

E.T.S. I. CAMINOS	
BIBLIOTECA	
CDU	T 621.7
AUTOR	LAV
TITULO	est

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE CORDONES  
DE SOLDADURA LATERALES EN ÁNGULO, EN  
UNIONES FORMADAS POR CHAPAS SOLDADAS A  
SOLAPE SOMETIDAS A CARGAS ESTÁTICAS SEGÚN  
LA DIRECCIÓN DEL CORDÓN**

por

José Lavado Rodríguez  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Dpto. Mecánica de Estructuras  
Universidad de Granada



Director de Tesis:

D. Edelmiro Rua Álvarez  
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos



Granada, Enero de 2001

N.º Copia
N.º Documento
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA GRANADA

UNIVERSIDAD DE GRANADA
19 FEB. 2001
COMISION DE DOCTORADO

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA GRANADA	
N.º Documento	881124
N.º Copia	924433

## AGRADECIMIENTOS:

La presente Tesis Doctoral es el fruto de un trabajo realizado durante algo más de siete años, resultado de un esfuerzo importante, ya que para su realización el autor tuvo que compaginar su investigación con su actividad docente y profesional.

Los resultados obtenidos y las conclusiones de esta Tesis Doctoral se basan en tres pilares fundamentales: una búsqueda y análisis exhaustivo de la documentación existente a nivel mundial; un estudio teórico importante empleando una muy potente herramienta de cálculo con elementos finitos; y por último el contraste de dichos resultados teóricos con dos campañas de ensayos de laboratorio, bien instrumentadas.

Todo el trabajo realizado hubiese sido imposible llevarlo a cabo sin la ayuda de personas y empresas que han facilitado mi tarea.

En primer lugar quiero darle las gracias a mi Director de Tesis D. Edelmiro Rúa Álvarez, por darme la posibilidad de desarrollar este trabajo.

Agradecer al Servicio de Documentación del Colegio de Ingenieros de Caminos su rapidez y eficacia en la localización de referencias bibliográficas.

Agradecerle a las empresas CEMOSA y APIA XXI, en las cuales he llevado a cabo mi actividad profesional durante los últimos años, el permitirme trabajar a media jornada, sabiendo el esfuerzo que ello significó en muchas ocasiones para ellas. Especialmente quiero dar las gracias al Delegado en Andalucía de APIA XXI D. Alejandro Castillo Linares, junto a la empresa METALÚRGICA DEL QUADALQUITVIR (MEGUSA) de Sevilla y su técnico D. Juan Gallego, por facilitarme los medios para realizar las probetas destinadas a la primera campaña de ensayos.

Quiero dar las gracias muy especialmente a D. Francisco Quintero, el cual me orientó en varias ocasiones, siempre con su ayuda desinteresada y sincera, sobre la línea a seguir en mi tesis. Me facilitó información muy valiosa, y por si fuera poco me apoyó para realizar las probetas destinadas a la segunda campaña de ensayos con la empresa DRAGADOS OFF SHORE de Puerto Real (Cádiz). Agradecerle también a esta empresa, y en especial a sus técnicos D. Luis Rodríguez y D. Arturo Ginés, la ayuda prestada.



También quiero agradecerle su ayuda a D. José Cañas, Profesor Titular de la Escuela de Industriales de Sevilla, al facilitarme información sobre artículos relacionados con esta Tesis.

Asimismo darle las gracias al personal del Laboratorio de Materiales de la Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, por poner los medios necesarios para la rotura de probetas en la primera campaña de ensayos. Y al Laboratorio de Estructuras de la misma escuela, a todo su personal y especialmente a D. José Torrico, por la ayuda prestada en la preparación, instrumentación y ejecución de todos los trabajos destinados a las dos campañas de ensayos realizados.

Quiero hacer también mención a la Escuela de Caminos de Granada, pilar de mi desarrollo docente e investigador, y a todos sus profesores y alumnos, esperando que esta Tesis Doctoral sea un granito más para impulsar su crecimiento.

Por último decir que todo el trabajo realizado durante estos años ha sido posible también gracias a la paciencia muchas veces de mi familia, amigos y seres queridos, los cuales siempre han estado a mi lado.

## INDICE

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUCCIÓN .....	5
1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL.....	5
1.2. ALCANCE Y CONTENIDO DE LA INVESTIGACIÓN .....	9
2. ANTECEDENTES .....	11
2.1. ESTUDIOS EXPERIMENTALES .....	11
2.2. ESTUDIOS TEÓRICOS .....	28
2.3. ESTUDIOS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.....	36
3. ESTADO ACTUAL DE LA NORMATIVA.....	46
3.1. INTRODUCCIÓN .....	46
3.2. MÉTODOS DE CÁLCULO SEGÚN EL I.I.S .....	47
3.2.1. Cálculo tensional.....	47
3.2.2. Cálculo basado en la fuerza total a transmitir por la unión .....	48
3.3. METODOS DE CALCULO SEGUN DIVERSAS NORMAS .....	49
3.4. HIPOTESIS EMPLEADAS EN LAS NORMAS .....	53
3.5. OBSERVACIONES A LA NORMATIVA .....	53
4. ESTUDIO TEÓRICO .....	56
4.1. ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS. MODELIZACIÓN DE LAS UNIONES .....	56
4.1.1. Programa utilizado para el cálculo.....	56
4.1.2. Modelización de la unión.....	56
4.1.2.1. Modelo tridimensional. Simplificaciones.....	56

	<u>Pág.</u>
4.1.2.2. Características de los materiales que conforman las chapas y el cordón.....	59
4.1.2.2.1. Materiales correspondientes a las probetas ensayadas a tracción.....	59
4.1.2.2.2. Materiales correspondientes a las probetas ensayadas a compresión.....	62
4.1.2.3. Tipo de elementos empleados en chapas y cordón.....	65
4.1.2.4. Discretización de la malla y calibración del modelo con el elemento SOLID95.....	68
4.1.2.5. Modelización de las tensiones residuales existentes en el cordón producto del proceso de soldeo .....	74
4.2. RESULTADOS.....	75
4.2.1. Introducción .....	75
4.2.2. Proceso de deformación y de transmisión de tensiones a través del cordón .....	76
4.2.3. Estudio en régimen elástico .....	83
4.2.3.1. Introducción .....	83
4.2.3.2. Resultados del estudio en régimen elástico .....	86
A) Influencia al aumentar la longitud del cordón, permaneciendo constantes otras variables .....	86
B) Influencia al aumentar la diferencia de anchura entre chapa central y exterior, permaneciendo constantes otras variables.....	95
C) Influencia al aumentar la anchura de ambas chapas, permaneciendo constantes otras variables .....	101
D) Influencia al aumentar el espesor de la chapa central, permaneciendo constantes otras variables .....	112
E) Influencia al aumentar el espesor de las chapas exteriores, permaneciendo constantes otras variables .....	118
F) Influencia al aumentar el espesor de garganta del cordón, permaneciendo constantes otras variables .....	124
4.2.3.3. Resultados del estudio en régimen plástico hasta rotura.....	130

	<u>Pág.</u>
5. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	153
5.1. DESCRIPCIÓN DE LAS DOS CAMPAÑAS DE ENSAYOS REALIZADAS .....	153
5.1.1. Campaña de Septiembre de 1998. Ensayos a tracción.....	153
5.1.1.1. Introducción. Características de la prensa empleada .....	153
5.1.1.2. Fabricación, calidades de los materiales y características geométricas de las probetas.....	154
5.1.1.3. Instrumentación de las 5 probetas ensayadas a tracción.....	163
5.1.1.4. Ejecución de los ensayos.....	163
5.1.1.5. Resultados de los ensayos .....	163
5.1.2. Campaña de Noviembre-Diciembre de 1999. Ensayos a compresión.....	164
5.1.2.1. Introducción. Características de la prensa empleada.....	164
5.1.2.2. Fabricación, calidades de los materiales y características geométricas de las probetas.....	165
5.1.2.3. Instrumentación de las 14 probetas ensayadas a compresión .....	178
5.1.2.3.1. Empleo de flexímetros .....	178
5.1.2.3.2. Control de la fisuración mediante cal durante la plastificación de los cordones .....	182
5.1.2.4. Ejecución de los ensayos.....	188
5.1.2.5. Resultados de los ensayos .....	188
6. CONCLUSIONES .....	206
6.1. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EN RÉGIMEN ELÁSTICO .....	206
6.1.1. Comportamiento en régimen elástico al aumentar la longitud del cordón, manteniendo constantes otras variables del modelo	207
6.1.2. Comportamiento en régimen elástico al aumentar la	

	<u>Pág.</u>
diferencia de anchura entre las chapas que forman la unión, manteniendo constantes otras variables del modelo.....	211
6.1.3. Comportamiento en régimen elástico al aumentar la anchura de ambas chapas, manteniendo constantes otras variables del modelo.....	215
6.1.4. Comportamiento en régimen elástico al aumentar el espesor de la chapa central, manteniendo constantes otras variables del modelo.....	219
6.1.5. Comportamiento en régimen elástico al aumentar el espesor de las chapas exteriores, manteniendo constantes otras variables del modelo ...	222
6.1.6. Comportamiento en régimen elástico al aumentar el espesor del cordón de garganta, manteniendo constantes otras variables del modelo	225
6.2. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EN RÉGIMEN PLÁSTICO.....	228
7. NUEVAS APORTACIONES. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN...	234
7.1. NUEVAS APORTACIONES .....	234
7.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....	234
PUBLICACIONES Y BIBLIOGRAFÍA .....	236

## ANEJOS

Anejo nº1: Certificados de calidad de materiales empleados en las probetas.

Anejo nº2: Calibración del modelo.

Anejo nº3: Modelización con elementos finitos.

Anejo nº4: Instrumentación de las probetas ensayadas a tracción.

- 3A) Situación de las galgas extensométricas en las probetas.

- 3B) Lectura de microdeformaciones.

Anejo nº5: Instrumentación de las probetas ensayadas a compresión. Lectura de flexímetros.

Anejo nº6: Fotografías.

## 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL.

El dimensionamiento de los cordones de soldadura en ángulo de las uniones soldadas aparece tratado en todas las Normas de una manera muy simple. El planteamiento que recogen todas las Instrucciones, Normas y Reglas de cálculo de uniones soldadas se basa en considerar que la carga transmitida (o resistida) por cada elemento diferencial del cordón es igual a lo largo de toda su longitud.

Según se utilicen Normas europeas o americanas, para el cálculo de tensiones se utilizarán criterios de tensión de comparación o de máxima tensión tangencial, pero en ninguna se tiene en cuenta una variación entre los esfuerzos soportados por cada elemento diferencial del cordón a lo largo de él. El motivo de esta consideración es el planteamiento realizado en todas las Normas de que tanto el cordón de soldadura como las chapas unidas por él son infinitamente rígidas.

Este planteamiento lleva a la hipótesis de un reparto lineal de la carga a lo largo del cordón, y por lo tanto a que todos los elementos del cordón están a la misma tensión y alcanzan la tensión crítica al mismo tiempo. Así, las distintas Normas e Instrucciones plantean una fórmula a través de la cual se obtiene una relación entre la carga soportada por la unión, la longitud del cordón  $L$ , su espesor de garganta  $a$  y la tensión última del material a unir.

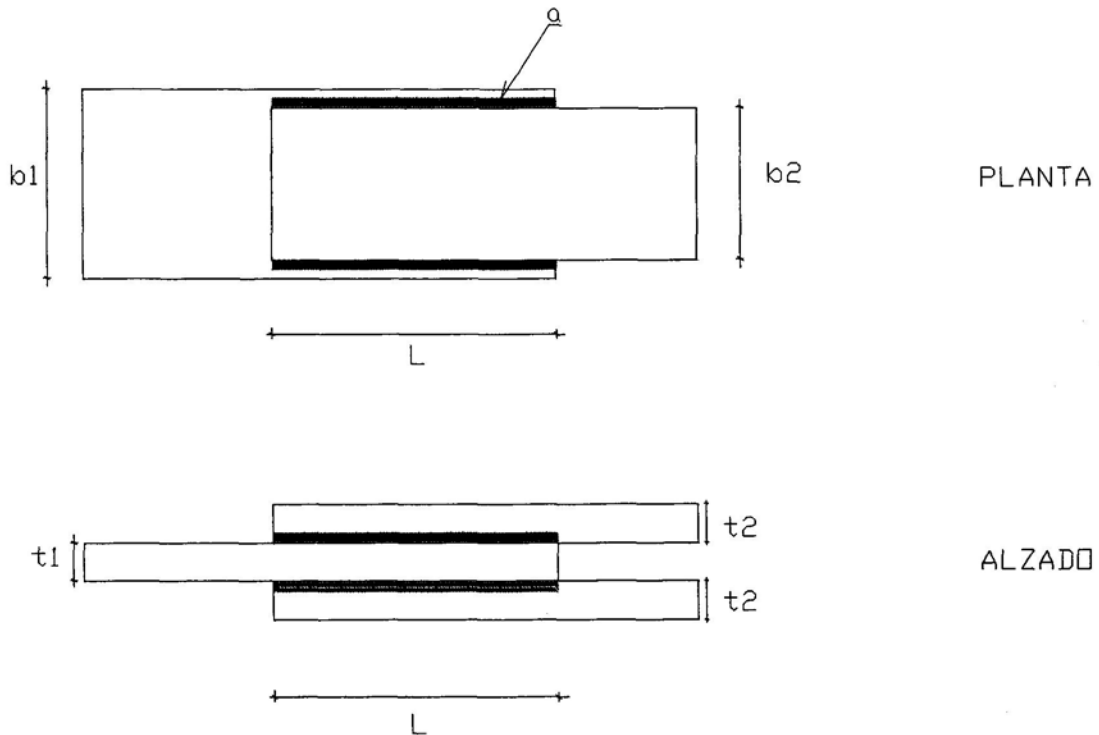
Dicho planteamiento es demasiado simplista, pues la transmisión y reparto de tensiones a lo largo del cordón depende de más variables que este modelo unidimensional empleado en las Normas no contempla.

Así, para transmitir la carga de una a otra chapa a través del cordón es necesario que se produzca un incurvamiento de las isostáticas, apareciendo unas tensiones normales al eje del cordón que alteran dichas tensiones.

En la siguiente figura se observa una unión a solape formada por una chapa central soldada a dos chapas exteriores, de manera que la fuerza actuante sobre el conjunto de la unión según el eje de los cordones esté completamente centrada, es decir sin aparición de

momento. Las distintas variables correspondientes a chapas y cordón que aparecen en dicha unión son:

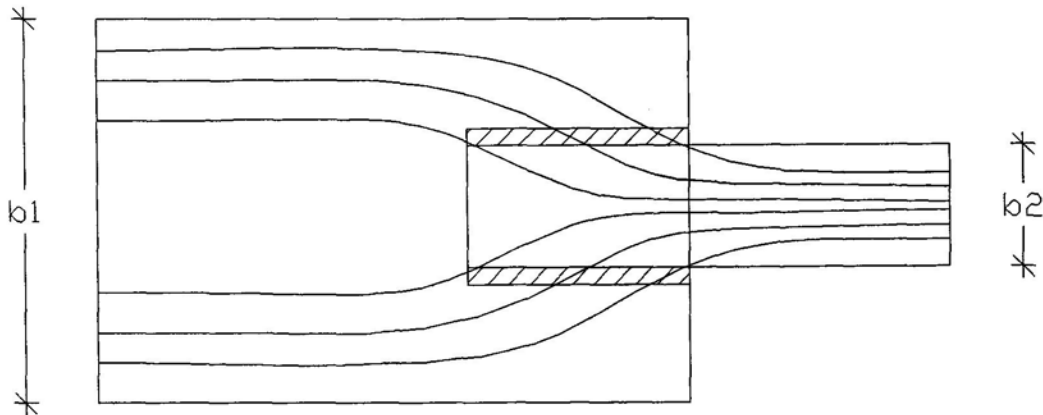
- L: longitud de los cordones de soldadura
- a: espesor del cordón de garganta de los cordones
- $b_1$ : anchura de la chapa central
- $b_2$ : anchura de las chapas exteriores
- $t_1$ : espesor de la chapa central
- $t_2$ : espesor de las chapas exteriores



Observando las figuras parece lógico en un principio hablar de un comportamiento bidimensional en el problema de la transmisión de tensiones. Efectivamente, el incurvamiento de las isostáticas en la transmisión de tensiones de una chapa a otra a través del cordón viene gobernado principalmente por la relación entre la longitud y la anchura del conjunto de la unión, es decir según las dos dimensiones principales. En la bibliografía existente hasta la fecha aparecen diversos artículos en el que se estudia el problema teniendo en cuenta este carácter bidimensional ( Faltus(1986), Fischer y Wenk (1990), Rúa (1992)).

Dicho comportamiento bidimensional de la unión conlleva dos factores a tener en cuenta en la transmisión de las tensiones a través del cordón:

1.- Un incremento indefinido de la longitud del cordón no puede aumentar indefinidamente la resistencia de la unión y a partir de una longitud  $L_e$  que llamaremos longitud eficaz, no aumenta la capacidad resistente de la unión. Este valor de la longitud eficaz dependerá de la relación entre la anchura de las chapas central y exteriores ( $b_1$  y  $b_2$ ) y la longitud del cordón ( $L$ ). En efecto las tensiones, en su recorrido realizado para pasar de una chapa a otra, se deberán incurvar buscando el paso a través del cordón de soldadura. Esto lleva a la aparición de unas tensiones normales al eje del cordón que modificarán el estado tensional global en cada punto del cordón. Según sea mayor o menor la anchura de las chapas, la incurvación en el recorrido de las tensiones será más o menos acentuado.



2.- Por otro lado, la relación que exista entre la anchura de la chapa central ( $b_1$ ) y la anchura de las chapas exteriores ( $b_2$ ) también afectará a la transmisión de tensiones de una chapa a otra a través del cordón, produciendo más o menos incurvación de las tensiones en uno u otro extremo del cordón.

Este tratamiento bidimensional, no obstante, no explica completamente el problema de la transmisión de tensiones, necesitando ser tratada la unión de manera tridimensional, debiendo observar por tanto otro tercer factor:



3.- Las chapas tendrán un espesor determinado ( $t_1$  y  $t_2$ ), lo cual se traduce en una mayor o menor rigidez en la unión. Igualmente el cordón tendrá un determinado espesor de garganta, que también le confiere más o menos rigidez al mismo. Deberá por tanto existir una compatibilidad de deformaciones entre ambas chapas de la unión y el cordón de soldadura. Esta relación de rigideces, producto de la relación de espesor entre chapas y cordón, afectará también a la transmisión de tensiones a través del cordón.

Además se puede hacer la siguiente consideración:

4.- Las tensiones dentro de una sección transversal dada del cordón no son uniformes. Efectivamente, las tensiones dentro de una misma sección transversal son máximas en la raíz del cordón de garganta, es decir en la arista longitudinal de unión con las chapas central y exterior, y nulas en la cara exterior del cordón.

Centrándonos en el concepto de longitud eficaz, éste viene tratado en las Normas de manera distinta.

El epígrafe 6.85 de la E.M.62 dice: "Los cordones laterales de soldaduras en ángulo que transmitan esfuerzos axiales de barras, tendrán una longitud no inferior a quince veces su espesor de garganta, ni inferior al ancho del perfil que unen. La longitud máxima no será superior a sesenta veces el espesor de garganta ni a doce veces el ancho del perfil unido".

Se tiene en cuenta así simultáneamente los dos efectos: el límite inferior marcado para la longitud del cordón impide una incurvación excesiva de las isostáticas, y el límite superior es un reconocimiento de la longitud eficaz del cordón.

En el Eurocódigo 3, su epígrafe 6.6.9. se dedica a "uniones largas", y plantea una reducción de la longitud efectiva del cordón aplicando un coeficiente de reducción a la longitud real y que tiene la siguiente expresión:

$$B_{LW,1} = 1.2 - 0.2 * \frac{L_j}{150 * a}$$

con  $B_{LW,1} < 1$

en donde  $L_j$  es la longitud total del solape en la dirección del esfuerzo.

Esta reducción sólo afecta a cordones cuya longitud sea mayor de ciento cincuenta veces el espesor, sin indicar ninguna limitación entre la longitud del cordón y el ancho del espesor de las chapas a unir.

La diferencia en el tratamiento del concepto de longitud eficaz establecidos por las Normas E.M.62 y Eurocódigo 3 es pues notable, considerando límites muy dispares entre sí.

Todas estas circunstancias han sido el motivo de plantear este estudio, en el que se analiza el comportamiento del cordón de soldadura a lo largo de su longitud, tanto teórica como experimentalmente, en función de todos los factores comentados que entran a formar parte en la transmisión de tensiones a través del cordón.

## 1.2. ALCANCE Y CONTENIDO DE LA INVESTIGACIÓN.

El alcance de la investigación realizada se centra en estudiar la distribución de tensiones en los cordones de soldadura que unen chapas soldadas a solape solicitadas a cargas estáticas paralelas al eje de los cordones, y en las consideraciones referentes a las longitudes eficaces de dichos cordones.

La distribución de tensiones en uniones soldadas es un proceso muy complejo en el que afectan numerosos factores: las rigideces de chapas y cordón, la calidad del proceso de soldeo, los defectos de ejecución de los cordones, el rozamiento entre las chapas que forman la unión, el estado tensional que introduce en el cordón y en sus proximidades en las chapas el enfriamiento del cordón tras el proceso de soldeo, etc.

No obstante, no se han podido recoger todos los factores antes mencionados, ya que sería objeto de una investigación vastísima, de la cual se podrían extraer varias tesis doctorales. La presente investigación estudia únicamente el gobierno de la distribución de tensiones ocasionado por las variables geométricas de chapas y cordón, las cuales afectan a la rigidez en la unión y que son determinantes en el paso y distribución de dichas tensiones entre las chapas soldadas a través del cordón.

La presente tesis doctoral se inicia con este **capítulo 1**, donde se realiza una introducción para justificar el interés por realizar la presente investigación, describiendo de forma concisa el contenido de cada uno de los capítulos de la Tesis Doctoral.

En el **capítulo 2** se realiza una revisión sobre los conocimientos existentes en la bibliografía y artículos publicados que tratan el tema objeto de esta investigación.

En el **capítulo 3** se expone el estado de la Normativa actual en el cálculo de uniones soldadas en ángulo. Se repasan los métodos de cálculo propuestos por el Instituto Internacional de la Soldadura (I.I.S.), así como las Normas europeas y americanas.

El **capítulo 4** recoge el estudio teórico, el cual se realiza modelizando mediante elementos finitos una serie de uniones entre dos chapas, soldadas a solape mediante cordones laterales, y sometiendo a la unión a una fuerza axil, paralela al eje longitudinal del cordón.

Con objeto de contrastar el estudio teórico la tesis se complementa con un estudio experimental, el cual se recoge en el **capítulo 5**, y que se ha desarrollado a través de dos campañas de ensayos: una primera realizada sobre 5 probetas ensayadas a tracción, y otra posterior realizada con 14 probetas ensayadas a compresión, todas ellas con uniones entre chapas unidas a solape por cordones laterales en ángulo.

Las conclusiones más interesantes obtenidas en la investigación se recogen en el **capítulo 6**, y a continuación en el **capítulo 7** se plantean las posibles líneas futuras de investigación.

En el apartado de **Bibliografía** se exponen las referencias bibliográficas y trabajos publicados más relacionados con el objeto de esta investigación.

Por último se presentan algunos **anejos** en los que se adjunta información de interés, no incluida en el cuerpo principal de la Tesis Doctoral para hacer más fluida su lectura en la medida de lo posible.

**2. ANTECEDENTES.**

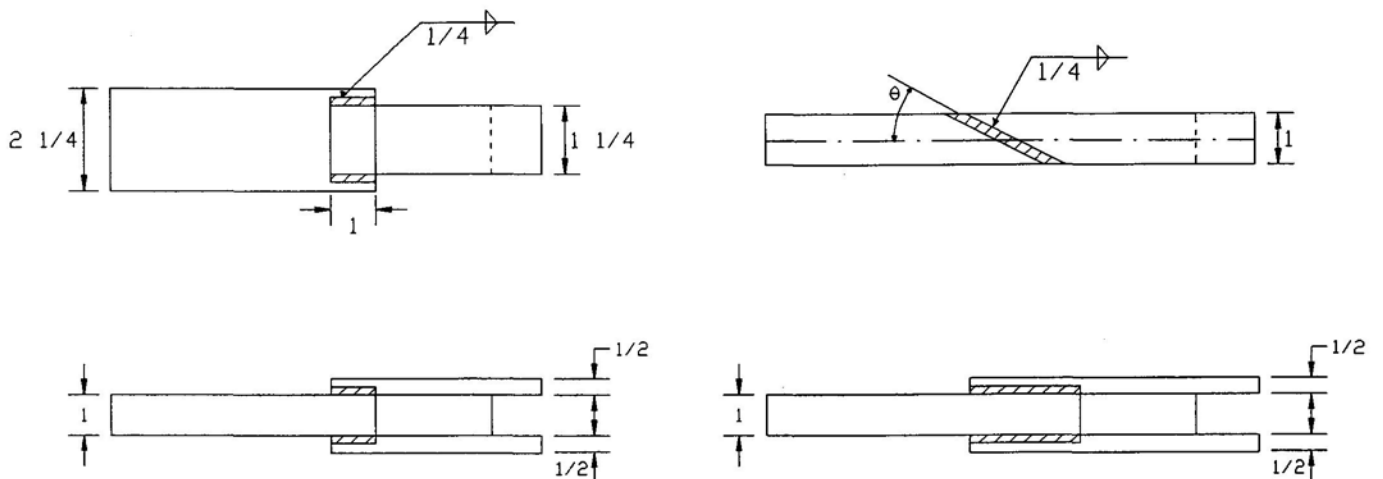
Para iniciar este estudio se va a hacer un repaso a la bibliografía existente sobre el comportamiento de cordones de soldadura. Dicha bibliografía es escasa, y apenas existen trabajos que contemplen la influencia de las variables comentadas que afectan al problema. Los estudios existentes se pueden dividir en tres grandes grupos:

- Estudios experimentales.
- Estudios teóricos empleando la teoría de la elasticidad.
- Estudios teóricos mediante elementos finitos.

**2.1. ESTUDIOS EXPERIMENTALES.**

Un primer estudio de interés corresponde a los años 1971 y 1972 por los autores **Butler, Pal y Kulak**.

En 1971 **Butler y Kulak** realizaron 23 ensayos sobre una serie de uniones a solape de chapas unidas con cordones de 1 pulgada de longitud (1 pulgada = 2.54 cm.) y 1/4 de pulgada de lado (1/4 de pulgada = 0.635 cm), orientados en distintos ángulos (0, 30, 60 y 90°) respecto a la fuerza a transmitir.



Emplearon probetas de acero canadiense CSA G40.12, con 44ksi (303 N/mm<sup>2</sup>) de límite elástico y 62 ksi (427 N/mm<sup>2</sup>) de carga de rotura mínima; los electrodos usados fueron del tipo AWS E60XX, de carga de rotura similar a la del metal base.

En dichos ensayos midieron cuidadosamente el corrimiento relativo en dirección de la fuerza entre las dos aristas del cordón, así como la carga de rotura del cordón.

Las conclusiones más importantes a las que llegaron fueron:

- 1. La capacidad portante de un cordón aumenta con el ángulo que forma con la fuerza a resistir, siendo máxima para  $\theta = 90^\circ$  (cordones frontales).
- 2. La deformabilidad del cordón en cambio disminuye con dicho ángulo, siendo máxima para  $\theta = 0^\circ$  (cordones laterales).

Así los autores establecen a partir de los resultados ofrecidos por los ensayos unas curvas y sus correspondientes expresiones analíticas, que sirven como herramientas de diseño, con vistas a determinar la carga última y la deformación de rotura en cordones.

La expresión analítica de dichas curvas es la siguiente:

$$R = R_{ult} \times (1 - e^{-\mu\Delta})^\lambda$$

donde:

$\Delta$  = corrimiento en pulgadas

$$\mu = 75e^{0.00114\theta}$$

$$\lambda = 0.4e^{0.0146\theta}$$

$\theta$  es el ángulo entre la carga y el eje del cordón ( $\theta = 0^\circ$  para cordones laterales y  $\theta = 90^\circ$  para cordones frontales)

$R$  es la carga que soporta el cordón en un cierto instante del proceso de carga, en kips/inch

$R_{ult}$  es la carga de rotura del cordón, en kips/inch.

(1 kips/inch = 179 kp/cm)

inch = pulgada

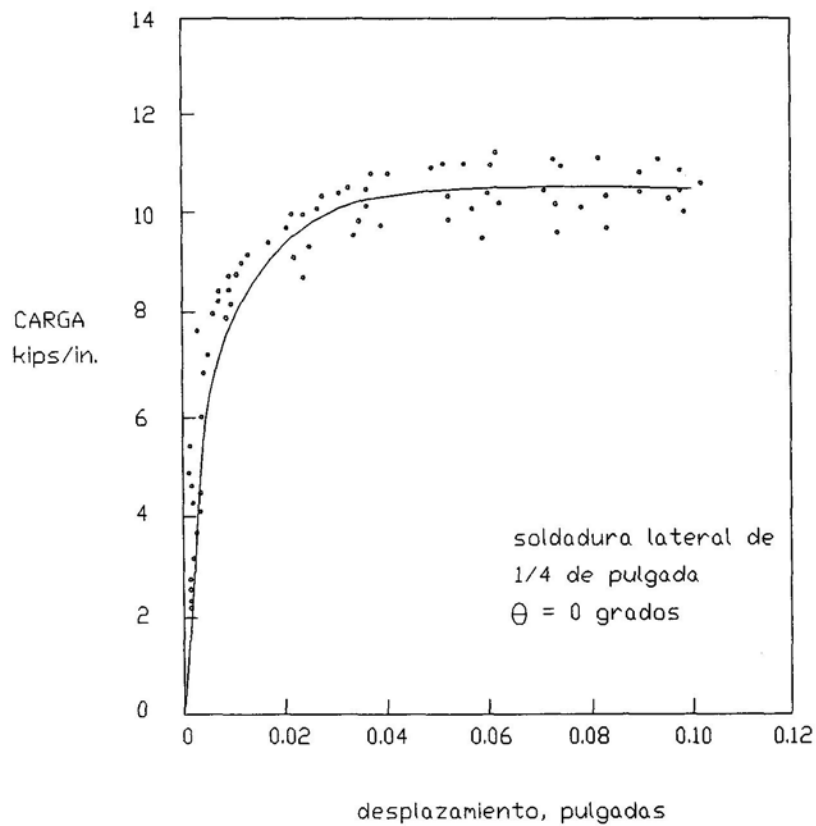
El valor que proponen como carga de rotura del cordón es:

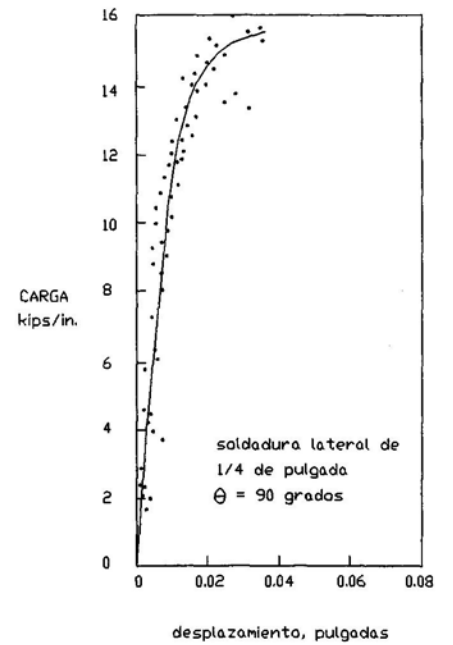
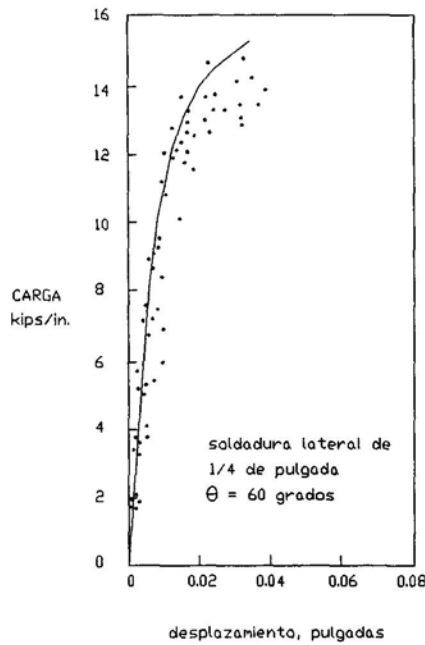
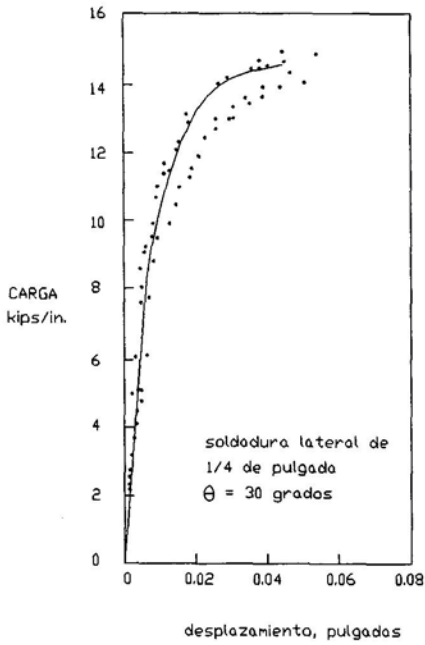
$$R_{ult} = \frac{10 + \theta}{0.92 + 0.0603\theta}$$

Y como valor del corrimiento último o de rotura en pulgadas:

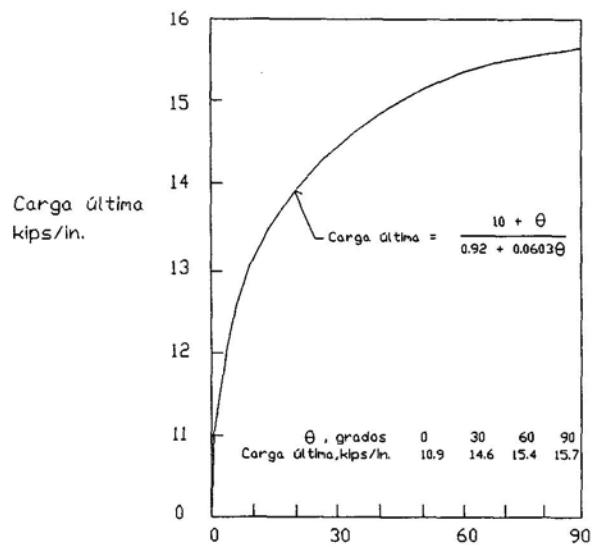
$$\Delta = 0.225(\theta + 5)^{-0.47}$$

Las curvas carga-corrimento que se obtienen, para distintos ángulos  $\theta$  entre la dirección de la carga y la del cordón, son las siguientes:

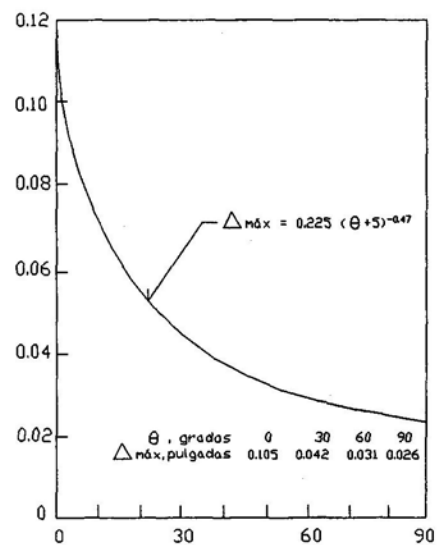




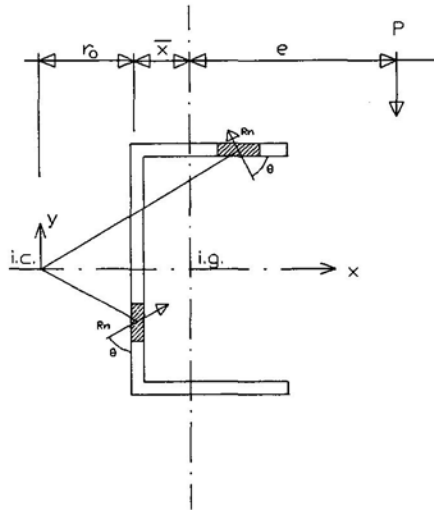
Y para la carga última y el corrimiento último son las siguientes:



$\Delta$  máx  
pulgadas



En 1972 **Butler, Pal y Kulak** aplican las curvas anteriores a la determinación de la carga de rotura de uniones soldadas a solape con tres cordones en ángulo (uniones en [ ]), sometidas a carga excéntrica.



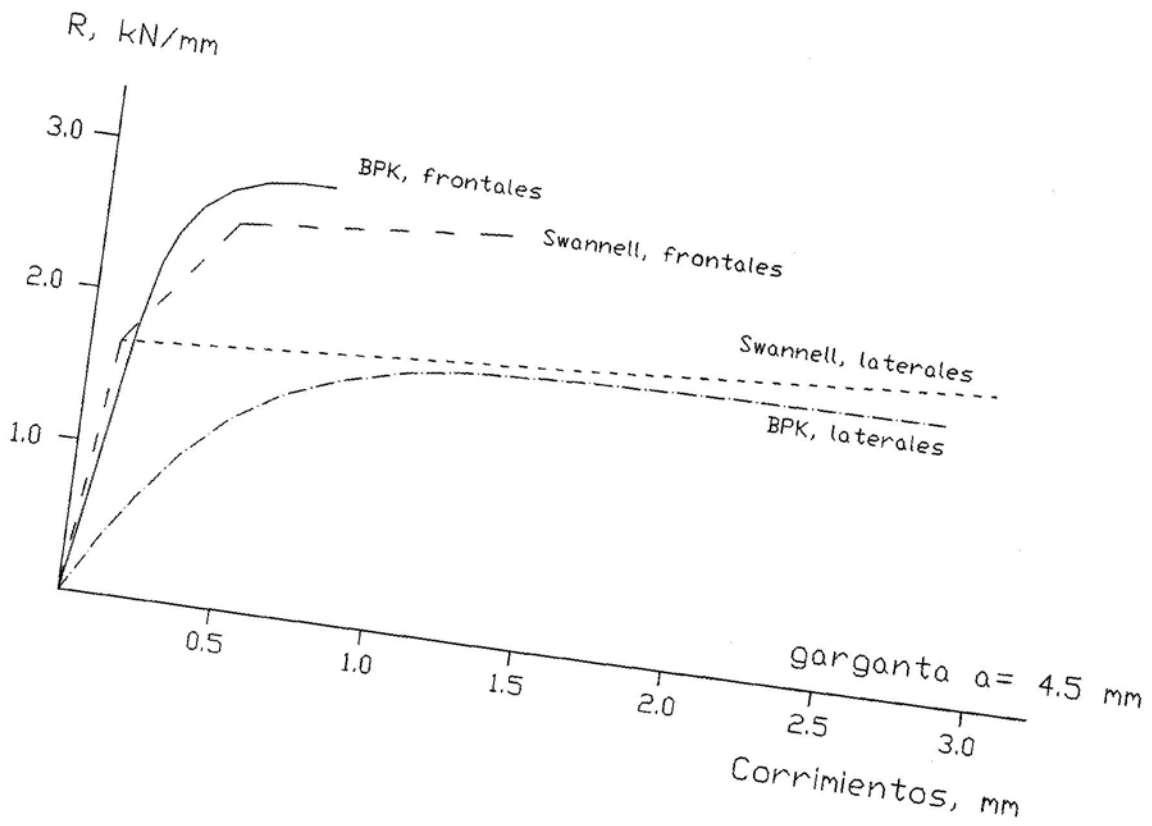
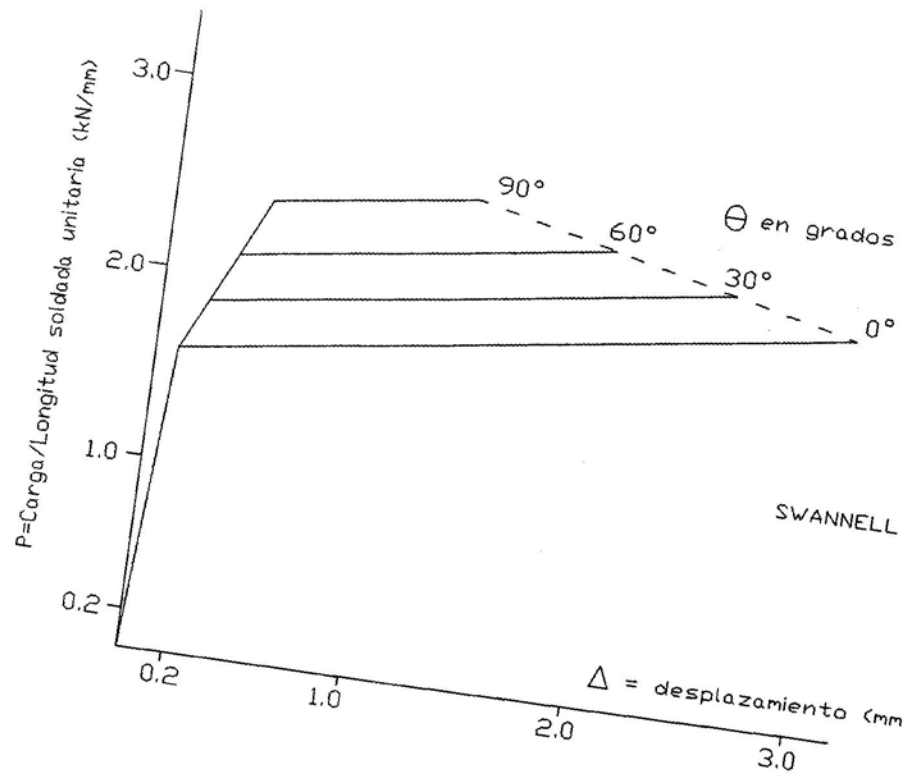
Estos resultados presentan una serie de limitaciones:

- 1. Las expresiones son válidas únicamente para cordones de lado igual a 1/4 de pulgada (que corresponde a una garganta de 4.5 mm).
- 2. Los resultados se presentan para cordones de 1 pulgada (2.54 cm) de longitud. No estudian por tanto el comportamiento de cordones de soldadura de mayor longitud. Por tanto no estudian hasta donde llega la longitud eficaz del cordón.
- 3. No estudian el problema para distintas rigideces de las chapas a unir, pues emplean un modelo de ensayo con una única anchura y espesor de chapas.

En 1974 **Dawe y Kulak** publican resultados en la línea del artículo anterior, sin aportar ninguna novedad.

En 1981 **Swannell** propone un método muy parecido al de **Butler et al.**, diferenciándose del mismo en la forma de las relaciones carga-corrimento, que pasan a ser bi o trilineales en vez de exponenciales. En la siguiente figura aparecen las curvas propuestas por **Swannell**, y también se comparan las curvas dadas por **Butler et al.** y **Swannell**, empleando unidades del Sistema Internacional, para cordones con espesor de garganta de 4.5 mm.





La ventaja del manejo de leyes bi o trilineales como las propuestas por Swanell es su fácil tratamiento en ordenador.

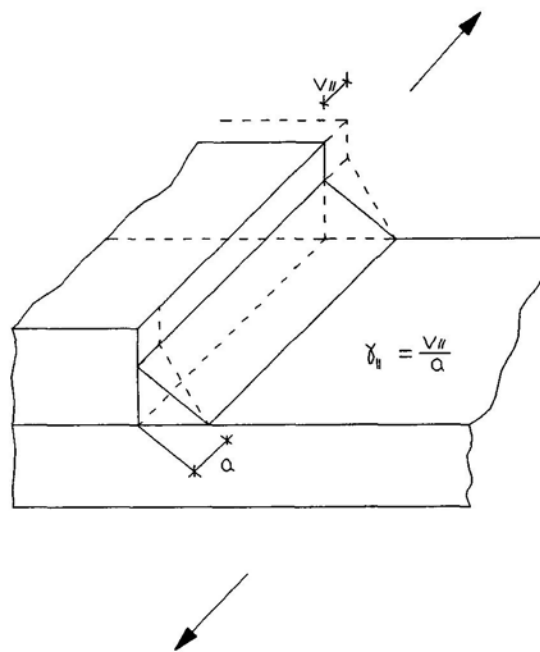
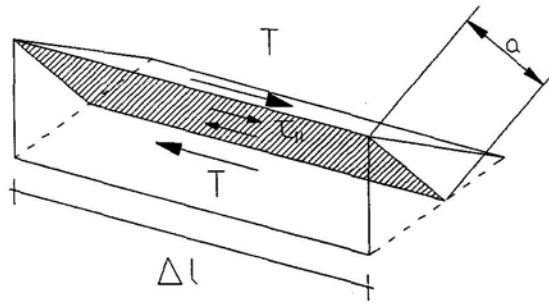
El ajuste con su propia experimentación es muy bueno en general, aunque en algún caso la diferencia entre resultados experimentales y teóricos es cercano al 25%.

Los resultados ofrecidos por Swanell presentan las mismas limitaciones que los dados por Butler *et al.*:

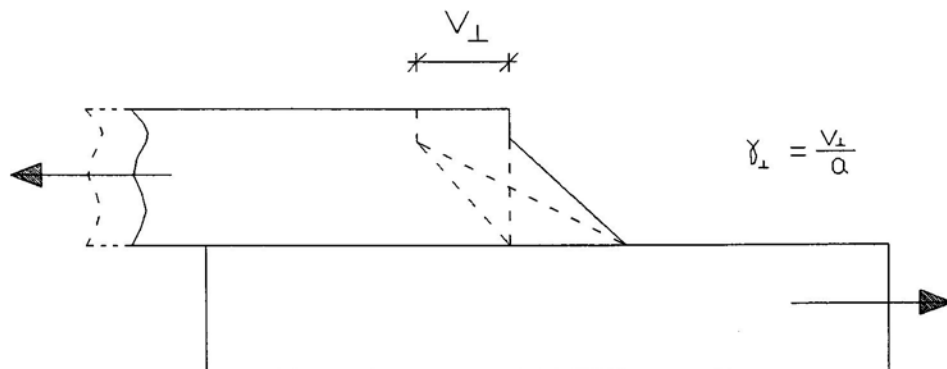
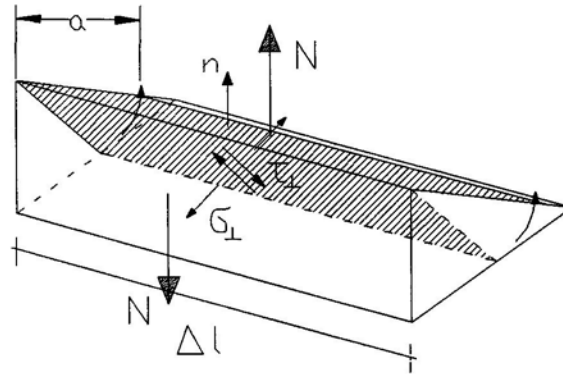
- 1. Las expresiones son válidas únicamente para cordones de lado igual a 1/4 de pulgada (garganta = 4.5 mm).
- 2. Los resultados se presentan para cordones de 1 pulgada (2.54 cm) de longitud. No estudia por tanto el comportamiento de cordones de soldadura de mayor longitud.
- 3. No estudia el problema para distintas rigideces de las chapas a unir.

En 1981 El Instituto Internacional de la Soldadura (IIW) propone una serie de curvas tensión-deformación, con vistas al dimensionamiento de cordones de soldadura. El estudio se realiza para la sección de garganta del cordón, tanto para cordones laterales como para cordones frontales.

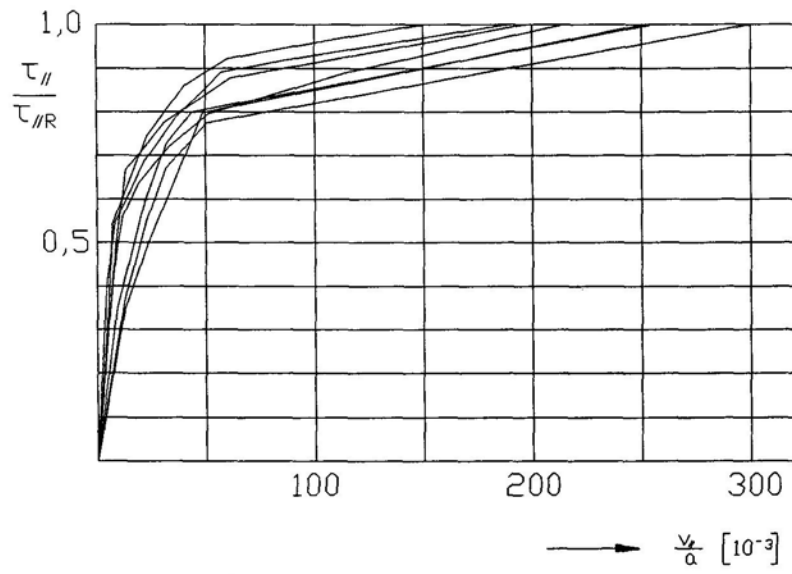
Para cordones laterales, la relación tensión-deformación se refiere a la que existe entre las tensiones tangenciales actuando en el plano de la sección de garganta, paralelas al eje del cordón (que son las representativas de la resistencia de cordones laterales, pues son las que equilibran las fuerzas exteriores), y las deformaciones angulares que aparecen debido al desplazamiento relativo entre las dos chapas unidas por el cordón, en la dirección de aplicación de la fuerza.



