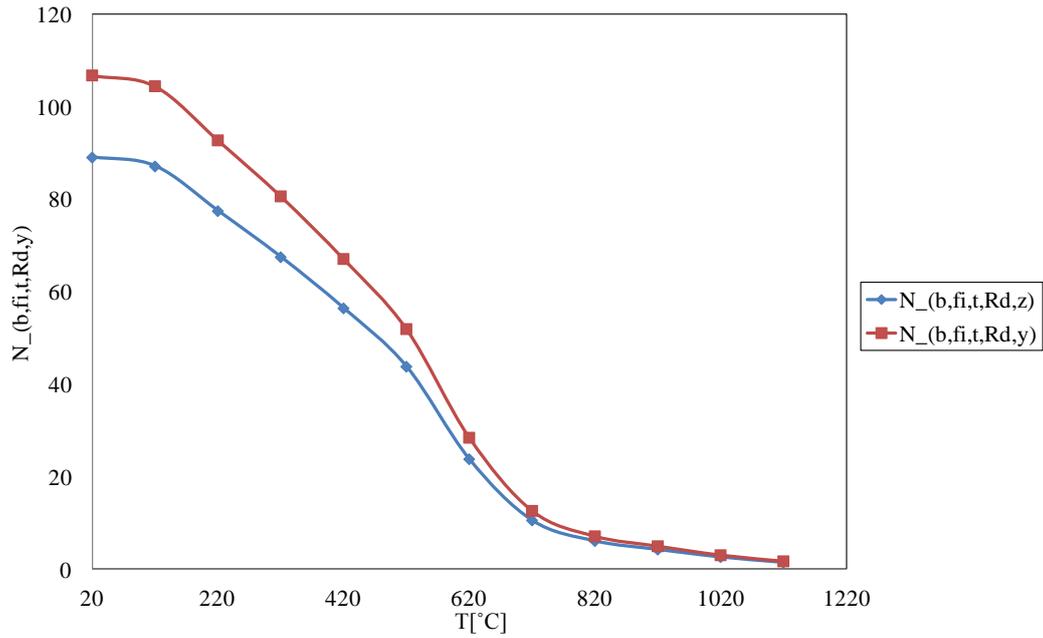
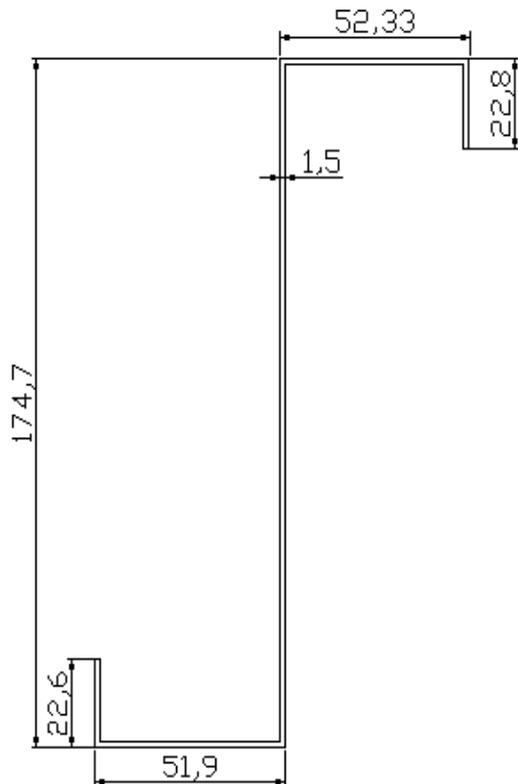


Figura 28 – Variación de la resistencia a pandeo con la temperatura

b) Perfil Z



$$h = 173,2 \text{ [mm]}$$

$$b_1 = b_s = 51,7 \text{ [mm]}$$

$$b_2 = b_i = 51,9 \text{ [mm]}$$

$$c_1 = c_s = 22,8 \text{ [mm]}$$

$$c_2 = c_i = 22,6 \text{ [mm]}$$

$$t_{nom} = 1,5 \text{ [mm]}$$

$$t = t_{nom} - 0,02 = 1,48 \text{ [mm]}$$

$$h_p = h - t_{nom} = 171,7 \text{ [mm]}$$

$$b_{p2} = b_2 - t_{nom} = 50,4 \text{ [mm]}$$

$$b_{p1} = b_1 - t_{nom} = 50,2 \text{ [mm]}$$

$$c_{p2} = c_2 - t_{nom} = 21,1 \text{ [mm]}$$

$$c_{p1} = c_1 - t_{nom} = 21,3 \text{ [mm]}$$

**Propiedades mecánicas:**

$$f_{yb} = 232,33 \text{ [MPa]}$$

$$E = 186,1172 \text{ [GPa]}$$

### 3.5.6 Propiedades geométricas

En primer lugar se calculan las propiedades geométricas del perfil C.

$$\frac{b_p}{t} \leq 60 \begin{cases} \frac{b_{p1}}{t} = \frac{50,2}{1,48} = 33,91 \rightarrow \textit{Verifica} \\ \frac{b_{p2}}{t} = \frac{50,4}{1,48} = 34,05 \rightarrow \textit{Verifica} \end{cases} \quad (149)$$

$$\frac{c_p}{t} \leq 50 \begin{cases} \frac{c_{p1}}{t} = \frac{21,3}{1,48} = 14,39 \rightarrow \textit{Verifica} \\ \frac{c_{p2}}{t} = \frac{21,1}{1,48} = 14,26 \rightarrow \textit{Verifica} \end{cases} \quad (150)$$

$$\frac{h_p}{t} \leq 500 \sin \theta \quad \frac{h_p}{t} = \frac{171,7}{1,48} = 116,01 \rightarrow \textit{Verifica} \quad (151)$$

$$0,2 \leq \frac{c_p}{b_p} \leq 0,6 \begin{cases} \frac{c_{p1}}{b_{p1}} = \frac{21,3}{50,2} = 0,42 \rightarrow \textit{Verifica} \\ \frac{c_{p2}}{b_{p2}} = \frac{21,1}{50,4} = 0,42 \rightarrow \textit{Verifica} \end{cases} \quad (152)$$

### 3.5.7 Propiedades de la sección bruta

$$A_{br} = t (c_{p1} + c_{p2} + b_{p1} + b_{p2} + h_p) = 4,6565 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]} \quad (153)$$

Posición del centro de gravedad del eje y:

$$z_{zy} = \frac{\left[ b_{p1} \left( c_{p1} + \frac{b_{p1}}{2} \right) - b_{p2} \left( c_{p2} + \frac{b_{p2}}{2} \right) \right] t}{A_{br}} = -1,3884 \cdot 10^{-5} [m] \quad (154)$$

Posición del centro de gravedad del eje z:

$$z_{zz} = \frac{\left[ \left( h_p \frac{h_p}{2} \right) + \left( c_{p2} \frac{c_{p2}}{2} \right) + (b_{p1} h_p) + \left( c_{p1} \left( h_p - \frac{c_{p1}}{2} \right) \right) \right] t}{A_{br}} = 0,0858 [m] \quad (155)$$

### 3.5.8 Propiedades efectivas a compresión

#### 3.5.8.1 Largura efectiva del ala a compresión

**Paso1:** obtener una sección efectiva inicial para el refuerzo usando anchos efectivos obtenidas como el supuesto de que el refuerzo proporciona resistencia total

En este caso la relación de tensiones y el coeficiente de pandeo son:

$$\psi = 1$$

$$k_\sigma = 4,0$$

Para el ala superior:

El coeficiente  $\varepsilon$  es

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = 1,0057 \quad (156)$$

El coeficiente elbeltez:

$$\bar{\lambda}_{p,b1} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_{p1}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,5938 \quad (157)$$

El coeficiente de reducción:

$$\rho_1 = \frac{\bar{\lambda}_{p,b1} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b1}^2} = 1,0057 \quad (158)$$

Como  $\rho_1 < 1 \rightarrow \rho_1 = 1$

La largura efectivas:

$$b_{\text{eff1}} = \rho_1 \cdot b_{p1} = 0,0502[\text{m}] \quad (159)$$

$$b_{e12} = \frac{b_{\text{eff1}}}{2} = 0,0251 [\text{m}] \quad (160)$$

$$b_{e12} = \frac{b_{\text{eff1}}}{2} = 0,0251 [\text{m}] \quad (161)$$

Para el ala inferior:

El coeficiente  $\varepsilon$  es

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = 1,0057 \quad (162)$$

El coeficiente elbeltez:

$$\bar{\lambda}_{p,b2} = \frac{\sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}}{\frac{b_{p2}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}} = 0,5961 \quad (163)$$

El coeficiente de reducción:

$$\rho_2 = \frac{\bar{\lambda}_{p,b2} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b2}^2} = 1,0584 \quad (164)$$

Como  $\rho_2 < 1 \rightarrow \rho_2 = 1$

La largura efectivas:

$$b_{\text{eff2}} = \rho_2 \cdot b_{p2} = 0,0504 [\text{m}] \quad (165)$$

$$b_{e21} = \frac{b_{\text{eff2}}}{2} = 0,0252 [\text{m}] \quad (166)$$

$$b_{e22} = \frac{b_{\text{eff2}}}{2} = 0,0252 [\text{m}] \quad (167)$$

### 3.5.8.2 Largura efectiva del ala a compresión

Para el ala del refuerzo superior:

El valor de  $k_{\sigma}$  depende de la relación entre  $\frac{b_{p,c}}{b_p}$  en el caso del refuerzo superior

es:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = 0,42 \text{ el valor de } k_{\sigma} \text{ es} \quad (168)$$

$$k_{\sigma} = 0,5 + 0,833^3 \sqrt{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2} = 0,6658 \quad (169)$$

Teniendo estos datos ya se puede calcular la esbeltez relativa y es:

$$\bar{\lambda}_{p1,c} = \frac{b_{pc1}}{t} = 0,6393 \quad (170)$$

El coeficiente de reducción:

$$\rho_1 = \frac{\bar{\lambda}_{p1,c} - 0,188}{\bar{\lambda}_{p1,c}^2} = 1,1042 \quad (171)$$

Como  $\rho_1 \geq 1$  se considerar  $\rho_1 = 1$

Luego:

$$C_{eff1} = \rho b_{pc1} = 0,0221 \text{ [m]} \quad (172)$$

Para el ala del refuerzo inferior

El valor de  $k_{\sigma}$  depende de la relación entre  $\frac{b_{p,c}}{b_p}$  en el caso del refuerzo inferior es:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = 0,43 \text{ el valor de } k_{\sigma} \text{ es} \quad (173)$$

$$k_{\sigma} = 0,5 + 0,833^3 \sqrt{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2} = 0,6586 \quad (174)$$

La esbeltez relativa:

$$\bar{\lambda}_{p2,c} = \frac{\frac{b_{pc2}}{t}}{28,4\varepsilon\sqrt{k_{\sigma}}} = 0,6369 \quad (175)$$

El coeficiente de reducción:

$$\rho_2 = \frac{\bar{\lambda}_{p2,c} - 0,188}{\bar{\lambda}_{p2,c}^2} = 1,1066 \quad (176)$$

Como  $\rho_1 \geq 1$  se considerar  $\rho_1 = 1$

Luego:

$$c_{\text{eff}2} = \rho b_{pc2} = 0,0219 \text{ [m]} \quad (177)$$

Con los cálculos anteriores se puede conocer el área afectiva de refuerzo y es:

$$A_{s1} = t(b_{\text{eff}1} + c_{\text{eff}1}) = 6,9782 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]} \quad (178)$$

$$A_{s2} = t(b_{\text{eff}2} + c_{\text{eff}2}) = 6,9634 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]} \quad (179)$$

**Paso 2:** Con la sección efectiva inicial determinar el factor de reducción para el pandeo por distorsión, considerando los efectos de las restricciones:

Para el ala superior:

Lo primero que se calcula es:

$$k_{f1} = \frac{A_{s2}}{A_{s1}} = 0,9979 \quad (180)$$

Sabiendo lo anterior ya se puede calcular la rigidez del muelle:

$$K_1 = \frac{E \cdot t^3}{4(1 - \nu^2) b_1^2 \cdot h_p + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_p \cdot k_{f1}} = 2,6974 \cdot 10^5 \text{ (1)}$$

El momento de inercia efectivo:

$$I_{s1} = \left( \frac{b_{e12} \cdot t^3}{12} \right) + \left( \frac{c_{eff1}^3 \cdot t}{12} \right) + \left( b_{e12} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff1}^2}{(2(b_{e12} + c_{eff1}))} \right)^2 \right) + \quad (182)$$

$$+ c \cdot t \cdot \left( \left( \frac{c_{eff1}^3}{2} \right) - \left( \frac{c_{eff1}^2}{2(b_{e12} + c_{eff1})} \right) \right) = 3,7289 \cdot 10^{-9} [\text{m}^4]$$

La tensión crítica elástica es:

$$\sigma_{cr1,s} = \frac{2\sqrt{KEI_{s1}}}{A_{s1}} = 3,9099 \cdot 10^8 \quad (183)$$

La esbeltez relativa

$$\bar{\lambda}_{d1} = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr1,s}}} = 0,7708 \quad (184)$$

En este caso el factor de reducción es: sigue la siguiente condición:

$$\text{si } 0,65 < \bar{\lambda}_{d1} \leq 1,38 \rightarrow \chi_{d1} = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_{d1} \quad (185)$$

$$\chi_{d1} = 0,9127 \quad (186)$$

Para el ala inferior:

Lo primero que se calcula es:

$$k_{f2} = \frac{A_{s1}}{A_{s2}} = 1,0021 \quad (187)$$

Sabiendo lo anterior ya se puede calcular la rigidez del muelle:

$$K_2 = \frac{E \cdot t^3}{4(1 - \nu^2) b_1^2 \cdot h_p + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_p \cdot k_{f1}} \cdot 1 = 2,6813 \cdot 10^5 \quad (1)$$

El momento de inercia efectivo:

$$I_{s2} = \left( \frac{b_{e22} \cdot t^3}{12} \right) + \left( \frac{c_{eff2}^3 \cdot t}{12} \right) + \left( b_{e22} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff2}^2}{(2(b_{e22} + c_{eff2}))} \right)^2 \right) +$$

$$+ c \cdot t \cdot \left( \left( \frac{c_{eff2}^3}{2} \right) - \left( \frac{c_{eff2}^2}{2(b_{e22} + c_{eff2})} \right) \right) = 3,3151 \cdot 10^{-9} [\text{m}^4] \quad (189)$$

La tensión crítica elástica es:

$$\sigma_{cr2,s} = \frac{2\sqrt{KEI_{s2}}}{A_{s2}} = 3,8608 \cdot 10^8 \quad (190)$$

La esbeltez relativa es:

$$\bar{\lambda}_{d2} = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr2,s}}} = 0,7757 \quad (191)$$

En este caso el factor de reducción es: sigue la siguiente condición:

$$\text{si } 0,65 < \bar{\lambda}_{d2} \leq 1,38 \rightarrow \chi_{d2} = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_{d2} \quad (192)$$

$$\chi_{d2} = 0,9091 \quad (193)$$

### 3.5.8.3 Propiedades efectivas del alma

Para este caso la relación de tensiones y el coeficiente de pandeo son:

$$\psi = 1$$

$$k_{\sigma} = 4,0$$

El coeficiente de esbeltez es:

$$\bar{\lambda}_{ph} = \frac{\frac{h_p}{t}}{28,4\varepsilon\sqrt{k_{\sigma}}} = 2,0908 \quad (194)$$

El factor de reducción es:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{ph} - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{ph}^2} = 0,4280 \quad (195)$$

Con los cálculos anteriores podemos conocer la altura efectiva y es:

$$\mathbf{h_{eff} = \rho \cdot h_p = 0,0735} \quad (196)$$

$$\mathbf{h_{e1} = \frac{h_{eff}}{2} = 0,0367} \quad (197)$$

$$\mathbf{h_{e2} = \frac{h_{eff}}{2} = 0,0345} \quad (198)$$

### 3.5.8.4 Propiedades efectivas de la sección

Área afectiva de la sección:

$$A_{eff} = t[c_p + b_{p2} + h_1 + h_2 + b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff})\chi_d] = 3,1301 \cdot 10^{-4} \quad (199)$$

Posición del centro geométrico de área efectiva:

$$Z_{G1} = \frac{t \left[ c_{eff2} \chi_{d2} \left( h_p - \frac{c_{eff2}}{2} \right) + h_p (b_{e22} \chi_{d2} + b_{e21}) + h_{e2} \left( h_p - \frac{h_{e2}}{2} \right) + \frac{h_{e1}^2}{2} + c_{eff}^2 \frac{\chi_{d1}}{2} \right]}{A_{eff}} = 0,0858 \quad (200)$$

$$Z_{G2} = h_p - Z_{G1} = 0,0859 \quad (201)$$

Momento de inercia efectivo según el eje y:

$$I_{eff,y} = \frac{h_1^5 \cdot t}{12} + \frac{h_2^5 \cdot t}{12} + \frac{b_{p2}^5 \cdot t}{12} + \frac{c_p^5 \cdot t}{12} + \frac{b_{e1} \cdot t^3}{12} + \frac{b_{e2} \cdot (\chi_d t)^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 \cdot (\chi_d t)}{12} + c_p t \left( z_t - \frac{c_p}{2} \right)^2 + b_{p2} t \cdot z_t^2 + h_2 t \left( z_t - \frac{h_2}{2} \right)^2 + h_1 t \left( z_t - \frac{h_1}{2} \right)^2 + b_{e2} t \cdot z_c^2 + b_{e2} (\chi_d t) \cdot z_c^2 + c_{eff} (\chi_d t) \left( z_c - \frac{c_{eff}}{2} \right)^2 \quad (202)$$

$$= 1,8968 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^4\text{]}$$

Posición del centro geométrico del área bruta:

$$C_{z1} = \frac{\left[ \left( h_p \cdot t \cdot \frac{h_p}{2} \right) + \left( c_{p2} \cdot t \cdot \frac{c_{p2}}{2} \right) + b_{p1} \cdot t \cdot h_p + c_{p1} \cdot t \cdot \left( h_p - \frac{c_{p1}}{2} \right) \right]}{A_{\text{eff}}} = 0,0858 \quad (20)$$

$$C_{z2} = h_p - C_{z1} = 171,61 \quad (204)$$

Momento de inercia del área bruta:

$$I_y = \frac{h_p^3 t}{12} + \frac{b_{p1}^3 t}{12} + \frac{b_{p2}^3 t}{12} + \frac{c_{p1}^3 t}{12} + \frac{c_{p2}^3 t}{12} + \frac{c_{p1}^3 t}{12} + h_p \cdot t \cdot \left( C_z - \frac{h_p}{2} \right) + b_{p1} \cdot t \cdot c_z^2 + c_p \cdot t \cdot \left( c_z - \frac{c_p}{2} \right)^2 + b_{p2} \cdot t \cdot C_{z2}^2 \quad (205)$$

$$= 2,0886 \cdot 10^{-6}$$

El área efectiva del perfil Z es como el de la Figura 29:

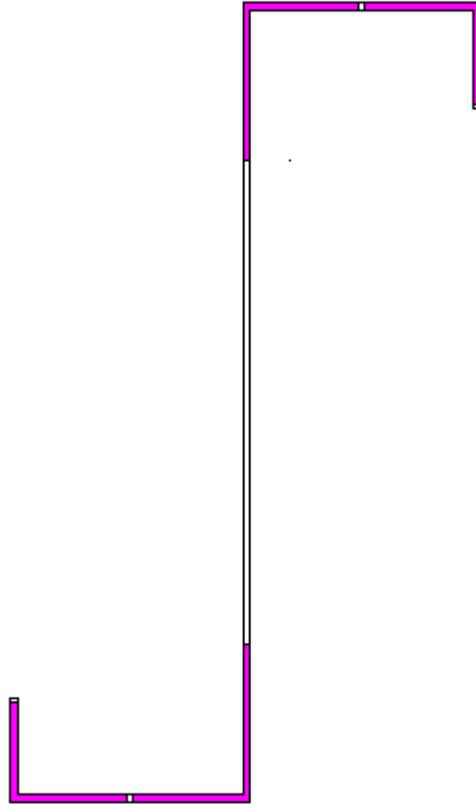


Figura 29-Área efectiva del perfil Z

Modulo efectivo de la sección a compresión:

$$W_{\text{eff},y,c} = \frac{I_{\text{eff},y}}{z_{G1}} = 2,2104 \cdot 10^{-6} [\text{m}^3] \quad (206)$$

Modulo efectivo de la sección a tracción:

$$W_{\text{eff},y,t} = \frac{I_{\text{eff},y}}{z_{G2}} = 2,2083 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3] \quad (207)$$

El modulo efectivo elegido:

$$W_{\text{eff},y} = \min(W_{\text{eff},y,c}, W_{\text{eff},y,t}) = 2,2083 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3] \quad (208)$$

### 3.5.9 Verificación de la seguridad de los perfiles conformados en frío

Esfuerzo norma resistente a compresión

El valor del esfuerzo norma resistente a compresión es:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{yb}}{\gamma_{Mo}} = 7,2593 \cdot 10^4 \text{ [N]} \quad (209)$$

Resistencia a pandeo del elemento comprimido

Para el eje “y” lo primero que se calcula carga crítica para calcular la esbeltez:

Se conoce ya el valor de inercia del eje y calculado en la ecuación (205) por lo que solo se debe resolver la siguiente fórmula:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L^2} = 2,6642 \cdot 10^6 \text{ [N]} \quad (210)$$

Para este caso el factor de imperfección es  $\alpha = 0,34$ , y el coeficiente de reducción es:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,y}}} = 0,1652 \quad (211)$$

Ya se puede calcula  $\phi$  que es:

$$\phi_y = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_y + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5077 \quad (212)$$

El factor de reducción es:

$$X_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y + \bar{\lambda}_y^2}} = 1,0123 \quad (213)$$

Como  $X > 1$  su valor es  $X = 1$

El área afectiva ya se ha calculado anteriormente en la ecuación (199), por lo que ya se puede calcular el valor de la resistencia a pandeo y es:

$$N_{b,Rdy} = \frac{X_y \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = 7,2722 \cdot 10^4 \text{ [N]} \quad (214)$$

Para el eje z:

Se calcula antes la inercia del eje z que está en función del centro geométrico calculado en la siguiente fórmula:

$$C_z = \frac{b_{p1} \cdot t \cdot \frac{b_{p1}}{2} + \frac{c_{p1} \cdot t \cdot b_{p1} + b_{p2} \cdot t \cdot b_{p2}}{2} + c_{p2} \cdot t \cdot b_{p2}}{A_{bruta}} = -1,388 \cdot 10^{-5} \text{ [m]} \quad (215)$$

El valor la inercia del eje z será:

$$I_z = \frac{c_{p1} t^3}{12} + (c_{p1} t)(b_{p1} - C_y)^2 + \frac{b_{p1}^3 t}{12} + (b_{p1} t) \left( b_{p1} - C_y - \frac{b_{p1}}{2} \right)^2 + \frac{c_{p2} t^3}{12} \quad (216)$$

$$+ (c_{p2} t)(b_{p2} - C_y)^2 + \frac{b_{p2}^3 t}{12} + (b_{p2} t) \left( b_{p2} - C_y - \frac{b_{p2}}{2} \right) + \frac{h_p t^3}{12}$$

$$+ (h_p t)(C_z)^2 = 2,9001 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^4\text{]}$$

El esfuerzo normal resistente a compresión del eje z viene determinado por la siguiente fórmula:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} = 3,699 \cdot 10^5 \text{ [N]} \quad (217)$$

Para este caso el factor de imperfección es  $\alpha = 0,34$ , y el coeficiente de reducción es:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_{eff} f}{N_{cr,z}}} = 0,4434 \quad (218)$$

Ya se puede calcula  $\phi$  que es:

$$\phi_z = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_z + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,6397 \quad (219)$$

El factor de reducción es:

$$X_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z + \bar{\lambda}_z^{-2}}} = 0,9085 \quad (220)$$

El área afectiva ya se ha calculado anteriormente en la ecuación (120)(120), por lo que ya se puede calcular el valor de la resistencia a pandeo y es:

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z \cdot A_{eff} \cdot f}{\gamma_{Mo}} = 6,6067 \cdot 10^4 \text{ [N]} \quad (221)$$

El valor de la resistencia a pandeo  $N_{b,Rd}$  debe de ser calculado para los ejes “y” y “z”, y de los dos el valor elegido es el menor:

$$\text{Min} (N_{b,Rd,y}, N_{b,Rd,z}) = 6,6067 \cdot 10^4 \text{ [N]} \quad (222)$$

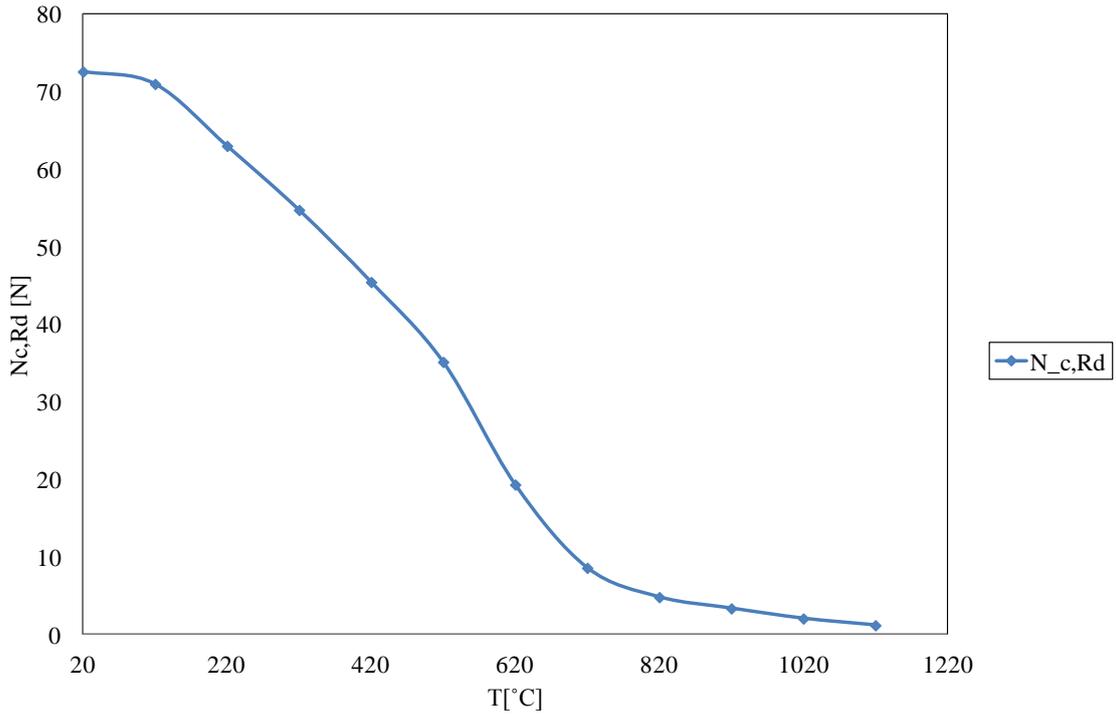
### 3.5.10 Verificación de la seguridad de los perfiles conformados en frío a elevadas temperaturas

#### Esfuerzo norma resistente a compresión

$$N_{fi,c,Rd} = \frac{A_{eff} K_{0.2,p,\theta} f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{A_{eff} f_{0.2,p,\theta}}{\gamma_{Mo}} \quad (223)$$

Para situación de incendio el valor de la tensión de cedencia del acero deberá ser considerado igual a la tensión límite convencional de proporcionalidad a 0,2%, es decir para este caso  $f_{0.2,p,\theta} = 231,86 \text{ [MPa]}$ .

Para las diferentes temperaturas el esfuerzo norma resistente tiene los valores del Figura 30:



**Figura 30-Variación de la tensión de pandeo en función con la temperatura.**

Resistencia a pandeo del elemento comprimido

Para el eje z:

Lo primero que se calcula es la esbeltez normalizada  $\bar{\lambda}_\theta$  a temperatura  $\theta$  es y en función de la temperatura tendremos los valores con la siguiente ecuación:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[ \frac{K_{y,\theta}}{K_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad (224)$$

20°C	0,8354
120°C	0,8349
220°C	0,8321
320°C	0,8273
420°C	0,8159
520°C	0,8090
620°C	0,8283
720°C	0,8274
820°C	0,7783
920°C	0,7675

1020°C	0,7573
1120°C	0,8080

Para todas las temperaturas  $\alpha$  es:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_{0.2,p}}} = 0.6457 \quad (225)$$

Para calcular el coeficiente de reducción a torsión  $\chi_{fi}$ , se tiene que conocer antes el valor  $\phi_{\theta}$  de que es el siguiente:

$$\phi_{\theta} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2] \quad (226)$$

$\phi_{\theta} =$	20°C	0,8356
	120°C	0,7575
	220°C	0,7676
	320°C	0,7784
	420°C	0,8276
	520°C	0,8285
	620°C	0,8091
	720°C	0,8160
	820°C	0,8274
	920°C	0,8323
	1020°C	0,8351
	1120°C	0,8081

Con estos datos ya se puede calcular el coeficiente de reducción a torsión que es:

$\chi_{fi} =$	20°C	0,6849
	120°C	0,7364
	220°C	0,7294
	320°C	0,7220
	420°C	0,6899
	520°C	0,6894
	620°C	0,7017
	720°C	0,6973
	820°C	0,6900
	920°C	0,6870

1020°C	0,6852
1120°C	0,7024

El valor de cálculo de la resistencia a pandeo  $N_{b,fi,t,Rd}$  para el eje z tiene los siguientes resultados:

$$N_{b,fi,t,Rd,z} =$$

20°C	49,7303
120°C	48,6584
220°C	43,2979
320°C	37,7777
420°C	31,6939
520°C	24,6602
620°C	13,3150
720°C	5,9114
820°C	3,4600
920°C	2,4361
1020°C	1,4971
1120°C	0,8160

Para el eje y:

Lo primero que se calcula es la esbeltez normalizada  $\bar{\lambda}_\theta$  a temperatura  $\theta$  es y en función de la temperatura tendremos los valores con la siguiente ecuación:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[ \frac{K_{y,\theta}}{K_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad (227)$$

$$\bar{\lambda}_\theta =$$

20°C	0,1652
120°C	0,1649
220°C	0,1640
320°C	0,1643
420°C	0,1584
520°C	0,1560
620°C	0,1627
720°C	0,1624
820°C	0,1450
920°C	0,1411
1020°C	0,1373
1120°C	0,1556

Para todas las temperaturas  $\alpha$  es:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_{0,2,p}}} = 0.6457 \quad (228)$$

Para calcular el coeficiente de reducción a torsión  $\chi_{fi}$ , se tiene que conocer antes

el valor  $\phi_{\theta}$  de que es el siguiente:

$\phi_{\theta} =$	20°C	0,5549
	120°C	0,5542
	220°C	0,5510
	320°C	0,5455
	420°C	0,5323
	520°C	0,5243
	620°C	0,5466
	720°C	0,5456
	820°C	0,5874
	920°C	0,5471
	1020°C	0,5613
	1120°C	0,5231

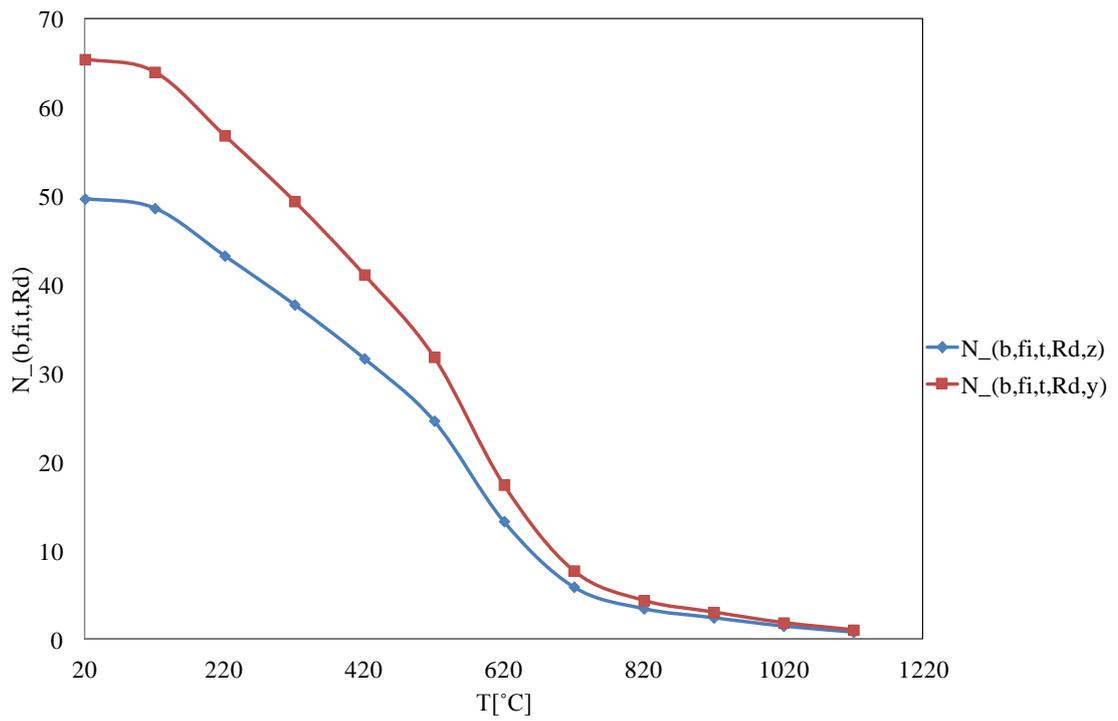
Con estos datos ya se puede calcular el coeficiente de reducción a torsión que es:

$\chi_{fi} =$	20°C	0,9003
	120°C	0,9163
	220°C	0,9141
	320°C	0,9118
	420°C	0,9019
	520°C	0,9017
	620°C	0,9055
	720°C	0,9041
	820°C	0,9019
	920°C	0,9010
	1020°C	0,9004
	1120°C	0,9057

El valor de cálculo de la resistencia a pandeo  $N_{b,fi,t,Rd}$  para el eje y tiene los siguientes resultados:

$N_{b,fi,t,Rd,y} =$	20°C	65,4720
	120°C	64,0390
	220°C	56,8708
	320°C	49,4530
	420°C	41,1596
	520°C	31,8712
	620°C	17,4425
	720°C	7,7391
	820°C	4,3762
	920°C	3,0578
	1020°C	1,8657
	1120°C	1,0538

En la Figura 31 se adjunta la superposición de los valores de la resistencia a pandeo para el eje “y” y para el eje “z”:



**Figura 31-Valores de la Resistencia de pandeo para los ejes y, z**

## Capítulo 4

### 4 Ensayos experimentales de los perfiles conformados en frío

#### 4.1 Caracterización de las propiedades geométricas

##### 4.1.1 Elementos de sección C

Las medidas de los perfiles son las siguientes:

Tabla 5- Medidas geométricas del perfil C

Perfil	h	b <sub>1</sub>	b <sub>s</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>s</sub>	t
C3	98,4	48,6	49,2	19,4	19,7	2,0
C8	98,1	49,1	48,5	19,4	19,8	2,0
C9	97,9	48,9	48,3	19,5	19,5	2,0
C14	100,7	50,7	50,7	19,6	19,4	1,5
C15	100,8	50,8	50,7	19,6	19,5	1,5
C16	101,0	49,8	51,3	19,3	19,7	1,5
C4	150,0	48,8	49,4	18,1	18,5	2,0
C1	148,3	49,7	49,6	19,8	19,0	2,0
C2	150,0	49,8	49,3	18,3	19,0	2,0
C12	148,8	51,4	51,5	19,9	20,2	1,5
C17	151,0	50,9	50,4	19,4	19,6	1,5
C18	150,5	50,8	51,1	19,6	20,0	1,5

<b>C5</b>	199,9	73,7	74,3	18,3	18,6	2,0
<b>C6</b>	198,6	74,7	74,0	18,4	18,6	2,0
<b>C7</b>	199,2	73,7	74,0	18,3	18,5	2,0
<b>C11</b>	199,8	75,7	76,0	20,0	20,4	1,5
<b>C13</b>	200,6	75,9	75,7	20,3	19,9	1,5
<b>C10</b>	197,9	75,9	75,6	21,0	21,0	1,5

Se ha calculado las propiedades mecánicas según los datos nominales dados en la hoja técnica, y según los obtenidos en los ensayos.