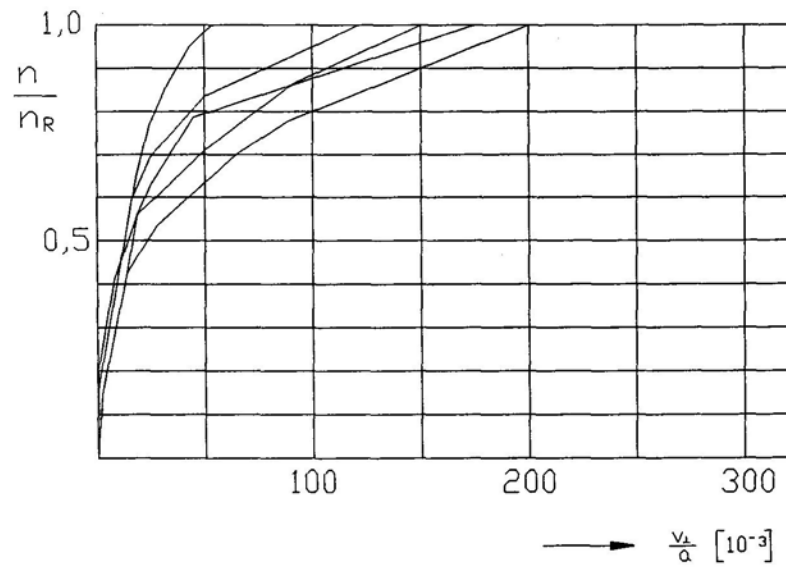
Para cordones frontales, la relación tensión-deformación se refiere a la que existe entre las tensiones normales actuando en el plano de la sección de garganta, perpendiculares al eje del cordón (que en este caso son las representativas de la resistencia de cordones frontales, pues son las que equilibran las fuerzas exteriores en este caso) y las deformaciones angulares que aparecen debido al desplazamiento relativo entre las dos chapas unidas por el cordón, en la dirección de aplicación de la fuerza.



Estas relaciones tensión-deformación se establecen a partir de la recopilación de resultados procedentes de numerosos ensayos realizados por diversos autores pertenecientes al IIS. A continuación se muestran los resultados de dichos ensayos.



Cordones laterales



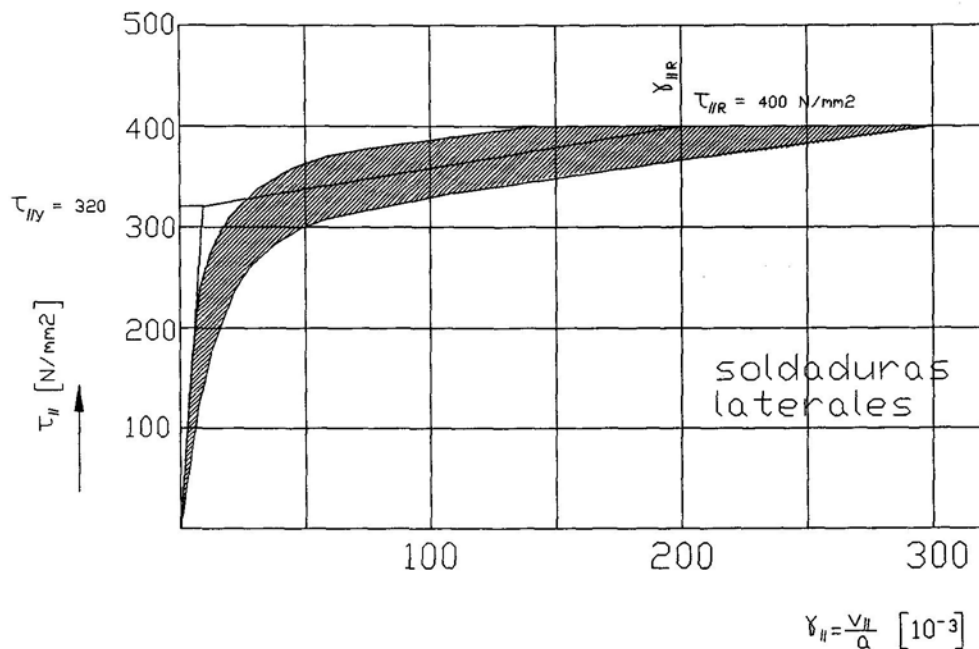
Cordones frontales

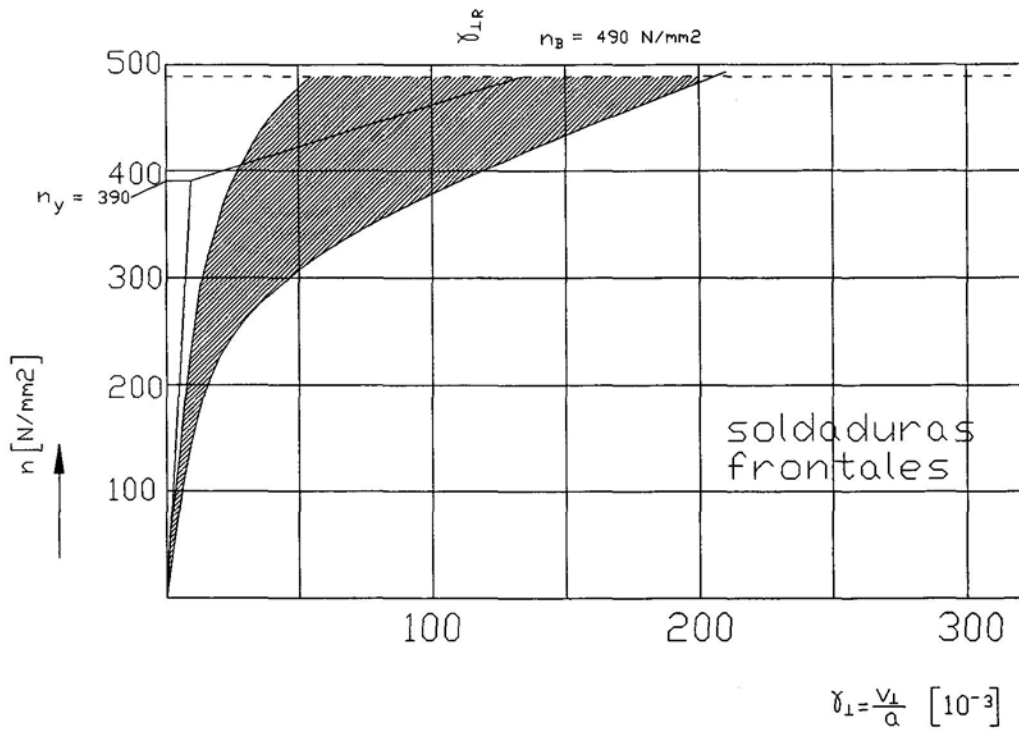
Como se observa la dispersión de los resultados es grande. Por tanto los valores de las tensiones en ordenadas se expresan como el cociente entre la tensión actuante en un instante y la tensión de rotura.

Esta gran dispersión de resultados se debe, fundamentalmente, a dos razones:

- La aparición de deformaciones plásticas en las chapas unidas por el cordón, en la cercanía de las galgas extensométricas empleadas para la medida de desplazamientos.
- La irregular distribución de tensiones a lo largo de la longitud del cordón.

En las siguientes figuras se observan las expresiones adoptadas por el IIS para las relaciones tensión-deformación.





En ellas se observa una banda rayada, englobando los resultados de todos los ensayos efectuados. El IIS propone tomar a efectos prácticos las dos relaciones bilineales que se observan en los gráficos anteriores. Ambas relaciones son válidas para aceros ordinarios de construcción (A 42 y A 52), y están caracterizadas por la resistencia a cortante en rotura y por el módulo de deformación elástico.

El IIS propone tomar como valores de la resistencia a cortante en rotura los valores  $n_R = 490 \text{ N/mm}^2$  para cordones frontales y  $\tau = 400 \text{ n/mm}^2$  para cordones laterales.

La rama elástica termina cuando se alcanza el 80% de los valores anteriores. Para dicha rama elástica los módulos de deformación que se proponen, relación entre tensión tangencial y deformación, tienen los valores de  $40 \text{ KN/mm}^2$  para cordones laterales y  $80 \text{ KN/mm}^2$  para cordones frontales.

Para la rama plástica los módulos de deformación propuestos, hasta la rotura, son  $0.4 \text{ KN/mm}^2$  para cordones laterales y  $0.8 \text{ KN/mm}^2$  para cordones frontales.

Estas leyes bilineales para el dimensionamiento de cordones tienen el inconveniente de haberse obtenido a través de numerosos ensayos, sin diferenciar en ningún caso la mayor o menor longitud de los cordones ensayados, ni el espesor del cordón, ni el espesor y anchura de las chapas unidas.

De hecho, cabe destacar la gran dispersión en los resultados de los ensayos que han dado lugar a dichas leyes.

No obstante, en el empleo de estas leyes el IIS sí advierte sobre la influencia de factores como una mayor o menor longitud del cordón y el espesor del mismo. Además apunta, respecto a cordones largos, dos cosas:

- 1. Cuanto más largo es el cordón menor es su resistencia (se reconoce por tanto la existencia de una longitud eficaz a partir de la cual un aumento en la longitud del cordón no supone un incremento de su resistencia).

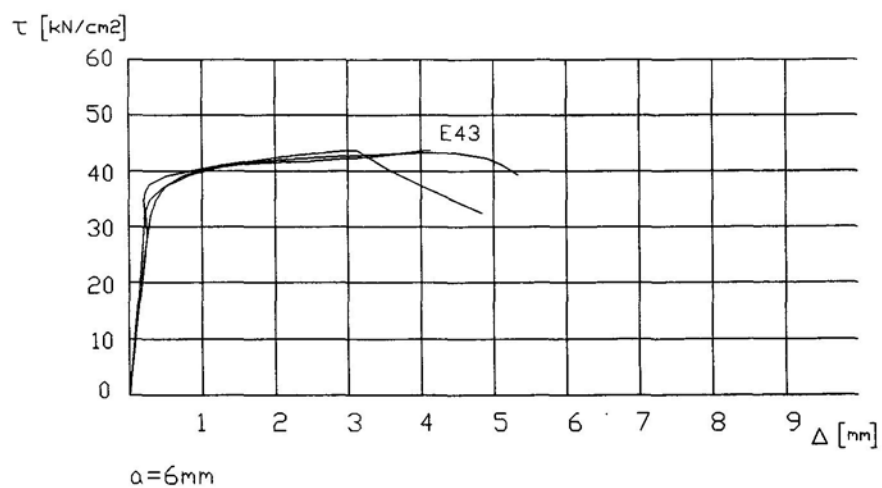
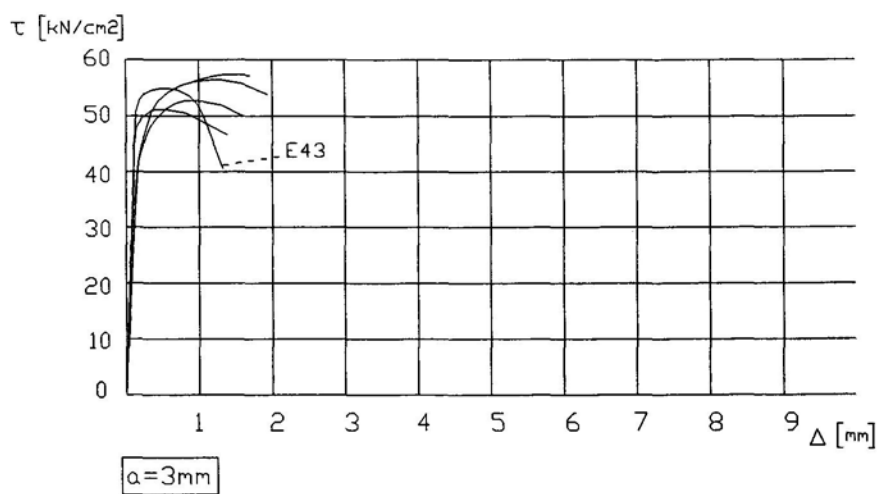
- 2. Los cordones largos tienen mucha más capacidad de deformación que los cordones cortos.

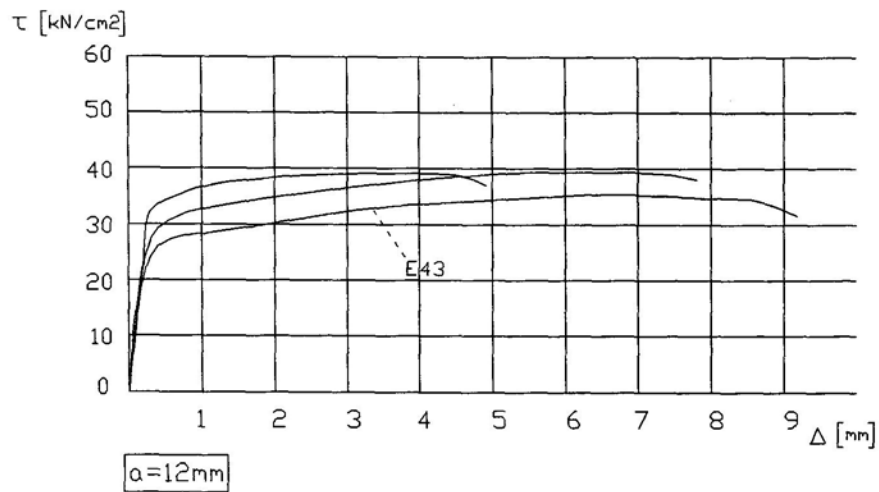
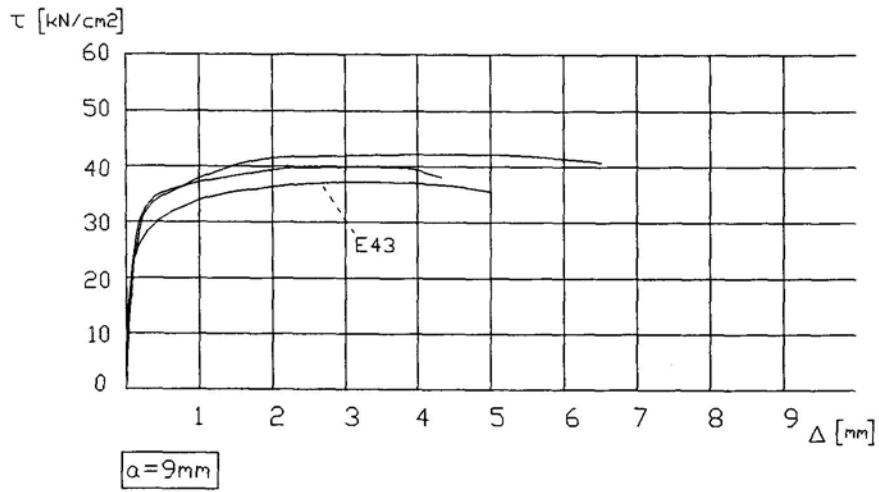
Observando los gráficos propuestos hay que resaltar la mayor rigidez de los cordones frontales que los cordones laterales. Los cordones laterales tienen una capacidad de deformación, según se deduce de las curvas, de casi el doble que los cordones frontales. Por contra, la resistencia de los cordones frontales es un 20% superior aproximadamente que la de los cordones laterales.

Fischer en 1990 realiza una serie de ensayos en uniones de piezas con cordones laterales de soldadura en ángulo, sometidas a tracción. Emplea cordones de diversos grosores de garganta ( 3 mm., 6 mm, 9 mm. y 12 mm. )

A partir de dichos ensayos establece las curvas tensión tangencial-corrimiento relativo entre chapas, según se observa en las siguientes figuras.







Para cada grosor de cordón ensayado se emplearon dos tipos de electrodos, el E43 y el E51.

En el siguiente cuadro se presenta además un resumen con algunos datos de interés sobre los ensayos realizados, donde:

$a$  = espesor del cordón de garganta en mm.

$\tau_F$  = tensión tangencial al alcanzarse el límite elástico (tensión tangencial de fluencia).

$T_F$  = carga por unidad de longitud de cordón.

$\Delta_F$  = desplazamiento del cordón al alcanzarse el límite elástico.

$\Delta_{Gr}$  = desplazamiento máximo al romperse el cordón.

$T_F/V$  = expresa la carga por unidad de longitud del cordón, entre el volumen unitario del cordón.

A	Electrodo	$\tau_F$	$T_F$	$\Delta_F$	$\Delta_{Gr}$	$T_F/V$	(7)/20.8
(mm)		(KN/cm <sup>2</sup> )	(KN/cm)	(mm)	(mm)	(KN/cm <sup>3</sup> )	(-)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
3	E 43	50	15	0.25	1.5	166.7	8.0
3	E 51	50	15	0.25	1.5	166.7	8.0
6	E 43	35	21	0.175	4.0	58.3	2.8
6	E 51	35	21	0.175	4.0	58.3	2.8
9	E 43	30	27	0.150	4.5	33.3	1.6
9	E 51	33	29.7	0.165	4.5	36.7	1.8
12	E 43	25	30	0.125	6.0	20.8	1.0
12	E 51	29	34.8	0.145	6.0	24.2	1.2

Podemos comparar los resultados de esta tabla con los dados por **Butler et alt.** y **Swannell** para cordones de 4.5 mm. de espesor.

Según Fischer la relación carga/longitud en el punto de fluencia, haciendo la media entre un cordón de 3 mm. y otro de 6 mm. es de:

$$T_F = 18 \text{ KN/cm} = 1.8 \text{ KN/mm}$$

El corrimiento en el punto de fluencia, haciendo la media entre un cordón de 3 mm. y otro de 6 mm. es de:

$$\Delta_{Gr} = 0.21 \text{ mm.}$$

Y el desplazamiento de rotura, haciendo la media entre un cordón de 3 mm. y otro de 6 mm. es de:

$$\Delta_{Gr} = 2.75 \text{ mm.}$$

La coincidencia con los resultados de **Butler et alt.**, y **Swannell** son buenas.

No obstante, viendo los resultados de la tabla anterior, y comparando con los valores de deformación tangencial de rotura dados por el I.I.W. para cordones laterales, se muestra una ductilidad mucho mayor de los cordones en los ensayos realizados por Fischer. La deformación tangencial de rotura según el I.I.W es de  $\gamma = 0.2$  y según estos ensayos es de  $\gamma = 2.75/4.5 = 0.61$ .

En la columna (8) de la tabla dada por Fischer se observa cuál es el rendimiento de un cordón a medida que aumenta su volumen. Así con respecto a la capacidad de resistir una carga por unidad de volumen se observa que el cordón de 3 mm. de espesor de garganta resiste 8 veces más carga que uno de 12 mm.

Si consideramos la capacidad de carga con respecto al espesor de garganta, la relación sería como sigue:

Espesor de garganta (mm.)	Capacidad de carga con relación al Espesor de garganta
3	2
6	1.4
9	1.2
12	1.0

Por tanto vemos que al aumentar el espesor de garganta no ganamos proporcionalmente en capacidad resistente del cordón. Este hecho no se tiene en cuenta en las Normas, ya que consideran que sí es proporcional esta relación.

Los resultados ofrecidos por Fischer presentan también limitaciones:

- 1. No se indica la influencia de la longitud de los cordones ensayados.
- 2. No se indica la influencia para distintas rigideces de las chapas a unir.

## 2.2. ESTUDIOS TEÓRICOS.

En los años 1984 y 1987 Kamtekar, basándose en la teoría de la plasticidad, desarrolla el problema matricialmente, llegando a determinar la carga última de un cordón de soldadura y grupos de cordones sometidos a cargas excéntricas.

Habla de una tensión residual que está presente, y que su valor será aquel que maximice la carga "P" exterior.

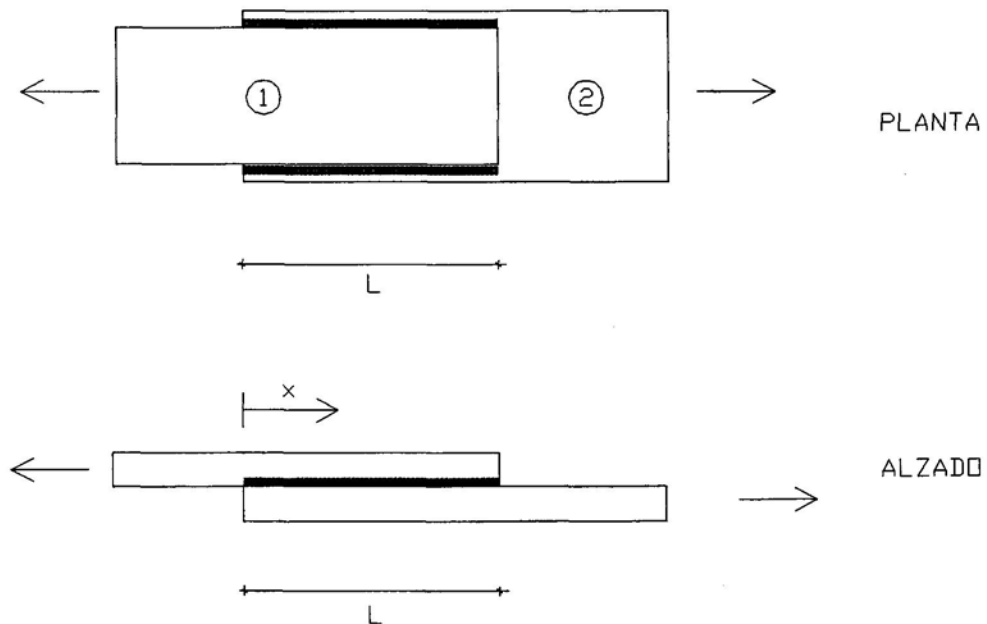
Considera igualmente constante la resistencia a lo largo del cordón. Tampoco tiene en cuenta para nada la rigidez de las chapas.

En 1985 Neis desarrolla el problema matricialmente, de un modo similar a Kamtekar.

Considera igualmente constante la resistencia a lo largo del cordón. Tampoco tiene en cuenta para nada la rigidez de las chapas.

Tanto Kamtekar como Neis llegan a resultados similares a los de Butler *et al.*, y Swannell.

En 1986 Faltus realiza un estudio teórico en régimen elástico de uniones largas, haciendo variar las rigideces de las chapas. En dicho estudio se plantea la siguiente unión:



donde:

- $A_1$  es la sección de la chapa 1
- $A_2$  es la sección de la chapa 2
- $a$  es la garganta del cordón
- $L$  es la longitud del cordón
- $E$  es el módulo de elasticidad.
- $G$  es el módulo de cortadura.

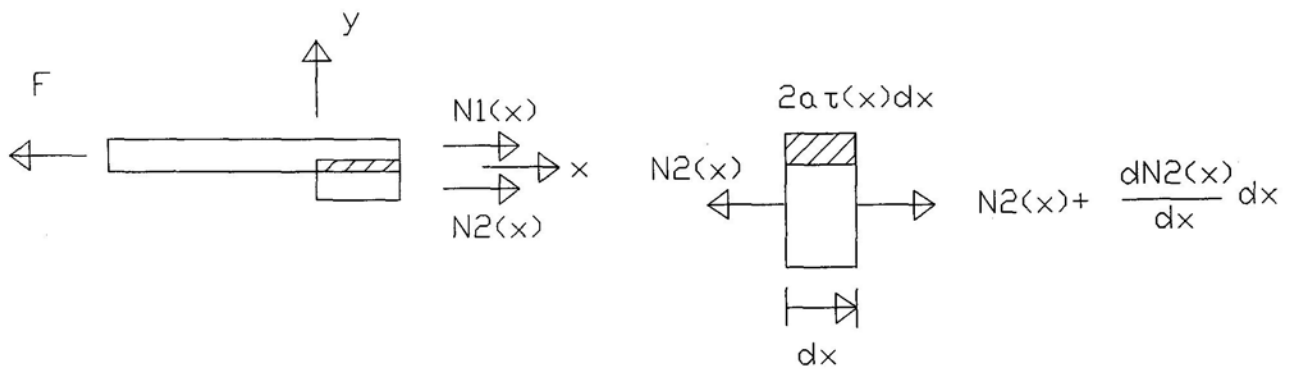
Como hipótesis de cálculo Faltus considera:

- el espesor de las piezas es pequeño, estando por tanto alineado el centro de gravedad de las piezas con el cordón de soldadura (con objeto de que no existan momentos en la unión).
- el cordón sólo está sometido a tensiones tangenciales y ésta sólo es función de la coordenada  $x$ .

- sólo se genera en las piezas tensión normal.

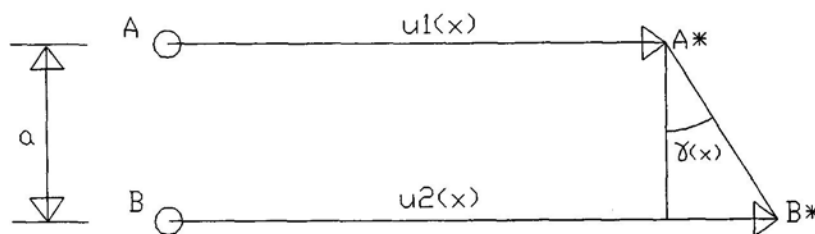
Se determinan de este modo las ecuaciones básicas, por equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones.

- Por equilibrio de fuerzas tenemos las siguientes ecuaciones básicas:



$$N_1(x) + N_2(x) = F \quad ; \quad \frac{dN_2(x)}{dx} = 2a\tau(x)$$

- Por compatibilidad de deformaciones tenemos las siguientes ecuaciones básicas:



$$u_2(x) = u_1(x) + \gamma(x)a \quad ; \quad \epsilon_1 = \frac{\delta u_1}{\delta x} \quad ; \quad \epsilon_2 = \frac{\delta u_2}{\delta x}$$

Las leyes de comportamiento del material son:

$$N_1 = E A_1 \varepsilon_1 ; N_2 = E A_2 \varepsilon_2 ; \tau = G \gamma$$

Combinando adecuadamente las anteriores expresiones se eliminan los desplazamientos y deformaciones, llegando a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - w^2 \tau(x) = 0 ; w^2 = 2G \frac{A_1 + A_2}{E A_1 A_2}$$

cuya resolución permite obtener el valor de  $\tau(x)$ :

$$\tau(x) = B_1 \cosh wx + B_2 \sinh wx$$

Las constantes  $B_1$  y  $B_2$  se determinan por aplicación de las condiciones de contorno del problema, que son:

$$N_1(0) = F ; N_2(0) = 0 ; N_1(L) = 0 ; N_2(L) = F$$

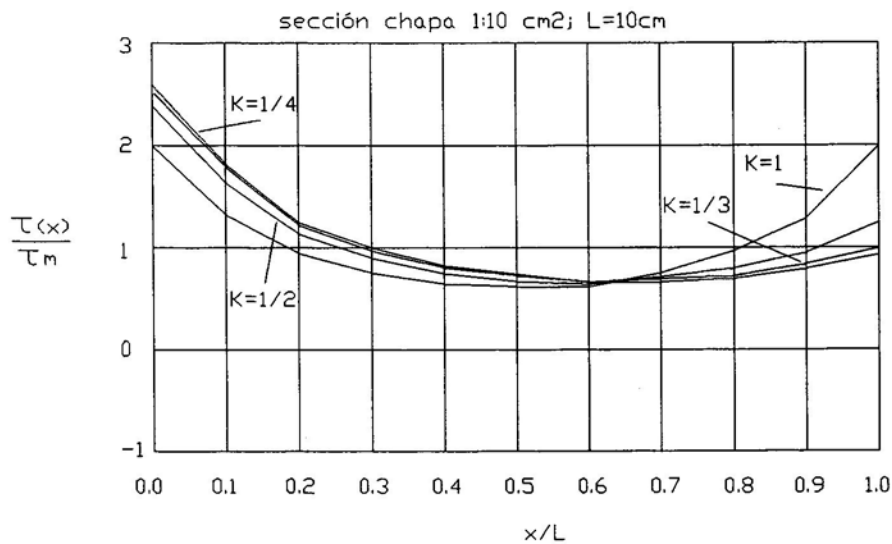
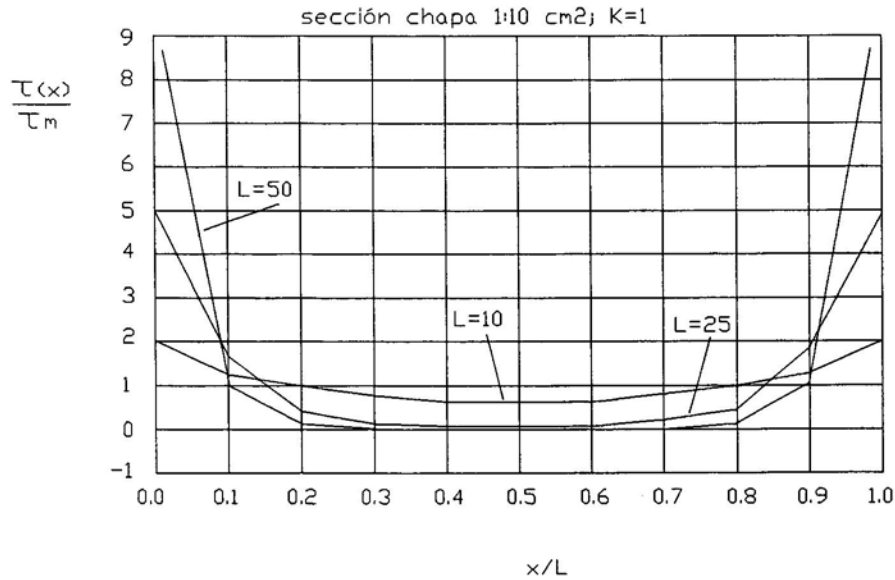
Con lo que se obtiene:

$$\frac{\tau(x)}{\tau_m(x)} = \frac{Lw}{\sinh wL} \left( \cosh wx - \frac{1}{K+1} (\cosh wx - \cosh(L-x)) \right)$$

$$\tau_m(x) = \frac{F}{2aL} ; K = \frac{A_1}{A_2}$$



Representando la expresión anterior para  $K = 1$  y diferentes longitudes así como para una longitud dada y diferentes valores de  $K$  obtenemos las siguientes gráficas:



De dicho estudio teórico realizado por Faltus se extraen las siguientes conclusiones:

- Se produce una concentración de tensiones en los extremos del cordón, más acusada cuanto mayor es su longitud.
- Al aumentar la longitud del cordón gran parte del mismo está con poca tensión.
- La distribución es simétrica si  $K=1$ , es decir, si ambas chapas tienen la misma rigidez.

- Si las chapas no tienen la misma rigidez ( $K$  distinto de 1) la concentración se hace más acusada en el lado de la chapa de menor rigidez.

Los resultados ofrecidos por Faltus presentan también una serie de limitaciones:

- 1. Realiza únicamente un estudio en régimen elástico. No realiza por tanto un estudio en régimen plástico, hasta rotura.
- 2. Estudia el problema en un solo plano, considerando únicamente la existencia de tensiones tangenciales en el cordón, sin tener en cuenta las tensiones perpendiculares al cordón.
- 3. Al ser un estudio en dos dimensiones, no se tiene en cuenta la influencia de las dimensiones reales de chapas y cordón en la distribución de tensiones.

En 1992 Rúa realiza, en la línea seguida por Faltus, un estudio teórico en régimen elástico de uniones a solape, haciendo variar las rigideces de las chapas, planteando la compatibilidad de deformaciones entre las chapas y el cordón de soldadura, considerando las siguientes hipótesis:

- a) Se adopta un diagrama tensión-deformación bilineal.
- b) Se considera como carga de agotamiento del cordón la que produce la tensión última en el elemento más solicitado del cordón.
- c) No se tienen en cuenta las tensiones normales al cordón.
- d) La unión se dimensiona para que se produzca antes el agotamiento del cordón que de las chapas a unir.

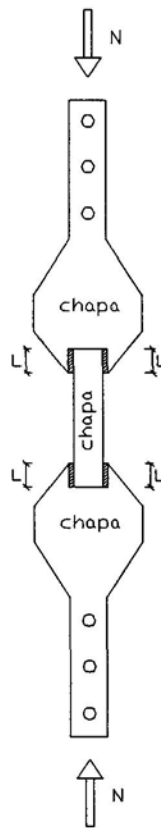
Las conclusiones obtenidas son similares a las obtenidas por Faltus:

- Para cada valor de rigidez de chapas existe una longitud a partir de la cual no se consigue un aumento apreciable de la capacidad de la unión.
- Se produce una concentración de tensiones en los extremos del cordón, más acusada cuanto mayor es su longitud.
- Al aumentar la longitud del cordón gran parte del mismo está con poca tensión.

- La distribución es simétrica si ambas chapas tienen la misma rigidez.
- Si las chapas no tienen la misma rigidez la concentración se hace más acusada en el lado de la chapa de menor rigidez.

Dicho estudio teórico realizado en régimen elástico se completa con un estudio en régimen plástico, con objeto de considerar por un lado la incurvación de las isostáticas (y por tanto los esfuerzos normales al cordón), y por otro lado tener en cuenta la plastificación progresiva del cordón. Dicho estudio en régimen plástico se lleva a cabo por dos vías:

- a) un estudio experimental, ensayando a compresión probetas de acero A42, con soldaduras de longitudes "L" variables entre 45 y 120 mm.. La geometría de las probetas se muestra en la siguiente figura:



- b) un estudio teórico empleando elementos finitos, modelizando los elementos ensayados en la parte experimental, para longitudes de cordones de 45, 90, 135 y 180 mm. En el cálculo de tensiones el criterio aplicado es el de Von Mises, y como criterio de desplazamiento máximo en régimen plástico se sigue el adoptado por el I.I.S., donde la deformación tangencial de rotura es de  $\gamma = 0.2$ .

Las conclusiones obtenidas del estudio en régimen plástico son:

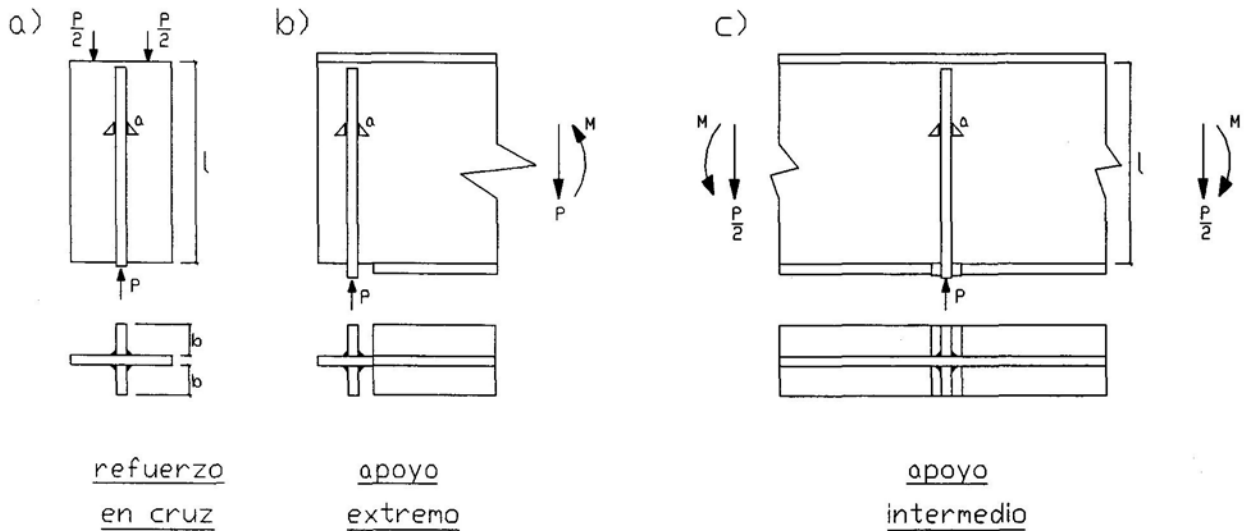
- La gran diferencia de comportamiento del cordón entre realizar un planteamiento elástico o un planteamiento plástico.
- En el caso de un estudio elástico existe un valor de la longitud del cordón a partir del cual no se consigue un aumento de la carga de rotura de la unión, que depende de la rigidez de las placas a unir. En este caso las Normativas (Norma MV-103 vigente en el momento del estudio y Eurocódigo3) dan valores por debajo de la seguridad para cordones largos. En el caso de un cálculo plástico del cordón, los valores de la Normativa se encuentran del lado de la seguridad al considerarse la plastificación de todo el cordón.
- Cuando estemos en un caso en el que se necesite tener en cuenta una posible fatiga en la unión, será necesario realizar un cálculo elástico, y necesitaremos tener en cuenta la longitud eficaz del cordón. Una solución para aumentar la longitud eficaz del cordón y su capacidad resistente es aumentar la rigidez de las chapas a unir.

Los resultados ofrecidos por Rúa presentan también una serie de limitaciones:

- 1. A pesar de realizarse el estudio con elementos finitos en dos dimensiones, no se analiza el estado tensional al variar las rigideces de las piezas. Dentro de esta variación de rigidez se tienen como variables:
  - la anchura de las piezas a unir
  - el espesor de las mismas
- 2. Se analizan cordones con longitudes máximas de 180 mm., siendo interesante conocer el comportamiento de cordones más largos.
- 3. Al ser un estudio en dos dimensiones, no se analiza la distribución real de tensiones en el espesor del plano de garganta. Para ello es necesario un estudio en tres dimensiones.

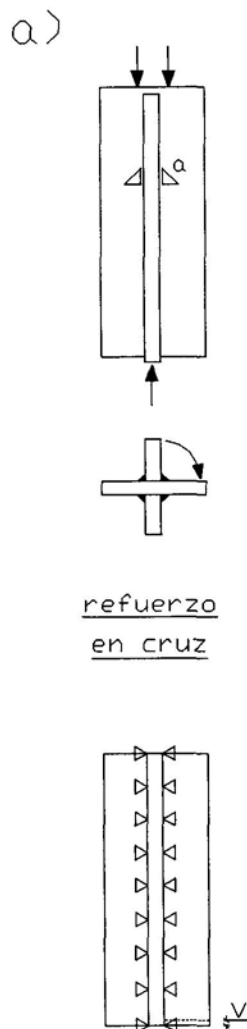
2.3. ESTUDIOS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.

En 1990 Fischer y Wenk realizan una modelización mediante elementos finitos de varios tipos de uniones. Estas son: un refuerzo en cruz de un rigidizador soldado en ángulo al alma de una viga de alma llena (a), un diafragma de apoyo final de una viga (b), y un diafragma de apoyo intermedio de una viga (c), según se observa en las siguientes figuras.



La modelización se ha realizado con un modelo plano (bidimensional), aprovechando las simetrías existentes en las uniones.

Así en el refuerzo en cruz (a) se modeliza para el cálculo un cuarto de la unión, según la siguiente figura, donde se abate el plano del rigidizador en el plano que contiene el alma de la viga. En los bordes del cordón se impiden los desplazamientos horizontales mediante apoyos, de manera que el cordón únicamente transmite de una a otra chapa tensiones tangenciales y los esfuerzos que resultan de la excentricidad de la carga son soportados por los apoyos horizontales. El alma de la viga se fija impidiendo sus desplazamientos verticales. La carga se aplica en el extremo inferior del rigidizador, a modo de un desplazamiento vertical hacia arriba (v).

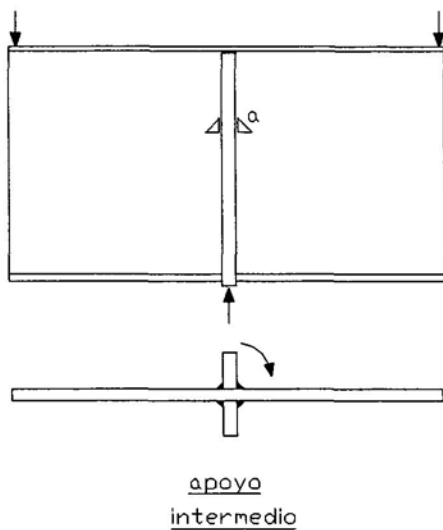


En el caso de diafragma de apoyo final de una viga (b) y diafragma de apoyo intermedio de una viga (c) se modelizan de manera análoga al refuerzo en cruz: se modeliza un cuarto de la unión, según las siguientes figuras, donde se abate igualmente el plano del diafragma en el plano que contiene el alma de la viga. En los bordes del cordón se fijan

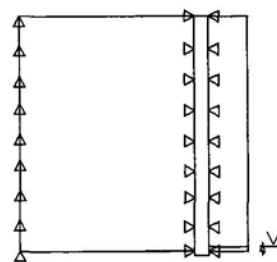
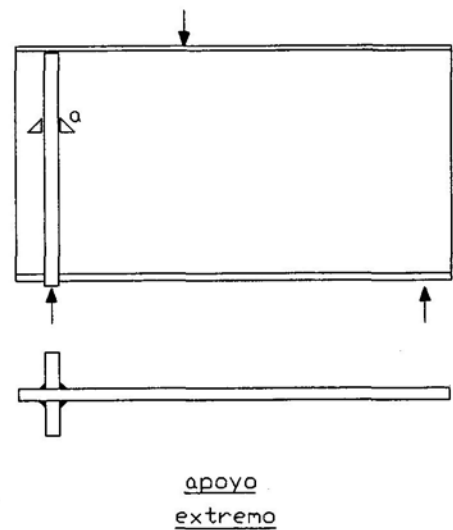
igualmente los desplazamientos horizontales, de manera que el cordón únicamente transmite de una a otra chapa tensiones tangenciales. La viga se fija mediante apoyos verticales, desplazables horizontalmente.

La carga también se aplica verticalmente en el extremo inferior del diafragma, como un desplazamiento ascendente (v).

b)

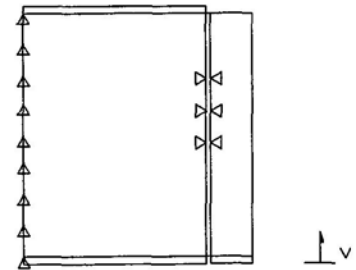
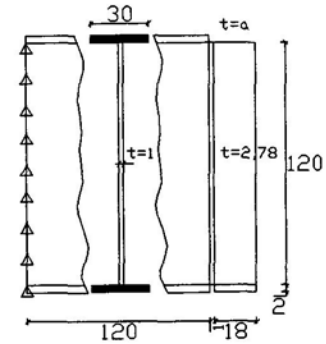
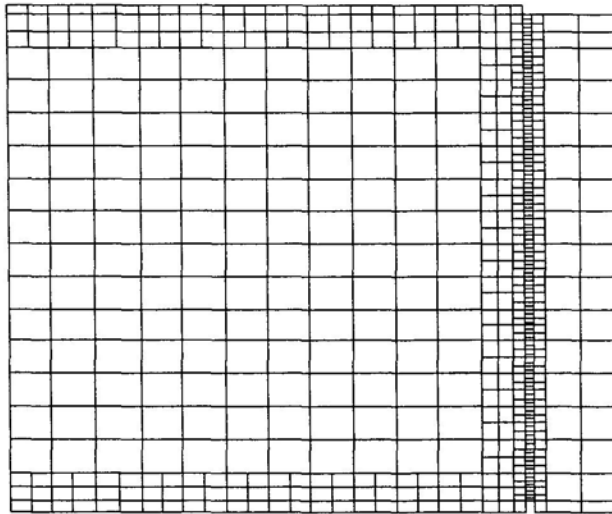


c)



El programa de cálculo empleado es el es STRUDL, en su versión V4MB. Los autores modelizaron tanto las chapas como el cordón con un elemento plano cuadrangular de cuatro nodos, con dos grados de libertad por nodo: desplazamiento vertical "uy" y horizontal "ux". Se discretizó una malla bastante fina, según se observa en la modelización de la unión correspondiente al diafragma de apoyo intermedio.

mallá empleada en la modelización



cotas en cm.

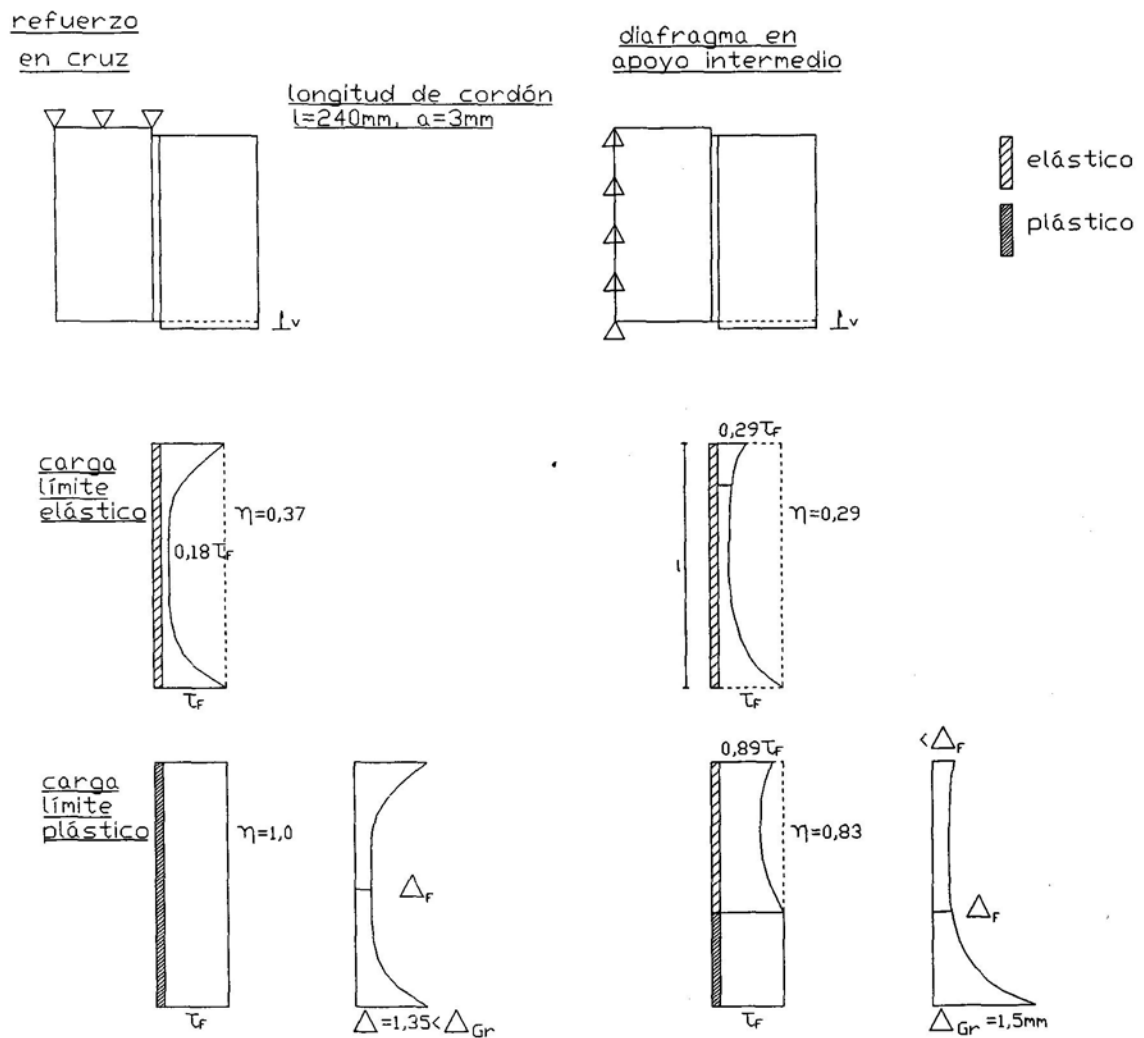
Al material que compone el cordón se le asigna un diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  bilineal, siendo su espesor de garganta de 3 mm. Las chapas, modelizadas para un acero St52 ( límite elástico de 3.600 kg/cm<sup>2</sup> ), se han dimensionado con un espesor de manera que plastifique antes por completo el cordón.

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos en dos casos, refuerzo en cruz y diafragma de apoyo intermedio. El cálculo que realizan tiene dos partes:

- Por un lado se hace un cálculo en régimen elástico, hasta que un extremo del cordón alcanza la tensión tangencial de fluencia.



- Posteriormente el cordón entra en el campo plástico, aumentándose la carga hasta que se llega al desplazamiento límite de rotura correspondiente a un espesor de cordón de 3 mm. ( $\Delta_{Gr} = 1.5 \text{ mm.}$ ), desplazamiento máximo obtenido experimentalmente por Fischer, tal como se expuso en el apartado 2.1. de este documento.



Fijándonos primero en el comportamiento elástico se observa lo siguiente:

- 1. La distribución de tensiones no es constante a lo largo del cordón. Por tanto se puede hablar de una longitud eficaz del cordón, hablando en régimen elástico.

- 2. En el caso del diafragma intermedio, al no ser iguales las anchuras de la chapa del diafragma de apoyo y la del alma de la viga, se produce una distribución de tensiones asimétrica, desaprovechándose el cordón. En el caso del refuerzo en cruz, debido a que las anchuras de ambas chapas unidas por el cordón son iguales, el cordón presenta iguales picos de tensiones en ambos extremos, aprovechándose simétricamente el cordón.

Dentro ya del campo plástico, se aumenta la carga en el cordón hasta llegar en su extremo al desplazamiento de rotura, que se fija en 1,5 mm., tal y como obtuvo Fischer. Tendríamos por tanto un concepto de longitud eficaz refiriéndonos ya al campo plástico. Este es el planteamiento que hace el I.I.S., el cual limita la longitud máxima de cordones considerando que el cordón puede llegar a su máxima carga admisible en su extremo (aquí establecido por un desplazamiento máximo de rotura), encontrándose parte del cordón todavía en régimen elástico.