- Datos nominales  $\begin{cases} E = 210 \text{ GPa} \\ f_y = 284 \text{ MPa} \end{cases}$

Los perfiles representados anteriormente fueron analizados en Matlab, considerando las propiedades geométricas reales para la determinación de las propiedades efectivas presentadas en la Tabla 6, y el cálculo de la resistencia de la resistencia en relación con los estados límites últimos representados.

**Tabla 6- Medidas efectivas del perfil C**

Perfil	$A_{bruta}$	$h_{eff}$	$b_{eff1}$	$b_{eff2}$	$c_{eff1}$	$c_{eff2}$	$A_{eff}$	$I_y$	$I_{effy}$	$I_z$	$I_{effz}$
<b>C3</b>	450,05	78,42	47,2	46,6	18,7	18,4	414,4	0,693	0,692	0,163	0,151
<b>C8</b>	449,26	78,34	46,5	47,1	18,8	18,4	414,1	0,687	0,686	0,162	0,15
<b>C9</b>	447,68	78,29	46,3	46,9	18,5	18,5	412,8	0,682	0,681	0,16	0,149
<b>C14</b>	347,95	63,5	49,2	49,2	18,65	18,85	285,3	0,57	0,544	0,137	0,112
<b>C15</b>	348,39	63,51	49,20	49,30	18,75	18,85	285,60	0,57	0,55	0,14	0,11
<b>C16</b>	348,10	63,54	49,80	48,30	18,75	18,85	285,25	0,57	0,55	0,14	0,11
<b>C4</b>	548,10	86,70	47,40	46,80	17,50	17,10	419,70	1,90	1,80	0,20	0,10
<b>C1</b>	552,80	86,60	47,60	47,70	18,80	18,80	429,70	1,80	1,80	0,20	0,20
<b>C2</b>	551,20	86,70	47,30	47,80	18,00	17,30	422,90	1,90	1,80	0,20	0,20
<b>C12</b>	423,00	67,70	50,00	49,90	19,40	19,10	289,30	1,40	1,30	0,20	0,10
<b>C17</b>	422,20	67,90	48,90	49,40	18,90	18,60	285,60	1,50	1,30	0,20	0,10
<b>C18</b>	423,30	67,80	49,60	49,30	19,30	18,90	287,40	1,50	1,30	0,20	0,10
<b>C5</b>	746,10	90,70	70,50	70,20	17,60	17,30	471,40	4,60	3,90	0,50	0,30
<b>C6</b>	743,10	90,60	70,30	70,20	17,60	17,40	471,80	4,60	3,80	0,50	0,30

<b>C7</b>	743,90	90,60	70,30	70,20	17,50	17,30	471,00	4,60	3,80	0,50	0,30
<b>C11</b>	571,10	70,00	59,20	59,10	19,60	19,30	292,30	3,60	2,50	0,50	0,20
<b>C13</b>	571,90	70,00	59,10	59,20	19,10	19,60	291,80	3,60	2,50	0,50	0,20
<b>C10</b>	570,40	69,90	59,10	59,20	20,30	20,30	296,10	3,50	2,50	0,50	0,20

**Tabla 7- Valores de los Estados Límite del perfil C**

<b>Perfil</b>	$N_{Cr,y}$	$\lambda_y$	$X_y$	$N_{b,Rd,y}$	$N_{Cr,z}$	$\lambda_z$	$X_z$	$N_{b,Rd,z}$	$N_{c,Rd}$	$\sigma_{cr1}$	$\sigma_{cr2}$
<b>C3</b>	997,21	0,344	0,948	111,572	234,1	0,709	0,78	91,6424	117,7	716	714,5
<b>C8</b>	989,08	0,345	0,947	111,423	233	0,711	0,78	91,467	117,6	732,4	707,6
<b>C9</b>	981,19	0,346	0,947	111,039	230,1	0,714	0,78	90,9605	117,2	726,7	716,9
<b>C14</b>	820,56	0,314	0,959	77,6899	197,7	0,64	0,82	66,1447	81,02	494,4	499,6
<b>C15</b>	823,19	0,31	0,96	77,78	198,41	0,64	0,82	66,25	81,11	496,44	497,94
<b>C16</b>	825,01	0,31	0,96	77,70	196,85	0,64	0,82	66,08	81,01	490,37	509,33
<b>C4</b>	2663,70	0,20	1,00	118,70	265,00	0,70	0,80	95,40	119,20	565,50	559,80
<b>C1</b>	2635,60	0,20	1,00	121,40	280,60	0,70	0,80	98,40	122,00	597,30	596,10
<b>C2</b>	2684,10	0,20	1,00	119,60	273,00	0,70	0,80	96,60	120,10	578,80	550,50
<b>C12</b>	2061,10	0,20	1,00	82,20	236,40	0,60	0,80	69,20	82,20	427,50	421,80
<b>C17</b>	2107,00	0,20	1,00	81,10	226,20	0,60	0,80	67,90	81,10	425,80	417,00
<b>C18</b>	2101,70	0,20	1,00	81,60	230,70	0,60	0,80	68,50	81,60	427,10	420,90
<b>C5</b>	6671,20	0,10	1,00	133,90	777,00	0,40	0,90	123,20	133,90	266,10	263,60
<b>C6</b>	6564,40	0,10	1,00	134,00	772,30	0,40	0,90	123,20	134,00	268,30	266,20
<b>C7</b>	6606,80	0,10	1,00	133,80	771,50	0,40	0,90	123,00	133,80	266,40	264,30
<b>C11</b>	5163,60	0,10	1,00	83,00	650,50	0,40	0,90	78,30	83,00	215,00	211,10
<b>C13</b>	5206,50	0,10	1,00	82,90	649,10	0,40	0,90	78,10	82,90	209,70	213,90
<b>C10</b>	5067,50	0,10	1,00	84,10	655,80	0,40	0,90	79,30	84,10	223,50	222,60

Los valores de la resistencia calculados y presentados en las siguientes tablas son calculados mediante los valores del módulo de elasticidad y de la tensión de fluencia obtenidos de experimentalmente por los ensayos de tracción.

- Datos experimentales para espesor  $t = 1,5$  [mm]  $\left\{ \begin{array}{l} E = 186,11 \text{ GPa} \\ f_y = 232,33 \text{ MPa} \end{array} \right.$

- Datos experimentales para espesor  $t = 2,0$  [mm]  $\left\{ \begin{array}{l} E = 179,94 \text{ GPa} \\ f_y = 239,64 \text{ MPa} \end{array} \right.$

Tabla 8- Medidas efectivas del perfil C

Perfil	$A_{bruta}$	$h_{eff}$	$b_{eff1}$	$b_{eff2}$	$c_{eff1}$	$c_{eff2}$	$A_{eff}$	$I_y$	$I_{effy}$	$I_z$	$I_{effz}$
C3	450,05	83,06	47,2	46,6	18,7	18,4	423,6	0,693	0,692	0,163	0,154
C8	450,25	82,98	47	47,1	18,8	18,4	424,3	0,69	0,689	0,164	0,155
C9	447,68	82,92	46,3	46,9	18,5	18,5	422	0,682	0,681	0,16	0,152
C14	347,95	68,69	49,20	49,20	18,65	18,85	295,73	0,57	0,55	0,14	0,12
C15	348,39	68,71	49,20	49,30	18,75	18,85	296,05	0,57	0,55	0,14	0,12
C16	348,10	68,74	49,80	48,30	18,75	18,85	295,69	0,57	0,55	0,14	0,12
C4	548,10	92,90	47,40	46,80	17,50	17,10	432,60	1,90	1,80	0,20	0,20
C1	551,20	92,70	47,60	47,70	18,00	18,80	440,20	1,80	1,80	0,20	0,20
C2	551,20	92,90	47,30	47,70	18,00	17,30	435,70	1,90	1,80	0,20	0,20
C12	423,00	73,90	50,00	49,90	19,40	19,10	301,50	1,40	1,30	0,20	0,10
C17	422,20	74,00	48,90	49,40	18,90	18,60	297,70	1,50	1,30	0,20	0,10
C18	423,30	74,00	49,60	49,30	19,30	18,90	299,50	1,50	1,30	0,20	0,10
C5	746,10	97,60	72,30	71,70	17,30	17,60	489,70	4,60	3,90	0,50	0,40
C6	743,10	97,50	72,00	71,70	17,60	17,40	489,80	4,60	3,90	0,50	0,40
C7	744,70	97,50	72,40	71,70	17,50	17,30	489,40	4,60	3,90	0,50	0,40
C11	571,10	76,60	63,40	63,40	19,60	19,30	316,00	3,60	2,70	0,50	0,30
C13	571,90	76,60	63,40	63,40	19,10	19,60	315,50	3,60	2,70	0,50	0,30
C10	570,40	76,50	63,30	63,40	20,30	20,30	319,90	3,50	2,60	0,50	0,30

Tabla 9-- Valores de los Estados Límite del perfil C

Perfil	$N_{Cr,y}$	$\lambda_y$	$X_y$	$N_{b,Rd,y}$	$N_{Cr,z}$	$\lambda_z$	$X_z$	$N_{b,Rd,z}$	$N_{c,Rd}$	$\sigma_{cr1}$	$\sigma_{cr2}$
C3	854,47	0,34	0,95	96,19	200,62	0,71	0,78	78,91	101,52	613,47	612,20
C8	850,30	0,35	0,95	96,29	202,02	0,71	0,78	79,14	101,67	619,20	605,09
C9	840,74	0,35	0,95	95,73	197,16	0,72	0,77	78,32	101,12	622,68	614,25
C14	727,24	0,31	0,96	66,05	175,20	0,63	0,82	56,59	68,71	438,18	442,77
C15	729,57	0,31	0,96	66,13	175,85	0,63	0,82	56,68	68,78	439,98	441,31
C16	731,19	0,31	0,96	66,07	174,46	0,63	0,82	56,54	68,70	434,60	451,41
C4	2282,50	0,20	1,00	103,20	227,10	0,70	0,80	82,70	103,70	484,50	479,70
C1	2252,30	0,20	1,00	104,90	238,30	0,70	0,80	84,70	105,50	491,90	512,30
C2	2298,60	0,20	1,00	103,90	233,40	0,70	0,80	83,60	104,40	496,20	472,90
C12	1826,70	0,20	1,00	70,00	209,50	0,60	0,80	59,40	70,00	378,80	373,80
C17	1867,40	0,20	1,00	69,20	200,50	0,60	0,80	58,30	69,20	377,40	369,60
C18	1862,70	0,20	1,00	69,60	204,40	0,60	0,80	58,80	69,60	378,50	373,00
C5	5716,30	0,10	1,00	117,30	665,70	0,40	0,90	107,70	117,30	228,00	225,90

<b>C6</b>	5624,80	0,10	1,00	117,40	661,80	0,40	0,90	107,70	117,40	229,90	228,10
<b>C7</b>	5670,40	0,10	1,00	117,30	665,50	0,40	0,90	107,70	117,30	226,60	226,20
<b>C11</b>	4576,40	0,10	1,00	73,40	576,50	0,40	0,90	69,20	73,40	188,30	184,80
<b>C13</b>	4614,40	0,10	1,00	73,30	575,30	0,40	0,90	69,10	73,30	183,60	187,30
<b>C10</b>	4491,20	0,10	1,00	74,30	581,20	0,40	0,90	70,00	74,30	195,80	195,00

#### 4.1.2 Elementos de Sección Z:

Las medidas de los perfiles Z son las siguientes:

**Tabla 10- Medidas geométricas del perfil Z**

Perfil	h	b <sub>1</sub>	b <sub>s</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>s</sub>	t
<b>Z6</b>	166,8	49,4	49,4	19,0	19,0	2,0
<b>Z18</b>	170,0	48,8	48,9	18,8	19,0	2,0
<b>Z2</b>	169,5	49,0	48,7	18,8	19,0	2,0
<b>Z1</b>	173,2	51,8	51,7	23,0	22,9	1,5
<b>Z4</b>	172,7	52,0	51,6	22,7	22,8	1,5
<b>Z5</b>	173,2	51,9	51,7	22,6	22,8	1,5
<b>Z15</b>	198,8	49,0	48,7	18,8	19,0	2,0
<b>Z16</b>	198,0	49,1	49,0	19,4	19,4	2,0
<b>Z17</b>	199,2	49,0	48,8	18,9	19,0	2,0
<b>Z10</b>	201,4	52,0	52,0	23,0	23,2	1,5
<b>Z11</b>	201,1	52,0	51,9	23,2	23,3	1,5
<b>Z12</b>	200,1	52,2	52,2	23,0	23,4	1,5
<b>Z3</b>	218,6	49,1	49,0	19,4	19,4	2,0
<b>Z13</b>	219,3	49,0	49,4	18,7	19,2	2,0
<b>Z14</b>	219,8	49,0	48,8	18,8	19,2	2,0
<b>Z7</b>	223,7	51,5	51,5	22,8	23,1	1,5
<b>Z8</b>	224,5	51,6	51,4	22,7	22,7	1,5
<b>Z9</b>	221,8	52,1	52,2	23,2	23,1	1,5

Se ha calculado las propiedades mecánicas según los datos nominales dados en la hoja técnica, y según los obtenidos en los ensayos.

- Datos nominales  $\left\{ \begin{array}{l} E = 210 \text{ GPa} \\ f_y = 284 \text{ MPa} \end{array} \right.$

Tabla 11-Medidas efectivas del perfil Z

Perfil	$A_{bruta}$	$h_{eff}$	$b_{eff1}$	$b_{eff2}$	$c_{eff1}$	$c_{eff2}$	$A_{eff}$	$I_y$	$I_{effy}$	$I_z$	$I_{effz}$
Z6	585,3	88,3	47,4	47,4	18	18	425,8	2,4	2,3	0,3	0,3
Z18	589	88,6	46,9	46,8	18	17,8	424	2,5	2,4	0,3	0,3
Z2	588,1	88,6	46,7	47	18	17,8	423,9	2,5	2,3	0,3	0,3
Z1	468,6	69	50,2	50,3	22,2	22,2	301,3	2,1	1,9	0,3	0,3
Z4	46,74	6,9	5,01	5,05	2,21	2,19	30,06	0,21	0,18	0,03	0,03
Z5	46,8	6,9	5,02	5,04	2,21	2,19	30,03	0,21	0,19	0,03	0,03
Z15	646,3	90,6	46,8	47	18	17,8	425,1	3,6	3,3	0,3	0,3
Z16	645,9	90,6	47,1	47,1	18	18	426,1	3,6	3,3	0,3	0,3
Z17	647,3	90,6	46,8	47	18	17,9	425,4	3,6	3,3	0,3	0,3
Z10	511,5	70	50,5	50,5	22,4	22,2	301,2	3	2,6	0,3	0,3
Z11	511,3	70	50,4	50,5	22,6	22,4	301,7	3	2,6	0,3	0,3
Z12	510,5	70	50,7	50,7	22,6	22,2	302	3	2,5	0,3	0,3
Z3	688	91,7	47	47,1	18,4	18,4	428,6	4,6	4,1	0,3	0,3
Z13	689,4	91,7	47,4	47	18,8	17,7	428,1	4,6	4,2	0,3	0,3
Z14	688,4	91,7	46,8	47,3	18	17,8	425,7	4,6	4,1	0,3	0,3
Z7	542,6	70,7	50	50	22,4	22,1	298,7	3,8	3,2	0,3	0,3
Z8	543	70,7	49,9	50,1	21,9	21,9	297,7	3,9	3,2	0,3	0,3
Z9	542,3	70,6	50,7	50,6	22,4	22,4	300,7	3,8	3,2	0,3	0,3

Tabla 12- Valores del los Estados Límite del perfil Z

Perfil	$N_{Cr,y}$	$\lambda_y$	$X_y$	$N_{b,Rd,y}$	$N_{Cr,z}$	$\lambda_z$	$X_z$	$N_{b,Rd,z}$	$N_{c,Rd}$	$\sigma_{cr1}$	$\sigma_{cr2}$
Z6	3452,9	0,2	1	120,9	433	0,5	0,9	105,4	120,9	550,9	550,9
Z18	3587,8	0,2	1	120,4	419,5	0,5	0,9	104,5	120,4	555,4	550,4
Z2	3562,7	0,2	1	120,4	419,5	0,5	0,9	104,5	120,4	558,5	548,8
Z1	3008,8	0,2	1	85,6	419,1	0,5	0,9	77,4	85,6	442,5	443,6
Z4	298,64	0,02	0,1	8,54	41,8	0,05	0,09	7,72	8,54	44,24	43,71
Z5	300,61	0,02	0,1	8,53	41,74	0,05	0,09	7,72	8,53	44,12	43,56
Z15	5217,6	0,2	1	120,7	420,6	0,5	0,9	104,8	120,7	519,2	511,4

Z16	5181,9	0,2	1	121	426,3	0,5	0,9	105,2	121	515,6	515,6
Z17	5244,7	0,2	1	120,8	421,3	0,5	0,9	104,9	120,8	518,6	513,6
Z10	4321,8	0,1	1	85,5	425,8	0,4	0,9	77,5	85,5	416,1	412,5
Z11	4308,1	0,1	1	85,7	426,4	0,4	0,9	77,7	85,7	418,6	416,1
Z12	4266,5	0,1	1	85,8	431	0,4	0,9	77,8	85,8	418,3	411,1
Z3	6591,7	0,1	1	121,7	430,3	0,5	0,9	105,9	121,7	503,8	502,7
Z13	6646,1	0,1	1	121,6	431,8	0,5	0,9	105,8	121,6	509,6	483,9
Z14	6656,1	0,1	1	120,9	424	0,5	0,9	105	120,9	495,7	485,2
Z7	5526,6	0,1	1	84,8	414,1	0,5	0,9	76,7	84,8	401,3	396,1
Z8	5565,7	0,1	1	84,5	411,4	0,5	0,9	76,5	84,5	395,2	393,7
Z9	5454,5	0,1	1	85,4	429,5	0,4	0,9	77,5	85,4	394,9	397,3

- Datos experimentales para espesor  $t = 1,5$  [mm]  $\left\{ \begin{array}{l} E = 186,11 \text{ GPa} \\ f_y = 232,33 \text{ MPa} \end{array} \right.$

- Datos experimentales para espesor  $t = 2,0$  [mm]  $\left\{ \begin{array}{l} E = 179,94 \text{ GPa} \\ f_y = 239,64 \text{ MPa} \end{array} \right.$

Tabla 13- Medidas efectivas del perfil Z

Perfil	$A_{bruta}$	$h_{eff}$	$b_{eff1}$	$b_{eff2}$	$c_{eff1}$	$c_{eff2}$	$A_{eff}$	$I_y$	$I_{effy}$	$I_z$	$I_{effz}$
Z1	468,6	75,4	50,2	50,3	22,2	22,2	314	2,1	1,9	0,3	0,3
Z4	467,4	75,4	50,1	50,5	22,1	21,9	313,2	2,1	1,9	0,3	0,3
Z5	468	75,4	50,2	50,4	22,1	21,9	313	2,1	1,9	0,3	0,3
Z6	585,3	94,8	47,4	47,4	18	18	439,3	2,4	2,3	0,3	0,3
Z18	589	95,1	46,9	46,8	18	17,8	437,5	2,5	2,4	0,3	0,3
Z2	588,1	95,1	46,7	47	18	17,8	437,5	2,5	2,4	0,3	0,3
Z10	511,5	76,7	50,5	50,5	22,4	22,2	314,3	3	2,6	0,3	0,3
Z11	511,3	76,7	50,4	50,5	22,6	22,4	314,8	3	2,6	0,3	0,3
Z12	510,5	76,6	50,7	50,7	22,6	22,2	315,1	3	2,6	0,3	0,3
Z15	646,3	97,5	46,8	47	18	17,8	439,4	3,6	3,4	0,3	0,3
Z16	645,9	97,4	47,1	47,1	18	18	440,5	3,6	3,4	0,3	0,3
Z17	647,3	97,5	46,8	47	18	17,9	439,7	3,6	3,3	0,3	0,3
Z7	542,6	77,5	50	50	22,4	22,1	312,1	3,8	3,3	0,3	0,3
Z8	543	77,5	49,9	50,1	21,9	21,9	311,1	3,9	3,3	0,3	0,3
Z9	542,3	77,4	50,7	50,6	22,4	22,4	314,1	3,8	3,2	0,3	0,3
Z3	688,1	98,8	47	47,1	18,4	18,4	443,3	4,6	4,2	0,3	0,3

<b>Z13</b>	688,2	98,8	47,4	47	18,2	17,7	441,1	4,6	4,2	0,3	0,3
<b>Z14</b>	688,4	98,8	46,8	47,3	18	17,8	440,4	4,6	4,2	0,3	0,3

Tabla 14- Valores de los Estados Límite del perfil Z

Perfil	$N_{Cr,y}$	$\lambda_y$	$X_y$	$N_{b,Rd,y}$	$N_{Cr,z}$	$\lambda_z$	$X_z$	$N_{b,Rd,z}$	$N_{c,Rd}$	$\sigma_{cr1}$	$\sigma_{cr2}$
<b>Z1</b>	2666,6	0,2	1	72,9	371,4	0,4	0,9	66,3	72,9	392,2	393,1
<b>Z4</b>	2646,8	0,2	1	72,8	370,4	0,4	0,9	66,1	72,8	392,1	387,4
<b>Z5</b>	2664,2	0,2	1	72,7	369,9	0,4	0,9	66,1	72,7	391	386,1
<b>Z6</b>	2958,6	0,2	1	105,3	371	0,5	0,9	91,5	105,3	472,1	472,1
<b>Z18</b>	3074,2	0,2	1	104,8	359,4	0,5	0,9	90,8	104,8	475,9	471,6
<b>Z2</b>	30527	0,2	1	104,8	359,4	0,5	0,9	104,3	104,8	478,5	470,3
<b>Z10</b>	3830,3	0,1	1	73	377,4	0,4	0,9	66,4	73	368,8	365,6
<b>Z11</b>	3818,2	0,1	1	73,1	377,9	0,4	0,9	66,6	73,1	371	368,8
<b>Z12</b>	3781,3	0,1	1	73,2	382	0,4	0,9	66,7	73,2	370,7	364,4
<b>Z15</b>	4470,8	0,2	1	105,3	360,4	0,5	0,9	91,2	105,3	444,9	438,2
<b>Z16</b>	4440,2	0,2	1	105,6	365,3	0,5	0,9	91,5	105,6	441,8	441,8
<b>Z17</b>	4494	0,2	1	105,4	361	0,5	0,9	91,2	105,4	444,3	440,1
<b>Z7</b>	4898,1	0,1	1	72,5	367	0,4	0,9	65,8	72,5	355,7	351,1
<b>Z8</b>	4932,7	0,1	1	72,3	364,6	0,4	0,9	65,6	72,3	350,3	348,9
<b>Z9</b>	4834,2	0,1	1	73	380,6	0,4	0,9	66,5	73	350	352,1
<b>Z3</b>	5648,1	0,1	1	106,2	368,7	0,5	0,9	92,2	106,2	431,7	430,8
<b>Z13</b>	5682,7	0,1	1	105,7	366,7	0,5	0,9	91,7	105,7	423,9	415,7
<b>Z14</b>	5703,3	0,1	1	105,5	363,3	0,5	0,9	91,5	105,5	424,8	415,8

## 4.2 Caracterización de las propiedades mecánicas

Las probetas pueden tener sección circular, rectangular, cuadrada, o otras, dependiendo de la forma y el tamaño del producto del cual fueran a ser retirados. Generalmente la gran mayoría son obtenidos por mecanizado. Algunos productos como perfiles, barras, cables o productos obtenidos por fundición (aleaciones no ferrosas o hierros fundidos), pueden ser ensayados sin preparación.

### 4.2.1 Dimensiones de las probetas

Para realizar el cálculo de las dimensiones de las probetas voy a seguir la Norma NP EN 10002-1 2006.

Dicha Norma Europea especifica el método de ensayo de tracción para materiales metálicos y define las características mecánicas que pueden ser determinadas a temperatura ambiente.

Las dimensiones de las probetas dependerán de las dimensiones del perfil metálico de donde esas probetas son retirados.

Los símbolos y designaciones a utilizar son las siguientes:

D: diámetro exterior

Lo: longitud inicial entre referencias

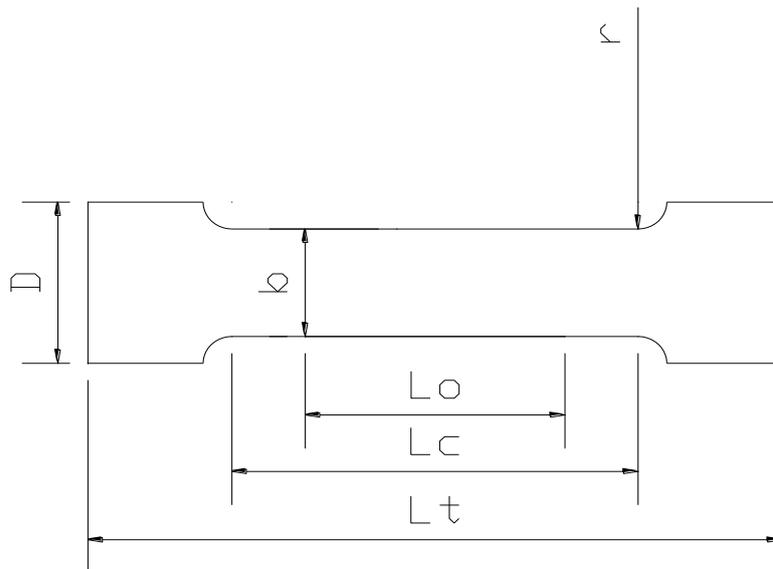
Lc: longitud de zona útil

Lt: longitud final

b : anchura de la zona útil de una probeta plana

So: área de la sección inicial de la zona útil

r : radio



**Figura 32- Dimensiones de la probeta**

Para realizar las dimensiones se ha escogido el Anexo B (pag 35) debido a que se utiliza en probetas finas, chapas, bandas o productos planos con espesor entre 0.1mm y 3mm.

Forma de la probeta:

En caso de que la anchura sea igual o inferior a 20 mm la anchura de la probeta “b” será la misma que la del diámetro exterior “D”. Por lo que  $D=b$ .

Dimensiones de la probeta:

La longitud de la zona útil deberá ser  $L_t \leq L_o + b/2$  , pero lo utilizado siempre debe ser  $L_o + 2b$  excepto cuando no hay material suficiente.

Para este caso con probetas de lados paralelos con  $b > 20$  mm la longitud inicial entre referencias  $L_o = 50$  mm

**Tabla 15– Dimensiones de las probetas.**

Tipo de probeta	b	Lo	Lc	Longitud entre garras
1	$12,5 \pm 1$	50	75	87,5
2	$20 \pm 1$	80	120	140

El tipo de probeta elegida es la 1 porque  $b > 20$  mm para dimensionar la probeta con los lados paralelos. La longitud final  $L_t$  será la longitud entre garras ( 87,5 mm) mas una longitud para fijar el elemento entre las garras de la máquina. Por lo que la longitud final  $L_t=130$  .

#### **4.2.2 Proceso de extracción de las probetas:**

Para realizar proceso de extracción de las probetas se ha elegido 8 perfiles con diferente espesor y forma en donde se han realizado los siguientes pasos:

- 1.- Marcar la medida por donde se va a cortar el perfil.
- 2.- Cortar el perfil con la sierra a lo largo de la sección longitudinal por la zona de los cantos y obteniendo las chapas “b”, “h” y las probetas de los cantos.
- 3.- Introducimos las chapas “b” y “h” en la guillotina y obtenemos por las probetas pb y ph.