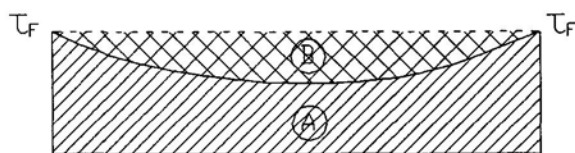
Fischer y Wenk hicieron diversos modelos con elementos finitos, variando las longitudes de cordón, para tres tipos de uniones:

- Rigidizador soldado a una placa infinitamente rígida (1).
- Diafragma en apoyo intermedio (2)
- Refuerzo en cruz (3)

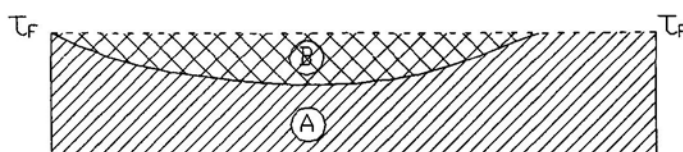
En la siguiente tabla se pueden observar los resultados obtenidos. Se dan dos coeficientes  $\eta$ , uno en régimen elástico y otro en régimen plástico. Dichos coeficientes significan lo siguiente:

- $\eta$  elástico: representa el cociente entre la suma del "área" de tensiones existente en el plano de garganta cuando se alcanza en el extremo del cordón el límite elástico, y el "área" de tensiones considerando que todos los puntos del plano de garganta del cordón se encuentran a la tensión correspondiente al límite elástico.
- $\eta$  plástico: representa el cociente entre la suma del "área" de tensiones existente en el plano de garganta cuando se alcanza en el extremo del cordón el límite de rotura, y el "área" de tensiones considerando que todos los puntos del plano de garganta del cordón se encuentran a la tensión correspondiente al límite elástico.

En las siguientes figuras se observa gráficamente el significado de  $\eta$  elástico y  $\eta$  plástico



$$\eta_{\text{elástico}} = A / (A+B)$$



$$\eta_{\text{plástico}} = A / (A+B)$$

Cuanto más cerca esté  $\eta$  de la unidad, más se parecerá la longitud eficaz a la longitud real del cordón.

l (cm)	$\eta$					
	$\eta$ elástico			$\eta$ plástico		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
120	0.34	0.39	0.49	1.00	1.00	1.00
180	0.28	0.33	0.42	0.92	0.92	1.00
240	0.24	0.29	0.37	0.81	0.83	1.00
360	0.20	0.25	0.32	0.66	0.72	0.92
480	0.17	0.22	0.28	0.57	0.65	0.82
600	0.15	0.20	0.26	0.51	0.58	0.73
720	0.14	0.18	0.24	0.46	0.54	0.66

Analizando los resultados se observa que la longitud eficaz es tanto menor cuanto más diferencia de rigideces existe entre ambos elementos unidos por el cordón. El caso más desfavorable, con menor longitud eficaz por tanto, es el de un rigidizador unido a una placa infinitamente rígida, seguido del diafragma de apoyo extremo, y por último el de un refuerzo en cruz.

Como conclusión el artículo comenta el límite dado por la Norma alemana DIN 18800 Teil 1 para la longitud de cordones,

$$l = 100 \times a,$$

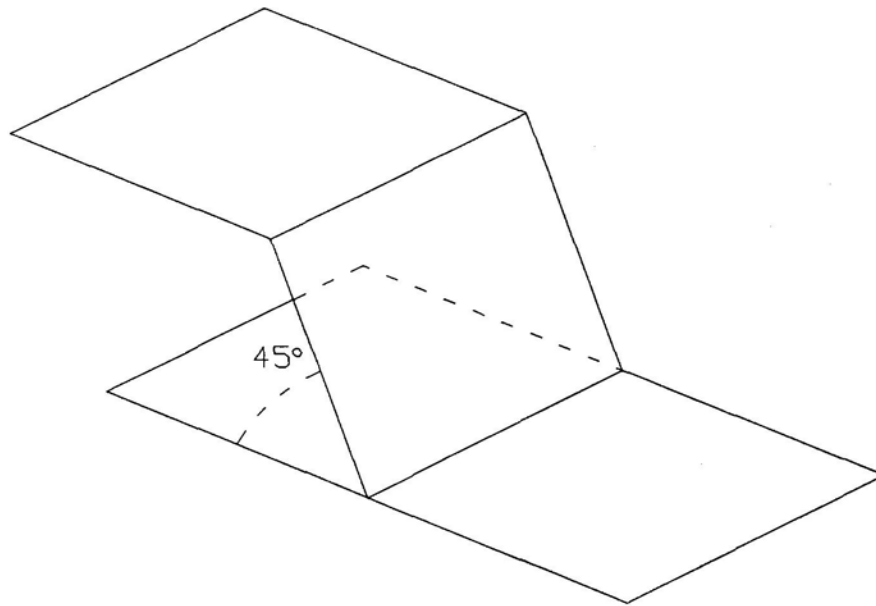
siendo  $a$  el espesor de garganta.

Según la tabla anterior tal como comentan los autores, dicho límite, según el estudio con elementos finitos realizados, y viendo la longitud eficaz considerando la capacidad de plastificación del cordón, se puede aumentar.

Así en el caso más desfavorable por ellos estudiado (rigidizador unido a una chapa infinitamente rígida), este límite se puede establecer en  $l = 476 \times a$ , según se comenta en su artículo.

Este límite propuesto es exagerado si lo comparamos con el límite dado por el Eurocódigo 3 ( $l = 150 \times a$ ).

En 1993 **Quintero** realiza un estudio mediante elementos finitos de una unión entre dos chapas soldadas en ángulo mediante cordones laterales o frontales. Emplea el programa ANSYS, revisión 4.4A, en su versión universitaria, funcionando con un ordenador PC 486. Modeliza la unión mediante elementos planos tipo lámina. En la siguiente figura se observa la modelización del cordón.



El modelo consta de una chapa superior, a través de la cual se introducen las cargas, paralelas o perpendiculares al cordón, el propio cordón y una chapa inferior, la cual tiene impedidos los corrimientos normales a su plano al establecer una simetría.

El cordón se modeliza como una lámina de espesor  $a\sqrt{2}$ , inclinada a  $45^\circ$  respecto a los planos de las chapas, que corresponde a una garganta real de 4.5 mm.

La longitud del cordón es de 6,35 mm. ( 1/4 de pulgada ).

En el modelo se han empleado dos tipos de elementos láminas, STIF93 ( con ocho nodos ) y STIF43 ( con 4 nodos ). A igualdad de número de elementos, STIF93 es más preciso, pero conduce a modelos con excesivo número de grados de libertad si se desea una malla con poco error, por lo que se optó al final por el elemento STIF43.

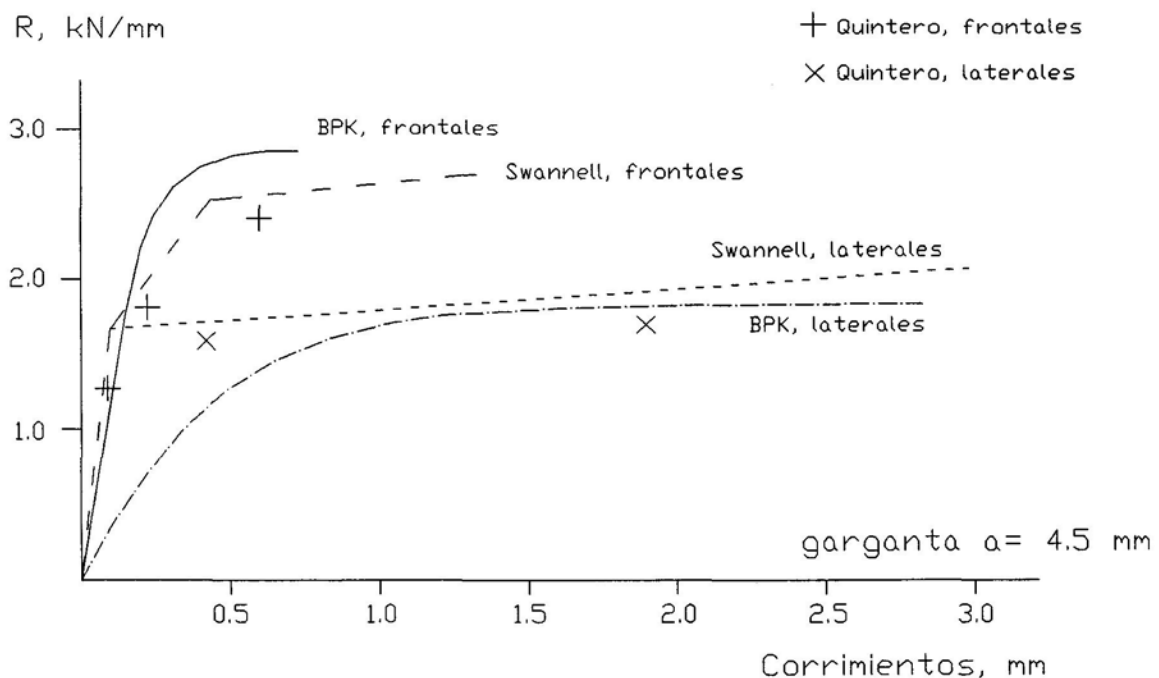
Para el metal base se ha dispuesto un acero A42b.

El límite elástico del material de aportación del cordón se ha elegido basándose el autor en las recomendaciones dadas por el I.I.S.; allí se comenta cómo las

soldaduras se comportan elásticamente mientras la tensión tangencial en el plano de garganta no supere  $320 \text{ N/mm}^2$  para cordones laterales y  $400 \text{ N/mm}^2$  para cordones frontales, lo que supone tener un material con límite elástico de  $554 \text{ N/mm}^2$  y  $693 \text{ N/mm}^2$  respectivamente. No obstante, al adoptarse un espesor en el cordón de  $a\sqrt{2}$ , se toma un límite elástico de  $450 \text{ N/mm}^2$ . La tensión de rotura se fija en  $450 \times 1.25 = 560 \text{ N/mm}^2$ , tal como recomienda el I.I.S. (se considera que el límite elástico es el 80 % de la carga de rotura). El módulo de elasticidad para el metal de aportación del cordón se ha tomado como 1/5 del módulo de Young del metal base, es decir  $42.000 \text{ N/mm}^2$ . El módulo tangente en la rama plástica es de  $155 \text{ N/mm}^2$ .

Quintero, con este modelo, estudia la unión con cargas paralelas y perpendiculares al eje del cordón, comparándolas con los resultados obtenidos con Butler *et al* y Swannell. En la siguiente figura se observan los resultados obtenidos, para cordones frontales y laterales. La coincidencia es notable.

Tampoco se tiene en cuenta en este estudio el comportamiento del cordón para longitudes mayores, ni para distintas rigidices de chapas.



### **3. ESTADO ACTUAL DE LA NORMATIVA.**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN.**

Como se dijo en el Capítulo 1, el planteamiento que reflejan todas las instrucciones, normas y reglas de cálculo de uniones soldadas se basa en considerar que la carga transmitida (o resistida) por cada elemento diferencial del cordón es igual a lo largo de toda su longitud.

Según se utilicen normas europeas o americanas, para el cálculo de tensiones se utilizarán criterios de tensión de comparación o de máxima tensión tangencial, pero en ninguna se tiene en cuenta ninguna diferencia entre los esfuerzos soportados por cada elemento diferencial del cordón a lo largo de él.

El motivo de esta consideración es el planteamiento realizado en todas las normas de que tanto el cordón de soldadura como las chapas unidas por él son infinitamente rígidas.

Este planteamiento nos lleva a la hipótesis de un reparto lineal de la carga a lo largo del cordón y por lo tanto a que todos los elementos del cordón están a la misma tensión y alcanzan la tensión crítica al mismo tiempo.

Este planteamiento no es real puesto que para transmitir la carga de una a otra chapa, a través del cordón, es necesario que se produzca un incurvamiento de las isostáticas y por tanto unas cargas normales al eje del cordón que alteran dichas tensiones.

Además las chapas que constituyen la unión no son rígidas y por tanto es necesario plantear la compatibilidad de deformaciones de ambas placas de la unión, lo que nos llevará a una distribución de esfuerzos a lo largo del cordón que depende de la rigidez de las placas y del propio cordón de soldadura.

A continuación se presentan diversos métodos de cálculo planteados en la Normativa existente.

### 3.2. MÉTODOS DE CÁLCULO SEGUN EL I.I.S.

La determinación de la resistencia de una unión soldada se puede estudiar por dos procedimientos, según indica el Instituto Internacional de la Soldadura. Estos dos caminos son los siguientes:

- 1. El cálculo de la soldadura depende directamente del estado tensional del cordón y la zona de chapas adyacente. Es un cálculo mucho más exacto, necesitando realizar un análisis tensional de la zona en estudio.

- 2. La unión es considerada como una unidad aparte en la estructura, y la fuerza actuante en la soldadura se deriva de la fuerza total que actúa en la unión.

A continuación se pasan a exponer ambos métodos.

#### 3.2.1. Cálculo tensional.

Esta vía de cálculo supone que una soldadura solicitada por una fuerza determinada se ve sometida a un estado tensional que depende de tres componentes, con la siguiente expresión:

$$\sigma_{CO} = \sqrt{\beta \times \sigma^2 + \alpha \times (\tau_n^2 + \delta \times \tau_a^2)} \leq \sigma_u$$
$$\sigma \leq \sigma_u$$

donde:

$\alpha$ ,  $\beta$  y  $\delta$  son unos coeficientes, cuyos valores difieren de una Norma a otra.

$\sigma_{CO}$  es la tensión de comparación.

$\sigma$  es la tensión normal ponderada, referida al plano de garganta.

$\tau_n$  es la tensión tangencial ponderada, normal a la arista, referida al plano de garganta.



$\tau_a$  es la tensión tangencial ponderada, paralela a la arista, referida al plano de garganta.

$\sigma_u$  es la resistencia de cálculo del acero.

Dicha fórmula presenta una base empírica.

### 3.2.2. Cálculo basado en la fuerza total a transmitir por la unión.

En estos casos se hace un análisis plástico de toda la unión, asumiendo que todo el cordón se comporta uniformemente, produciéndose igualmente el comienzo de la plastificación en toda la longitud al mismo tiempo.

En el caso que nos ocupa, el Instituto internacional de la Soldadura establece la siguiente expresión, para una unión formada por cordones laterales de soldadura en ángulo sometidos a una fuerza paralela a su eje:

$$P = \sum a \times l \times \sigma_w$$

siendo:

$P$  la fuerza total en el cordón.

$\sum a \times l$  la suma de áreas de la sección del plano de garganta de todas las soldaduras.

$\sigma_w$  la tensión admisible en la sección de garganta (determinada aplicando el criterio de máxima tensión cortante).

Dicha fórmula (I.I.S.) ignora los picos de tensiones que se producen en los extremos del cordón en la distribución de tensiones elásticas. Sin embargo apunta el I.I.S. que los test de ruptura muestran que se encuentra del lado de la seguridad, pues las tensiones se igualan al final del proceso de carga, al entrar el cordón en deformaciones plásticas. Para cordones con relación elevada entre su longitud y su garganta, la capacidad de deformación en sus extremos puede llegar al límite, antes de que en el centro de cordón se haya alcanzado su límite elástico. De ahí que los diferentes códigos hayan establecido una relación mínima entre el espesor de garganta y el espesor de chapa, y entre el espesor de garganta y la longitud del cordón.

### 3.3. MÉTODOS DE CÁLCULO SEGUN DIVERSAS NORMAS.

En la actualidad el cálculo según las diferentes Normas o códigos se basan en los dos métodos de cálculo preconizados por el I.I.S.

#### A) NORMA ESPAÑOLA NBE-EA-95

Para cordones laterales en ángulo sometidos a cargas paralelas a su eje, la Norma EA-95 recomienda explícitamente un cálculo según la fuerza total a transmitir por la unión:

$$F^* \leq 0.75 \cdot a \cdot L \cdot \sigma_u \quad (1)$$

siendo:

$F^*$  la fuerza total actuando en la unión, mayorada

$a \cdot L$  es la suma de áreas de la sección del plano de garganta de los distintos cordones de soldadura.

$\sigma_u$  la tensión admisible en la sección de garganta (determinada aplicando el criterio de máxima tensión cortante).

No obstante, también apunta un cálculo tensional, con la siguiente expresión:

$$\sigma_{co} = \sqrt{\sigma^2 + 1.8 \times (\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq \sigma_u \quad (2)$$

donde:

$\sigma_{co}$  es la tensión de comparación.

$\sigma$  es la tensión normal ponderada, referida al plano de garganta.

$\tau_n$  es la tensión tangencial ponderada, normal a la arista, referida al plano de garganta.

$\tau_a$  es la tensión tangencial ponderada, paralela a la arista, referida al plano de garganta.

$\sigma_u$  es la resistencia de cálculo del acero.

Hay que apuntar que la fórmula (1) se obtiene de la fórmula (2), sin más que hacer nulas las componentes de tensiones  $\sigma$  y  $\tau_n$  actuantes en el plano de la sección de garganta del cordón.

### **B) NORMA FRANCESA**

$$F^* \leq 0.75 \cdot \alpha \cdot a \cdot L \cdot \sigma_u$$

$$\alpha = 0.8 \cdot (1 + 1/a) \text{ para } a \geq 4 \text{ mm}$$

$$\alpha = 1 \text{ para } a < 4 \text{ mm}$$

teniendo  $F^*$ ,  $a$ ,  $L$  y  $\sigma_u$  los mismos significados que en la Norma Española.

### **C) EUROCODIGO 3**

El Eurocódigo 3 presenta un cálculo de cordones de soldadura en ángulo según la fuerza total a transmitir por la unión.

Así determina que la resistencia de un cordón de soldadura en ángulo se supone adecuada si, en cualquier punto de su longitud, la resultante, por unidad de longitud, de todas las fuerzas transmitidas por el cordón de soldadura no supera su resistencia de cálculo  $F_{w,Rd}$

Independientemente de la orientación del cordón de soldadura, la resistencia de cálculo por unidad de longitud  $F_{w,Rd}$  se determinará mediante la expresión:

$$F_{w,Rd} = f_{vw} \cdot a$$

donde:

$f_{vw}$  es la resistencia a cortante de cálculo en el cordón de soldadura

$a$  es el espesor del cordón de garganta

La resistencia a cortante de cálculo  $f_{vw}$  se determinará a partir de la expresión:

$$f_{vw} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w * \gamma_{Mw}} \quad (1)$$

en donde:

$f_{vw}$  es la resistencia a cortante de cálculo en el cordón de soldadura.

$f_u$  es la resistencia última nominal a tracción de la pieza más débil de la unión.

$\gamma_{Mw}$  es un coeficiente de minoración de la resistencia de cálculo del acero

$\beta_w$  es un coeficiente de correlación, el cual tiene distintos valores dependiendo de la calidad del acero, según el siguiente cuadro:

Tipo de acero EN 10025	Resistencia a tracción $f_u$	Coficiente de correlación $\beta_w$
S 235	360 N/mm <sup>2</sup>	0.8
S 275	430 N/mm <sup>2</sup>	0.85
S 355	510 N/mm <sup>2</sup>	0.9

No obstante, también el Eurocódigo 3 apunta en uno de sus Anejos un cálculo tensional, con la siguiente expresión:

$$\sigma_{co} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \times (\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq f_u / (\beta_w * \gamma_{Mw}) \quad (2)$$

debiendo cumplirse que  $\sigma \leq f_u / \gamma_{Mw}$

donde:

$\sigma_{co}$  es la tensión de comparación.

$\sigma$  es la tensión normal ponderada, referida al plano de garganta.

$\tau_n$  es la tensión tangencial ponderada, normal a la arista, referida al plano de garganta.

$\tau_a$  es la tensión tangencial ponderada, paralela a la arista, referida al plano de garganta.

$\sigma_u$  es la resistencia de cálculo del acero.

Dicha expresión es la que recomienda el I.I.S, obtenida por un ajuste realizado tras numerosos ensayos en uniones. Igualmente hay que apuntar que la fórmula (1) se obtiene de la fórmula (2), sin más que hacer nulas las componentes de tensiones  $\sigma$  y  $\tau_n$  actuantes en el plano de la sección de garganta del cordón.

#### **D) REGLAMENTOS AMERICANOS.(A.W.S.)**

La máxima fuerza soportada por la unión se determina mediante la expresión:

$$F^* \leq 0.4 \cdot a \cdot L \cdot \sigma_y$$

siendo:

$F^*$  fuerza actuante en la unión, mayorada

$a$  espesor del cordón de garganta

$L$  longitud del cordón

$\sigma_y$  tensión admisible en la sección de garganta.

La diferencia que existe entre los coeficientes de las normas europeas (0.75) y los códigos americanos (0.4) es debido a la diferencia de criterios utilizados en ambas normativas. En Europa se calcula con cargas mayoradas y en Norteamérica con tensiones admisibles.

### **3.4. HIPOTESIS EMPLEADAS EN LAS NORMAS.**

En todos los planteamientos de las Normas se consideran las siguientes hipótesis:

- I) Todos los elementos de la unión, chapas y cordón de soldadura, son rígidos. La carga se transmite de forma uniforme a lo largo de todo el cordón.
  
- II) La capacidad de la unión es la fuerza  $F$  que produce en cada elemento diferencial del cordón la tensión última.

### **3.5. OBSERVACIONES A LA NORMATIVA.**

Como se señaló al inicio de este documento, el planteamiento de unión totalmente rígida no es riguroso, y la unión no puede ser independiente de la rigidez de las placas a unir y de la del propio cordón.

El planteamiento unidimensional seguido en las Normas conduce a que la carga se transmita uniformemente a lo largo de todo el cordón. Este planteamiento es demasiado simplista, pues la transmisión y reparto de tensiones a lo largo del cordón depende de más variables que este modelo unidimensional empleado en las Normas no contempla.

Así, para transmitir la carga de una a otra chapa a través del cordón es necesario que se produzca un incurvamiento de las isostáticas, apareciendo unas tensiones normales al eje del cordón que alteran dichas tensiones.

La aparición de estas tensiones normales al eje del cordón no se recoge en las Normas, y dependen de la longitud del cordón, de las rigideces de las chapas a unir (rigidez que a su vez depende de la anchura y el espesor de dichas chapas), y de la rigidez del propio cordón de soldadura. Todos estos factores confieren al problema un carácter tridimensional.

Por otro lado un incremento indefinido de la longitud del cordón no puede aumentar indefinidamente la resistencia de la unión y a partir de una longitud  $L$  que llamaremos longitud eficaz no aumenta la capacidad resistente de la unión aunque se aumente indefinidamente la longitud del cordón.

Comparando la antigua Norma Española E.M.62 y el actual Eurocódigo 3, se observan planteamientos muy dispares al limitar la longitud útil del cordón.

El epígrafe 6.85 de la E.M.62 dice: "Los cordones laterales de soldaduras en ángulo que transmitan esfuerzos axiales de barras, tendrán una longitud no inferior a quince veces su espesor de garganta, ni inferior al ancho del perfil que unen. La longitud máxima no será superior a sesenta veces el espesor de garganta ni a doce veces el ancho del perfil unido".

Se tiene en cuenta así simultáneamente los dos efectos, la incurvación de las isostáticas y un límite a la longitud que implícitamente es un reconocimiento de la longitud eficaz del cordón.

En el Eurocódigo 3, su epígrafe 6.6.9. se dedica a "uniones largas", y plantea una reducción de la longitud efectiva del cordón aplicando un coeficiente de reducción a la longitud real y que tiene la siguiente expresión:

$$B_{LW,1} = 1.2 - 0.2 * \frac{L_j}{150 * a}$$

$$B_{LW,1} < 1$$

en donde  $L_j$  es la longitud total del solape en la dirección del esfuerzo.

Esta reducción sólo afecta a cordones cuya longitud sea mayor de ciento cincuenta veces el espesor.

Como vemos, la diferencia en el tratamiento del concepto de longitud eficaz establecidos por las Normas E.M.62 y Eurocódigo 3 es notable.

Todas estas circunstancias han sido el motivo de plantear este estudio, en el que se analiza el comportamiento del cordón de soldadura a lo largo de su longitud, tanto teórica como experimentalmente, en función de todos los factores que entran a formar parte en la transmisión de tensiones a través del cordón.

En los dos siguientes apartados se presenta el desarrollo propio de esta tesis doctoral, mediante un estudio teórico y un estudio experimental.

El estudio teórico se va a realizar modelizando mediante elementos finitos una serie de uniones entre dos chapas, soldadas a solape mediante cordones laterales, y sometiendo a la unión a una fuerza axial, paralela al eje longitudinal del cordón. La técnica de análisis mediante elementos finitos es la que mejor recoge el aspecto tridimensional que presentan las uniones estudiadas.

Con objeto de contrastar el estudio teórico la tesis se complementa con un estudio experimental, el cual se ha desarrollado a través de dos campañas de ensayos: una primera realizada sobre 5 probetas ensayadas a tracción, y otra posterior realizada con 14 probetas ensayadas a compresión, todas ellas con uniones entre chapas unidas a solape por cordones laterales en ángulo.



#### **4. ESTUDIO TEÓRICO.**

##### **4.1. ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS. MODELIZACIÓN DE LAS UNIONES.**

En este apartado se presenta el estudio teórico realizado mediante modelización con elementos finitos. Tratamos de estudiar el comportamiento de chapas unidas a solape mediante cordones laterales de soldadura en ángulo simétricos, estando sometidas las chapas a esfuerzos axiales aplicados en la dirección de los cordones que forman la unión.

###### **4.1.1. Programa utilizado para el cálculo.**

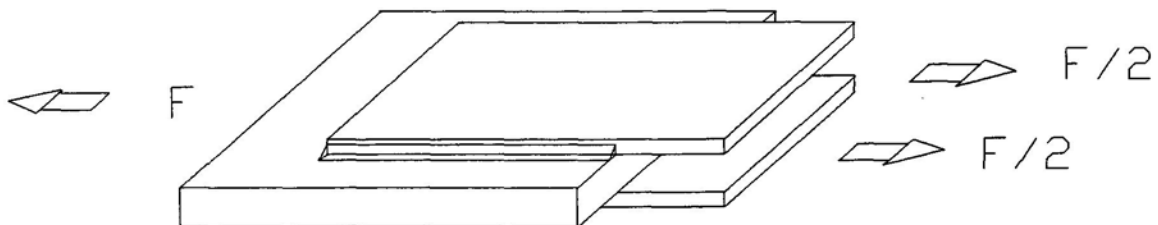
Este estudio teórico se ha realizado mediante un cálculo por elementos finitos en tres dimensiones. La herramienta empleada ha sido el programa ANSYS (revisión 5.5), con la versión universitaria.

El ordenador empleado es un PC Pentium II.

###### **4.1.2. Modelización de la unión.**

###### **4.1.2.1. Modelo tridimensional. Simplificaciones.**

La unión soldada objeto de estudio se observa en la siguiente figura:

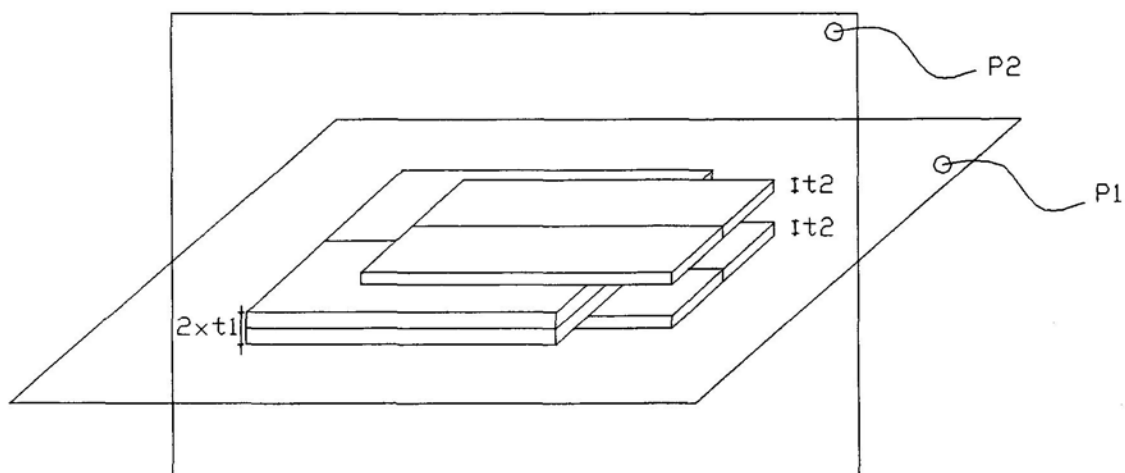


Dicha unión se compone de una chapa central y dos chapas exteriores unidas a la anterior. Esta unión se materializa mediante cuatro cordones laterales a solape. Las fuerzas axiales que solicitan la unión son aplicadas por los extremos izquierdo (a través de la chapa central) y derecho (a través de las dos chapas laterales). El modelo así planteado evita que aparezcan momentos en la unión.

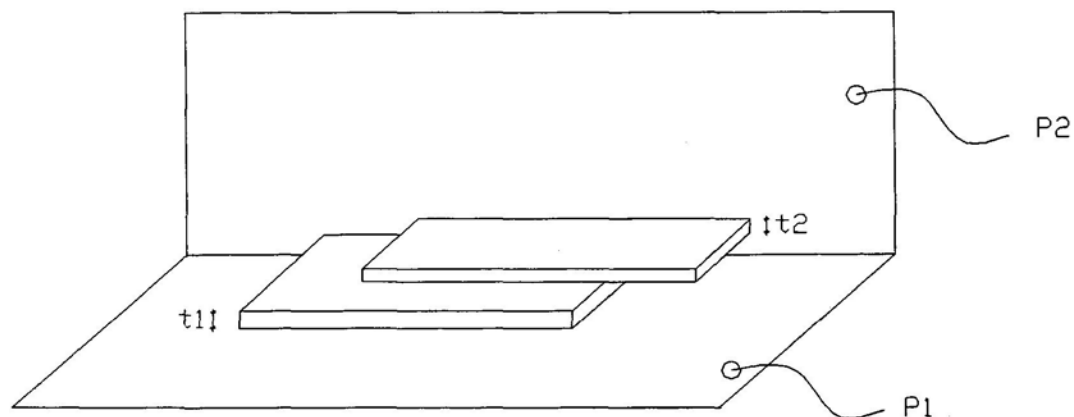
El grosor de la chapa central es  $2xt_1$ , y el grosor de las chapas exteriores es  $t_2$ .

La unión a estudiar presenta simetría con respecto a dos planos, lo cual nos permitirá reducir el tamaño del modelo, disminuyendo así el tiempo necesario para el cálculo a ordenador.

La primera simetría que se observa es con respecto a un plano horizontal (plano P1), con lo cual la chapa central de espesor  $2xt_1$  quedaría modelizada con un espesor  $t_1$ . La segunda simetría es con respecto a un plano vertical (plano P2), normal al eje longitudinal de la unión, que divide la unión en dos partes iguales.



El modelo a calcular se reduce por tanto al que se observa en la siguiente figura.



El número de modelos a realizar será muy elevado, ya que en el presente trabajo pretendemos estudiar cómo influyen las distintas variables que afectan a la distribución de tensiones. Esto dependerá de la rigidez de la unión, rigidez que es función de las características geométricas de las chapas y cordón.

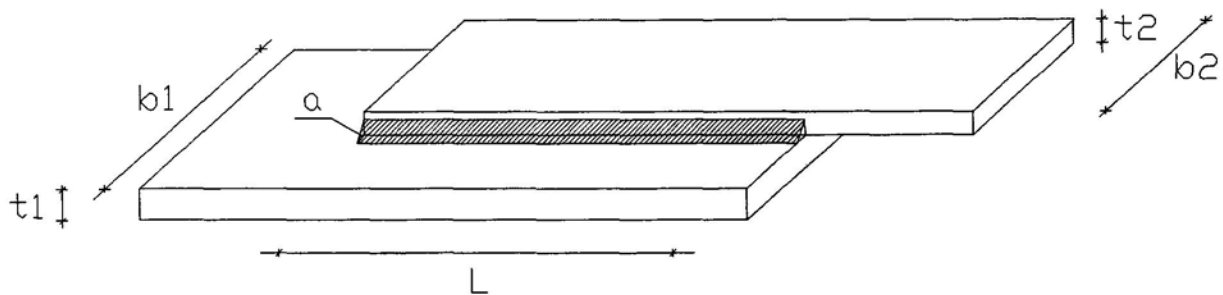
De este modo existirán las siguientes variables en el modelo:

- Longitud del cordón
- Espesor de garganta del cordón
- Anchura de la chapa central
- Anchura de las chapas exteriores
- Espesor de la chapa central
- Espesor de las chapas exteriores

En la siguiente figura se observan todas las dimensiones, que iremos modificando, en las dos chapas y el cordón:

- L: longitud del cordón
- a: espesor de garganta del cordón

- $b_1$ : anchura de la chapa central
- $b_2$ : anchura de las chapas exteriores
- $t_1$ : espesor de la chapa central
- $t_2$ : espesor de las chapas exteriores



#### 4.1.2.2. Características de los materiales que conforman las chapas y el cordón.

Las propiedades tanto del material que conforma las chapas como del material de aportación que forma el cordón de soldadura se han escogido para el cálculo de manera que simulen lo más fielmente posible a las de los materiales empleados en la fase experimental. Se emplearán dos grupos de materiales: uno para las probetas ensayadas a tracción, y otro para las probetas ensayadas a compresión.

##### 4.1.2.2.1. Materiales correspondientes a las probetas ensayadas a tracción.

###### a) Material que conforma las chapas:

El acero a emplear en las chapas será un A-52b, cuyo límite elástico es 3.600 kp/cm<sup>2</sup> y su límite de rotura 5.200 kp/cm<sup>2</sup>. Además presenta los siguientes parámetros:

- Módulo de elasticidad longitudinal en el origen:

$$E_0 = 2.100.000 \text{ kp/cm}^2 = 2.08E+11 \text{ N/m}^2$$

- Módulo de elasticidad transversal:

$$G = E\nu/2(1+\nu)$$

donde  $\nu$  es el módulo de Poisson ( $\nu=0.3$ )  $\Rightarrow G = 8.077E+10 \text{ N/m}^2$ .

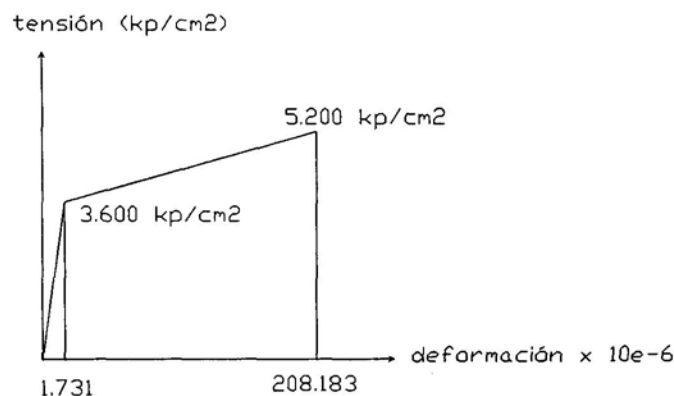
El acero es un material que presenta un diagrama tensión-deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) en el cual aparece una primera rama elástica; alcanzado un cierto valor de la tensión (el llamado límite elástico ( $\sigma_e$ )) disminuye el módulo de elasticidad longitudinal, entrando el material en su fase plástica.

Así el programa ANSYS permite adoptar inicialmente un valor para E (módulo de elasticidad longitudinal) y otro para G (módulo de elasticidad transversal), de modo que mientras en el material no se alcance su límite elástico, la relación  $\sigma$ - $\epsilon$  será constante.

Al superar su límite elástico el material entra en la fase plástica.

Dentro de los distintos diagramas  $\sigma$ - $\epsilon$  que ofrece el programa ANSYS, se ha adoptado un diagrama de respuesta multilineal (Multilinear Isotropic Hardening (MISO)), que tiene en cuenta para el cálculo de tensiones el criterio de Von Mises. De este modo podemos definir diagramas  $\sigma$ - $\epsilon$  con una rama elástica y una o más ramas que reflejen el comportamiento plástico del acero.

Para las chapas se ha empleado un diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  del tipo MISO con una rama elástica y una única rama plástica, que es el que se observa en la siguiente figura.



b) Material que conforma el cordón:

Como material de aportación para el cordón de soldadura se ha modelizado el electrodo empleado en las probetas ensayadas a tracción. Dicho electrodo es el Supra Mig SG-2 de la casa Lincoln Electric. Sus características mecánicas son:

- Límite elástico: 5.090 kp/cm<sup>2</sup>
- Límite de rotura: 5.740 kp/cm<sup>2</sup>.
- Módulo de deformación longitudinal en la rama elástica; según un ajuste realizado por Quintero, es 1/5 del valor del módulo de Young del metal base:

$$E_e = 0,2 \times 2.100.000 \text{ kp/cm}^2 = 4.2E+10 \text{ N/m}^2$$

- Módulo de deformación en la rama plástica:

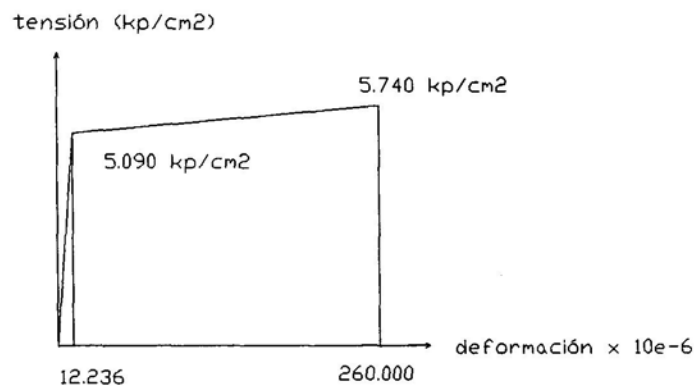
$$E_p = 2.623 \text{ kp/cm}^2 = 2.623E+8 \text{ N/m}^2$$

- Módulo de deformación transversal:

$$G = E/2(1+\mu)$$

donde  $\mu$  es el módulo de Poisson ( $\mu=0.3$ )

En este cordón de soldadura se ha empleado al igual que en las chapas un diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  del tipo MISO con una rama elástica y una única rama plástica, que es el que se observa en la siguiente figura.



Las características mecánicas del electrodo Supra Mig SG-2 se encuentran reflejadas en los certificados de calidad del Anejo nº1.

4.1.2.2.2. Materiales correspondientes a las probetas ensayadas a compresión.

a) Material que conforma las chapas:

El acero a emplear en las chapas será un S-460, cuyo límite elástico es 4.600 kp/cm<sup>2</sup> y su límite de rotura se sitúa entre 5.500 kp/cm<sup>2</sup> y 7.200 kp/cm<sup>2</sup>, adoptándose un valor de 6.200 kp/cm<sup>2</sup>. Además presenta los siguientes parámetros:

- Módulo de elasticidad longitudinal en el origen:

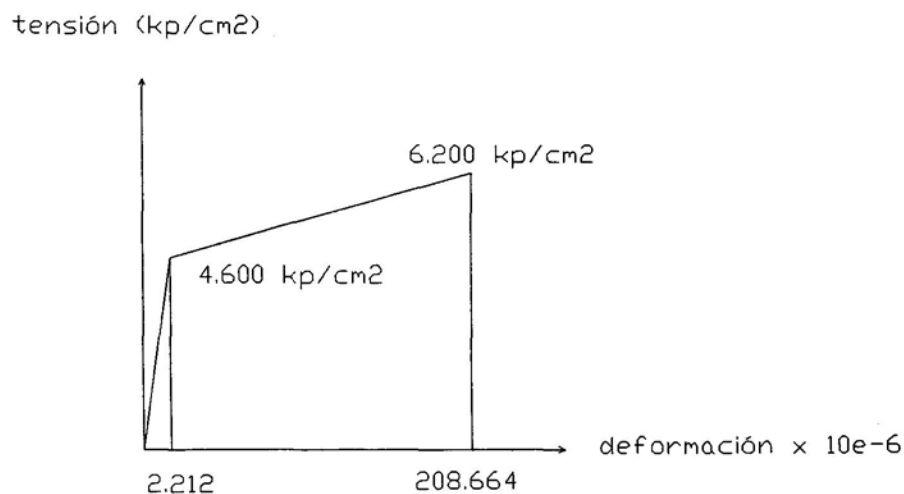
$$E_0 = 2.100.000 \text{ kp/cm}^2 = 2.08E+11 \text{ N/m}^2$$

- Módulo de elasticidad transversal:

$$G = E_x / 2(1 + \mu)$$

donde  $\mu$  es el módulo de Poisson ( $\mu=0.3$ )  $\Rightarrow G = 8.077E+10 \text{ N/m}^2$ .

Para las chapas se ha empleado un diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  del tipo MISO con una rama elástica y una única rama plástica, que es el que se observa en la siguiente figura.



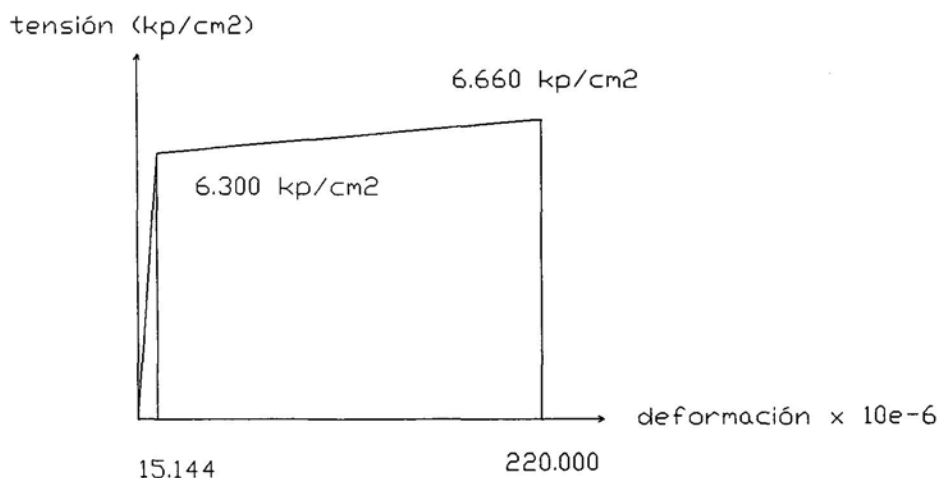
b) Material que conforma el cordón:

Como material de aportación para el cordón de soldadura se han modelizado dos tipos de electrodos, uno más resistente y otro más débil, correspondientes a los empleados en las probetas ensayadas a compresión.

- a) El más resistente es un electrodo empleado por la Empresa Dragados Off Shore en las soldaduras del Puente de Öresund (Dinamarca). Dicho electrodo es el Outershield 81K2-H, de la casa Lincoln Electric. Sus características mecánicas son:

- Límite elástico: 6.300 kp/cm<sup>2</sup>
- Límite de rotura: 6.660 kp/cm<sup>2</sup>
- Módulo de deformación longitudinal en la rama elástica:  
 $E_e = 0,2 \times 2.100.000 \text{ kp/cm}^2 = 4.2E+10 \text{ N/m}^2$
- Módulo de deformación en la rama plástica:  
 $E_p = 1.757 \text{ kp/cm}^2 = 1.757E+8 \text{ N/m}^2$
- Módulo de deformación transversal:  
 $G = E/2(1+\mu)$   
 donde  $\mu$  es el módulo de Poisson ( $\mu=0.3$ )

En este cordón de soldadura se ha empleado al igual que en las chapas un diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  del tipo MISO con una rama elástica y una única rama plástica, que es el que se observa en la siguiente figura.





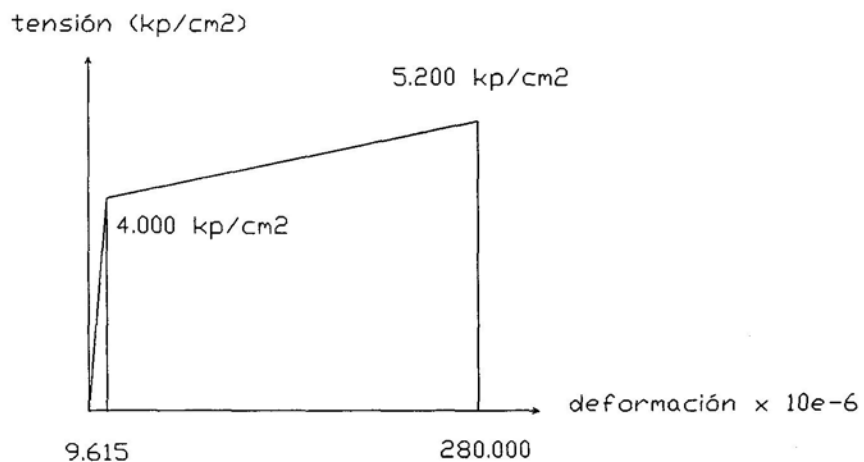
Las características mecánicas del electrodo Outershield 81K2-H se encuentran reflejadas en los certificados de calidad del Anejo nº1.

- b) El segundo electrodo empleado, de menor resistencia, es un electrodo más convencional llamado O.K.46.

Sus características mecánicas son:

- Límite elástico: 4.000 kp/cm<sup>2</sup>
- Límite de rotura: 5.200 kp/cm<sup>2</sup>
- Módulo de deformación longitudinal en la rama elástica:  
 $E_e = 0,2 \times 2.100.000 \text{ kp/cm}^2 = 4.2E+10 \text{ N/m}^2$
- Módulo de deformación en la rama plástica:  
 $E_p = 4.438 \text{ kp/cm}^2 = 4.438E+9 \text{ N/m}^2$
- Módulo de deformación transversal:  
 $G = E/2(1+\mu)$   
donde  $\mu$  es el módulo de Poisson ( $\mu=0.3$ )

En este cordón de soldadura se ha empleado también un diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  del tipo MISO con una rama elástica y una única rama plástica, que se presenta en la siguiente figura.

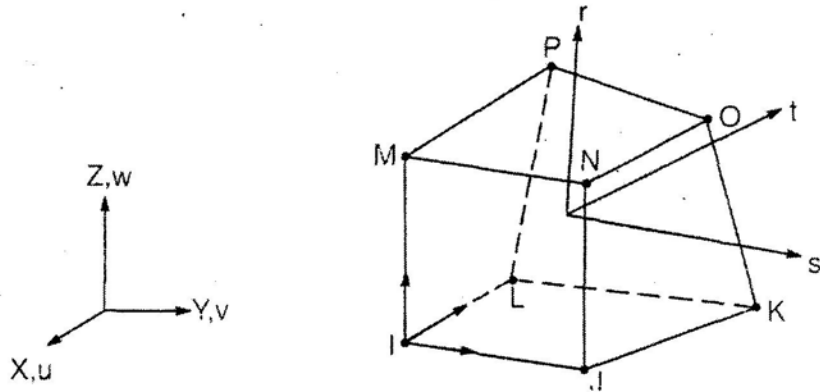


Las características mecánicas del electrodo O.K.46 se encuentran reflejadas en los certificados de calidad del Anejo nº1.

4.1.2.3. Tipo de elementos empleados en chapas y cordón.

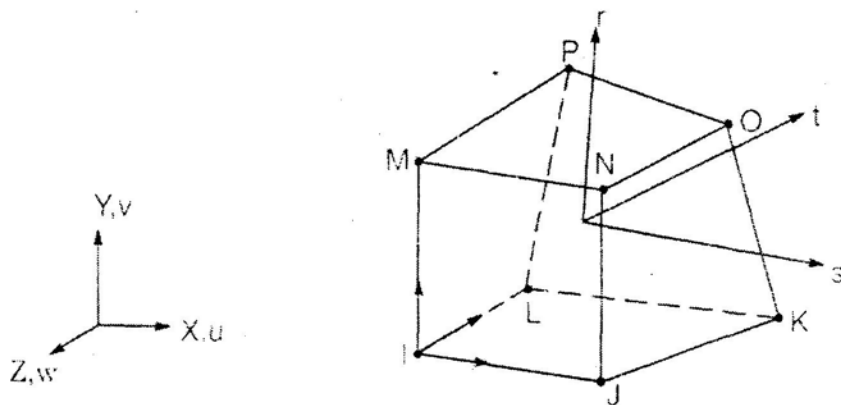
El modelo tridimensional de la unión que se estudia se ha modelizado con elementos sólidos. La versión 5.5 del programa ANSYS pone a disposición del usuario en su biblioteca 11 tipos de elementos tridimensionales diseñados para un cálculo estructural. De ellos únicamente 5 permiten estudiar un comportamiento elasto-plástico. Estos 5 elementos son los siguientes:

- **SOLID45:**



Es un elemento prismático de 8 nodos. Presenta tres grados de libertad por nodo, correspondientes a los tres desplazamientos en el espacio ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ). Mediante la agrupación de parejas de nodos, el elemento se puede convertir en un prisma triangular o en un tetraedro.

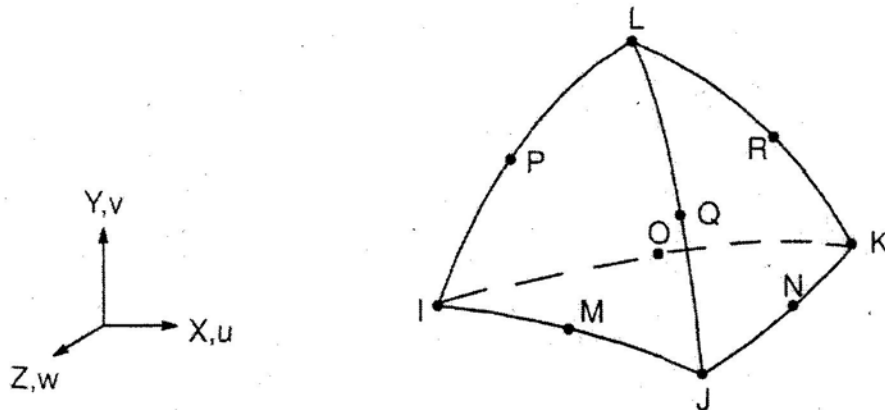
- **SOLID65:**



Es un elemento prismático también de 8 nodos. Presenta tres grados de libertad por nodo, correspondientes a los tres desplazamientos en el espacio ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ).

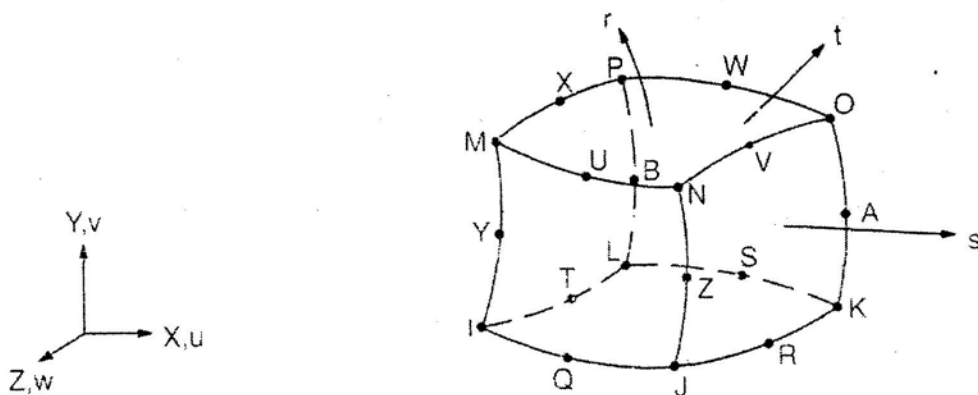
Tiene unas características muy similares al SOLID45 antes descrito, pero permitiendo además un comportamiento frágil. Se suele por tanto emplear en la modelización de estructuras de hormigón.

**- SOLID92:**



Es un tetraedro de 10 nodos, uno en cada una de las esquinas del elemento, y otro en cada uno de los centros de sus seis aristas. Presenta igualmente tres grados de libertad por nodo, correspondientes a cada uno de los tres desplazamientos en el espacio ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ). Su forma tetraédrica lo hace adaptable a geometrías complicadas.

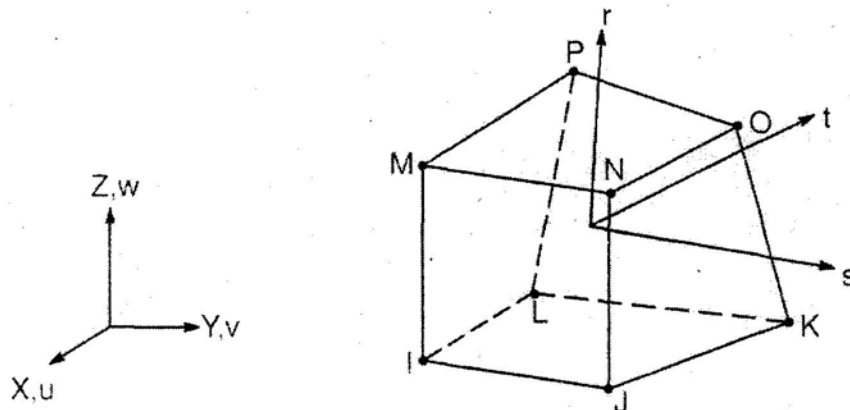
**- SOLID95:**



Es un elemento prismático de 20 nodos. Presenta tres grados de libertad por nodo, correspondientes a los tres desplazamientos en el espacio ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ). Es una versión superior del elemento SOLID45 ya descrito, ya que permite adoptar formas más irregulares

sin perder precisión en su comportamiento. Presenta nodos en sus esquinas y en el centro de sus aristas, por lo que se adapta fácilmente a la modelización de contornos más difíciles. Al igual que el elemento SOLID45, mediante la agrupación de parejas de nodos el elemento se puede convertir en un prisma triangular o en un tetraedro.

- **SOLID185:**



Es un elemento prismático de 8 nodos. Presenta tres grados de libertad por nodo, correspondientes a los tres desplazamientos en el espacio ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ). Su comportamiento es muy similar al del SOLID45 ya descrito.

De los cinco elementos presentados con posibilidad de comportamiento plástico descartamos el SOLID65 por ser más específico para estructuras de hormigón. De los cuatro elementos restantes también descartamos el tetraedro SOLID92, ya que muestra en su comportamiento menor precisión que los elementos prismáticos cuadrangulares. De los tres restantes (SOLID45, SOLID95 Y SOLID185), elegimos el SOLID95, ya que con sus 20 nodos permite una precisión mucho mayor que SOLID45 Y SOLID185 a igualdad de elementos.

4.1.2.4. Discretización de la malla y calibración del modelo con el elemento SOLID95.

a) Discretización de la malla:

Para discretizar el modelo se ha seguido un principio esencial en la técnica de análisis con elementos finitos, con el fin de obtener una solución lo más exacta posible: densificar la malla en aquellas zonas donde existan concentraciones de tensiones.

En el proceso de transmisión de tensiones entre las chapas que forman la unión y el cordón de soldadura podemos apreciar de manera intuitiva cómo dichas tensiones serán mucho mayores en el interior del volumen correspondiente al cordón, ya que toda la fuerza soportada por la unión tiene que ser transmitida íntegramente a través de dicho cordón de soldadura. Por tanto las tensiones que sufre la unión serán menores en las chapas que en el cordón.

Profundizando en esta observación y por continuidad en dichas tensiones, cuanto más nos acerquemos al cordón de soldadura desde las chapas las tensiones irán creciendo gradualmente hasta hacerse máximas en las caras de contacto de dichas chapas con el cordón de soldadura.

Por tanto la discretización de la malla a emplear tiene que ser máxima en el cordón de soldadura y en las inmediaciones de las chapas a dicho cordón, requiriendo el modelo menos elementos a medida que nos alejamos del cordón de soldadura, ya dentro de las chapas.

Dentro de lo que es el volumen del cordón además cabe esperar, debido al concepto de longitud eficaz del cordón de soldadura, una concentración de tensiones mayor en sus extremos que en el centro. Por tanto, la malla deberá ser más densa en dichos extremos del cordón que en su zona central. Esta necesidad de aumentar el número de elementos en los extremos del cordón es más evidente cuanto más largo es el cordón de soldadura.

Así pues el modelo que va a servir para este cálculo con elementos finitos presentará una malla con las siguientes características:

- 1.- Densidad máxima de elementos en los extremos del cordón de soldadura y en sus inmediaciones, ya dentro de las chapas.
- 2.- Densidad también elevada de elementos pero decreciendo hacia el centro del cordón de soldadura y en sus inmediaciones, ya dentro de las chapas.
- 3.- Densidad de elementos decreciendo gradualmente en las chapas a medida que nos alejamos de las proximidades del cordón de soldadura.

Hay sin embargo dos zonas extremas en las chapas del modelo donde se requerirá una densidad de elementos determinada y uniforme en toda la anchura y espesor de las chapas. Dichas zonas son los extremos de las chapas donde se aplica en el modelo la fuerza axial que solicita a la unión. En dichas zonas la malla debe tener un tamaño de elementos uniforme, de manera que las fuerzas que se aplican puntualmente en cada uno de los nodos que forman dichas caras proporcionen una tensión constante en toda la sección transversal de la chapa.

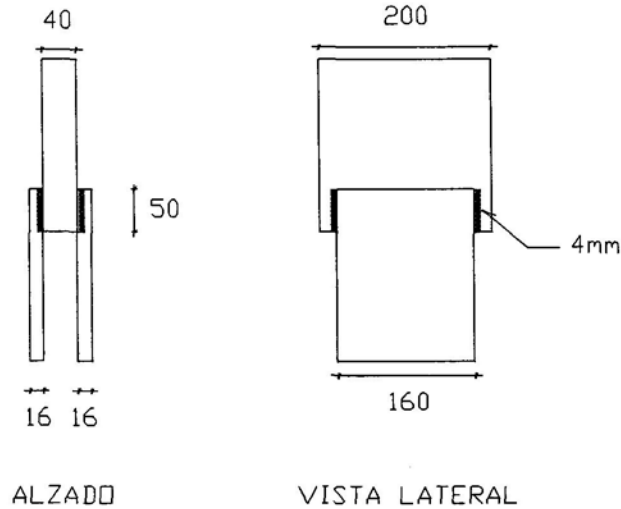
Vistos los criterios para discretizar la malla queda únicamente por determinar el número de elementos que deben formarla para conseguir resultados con un grado de precisión aceptable.

b) Calibración del modelo con el elemento SOLID95:

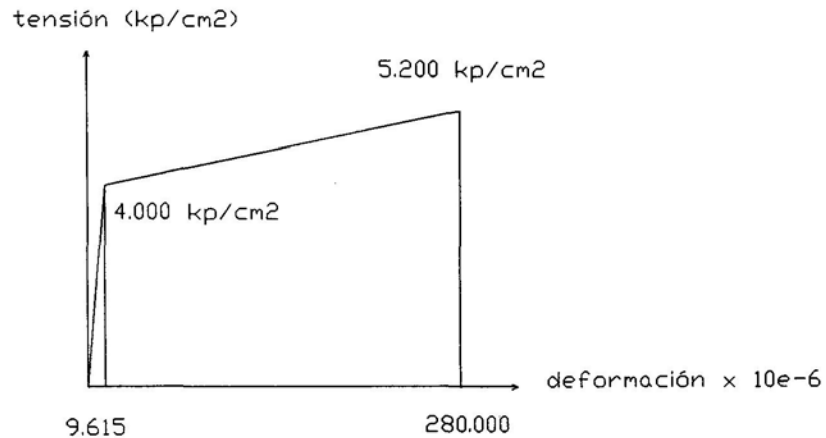
La solución que obtengamos con el modelo deberá ser lo más exacta posible, con tiempos de cálculo razonables.

Este proceso de calibración se va a realizar para un modelo que reproduce la probeta más pequeña ensayada en la campaña de ensayos a compresión de la fase experimental. Dicho modelo presenta cordones de longitud  $L = 5$  cm. Su espesor de garganta es de 4 mm.

En la siguiente figura se observa el modelo que nos va a servir para esta calibración.



De los dos tipos de materiales a emplear en el cordón, se va a realizar esta calibración con el electrodo menos resistente, el O.K.46, cuyo diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  recordamos:



El modelo va a ser sometido a un esfuerzo axial hasta la rotura, que se manifestará por un desplazamiento excesivo de los nodos del cordón, llegado éste a su agotamiento plástico.

Para este cordón de 5 cm. de longitud su longitud eficaz será con toda seguridad la longitud total, ya que en cordones cortos todo el cordón trabaja. Suponiendo la rotura por el plano de garganta, tomaremos la resistencia en cordones adoptada en el Eurocódigo 3. No obstante, al tomar la resistencia del metal soldado, no afectaremos a la fórmula con el coeficiente  $\beta_w$ :

$$F \text{ rotura} = \tau_{\text{rotura}} (\text{kp/cm}^2) \times L (\text{cm}) \times a (\text{cm})$$

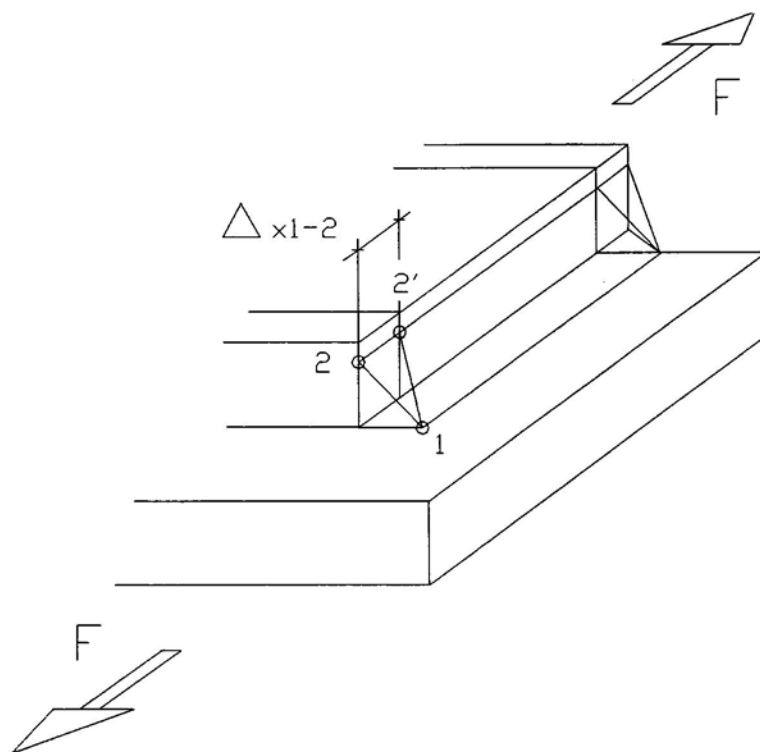
siendo:

- $\tau_{\text{rotura}} = 5.200 \text{ kp/cm}^2 / \sqrt{3} = 3002 \text{ kp/cm}^2$ .
- $L (\text{cm}) = \text{longitud del cordón} = 5 \text{ cm}$ .
- $a (\text{cm}) = \text{espesor de garganta del cordón} = 0.4 \text{ cm}$ .

$$\text{Así pues } F \text{ rotura} = 3002 \text{ kp/cm}^2 \times 5 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm} = 6.004 \text{ kp}.$$

Con los criterios de discretización de malla vistos en el párrafo anterior se ha realizado un proceso de calibración del modelo, aumentando progresivamente y de manera uniforme en todo el modelo el número de elementos de la malla, comparándolo con el tiempo de cálculo empleado.

En cada uno de los modelos que forman parte de la calibración se ha procedido aumentando progresivamente la fuerza axial aplicada, viendo el correspondiente desplazamiento longitudinal en el cordón. Dicho desplazamiento longitudinal del cordón se obtiene mediante el corrimiento relativo según el eje X entre los nodos 1 y 2, tal como se muestra en la siguiente figura:





Para el valor de rotura seguimos el límite propuesto por Fischer en los ensayos por él realizados. Así la fuerza de rotura será aquella que produzca una deformación angular  $\gamma_{1-2}$  (corrimiento relativo entre los nodos 1 y 2) de valor:

$$\Delta x_{1-2} = 0.5 \times a$$

siendo "a" el espesor del cordón de garganta. Por tanto para un cordón de 4 mm. de espesor de garganta, el desplazamiento máximo llegada la rotura es:

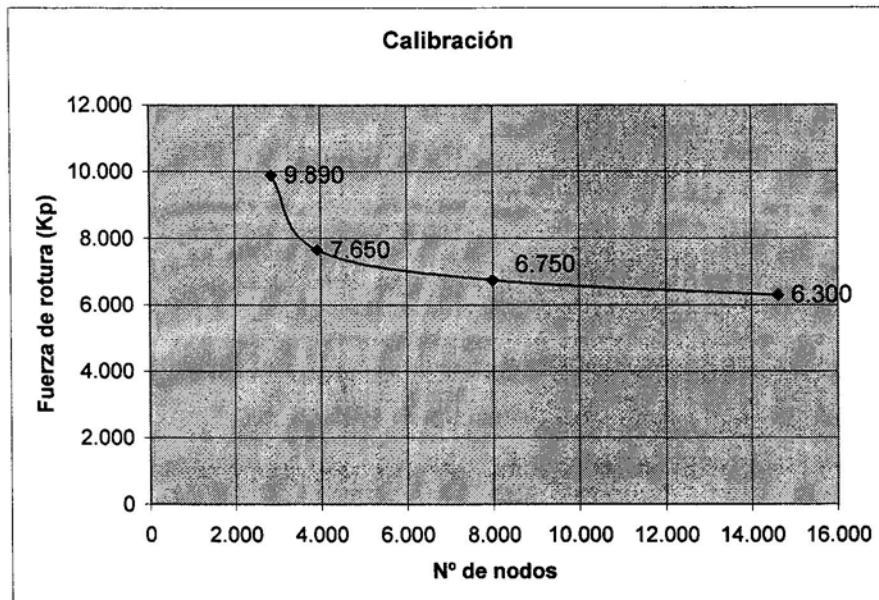
$$\Delta x_{1-2} = 0.5 \times a = 0.5 \times 4 \text{ mm.} = 2.0 \text{ mm.}$$

En la siguiente tabla se observa para cada uno de los modelos estudiados:

- 1. Número de nodos del modelo.
- 2. Número de elementos del modelo.
- 3. Fuerza de rotura en la unión (correspondiente a un corrimiento relativo  $\Delta x_{1-2} = 2.0 \text{ mm.}$ )
- 4. Tiempo empleado en el cálculo.

Modelo	Nº de nodos	Nº de elementos	Fuerza de rotura (Kp)	Tiempo de cálculo
1	2.851	1.426	9.890	2 h.
2	3.911	1.940	7.650	4 h.
3	7.986	3.394	6.750	12 h.
4	14.617	6.313	6.300	49 h.

De los resultados obtenidos se observa cómo los tiempos de cálculo crecen rápidamente a medida que aumentamos el número de nodos y elementos del modelo. A continuación se muestra en un gráfico una relación entre el nº de nodos y la fuerza de rotura.



Como vemos, la fuerza de rotura tiende asintóticamente a un valor constante a medida que aumentamos el número de nodos. Se observa que la fuerza de rotura para el modelo más discretizado es ligeramente superior a la teórica. Aumentando la discretización del modelo los tiempos de cálculo serían de muchos días, ganando muy poco más en precisión.

En el Anejo nº2 se observa para cada uno de los modelos de manera detallada una relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento longitudinal del cordón.

c) Conclusiones:

Tras los criterios de mallado vistos en el apartado a) y con la calibración cuyos resultados vemos en el apartado b), se propone realizar los cálculos del estudio teórico de la unión mediante una serie de modelos con las siguientes características:

- 1.- El número de nodos de los modelos (empleando el elemento SOLID95) será como mínimo de 8.000.
- 2.- Se emplearán mallas con densidad máxima de elementos en los extremos del cordón de soldadura y en sus inmediaciones, dentro de las chapas.

- 3.- La densidad de elementos también será elevada, pero decreciendo, hacia el centro del cordón de soldadura y sus inmediaciones, dentro de las chapas.
- 4.- La densidad de elementos irá decreciendo gradualmente en las chapas a medida que nos alejamos de las proximidades del cordón de soldadura.

#### 4.1.2.5. Modelización de las tensiones residuales existentes en el cordón producto del proceso de soldeo.

El proceso de soldeo del cordón de soldadura y su posterior enfriamiento producen una disminución en el volumen del cordón, que se manifiesta en la aparición de unas tensiones residuales en el mismo.

Para chapas de acero laminado y electrodos convencionales como los empleados para este estudio, la literatura existente al respecto considera que las tensiones residuales máximas de tracción existentes en el cordón de soldadura tras el enfriamiento por el proceso de soldeo son de aproximadamente 2.500 kp/cm<sup>2</sup>.

En los modelos estudiados se ha simulado la existencia de dichas tensiones residuales mediante la aplicación de un descenso de temperatura en todo el volumen que forma el cordón de soldadura, modelizando de este modo el enfriamiento del cordón, hasta alcanzar en algún punto del mismo una tensión máxima de tracción de 2.500 kp/cm<sup>2</sup>.

Se ha comprobado para varios de los modelos realizados que el descenso de temperatura a aplicar es prácticamente independiente de la longitud del cordón, y se sitúa en torno a los 200°C. Este será por tanto el descenso de temperatura a aplicar en todos los modelos estudiados.

Por otro lado, se estudió la influencia de dichas tensiones residuales en la carga última de los cordones, para varios modelos estudiados. Dicha influencia fue mínima, agotándose el cordón para cargas muy similares con y sin aplicación de dicho descenso de temperatura.

## 4.2. RESULTADOS.

### 4.2.1. Introducción.

La exposición de los resultados del estudio teórico realizado mediante elementos finitos se va a realizar en tres apartados:

1.- Inicialmente se va a detallar el proceso de deformación y de transmisión de tensiones a través del cordón, estudiando cómo se van desarrollando dichas tensiones a través del plano de garganta del cordón. Conviene explicar bien este proceso para después entender mejor los dos apartados siguientes, en los cuales se presentan los resultados propiamente dichos, diferenciados en un estudio elástico y en un estudio plástico hasta rotura.

2.- Estudio en régimen elástico: en este apartado se ha sometido al cordón a una carga creciente hasta llegar al límite elástico en algún punto del mismo.

El número de modelos estudiados ha sido amplísimo:

- Por un lado se han estudiado los modelos correspondientes a los ensayos realizados en las dos campañas de la fase experimental.
- Posteriormente se ha completado el estudio viendo cómo influyen en la transmisión de tensiones las distintas variables que afectan a la rigidez de la unión y por tanto al desarrollo de la longitud eficaz en los cordones. Así, se han creado otros muchos modelos jugando con las dimensiones siguientes:
  - Longitud del cordón
  - Espesor de garganta del cordón
  - Anchura de la chapa central
  - Anchura de las chapas exteriores
  - Espesor de la chapa central
  - Espesor de las chapas exteriores

3.- Estudio en régimen plástico hasta rotura: en este apartado se han estudiado los siguientes modelos:

- los modelos correspondientes a las probetas ensayadas en la fase experimental.
- otros dos modelos que completan el estudio en régimen plástico:
  - un modelo con cordón de 120 cm. de longitud, con las características mecánicas de los ensayos rotos a compresión con el electrodo más resistente (de límite de rotura 6.660 kp/cm<sup>2</sup>). Este modelo se ha ensayado con vistas a estudiar un modelo con cordones muy largos, superiores al cordón más largo ensayado en la fase experimental, que sólo presenta 60 cm. de longitud.
  - otro modelo con cordón de 30 cm. de longitud, y chapas de anchuras de 200 cm., con las características mecánicas de los ensayos rotos a compresión con el electrodo más resistente (de límite de rotura 6.660 kp/cm<sup>2</sup>). Este modelo se ha ensayado con vistas a estudiar cómo influyen las componentes transversales al eje del cordón, que hacen crecer de manera apreciable las tensiones de comparación.

Así, los modelos se han sometido a una carga creciente por encima del límite elástico, plastificando el cordón progresivamente. Dicha carga se ha llevado hasta alcanzar una deformación angular  $\gamma_{1.2}$  suficientemente grande como para considerar que el cordón ha superado su capacidad de deformación.

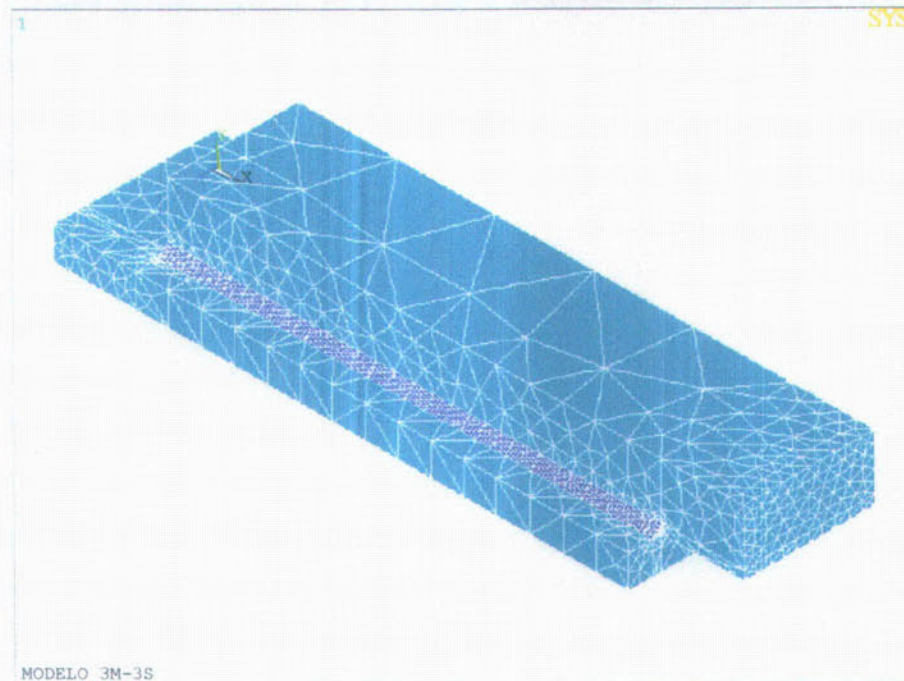
#### 4.2.2. Proceso de deformación y de transmisión de tensiones a través del cordón.

Para realizar esta exposición se ha aprovechado uno de los modelos estudiados, correspondiente a la probeta 3S de la campaña a compresión.

El cordón empleado en este modelo presenta un límite de rotura de 6.660 kp/cm<sup>2</sup>, con lo cual la tensión tangencial de rotura es:

$$\tau_{rotura} = 6.660 \text{ kp/cm}^2 / \sqrt{3} = 3.845 \text{ kp/cm}^2$$

Como se explicó en el apartado 3.1.2.1., el modelo estudiado mediante elementos finitos corresponde a la cuarta parte de dicha probeta. La discretización del modelo se observa en la siguiente figura:



La transmisión de la fuerza que solicita la unión a través del cordón de soldadura se realiza aproximadamente por el plano medio de garganta.

Las Normas existentes en la actualidad consideran que las tensiones que se transmiten a través del cordón se desarrollan con un valor constante en todo su espesor.

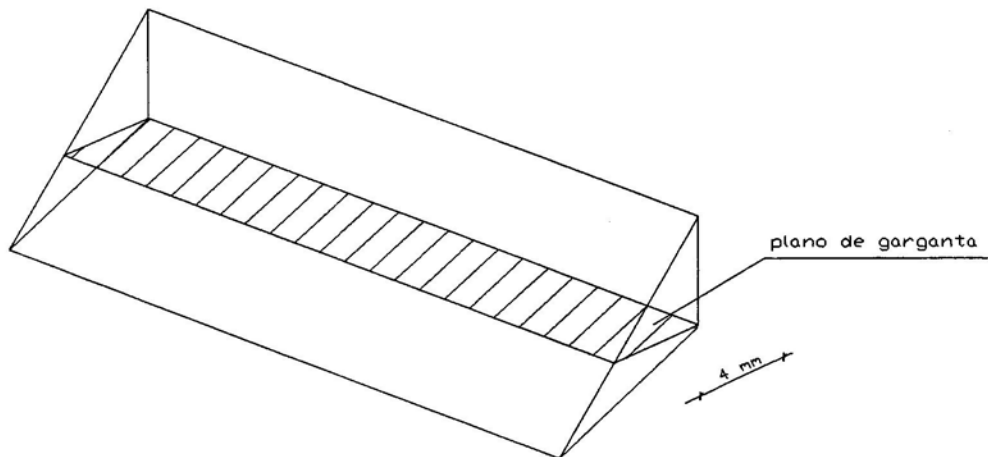
Según diversos autores (**D.Feder**, **M.Fischer**), las tensiones dentro de una misma sección no son constantes, siendo máximas en la raíz del cordón, es decir en su arista de unión con las dos chapas, y mínimas en la cara exterior del cordón.

Efectivamente, el estudio realizado mediante elementos finitos refleja cómo a medida que vamos aumentando la fuerza que solicita la unión, el cordón va entrando en carga desde los extremos, concentrándose más las tensiones en la arista interna del cordón, y disminuyendo hacia la cara exterior. A medida que aumenta la fuerza aplicada, las tensiones van creciendo en el plano de garganta, hacia la cara exterior del cordón.



La carga de rotura en el cordón será en principio aquella que plastifique por completo la sección de garganta. En las siguientes figuras se observa, para cargas crecientes, la plastificación progresiva del plano de garganta del cordón. El escalón de cargas representado es:

- Figura 1  $\Rightarrow$  17.200 Kp.
- Figura 2  $\Rightarrow$  34.500 Kp.
- Figura 3  $\Rightarrow$  50.800 Kp.
- Figura 4  $\Rightarrow$  55.000 Kp.
- Figura 5  $\Rightarrow$  57.500 Kp.
- Figura 6  $\Rightarrow$  58.500 Kp.



$F = 17200 \text{ Kp}$

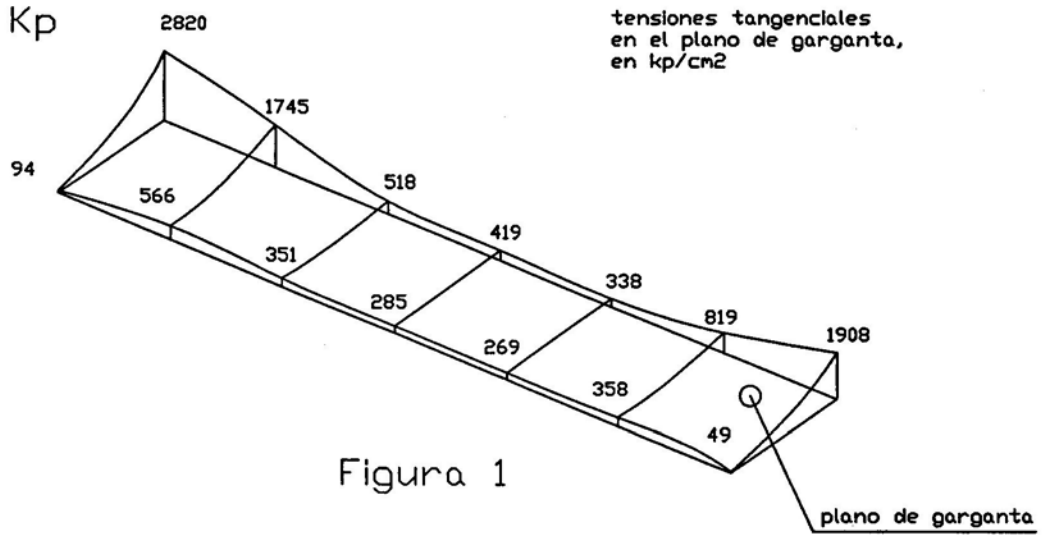


Figura 1

$F = 34500 \text{ Kp}$

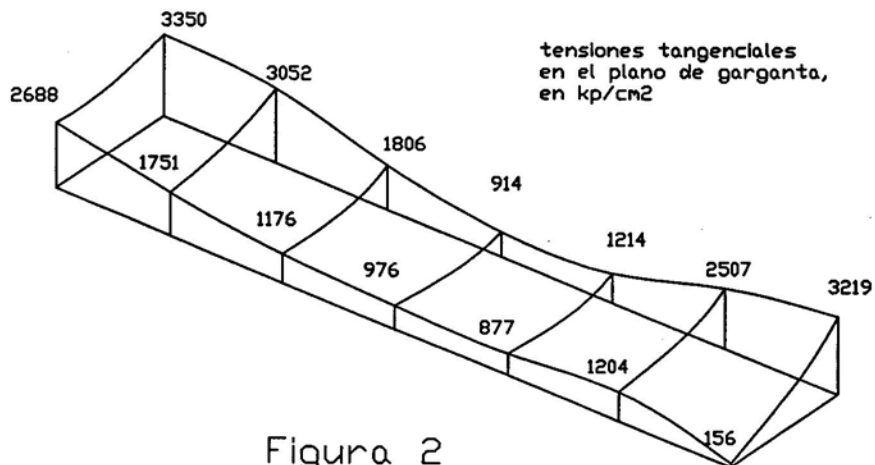


Figura 2



$F = 50800 \text{ Kp}$

tensiones tangenciales  
en el plano de garganta,  
en  $\text{kp}/\text{cm}^2$

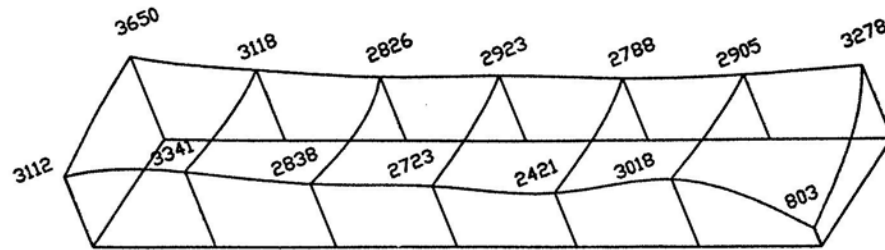


Figura 3

$F = 55000 \text{ Kp}$

tensiones tangenciales  
en el plano de garganta,  
en  $\text{kp}/\text{cm}^2$

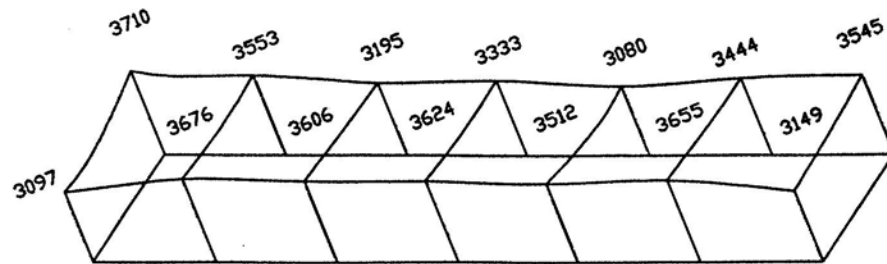


Figura 4

$F = 57500 \text{ Kp}$

tensiones tangenciales  
en el plano de garganta,  
en  $\text{kp}/\text{cm}^2$

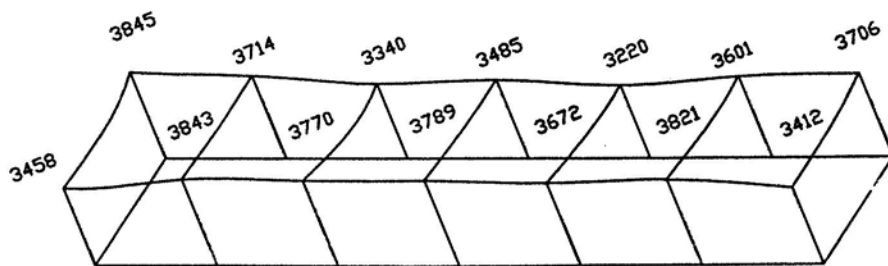


Figura 5

$F = 58500 \text{ Kp}$

tensiones tangenciales  
en el plano de garganta,  
en  $\text{kp}/\text{cm}^2$

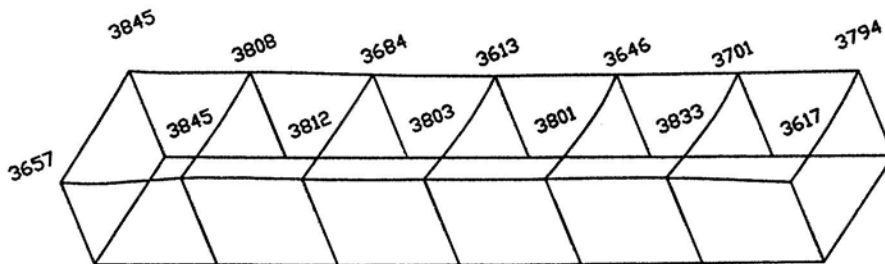


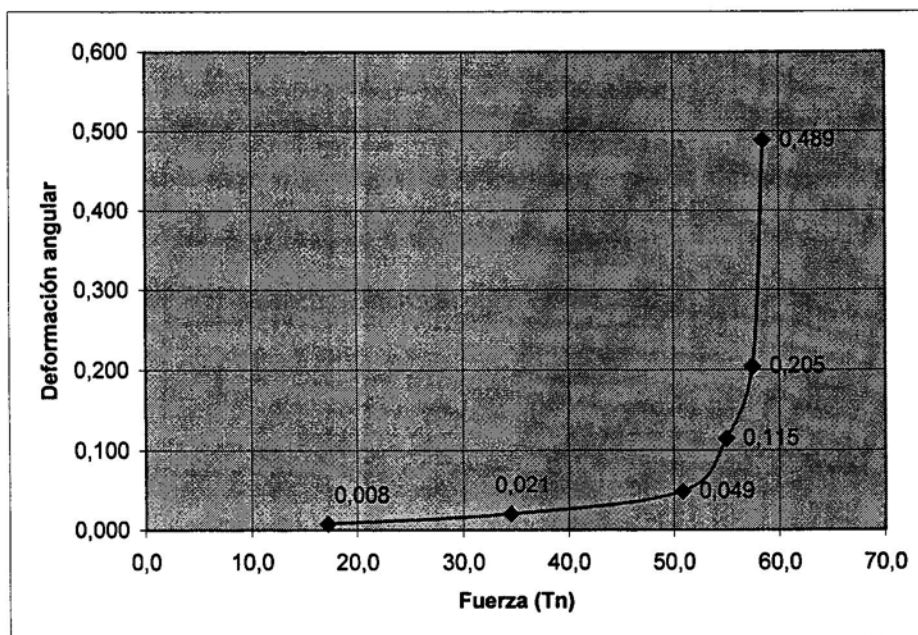
Figura 6

Igualmente se midió la deformación tangencial existente en el cordón para cada escalón de carga. En la siguiente tabla se presentan estos resultados:

Carga (Kp)	Desplazamiento relativo Entre vértices 1 y 2 $\Delta x_{1-2}$ (mm)	Deformación angular $\gamma_{1-2}$ $\Delta x_{1-2}/4^*$
17.200	0.032	0.008
34.500	0.085	0.021
50.800	0.198	0.049
55.000	0.460	0.115
57.500	0.821	0.205
58.500	1.956	0.489

\* 4 mm = espesor de garganta

En el siguiente gráfico se presenta la relación existente entre el aumento de carga actuante en el cordón, y la deformación angular  $\gamma_{1-2}$



### 4.2.3. Estudio en régimen elástico.

#### 4.2.3.1. Introducción.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en el estudio que se ha realizado en régimen elástico. El proceso seguido ha sido someter todos los modelos a una carga creciente hasta llegar al límite elástico en algún punto del cordón de soldadura.

El número de modelos estudiados ha sido amplísimo:

- En primer lugar se han estudiado los modelos correspondientes a los ensayos realizados en las dos campañas de la fase experimental.
- Posteriormente se ha completado el estudio con otros muchos modelos variando la geometría de la unión, con objeto de analizar cómo influyen en la transmisión de tensiones las distintas variables que afectan a la rigidez de la unión y por tanto al desarrollo de la longitud eficaz en los cordones. Así, se han analizado otros muchos modelos jugando con las dimensiones siguientes:
  - Longitud del cordón
  - Espesor de garganta del cordón
  - Anchura de la chapa central
  - Anchura de las chapas exteriores
  - Espesor de la chapa central
  - Espesor de las chapas exteriores

Se pretende que este estudio sobre el comportamiento del cordón en régimen elástico sea un estudio cualitativo, comparando el comportamiento en cordones correspondientes a geometrías de modelos distintas.

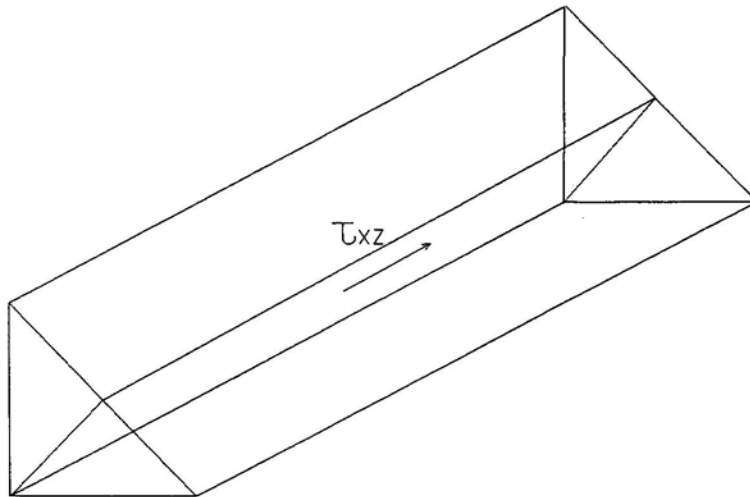
Se ha procedido por tanto a realizar un estudio del comportamiento diferencial a lo largo del cordón, viendo las tensiones que actúan en la arista del plano de garganta, que es la zona más solicitada del cordón. La discusión se realizará sobre los dos criterios tensionales que refleja el Eurocódigo:

- **Criterio 1** o de Tensión Tangencial Máxima: considera las tensiones tangenciales contenidas en el plano de garganta ( $\tau_{xz}$ ), paralelas a la arista, que son las que equilibran las fuerzas exteriores que actúan sobre el conjunto de la unión. Considerando dichas tensiones tangenciales, el inicio de la plastificación del cordón se produce al alcanzarse la tensión tangencial máxima:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \times \beta_w \times \gamma_{mw}}$$

El parámetro  $\beta$  depende de la calidad del metal base (menor cuanto menor resistencia mecánica tenga el metal base).  $\gamma_{mw}$  es un coeficiente de seguridad que vale 1.25. Vamos a tomar las características mecánicas del metal soldado y prescindiremos del coeficiente de seguridad. Por tanto  $\beta_w = \gamma_{mw} = 1$ .

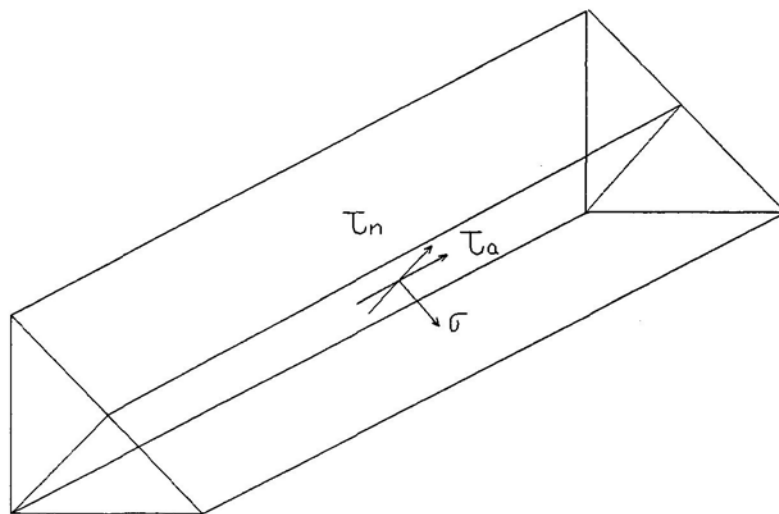
En nuestro caso  $f_u$  es el límite elástico del material de soldadura en el ensayo de tracción.



- **Criterio 2** o de las Componentes de Tensión actuantes según el plano de garganta; según este criterio la plastificación del cordón empieza cuando se alcanza la tensión de comparación:

$$\sigma_{CO} = \sqrt{\sigma^2 + 3 * (\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{mw}}$$

Igualmente tomaremos  $\beta_w = \gamma_{mw} = 1$ , con  $f_u$  igual al límite elástico del material de soldadura.



4.2.3.2. Resultados del estudio en régimen elástico.

**A) Influencia al aumentar la longitud del cordón, permaneciendo constantes otras variables.**

En este apartado se analiza cómo influye el aumento de longitud del cordón en el desarrollo de las tensiones, manteniendo constantes las otras variables: espesor de garganta, anchura de chapas, y espesor de chapas.

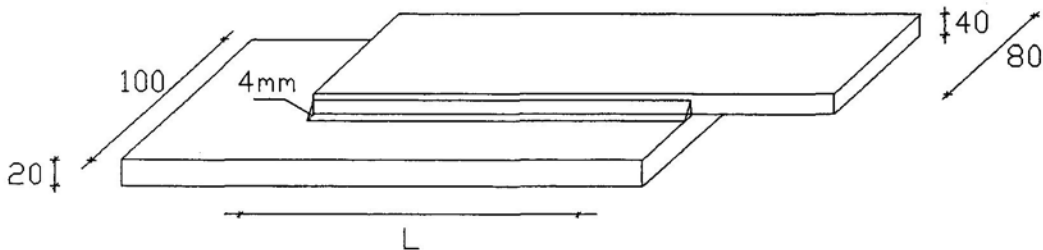
El estudio se ha realizado para dos grupos de modelos:

- el primer grupo presenta pequeña anchura de chapas (alrededor de 20 cm.).
- el segundo grupo presenta gran anchura de chapas (alrededor de 200 cm.).

**A.1.) Modelos con anchura de chapas pequeña, en torno a los 20 cm.**

En la siguiente figura se representa el modelo analizado, en el cual únicamente se mantiene como variable la longitud del cordón, "L". El espesor de todas las chapas es de 40 mm, y el espesor de garganta de 4 mm. Las anchuras de chapa son las observadas, 20 cm. para la chapa central y 16 cm. para las chapas exteriores. La doble simetría de la unión deja el modelo reducido al que se observa.

Las características de los materiales en dichos modelos corresponden a las de las probetas ensayadas en los ensayos a compresión, con el electrodo O.K.46.



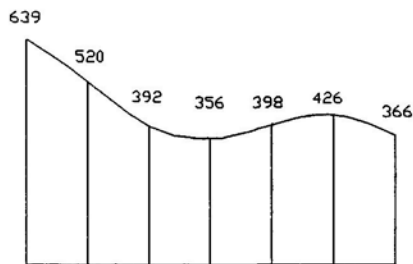
Se han analizado 5 modelos, con distintas longitudes de cordón:

- Modelo 1  $\Rightarrow$  L = 5 cm
- Modelo 2  $\Rightarrow$  L = 15 cm
- Modelo 3  $\Rightarrow$  L = 30 cm
- Modelo 4  $\Rightarrow$  L = 60 cm
- Modelo 5  $\Rightarrow$  L = 120 cm

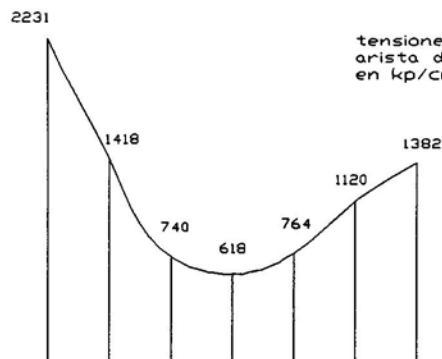
En las figuras siguientes se muestran las tensiones tangenciales  $\tau_{zx}$  sobre el plano de garganta y las tensiones de comparación, en la arista del cordón. Los valores representados corresponden a una fuerza de 1000 Kp aplicada al modelo. Al encontrarnos siempre en régimen elástico, la fuerza que plastifica el extremo del cordón se calculará proporcionalmente a las tensiones que aparecen para 1000 Kp, como se verá posteriormente.

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

Modelo 1 (L=5 cm)

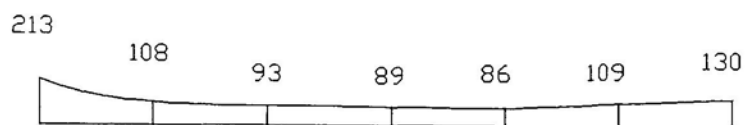


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

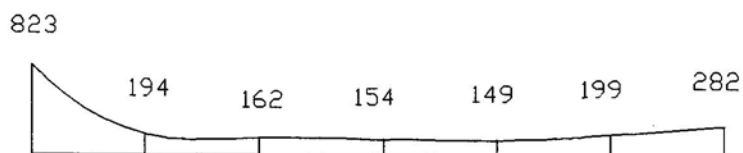




Modelo 2 (L=15 cm)



tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

Modelo 3 (L=30 cm)



tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

Modelo 4 (L=60 cm)

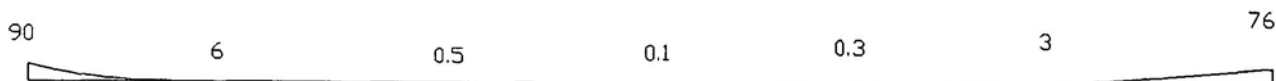


tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

Modelo 5 (L=120 cm)



tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



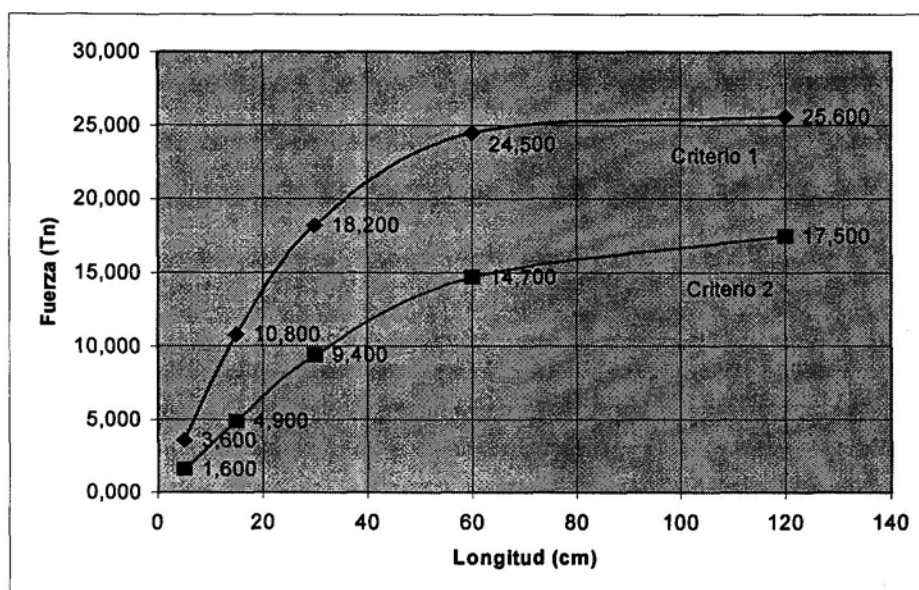
tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

En la tabla siguiente se presentan los siguientes datos de interés:

- 1.- Relación entre la longitud del cordón y el espesor de garganta:  $L/a$
- 2.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 1**, o de Máxima Tensión Tangencial. ( $F_{máx}$ )
- 3.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 2**, o de las Componentes de Tensión. ( $F_{máx}$ )
- 4.- Cociente entre la máxima tensión tangencial existente en el extremo del cordón y la mínima tensión existente en su parte central. ( $\tau_{máx}/\tau_{mín}$ )

	$b_1$ (cm)	$b_2$ (cm)	L (cm)	L/a	$F_{máx}$ (T) Criterio 1	$F_{máx}$ (T) Criterio 2	$\tau_{máx}/\tau_{mín}$
Modelo 1	20	16	5	12.5	3.6	1.6	1.8
Modelo 2	20	16	15	37.5	10.8	4.9	2.5
Modelo 3	20	16	30	75	18.2	9.4	7.1
Modelo 4	20	16	60	150	24.5	14.7	31.5
Modelo 5	20	16	120	300	25.6	17.5	900

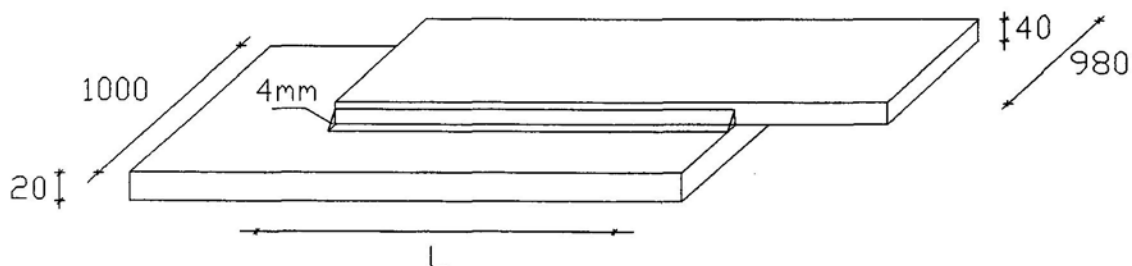
A continuación se observa gráficamente la relación entre la longitud "L" del cordón y la máxima fuerza resistida por el mismo, suponiendo que el cordón se agota al alcanzarse el límite elástico en su extremo, según los Criterios 1 y 2 establecidos en el Eurocódigo.