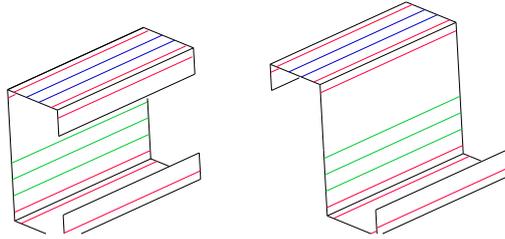


Figura 33 – Localización de extracción de las probetas

### 4.2.3 Elementos de sección C

Las probetas ensayadas de espesor 1,5 son C14 y C10, con las siguientes dimensiones:

Tabla 16- Dimensiones de las probetas C14 y C10

Probeta	$L_t$ [mm]	$L_c$ [mm]	$L_o$ [mm]	$L_b$ [mm]	$t_{nom}$ [mm]	$t_{acero}$ [mm]	$A_o$ [mm <sup>2</sup> ]
C14Ph1	131	75	50	12,5	1,51	1,49	18,625
C14Ph2	130,9	75	50	12,6	1,505	1,485	18,711
C14Ph3	130,95	75	50	12,6	1,505	1,485	18,711
C14Pb2	131	75	50	12,8	1,51	1,49	19,072
C14Pb3	131	75	50	12,7	1,51	1,49	18,923
C10pb2	129,9	75	50	13	1,51	1,49	19,37
C10pb3	129,9	75	50	13	1,51	1,49	19,37
C10pb4	130	75	50	13	1,51	1,49	19,37
C10pb7	131	75	50	13	1,51	1,49	19,37
C10pb8	130,5	75	50	13	1,51	1,49	19,37
C10ph4	131,5	75	50	12,9	1,51	1,49	19,221
C10ph6	130,7	75	50	12,9	1,51	1,49	19,221
C10ph7	131,3	75	50	12,9	1,51	1,49	19,221
C10ph8	131,5	75	50	12,9	1,51	1,49	19,221

Con los siguientes resultados:

Tabla 17-Resultados de las probetas C14 y C10

Probeta	$L_{libre}$ [mm]	$L_o$ [mm]	$A_o$ [mm <sup>2</sup> ]	E [GPa]	$F_m$ [kN]	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$R_{eH}$ [MPa]	$R_{eL}$ [MPa]	$A_t$ [%]
C14Ph1	87,5	50	18,625	173,092	4,9664	181,611	266,652	181,901	181,901	43,386

<b>C14Ph2</b>	87,5	50	18,711	228,894	5,1597	192,256	275,758	192,256	191,679	45,42
<b>C14Ph3</b>	87,5	50	18,711	181,169	5,3154	202,01	284,079	202,01	201,721	45,736
<b>C14Pb2</b>	87,5	50	19,072	148,073	5,4335	205,222	284,894	205,222	203,534	47,346
<b>C14Pb3</b>	87,5	50	18,923	168,94	5,5086	210,812	291,106	210,812	210,812	42,794
			<b>Média</b>	<b>180,034</b>	<b>5,27672</b>	<b>198,382</b>	<b>280,498</b>	<b>198,44</b>	<b>197,929</b>	<b>44,9364</b>
<b>C10pb2</b>	87,5	50	19,37	198,512	5,7395	219,53	296,309	219,53	217,868	30,912
<b>C10pb3</b>	87,5	50	19,37	198,512	5,7395	219,53	296,309	219,53	217,868	30,912
<b>C10pb4</b>	87,5	50	19,37	214,681	6,0133	231,724	310,444	232,003	230,893	31,396
<b>C10pb7</b>	87,5	50	19,37	188,918	5,4066	193,196	279,122	193,474	193,196	31,382
<b>C10pb8</b>	87,5	50	19,37	175,239	5,455	196,247	281,621	196,247	195,968	31,972
<b>C10ph4</b>	87,5	50	19,221	187,105	6,169	243,577	320,951	244,139	242,459	31,57
<b>C10ph6</b>	87,5	50	19,221	166,237	5,6697	216,482	294,974	217,044	215,644	29,798
<b>C10ph7</b>	87,5	50	19,221	176,366	6,6039	270,954	343,577	272,348	270,673	29,02
<b>C10ph8</b>	87,5	50	19,221	182,816	6,2442	248,884	324,863	249,165	248,046	31,892
			<b>Media</b>	<b>187,598</b>	<b>5,89341</b>	<b>226,68</b>	<b>305,352</b>	<b>227,053</b>	<b>225,846</b>	<b>30,9838</b>

Los Figura 34 y Figura 35 muestran la relación entre la tensión y la deformación de los ensayos realizados con las probetas de C10 y de C14

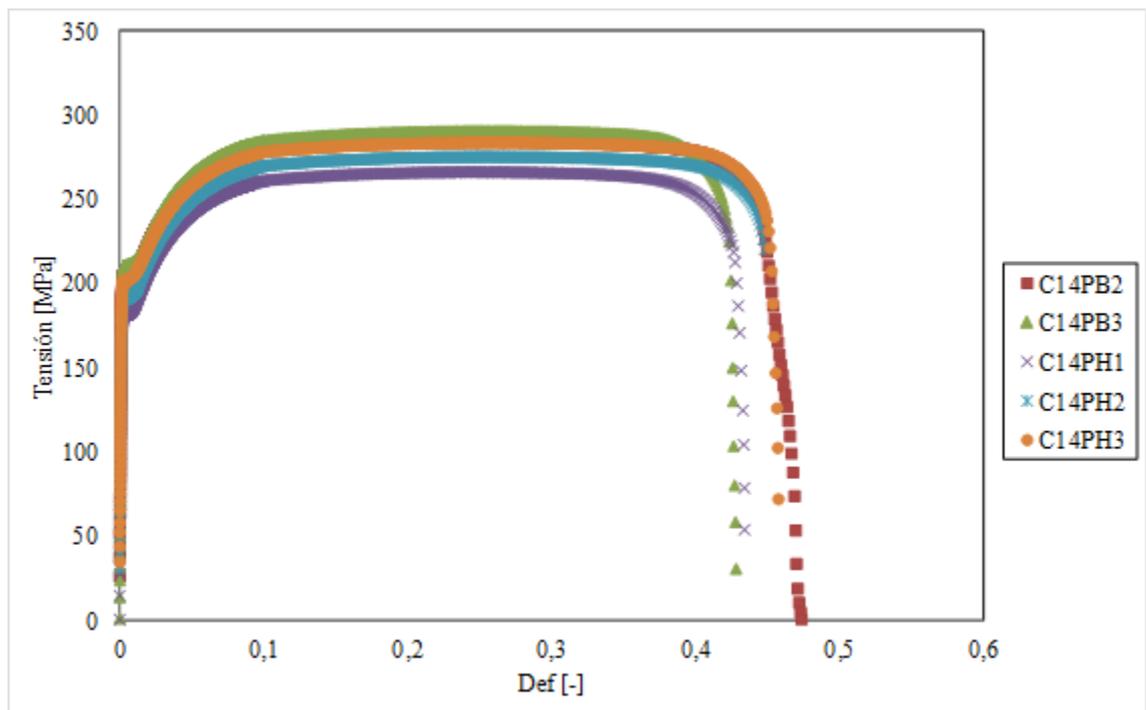


Figura 34 – Relación tensión-deformación de las probetas C14

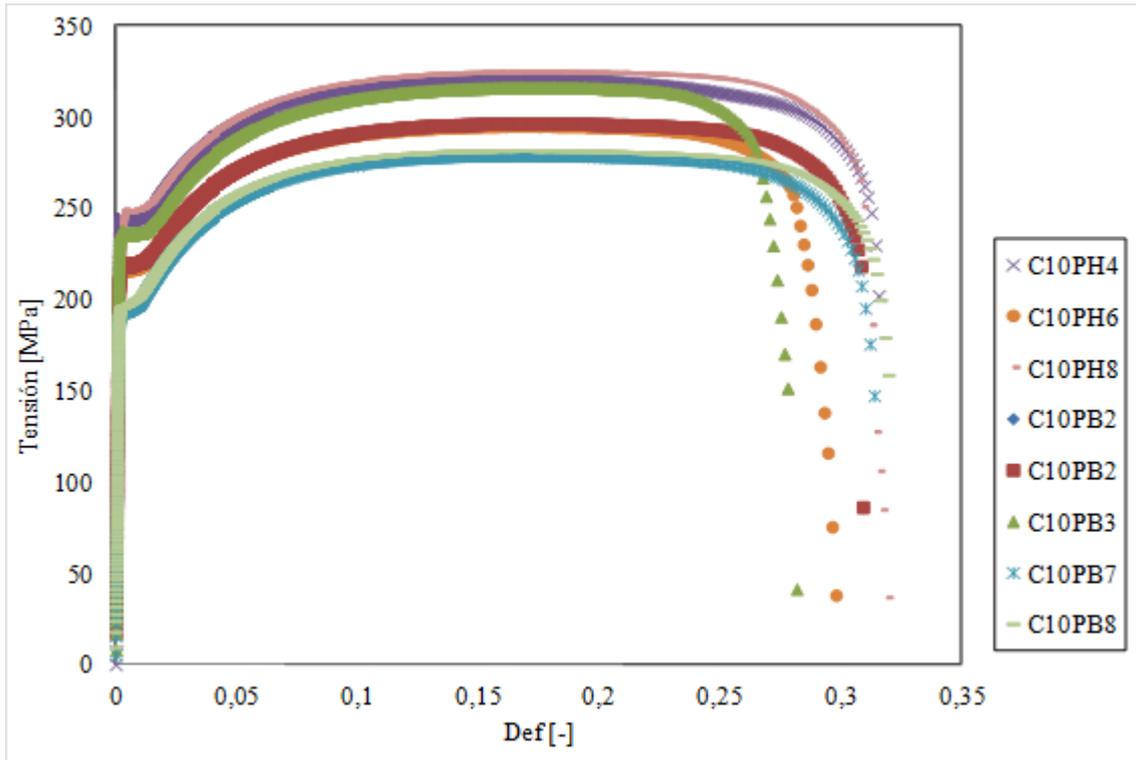


Figura 35 – Relación tensión-deformación de las probetas C10

Para las probetas ensayadas de espesor 2 son C3 y C5, tienen las siguientes dimensiones:

Tabla 18- Dimensiones de las probetas C3 y C5

Probetas	$L_t$ [mm]	$L_c$ [mm]	$L_o$ [mm]	$L_b$ [mm]	$t_{nom}$ [mm]	$t_{acero}$ [mm]	$A_o$ [mm <sup>2</sup> ]
C3Ph1	127,3	75	50	12	2,03	2,01	24,120
C3Ph2	127,5	75	50	12,2	2,03	2,01	24,522
C3Ph3	127,2	75	50	12	2,05	2,03	24,360
C3Pb1	124,2	75	50	12,7	2,02	2	25,400
C3Pb2	124	75	50	12,55	2,03	2,01	25,226
C5Pb4	130	75	50	12,7	2,03	2,01	25,527
C5Pb6	131,4	75	50	12,7	2,03	2,01	25,527
C5Ph1	131,6	75	50	12,7	2,03	2,01	25,527
C5Ph2	131,1	75	50	12,7	2,03	2,01	25,527
C5Ph4	131,8	75	50	12,7	2,03	2,01	25,527
C5Ph6	131,7	75	50	12,7	2,03	2,01	25,527
C5Ph7	131,6	75	50	12,7	2,03	2,01	25,527

Con los siguientes resultados:

Tabla 19-Resultados de C3 y C5

Probeta	$L_{libre}$ [mm]	$L_0$ [mm]	$A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	E [GPa]	$F_m$ [kN]	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$R_{eH}$ [MPa]	$R_{eL}$ [MPa]	$A_t$ [%]
C3Ph1	87,5	50	24,12	248,041	7,6133	239,071	315,643	255,09	255,09	33,058
C3Ph2	87,5	50	24,522	172,72	7,318	218,5	298,42	220,91	220,69	50,012
C3Ph3	87,5	50	24,36	266	8,2308	263,826	337,882	277,04	276,82	32,634
C3Pb1	87,5	50	25,4	163,419	8,059	242,24	317,283	242,24	242,031	39,648
C3Pb2	87,5	50	25,226	184,35	7,6	226,7	301,38	227,1	225,4	52,044
			Média	206,906	7,76422	238,067	314,122	244,476	244,006	41,4792
C5Pb4	87,5	50	25,527	197,768	8,8589	268,167	347,04	268,59	267,329	37,918
C5Pb6	87,5	50	25,527	157,064	8,059	237,881	315,705	238,301	237,67	37,274
C5Ph1	87,5	50	25,527	194,8	8,671	262,702	339,68	263,333	249,869	35,356
C5Ph2	87,5	50	25,527	152,584	7,812	229,467	306,029	229,678	228,629	37,194
C5Ph4	87,5	50	25,527	172,438	8,4455	255,13	330,846	255,549	253,657	36,442
C5Ph6	87,5	50	25,527	165,212	8,5798	259,968	336,107	260,176	258,914	37,436
C5Ph7	87,5	50	25,527	193,511	8,3918	252,603	328,742	252,815	252,184	34,376
			Média	176,197	8,40257	252,274	329,164	252,634	249,75	36,5709

Los Figura 36 y Figura 37 muestran la relación entre la tensión y la deformación de los ensayos realizados con las probetas de C3 y de C5

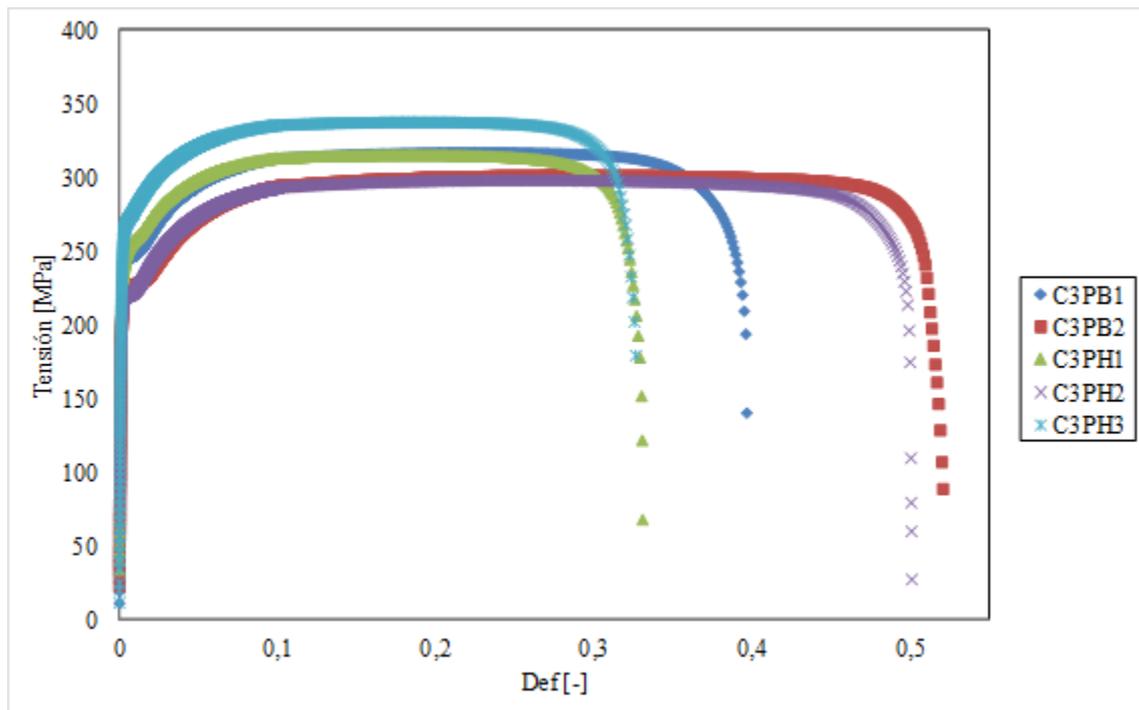


Figura 36 – Relación tensión-deformación de las probetas de C3

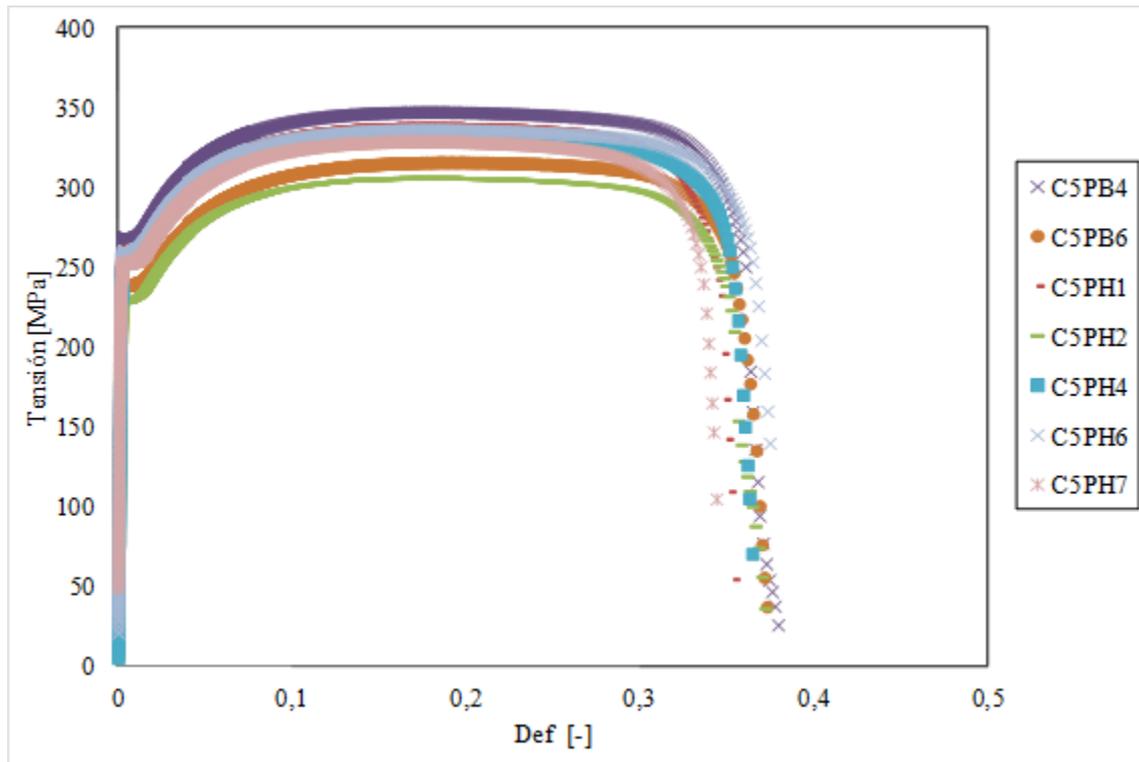


Figura 37 – Relación tensión deformación de las probetas de C5

#### 4.2.4 Elementos de Sección Z

Las probetas ensayadas de espesor 1,5 son Z1 y Z7, tienen las siguientes dimensiones:

Tabla 20- Dimensiones de las probetas de Z1 y Z7

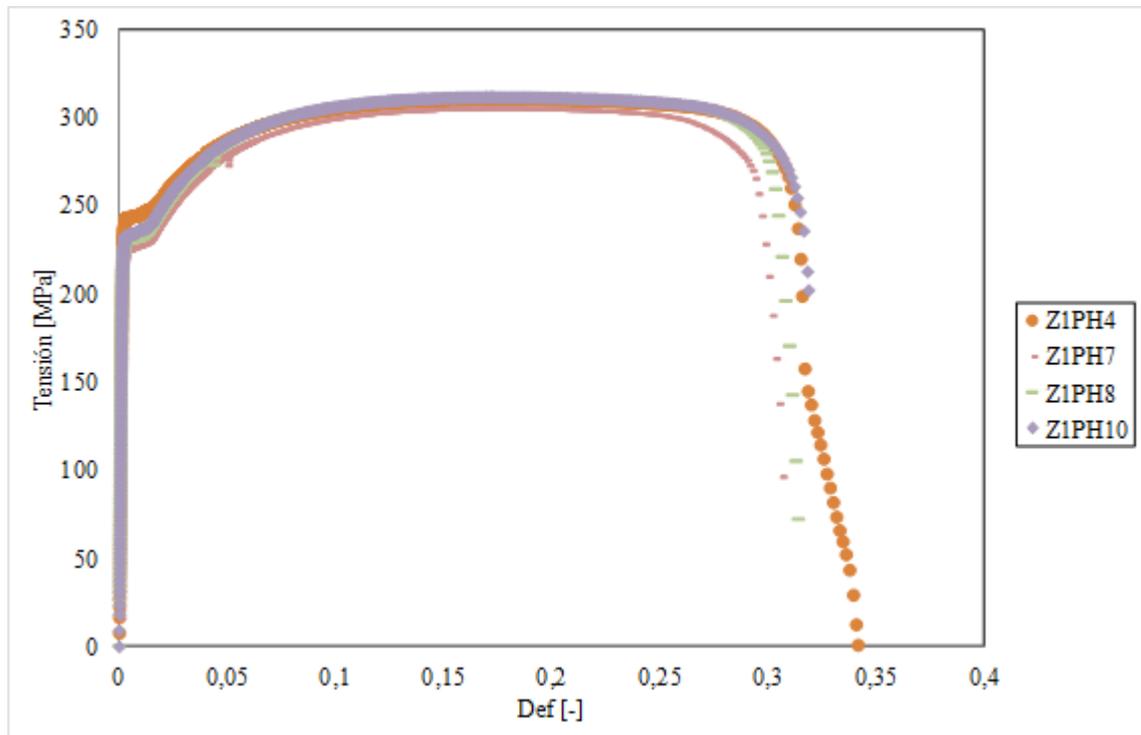
Probeta	$L_t$ [mm]	$L_c$ [mm]	$L_o$ [mm]	$L_b$ [mm]	$t_{nom}$ [mm]	$t_{acero}$ [mm]	$A_o$ [mm <sup>2</sup> ]
Z1Pb2	130,3	75	50	12,6	1,51	1,49	18,774
Z1Ph4	130,3	75	50	12,7	1,51	1,49	18,923
Z1Ph6	130,2	75	50	12,7	1,51	1,49	18,923
Z1Ph7	130,6	75	50	12,7	1,51	1,49	18,923
Z1Ph8	130,7	75	50	12,7	1,51	1,49	18,923
Z1Ph10	130,5	75	50	12,7	1,51	1,49	18,923
Z7Pb2	130,2	75	50	12,7	1,5	1,48	18,796
Z7Ph1	131,2	75	50	12,7	1,5	1,48	18,796
Z7Ph5	131,6	75	50	12,7	1,5	1,48	18,796
Z7Ph7	131,2	75	50	12,7	1,5	1,48	18,796
Z7Ph8	131,4	75	50	12,7	1,5	1,48	18,796
Z7Ph13	131,1	75	50	12,7	1,5	1,48	18,796

Con los siguientes resultados:

**Tabla 21- Resultados de las probetas de Z1 y Z7**

Probeta	$L_{libre}$ [mm]	$L_0$ [mm]	$A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	E [GPa]	$F_m$ [kN]	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$R_{eH}$ [MPa]	$R_{eL}$ [MPa]	$A_t$ [%]
Z1Ph4	87,5	50	18,923	181,23	5,8738	242,87	310,405	242,67	242,02	31,58
Z1Ph6	87,5	50	18,923	152,545	5,9006	266,142	311,822	271,247	271,247	31,034
Z1Ph7	87,5	50	18,923	180,993	5,7717	225,852	305,01	226,132	225,001	30,59
Z1Ph8	87,5	50	18,923	194,691	5,8738	229,541	310,405	229,821	229,255	31,396
Z1Ph10	87,5	50	18,923	160,964	5,8952	232,379	311,536	232,659	232,093	31,878
			Média	174,085	5,86302	239,357	309,836	240,506	239,923	31,2956
Z7Pb2	87,5	50	18,796	209,458	6,3784	250,798	339,349	252,229	252,229	29,932
Z7Ph1	87,5	50	18,796	223,53	6,5288	271,936	347,351	272,223	269,94	31,772
Z7Ph5	87,5	50	18,796	187,12	62,174	249,372	330,783	249,942	249,66	32,2
Z7Ph7	87,5	50	18,796	190,634	6,58	272,797	346,776	273,337	273,337	32,872
Z7Ph8	87,5	50	18,796	190,634	6,58	272,797	346,776	273,337	273,337	32,872
Z7Ph13	87,5	50	18,796	201,747	6,0348	247,372	321,068	247,372	244,802	31,234
			Média	200,521	15,7127	260,845	338,684	261,406	260,551	31,8137

Los Figura 38 y Figura 39 muestran la relación entre la tensión y la deformación de los ensayos realizados con las probetas de Z1 y de Z7



**Figura 38 – Relación tensión-deformación Z1**

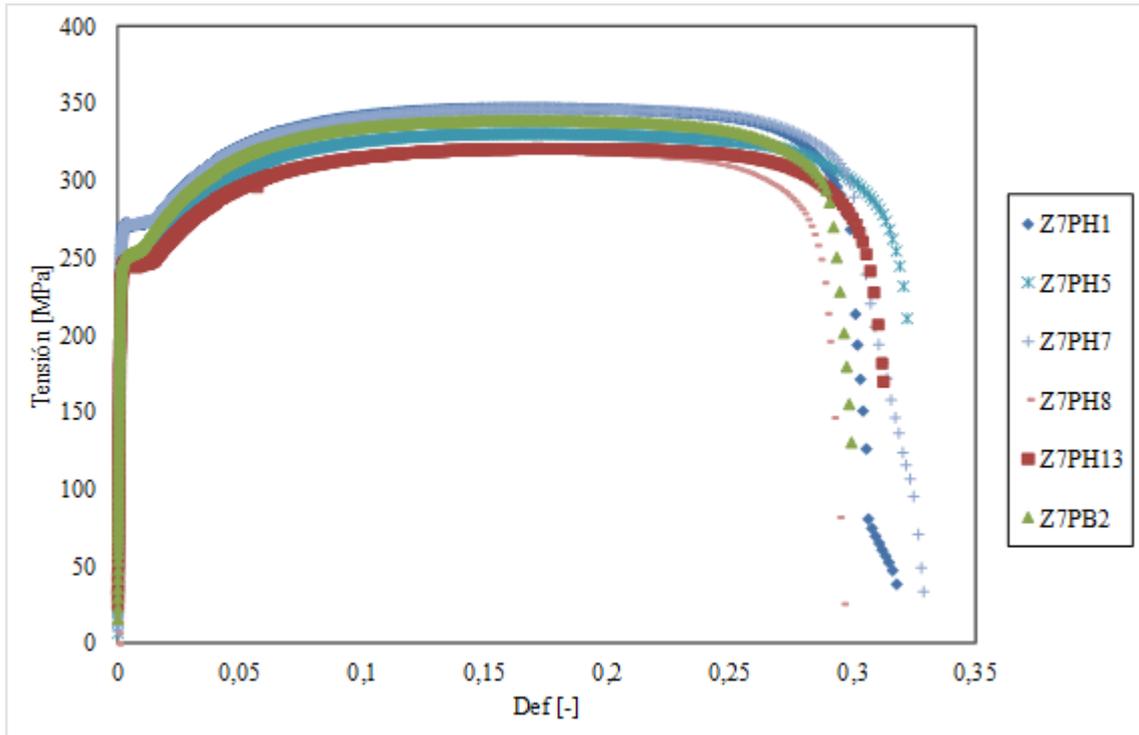


Figura 39 – Relación tensión-deformación de Z7

Las probetas ensayadas de espesor 2,0 son Z3 y Z6, tienen las siguientes dimensiones:

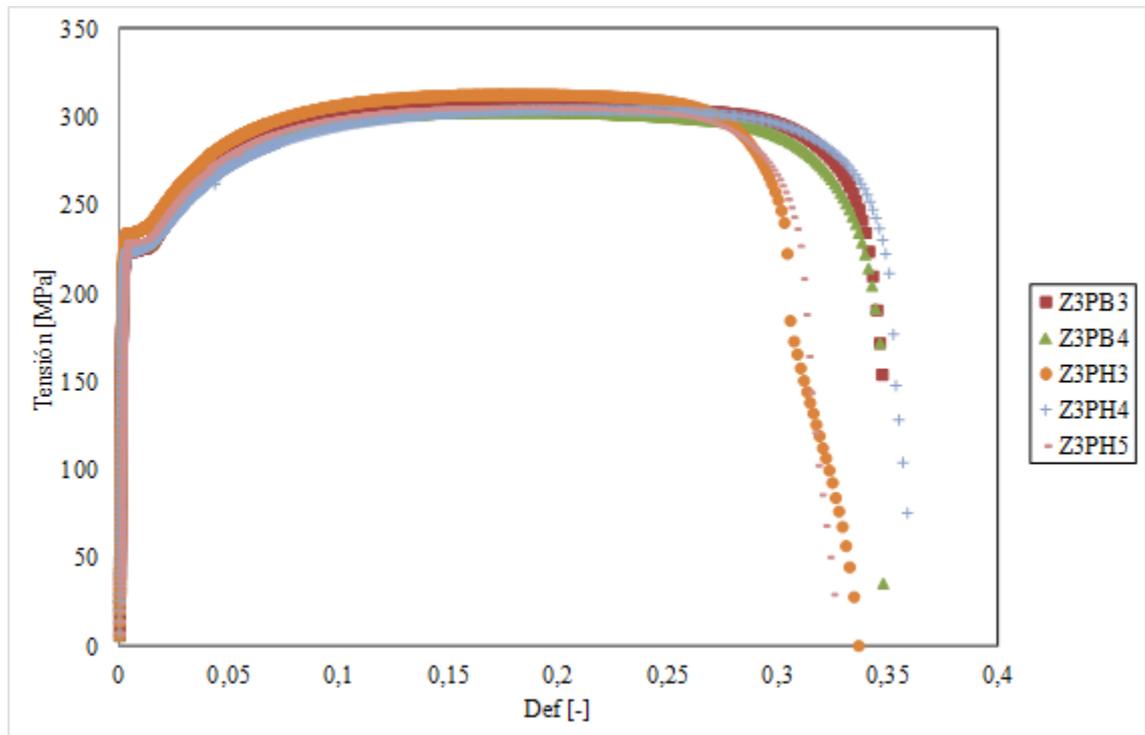
Tabla 22- Dimensiones de las probetas

Probeta	$L_t$ [mm]	$L_c$ [mm]	$L_o$ [mm]	$L_b$ [mm]	$t_{nom}$ [mm]	$t_{acero}$ [mm]	$A_o$ [mm <sup>2</sup> ]
Z3Pb3	130,4	75	50	12,7	2	1,98	25,146
Z3Pb4	130,5	75	50	12,7	2	1,98	25,146
Z3Ph3	131,9	75	50	13	2	1,98	25,74
Z3Ph4	132	75	50	13	2	1,98	25,74
Z3Ph5	131,3	75	50	13	2	1,98	25,74
Z6Pb1	130,2	75	50	12,7	2,01	1,99	25,273
Z6Pb2	130,4	75	50	12,7	2,01	1,99	25,273
Z6Pb4	130,7	75	50	12,7	2,01	1,99	25,273
Z6Ph1	130,3	75	50	12,7	2,01	1,99	25,273
Z6Ph2	131,1	75	50	12,7	2,01	1,99	25,273
Z6Ph3	131,1	75	50	12,7	2,01	1,99	25,273
Z6Ph4	130,5	75	50	12,7	2,01	1,99	25,273
Z6Ph5	130,5	75	50	12,7	2,01	1,99	25,273

Con los siguientes resultados:

**Tabla 23- Resultados de las probetas**

Probeta	$L_{libre}$ [mm]	$L_0$ [mm]	$A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	E [GPa]	$F_m$ [kN]	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$R_{eH}$ [MPa]	$R_{eL}$ [MPa]	$A_t$ [%]
Z3Pb3	87,5	50	25,146	173,541	7,7046	225,046	306,395	225,26	224,405	34,738
Z3Pb4	87,5	50	25,146	154,521	7,6241	227,392	303,193	227,392	225,901	34,778
Z3Ph3	87,5	50	25,74	163,02	7,871	228,82	305,789	229,029	227,988	31,87
Z3Ph4	87,5	50	25,74	139,629	7,6509	219,433	297,238	220,062	219,227	35,878
Z3Ph5	87,5	50	25,74	151,396	7,6885	224,65	298,699	224,65	222,774	32,456
			Media	156,422	7,70782	225,068	302,263	225,279	224,059	33,944
Z6Pb1	87,5	50	25,273	194,31	8,1502	241,76	322,486	242,183	240,059	34,43
Z6Pb2	87,5	50	25,273	203,317	7,5543	222,004	298,908	222,213	220,726	34,644
Z6Pb4	87,5	50	25,273	190,8	7,9462	234,96	314,415	234,96	233,26	28,71
Z6Ph1	87,5	50	25,273	180,35	8,1126	238,99	320,99	239,212	237,087	32,75
Z6Ph2	87,5	50	25,273	169,428	7,9731	241,123	315,479	241,546	239,849	36,12
Z6Ph3	87,5	50	25,273	155,719	7,6831	228,801	304,004	229,011	227,737	33,718
Z6Ph4	87,5	50	25,273	183,105	8,0106	242,611	316,963	242,82	240,909	35,368
Z6Ph5	87,5	50	25,273	171,528	7,4898	221,79	296,356	222,004	220,726	35,222
			Media	181,07	7,86499	234,005	311,2	234,244	232,544	33,8703



**Figura 40 – Relación tensión deformación de Z3**

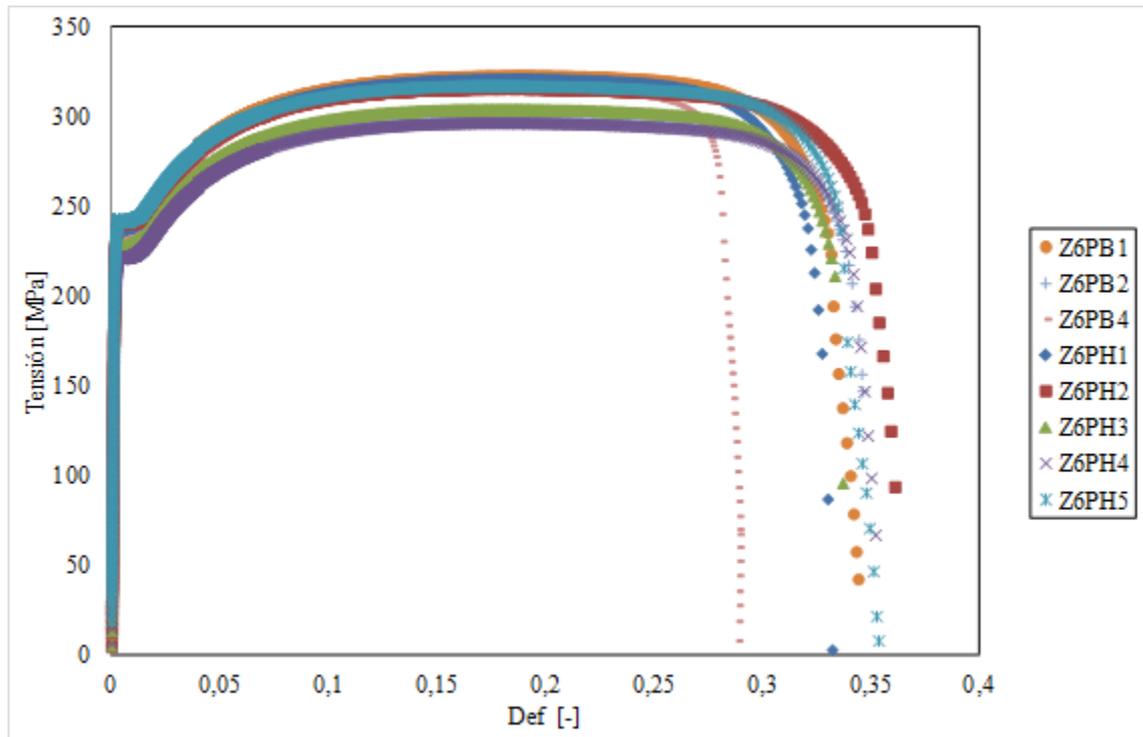


Figura 41 – Relación tensión deformación de Z6

### 4.3 Setup experimental de los ensayos a compresión:

Lo primero que se ha realizado para obtener la configuración del montaje es fabricar los apoyos en donde va a ir colocado el perfil como se representa en la Figura 42.