**A.2.) Modelos con anchura de chapas grande, en torno a los 200 cm.**

En la siguiente figura se representa en planta y alzado el modelo analizado, en el cual únicamente se mantiene como variable la longitud del cordón, "L". El espesor de todas las chapas es de 40 mm, y el espesor de garganta de 4 mm. Las anchuras de chapa son de 200 cm. para la chapa central y 196 cm. para las chapas exteriores. Tras aplicar la doble simetría existente, el modelo queda reducido al que se observa.

Las características de los materiales en dichos modelos corresponden a las de las probetas ensayadas en los ensayos a compresión, con el electrodo O.K.46.



Se han analizado 3 modelos, con distintas longitudes de cordón:

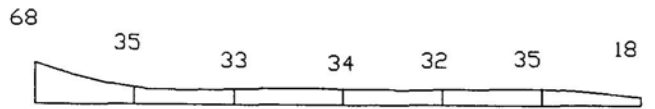
Modelo 1  $\Rightarrow$  L = 30 cm

Modelo 2  $\Rightarrow$  L = 60 cm

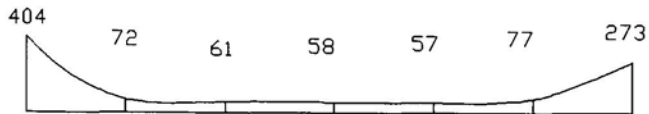
Modelo 3  $\Rightarrow$  L = 120 cm

En las figuras siguientes se muestran las tensiones tangenciales  $\tau_{zx}$  sobre el plano de garganta y las tensiones de comparación, en la arista del cordón. Los valores representados corresponden a una fuerza de 1000 Kp aplicada al modelo. Al encontrarnos siempre en régimen elástico, la fuerza que plastifica el extremo del cordón se calculará proporcionalmente a las tensiones que aparecen para 1000 Kp, como se verá posteriormente.

Modelo 1 (L=30 cm)



tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

Modelo 2 (L=60 cm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

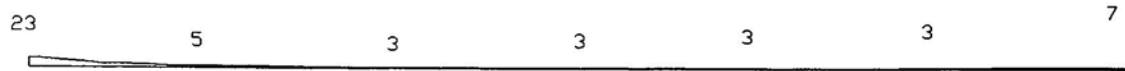


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



Modelo 3 (L=120 cm)

tensiones tangenciales en la  
arista del plano de garganta,  
en  $\text{kp/cm}^2$



tensiones de comparación en la  
arista del plano de garganta,  
en  $\text{kp/cm}^2$

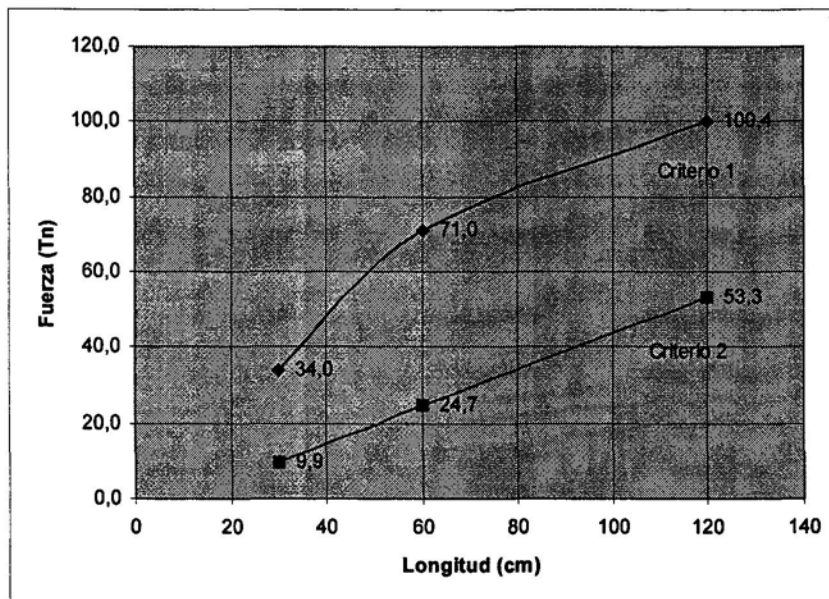


En la tabla siguiente se presentan los siguientes datos de interés:

- 1.- Relación entre la longitud del cordón y el espesor de garganta:  $L/a$
- 2.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 1**, o de Máxima Tensión Tangencial. ( $F_{máx}$ )
- 3.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 2**, o de las Componentes de Tensión. ( $F_{máx}$ )
- 4.- Cociente entre la máxima tensión tangencial existente en el extremo del cordón y la mínima tensión existente en su parte central. ( $\tau_{máx}/\tau_{mín}$ )

	$b_1$ (cm)	$b_2$ (cm)	L (cm)	$L/a$	$F_{máx}$ (T) Criterio 1	$F_{máx}$ (T) Criterio 2	$\tau_{máx}/\tau_{mín}$
Modelo 1	200	196	30	75	34.0	9.9	2.13
Modelo 2	200	196	60	150	71.0	24.7	4.0
Modelo 3	200	196	120	300	100.4	53.3	7.7

A continuación se observa gráficamente la relación entre la longitud “L” del cordón y la máxima fuerza resistida por el mismo, suponiendo que el cordón se agota al alcanzarse el límite elástico en su extremo, según los Criterios 1 y 2 establecidos en el Eurocódigo.

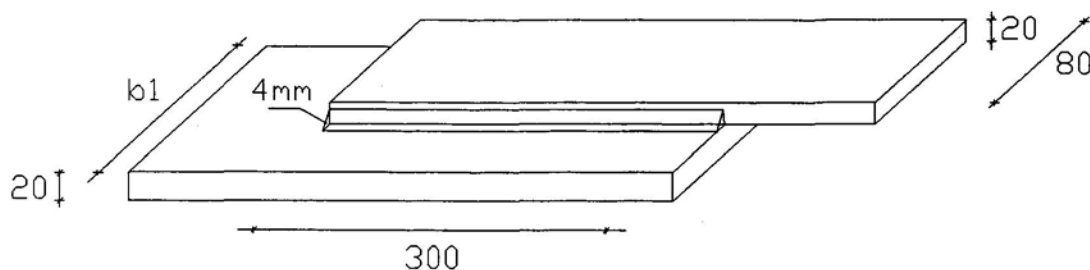


**B) Influencia al aumentar la diferencia de anchura entre chapa central y exterior, permaneciendo constantes otras variables.**

En este apartado se analiza cómo influye en el desarrollo de las tensiones el aumento progresivo de la anchura de una de las chapas que forma la unión, manteniéndose constante la anchura de la otra, y manteniendo constantes las otras variables: espesor de garganta, longitud de cordón, y espesor de chapas.

En la siguiente figura se representa el modelo analizado, en el cual únicamente se mantiene como variable el ancho de la chapa central " $b_1$ ". El estudio se ha realizado para una longitud de cordón de 30 cm. El espesor de la chapa central es de 40 mm, y el de las chapas laterales es de 20 mm. Tras la doble simetría existente, el modelo se reduce al que se observa.

Las características de los materiales en dichos modelos corresponden igualmente a las de las probetas ensayadas en los ensayos a compresión, con el electrodo O.K.46.





Se han analizado 4 modelos, aumentando progresivamente la anchura de la chapa central:

Modelo 1  $\Rightarrow$   $b_1$  : 20 cm

Modelo 2  $\Rightarrow$   $b_1$  : 30 cm

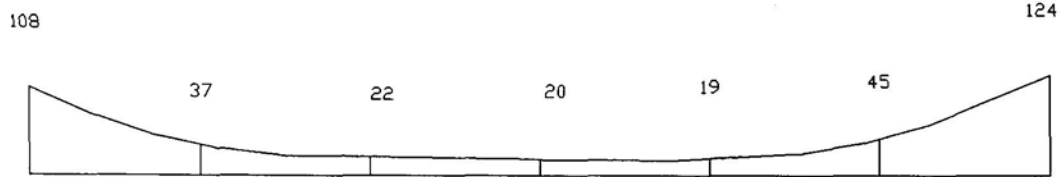
Modelo 3  $\Rightarrow$   $b_1$  : 40 cm

Modelo 4  $\Rightarrow$   $b_1$  : 80 cm

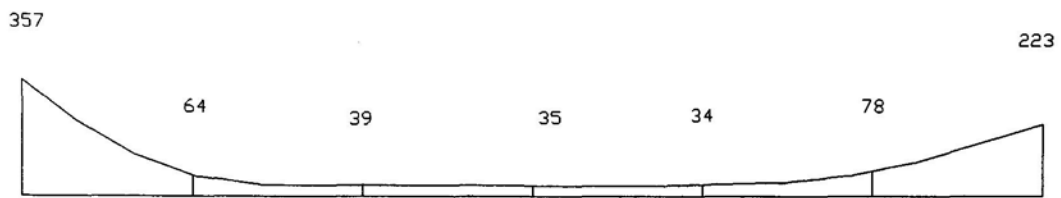
En las figuras siguientes se muestran las tensiones tangenciales  $\tau_{zx}$  sobre el plano de garganta y las tensiones de comparación, en la arista del cordón. Los valores representados corresponden a una fuerza de 1000 Kp aplicada al modelo. Al encontrarnos siempre en régimen elástico, la fuerza que plastifica el extremo del cordón se calculará proporcionalmente a las tensiones que aparecen para 1000 Kp, como se verá posteriormente.

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

Modelo 1 ( $b_1=20 \text{ cm}$ )

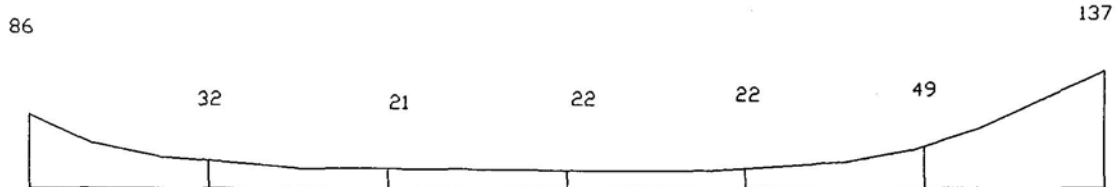


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

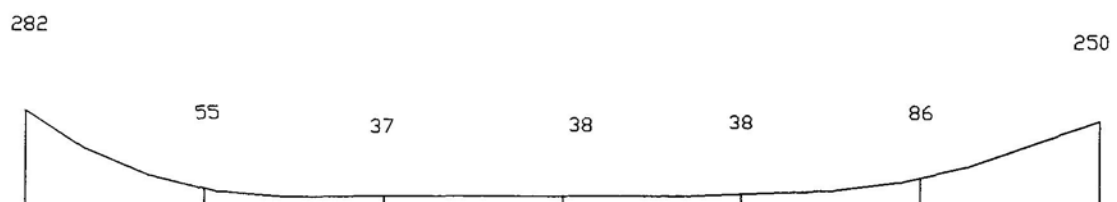


tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

Modelo 2 ( $b_1=30 \text{ cm}$ )

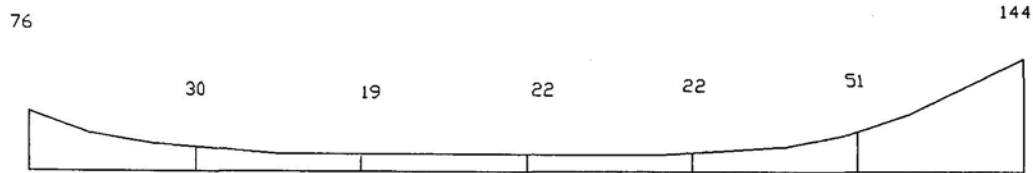


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

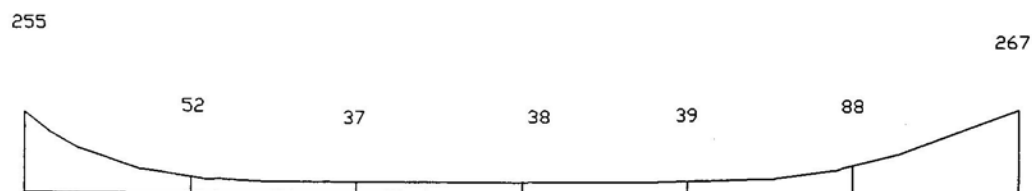


tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

Modelo 3 ( $b_1=40$  cm)

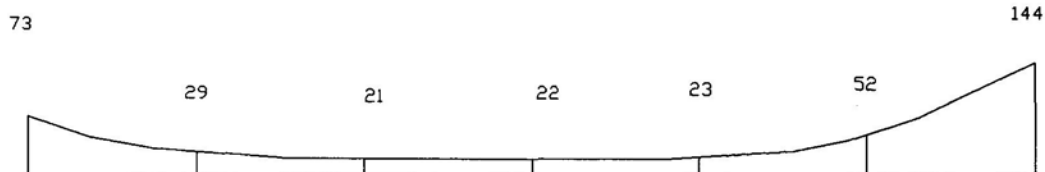


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

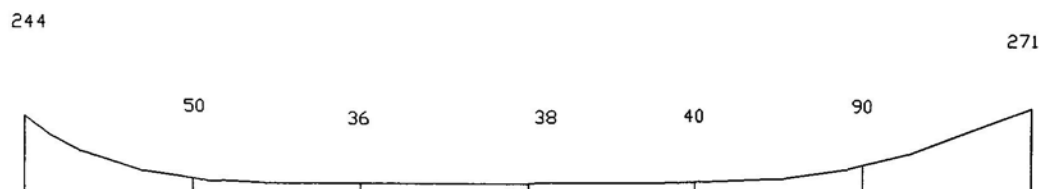


tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

Modelo 4 ( $b_1=80$  cm)



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

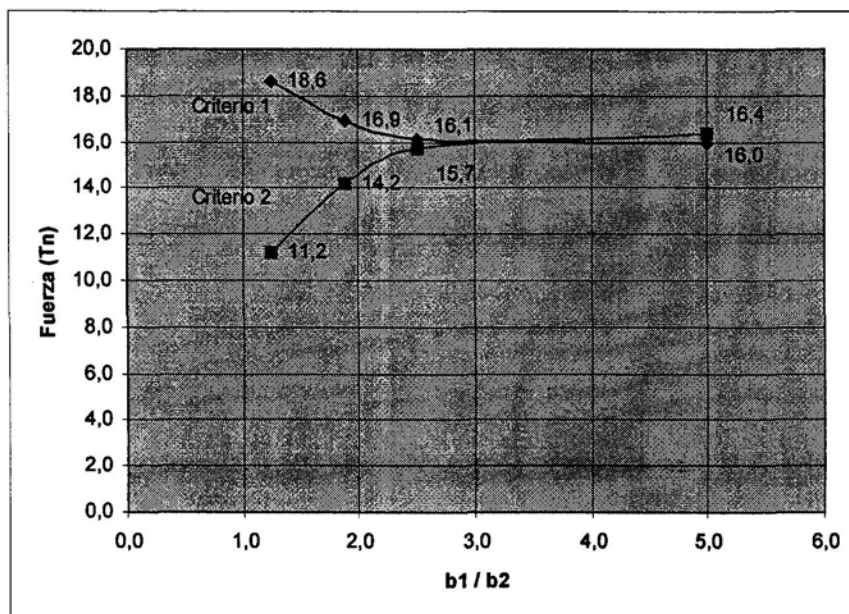


En la tabla siguiente se presentan los siguientes datos de interés:

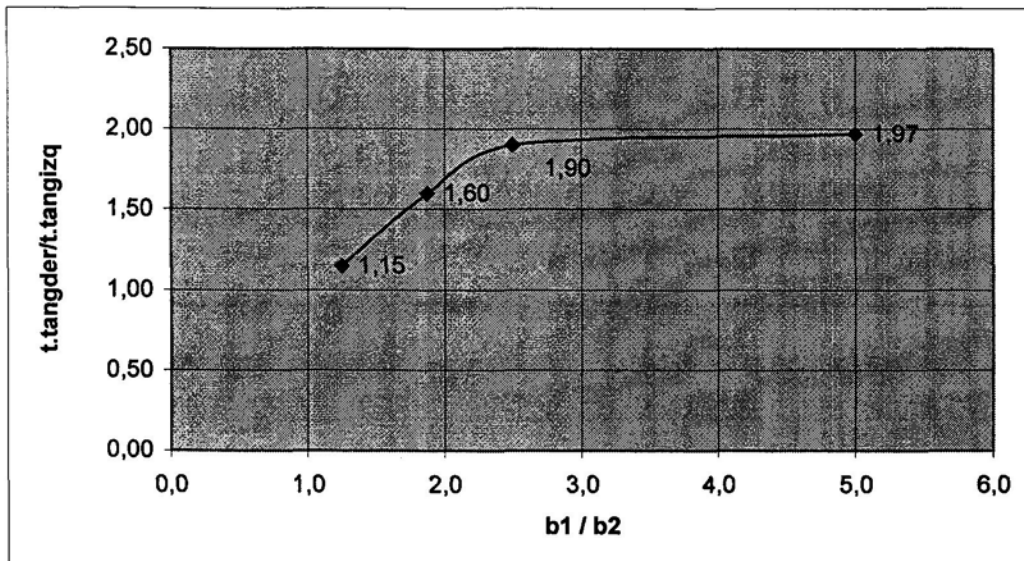
- 1.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 1**, o de Máxima Tensión Tangencial. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 2.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 2**, o de las Componentes de Tensión. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 3.- Cociente entre la tensión tangencial existente en el extremo derecho del cordón según las figuras y la tensión tangencial existente en el extremo izquierdo del cordón.

	L (cm)	b <sub>1</sub> (cm)	b <sub>2</sub> (cm)	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 1	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 2	$\tau_{der}/\tau_{izq}$
Modelo 1	30	20	16	18.6	11.2	1.15
Modelo 2	30	30	16	16.9	14.2	1.60
Modelo 3	30	40	16	16.1	15.7	1.90
Modelo 4	30	80	16	16.0	16.4	1.97

A continuación se observa gráficamente la relación entre la diferencia de anchura de chapas, expresado como el cociente entre la anchura de la chapa central y la exterior ( $b_1/b_2$ ), y la máxima fuerza resistida por el cordón, suponiendo que éste se agota al alcanzarse el límite elástico en su extremo más solicitado, según los Criterios 1 y 2 establecidos en el Eurocódigo.



Y a continuación se presenta un gráfico donde se observa el cociente entre las tensiones tangenciales que se producen en el extremo derecho del cordón y el extremo izquierdo del cordón al aumentar la diferencia de anchura entre chapas.



**C) Influencia al aumentar la anchura de ambas chapas, permaneciendo constantes otras variables.**

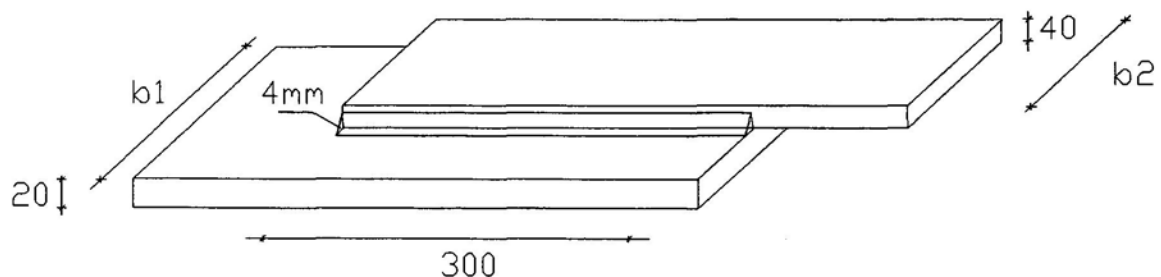
En este apartado se analiza cómo influye en el desarrollo de las tensiones el aumento progresivo de la anchura del conjunto de todas las chapas que forman la unión, manteniendo constantes las otras variables: espesor de garganta, longitud de cordón, y espesor de chapas.

El estudio se ha realizado para dos longitudes de cordón, ya que se han encontrado diferencias de comportamiento entre cordones de longitud mediana y cordones de gran longitud. Las longitudes estudiadas son dos: 30 cm. y 120 cm.

**C.1.) Modelos con cordones de longitud  $L = 30$  cm.**

En la siguiente figura se representa el modelo analizado, en el cual únicamente se mantienen como variables el ancho de la chapa central " $b_1$ " y el ancho de la chapa exterior " $b_2$ ". El estudio se ha realizado para una longitud de cordón de 30 cm, y espesor de chapas de 40 mm. Tras las dos simetrías existentes el modelo se reduce al que se observa.

Las características de los materiales en dichos modelos corresponden, igual que en el caso estudiado anteriormente, a las de las probetas ensayadas en los ensayos a compresión, con el electrodo O.K.46.



Se han analizado 4 modelos, con las siguientes anchuras de chapas:

Modelo 1  $\Rightarrow$   $b_1$  : 20 cm

$b_2$  : 16 cm

Modelo 2  $\Rightarrow$   $b_1$  : 50 cm

$b_2$  : 46 cm

Modelo 3  $\Rightarrow$   $b_1$  : 100 cm

$b_2$  : 96 cm

Modelo 4  $\Rightarrow$   $b_1$  : 200 cm

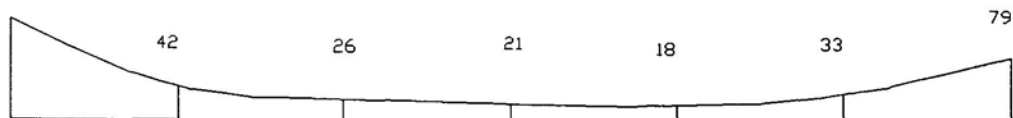
$b_2$  : 196 cm

En las figuras siguientes se muestran las tensiones tangenciales  $\tau_{zx}$  sobre el plano de garganta y las tensiones de comparación, en la arista del cordón. Los valores representados corresponden a una fuerza de 1000 Kp aplicada al modelo. Al encontrarnos siempre en régimen elástico, la fuerza que plastifica el extremo del cordón se calculará proporcionalmente a las tensiones que aparecen para 1000 Kp, como se verá posteriormente.

Modelo 1 ( $b_1=20$  cm,  $b_2=16$  cm)

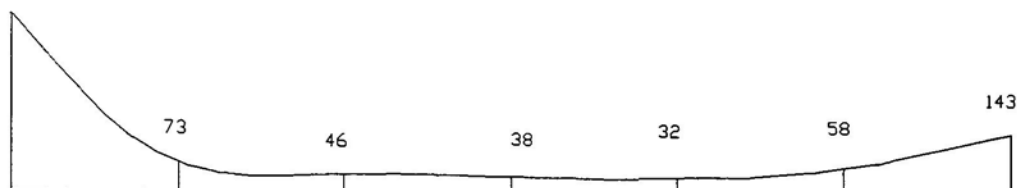
tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

127



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

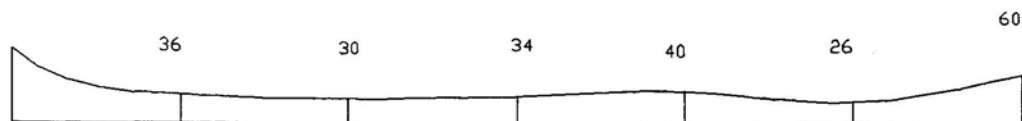
425



Modelo 2 ( $b_1=50$  cm,  $b_2=46$  cm)

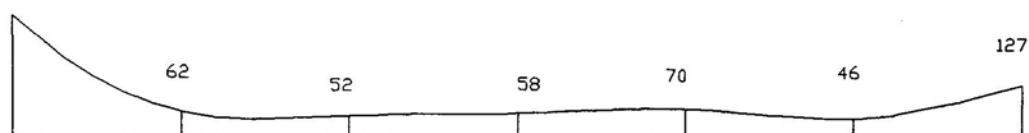
tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

92



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

298

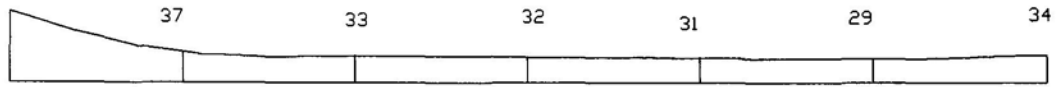




Modelo 3 ( $b_1=100$  cm,  $b_2=96$  cm)

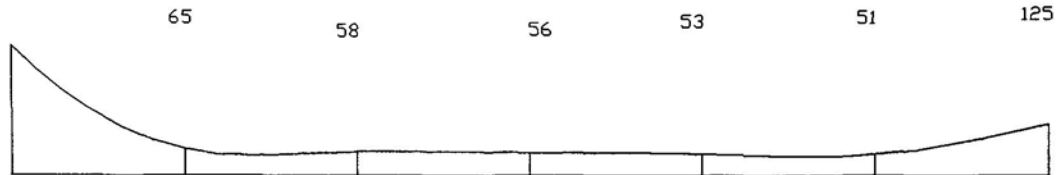
tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

87



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

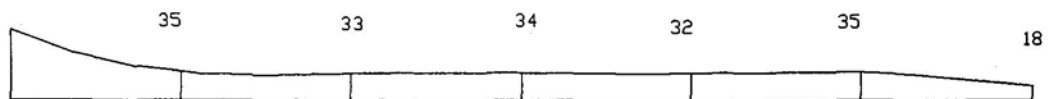
314



Modelo 4 ( $b_1=200$  cm,  $b_2=196$  cm)

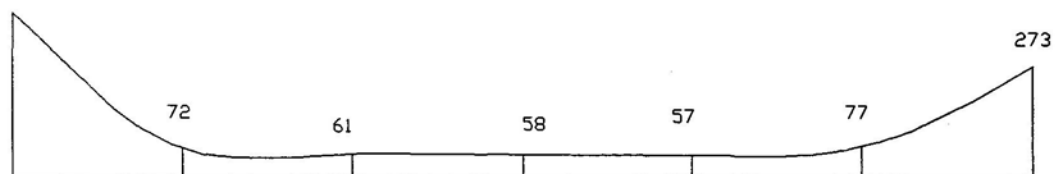
tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

86



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

404

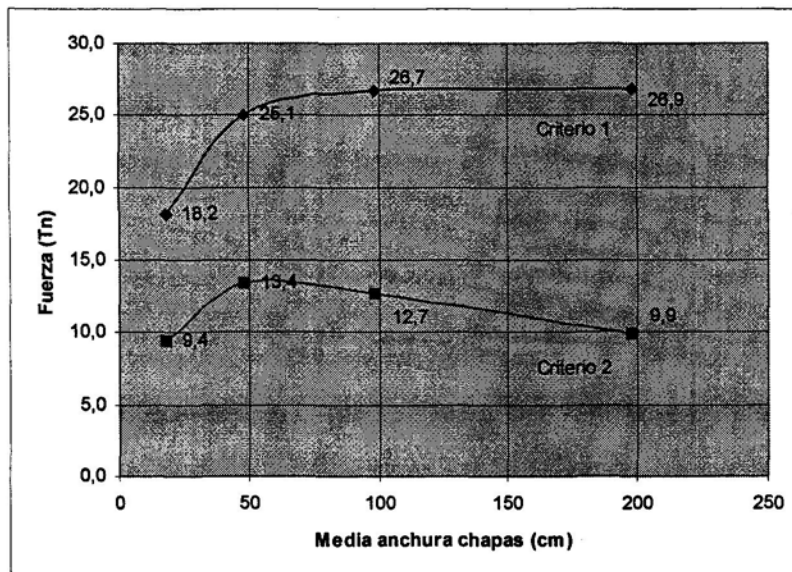


En la tabla siguiente se presentan los siguientes datos de interés:

- 1.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 1**, o de Máxima Tensión Tangencial. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 2.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 2**, o de las Componentes de Tensión. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 3.- Cociente entre la tensión tangencial existente en el extremo más solicitado del cordón y la tensión tangencial mínima en su zona central. ( $\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{m\acute{i}n}$ )

	L (cm)	b <sub>1</sub> (cm)	b <sub>2</sub> (cm)	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 1	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 2	$\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{m\acute{i}n}$
Modelo 1	30	20	16	18.2	9.4	7.1
Modelo 2	30	50	46	25.1	13.4	3.5
Modelo 3	30	100	96	26.7	12.7	3.0
Modelo 4	30	200	196	26.9	9.9	2.7

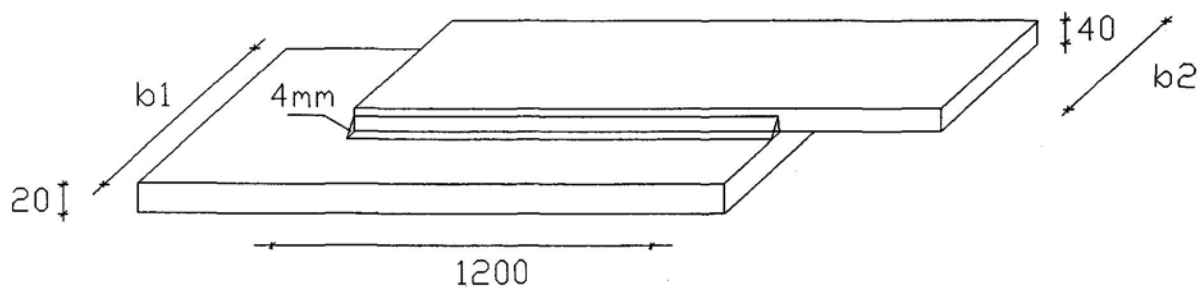
A continuación se observa gráficamente la relación entre la anchura de chapas del conjunto de la unión, expresada como la media entre las anchuras de chapa central y exterior, y la máxima fuerza resistida por el cordón, suponiendo que éste se agota al alcanzarse el límite elástico en su extremo más solicitado, según los Criterios 1 y 2 establecidos en el Eurocódigo.



**C.2.) Modelos con cordones de longitud  $L = 120$  cm.**

En la siguiente figura se representa el modelo analizado, en el cual se mantienen igualmente como variables el ancho de la chapa central " $b_1$ " y el ancho de la chapa exterior " $b_2$ ". El estudio se ha realizado para una longitud de cordón de 120 cm, y espesor de chapas de 40 mm; aplicando la doble simetría al modelo, éste se reduce al que se observa.

Las características de los materiales en dichos modelos corresponden, igual que en el caso estudiado anteriormente, a las de las probetas ensayadas en los ensayos a compresión, con el electrodo O.K.46.



Se han analizado 5 modelos, con las siguientes anchuras de chapas:

Modelo 1  $\Rightarrow$   $b_1$  : 20 cm  
 $b_2$  : 16 cm

Modelo 2  $\Rightarrow$   $b_1$  : 50 cm  
 $b_2$  : 46 cm

Modelo 3  $\Rightarrow$   $b_1$  : 100 cm  
 $b_2$  : 96 cm

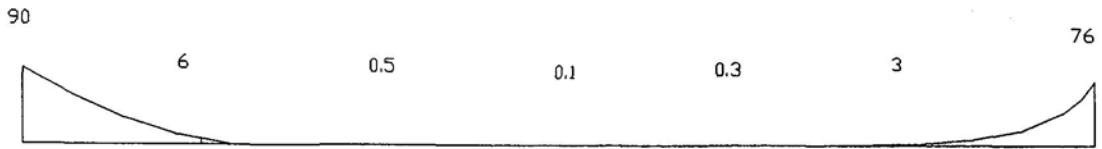
Modelo 4  $\Rightarrow$   $b_1$  : 200 cm  
 $b_2$  : 196 cm

Modelo 5  $\Rightarrow$   $b_1$  : 400 cm  
 $b_2$  : 396 cm

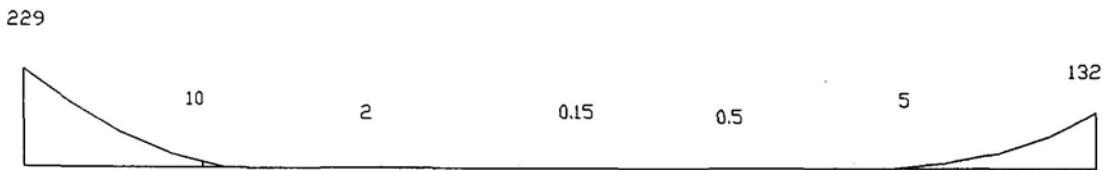
En las figuras siguientes se muestran las tensiones tangenciales  $\tau_{zx}$  sobre el plano de garganta y las tensiones de comparación, en la arista del cordón. Los valores representados corresponden a una fuerza de 1000 Kp aplicada al modelo. Al encontrarnos siempre en régimen elástico, la fuerza que plastifica el extremo del cordón se calculará proporcionalmente a las tensiones que aparecen para 1000 Kp, como se verá posteriormente.

Modelo 1 (b1=20 cm, b2=16 cm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

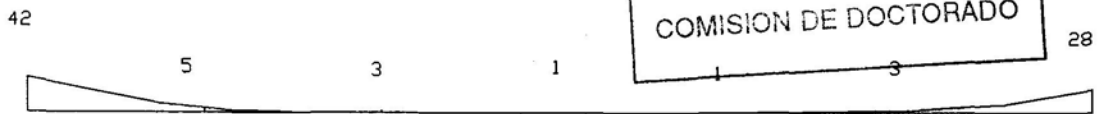
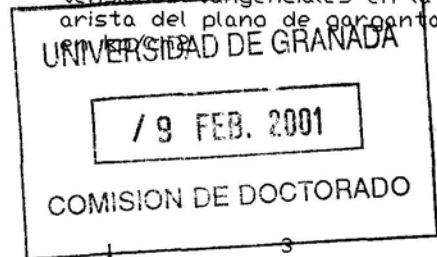


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



Modelo 2 (b1=50 cm, b2=46 cm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

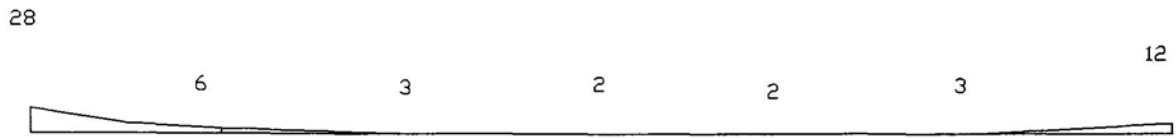


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

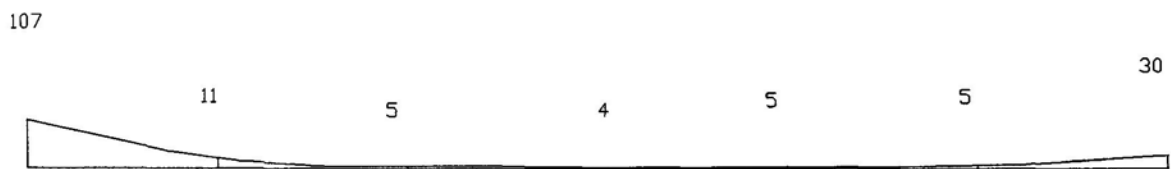


Modelo 3 (b1=100 cm, b2=96 cm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



Modelo 4 (b1=200 cm, b2=196 cm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

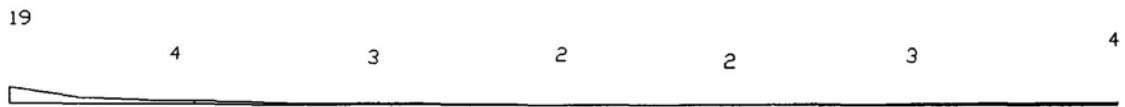


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

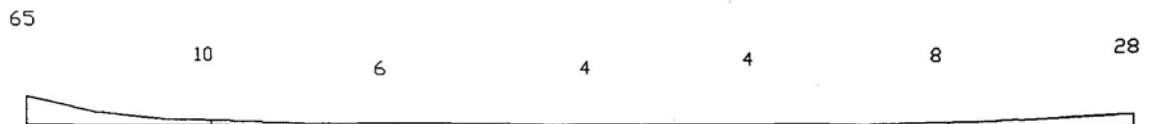


Modelo 5 ( $b_1=400$  cm,  $b_2=396$  cm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

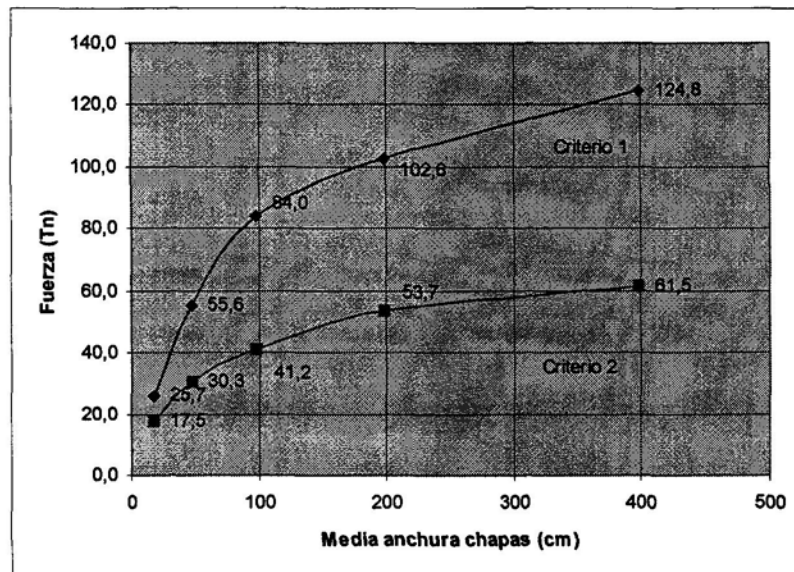


En la tabla siguiente se presentan los siguientes datos de interés:

- 1.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 1**, o de Máxima Tensión Tangencial. ( $F_{máx}$ )
- 2.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 2**, o de las Componentes de Tensión. ( $F_{máx}$ )
- 3.- Cociente entre la tensión tangencial existente en el extremo más solicitado del cordón y la tensión tangencial mínima en su zona central. ( $\tau_{máx}/\tau_{mín}$ )

	L (cm)	b <sub>1</sub> (cm)	b <sub>2</sub> (cm)	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 1	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 2	$\tau_{máx}/\tau_{mín}$
Modelo 1	30	20	16	25.7	17.5	900
Modelo 2	30	50	46	55.6	30.3	42
Modelo 3	30	100	96	84.0	41.2	14
Modelo 4	30	200	196	102.6	53.7	9
Modelo 4	30	400	396	124.8	61.5	7

A continuación se observa gráficamente la relación entre la anchura de chapas del conjunto de la unión, expresada como la media entre las anchuras de chapa central y exterior, y la máxima fuerza resistida por el cordón, suponiendo que éste se agota al alcanzarse el límite elástico en su extremo más solicitado, según los Criterios 1 y 2 establecidos en el Eurocódigo.



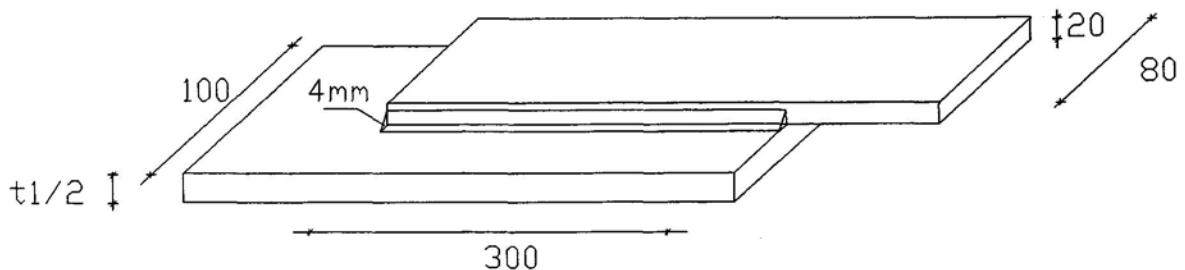


**D) Influencia al aumentar el espesor de la chapa central, permaneciendo constantes otras variables.**

En este apartado se analiza cómo influye en el desarrollo de las tensiones el aumento progresivo del espesor de la chapa central, manteniendo constantes las otras variables: espesor de garganta, longitud de cordón, espesor de las chapas exteriores, y anchura de chapas.

En la siguiente figura se representa el modelo analizado, en el cual únicamente se mantiene como variable el espesor de la chapa central " $t_1$ ". El estudio se ha realizado para una longitud de cordón de 30 cm. Las chapas exteriores presentan un espesor de 20 mm. Aplicada la doble simetría existente en el modelo, éste se reduce al que se observa.

Las características de los materiales en dichos modelos corresponden igualmente a las de las probetas ensayadas en los ensayos a compresión, con el electrodo O.K.46.



Se han analizado 5 modelos, aumentando progresivamente el espesor de la chapa central:

Modelo 1  $\Rightarrow$   $t_1$  : 20 mm

Modelo 2  $\Rightarrow$   $t_1$  : 30 mm

Modelo 3  $\Rightarrow$   $t_1$  : 40 mm

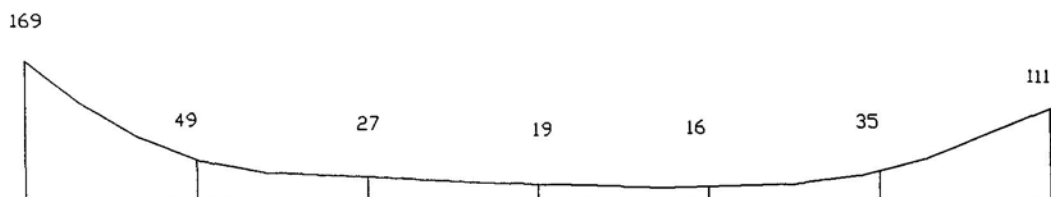
Modelo 4  $\Rightarrow$   $t_1$  : 60 mm

Modelo 5  $\Rightarrow$   $t_1$  : 80 mm

En las figuras siguientes se muestran las tensiones tangenciales  $\tau_{zx}$  sobre el plano de garganta y las tensiones de comparación, en la arista del cordón. Los valores representados corresponden a una fuerza de 1000 Kp aplicada al modelo. Al encontrarnos siempre en régimen elástico, la fuerza que plastifica el extremo del cordón se calculará proporcionalmente a las tensiones que aparecen para 1000 Kp, como se verá posteriormente.