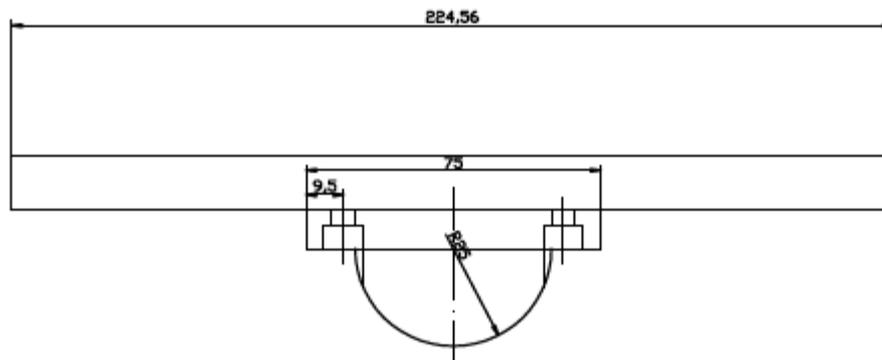
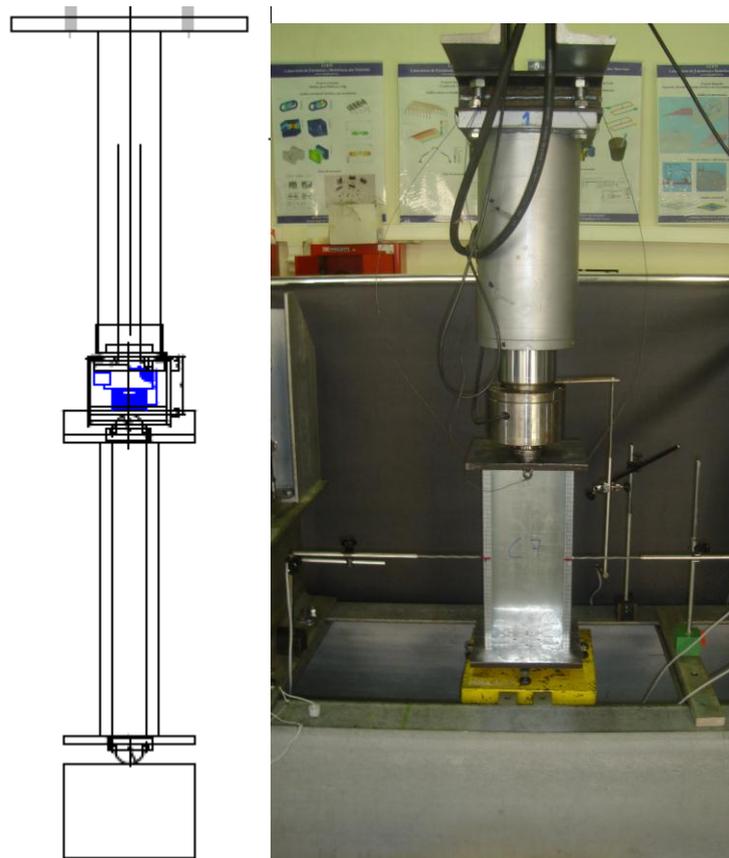


Figura 42- Apoyo simple para el ensayo de compresión

Como muestra la figura dicho apoyo es simple, con forma de semiesfera atornillada a un placa base.

La configuración para realizar los ensayos esta representada en la Figura 43, donde el perfil se colocara el perfil entre los dos apoyos simples como los de la Figura 42. El apoyo superior por la parte de la semiesfera estará en contacto siempre con el pistón, que es el que aplicara la carga y este lo transmitirá al perfil, y el apoyo inferior estará por la parte de la semiesfera estará en contacto de con un bloque de acero, de manera que cuando este el perfil entre los dos apoyos y sin aplicar carga este todo el sistema en equilibrio.

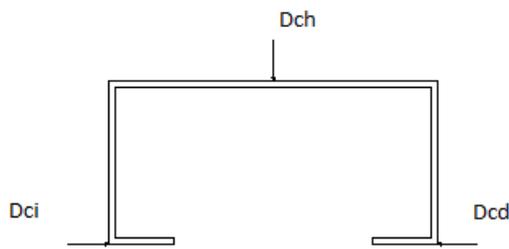


**Figura 43- Setup para los ensayos a compresión**

Para conocer los deformación que va a tener el perfil después de aplicar la carga, se va a colocar unos medidores de desplazamiento llamados LVDT en las diferentes superficies del perfil para conocer las siguientes deformaciones:

- Deformación vertical.
- Deformaciones horizontales:
  - Ala (b) de la derecha → Dcd
  - Ala (b) de la izquierda → Dci
  - Alma (h) → Dch

Situados como muestra la Figura 44



**Figura 44- Colocación de LVDT en el perfil**

#### **4.4 Resultados de los ensayos a temperatura ambiente:**

Los perfiles ensayados son los que aparecen en la Figura 45:



**Figura 45-perfiles ensayados a compresión**

Como se muestra la Figura 45 todos los perfiles tienen la misma longitud, y la altura tiene los valores de 100mm, 150mm y 200mm, con espesor de 1,5mm y 2mm.

#### 4.4.1 Elementos de sección C para espesor de 2mm:

Para el perfil C2 con  $h=150\text{mm}$  se obtienen las siguientes gráficas:

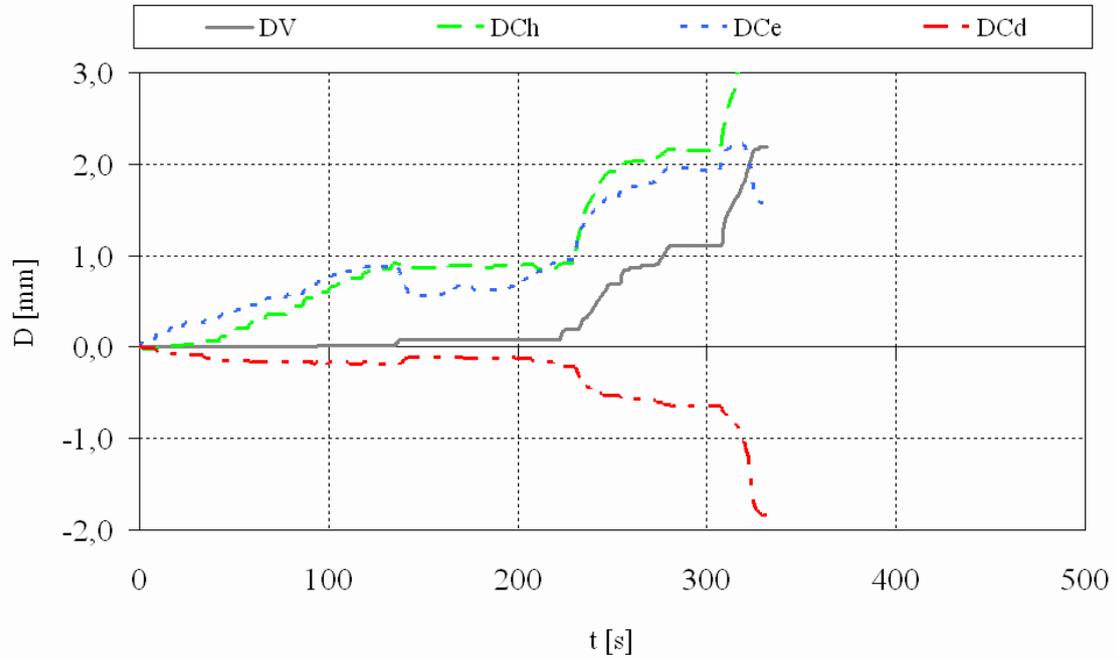


Figura 46-desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo.

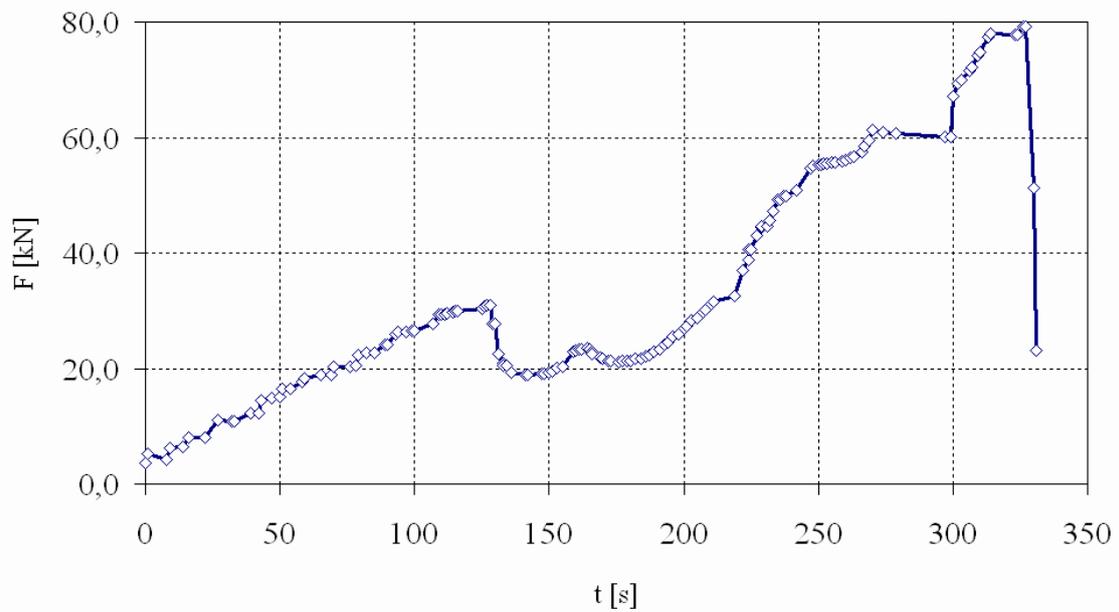
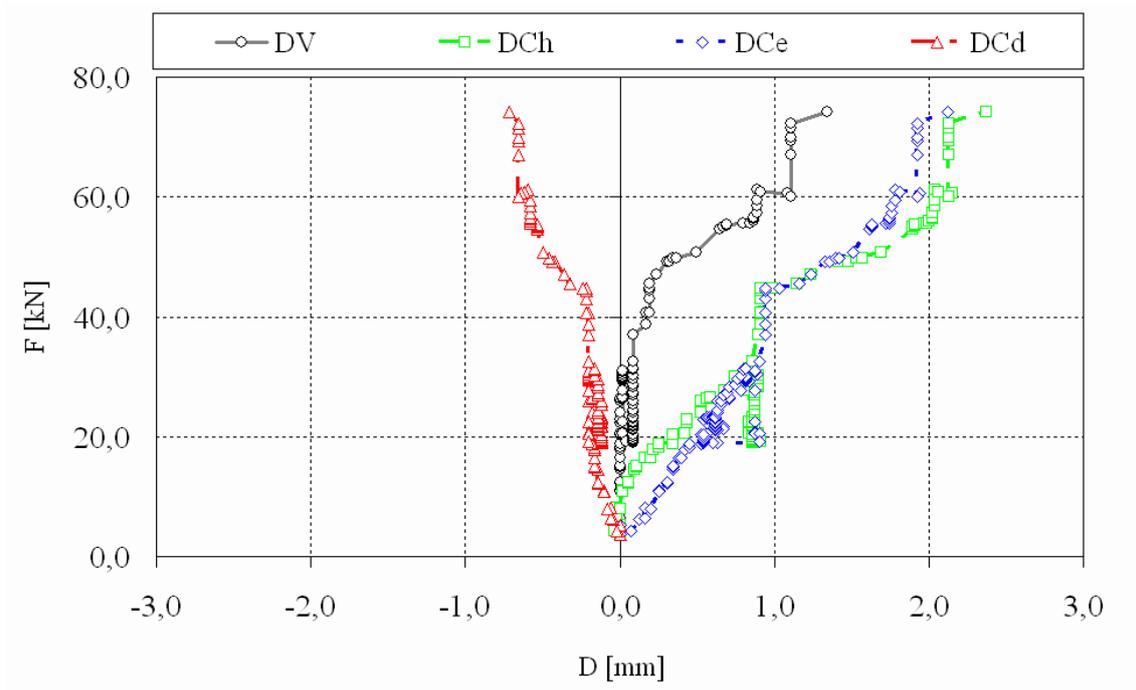
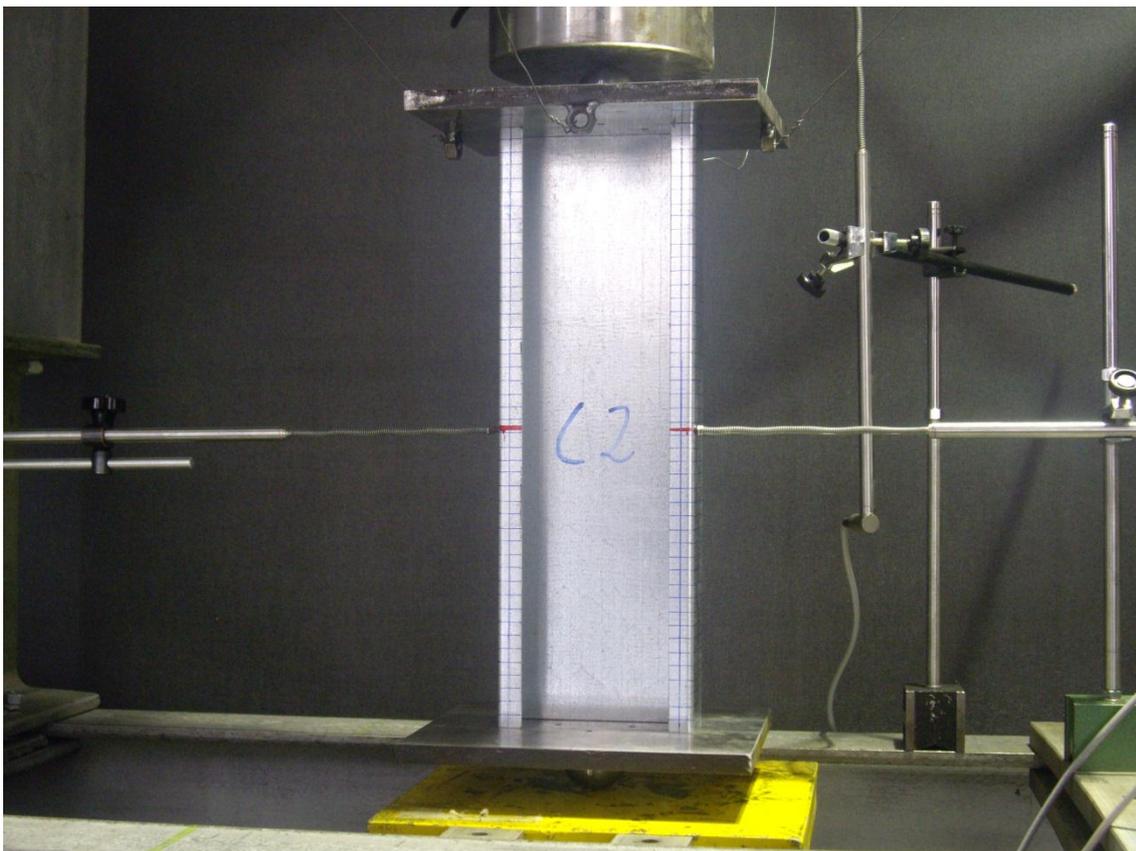


Figura 47- fuerza aplicada a lo largo del tiempo

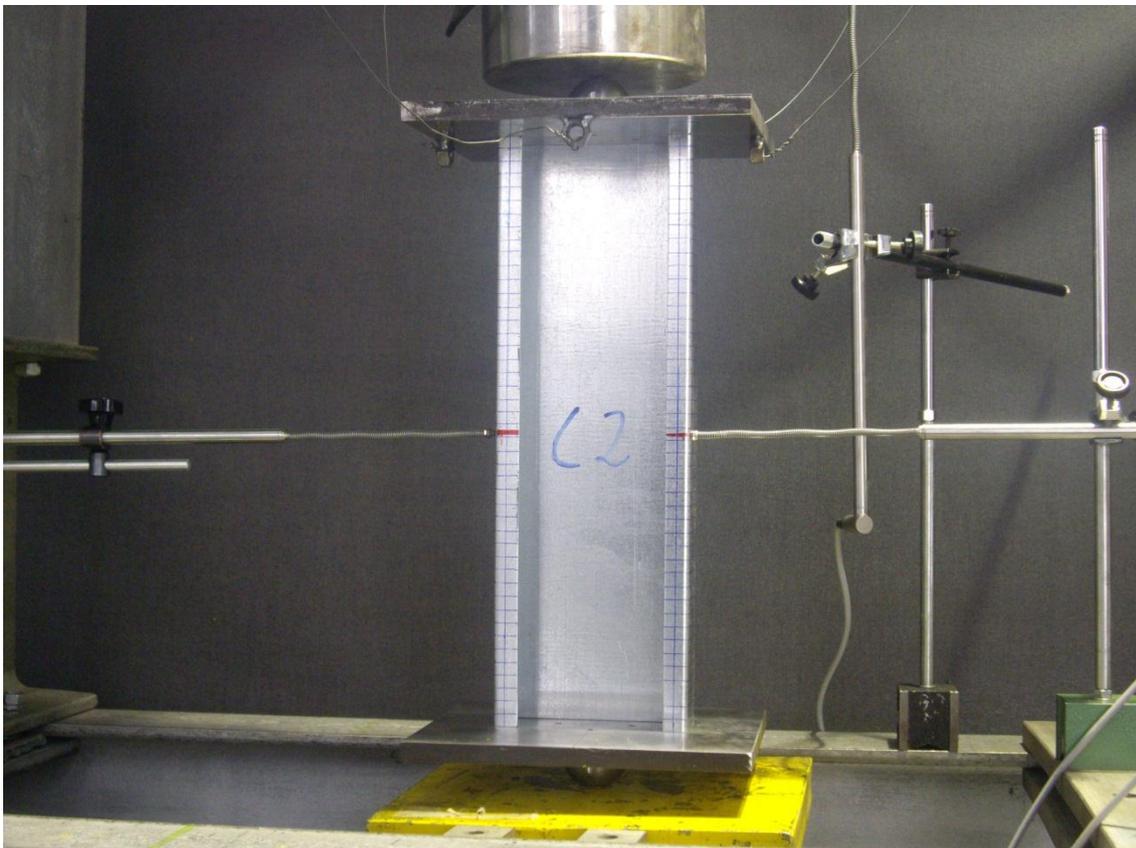


**Figura 48- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada**

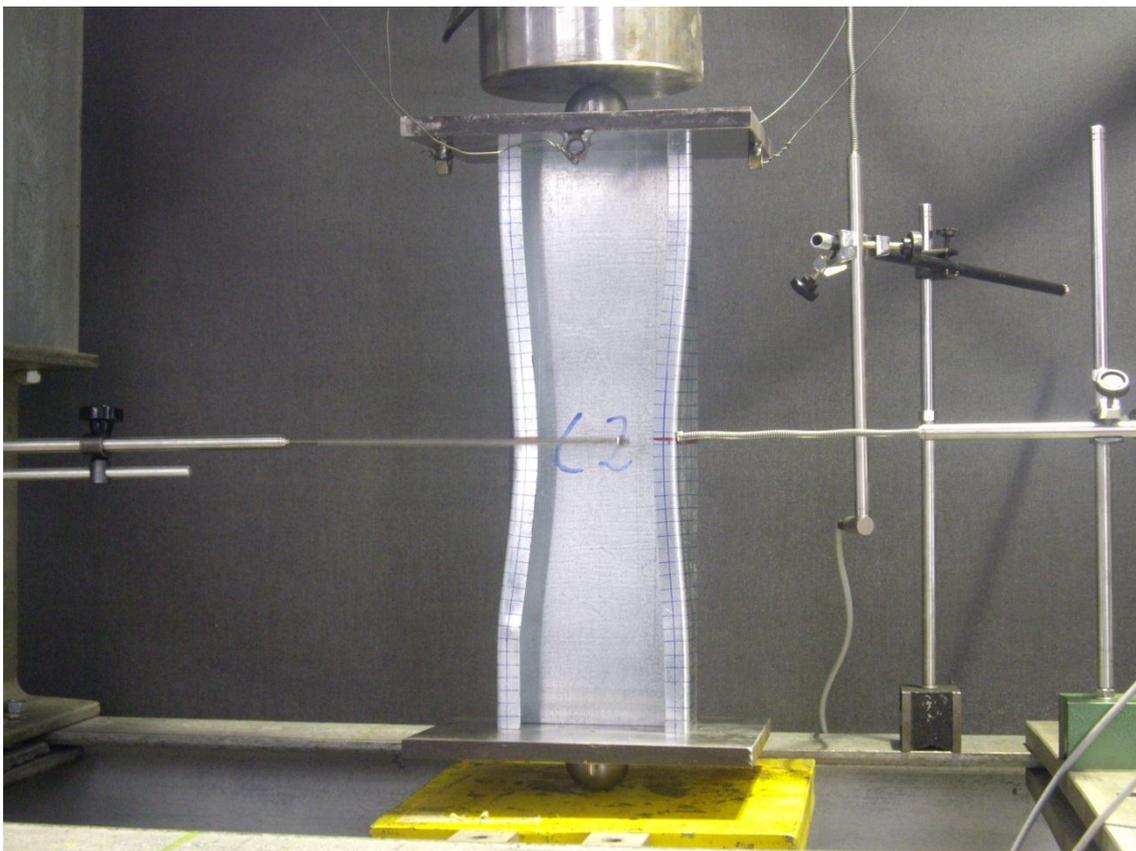
La Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52 muestran el efecto de compresión en función de la carga:



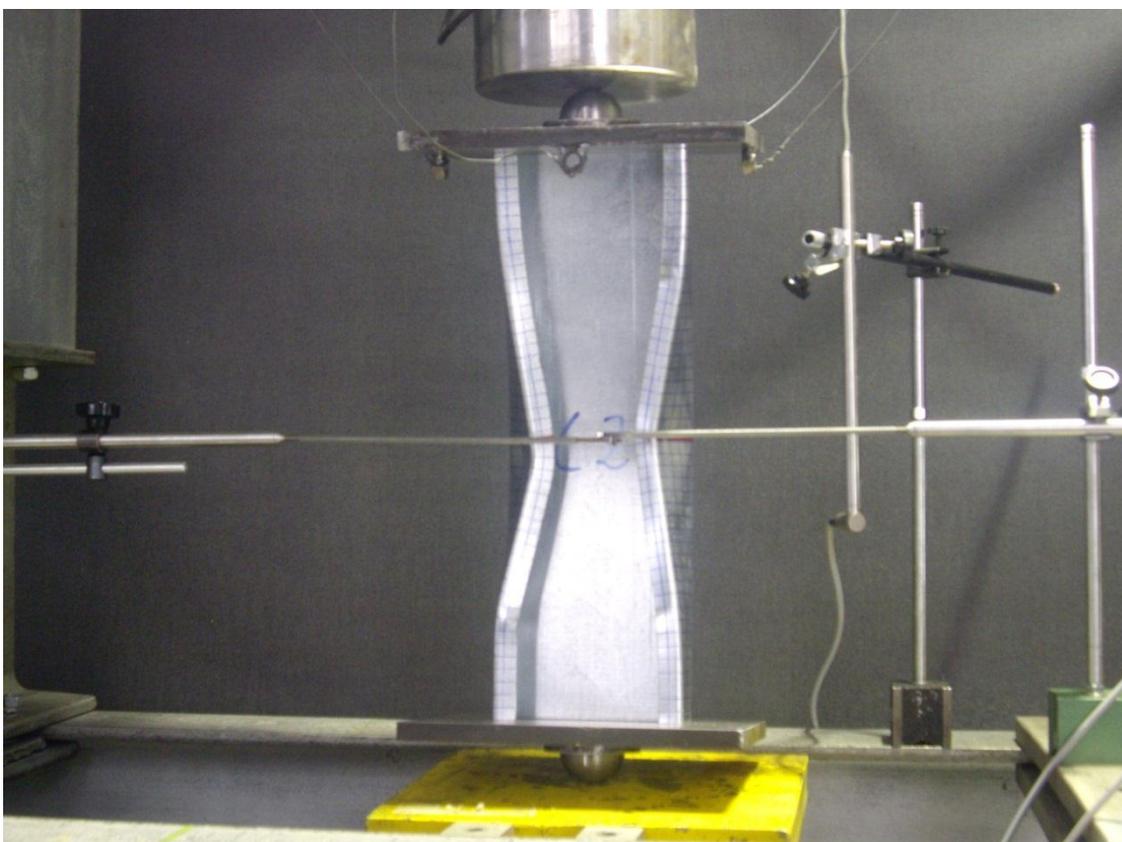
**Figura 49- Estado 1 del perfil C2 a compresión**



**Figura 50 Estado 2 del perfil C2 a compresión**

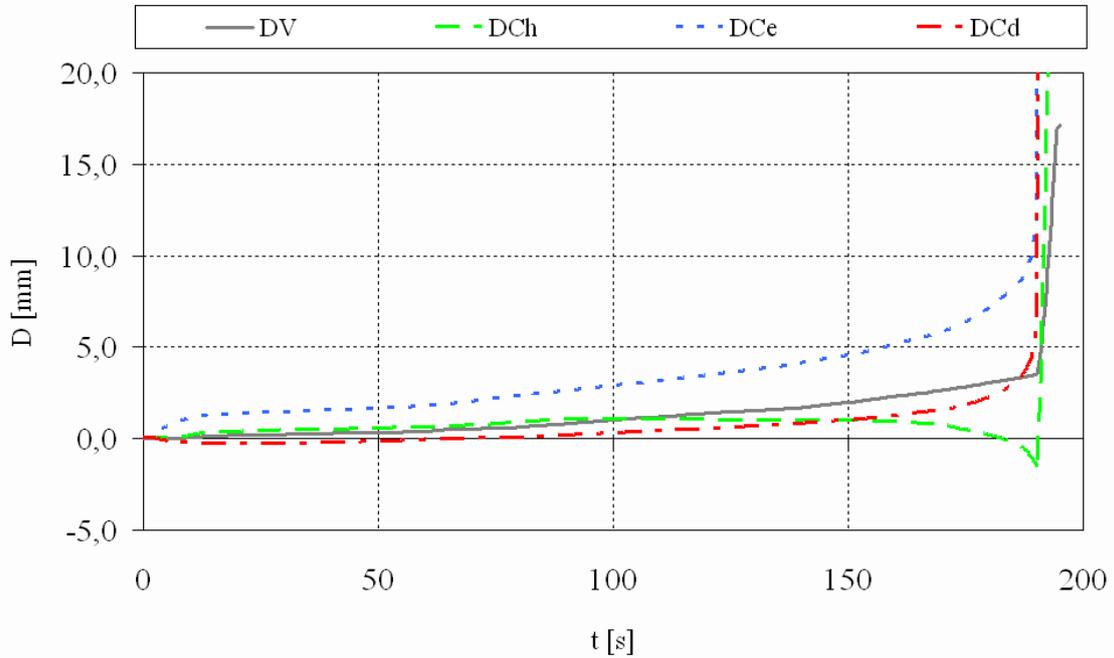


**Figura 51. Estado 3 del perfil C2 a compresión**



**Figura 52-Estado 4 del perfil C2 a compresión**

Para el perfil C7 con  $h=200\text{mm}$  se obtienen las siguientes gráficas:



-Figura 53-desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo.