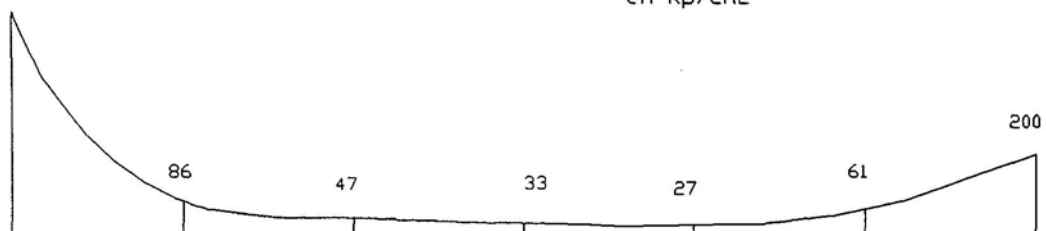
Modelo 1 ( $t_1=20$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



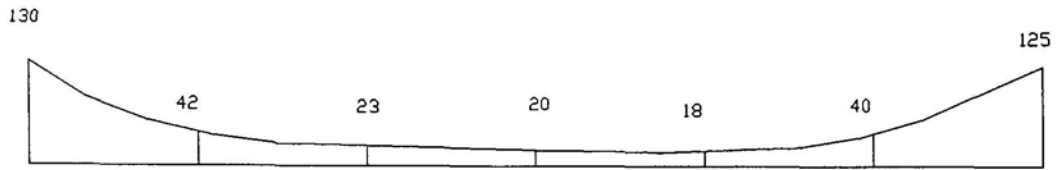
552

tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

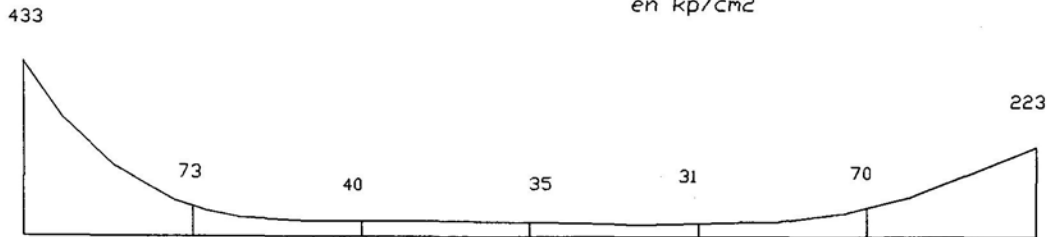


Modelo 2 ( $t_1=30$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

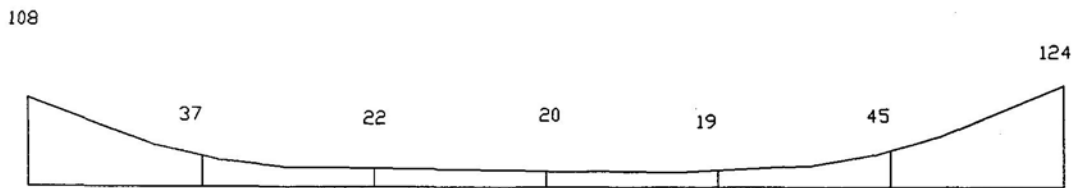


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

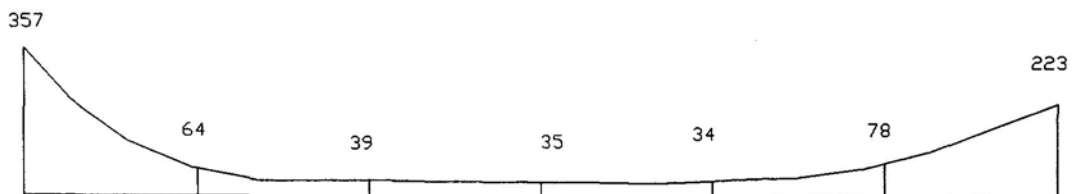


Modelo 3 ( $t_1=40$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

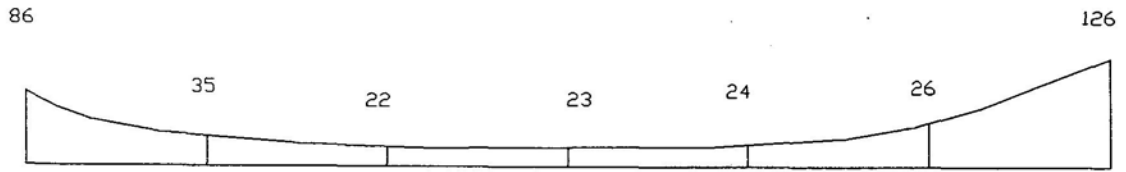


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

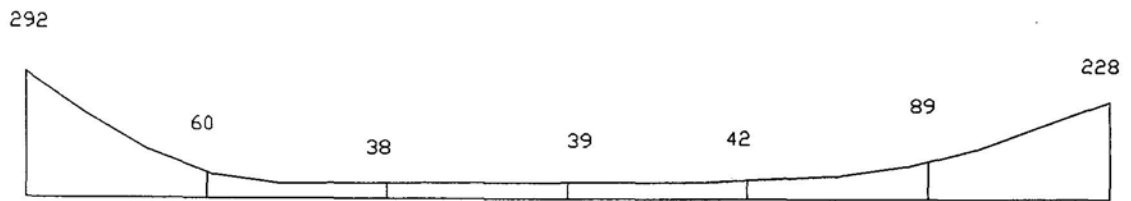


Modelo 4 ( $t_1=60$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

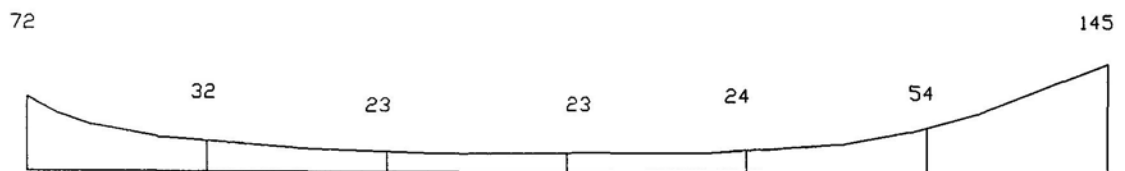


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

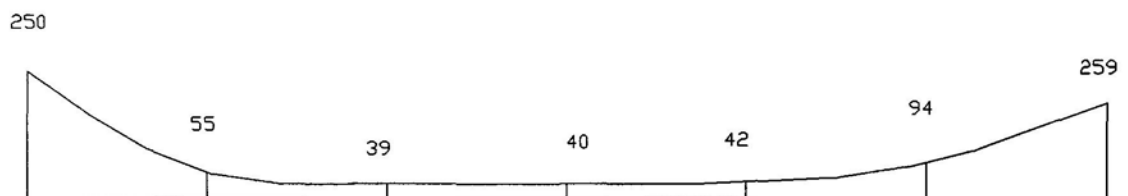


Modelo 5 ( $t_1=80$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

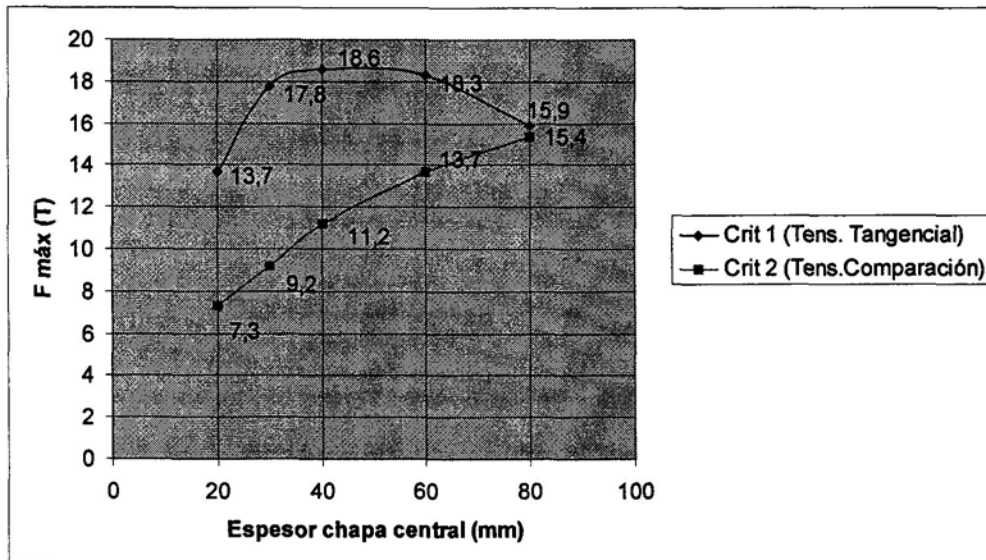


En la tabla siguiente se presentan los siguientes datos de interés:

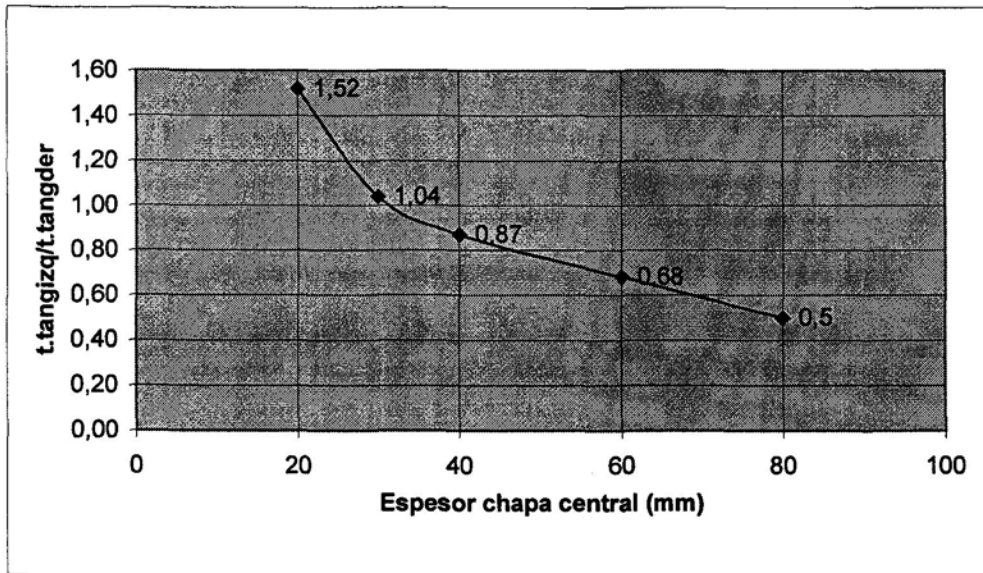
- 1.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 1**, o de Máxima Tensión Tangencial. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 2.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 2**, o de las Componentes de Tensión. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 3.- Cociente entre la tensión tangencial existente en el extremo izquierdo del cordón según las figuras y la tensión tangencial existente en el extremo derecho del cordón.

	L (cm)	b <sub>1</sub> (cm)	b <sub>2</sub> (cm)	t <sub>1</sub> (mm)	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 1	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 2	$\tau_{izq}/\tau_{der}$
Modelo 1	30	20	16	20	13.7	7.3	1.52
Modelo 2	30	20	16	30	17.8	9.2	1.04
Modelo 3	30	20	16	40	18.6	11.2	0.87
Modelo 4	30	20	16	60	18.3	13.7	0.68
Modelo 5	30	20	16	80	15.9	15.4	0.50

A continuación se observa gráficamente la relación entre el espesor de la chapa central de la unión y la máxima fuerza resistida por el cordón, suponiendo que éste se agota al alcanzarse el límite elástico en su extremo más solicitado, según los Criterios 1 y 2 establecidos en el Eurocódigo.



Y a continuación se presenta un gráfico donde se observa el cociente entre las tensiones tangenciales que se producen en el extremo izquierdo del cordón y el extremo derecho del cordón al aumentar el espesor de la chapa central.

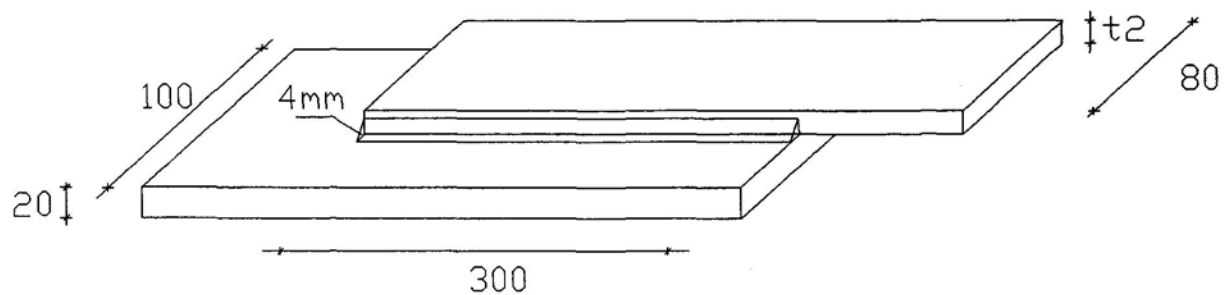


**E) Influencia al aumentar el espesor de las chapas exteriores, permaneciendo constantes otras variables.**

En este apartado se analiza cómo influye en el desarrollo de las tensiones el aumento progresivo del espesor de la chapa exterior, que es la que presenta su canto soldado al cordón, manteniendo constantes las otras variables: espesor de garganta, longitud de cordón, y espesor de la chapa central.

En la siguiente figura se representa el modelo analizado, en el cual únicamente se mantiene como variable el espesor de la chapa exterior " $t_2$ ". El estudio se ha realizado para una longitud de cordón de 30 cm., y tras aplicar la doble simetría existente el modelo se reduce al que se observa.

Las características de los materiales en dichos modelos corresponden igualmente a las de las probetas ensayadas en los ensayos a compresión, con el electrodo O.K.46.



Se han analizado 5 modelos, aumentando progresivamente el espesor de la chapa exterior:

Modelo 1  $\Rightarrow$   $t_2$  : 10 mm

Modelo 2  $\Rightarrow$   $t_2$  : 15 mm

Modelo 3  $\Rightarrow$   $t_2$  : 20 mm

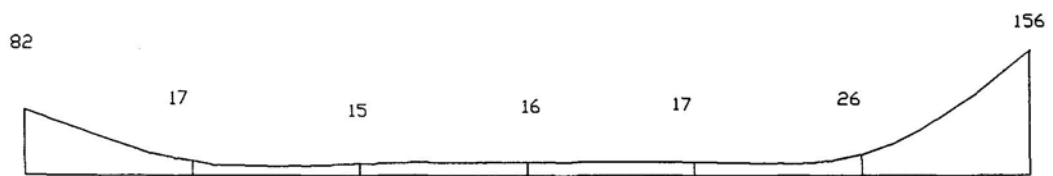
Modelo 4  $\Rightarrow$   $t_2$  : 30 mm

Modelo 5  $\Rightarrow$   $t_2$  : 40 mm

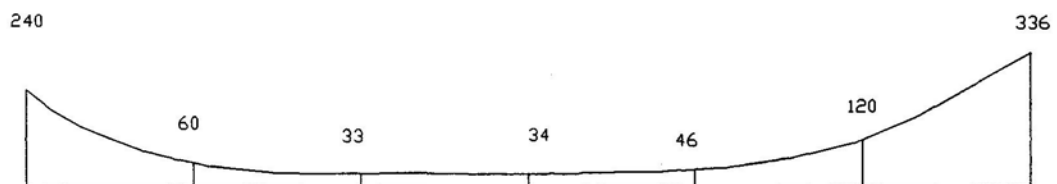
En las figuras siguientes se muestran las tensiones tangenciales  $\tau_{zx}$  sobre el plano de garganta y las tensiones de comparación, en la arista del cordón. Los valores representados corresponden a una fuerza de 1000 Kp aplicada al modelo. Al encontrarnos siempre en régimen elástico, la fuerza que plastifica el extremo del cordón se calculará proporcionalmente a las tensiones que aparecen para 1000 Kp, como se verá posteriormente.

Modelo 1 ( $t_2=10$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

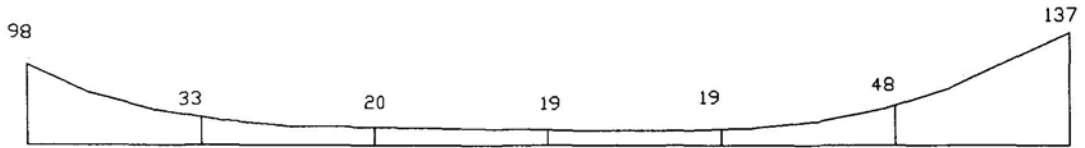




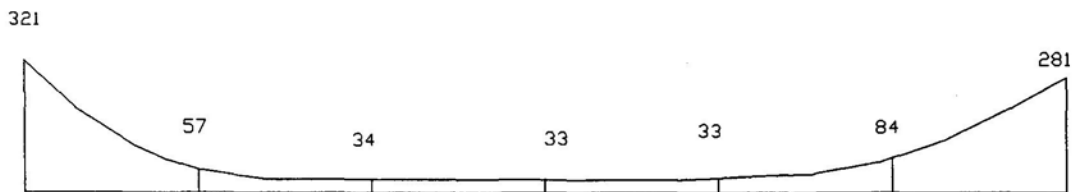
**Capítulo 4. Estudio teórico**

Modelo 2 ( $t_2=15$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

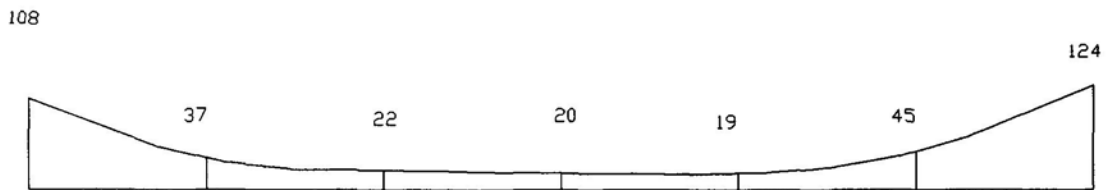


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

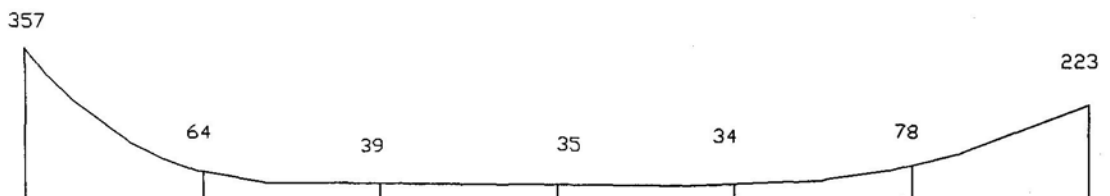


Modelo 3 ( $t_2=20$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$



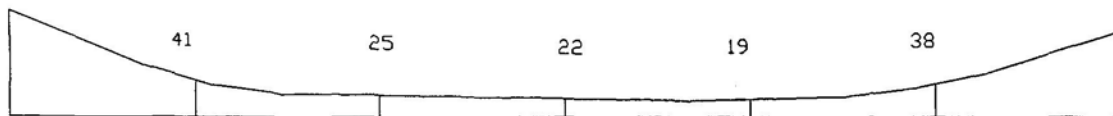
**Capítulo 4. Estudio teórico**

Modelo 4 ( $t_2=30$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

121

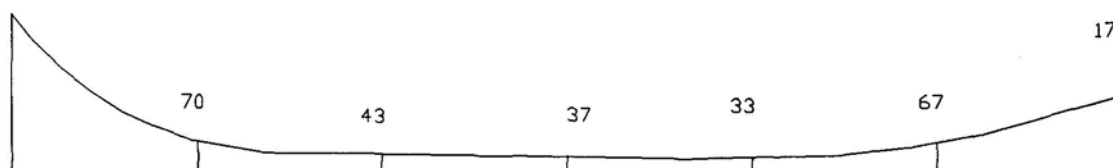
99



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

402

176

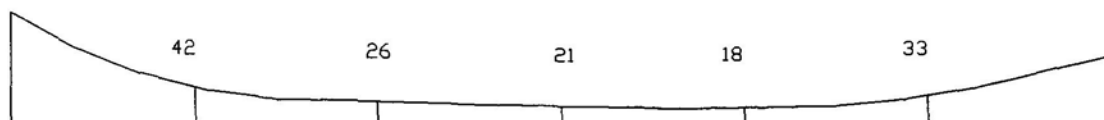


Modelo 5 ( $t_2=40$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

127

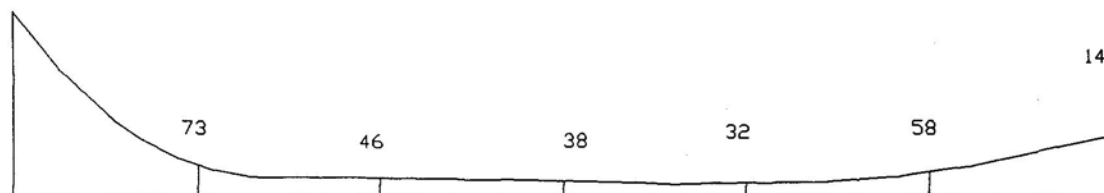
79



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $kp/cm^2$

425

143

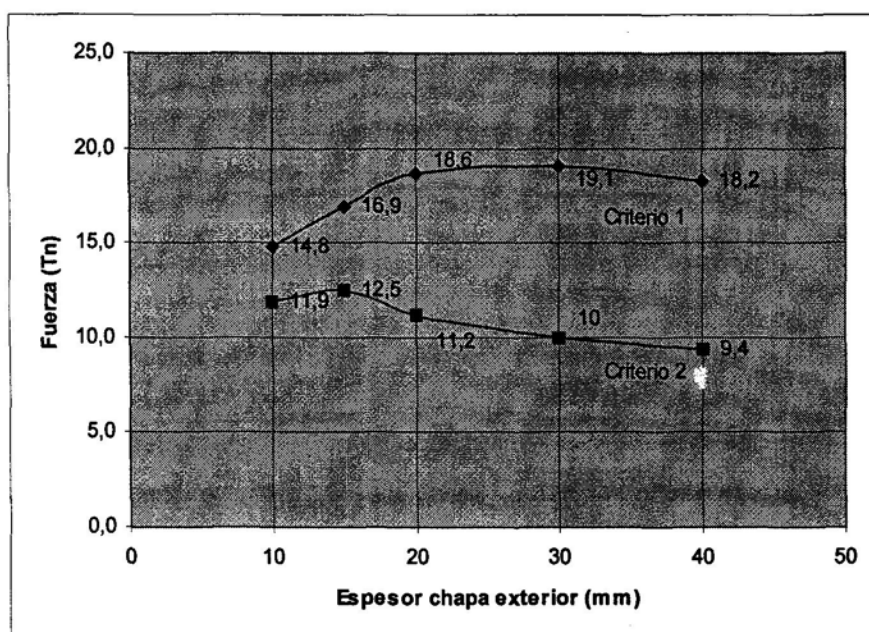


En la tabla siguiente se presentan los siguientes datos de interés:

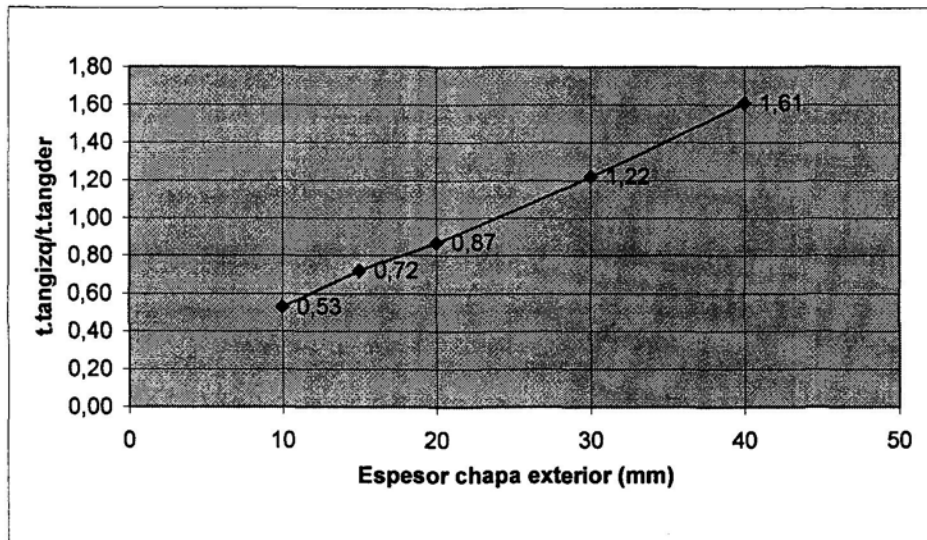
- 1.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 1**, o de Máxima Tensión Tangencial. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 2.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 2**, o de las Componentes de Tensión. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 3.- Cociente entre la tensión tangencial existente en el extremo izquierdo del cordón según las figuras y la tensión tangencial existente en el extremo derecho del cordón.

	L (cm)	b <sub>1</sub> (cm)	b <sub>2</sub> (cm)	t <sub>2</sub> (mm)	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 1	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 2	$\tau_{izq}/\tau_{der}$
Modelo 1	30	20	16	10	14.8	11.9	0.53
Modelo 2	30	20	16	15	16.9	12.5	0.72
Modelo 3	30	20	16	20	18.6	11.2	0.87
Modelo 4	30	20	16	30	19.1	10.0	1.22
Modelo 5	30	20	16	40	18.2	9.4	1.61

A continuación se observa gráficamente la relación entre el espesor de la chapa exterior de la unión y la máxima fuerza resistida por el cordón, suponiendo que éste se agota al alcanzarse el límite elástico en su extremo más solicitado, según los Criterios 1 y 2 establecidos en el Eurocódigo.



Y a continuación se presenta un gráfico donde se observa el cociente entre las tensiones tangenciales que se producen en el extremo izquierdo del cordón y el extremo derecho del cordón al aumentar el espesor de la chapa exterior.

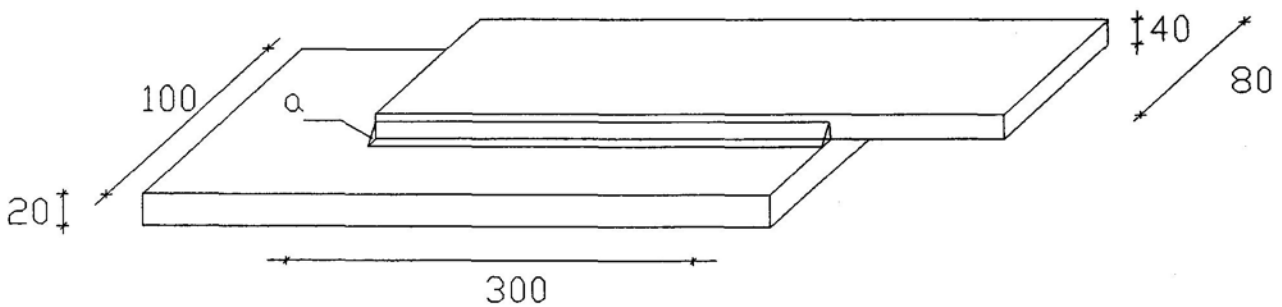


**F) Influencia al aumentar el espesor de garganta del cordón, permaneciendo constantes otras variables.**

Por último, en este apartado se analiza cómo influye en el desarrollo de las tensiones el aumento progresivo del espesor de garganta del cordón, manteniendo constantes las otras variables.

En la siguiente figura se representa el modelo analizado, en el cual únicamente se mantiene como variable el espesor de garganta del cordón "a". El estudio se ha realizado para una longitud de cordón de 30 cm. El espesor de las chapas que forman la unión es de 40 mm. Tras la doble simetría existente, el modelo queda reducido al que se observa.

Las características de los materiales en dichos modelos corresponden igualmente a las de las probetas ensayadas en los ensayos a compresión, con el electrodo O.K.46.



Se han analizado 4 modelos, aumentando progresivamente el espesor de garganta del cordón:

Modelo 1  $\Rightarrow$  a : 4 mm

Modelo 2  $\Rightarrow$  a : 8 mm

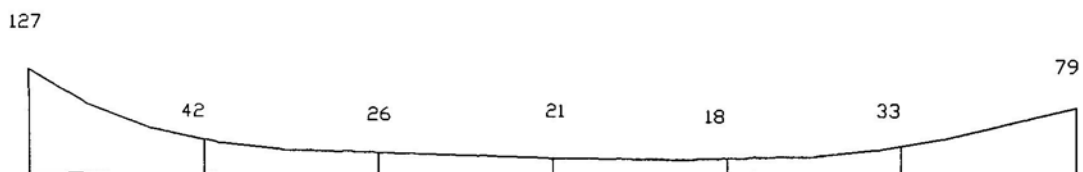
Modelo 3  $\Rightarrow$  a : 12 mm

Modelo 4  $\Rightarrow$  a : 16 mm

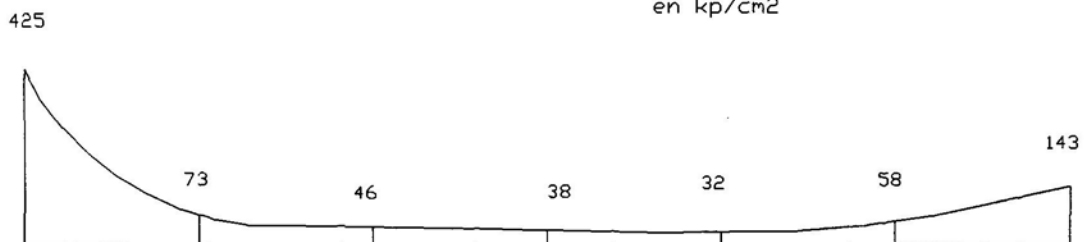
En las figuras siguientes se muestran las tensiones tangenciales  $\tau_{zx}$  sobre el plano de garganta y las tensiones de comparación, en la arista del cordón. Los valores representados corresponden a una fuerza de 1000 Kp aplicada al modelo. Al encontrarnos siempre en régimen elástico, la fuerza que plastifica el extremo del cordón se calculará proporcionalmente a las tensiones que aparecen para 1000 Kp, como se verá posteriormente.

Modelo 1 (a=4 mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

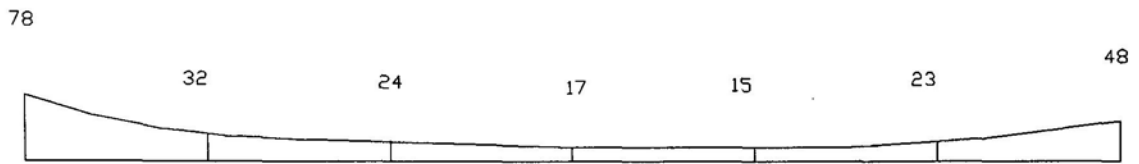


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en kp/cm<sup>2</sup>

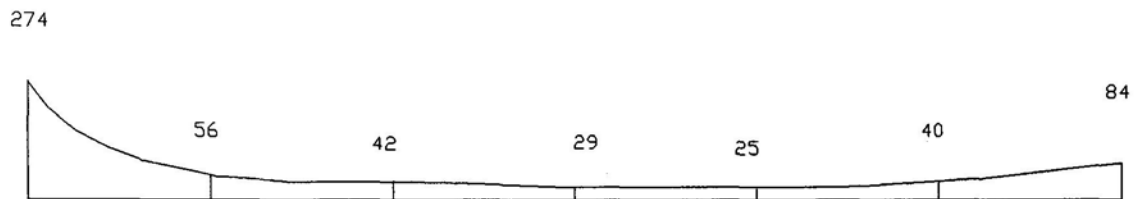


Modelo 2 ( $\alpha=8$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

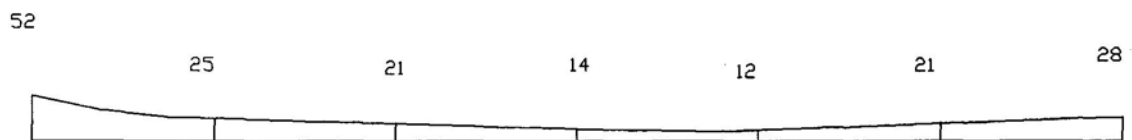


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

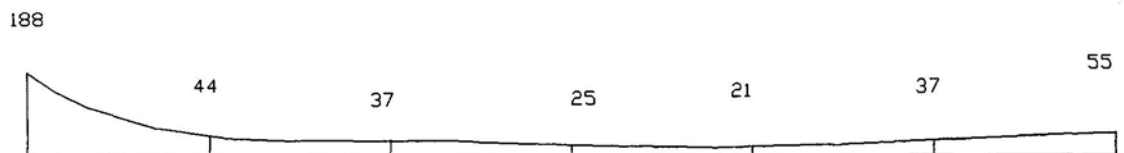


Modelo 3 ( $\alpha=12$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

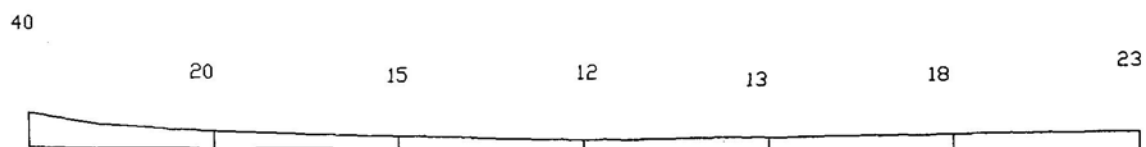


tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$

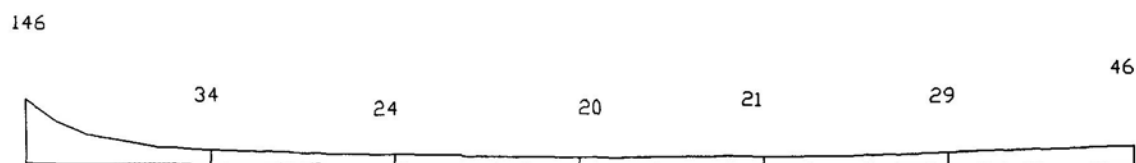


Modelo 4 ( $\alpha=16$  mm)

tensiones tangenciales en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$



tensiones de comparación en la arista del plano de garganta, en  $\text{kp/cm}^2$



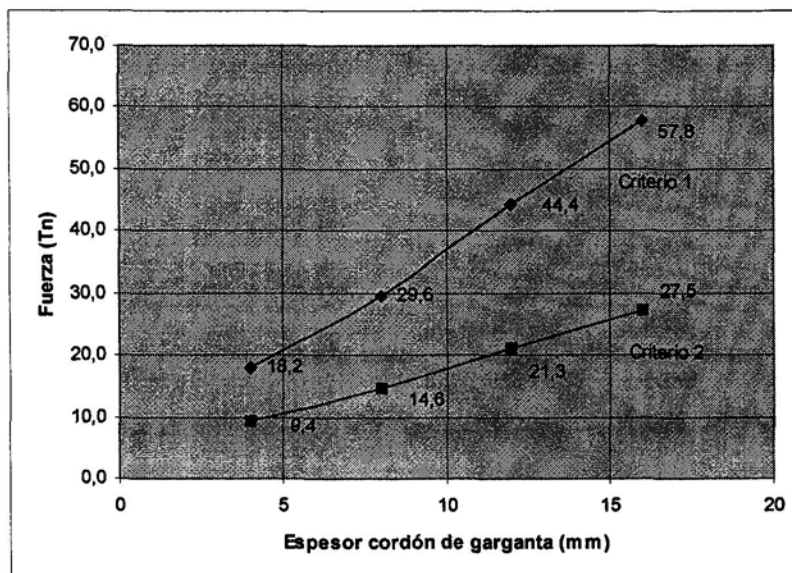


En la tabla siguiente se presentan los siguientes datos de interés:

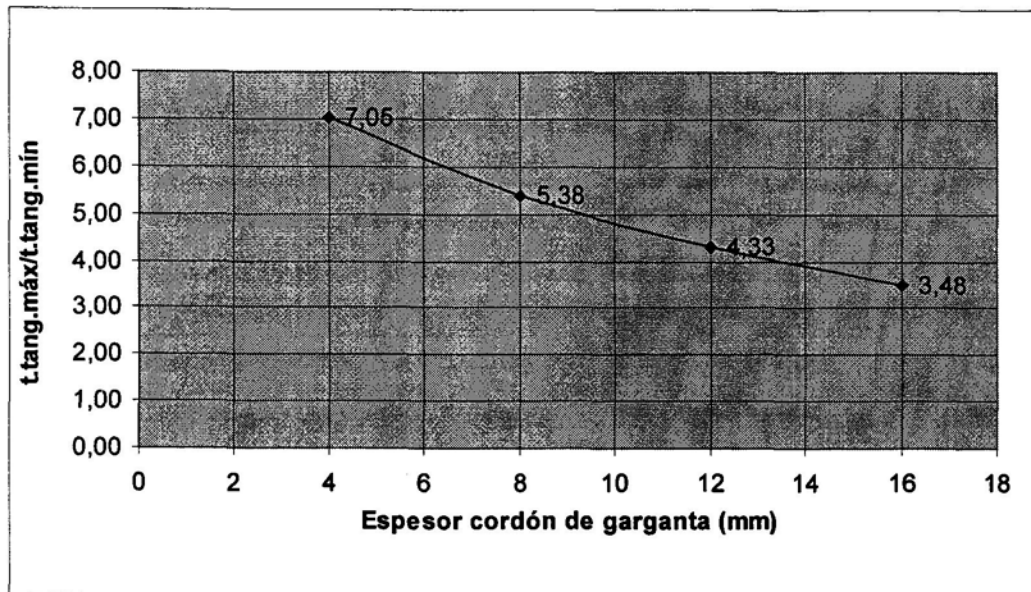
- 1.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 1**, o de Máxima Tensión Tangencial. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 2.- Máxima fuerza soportada por el cordón en régimen elástico, según el **Criterio 2**, o de las Componentes de Tensión. ( $F_{m\acute{a}x}$ )
- 3.- Cociente entre la tensión tangencial existente en el extremo más solicitado del cordón y la tensión tangencial mínima en su zona central. ( $\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{m\acute{i}n}$ )

	L (cm)	b <sub>1</sub> (cm)	b <sub>2</sub> (cm)	a (mm)	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 1	F <sub>máx</sub> (T) Criterio 2	$\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{m\acute{i}n}$
Modelo 1	30	20	16	4	18.2	9.4	7.05
Modelo 2	30	20	16	8	29.6	14.6	5.38
Modelo 3	30	20	16	12	44.4	21.3	4.33
Modelo 4	30	20	16	16	57.8	27.5	3.48

A continuación se observa gráficamente la relación entre el espesor del cordón y la máxima fuerza resistida por el cordón, suponiendo que éste se agota al alcanzarse el límite elástico en su extremo más solicitado, según los Criterios 1 y 2 establecidos en el Eurocódigo.



Y a continuación se presenta un gráfico donde se observa el cociente entre la tensión tangencial existente en el extremo más solicitado del cordón y la tensión tangencial mínima en su zona central, con el aumento del espesor del cordón.



#### 4.2.3.3. Resultados del estudio en régimen plástico hasta rotura.

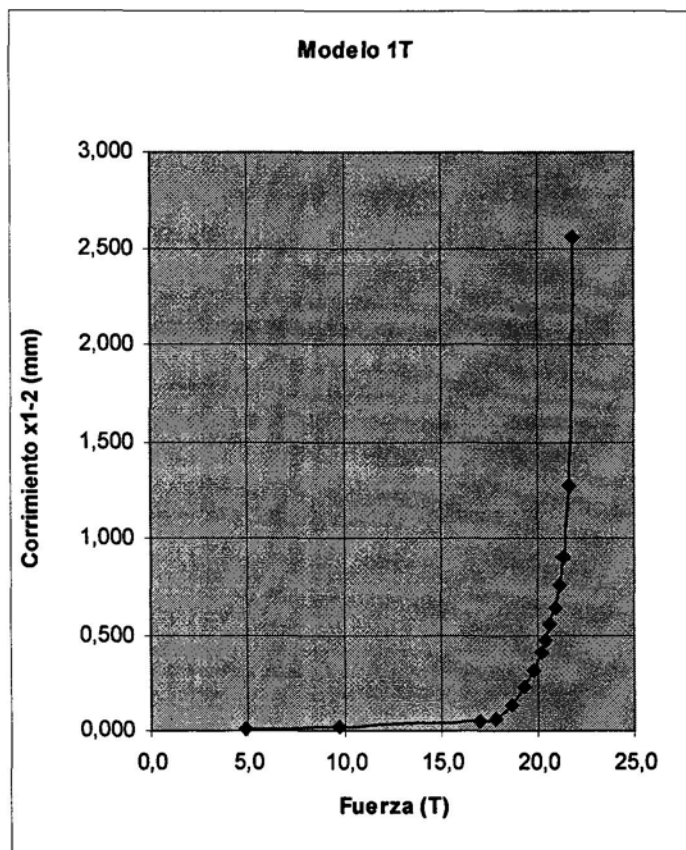
Se han modelizado hasta rotura las siguientes probetas:

- los modelos correspondientes a las probetas ensayadas en la fase experimental (5 ensayos a tracción y 14 ensayos a compresión).
- otros dos modelos que completan el estudio en régimen plástico:
  - un modelo con cordón de 120 cm. de longitud, con las características mecánicas de los ensayos rotos a compresión con el electrodo más resistente (de límite de rotura 6.660 kp/cm<sup>2</sup>). Este modelo se ha ensayado con vistas a estudiar un modelo con cordones muy largos (modelo que llamaremos "LARGO").
  - otro modelo con cordón de 30 cm. de longitud, y chapas de anchuras de 200 cm., con las características mecánicas de los ensayos rotos a compresión con el electrodo más resistente (de límite de rotura 6.660 kp/cm<sup>2</sup>). Este modelo se ha ensayado con vistas a estudiar cómo influyen las componentes transversales al eje del cordón, que hacen crecer de manera apreciable la tensión de comparación (modelo que llamaremos "ANCHO").

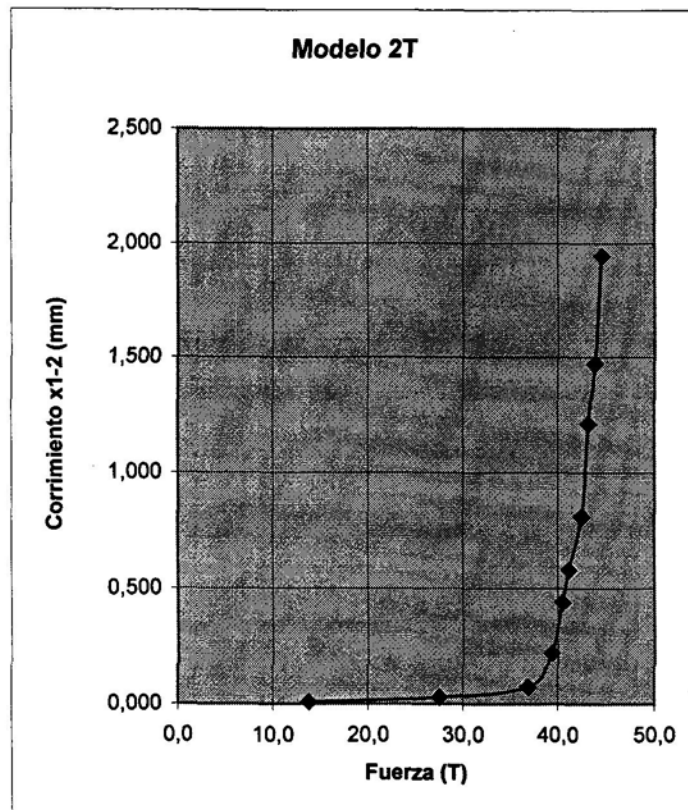
Los modelos se han sometido a una carga creciente por encima del límite elástico, plastificando el cordón progresivamente.

En las páginas siguientes se muestran los gráficos correspondientes a las curvas carga-corrimiento, donde en abscisas aparece la carga aplicada al modelo en toneladas, y en ordenadas el corrimiento  $\Delta x_{1,2}$  existente entre los vértices del cordón. Se supone que la carga que agota la unión es aquella para la que el corrimiento alcanza un valor  $\Delta x_{1,2} = 1.5$  mm.

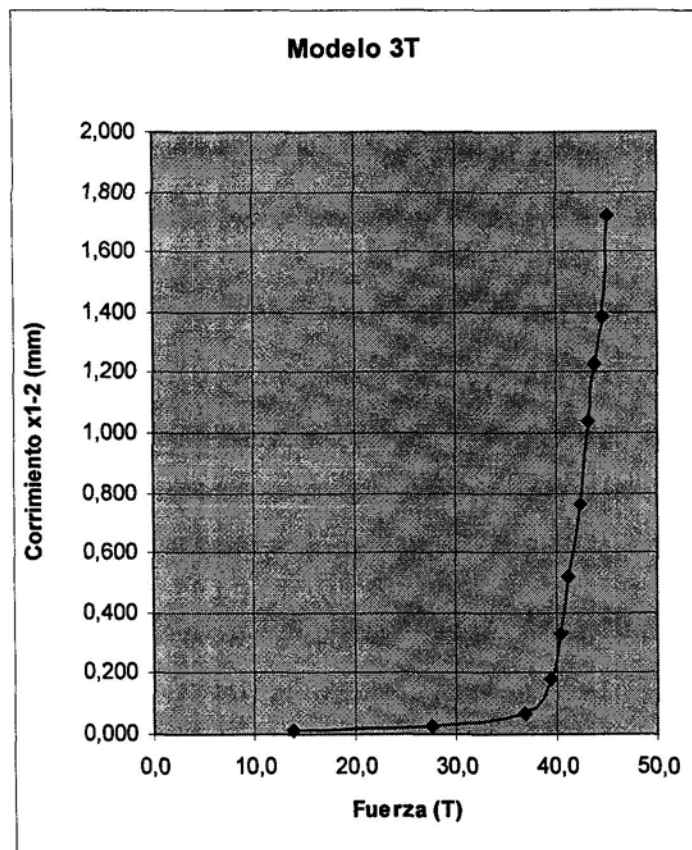
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
4,9	0,007
9,7	0,017
17,0	0,050
17,8	0,064
18,7	0,142
19,3	0,232
19,8	0,321
20,2	0,409
20,4	0,476
20,7	0,553
20,9	0,644
21,1	0,755
21,4	0,902
21,6	1,271
21,9	2,559



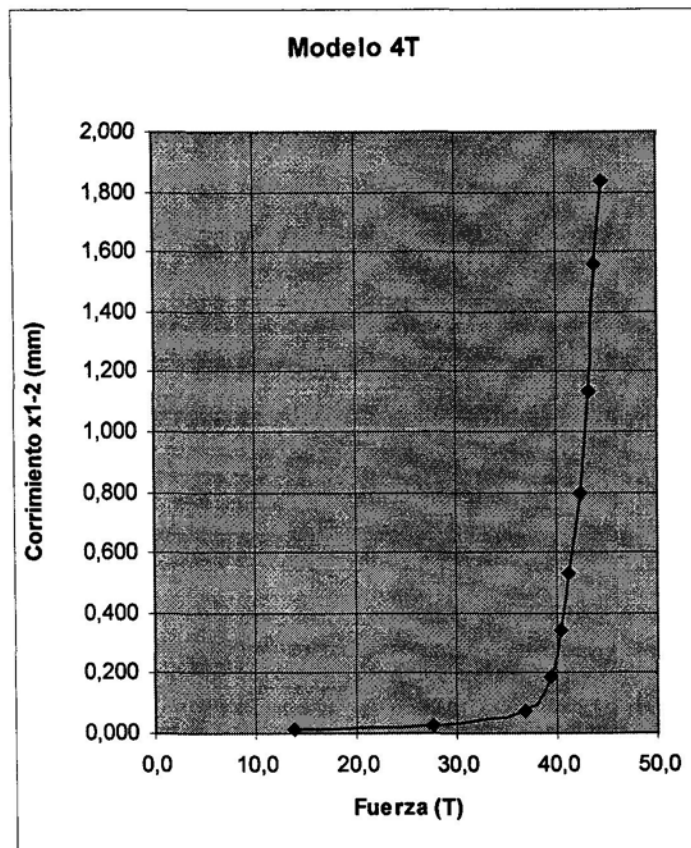
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
13,8	0,010
27,5	0,030
36,8	0,075
39,3	0,222
40,4	0,442
41,1	0,583
42,5	0,811
43,2	1,212
43,8	1,473
44,5	1,946



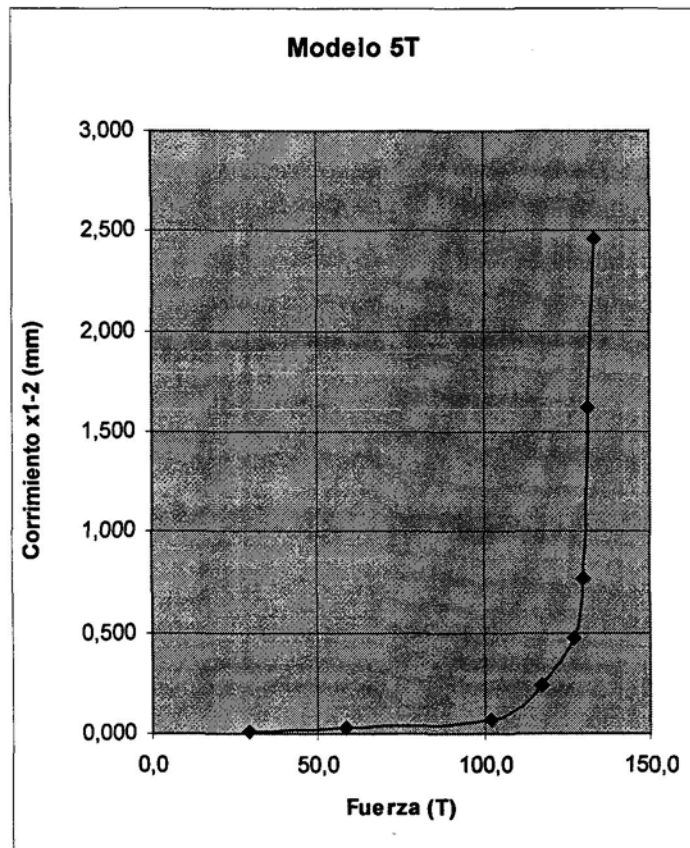
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
13,8	0,012
27,5	0,027
36,8	0,069
39,3	0,184
40,4	0,334
41,1	0,521
42,5	0,763
43,2	1,040
43,8	1,232
44,5	1,385
45,2	1,726



Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
13,8	0,012
27,5	0,029
36,8	0,072
39,3	0,188
40,4	0,342
41,1	0,536
42,5	0,795
43,2	1,134
43,8	1,562
44,5	1,839

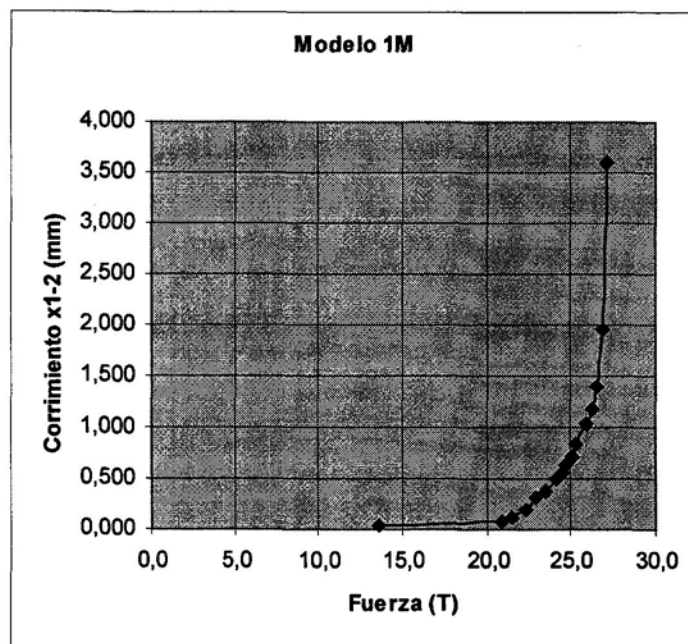


Fuerza (T)	Corrimiento
	$\Delta x_{1-2}$ (mm)
29,2	0,012
58,3	0,029
102,1	0,072
117,0	0,245
126,8	0,478
129,9	0,769
131,4	1,623
132,8	2,467

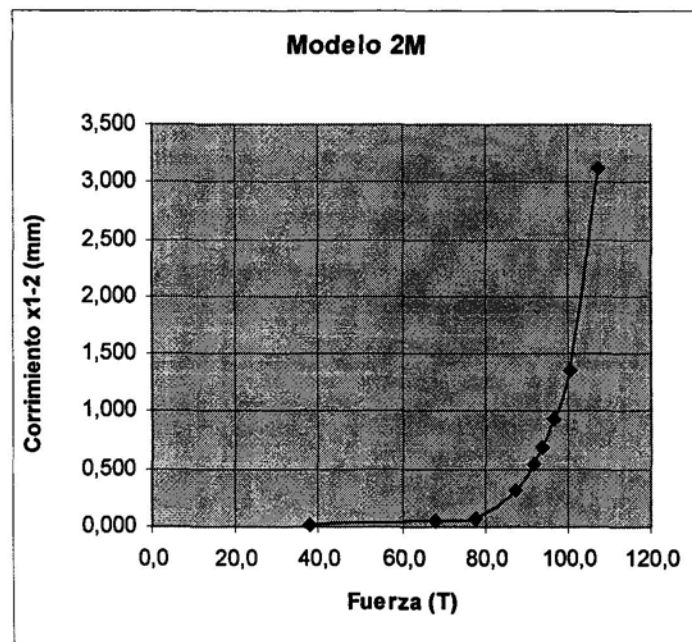




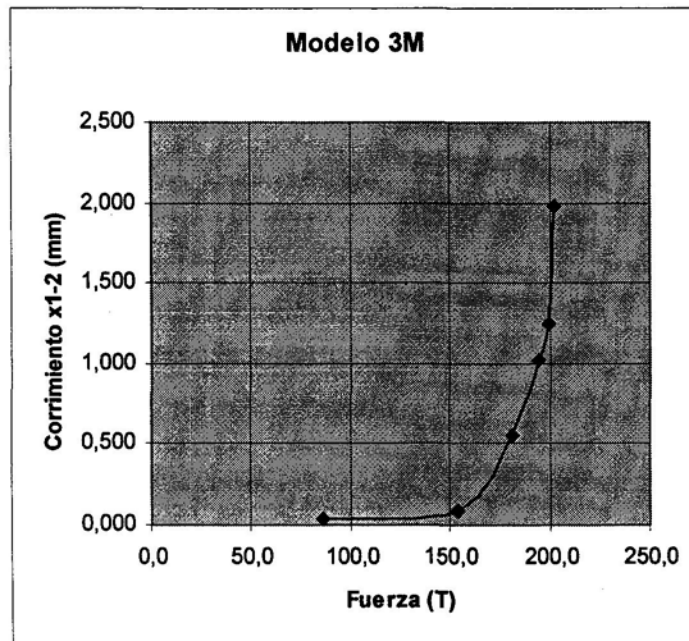
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
13,5	0,031
20,8	0,081
21,4	0,113
22,4	0,200
23,0	0,319
23,6	0,377
24,2	0,495
24,5	0,565
24,8	0,643
25,1	0,730
25,4	0,843
26,0	1,048
26,3	1,189
26,6	1,406
26,9	1,958
27,2	3,595