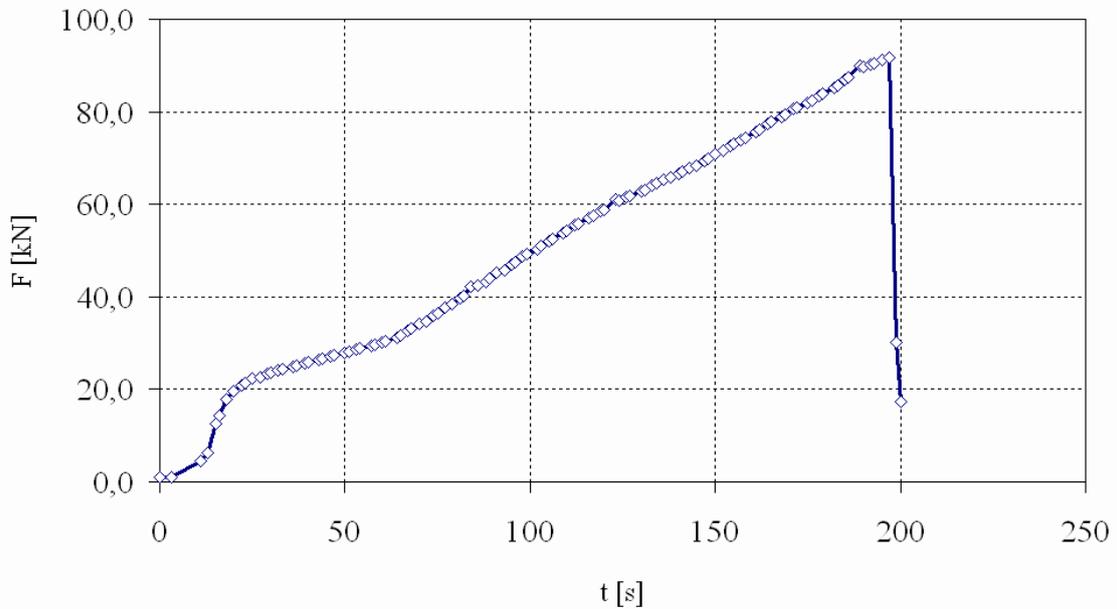


Figura 54- fuerza aplicada a lo largo del tiempo

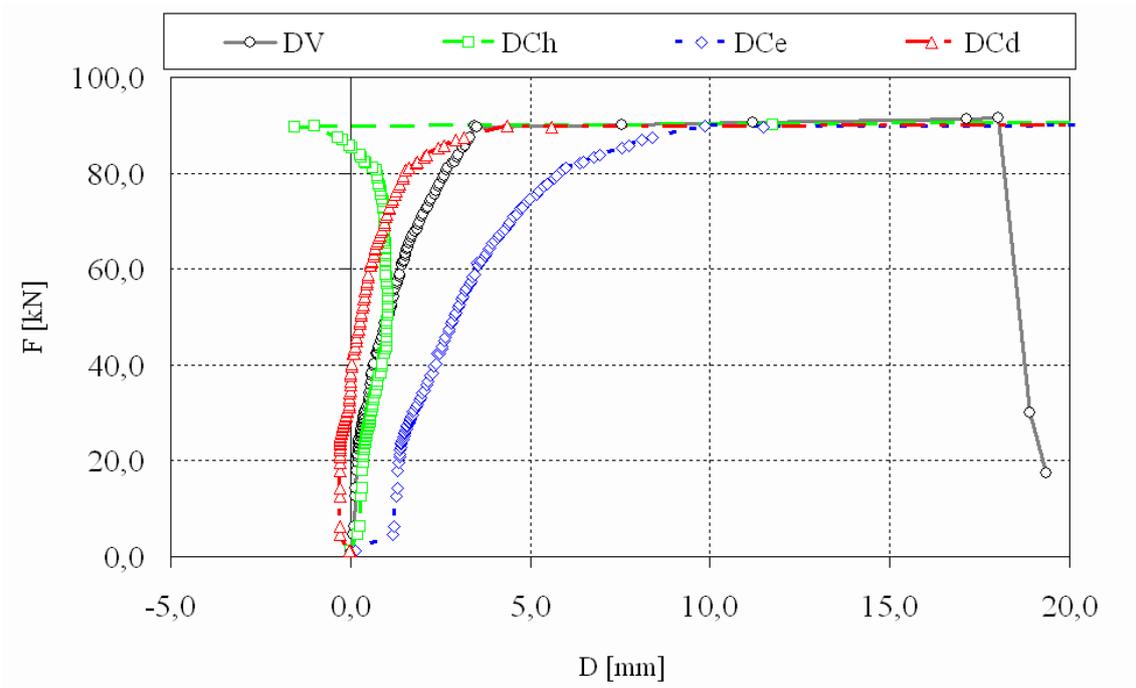


Figura 55- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada

La Figura 56, Figura 57, Figura 58, Figura 59 muestran el efecto de compresión en función de la carga:

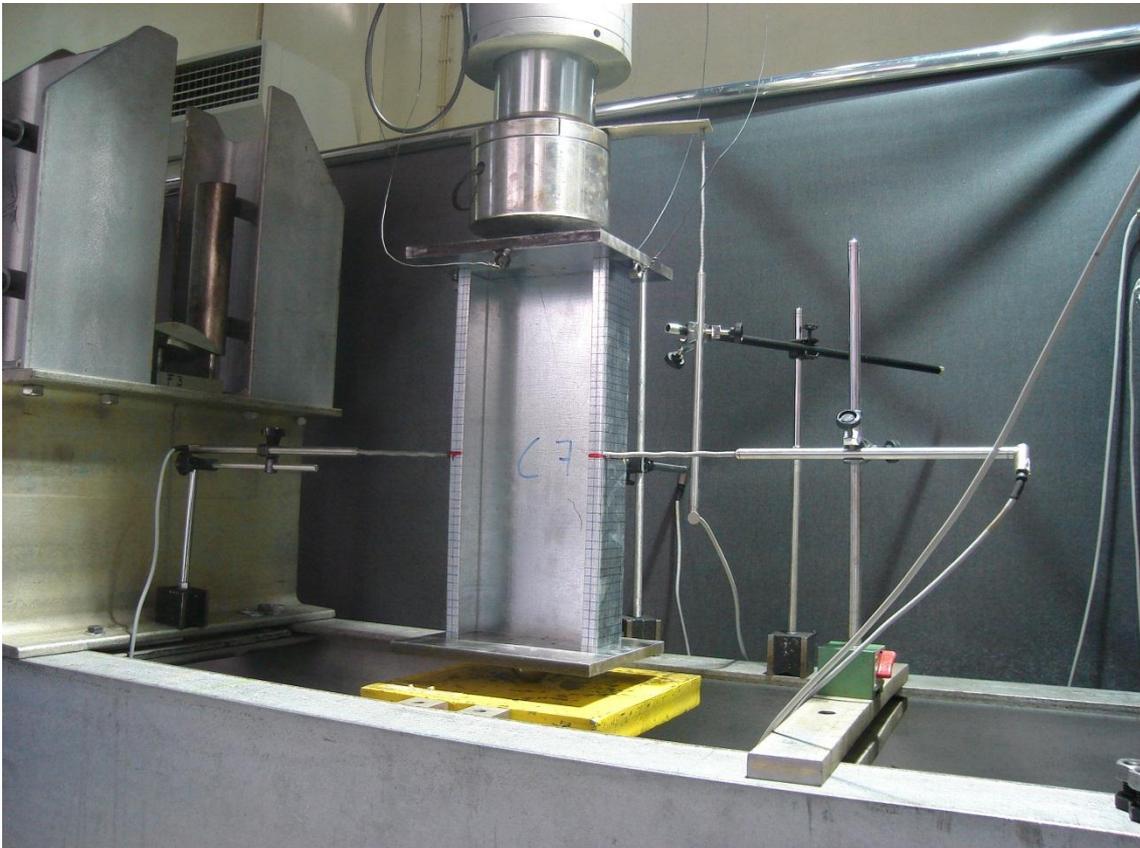


Figura 56 Estado 1 del perfil C7 a compresión



**Figura 57- Estado 2 del perfil C7 a compresión**

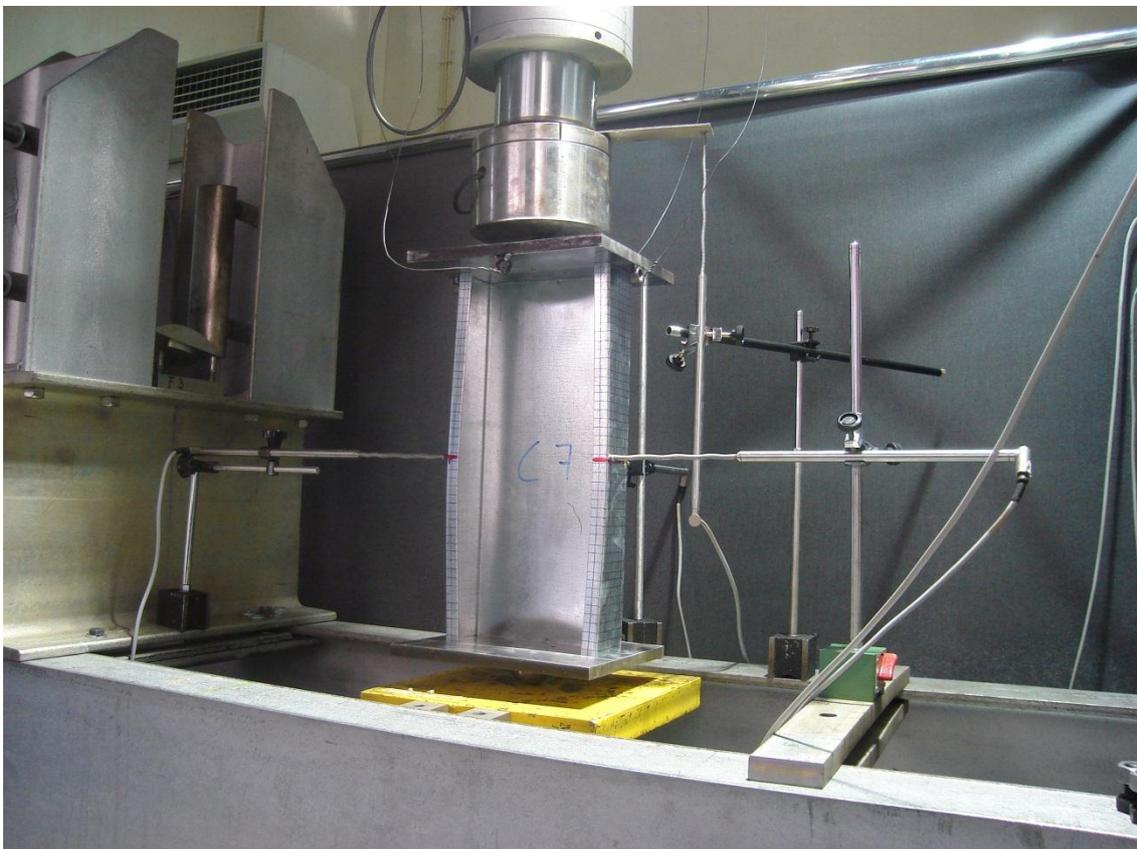


Figura 58- Estado 3 del perfil C7 a compresión

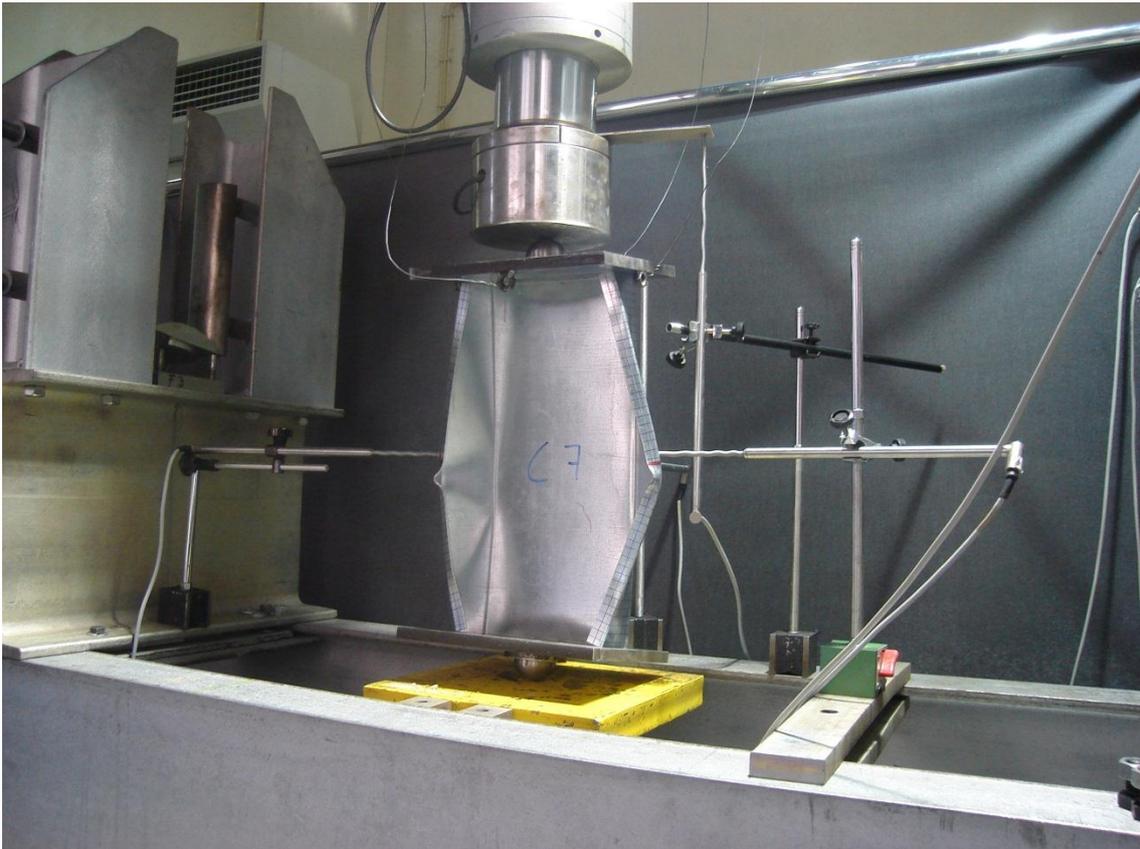
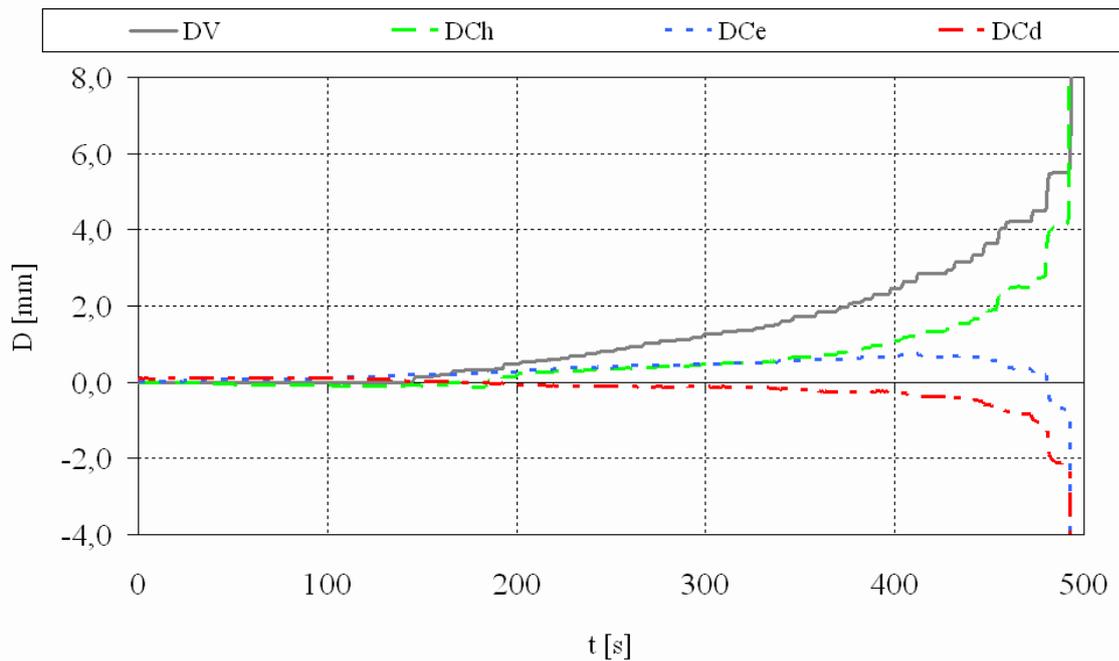
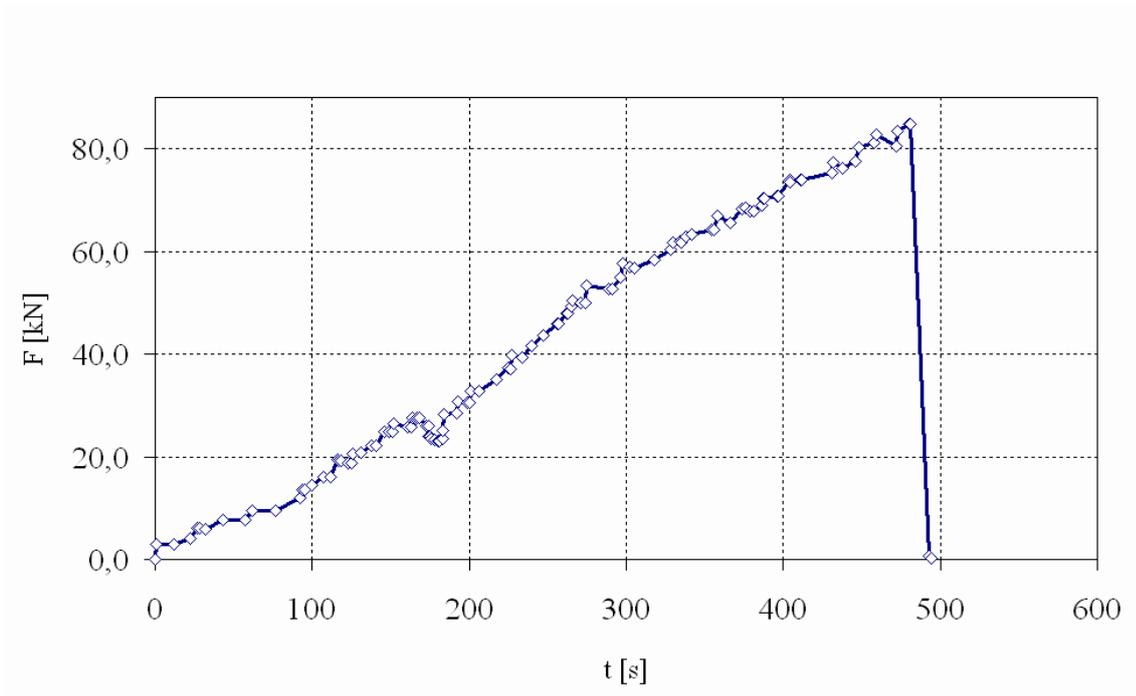


Figura 59- Estado 4 del perfil C7 a compresión

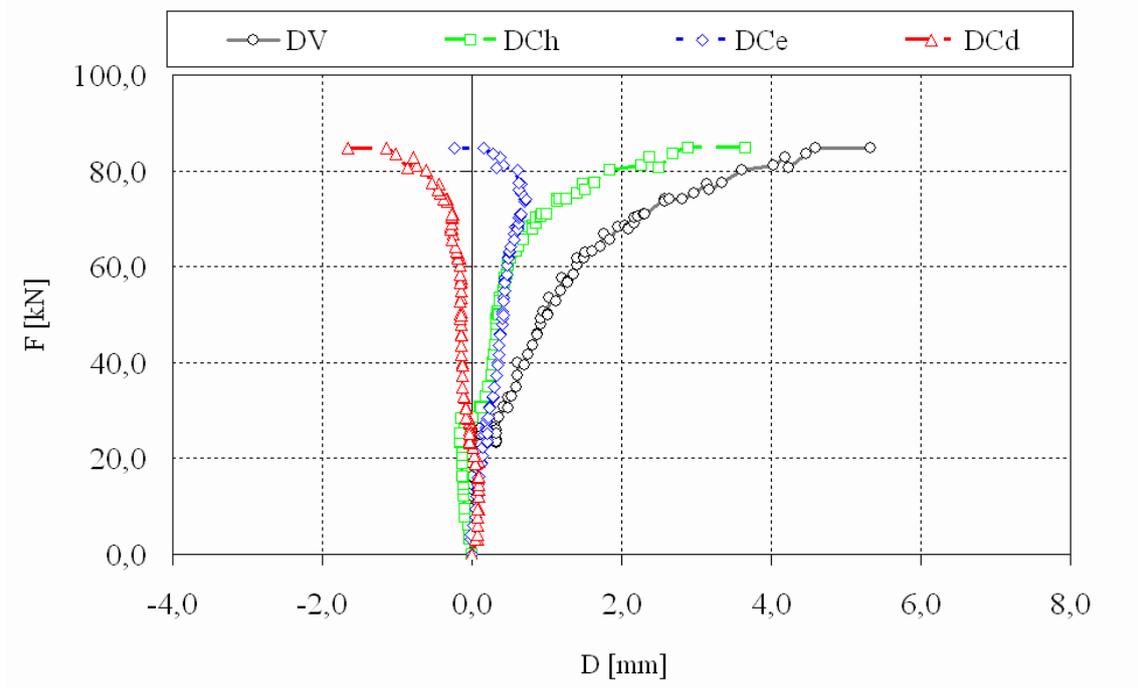
Para el perfil C8 con  $h=100\text{mm}$  se obtienen las siguientes gráficas:



**Figura 60-desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo**

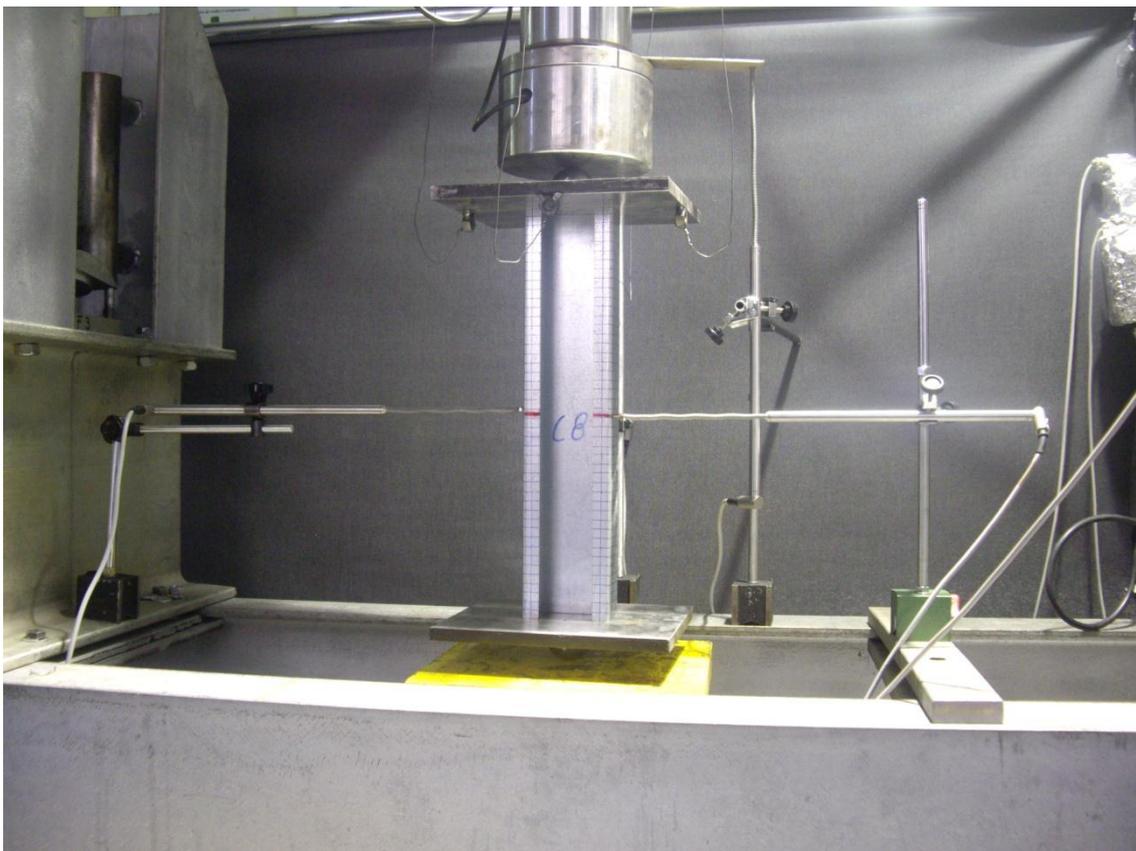


**Figura 61- fuerza aplicada a lo largo del tiempo**

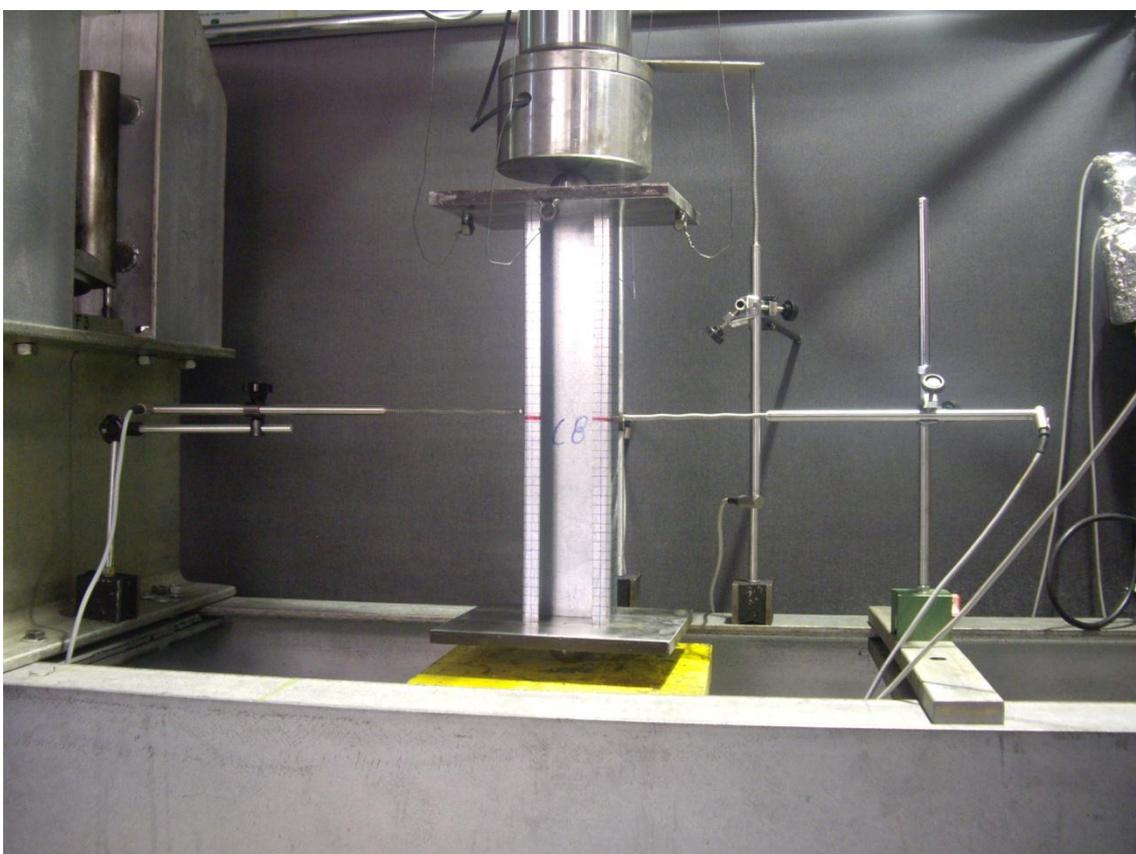


**Figura 62- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada**

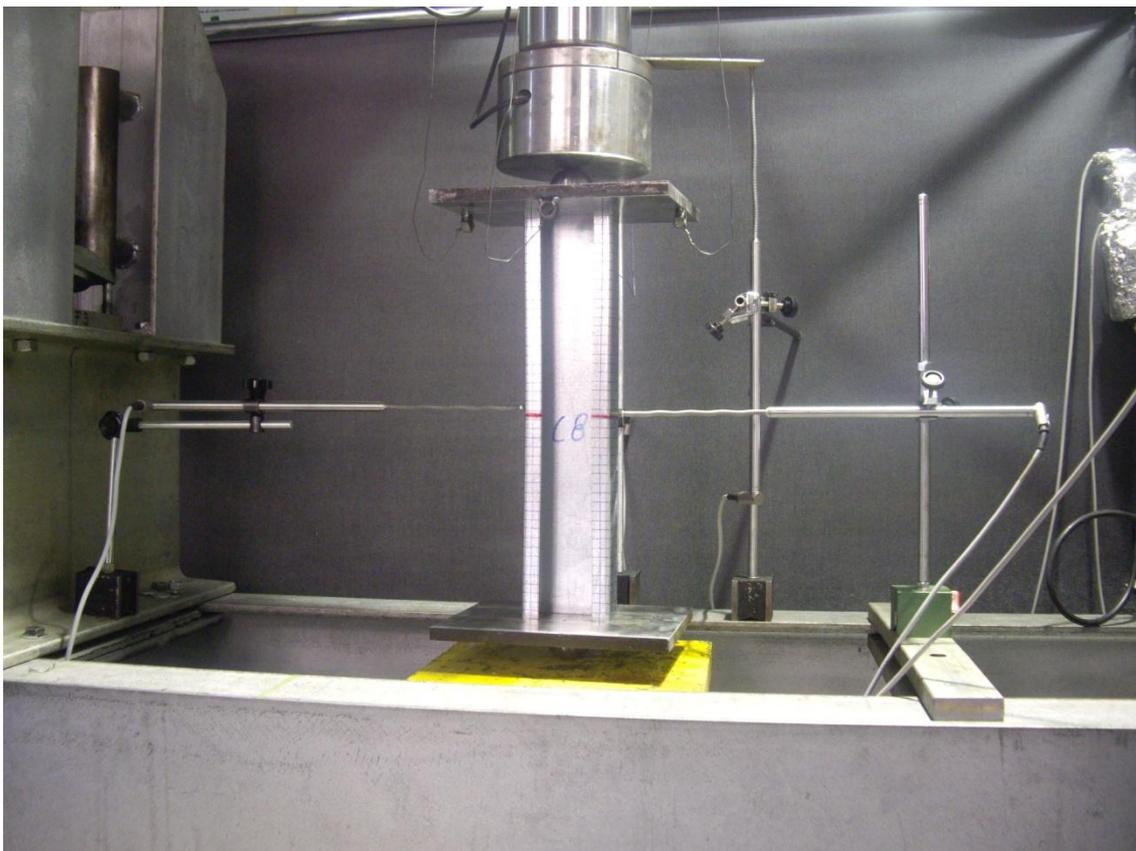
La Figura 63, Figura 64, Figura 65, y Figura 66 muestran el efecto de compresión en función de la carga:



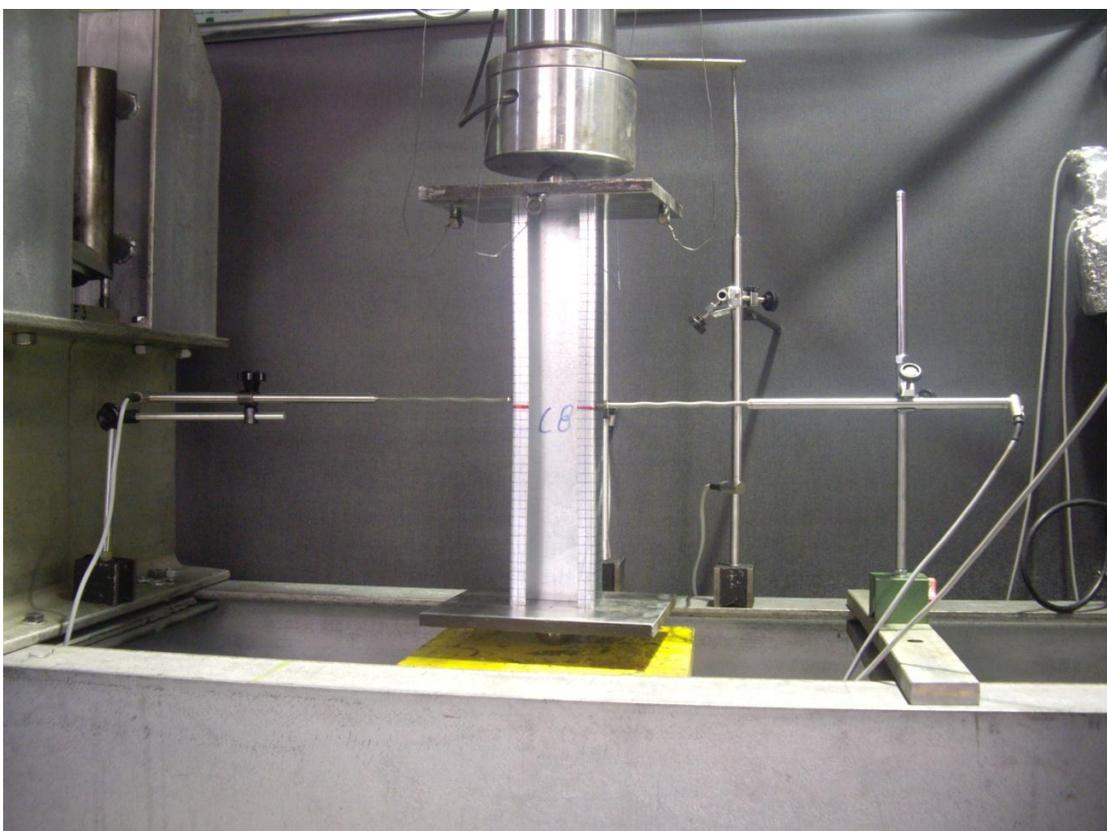
**Figura 63- Estado 1 del perfil C8 a compresión**



**Figura 64 Estado 2 del perfil C8 a compresión**



**Figura 65- Estado 3 del perfil C8 a compresión**



**Figura 66- Estado 4 del perfil C8 a compresión**

#### 4.4.2 Elementos de sección C para espesor de 1,5mm:

Para el perfil C11 con  $h=200\text{mm}$  se obtienen las siguientes gráficas:

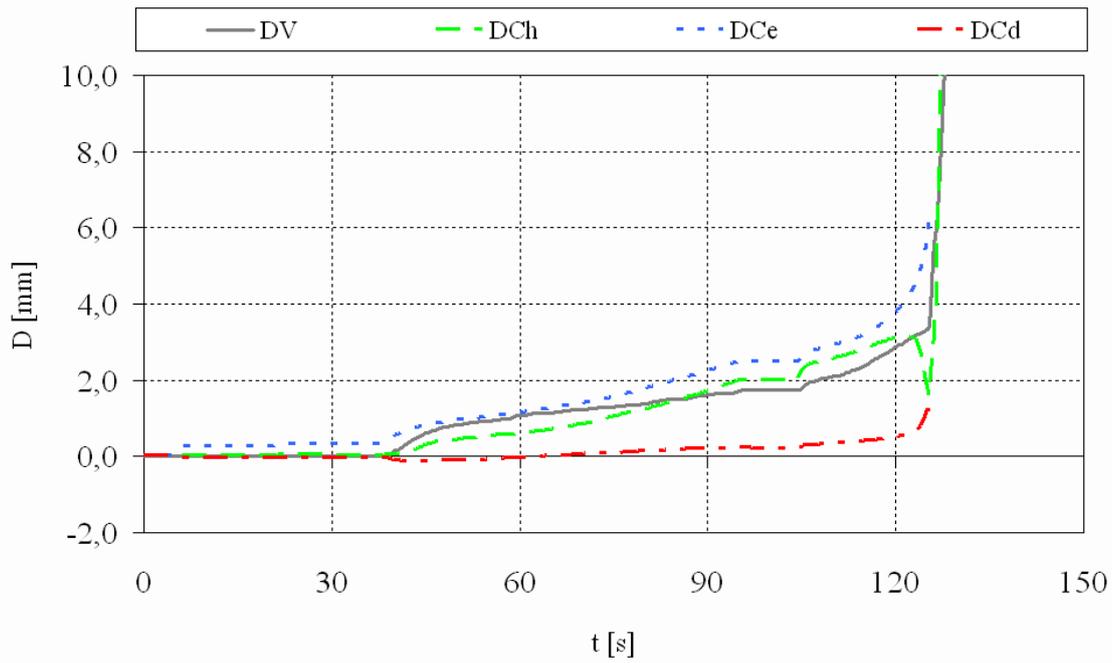
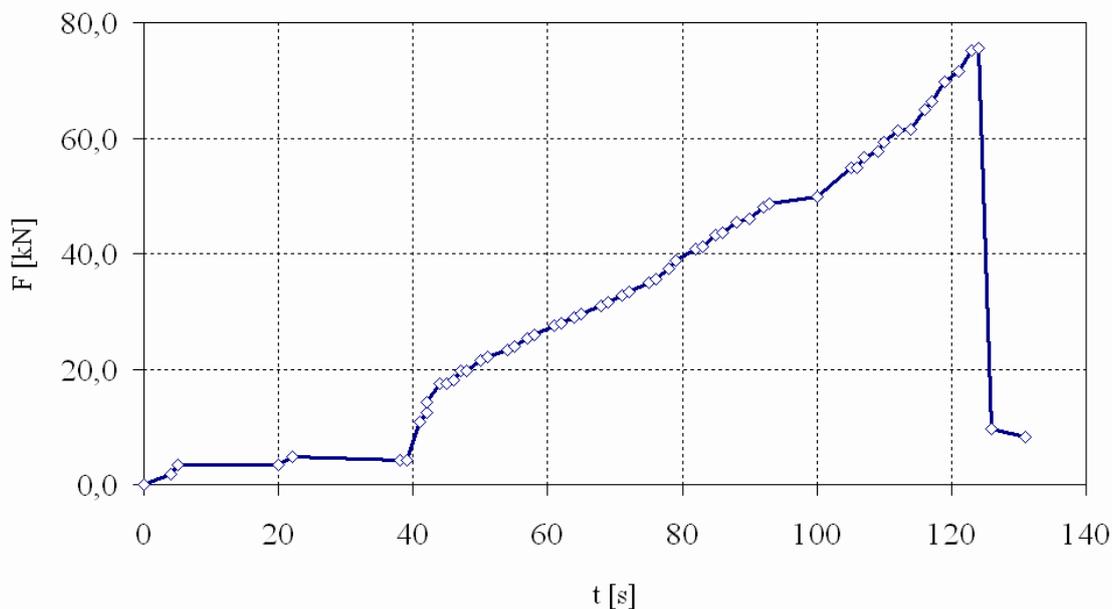
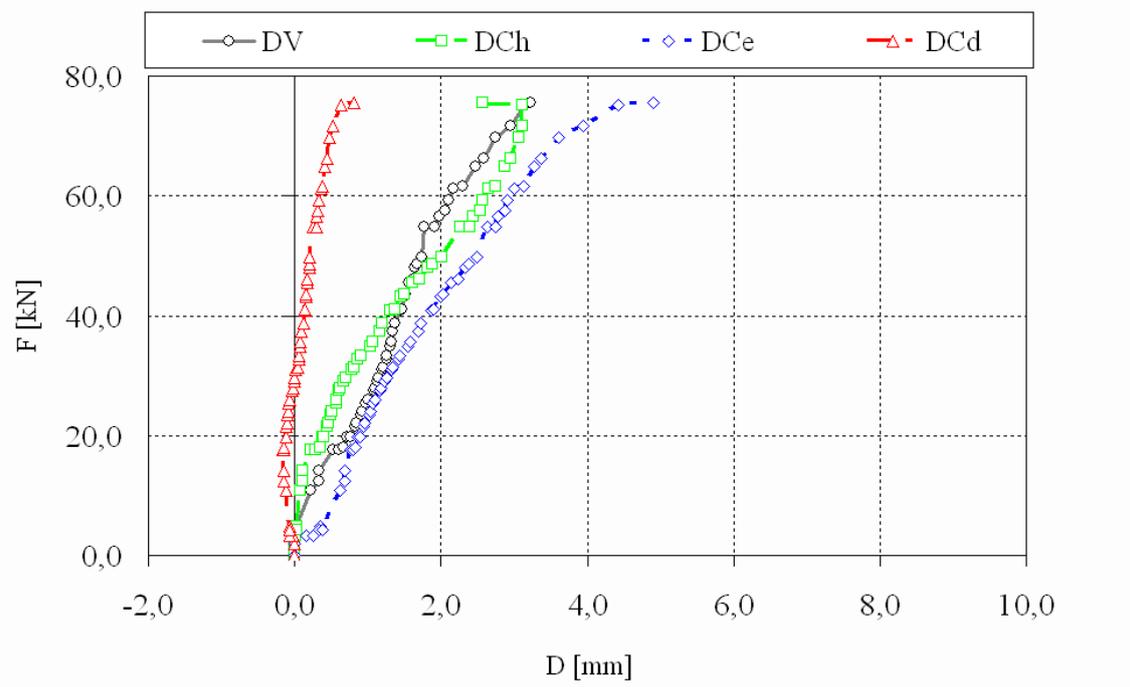


Figura 67-desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo.

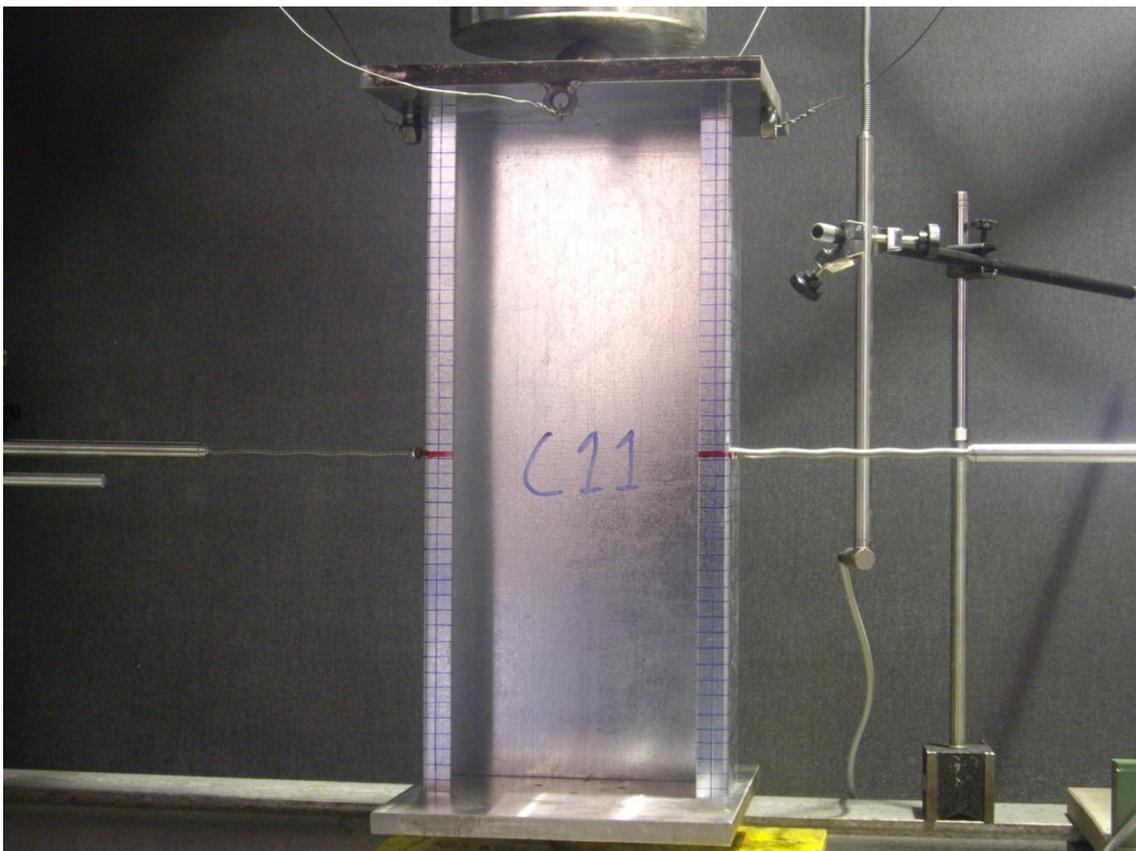


**Figura 68- fuerza aplicada a lo largo del tiempo**

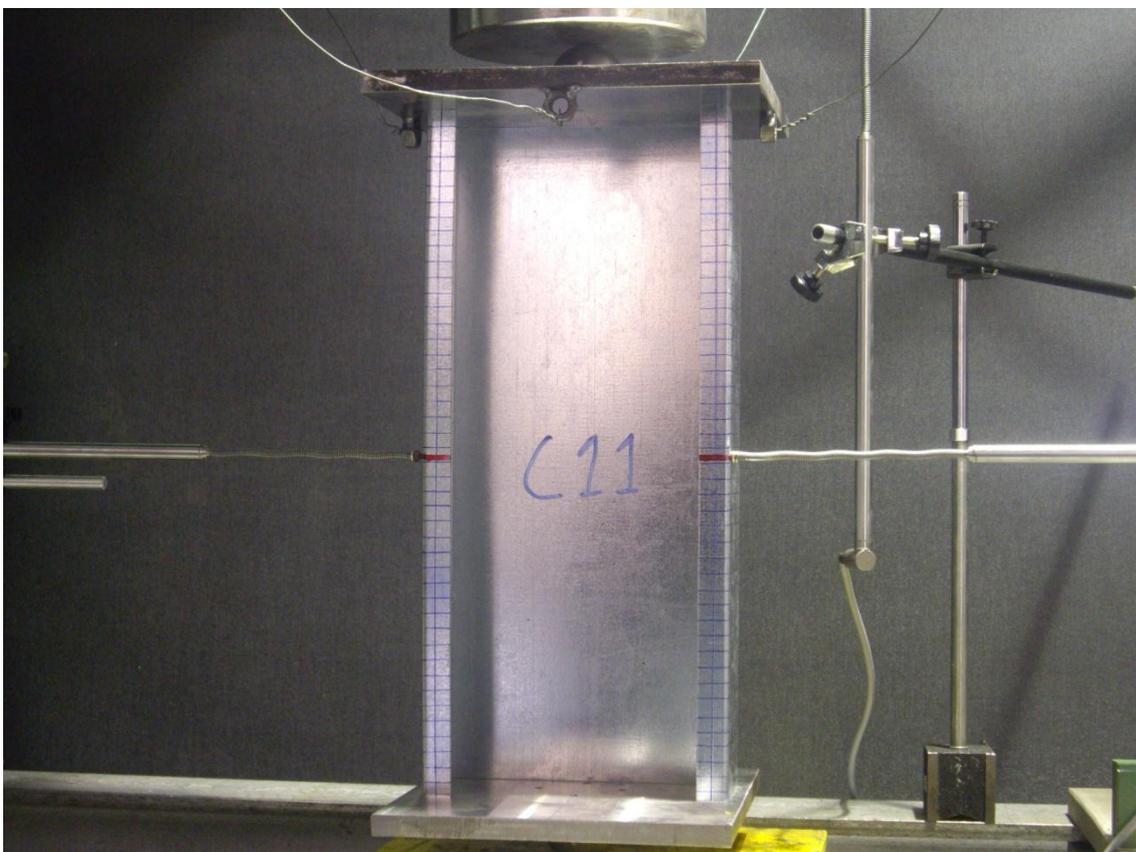


**Figura 69-desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo**

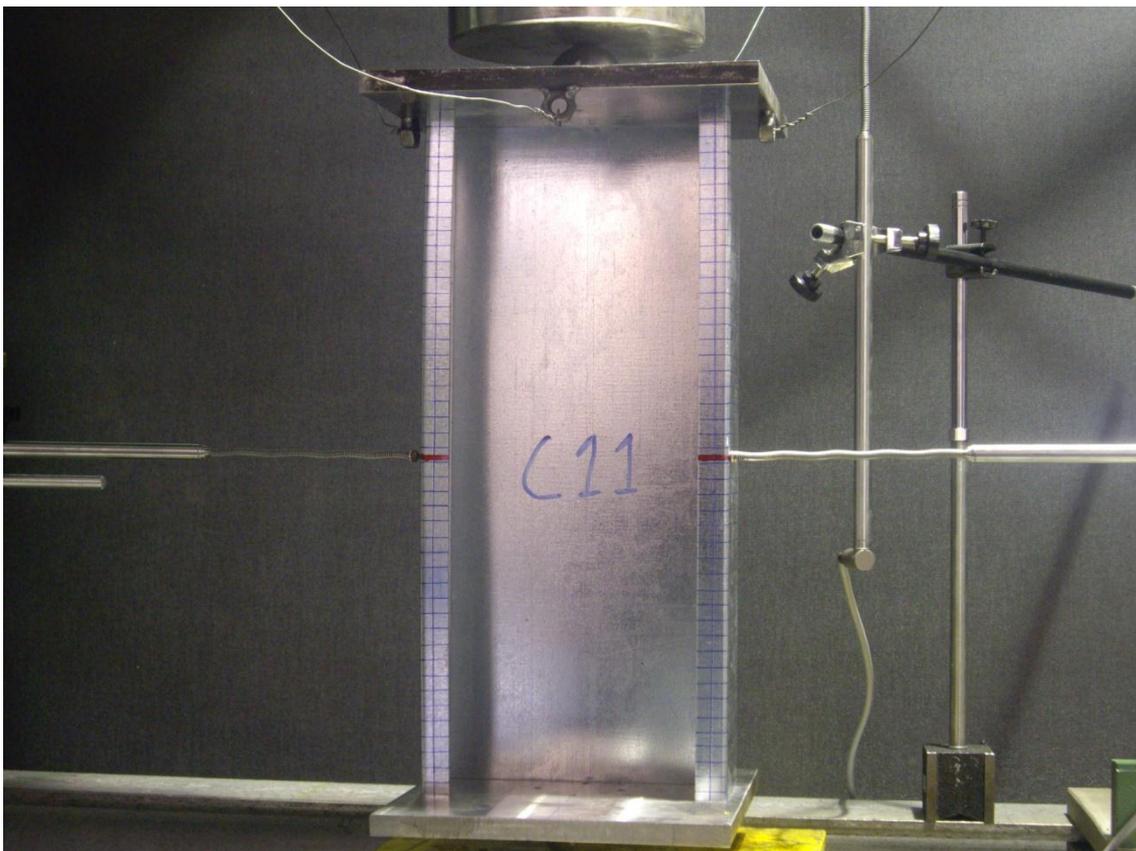
La Figura 70, Figura 71, Figura 72, Figura 73 muestran el efecto de compresión en función de la carga:



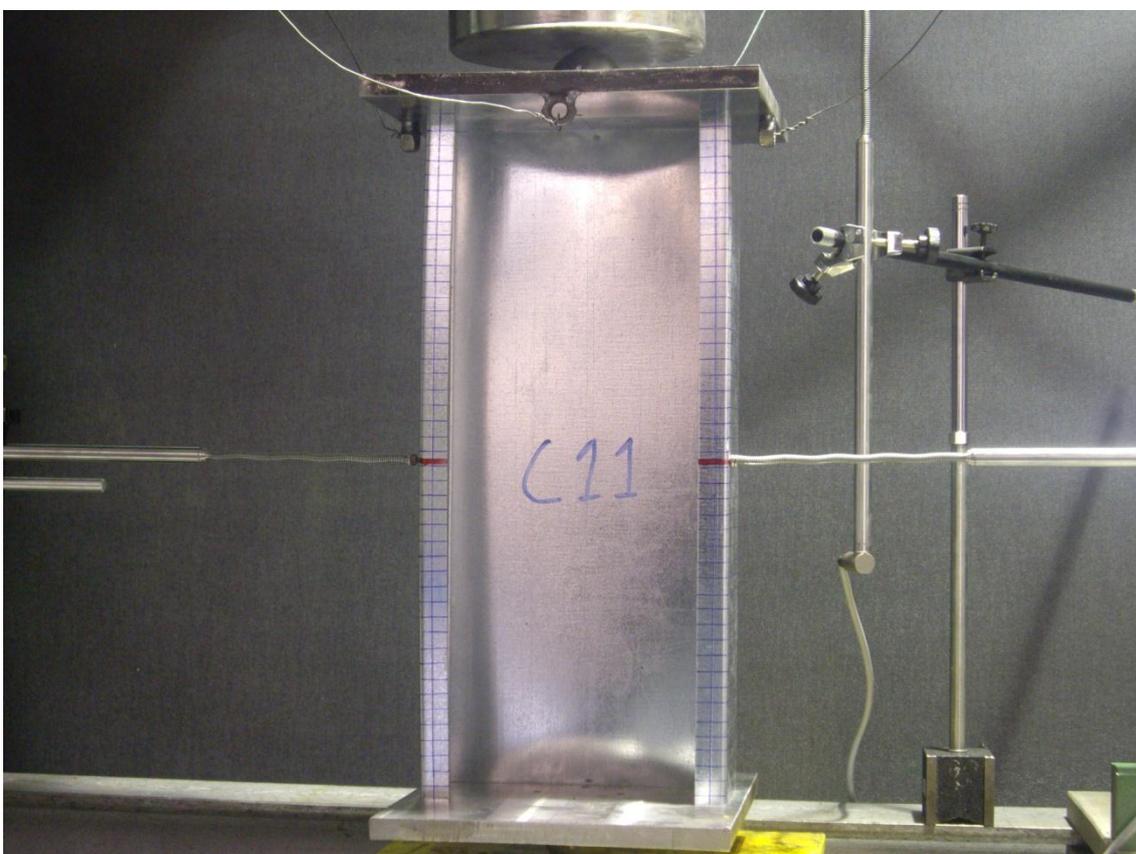
**Figura 70 -Estado 1 del perfil C11 a compresión**



**Figura 71- Estado 2 del perfil C11 a compresión**



**Figura 72- Estado 3 del perfil C11 a compresión**



**Figura 73- Estado 4 del perfil C11 a compresión**

Para el perfil C12 con  $h=150\text{mm}$  se obtienen las siguientes gráficas:

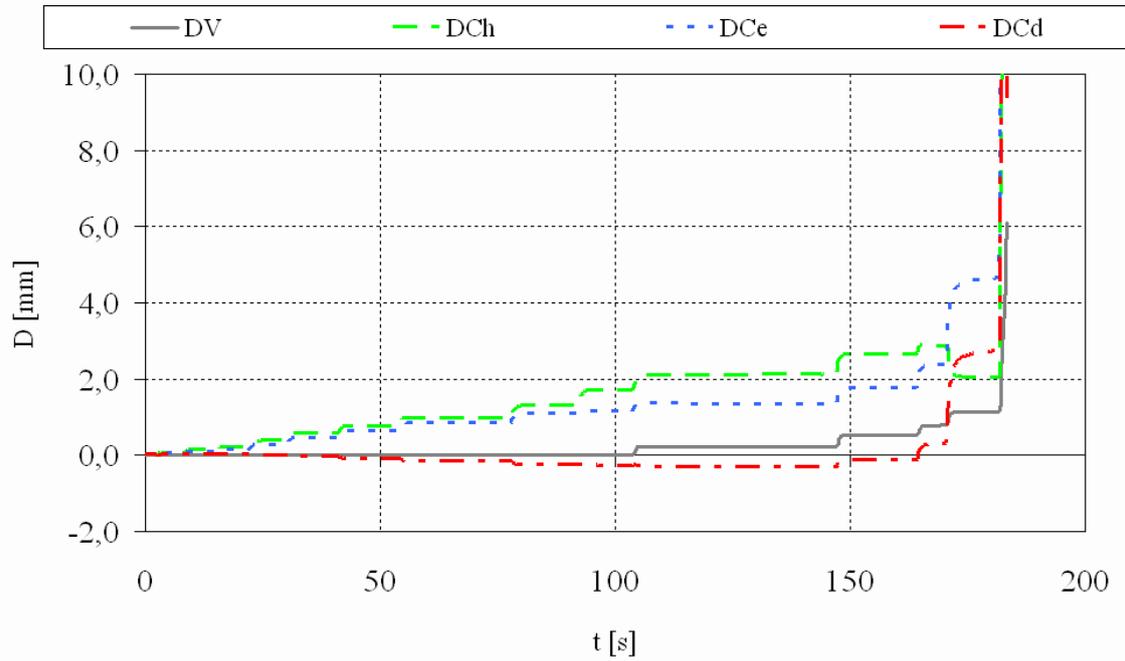
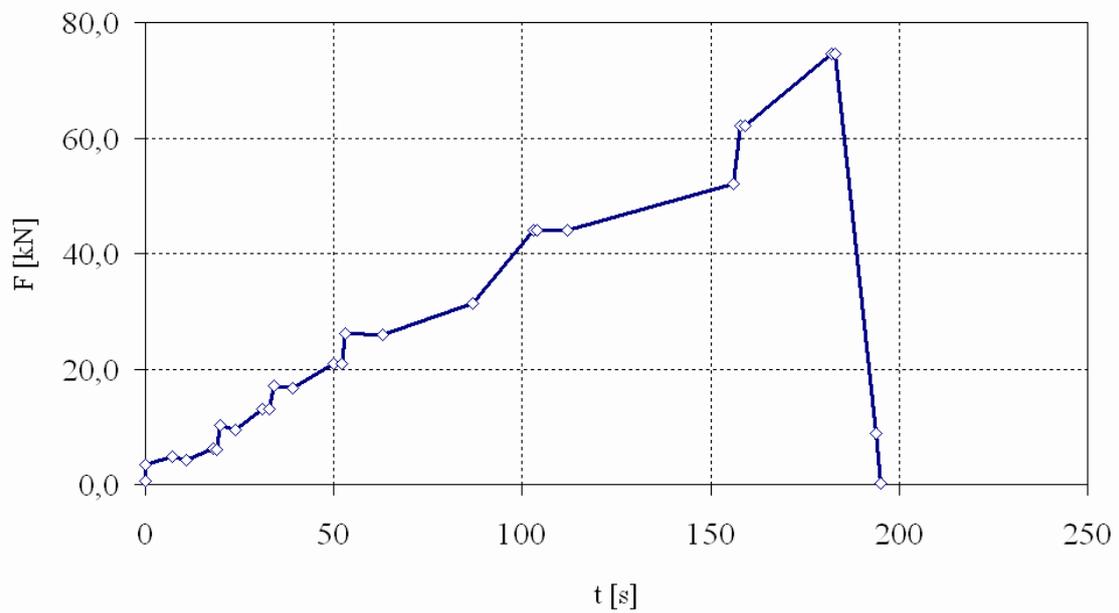
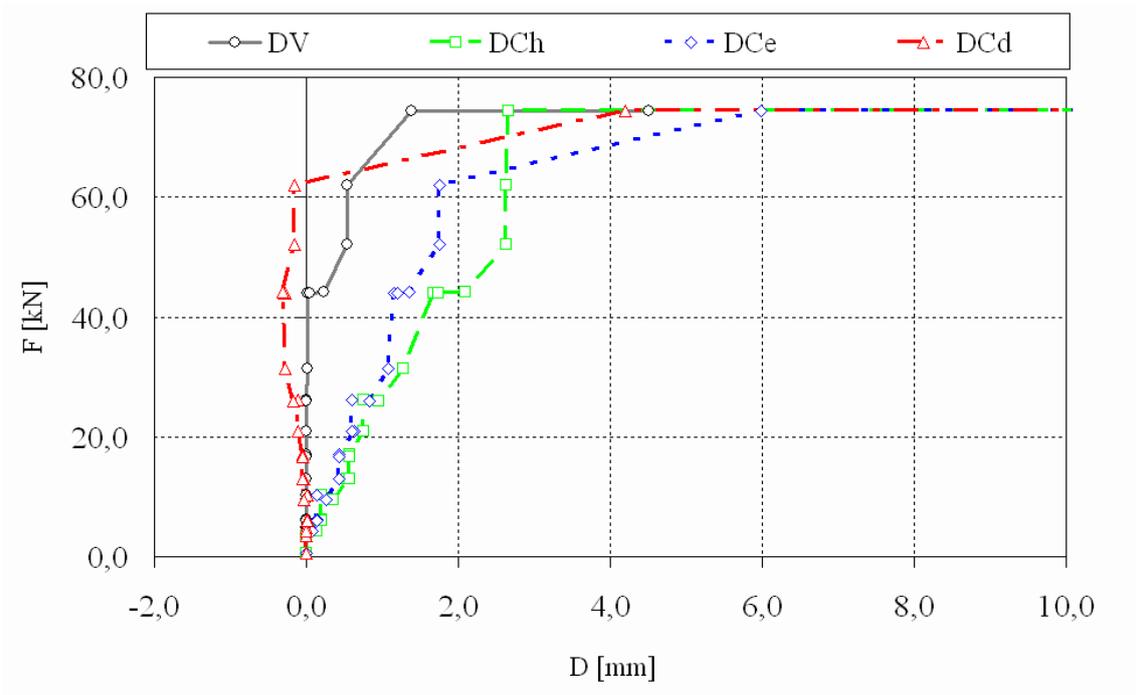


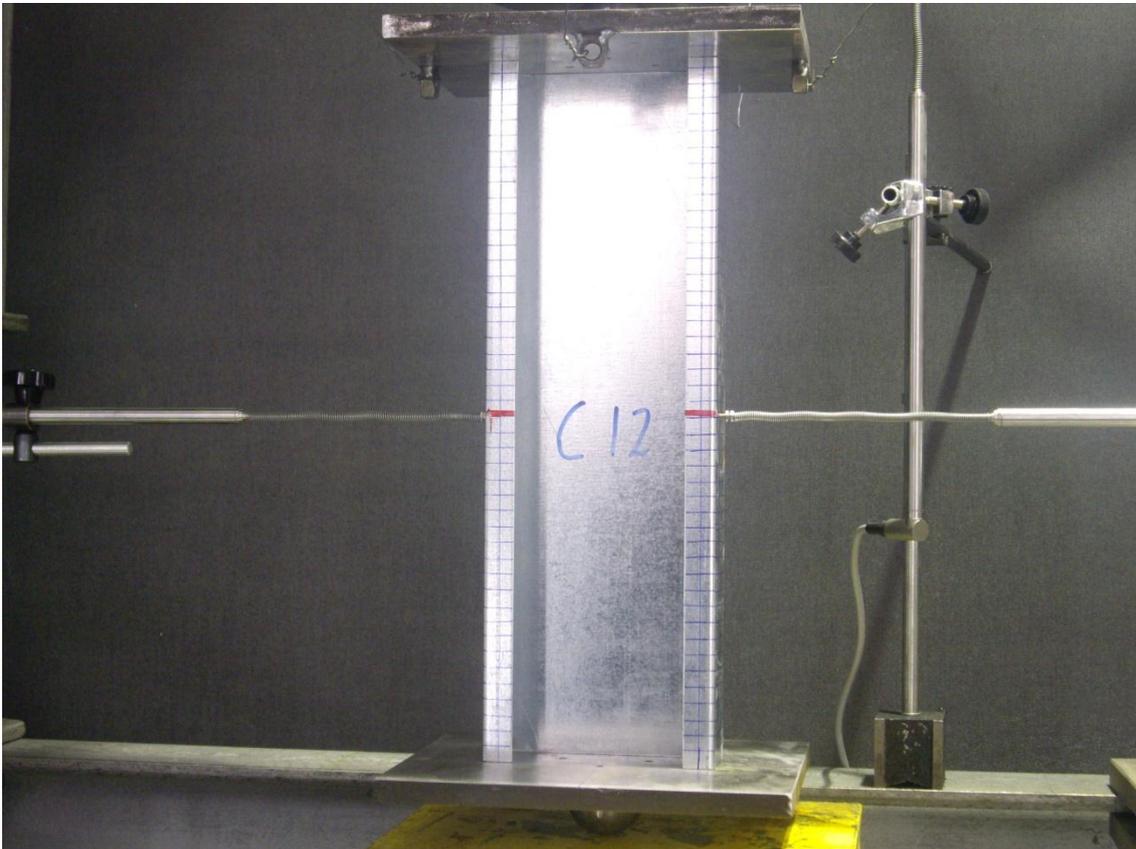
Figura 74- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada





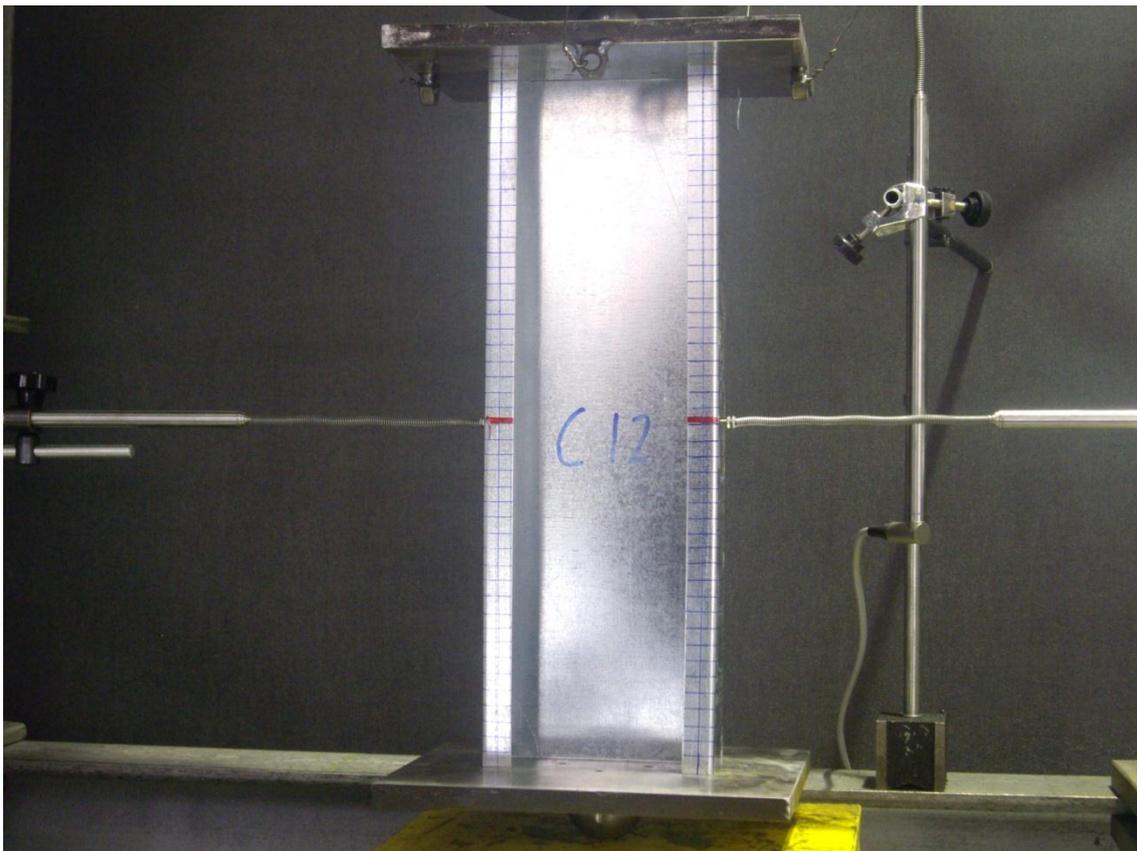
**Figura 76-desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo**