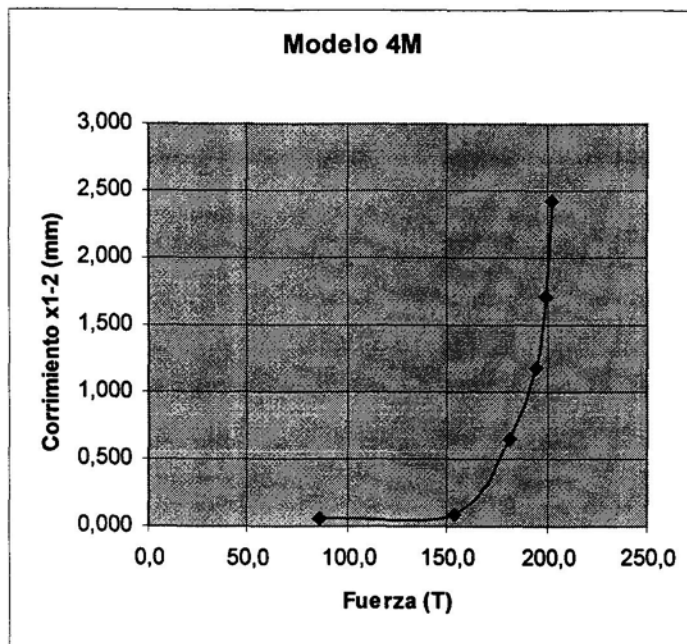
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
38,1	0,022
68,2	0,051
77,7	0,073
87,3	0,311
91,8	0,550
94,0	0,686
96,8	0,932
100,6	1,368
107,2	3,128



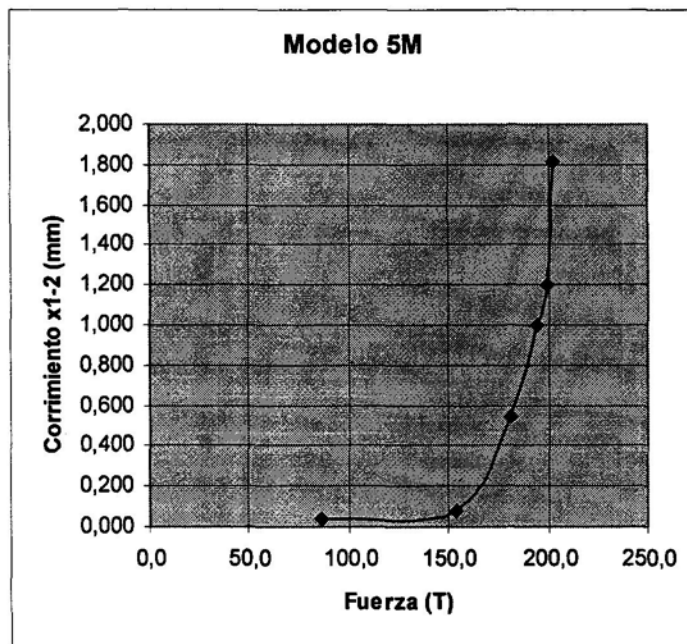
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
85,9	0,043
153,7	0,085
181,1	0,553
194,6	1,028
199,2	1,254
202,4	1,987



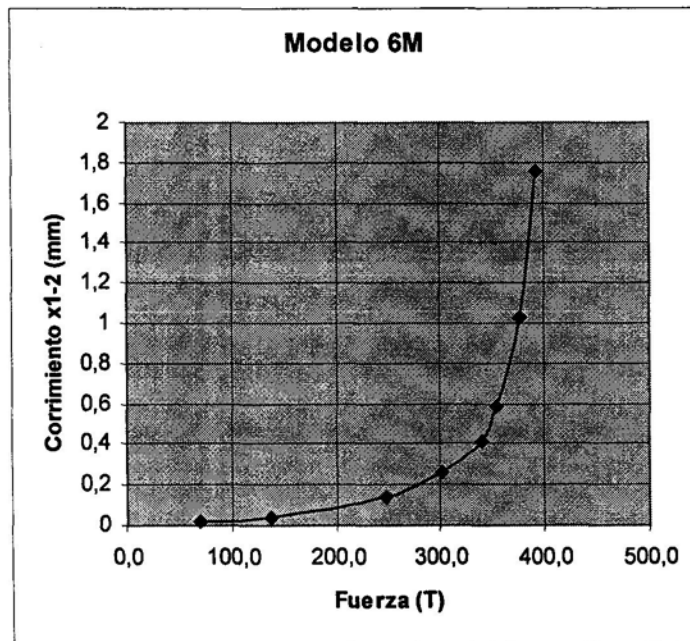
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
85,9	0,056
153,7	0,098
181,1	0,653
194,6	1,186
199,2	1,712
202,4	2,426



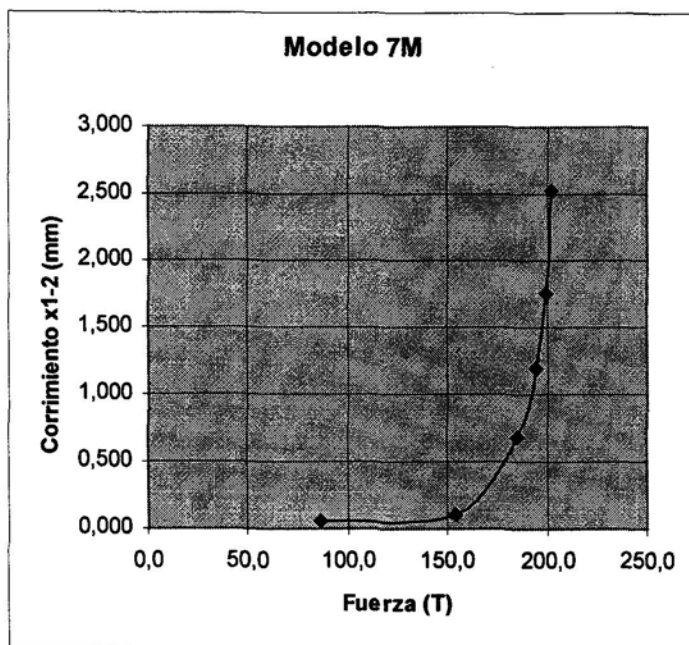
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
85,9	0,041
153,7	0,082
181,1	0,543
194,6	0,998
199,2	1,198
202,4	1,814



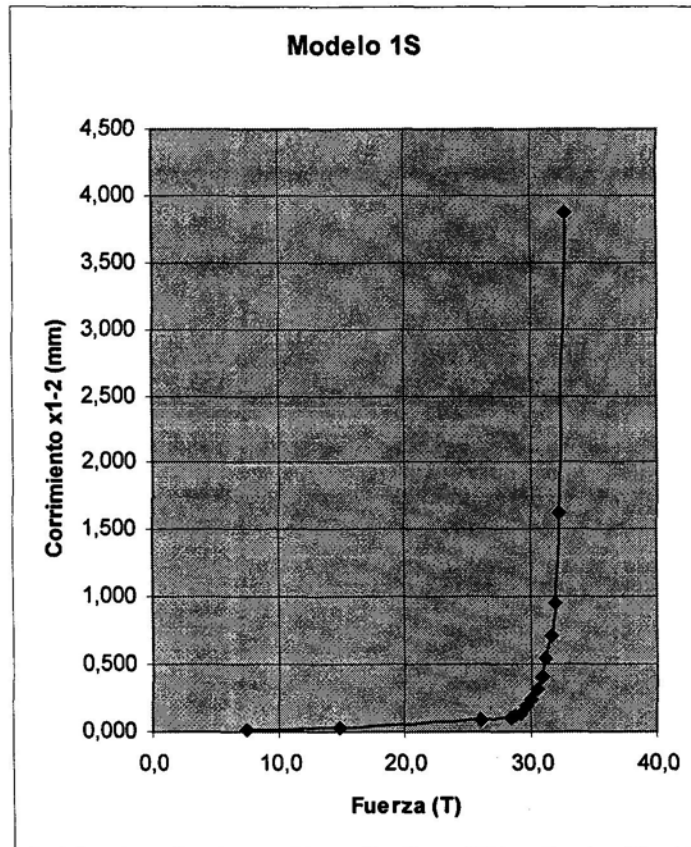
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
68,9	0,023
137,7	0,041
246,5	0,145
300,4	0,263
340,0	0,413
353,6	0,583
377,4	1,030
391,0	1,758



Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
85,9	0,059
153,7	0,103
185,3	0,676
194,6	1,198
199,2	1,756
202,4	2,528

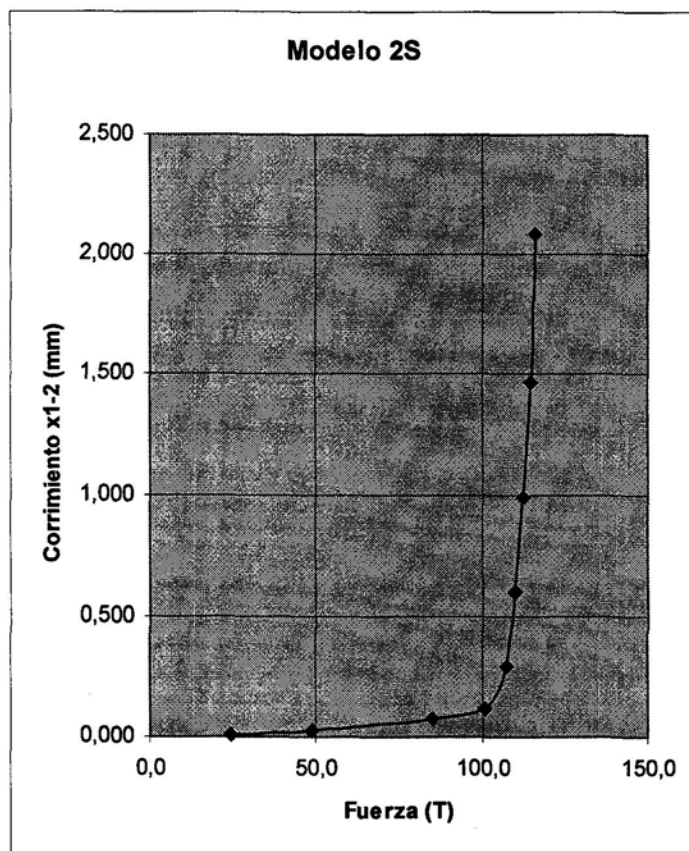


Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
7,5	0,014
14,9	0,034
26,1	0,087
28,5	0,112
28,9	0,121
29,2	0,139
29,8	0,192
30,1	0,246
30,5	0,319
30,9	0,414
31,3	0,541
31,6	0,711
32,0	0,964
32,4	1,620
32,7	3,879

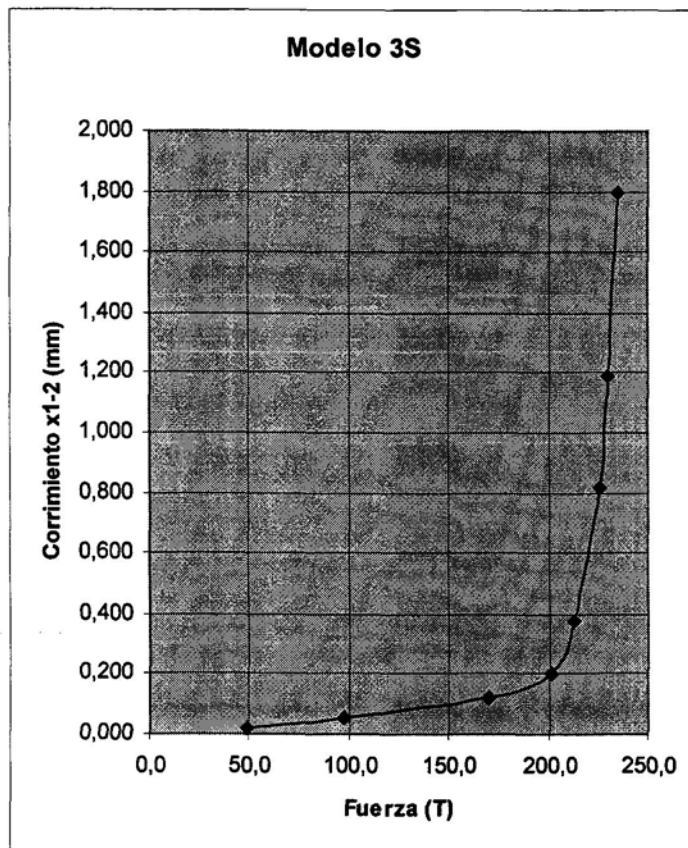




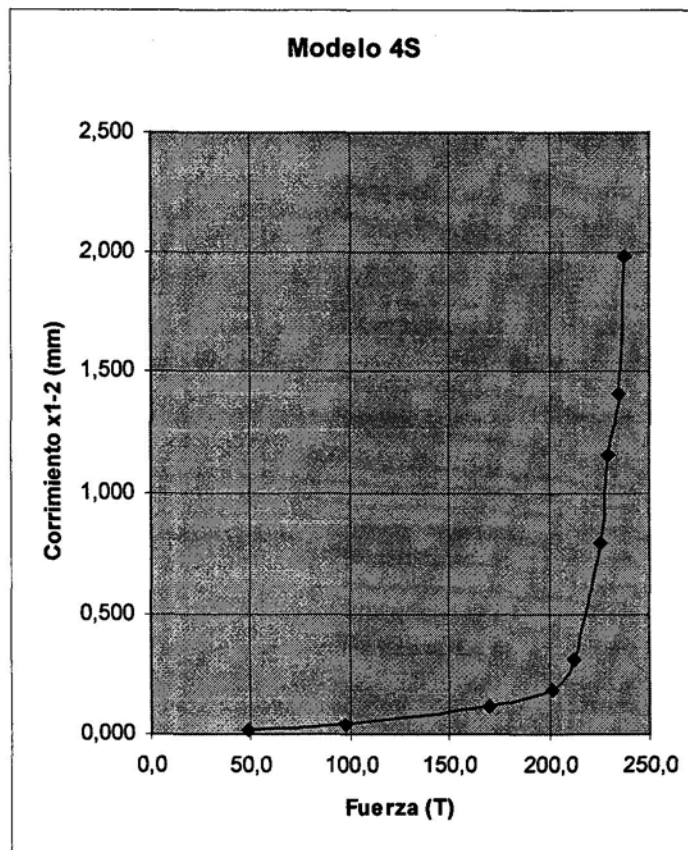
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
24,3	0,011
48,6	0,027
85,1	0,074
100,8	0,118
107,6	0,294
110,0	0,597
112,4	0,987
114,8	1,469
116,0	2,089



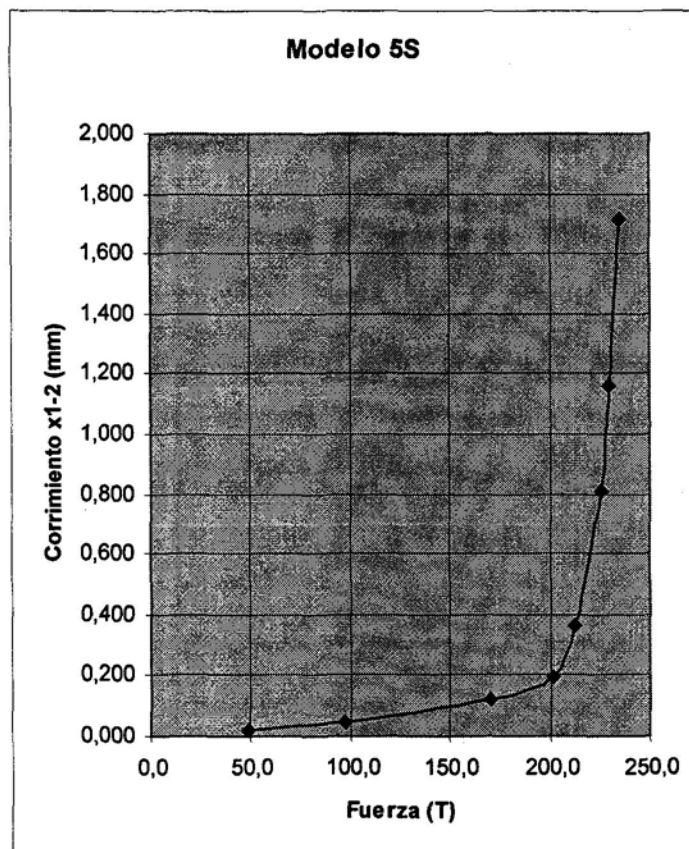
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
48,6	0,021
97,2	0,051
170,1	0,125
201,6	0,202
213,0	0,380
225,4	0,820
230,2	1,189
235,0	1,796



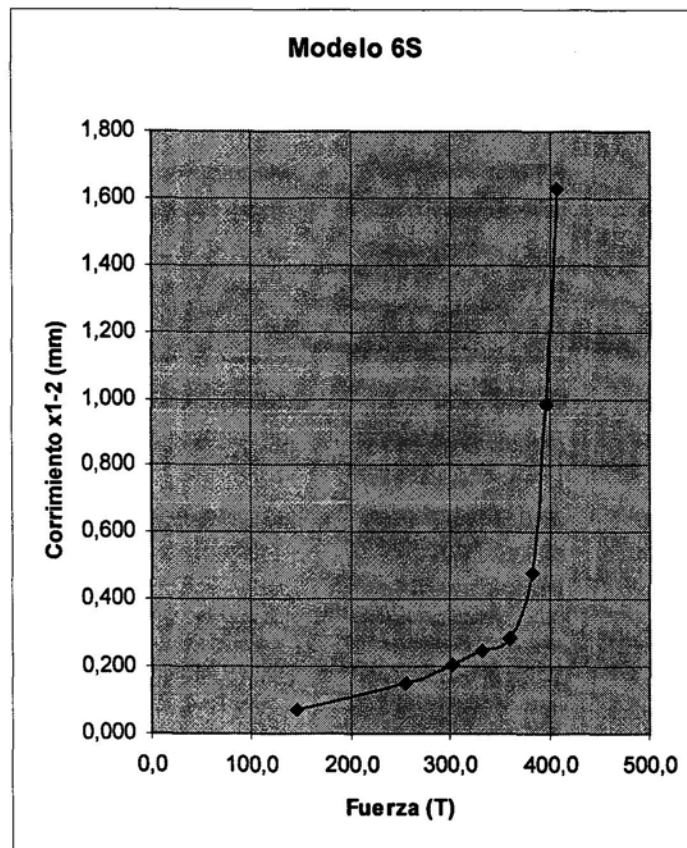
Fuerza (T)	Corrimiento
	$\Delta x_{1-2}$ (mm)
48,6	0,020
97,2	0,046
170,1	0,118
201,6	0,185
213,0	0,312
225,4	0,795
230,2	1,159
235,0	1,413
237,4	1,985



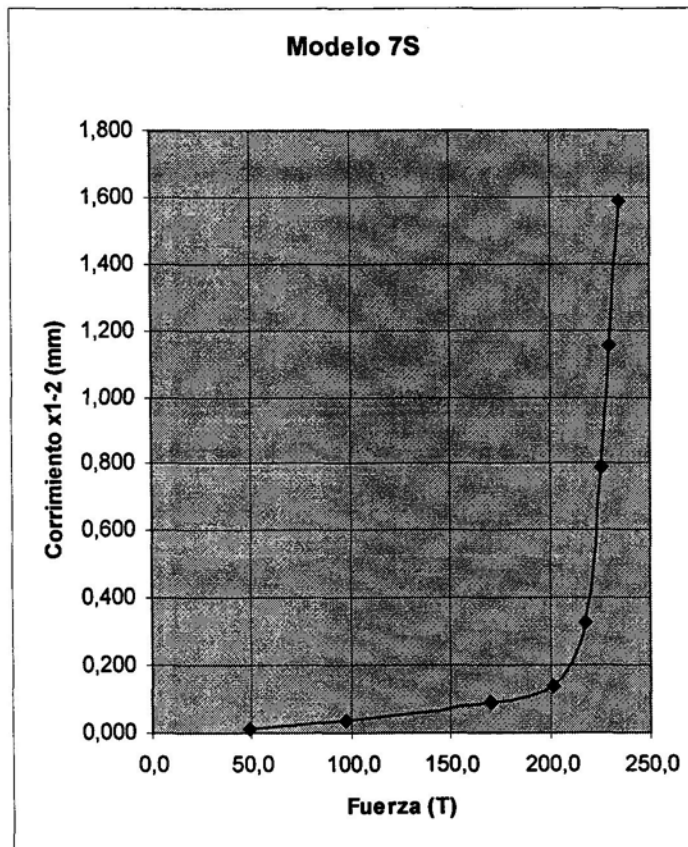
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
48,6	0,020
97,2	0,050
170,1	0,123
201,6	0,198
213,0	0,367
225,4	0,810
230,2	1,165
235,0	1,715



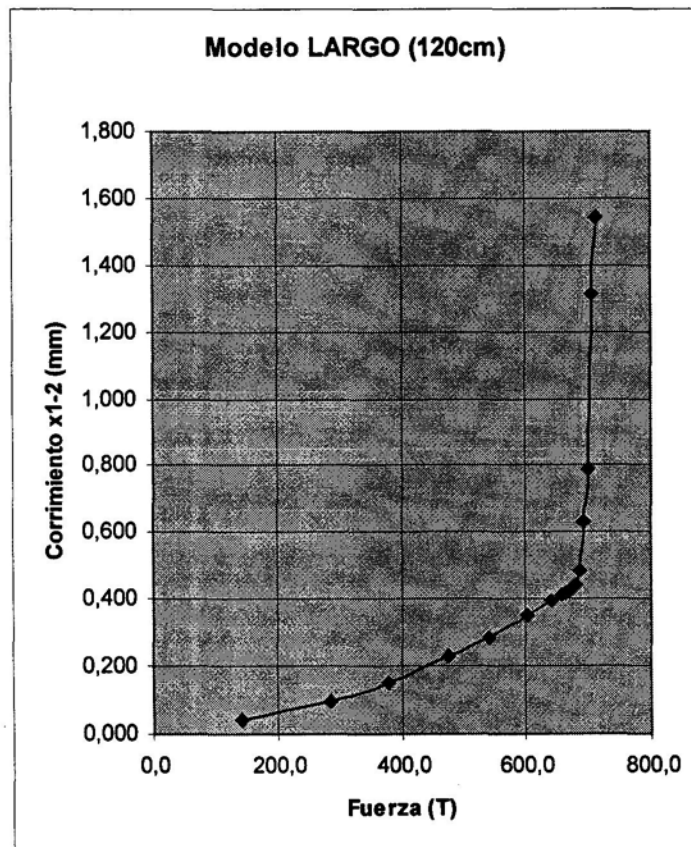
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
145,8	0,071
255,2	0,155
302,3	0,210
331,2	0,248
360,0	0,288
382,3	0,479
396,0	0,984
406,8	1,629



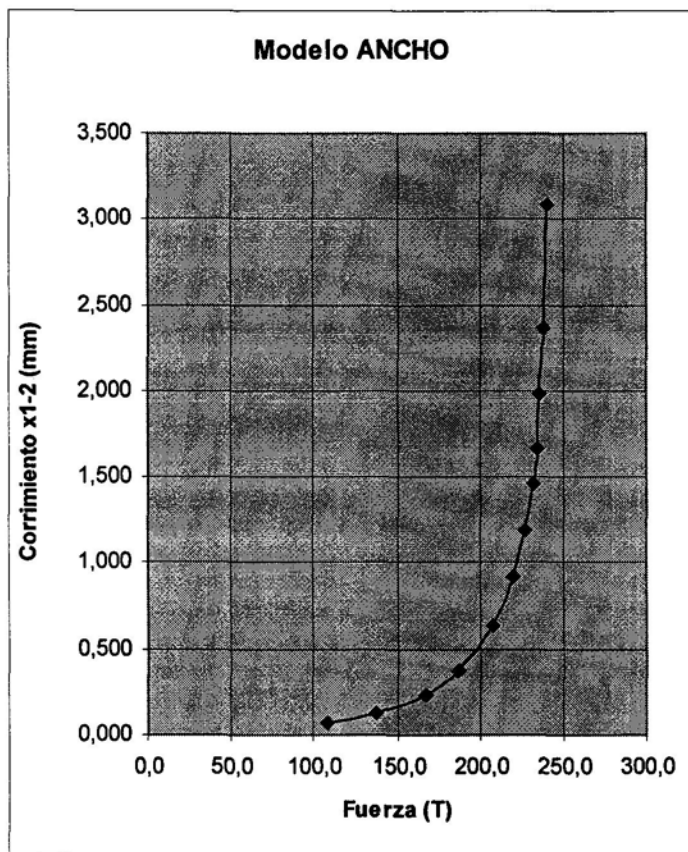
Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
48,6	0,014
97,2	0,036
170,1	0,091
201,6	0,141
217,3	0,331
225,4	0,792
230,2	1,154
235,0	1,587



Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
141,8	0,040
283,5	0,099
379,2	0,154
474,9	0,228
539,4	0,287
604,0	0,352
641,0	0,392
657,6	0,411
664,6	0,419
671,6	0,427
678,6	0,442
685,6	0,487
692,6	0,634
699,6	0,792
706,6	1,315
713,6	1,546



Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
108,0	0,072
137,7	0,128
167,4	0,237
187,4	0,381
207,5	0,640
219,5	0,919
226,9	1,197
231,4	1,466
233,8	1,672
236,2	1,984
238,1	2,370
240,0	3,090





En la siguiente tabla se resumen las cargas de rotura de todos los modelos ensayados:

	L (cm)	Garganta a(mm)	b <sub>1</sub> (cm)	b <sub>2</sub> (cm)	t <sub>1</sub> (mm)	t <sub>2</sub> (mm)	F rotura (T)
Modelo 1T	5	3	20	16	35	10	21.6
Modelo 2T	10	3	20	16	35	10	44.0
Modelo 3T	10	3	24	16	35	10	45.1
Modelo 4T	10	3	40	16	35	10	43.8
Modelo 5T	30	3	20	16	35	10	131.2
Modelo 1M	5	4	20	16	40	16	26.8
Modelo 2M	15	4	20	16	40	16	103.8
Modelo 3M	30	4	20	16	40	40	200.9
Modelo 4M	30	4	30	16	40	40	198.7
Modelo 5M	30	4	40	16	40	40	201.3
Modelo 6M	60	4	20	16	60	40	384.0
Modelo 7M	30	4	50	46	40	20	198.3
Modelo 1S	5	4	20	16	40	16	34.0
Modelo 2S	15	4	20	16	40	16	115.0
Modelo 3S	30	4	20	16	40	40	233.1
Modelo 4S	30	4	30	16	40	40	235.3
Modelo 5S	30	4	40	16	40	40	233.7
Modelo 6S	60	4	20	16	60	40	405.0
Modelo 7S	30	4	50	46	40	20	234.3
Modelo LARGO	120	4	20	16	60	40	712.0
Modelo ANCHO	30	4	200	196	40	20	231.4

## **5. ESTUDIO EXPERIMENTAL.**

Con vistas a contrastar los resultados obtenidos mediante el estudio teórico se han realizado dos campañas de ensayos de laboratorio.

La primera campaña de ensayos se realizó en Septiembre de 1998, ensayando a tracción 5 probetas. Como veremos a continuación, las limitaciones que presentaba la prensa a tracción hizo necesario ampliar el número de ensayos, con una segunda campaña.

La segunda campaña se realizó entre Noviembre y Diciembre de 1999, ensayando 14 probetas, pero esta vez a compresión.

### **5.1. DESCRIPCIÓN DE LAS DOS CAMPAÑAS DE ENSAYOS REALIZADAS.**

#### **5.1.1. Campaña de Septiembre de 1998. Ensayos a tracción.**

##### **5.1.1.1. Introducción. Características de la prensa empleada.**

Los 5 ensayos a tracción se han realizado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Para los ensayos se ha empleado una prensa de tracción, que presenta una capacidad máxima de 200 Tn. La prensa se puede observar en el Anejo Fotográfico.

El empleo de esta prensa condicionaba la realización de los ensayos en dos sentidos:

1.- La máxima luz libre entre mordazas con la prensa completamente extendida es de 1300 mm. Este hecho limita la longitud de la probeta a ensayar, longitud que no debe ser superior a los 1250 mm. aproximadamente, ya que deben dejarse al menos 50 mm. para permitir que la probeta desarrolle toda su deformación durante el ensayo.

2.- La máxima fuerza que puede aplicar la prensa es de 200 Tn. Este tope también limita las características de los cordones a ensayar. Obsérvese que la fuerza de tracción que transmite la prensa se reparte entre los 4 cordones que une cada chapa central con las chapas extremas. Para poder romper los cordones se debía jugar por tanto con tres factores que son proporcionales a la resistencia a la rotura:

- la longitud del cordón
- el espesor de garganta del cordón
- la calidad del electrodo empleado

Se trató de conjugar estas tres variables con objeto de poder romper las probetas con la máxima longitud posible de cordón.

#### **5.1.1.2. Fabricación, calidades de los materiales y características geométricas de las probetas.**

##### **A) Fabricación de las probetas.**

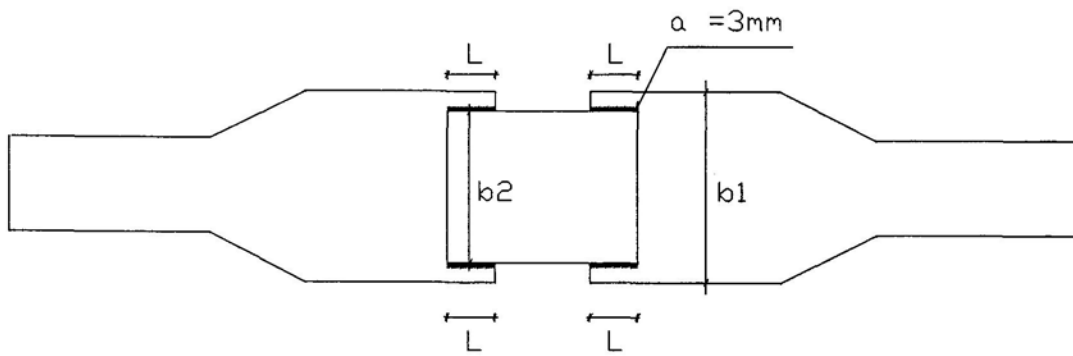
El montaje de las probetas se realizó en los talleres que la empresa MEGUSA (Metalúrgica del Guadalquivir S.A.) posee en Sevilla. Dicho taller cuenta con una amplia experiencia en el montaje y soldadura de estructuras metálicas, fundamentalmente para Obra Civil.

Las probetas constan de 4 chapas, dos centrales por cuyos extremos las mordazas de la prensa aplican la fuerza de tracción, y dos chapas exteriores. Cada chapa central se encuentra soldada a solape mediante dos cordones a cada una de las chapas laterales. Por tanto el número total de cordones presentes en la unión es de 8.

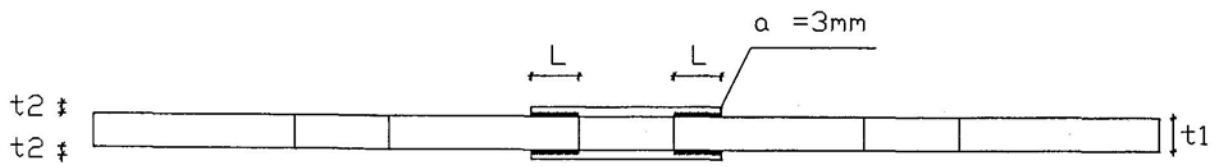
En la siguiente figura se observa en planta y alzado la geometría tipo de la unión ensayada, siendo:

- L: longitud del cordón
- a: espesor de garganta del cordón (3mm).
- $b_1$ : anchura de la chapa central
- $b_2$ : anchura de las chapas exteriores

- $t_1$ : espesor de la chapa central
- $t_2$ : espesor de las chapas exteriores



PLANTA



ALZADO

**B) Calidades de los materiales.**

Los materiales empleados en la fabricación de las probetas han sido los siguientes:

- Las chapas que componen las probetas se han realizado con acero laminado A-52b de límite elástico 3.600 kp/cm<sup>2</sup> y límite de rotura 5.200 kp/cm<sup>2</sup>.
- El electrodo empleado es un Supra Mig SG-2 de la casa Lincoln Electric. Presenta un límite elástico de 5.090 kg/cm<sup>2</sup> y un límite de rotura de 5.740 kg/cm<sup>2</sup>, alcanzando una deformación en rotura del 26%. El espesor de garganta empleado es de 3 mm.

En el Anejo nº1 se presenta el certificado del material de aportación empleado en la fabricación de las probetas.

**C) Descripción de las probetas ensayadas.**

La geometría que presentan cada una de las 5 probetas objeto de ensayo se han elegido jugando con las dimensiones de anchura de chapas y longitud de cordón.

De este modo las 5 probetas son las siguientes:

**Probeta nº 1:**

- Longitud del cordón: 5 cm.
- Anchura de las chapas centrales:  $b_1 = 20$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

**Probeta nº 2:**

- Longitud del cordón: 10 cm.
- Anchura de las chapas centrales:  $b_1 = 20$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

Probeta n° 3:

- Longitud del cordón: 10 cm.
- Anchura de las chapas centrales:  $b_1 = 24$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

Probeta n° 4:

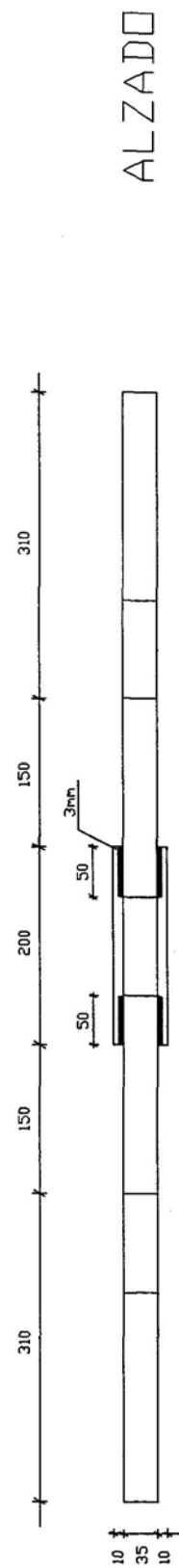
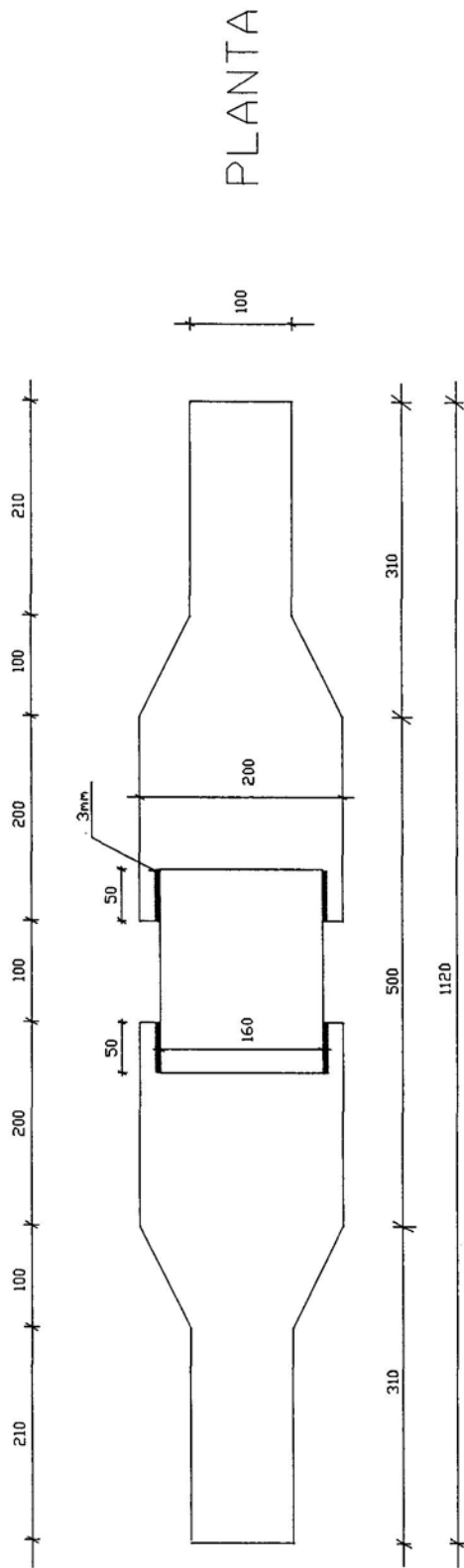
- Longitud del cordón: 10 cm.
- Anchura de las chapas centrales:  $b_1 = 40$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

Probeta n° 5:

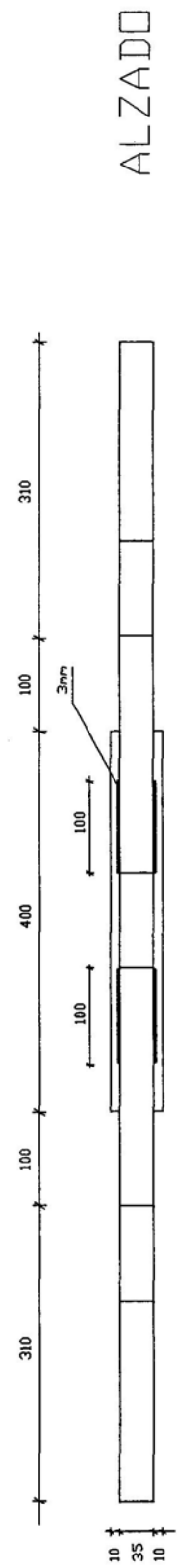
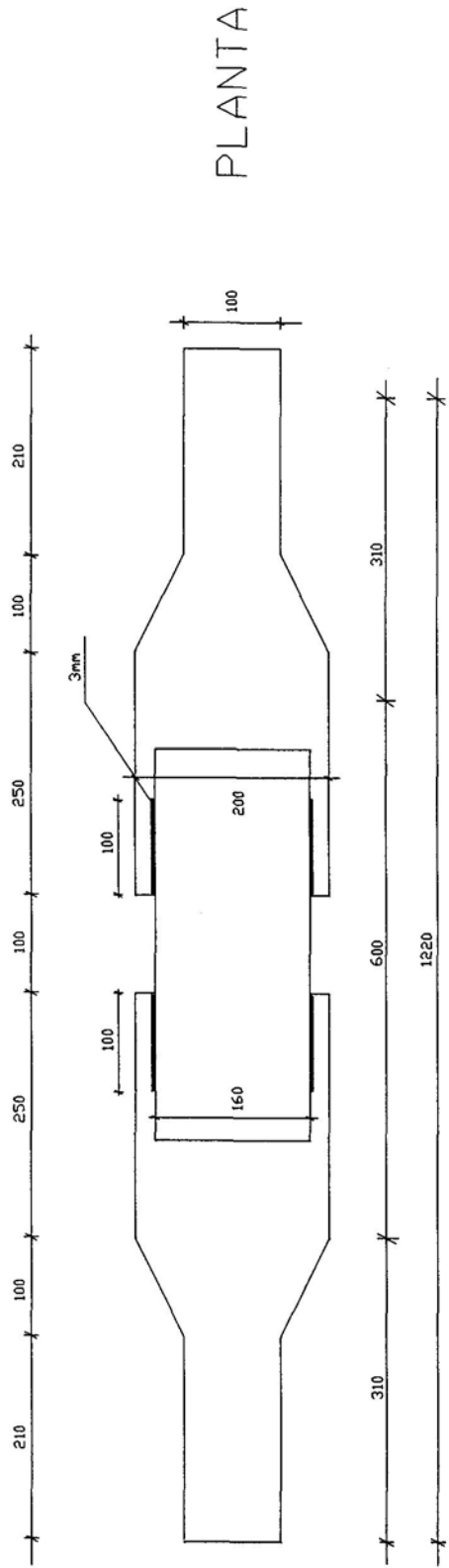
- Longitud del cordón: 30 cm.
- Anchura de las chapas centrales:  $b_1 = 20$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

En las siguientes páginas se observa la geometría completa de las 5 probetas objeto de ensayo.

En el Anejo Fotográfico se pueden observar igualmente todas las probetas (Fotografías n° 2 a 14).

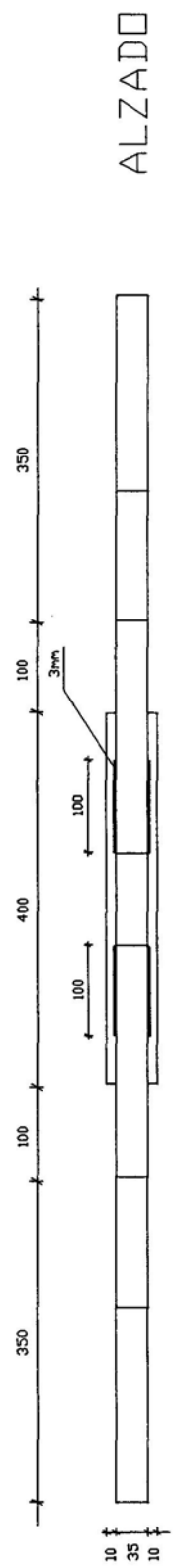
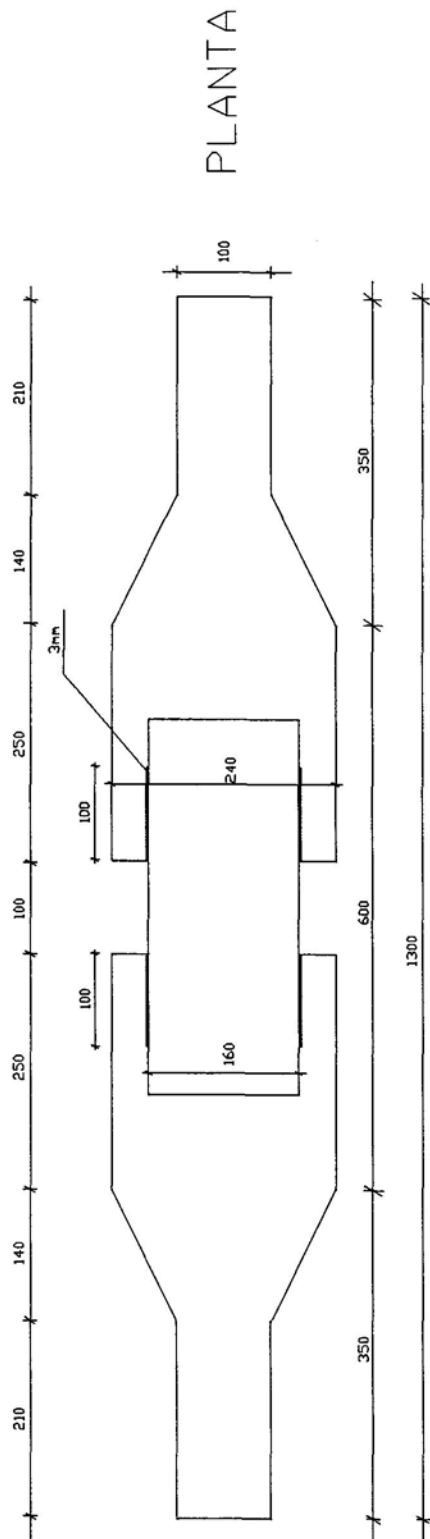


MODELO 1T

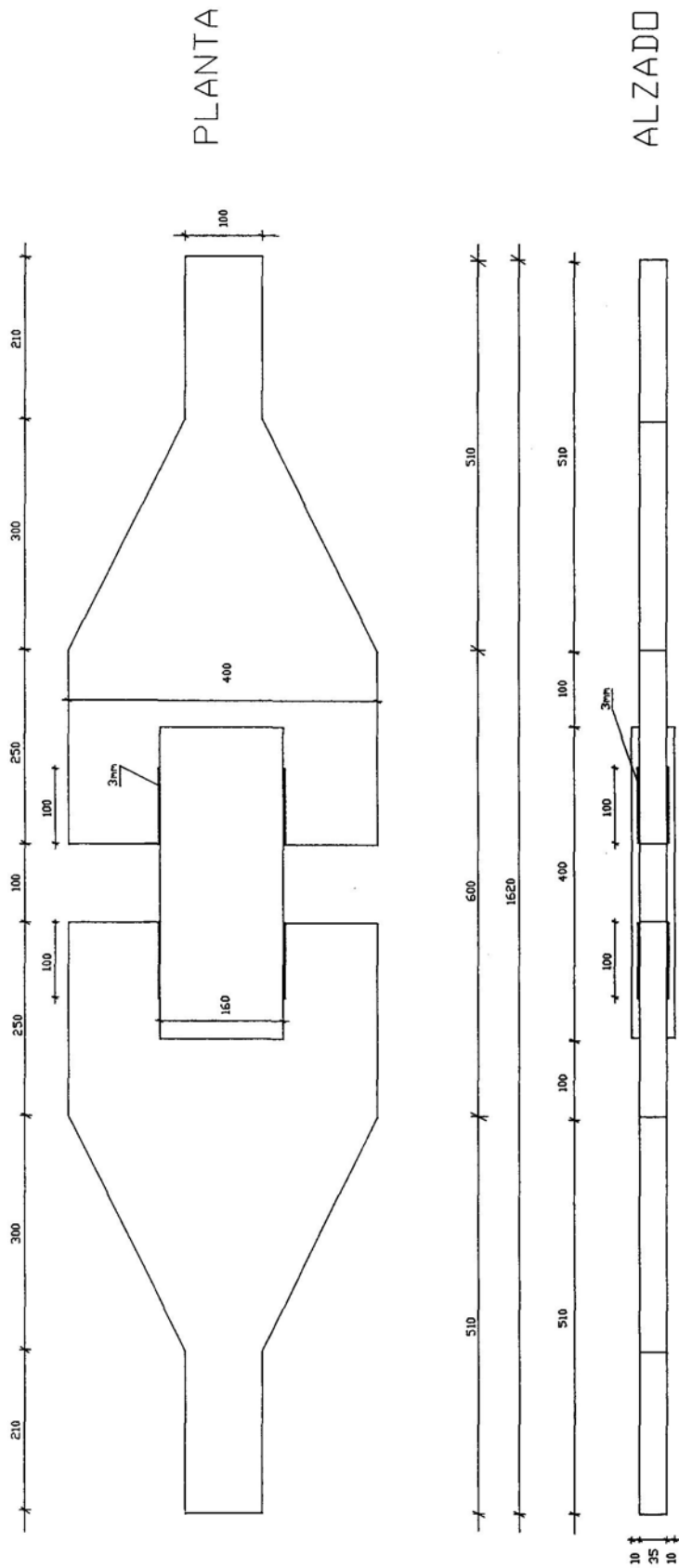


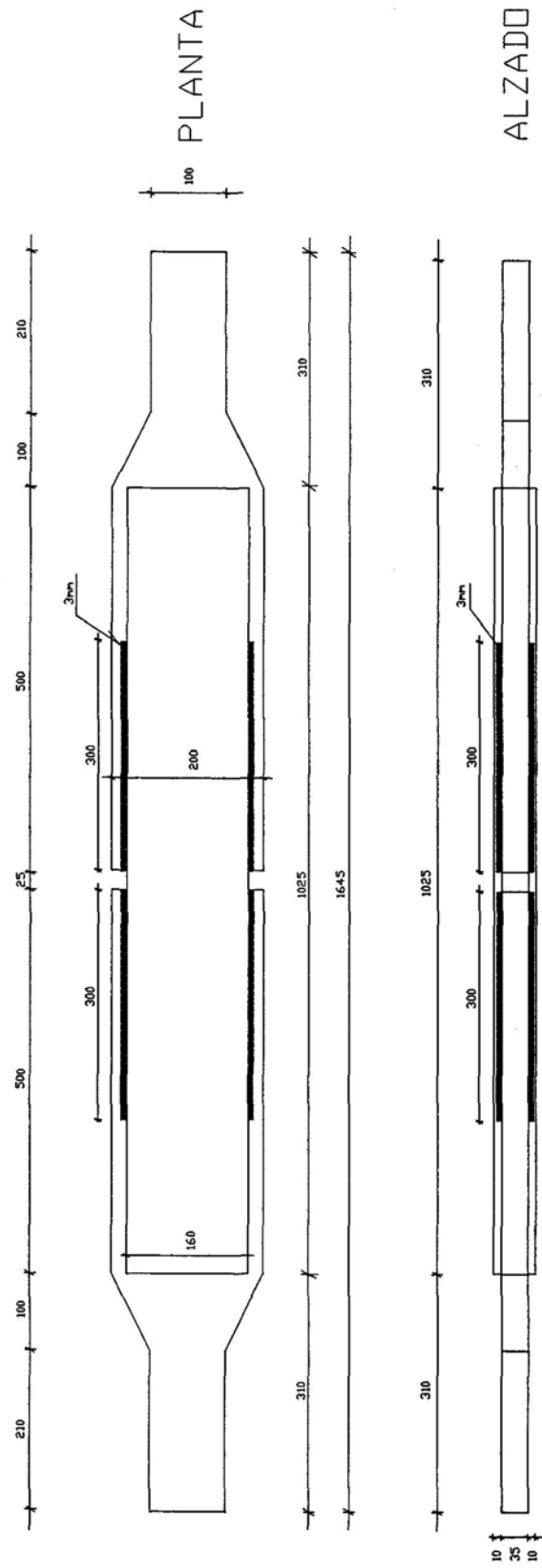
MODELO 2T





MODELO 3T





**5.1.1.3. Instrumentación de las 5 probetas ensayadas a tracción.**

Las 5 probetas ensayadas a tracción se han instrumentado mediante galgas extensométricas, distribuidas uniformemente en las probetas ensayadas al objeto de determinar, a través de las deformaciones de estas galgas, la distribución de tensiones en las chapas. En el Anejo nº4 se muestra la instrumentación realizada en cada probeta, así como todas las deformaciones registradas en los ensayos de las 5 probetas.