La Figura 77, Figura 78, Figura 79, Figura 80 muestran el efecto de compresión en función de la carga:

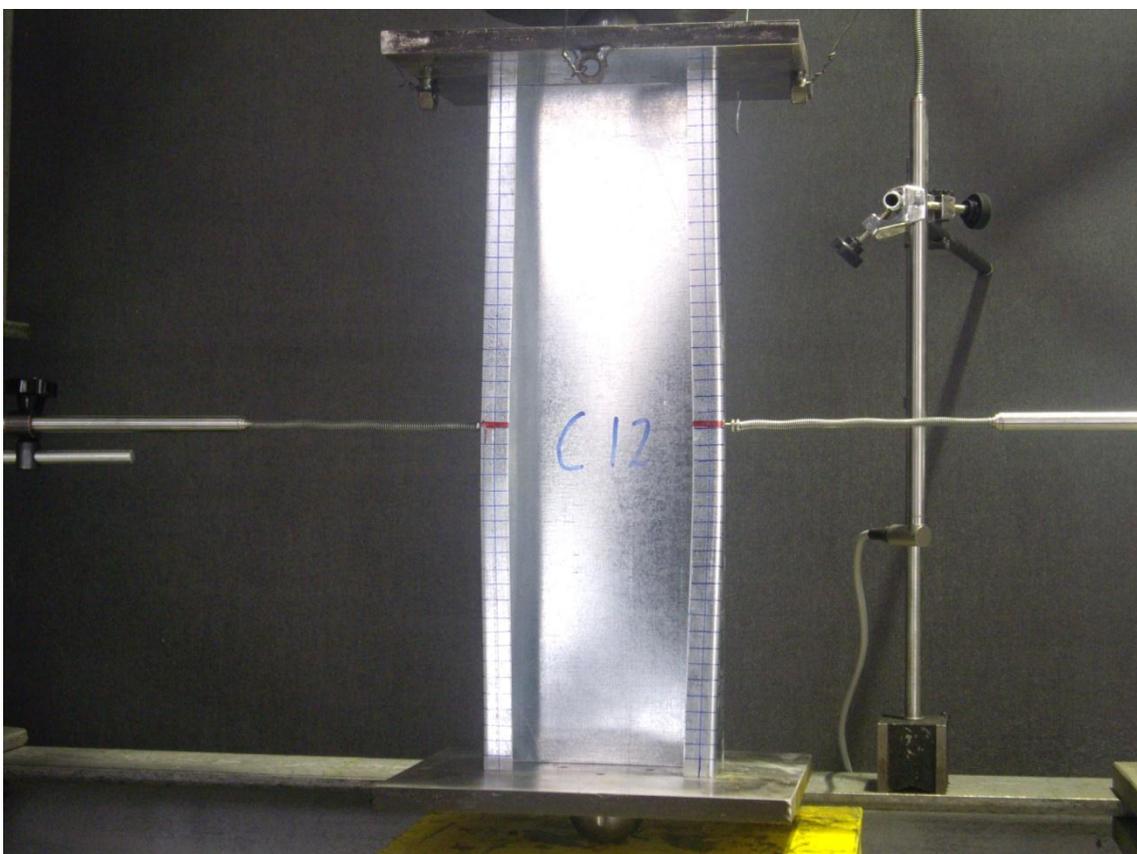


**Figura 77- Estado 1 del perfil C12 a compresión**

1



**Figura 78- Estado 2 del perfil C12 a compresión**



**Figura 79- Estado 3 del perfil C12 a compresión**

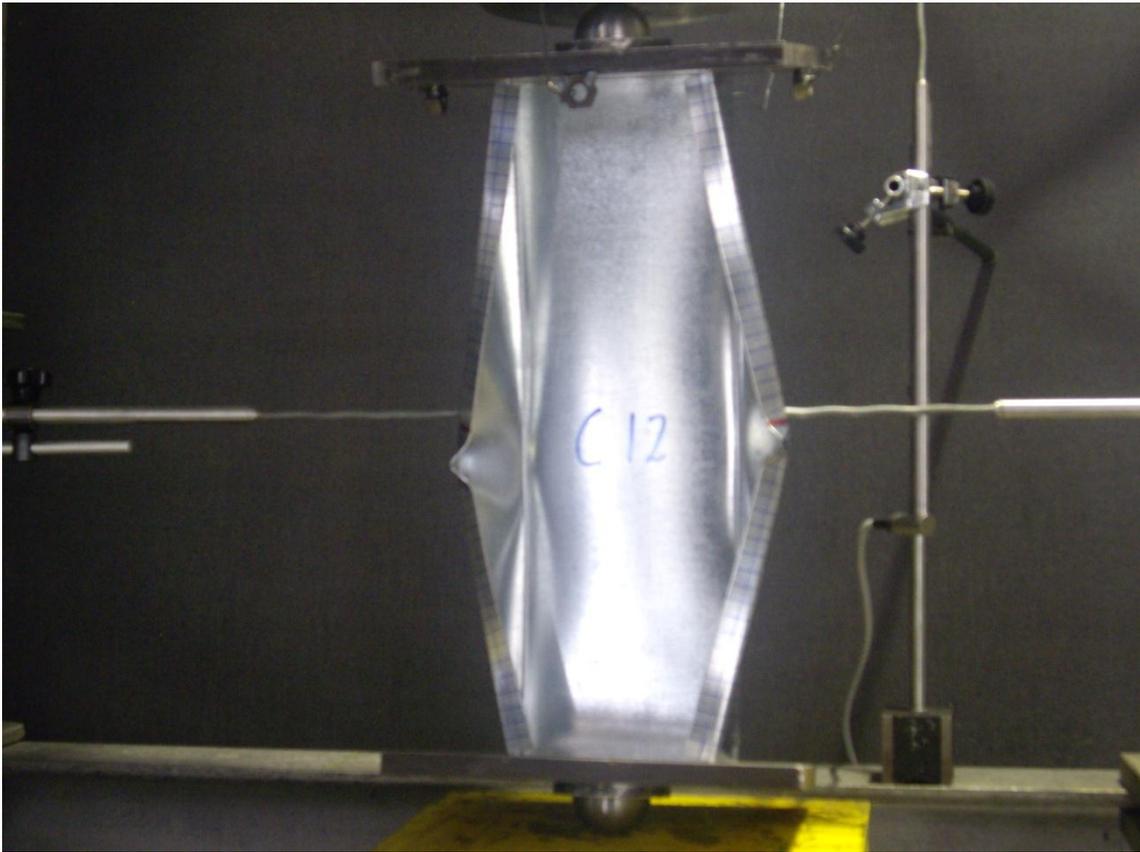


Figura 80- Estado 4 del perfil C12 a compresión

Para el perfil C16 se obtienen las siguientes gráficas:

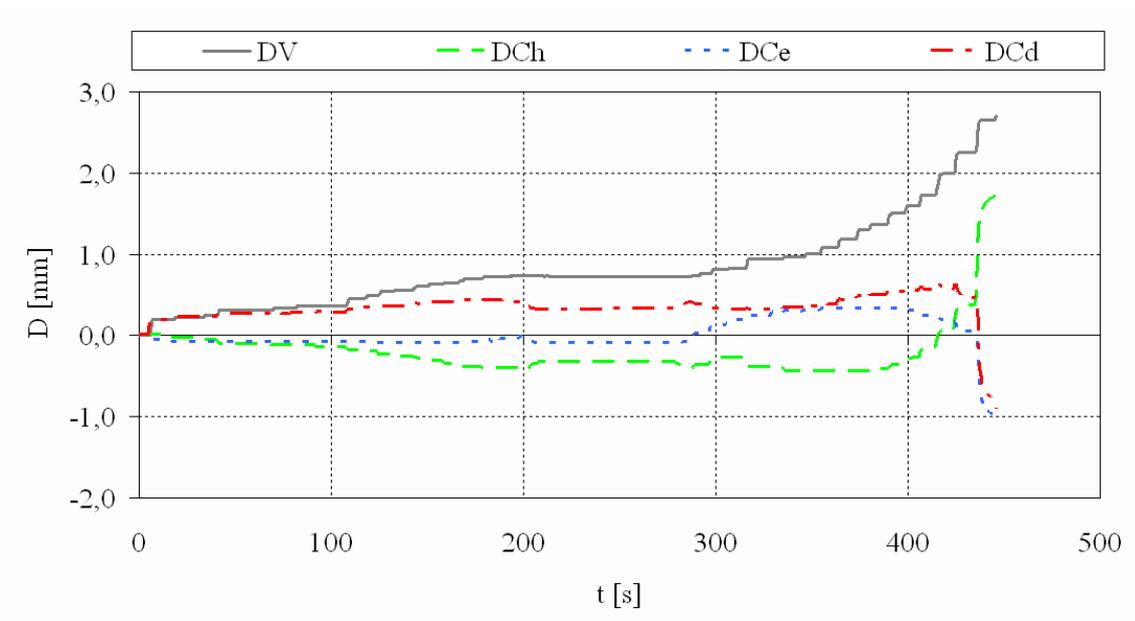
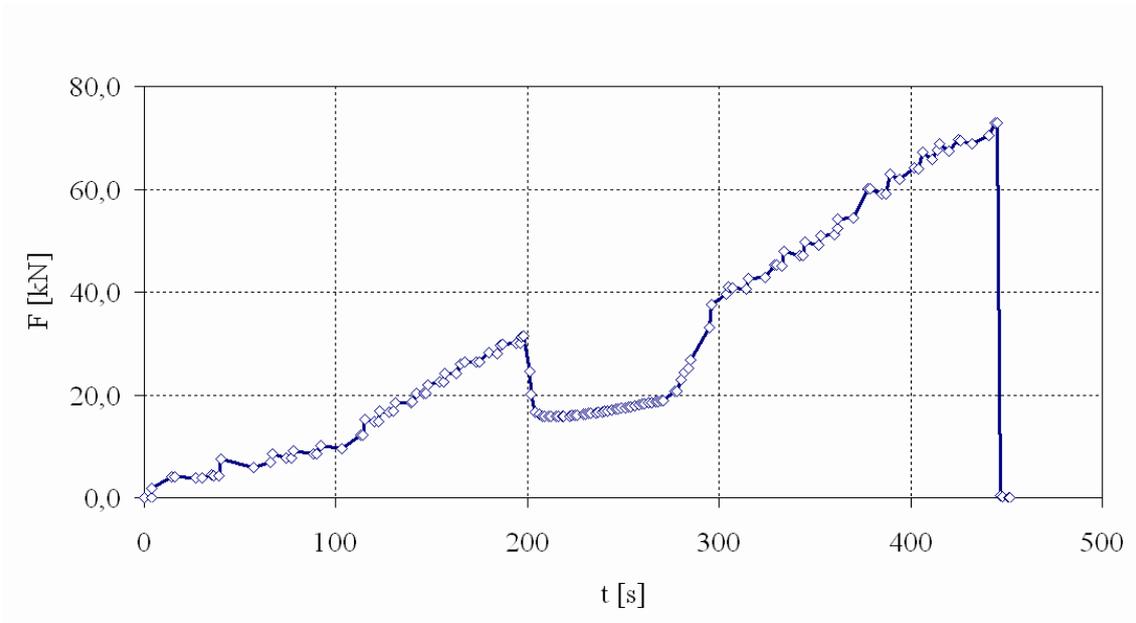
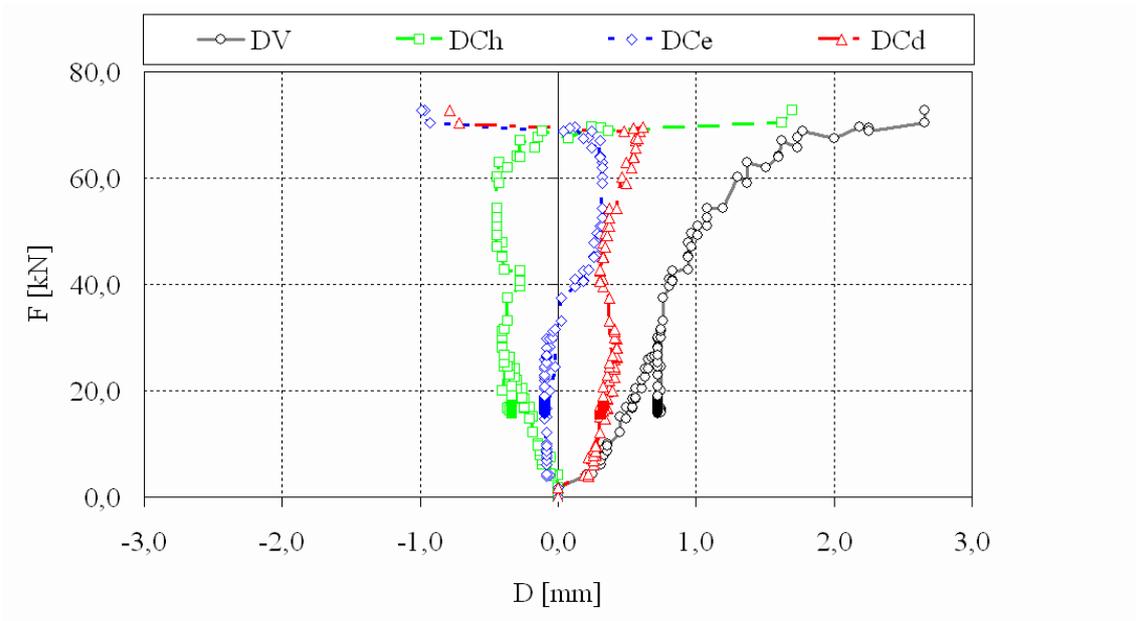


Figura 81- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada



**Figura 82- fuerza aplicada a lo largo del tiempo**

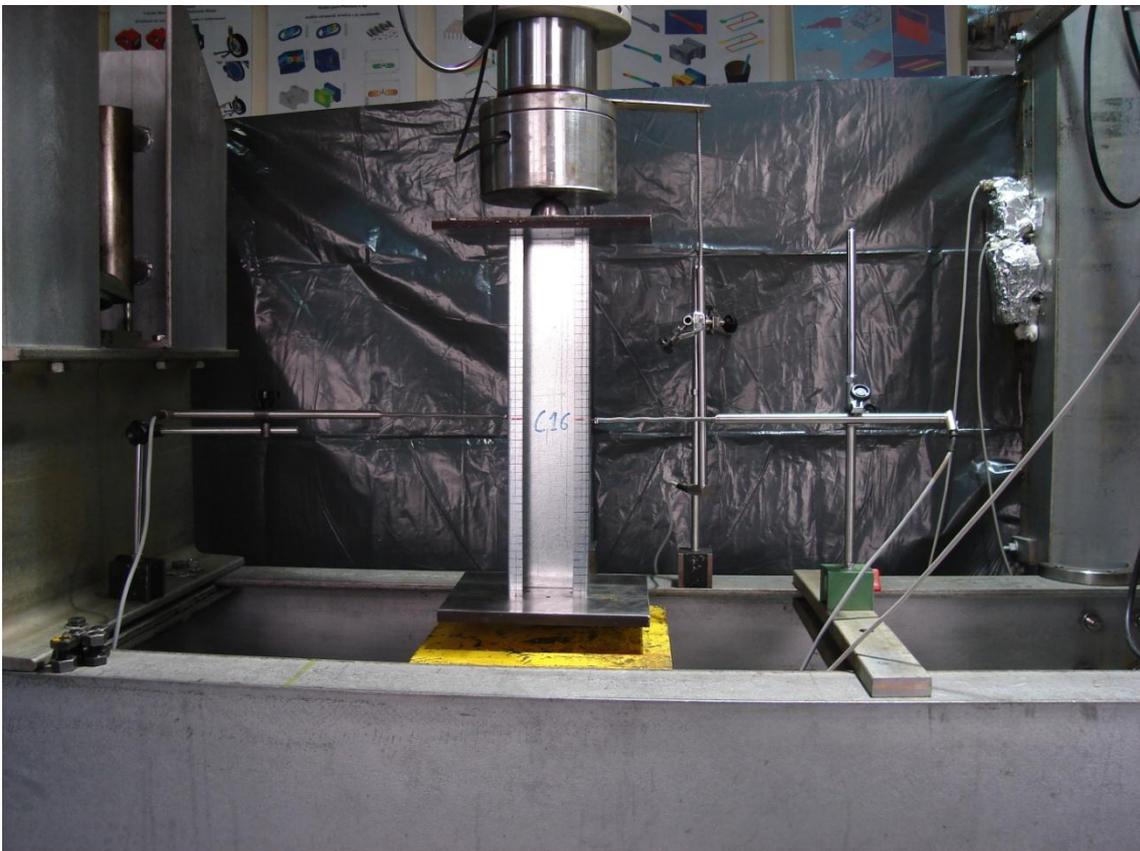


**Figura 83- desplazamientos horizontales y verticales en función de la carga aplicada**

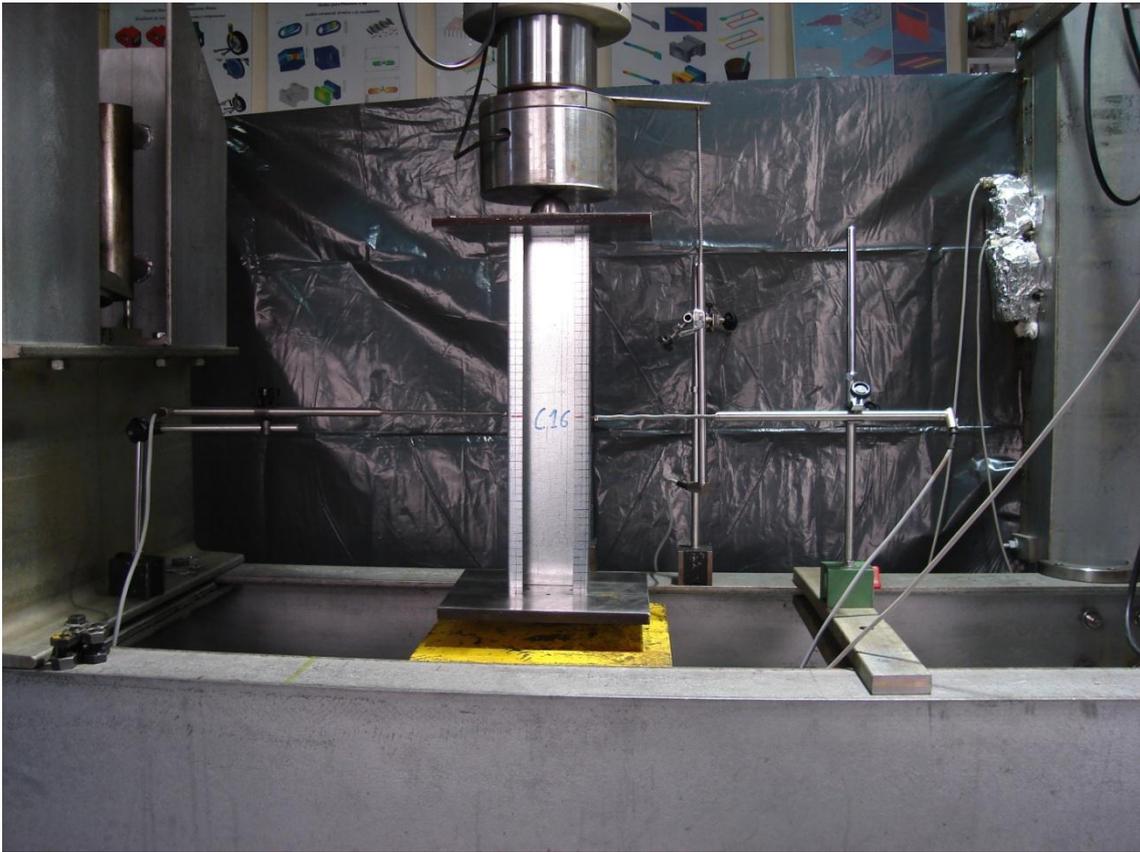
La Figura 84, Figura 85, Figura 86, Figura 87 muestran el efecto de compresión en función de la carga:



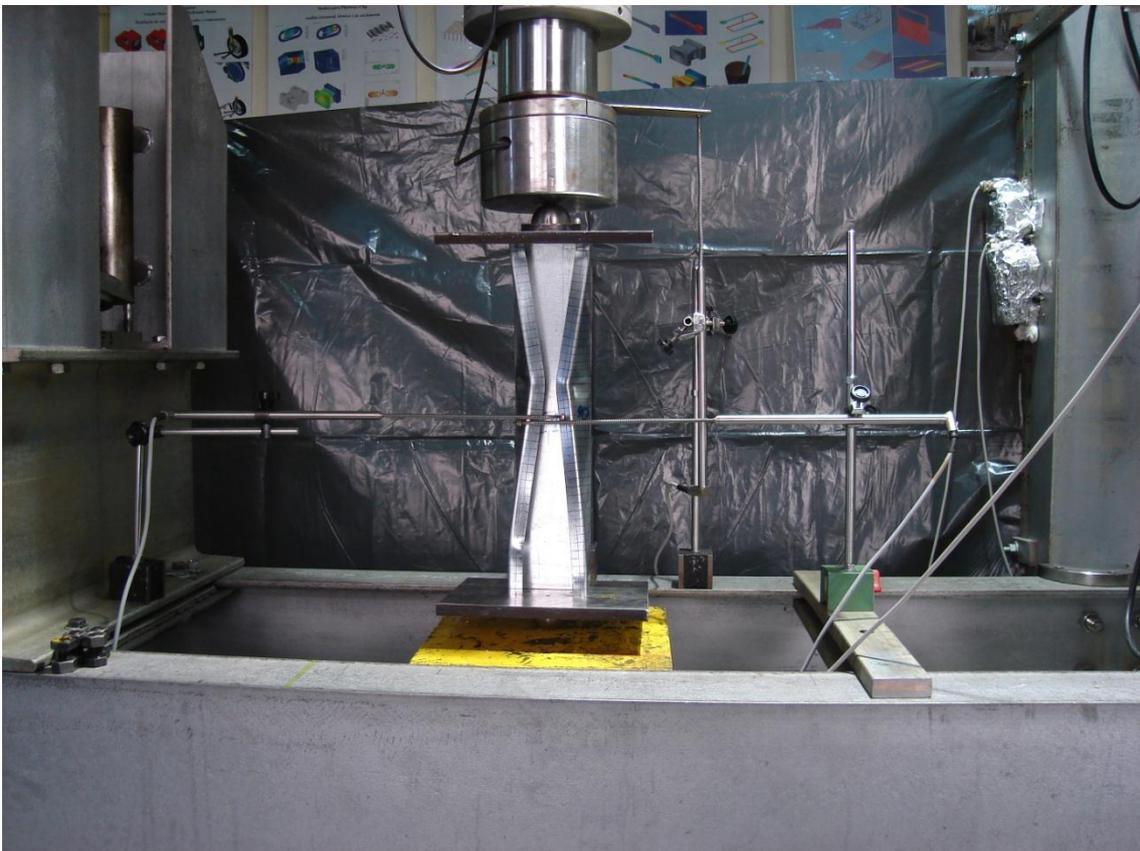
**Figura 84- Estado 1 del perfil C 16a a compresión**



**Figura 85- Estado 2 del perfil C 16a a compresión**



**Figura 86- Estado 3 del perfil C16 a compresión**



**Figura 87- Estado 4 del perfil C16 a compresión**

## Capítulo 5

### 5 Comparación de resultados y consideraciones finales:

Para los ensayos de tracción se ha obtenido la tabla representando la media, el máximo, el mínimo, y la desviación típica de los resultados obtenidos para los espesores de 1,5 y 2 mm.

- Espesor 1,5 mm:

	<b>E</b> <b>GPa</b>	<b>Fm</b> <b>kN</b>	<b>Rp0.2</b> <b>MPa</b>	<b>Rm</b> <b>MPa</b>	<b>ReH</b> <b>MPa</b>	<b>ReL</b> <b>MPa</b>	<b>At</b> <b>%</b>
Media	186,484	5,88235	231,756	309,278	232,266	231,407	34,0358
Máximo	228,894	6,6039	272,797	347,351	273,337	273,337	47,346
Mínimo	148,073	4,9664	181,611	266,652	181,901	181,901	29,02
Desv Típica	20,0298	0,45896	27,8373	24,2146	28,2966	28,1934	5,67819

- Espesor 2 mm:

	<b>E</b> <b>GPa</b>	<b>Fm</b> <b>kN</b>	<b>Rp0.2</b> <b>MPa</b>	<b>Rm</b> <b>MPa</b>	<b>ReH</b> <b>MPa</b>	<b>ReL</b> <b>MPa</b>	<b>At</b> <b>%</b>
Media	179,943	7,96392	238,145	315,027	239,647	237,957	36,163
Máximo	266	8,8589	268,167	347,04	277,04	276,82	52,044
Mínimo	139,629	7,318	218,5	296,356	220,062	219,227	28,71
Desv Típica	28,6636	0,39667	14,8914	14,8535	16,2641	15,8162	5,02231

o

Como se ve en los resultados la carga de tracción máxima que soportan las probetas es menor para los perfiles de 1,5 mm que de 2mm, y debido a esto la tensión de fluencia también lo es.

Para los ensayos de compresión la deformación del perfil hacia dentro o hacia afuera dependerá de las imperfecciones iniciales que tenga, pero tenderá a deformarse y pandearse por la mitad de su longitud como muestra la Figura 88.



**Figura 88- deformación del perfil después de un ensayo de compresión**

Como se ve en los resultados para un espesor de 2mm la carga aplicada superará los 7900 N, mientras que para un espesor 1,5mm se aproximará a los 7500N. La carga también será mayor sea el valor de h del perfil.

Perfil	t	h	Resultados nominales				Resultados experimentales				
			E	$f_y$	Nb,rd,z	Nc, rd	E	$f_y$	Nb,rd,z	Nc,rd	F <sub>Exp</sub> [kN]
C8	2	100	210	284	113,4	116,10	179,94	239,64	97,7	100,1	84,78
C2	2	150	210	284	114	116	179,94	239,64	101,60	103,40	79,10
C7	2	200	210	284	130,1	132,4	179,94	239,64	107,70	117,30	91,62
C16	1,5	100	210	284	66,54	67,37	186,11	282,11	69,8	69,9	72,82
C12	1,5	150	210	284	65,84	65,84	186,11	282,11	68,29	68,68	74,48
C11	1,5	200	210	284	72,12	72,12	186,11	282,11	71,64	71,64	75,52

Comparando los resultados nominales con la carga aplicada a compresión para un espesor se puede decir que:

Para un espesor de 2mm la carga de compresión que soportará el perfil será mayor que como se ha comprobado experimentalmente aumentando alrededor de un 22%.

Para un espesor de 1,5mm la carga de compresión que soportará el perfil según los cálculos teóricos será menor que como se ha comprobado experimentalmente reduciéndolo alrededor de un 7%.

Comparando los resultados experimentales obtenidos mediante los ensayos de tracción con su correspondiente tensión de fluencia y modulo de elasticidad, con la carga aplicada a compresión se puede decir que:

Para un espesor de 2mm la carga de compresión que soportará el perfil será mayor que como se ha comprobado experimentalmente aumentando alrededor de un 15%.

Para un espesor de 1,5mm la carga de compresión que soportará el perfil según los cálculos teóricos será menor que como se ha comprobado experimentalmente reduciéndolo alrededor de un 5%.

Conociendo las propiedades mecánicas del acero mediante ensayos experimentales obtenemos resultados mas próximos a la realidad, que con los valores nominales dados por el fabricante.

## **5.1 Trabajos futuros**

Para trabajos de futuro se ha desarrollado un nuevo montaje experimental para la medición de imperfecciones geométricas como representa la Figura 89 y Figura 90.



Figura 89- Setup para la medición de imperfecciones

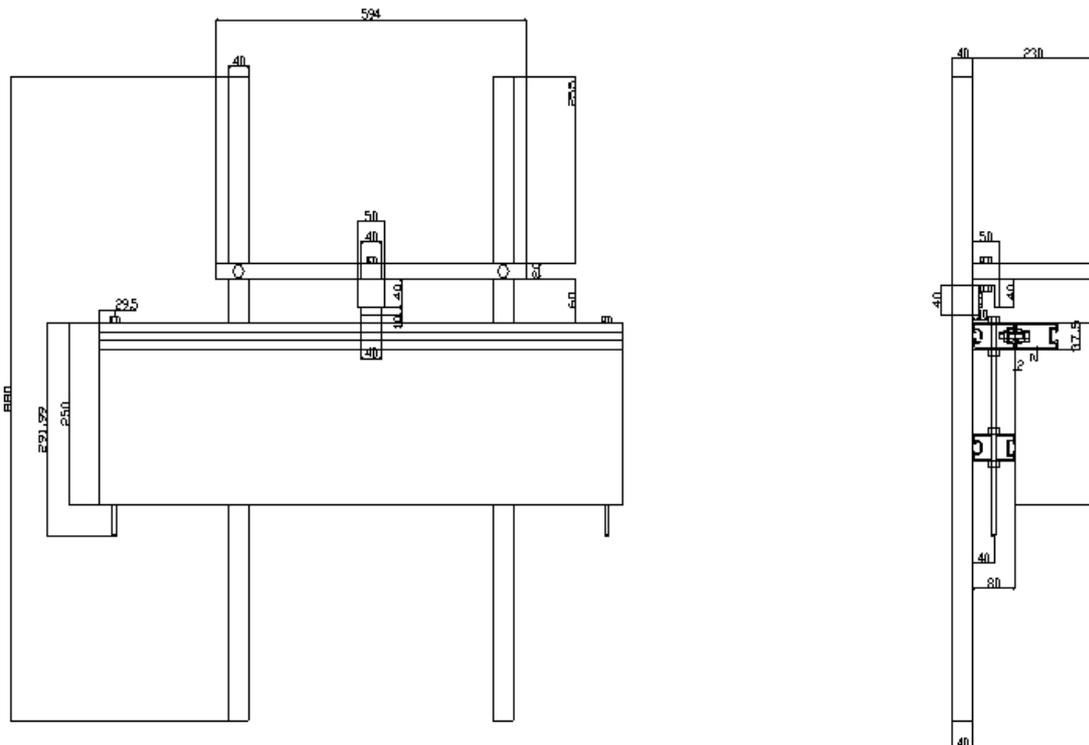


Figura 90- Setup para la medición de imperfecciones

Por ultimo el setup experimental para el estudio de los elementos largos a compresión a temperatura ambiente y temperatura elevada, como se representa en la Figura 91 y Figura 92.



Figura 91- Setup de análisis de elementos a compresión

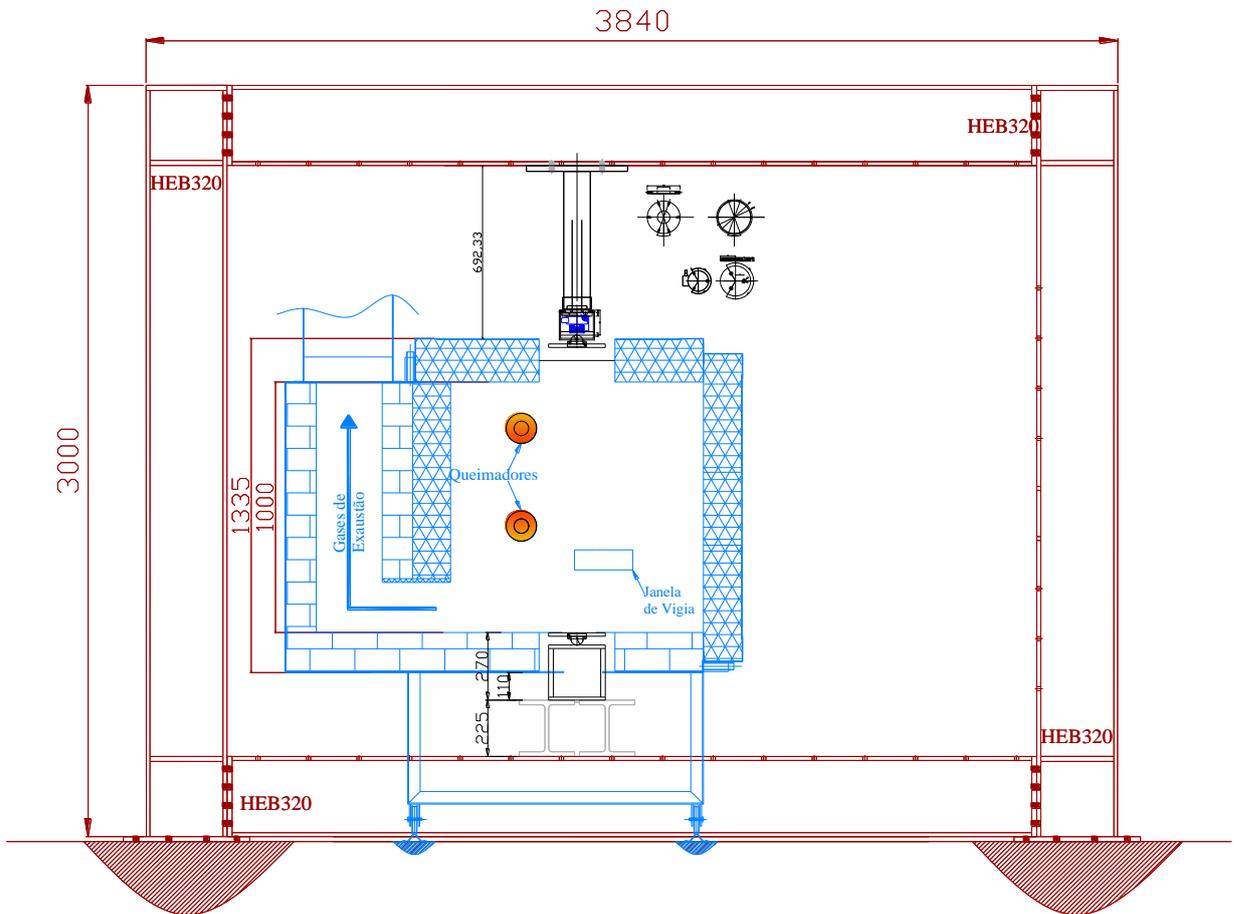


Figura 92-Montaje del horno para los ensayos a compresión

Comparación de resultados y consideraciones finales:

## REFERENCIAS

- [1]. Davim , J.P. y Magalhaes A.G. Ensaio Mecanicos e Tecnológicos. Estante Editora.
- [2]. Pinto Rua, André – Tese de Mestrado sobre Estabilidade Local de Perfis de Aço Enformados a Frio, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Outubro 2010;
- [3]. LSK Jornada Técnica, “Utilização de produtos em aço enformados a frio na construção”-27 de Outubro de 2006, Feira de Concreta, Porto;
- [4]. <http://www.gestedi.pt/pt/index.php> consulta realizada el día 30/04/2012 a las 18h 13m;
- [5].<http://www.engenhariacivil.com/dimensionamento-ec3-estruturas-aco-leve>, consulta realizada el día 30/04/2012, a las 18h 53m;
- [6]. Veríssimo, Hugo- Tese de Mestrado sobre Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Enformado a Frio de acordo com o Eurocódigo 3, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Outubro 2008;
- [7]. Barreta Carlos, Tese de Mestrado “Interacção entre instabilidade local-de-placa e distorcional em colunas de aço enformado a frio secção em Z”, IST Universidade Técnica de Lisboa, Junho de 2011.
- [8] Mesquita Luís, Tese de Mestrado “ Instabilidade Termo-Mecânica de Vigas Submetidas a Temperaturas Elevadas- Estudo Numérico e Experimental” FEUP, Julho de 2004
- [9] Vila Real, Paulo”Incêndio em Estruturas Metálicas – cálculo estrutural”. Edições Orion 1ª edição- Novembro de 2003;
- [10] Mesquita Luís, Tese de Mestrado “ Instabilidade Termo-Mecânica de Vigas Submetidas a Temperaturas Elevadas- Estudo Numérico e Experimental” FEUP, Julho de 2004.
- [11] Olga Garzom, Tim Heistermann and Milan Veljkovic- “A study of na axially compressed cold –formed folded plate”, Lulea University of Technology

- [12] Nirosha Dolamune Kankanamge and Mahem Mahendran- “Lateral torsional buckling behaviour of cold-formed steel beams at elevated temperatures”, Faculty of Built Environment and Engineering Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- [13] Eliane S. dos Santos, Pedro B.Dinis, Eduardo de M.Batista and Dinar Camotim- “Local-distorsional-global mode interaction in lipped-channel columns: experiemental results numerical simulations and desingn considerations”, Civil Engineering Program COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil, Department of Civil Enginneering and Architecture, ICIST/IST, Technical University of Lisbon, Portugal
- [14] Ju Chen, Ben Young – “Corner properties of cold - formed steel sections at elevated temperatures” Thin - <Walled Structures 44 (2006) 216 – 223, Department of civil Engineering, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong, China
- [15] M. Feng, Y.C Wang – “An experimental study of loaded full-scale cold-formed thin-walled steel structural panels under fire conditions”, Fire Safety Journal 40 (2005) 43 – 63, Manchester Centre for Civil and Construction Engineering, UMIST and University of Manchester
- [16]. Silva, Luís Simões; Gervásio, Helena – Manual de Dimensionamento de estruturas Metálicas: Métodos avançados. Edição: CMM. Coimbra, Portugal, Fevereiro 2007;
- [17]. Simões, Rui A. D. – Manual de Dimensionamento de estruturas Metálicas. 2ª Edição: CMM. Coimbra, Portugal, Fevereiro 2007.
- [18].<http://www.engenhariacivil.com/dimensionamento-ec3-estruturas-aco-leve>,consulta realizada el día 30/04/2012, a las 18h 53m;
- [19]. EN 1993-1-1; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”; Maio, 2005;
- [20]. EN 1993-1-3; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting”; Março, 2004;
- [21]. EN 1993-1-5; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-5: Plated structural elements”; Setembro, 2003
- [22]. EN 1993-1-2; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: Geral rules- Structural fire design” Março 2010;

## Apendice A

### Codigo Matlab de verificación de seguridad a temperatura ambiente:

```
function
[heff,ceff1,ceff2,beff1,beff2,Ieff_y,Ieff_z,Aeff,Nc_rd,Weff_y_min,Ncr_y,Ncr_z,Nb_rd,Abruta,sigma_cr_
1,sigma_cr_2]=compressao(h,b1,b2,c1,c2,tnom,t,fyb,E,nu,gamma_m0,L,C,Z)

% dados geométricos em m
h=h/1000;
b1=b1/1000;
b2=b2/1000;
c1=c1/1000;
c2=c2/1000;
tnom=tnom/1000;
t=t/1000

%r=r/1000;

hp=h-tnom;
%bp=b-tnom
bp1=b1-tnom; bp2=b2-tnom;
cp1=c1-tnom/2; cp2=c2-tnom/2;
bpc1=cp1;bpc2=cp2;

if bp1/tnom>60 || bp2/tnom>60,
    error(dlg('A secção tem prop. geométricas que resultam em: bp/tnom>60','Erro!'));
return;
```

```

end

if cp1/tnom>50 || cp2/tnom>50,
    errordlg('A secção tem prop. geométricas que resultam em: cp/tnom>50','Erro!');
    return;
end

if hp/tnom>500*sin(pi/2)
    errordlg('A secção tem prop. geométricas que resultam em: hp/tnom>500.sin(phi)','Erro!');
    return;
end

if cp1/bp1>0.6 || cp1/bp1<0.2
    errordlg('A secção tem prop. geométricas que resultam em: 0.2<= c/b <=0.6','Erro!');
    return;
end

if cp2/bp2>0.6 || cp2/bp2<0.2
    errordlg('A secção tem prop. geométricas que resultam em: 0.2<= c/b <=0.6','Erro!');
    return;
end

gamma_m1=gamma_m0;

Abruta=t*(cp1+cp2+bp1+bp2+hp)
epsilon=sqrt(235e6/fyb)

if get(C,'value')==1
    Centroide_y=(bp1*t*bp1/2+cp1*t*bp1+bp2*t*bp2/2+cp2*t*bp2)/Abruta
elseif get(Z,'value')==1
    Z_Centroide_y=(bp1*t*bp1/2+cp1*t*bp1-(bp2*t*bp2/2+cp2*t*bp2))/Abruta
else
    errordlg('Não é uma secção C ou Z','Erro!');
    return;
end

Centroide_z=(hp*t*hp/2+cp2*t*cp2/2+bp1*t*hp+cp1*t*(hp-cp1/2))/Abruta

```

```

fprintf('Propiedades efectivas do reforço superior \n')
%% % Propiedades efectivas do reforço superior
    % larguras efectivas do banço beff
    % razão da tensões

psi=1;
if(psi>0 & psi<1)
k_sigma=0.82/(psi+1.05)
elseif psi==0
    k_sigma=7.81
elseif psi==1
    k_sigma=4
elseif psi==-1
k_sigma=23.9
elseif (psi<0 & psi>-1)
    k_sigma=(7.81-6.29*psi+9.78*psi^2)
elseif (psi<-1 & psi>-3)
    k_sigma=(5.98*(1-psi)^2)
end

lambda_p_baz_1=(bp1/t)/(28.4*epsilon*sqrt(k_sigma))
rho1=(lambda_p_baz_1-0.055*(3+psi))/lambda_p_baz_1^2
if rho1>1, rho1=1, end
beff1=rho1*bp1
be11=beff1/2
be12=beff1/2

% larguras efectivas do reforço superior Ceff
if (bpc1/bp1) <=0.35
k_sigma=0.5
elseif ((bpc1/bp1)<=0.6 & (bpc1/bp1)>=0.35)
k_sigma=0.5+0.83*((bpc1/bp1-0.35)^2)^(1/3)
end

lambda_p_ref_1=(bpc1/t)/(28.4*epsilon*sqrt(k_sigma))

```

```

rho1=(lambda_p_ref_1-0.188)/lambda_p_ref_1^2
if rho1>1, rho1=1, end
ceff1=rho1*bpc1

fprintf('Propriedades efectivas do reforço inferior \n')
%%% Propriedades efectivas do reforço inferior
% larguras efectivas do banzo beff
% razão da tensões
psi=1;

if (psi>0 & psi<1)
k_sigma=0.82/(psi+1.05)
elseif psi==0
k_sigma=7.81
elseif psi==1
k_sigma=4
elseif psi==-1
k_sigma=23.9
elseif (psi<0 & psi>-1)
k_sigma=(7.81-6.29*psi+9.78*psi^2)
elseif (psi<-1 & psi>-3)
k_sigma=(5.98*(1-psi)^2)
end

lambda_p_baz_2=(bp2/t)/(28.4*epsilon*sqrt(k_sigma))
rho2=(lambda_p_baz_2-0.055*(3+psi))/lambda_p_baz_2^2
if rho2>1, rho2=1, end
beff2=rho2*bp2
be21=beff2/2
be22=beff2/2

% larguras efectivas do reforço inferior Ceff
if (bpc2/bp2) <=0.35
k_sigma=0.5
elseif ((bpc2/bp2)<=0.6 & (bpc2/bp2)>=0.35)
k_sigma=0.5+0.83*((bpc2/bp2-0.35)^2)^(1/3)
end

```

```
lambda_p_ref_2=(bpc2/t)/(28.4*epsilon*sqrt(k_sigma))
rho2=(lambda_p_ref_2-0.188)/lambda_p_ref_2^2
if rho2>1, rho2=1, end
ceff2=rho2*bpc2
```

```
% Section properties
```

```
% area do reforço
```

```
As1=t*(be12+ceff1)
As2=t*(be22+ceff2)
```

```
b1=bp1-(be12*t*be12/2)/((be12+ceff1)*t)
b2=bp2-(be22*t*be22/2)/((be22+ceff2)*t)
```

```
kf1=As2/As1 % para flexão kf=0
kf2=As1/As2 % para flexão kf=0
```

```
% rigidez da mola superior
```

```
K1=(E*t^3/(4*(1-nu^2)))*1/(b1^2*hp+b1^3+0.5*b1*b2*hp*kf1) % [N/mm]
```

```
% momento de inércia
```

```
Is1=((be12*t^3/12)+((ceff1^3*t)/12)+be12*t*(ceff1^2/(2*(be12+ceff1)))^2+ceff1*t*(ceff1/2-
(ceff1^2/(2*(be12+ceff1))))^2) % [mm^4]
```

```
% tensão critica
```

```
sigma_cr_1=2*sqrt(K1*E*Is1)/As1 % MPa
```

```
% rigidez da mola inferior
```

```
K2=(E*t^3/(4*(1-nu^2)))*1/(b2^2*hp+b2^3+0.5*b1*b2*hp*kf2) % [N/mm]
```

```
% momento de inércia
```

```
Is2=(be22*t^3/12)+(ceff2^3*t/12)+be22*t*(ceff2^2/(2*(be22+ceff2)))^2+ceff2*t*(ceff2/2-
(ceff2^2/(2*(be22+ceff2))))^2) % [mm^4]
```

```
% tensão critica
```

```
sigma_cr_2=2*sqrt(K2*E*Is2)/As2 % MPa
```

```

%%% calculo do factor de redução
% Esbelteza relativa
lambda_d1=sqrt(fyb/sigma_cr_1)
lambda_d2=sqrt(fyb/sigma_cr_2)
%factor de redução
if lambda_d1<=0.65
qsi_d1=1
elseif (lambda_d1<1.38 & lambda_d1>0.65)
qsi_d1=1.47-0.723*lambda_d1
else
qsi_d1=0.66/lambda_d1
end
if qsi_d1>1
fprintf('Factor de redução > 1 \n')

end

%factor de redução
if lambda_d2<=0.65
qsi_d2=1
elseif (lambda_d2<1.38 & lambda_d2>0.65)
qsi_d2=1.47-0.723*lambda_d2
else
qsi_d2=0.66/lambda_d2
end
if qsi_d2>1
fprintf('Factor de redução > 1 \n')

end

%area reduzida do reforço
As1=t*(be12+ceff1)*qsi_d1
As2=t*(be22+ceff2)*qsi_d2

Factor_red_2(1)=qsi_d2
Factor_red_1(1)=qsi_d1

```

```

%% Processo iterativo do banzo superior
fprintf('Processo iterativo \n')
for i=1:3
%% Processo iterativo do banzo superior
% larguras efectivas do reforço Ceff

lambda_p_ref_red_1=lambda_p_ref_1*sqrt(qsi_d1)
rho1=(lambda_p_ref_red_1-0.188)/lambda_p_ref_red_1^2 % external elements
if rho1>1, rho1=1, end
ceff1=rho1*bpc1

% larguras efectivas do banzo beff
psi=1;

lambda_p_baz_red_1=lambda_p_baz_1*sqrt(qsi_d1)
rho1=(lambda_p_baz_red_1-0.055*(3+psi))/lambda_p_baz_red_1^2
if rho1>1, rho1=1, end
% beff1=rho1*bp1
be12=0.5*rho1*bp1

%% Processo iterativo do banzo inferior
% larguras efectivas do reforço Ceff

lambda_p_ref_red_2=lambda_p_ref_2*sqrt(qsi_d2)
rho2=(lambda_p_ref_red_2-0.188)/lambda_p_ref_red_2^2; % external elements
if rho2>1, rho2=1, end
ceff2=rho2*bpc2

% larguras efectivas do banzo beff
psi=1;

lambda_p_baz_red_2=lambda_p_baz_2*sqrt(qsi_d2)
rho2=(lambda_p_baz_red_2-0.055*(3+psi))/lambda_p_baz_red_2^2;
if rho2>1, rho2=1, end
    % beff2=rho2*bp2
    be22=0.5*rho2*bp2

```

```

%area do reforço
As1=t*(be12+ceff1)
As2=t*(be22+ceff2)
b1=bp1-(be12*t*be12/2)/((be12+ceff1)*t)
b2=bp2-(be22*t*be22/2)/((be22+ceff2)*t)

kf1=As2/As1 % para flexão kf=0
kf2=As1/As2 % para flexão kf=0

%rigidez da mola superior
K1=(E*t^3/(4*(1-nu^2)))*1/(b1^2*hp+b1^3+0.5*b1*b2*hp*kf1) % [N/mm]
% momento de inércia
Is1=((be12*t^3/12)+((ceff1^3*t)/12)+be12*t*(ceff1^2/(2*(be12+ceff1)))^2+ceff1*t*(ceff1/2-
(ceff1^2/(2*(be12+ceff1))))^2) % [mm^4]

% tensão critica
sigma_cr_1=2*sqrt(K1*E*Is1)/As1 % MPa

%rigidez da mola inferior
K2=(E*t^3/(4*(1-nu^2)))*1/(b2^2*hp+b2^3+0.5*b1*b2*hp*kf2) % [N/mm]

% momento de inércia
Is2=(be22*t^3/12)+((ceff2^3*t)/12)+be22*t*(ceff2^2/(2*(be22+ceff2)))^2+ceff2*t*(ceff2/2-
(ceff2^2/(2*(be22+ceff2))))^2) % [mm^4]

% tensão critica
sigma_cr_2=2*sqrt(K2*E*Is2)/As2 % MPa

%%% calculo do factor de redução
% Esbelteza relativa
lambda_d1=sqrt(fyb/sigma_cr_1)
lambda_d2=sqrt(fyb/sigma_cr_2)
%factor de redução
if lambda_d1<=0.65
    qsi_d1=1

```

```

elseif (lambda_d1<1.38 & lambda_d1>0.65)
    qsi_d1=1.47-0.723*lambda_d1
else
    qsi_d1=0.66/lambda_d1
end
if qsi_d1>1
    fprintf('Factor de redução > 1 \n')
    break
end

%factor de redução
if lambda_d2<=0.65
    qsi_d2=1
elseif (lambda_d2<1.38 & lambda_d2>0.65)
    qsi_d2=1.47-0.723*lambda_d2
else
    qsi_d2=0.66/lambda_d2
end
if qsi_d2>1
    fprintf('Factor de redução > 1 \n')
    break
end

%area reduzida do reforço
As1=t*(be12+ceff1)*qsi_d1
As2=t*(be22+ceff2)*qsi_d2

Factor_red_2(i+1)=qsi_d2
Factor_red_1(i+1)=qsi_d1

if (Factor_red_1(i+1)-Factor_red_1(i)==0 | Factor_red_1(i+1)/Factor_red_1(i)==0)
    fprintf('Processo iterativo convergiu \n')
    break
end
end

fprintf('propriedades efectivas da alma \n')

```

```

% propriedades efectivas da alma
psi=1 % alma à compressão
if (psi>0 & psi<1)
k_sigma=8.2/(psi+1.05)
elseif psi==0
    k_sigma=7.81
elseif psi==1
    k_sigma=4
elseif psi==-1
k_sigma=23.9
elseif (psi<0 & psi>-1)
    k_sigma=(7.81-6.29*psi+9.78*psi^2)
elseif (psi<-1 & psi>-3)
    k_sigma=(5.98*(1-psi)^2)
end
lambda_p_h=(hp/t)/(28.4*epsilon*sqrt(k_sigma))
rho=(lambda_p_h-0.055*(3+psi))/lambda_p_h^2
heff=rho*hp
he1=heff/2
he2=heff/2

fprintf('Propriedades efectivas da Secção \n')
% propriedades efectivas da secção
Aeff=t*(be11+be21+he1+he2+(be12+ceff1)*qsi_d1+(be22+ceff2)*qsi_d2)

% posição do centroide DA AREA EFFECTIVA
ZG1=t*( (ceff2*qsi_d2*(hp-ceff2/2)) + hp*(be22*qsi_d2+be21) + he2*(hp-he2/2) + he1^2/2+
(ceff1^2*qsi_d1/2))/Aeff
ZG2=hp-ZG1

% momento de inércia efectivo segundo eixo paralelo ao banzo e a passar no centroide
Ieff_y=(he1^3*t/12)+(be11*t^3/12)+(be12*(qsi_d1*t)^3/12)+(ceff1^3*(qsi_d1*t)/12)+...
    (he2^3*t/12)+(be21*t^3/12)+(be22*(qsi_d2*t)^3/12)+(ceff2^3*(qsi_d2*t)/12)+...
    (he1*t)*(ZG1-he1/2)^2+(be11*t)*(ZG1)^2+(be12*(qsi_d1*t))*(ZG1)^2+(ceff1*(qsi_d1*t))*(ZG1-
ceff1/2)^2+...
    (he2*t)*(ZG2-he2/2)^2+(be21*t)*(ZG2)^2+(be22*(qsi_d2*t))*(ZG2)^2+(ceff2*(qsi_d2*t))*(ZG2-
ceff2/2)^2

```

% posição do centroide DA AREA BRUTA

$C_z = (hp \cdot t \cdot hp/2 + cp2 \cdot t \cdot cp2/2 + bp1 \cdot t \cdot hp + cp1 \cdot t \cdot (hp - cp1/2)) / A_{bruta}$

$C_{upper\_z} = hp - C_z;$

% momento de inércia DA AREA BRUTA segundo eixo paralelo ao banzo e a passar no centroide

$I_y = (hp^3 \cdot t/12) + (bp1 \cdot t^3/12) + (bp2 \cdot t^3/12) + (cp1^3 \cdot t/12) + (cp1^3 \cdot t/12) + \dots$

$(hp \cdot t) \cdot (C_z - hp/2)^2 + (bp1 \cdot t) \cdot (C_z)^2 + (cp2 \cdot t) \cdot (C_z - cp2/2)^2 + \dots$

$+ (bp2 \cdot t) \cdot (C_{upper\_z})^2 + (cp1 \cdot t) \cdot (C_{upper\_z} - cp1/2)^2$

% modulo efectivo  $I/(h/2)$

$W_{eff\_y\_top} = I_{eff\_y} / ZG1$

$W_{eff\_y\_bot} = I_{eff\_y} / ZG2$

$W_{eff\_y\_min} = \min(W_{eff\_y\_top}, W_{eff\_y\_bot})$

% Verificação dos ELU

% Resistência da Secção

$N_{c\_rd} = (A_{eff} \cdot f_{yb}) / (\gamma_{m0})$

% resistência à encurvadura

% solicitação A compressão em relação ao eixo y

disp('A aplicar a curva de encurvadura b. Secções C e Z com reforços')

alfa=0.34 % tabela 6.3

Le=L

$\% N_{cr\_y} = ((\pi^2 \cdot E \cdot I_{eff\_y}) / (Le^2))$

$N_{cr\_y} = ((\pi^2 \cdot E \cdot I_y) / (Le^2))$  % gross properties

$\lambda_{relativo\_y} = \sqrt{(A_{eff} \cdot f_{yb}) / (N_{cr\_y})}$

$\eta = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_{relativo\_y} - 0.2) + (\lambda_{relativo\_y}^2))$

$\eta_{y} = 1 / (\eta + (\sqrt{\eta^2 - \lambda_{relativo\_y}^2}))$

if ( $\eta_{y} > 1$ )

$\eta_{y} = 1$

end

$$Nb\_rd\_y=(\text{qsi\_y}*\text{Aeff}*f_yb)/(\text{gamma\_m1})$$

%solicitação à compressão em relação ao eixo z

% Centro geometrico seg y da area efectiva

if get(C,'value')==1

$$y\_barra=(\text{be11}/2*\text{be11}*t+(\text{bp1}-(\text{be12}/2))*(\text{be12}*\text{qsi\_d1}*t)+\text{bp1}*(\text{bpc1}*\text{qsi\_d1}*t)+\dots \\ \text{be21}/2*\text{be21}*t+(\text{bp2}-(\text{be22}/2))*(\text{be22}*\text{qsi\_d2}*t)+\text{bp2}*(\text{bpc2}*\text{qsi\_d2}*t) )/\text{Aeff}$$

% Centro geometrico seg y da area bruta

$$C\_y=(\text{bp1}*t*\text{bp1}/2+\text{cp1}*t*\text{bp1}+\text{bp2}*t*\text{bp2}/2+\text{cp2}*t*\text{bp2})/\text{Abruta}$$

$$\text{Ieff\_z}=(\text{ceff1}*(\text{qsi\_d1}*t)^3/12)+(\text{ceff1}*\text{qsi\_d1}*t)*(\text{bp1}- \\ y\_barra)^2+(\text{qsi\_d1}*t*\text{be12}^3)/12+(\text{be12}*\text{qsi\_d1}*t)*(\text{bp1}-y\_barra- \\ \text{be12}/2)^2+(t*\text{be11}^3)/12+(t*\text{be11})*(y\_barra-\text{be11}/2)^2+\dots$$

$$((\text{ceff2}*(\text{qsi\_d2}*t)^3/12)+(\text{ceff2}*\text{qsi\_d2}*t)*(\text{bp2}- \\ y\_barra)^2+(\text{qsi\_d2}*t*\text{be22}^3)/12+(\text{be22}*\text{qsi\_d2}*t)*(\text{bp2}-y\_barra- \\ \text{be22}/2)^2+(t*\text{be21}^3)/12+(t*\text{be21})*(y\_barra-\text{be21}/2)^2+\dots \\ +(he1*t^3)/12+(he1*t)*y\_barra^2+(he2*t^3)/12+(he2*t)*y\_barra^2$$

$$I\_z=(\text{cp1}*t^3/12)+(\text{cp1}*t)*(\text{bp1}-C\_y)^2+(t*\text{bp1}^3)/12+(\text{bp1}*t)*(\text{bp1}-C\_y-\text{bp1}/2)^2+\dots \\ ((\text{cp2}*t^3/12)+(\text{cp2}*t)*(\text{bp2}-C\_y)^2+(t*\text{bp2}^3)/12+(\text{bp2}*t)*(\text{bp2}-C\_y-\text{bp2}/2)^2+\dots \\ +(hp*t^3)/12+(hp*t)*C\_y^2$$

elseif get(Z,'value')==1

$$y\_barra=(\text{be11}/2*\text{be11}*t+(\text{bp1}-(\text{be12}/2))*(\text{be12}*\text{qsi\_d1}*t)+\text{bp1}*(\text{bpc1}*\text{qsi\_d1}*t)-\dots \\ \text{be21}/2*\text{be21}*t+(\text{bp2}-(\text{be22}/2))*(\text{be22}*\text{qsi\_d2}*t)-\text{bp2}*(\text{bpc2}*\text{qsi\_d2}*t) )/\text{Aeff}$$

% Centro geometrico seg y da area bruta

$$C\_y=(\text{bp1}*t*\text{bp1}/2+\text{cp1}*t*\text{bp1}-\text{bp2}*t*\text{bp2}/2-\text{cp2}*t*\text{bp2})/\text{Abruta}$$

$$\text{Ieff\_z}=(\text{ceff1}*(\text{qsi\_d1}*t)^3/12)+(\text{ceff1}*\text{qsi\_d1}*t)*(\text{bp1}- \\ y\_barra)^2+(\text{qsi\_d1}*t*\text{be12}^3)/12+(\text{be12}*\text{qsi\_d1}*t)*(\text{bp1}-y\_barra- \\ \text{be12}/2)^2+(t*\text{be11}^3)/12+(t*\text{be11})*(y\_barra-\text{be11}/2)^2+\dots$$

$$((\text{ceff2}*(\text{qsi\_d2}*t)^3/12)+(\text{ceff2}*\text{qsi\_d2}*t)*(\text{bp2}+y\_barra)^2+(\text{qsi\_d2}*t*\text{be22}^3)/12+(\text{be22}*\text{qsi\_d2}*t)* \\ \text{bp2}+y\_barra-\text{be22}/2)^2+(t*\text{be21}^3)/12+(t*\text{be21})*(y\_barra+\text{be21}/2)^2+\dots \\ +(he1*t^3)/12+(he1*t)*y\_barra^2+(he2*t^3)/12+(he2*t)*y\_barra^2$$

$$I\_z=(\text{cp1}*t^3/12)+(\text{cp1}*t)*(\text{bp1}-C\_y)^2+(t*\text{bp1}^3)/12+(\text{bp1}*t)*(\text{bp1}-C\_y-\text{bp1}/2)^2+\dots \\ ((\text{cp2}*t^3/12)+(\text{cp2}*t)*(\text{bp2}+C\_y)^2+(t*\text{bp2}^3)/12+(\text{bp2}*t)*(\text{bp2}+C\_y-\text{bp2}/2)^2+\dots \\ +(hp*t^3)/12+(hp*t)*C\_y^2$$

else

```

errorldg('Não é uma secção C ou Z','Erro!');
return;
end

%Ncr_z=((pi^2*E*Ieff_z)/(Le^2))
Ncr_z=((pi^2*E*I_z)/(Le^2))
lambda_relativo_z=sqrt((Aeff*fyb)/(Ncr_z))
fi=0.5*(1+alfa*(lambda_relativo_z-0.2)+(lambda_relativo_z^2))
qsi_z=1/(fi+(sqrt(fi^2-lambda_relativo_z^2)))
if (qsi_z>1)
qsi_z=1
end

Nb_rd_z=(qsi_z*Aeff*fyb)/(gamma_m1)
Nb_rd=min(Nb_rd_z,Nb_rd_y)

%format short
Output=[Abruta*1e6 heff*1000 beff1*1000 beff2*1000 ceff1*1000 ceff2*1000 Aeff*1e6 L_y*1e12/1e6
Ieff_y*1e12/1e6 Ncr_y/1000 lambda_relativo_y qsi_y Nb_rd_y/1000 L_z*1e12/1e6 Ieff_z*1e12/1e6
Ncr_z/1000 lambda_relativo_z qsi_z Nb_rd_z/1000 Nc_rd/1000 sigma_cr_1/1e6 sigma_cr_2/1e6]

```

## Apendice B

# Codigo Matlab de verificación de seguridad a temperatura elevada

```
%%% Resistência em situação de incêndio
%%resistencia da secção transversal
%corte

gamma_m_fi=1.00;

% variação dos coeficientes de redução
% redução da tensão convencional a 0.2%
T_k02p=[20, 100:100:1200]';
k_02_p_theta_tab=[1 1 0.89 0.78 0.65 0.53 0.30 0.13 0.07 0.05 0.03 0.02 0.0]';
% redução do valor do modulo de Elasticidade

T_kE=[20, 100:100:1200]';
k_E_theta_tab=[1.00 1.000 0.900 0.800 0.700 0.600 0.310 0.130 0.090 0.0675 0.0450 0.0225 0.0]';

% imposição para secções de classe 4
f02_p=fyb

% encurvadura de elementos à compressão em situação de incêndio
% Temp=[20, 100:100:1200]';
Temp=Temp';
for j=1:length(Temp)
    T=Temp(j)
```

```

k_02_p_theta=interp1(T_k02p,k_02_p_theta_tab,T) %yi = interp1(x,Y,xi)
k_E_theta=interp1(T_kE,k_E_theta_tab,T) %yi = interp1(x,Y,xi)

alfa=0.65*sqrt(235e6/f02_p)
% seg z
lambda_relativo_theta_z(j,1)=lambda_relativo_z*(k_02_p_theta/k_E_theta)^0.5
fi_theta_z=0.5*(1+alfa.*lambda_relativo_theta_z(j,1)+(lambda_relativo_theta_z(j,1).^2))
qsi_fi_z=1./(fi_theta_z+sqrt(fi_theta_z^2-(lambda_relativo_theta_z(j,1).^2)))
Nb_fi_t_Rd_z(j,1)=qsi_fi_z*Aeff*(k_02_p_theta*f02_p)/(gamma_m_fi) %N
% segy
lambda_relativo_theta_y(j,1)=lambda_relativo_y*(k_02_p_theta/k_E_theta)^0.5
fi_theta_y=0.5.*(1+alfa.*lambda_relativo_theta_y(j,1)+(lambda_relativo_theta_y(j,1).^2))
qsi_fi_y=1./(fi_theta_y+sqrt(fi_theta_y^2-(lambda_relativo_theta_y(j,1).^2)))
Nb_fi_t_Rd_y(j,1)=qsi_fi_y*Aeff*(k_02_p_theta*f02_p)/(gamma_m_fi) %N

Nb_fi_t_Rd=min(Nb_fi_t_Rd_z,Nb_fi_t_Rd_y)
Nc_rd_fi(j,1)=Nc_rd*k_02_p_theta;
end
A

```