**5.1.1.4. Ejecución de los ensayos.**

Los ensayos a tracción de las 5 probetas se han realizado aplicando la carga de forma escalonada hasta la rotura de la probeta. El incremento de carga en cada escalón se fue adaptando al desarrollo del ensayo, disminuyendo el incremento de carga a medida que el ensayo se acercaba a la rotura teórica de la probeta. En cada uno de los escalones de carga se hizo lectura de las galgas extensométricas.

**5.1.1.5. Resultados de los ensayos.**

En el Anejo nº4 se presentan cada uno de los 5 ensayos realizados, con todos los escalones de carga llevados a cabo y las medidas de deformaciones obtenidas en las galgas extensométricas para cada escalón de carga.

La rotura se produjo en 4 de las 5 probetas ensayadas. La probeta nº5, que es la que tenía cordones más largos ( $L = 30$  cm.) no llegó a romper, alcanzando la prensa de tracción una fuerza máxima de 162 toneladas.

Las cargas de rotura en las probetas fueron las siguientes:

PROBETA ENSAYADA	CARGA DE ROTURA (Tn)
PROBETA Nº1	33.92
PROBETA Nº2	68.90
PROBETA Nº3	70.88
PROBETA Nº4	71.47
PROBETA Nº5	NO ROMPIÓ

### 5.1.2. Campaña de Noviembre-Diciembre de 1999. Ensayos a compresión.

La segunda campaña de ensayos se realizó entre Noviembre y Diciembre de 1999, ensayándose a compresión 14 probetas.

#### **5.1.2.1. Introducción. Características de la prensa empleada.**

Los 14 ensayos a compresión se han realizado en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Para los ensayos se ha empleado una prensa de compresión marca AMSLER, con una capacidad máxima de 500 Tn. En el Anejo Fotográfico se puede observar la prensa empleada.

En esta segunda campaña se empleó una prensa a compresión con objeto de poder ensayar cordones de longitudes mayores. Como se comentó en el apartado anterior, la prensa de tracción de 200 T empleada en la primera campaña obligaba, si queríamos llegar a romper cordones largos, a adoptar varias medidas:

- Realizar cordones con espesores de garganta bastante menores.
- Emplear electrodos de peores calidades (es decir, con un límite elástico y un límite de rotura menores).

Ninguna de estas dos opciones es buena, por los siguientes motivos:

- tecnológicamente no es factible soldar cordones de menos de 3 mm. de espesor ya que el acabado que se consigue con espesores tan pequeños no es satisfactorio. Se podría pensar en soldar con mayor espesor de garganta y después mecanizar el cordón con una fresa para obtener el espesor deseado (1-2mm). Pero aún así, las irregularidades que presenta al soldar el cordón en la arista que une ambas chapas se harían mucho más patentes para un cordón de espesor tan pequeño.

- el emplear electrodos de menor calidad tampoco es posible, ya que no se encuentran en el mercado electrodos con límites elásticos menores a los 4.000 kp/cm<sup>2</sup>. Además, se optó por utilizar electrodos con calidades similares a las que se emplean usualmente en Obra Civil y Edificación para que la presente investigación tuviese más representatividad.

Por tanto optamos por emplear una prensa de compresión que nos diese una fuerza suficiente como para romper cordones largos, empleando electrodos de calidades convencionales y espesores de garganta factibles de soldar. La garganta elegida para los cordones a ensayar fue de 4 mm.

El emplear una prensa de compresión a la hora de realizar los ensayos tiene el problema del pandeo. En un ensayo a compresión la trayectoria de tensiones entre ambas chapas se realiza del mismo modo que en un ensayo a tracción, ya que la única diferencia es el signo de las fuerzas aplicadas al modelo; no obstante, al tratarse de una unión sometida a compresión, el fenómeno del pandeo afectará a las chapas que forman la unión. Para no tener problemas de pandeo se dispusieron unos rigidizadores longitudinales en las chapas que forman la unión.

#### **5.1.2.2. Fabricación, calidades de los materiales y características geométricas de las probetas.**

##### **A) Fabricación de las probetas.**

El montaje de las probetas se realizó en la Empresa Romero Puerto, situada en la localidad de Puerto Real (Cádiz). Dicho taller cuenta igualmente con una amplia experiencia en el montaje y soldadura de estructuras metálicas, fundamentalmente para Obra Civil. Los materiales que forman las probetas (chapas y electrodos) han sido aportados por la empresa constructora Dragados Offshore, desde su central situada en Puerto Real (Cádiz).

El hecho de ensayar a compresión esta segunda campaña de probetas obliga a adoptar una geometría distinta para las mismas, por dos motivos:

- Por un lado una prensa de compresión no posee mordazas como una de tracción; la carga se aplica a través de unos platos. Esto simplifica el

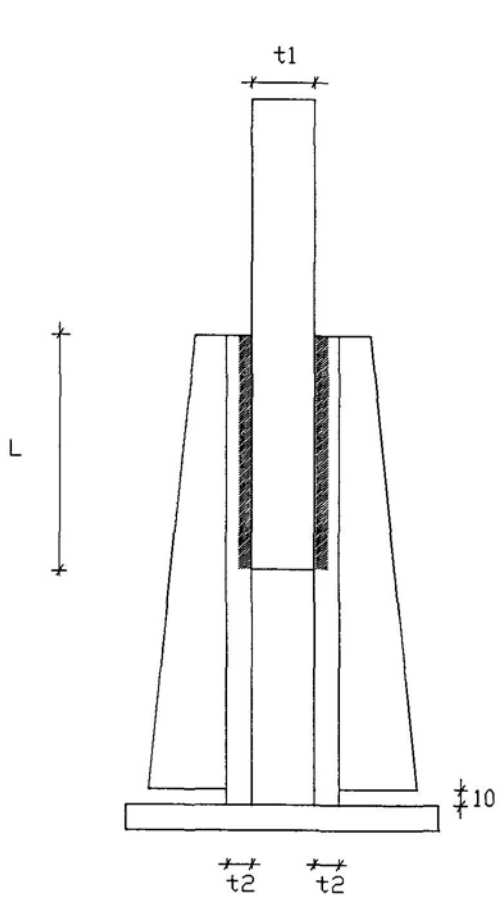
modelo, pues podemos conseguir la transmisión de una carga centrada únicamente con tres chapas: una central en cuyo extremo se aplica uno de los platos de la prensa, y dos chapas exteriores en cuyos extremos se aplica el otro plato de la prensa. Además se reduce el número de cordones a la mitad, pues tendremos dos cordones uniendo a solape la chapa central con cada una de las chapas exteriores: 4 cordones en total. No obstante, los extremos de las dos chapas exteriores se han soldado a una placa base, que es la que recibe directamente la fuerza del plato móvil, con objeto de garantizar que el reparto de carga entre las dos chapas exteriores se haga a partes iguales. Para garantizar aún más un reparto de carga homogéneo, la reacción del plato fijo en su contacto con la chapa central se realiza mediante una banda de neopreno.

- Como hemos comentado antes, el posible pandeo de las chapas que forman la unión obliga a disponer unos rigidizadores longitudinales en las dos chapas exteriores. La chapa central no tiene riesgo de pandeo al encontrarse rigidizada por los propios cordones de soldadura a ensayar, estando además confinada entre las dos chapas exteriores.

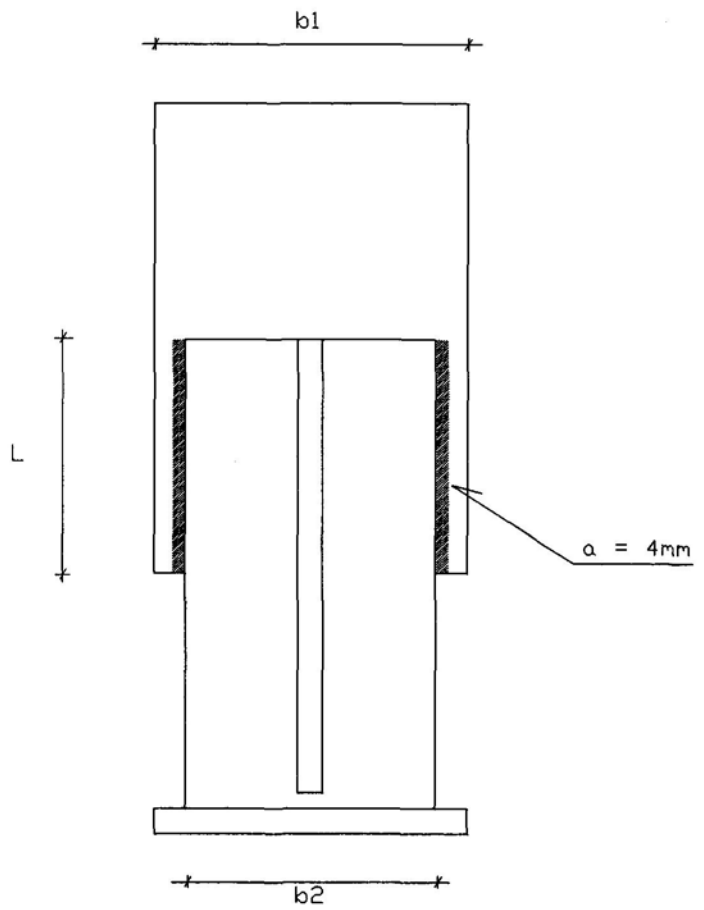
En la siguiente figura se observa un alzado y una vista lateral de la geometría tipo de la unión ensayada, siendo:

- $L$ : longitud del cordón
- $a$ : espesor de garganta del cordón (4mm).
- $b_1$ : anchura de la chapa central
- $b_2$ : anchura de las chapas exteriores
- $t_1$ : espesor de la chapa central
- $t_2$ : espesor de las chapas exteriores

Como se observa entre los rigidizadores y la placa base se ha dejado una separación de 10 mm., con objeto de que el rigidizador no absorba parte de la carga transmitida de la placa base a las chapas exteriores, pues modificaría la transmisión de tensiones a través de la unión. Nos interesa que los rigidizadores únicamente rigidicen, sin colaborar en la transmisión de la carga hacia el cordón.



ALZADO



VISTA LATERAL



**B) Calidades de los materiales.**

Los materiales empleados en la fabricación de las probetas han sido los siguientes:

- Las chapas que componen las probetas se han realizado con acero A-62 de límite elástico  $4.600 \text{ kp/cm}^2$  y límite de rotura  $6.200 \text{ kp/cm}^2$ , que son las empleadas por la empresa Dragados Offshore en la construcción del Puente de Öresund (Dinamarca); de este modo se garantiza que las chapas no plastifiquen antes que los cordones ante las fuerzas de compresión elevadas que transmitirá la prensa en los ensayos.

- Para el material de aportación que constituye los cordones de soldadura a ensayar se han empleado dos calidades:

- a) En la mitad de las probetas (7 probetas de las 14) se ha empleado un electrodo de peor calidad que los usados convencionalmente, concretamente un O.K.46. Dicho electrodo presenta un límite elástico de  $4.000 \text{ kp/cm}^2$ , un límite de rotura de  $5.200 \text{ kp/cm}^2$  y una deformación en rotura del 28 %.
- b) En la otra mitad de las probetas, se ha utilizado un electrodo empleado por la Empresa Dragados Off Shore en las soldaduras de la celosía metálica del Puente de Öresund (Dinamarca). Dicho electrodo es el Outersshield 81K2-H, de la casa Lincoln Electric. Presenta un límite elástico de  $6.300 \text{ kg/cm}^2$ , siendo su límite de rotura de  $6.660 \text{ kg/cm}^2$  alcanzando una deformación en rotura del 32%.

En el Anejo nº1 se presentan los certificados de conformidad de las chapas y de los dos tipos de material de aportación empleados en la fabricación de las probetas.

C) Características geométricas de las probetas.

La geometría que presentan cada una de las 14 probetas objeto de ensayo se han elegido, al igual que en los modelos ensayados a tracción, variando las dimensiones de anchura de chapas y longitud de cordón.

A continuación se presenta la geometría de las 14 probetas. Realmente hay sólo 7 geometrías distintas ya que los modelos se repiten dos a dos, cambiando únicamente la calidad de los electrodos de los cordones a ensayar.

Probeta nº 1:

- Longitud del cordón:  $L = 5$  cm.
- Anchura de la chapa central:  $b_1 = 20$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

Probeta nº 2:

- Longitud del cordón:  $L = 15$  cm.
- Anchura de la chapa central:  $b_1 = 20$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

Probeta nº 3:

- Longitud del cordón:  $L = 30$  cm.
- Anchura de la chapa central:  $b_1 = 20$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

Probeta nº 4:

- Longitud del cordón:  $L = 30$  cm.
- Anchura de la chapa central:  $b_1 = 30$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

Probeta nº 5:

- Longitud del cordón:  $L = 30$  cm.
- Anchura de la chapa central:  $b_1 = 40$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

Probeta nº 6:

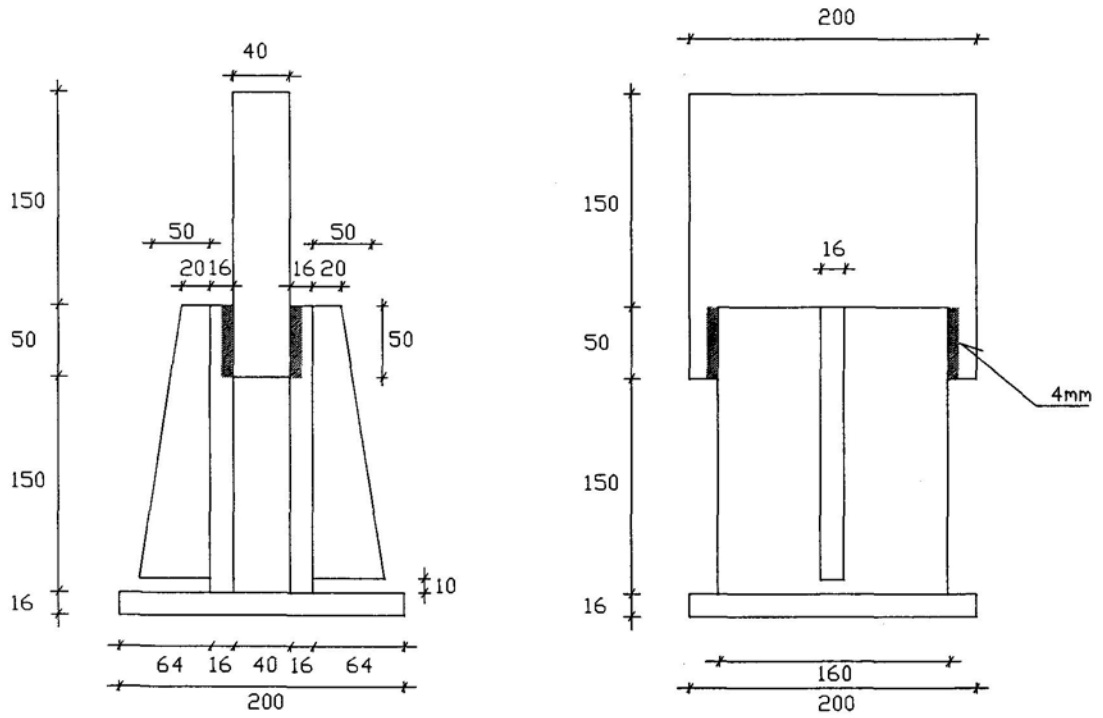
- Longitud del cordón:  $L = 60$  cm.
- Anchura de la chapa central:  $b_1 = 20$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 16$  cm.

Probeta nº 7:

- Longitud del cordón:  $L = 30$  cm.
- Anchura de la chapa central:  $b_1 = 50$  cm.
- Anchura de chapas exteriores:  $b_2 = 46$  cm.

En las siguientes páginas se observa la geometría completa de las 14 probetas objeto de ensayo.

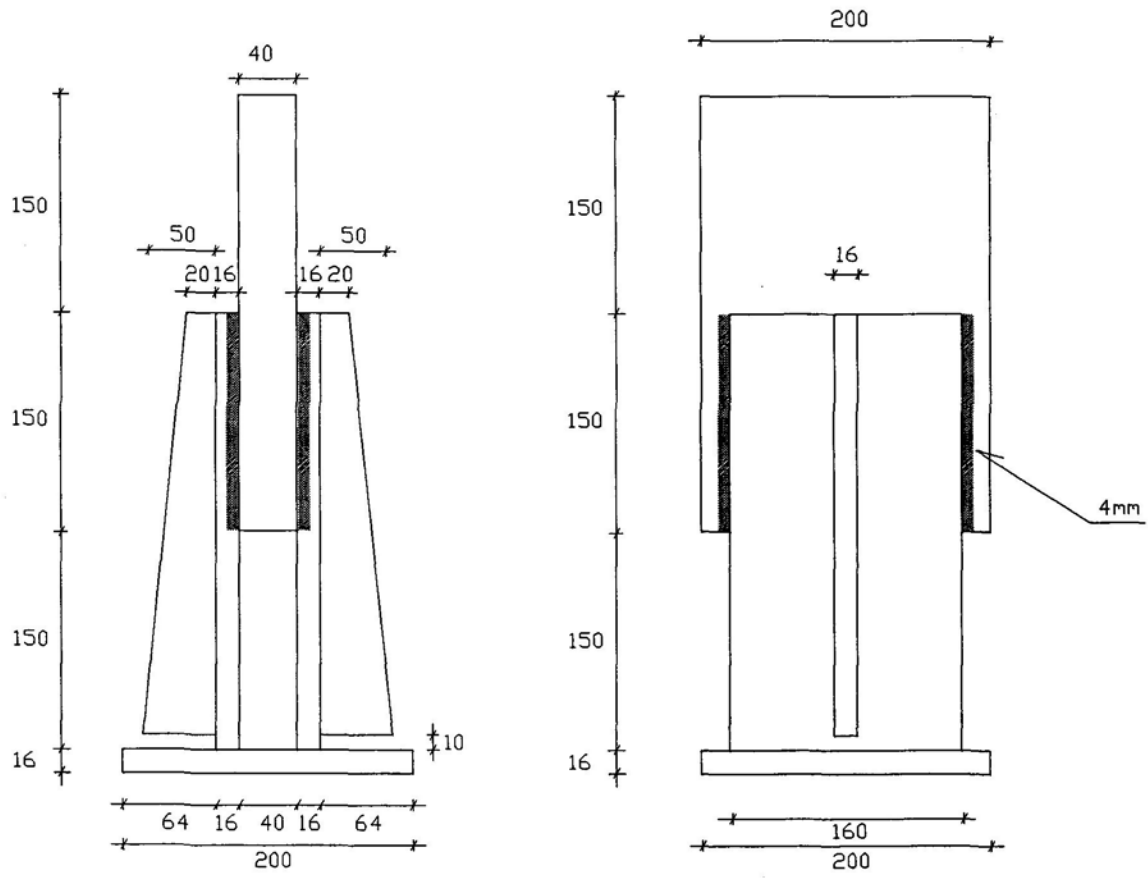
En el Anejo Fotográfico se pueden observar igualmente todas las probetas (fotografías nº 17 a 43).



ALZADO

VISTA LATERAL

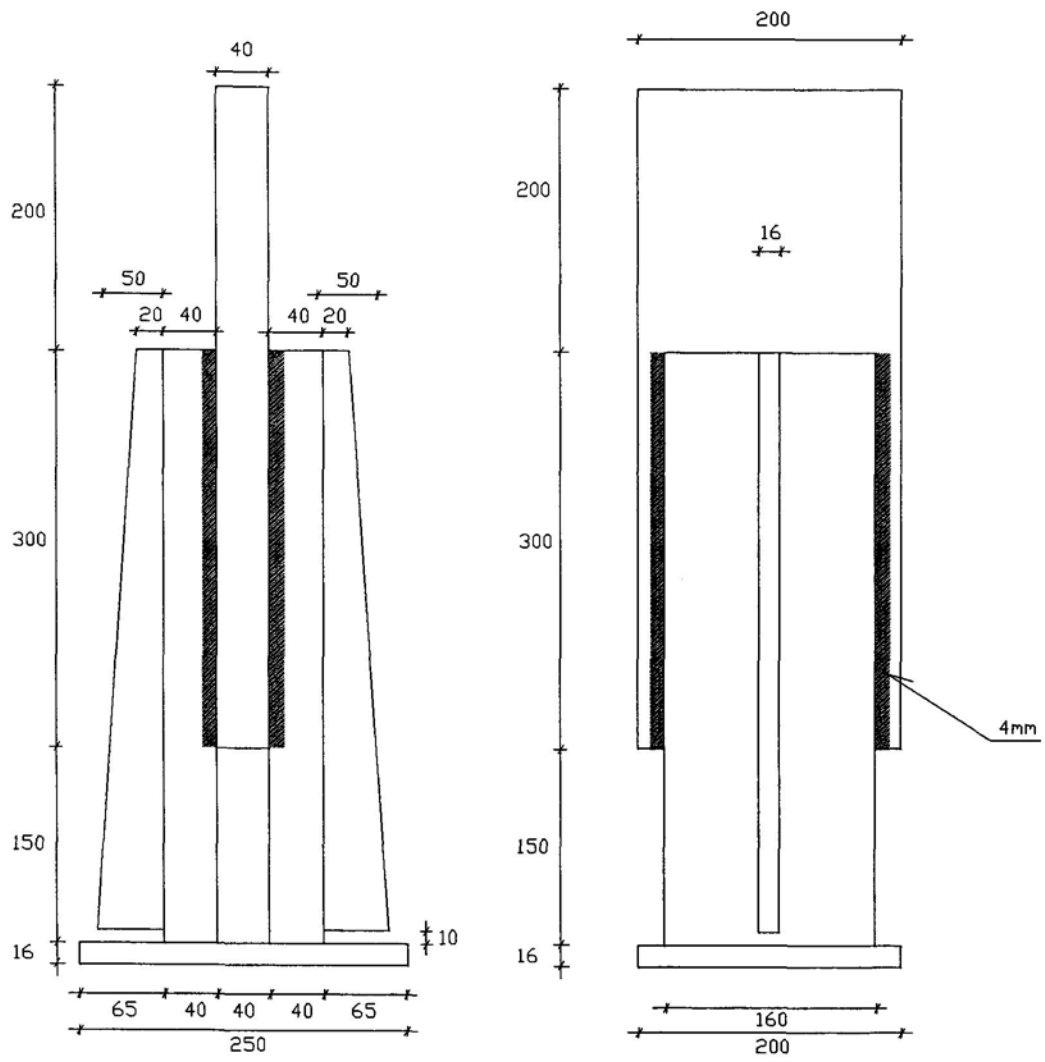
PROBETA 1M-1S



ALZADO

VISTA LATERAL

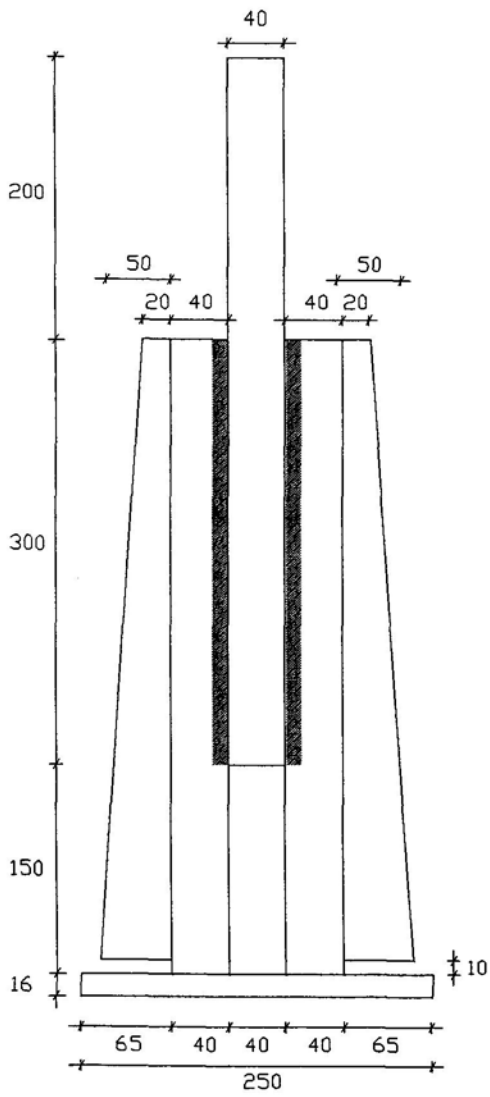
PROBETA 2M-2S



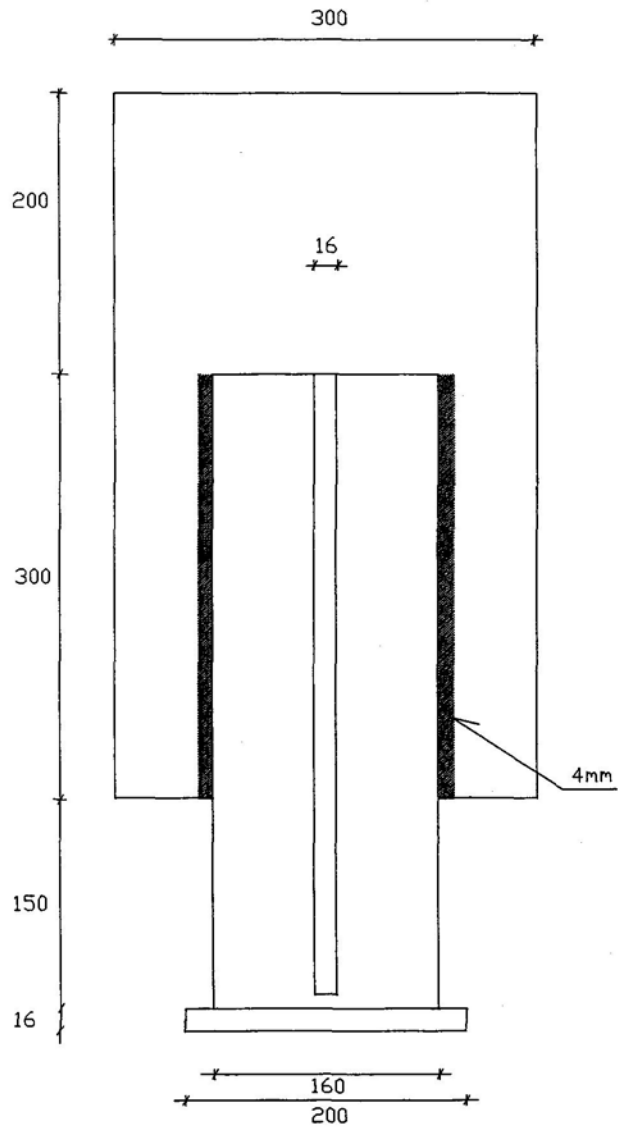
ALZADO

VISTA LATERAL

PROBETA 3M-3S

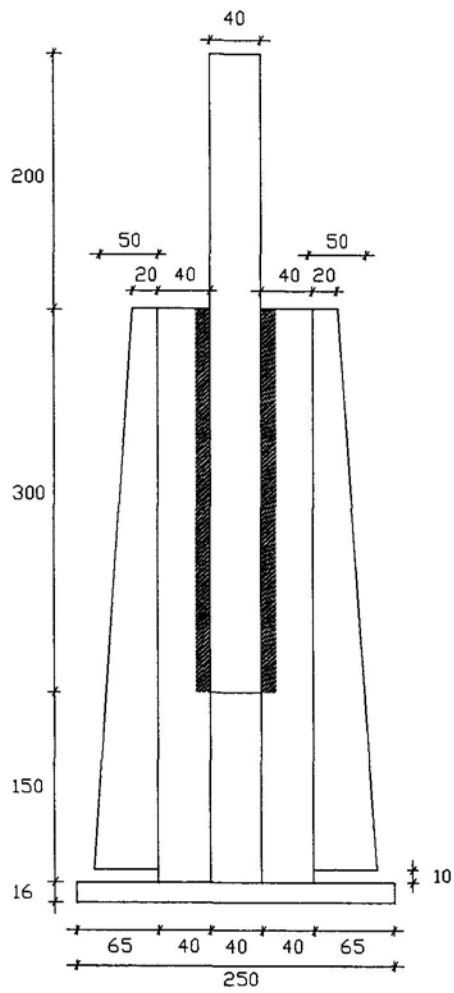


ALZADO

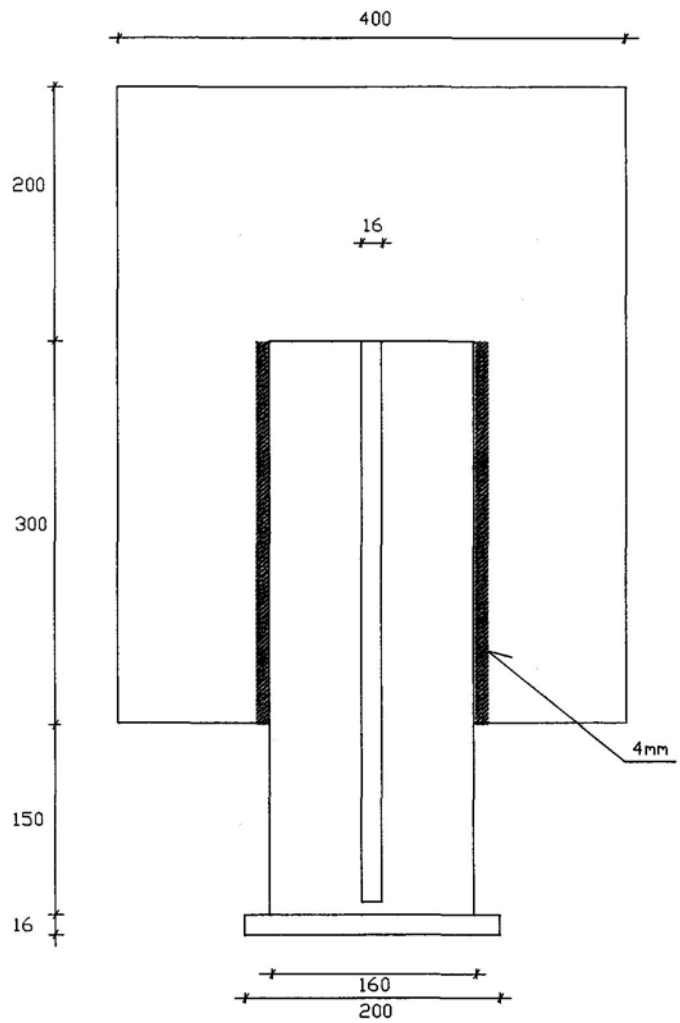


VISTA LATERAL

PROBETA 4M-4S



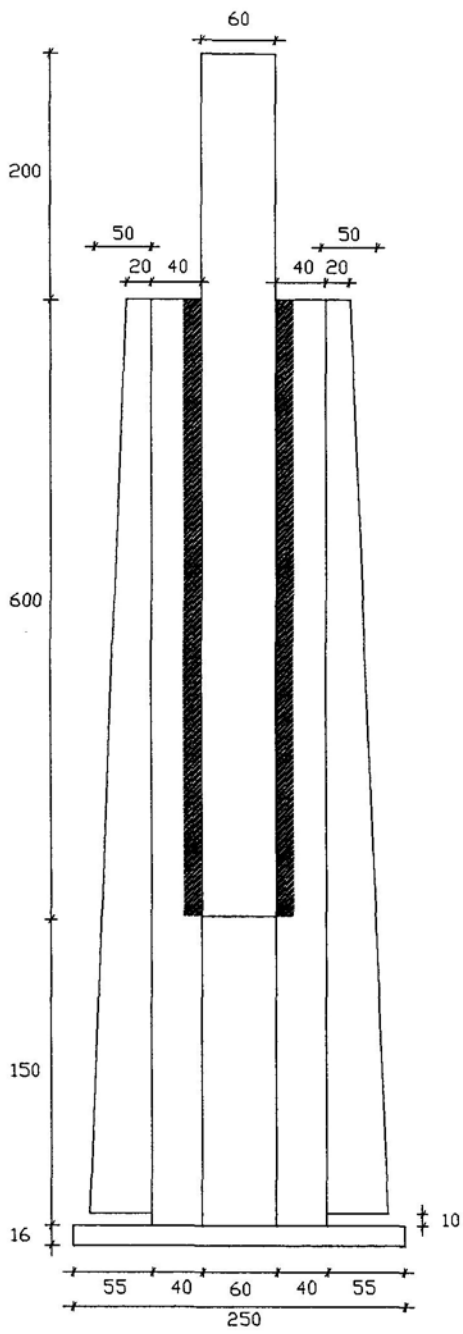
ALZADO



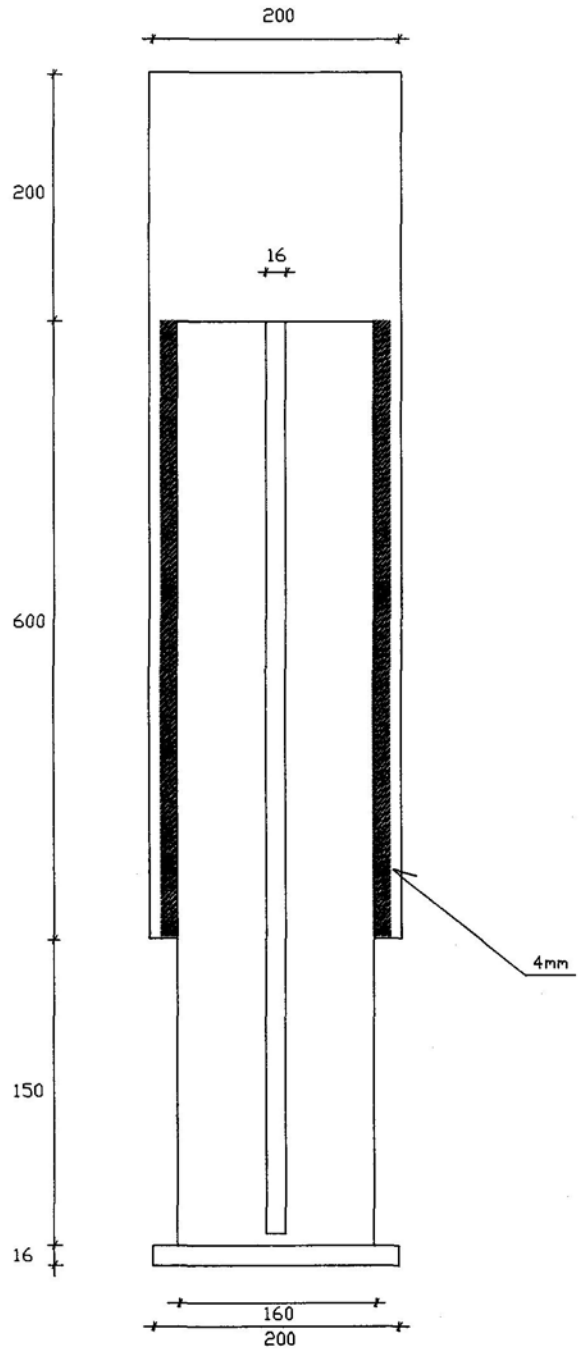
VISTA LATERAL

PROBETA 5M-5S



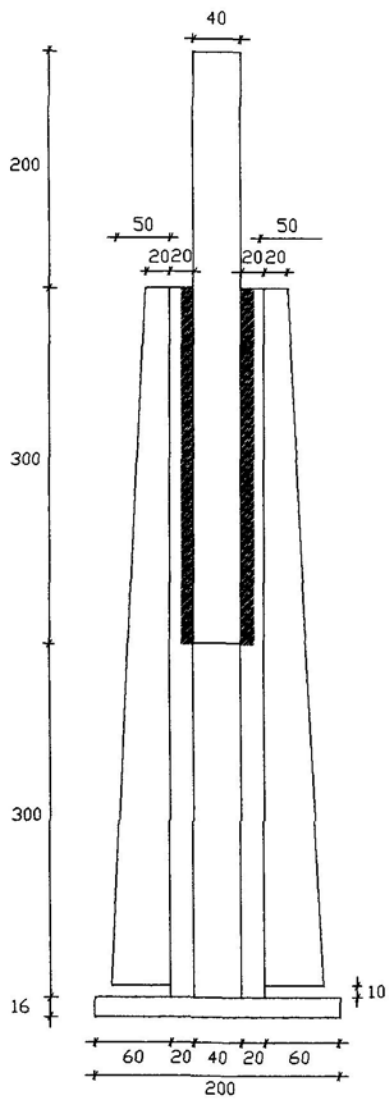


ALZADO

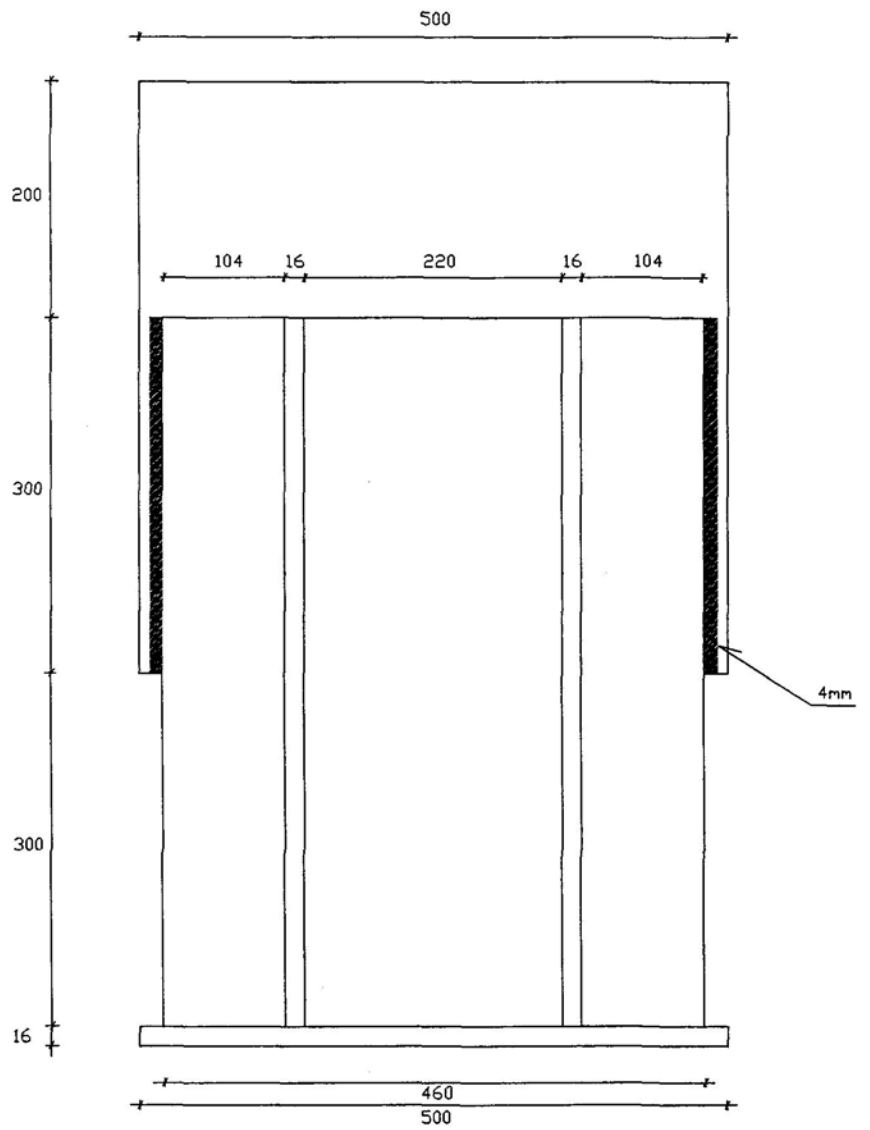


VISTA LATERAL

PROBETA 6M-6S



ALZADO



VISTA LATERAL

PROBETA 7M-7S

### 5.1.2.3. Instrumentación de las 14 probetas ensayadas a compresión.

Para controlar el desarrollo de la rotura en las 14 probetas ensayadas en la segunda campaña se hicieron dos actuaciones en las probetas:

- 1-. Colocación de flexímetros para medida de los corrimientos longitudinales de los extremos de los 4 cordones.
- 2-. Controlar la plastificación de los cordones aplicando en las caras externas de los 4 cordones que forman cada probeta una capa de cal apagada con agua (tal como se emplea en el encale de las fachadas del sur de España).

#### 5.1.2.3.1. Empleo de flexímetros.

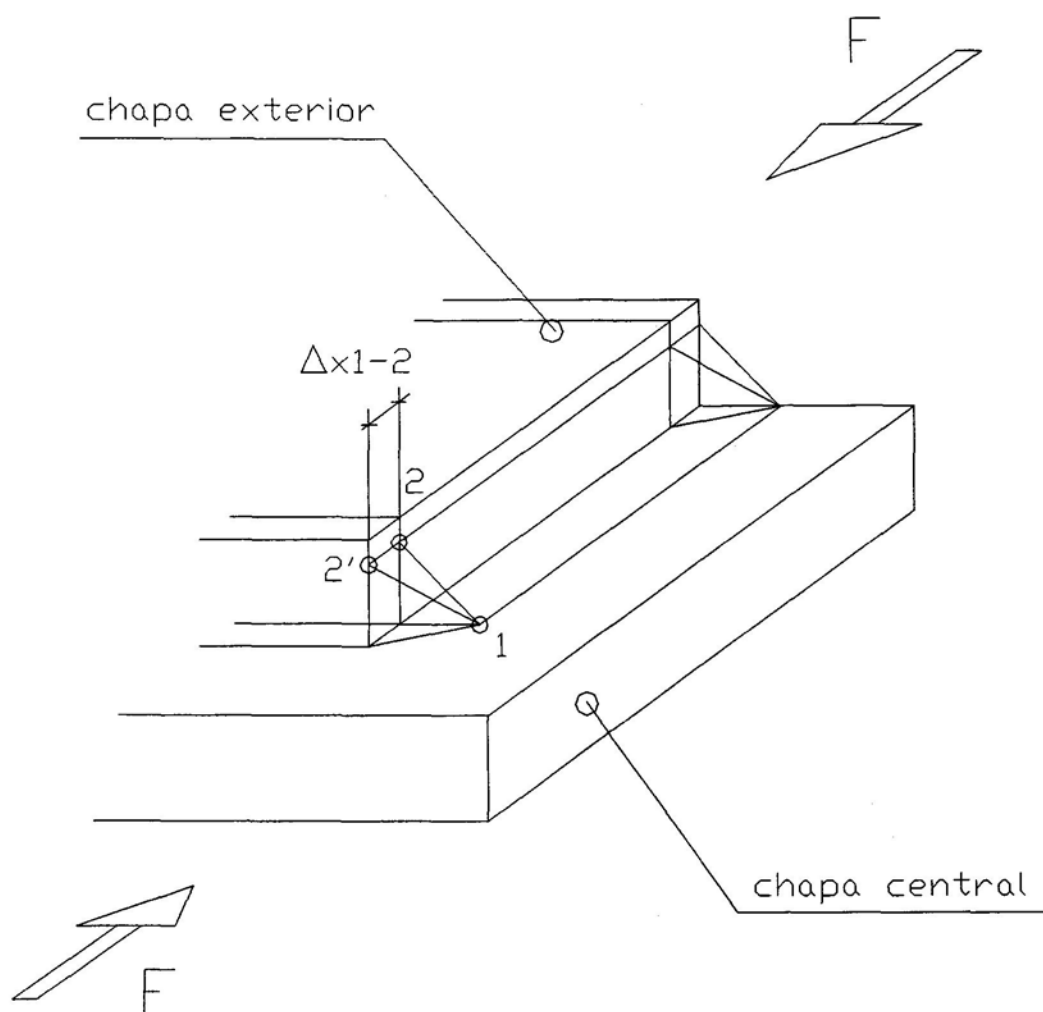
Los datos ofrecidos por las galgas extensiométricas en la primera campaña de ensayos a tracción no ofrecieron información suficiente sobre el comportamiento de los cordones. Las deformaciones en la unión son máximas en los cordones de soldadura (correspondiendo a la gran concentración de tensiones que en ellos se producen). Conforme nos alejamos de ellos, ya metidos en las chapas, las tensiones y por tanto las deformaciones son mucho menores.

La única manera correcta de captar mediante galgas las deformaciones que sufre el cordón es mediante la colocación de las mismas sobre la cara exterior del cordón, lo cual no es posible por dos motivos: por el pequeño espesor del cordón empleado y por la irregularidad superficial que presenta su superficie exterior. Por tanto, a pesar de colocar grupos de galgas en las proximidades del cordón en las chapas, no se consiguieron apreciar deformaciones importantes en la primera campaña de ensayos a tracción.

En esta segunda campaña por tanto se optó por emplear una instrumentación que nos diese una idea más directa de las deformaciones que se producían en los cordones, mediante el uso de flexímetros.

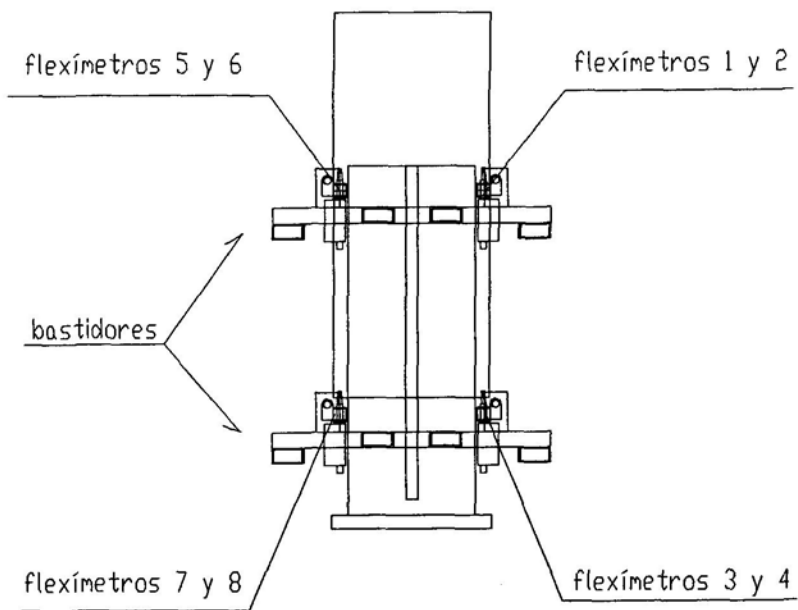
En concreto se midieron los desplazamientos longitudinales según la dirección del eje del cordón. Para ello se instrumentó cada probeta con 8 flexímetros del siguiente modo: cada uno de los flexímetros mide el corrimiento  $\Delta_{x1-2}$  en el extremo del cordón, que es el que se

produce entre los vértices 1 y 2 del triángulo que forma la sección transversal del cordón, según se muestra en la siguiente figura.

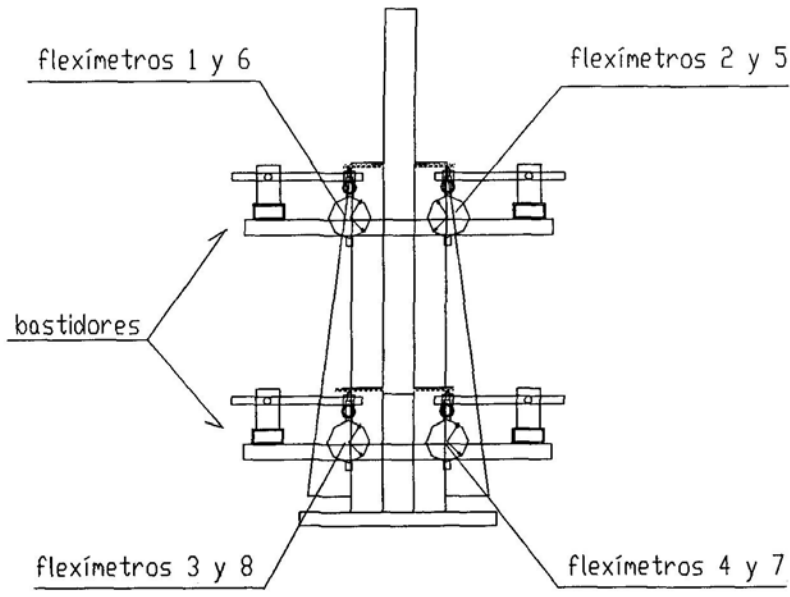


De este modo, con cada flexímetro se mide el desplazamiento relativo entre los vértices 1 y 2. Al ser 4 los cordones de soldadura, cada uno de ellos se instrumentó con un flexímetro en sus dos extremos, necesiándose en total 8 flexímetros.

Los flexímetros se mueven solidariamente con las chapas exteriores, atornillados a una serie de bastidores que van soldados a dichas chapas exteriores, a la altura del extremo de cada cordón. Existen 4 bastidores, cada uno soportando dos flexímetros. En la siguiente figura se presenta una vista del conjunto de la probeta instrumentada con los 8 flexímetros.



VISTA LATERAL

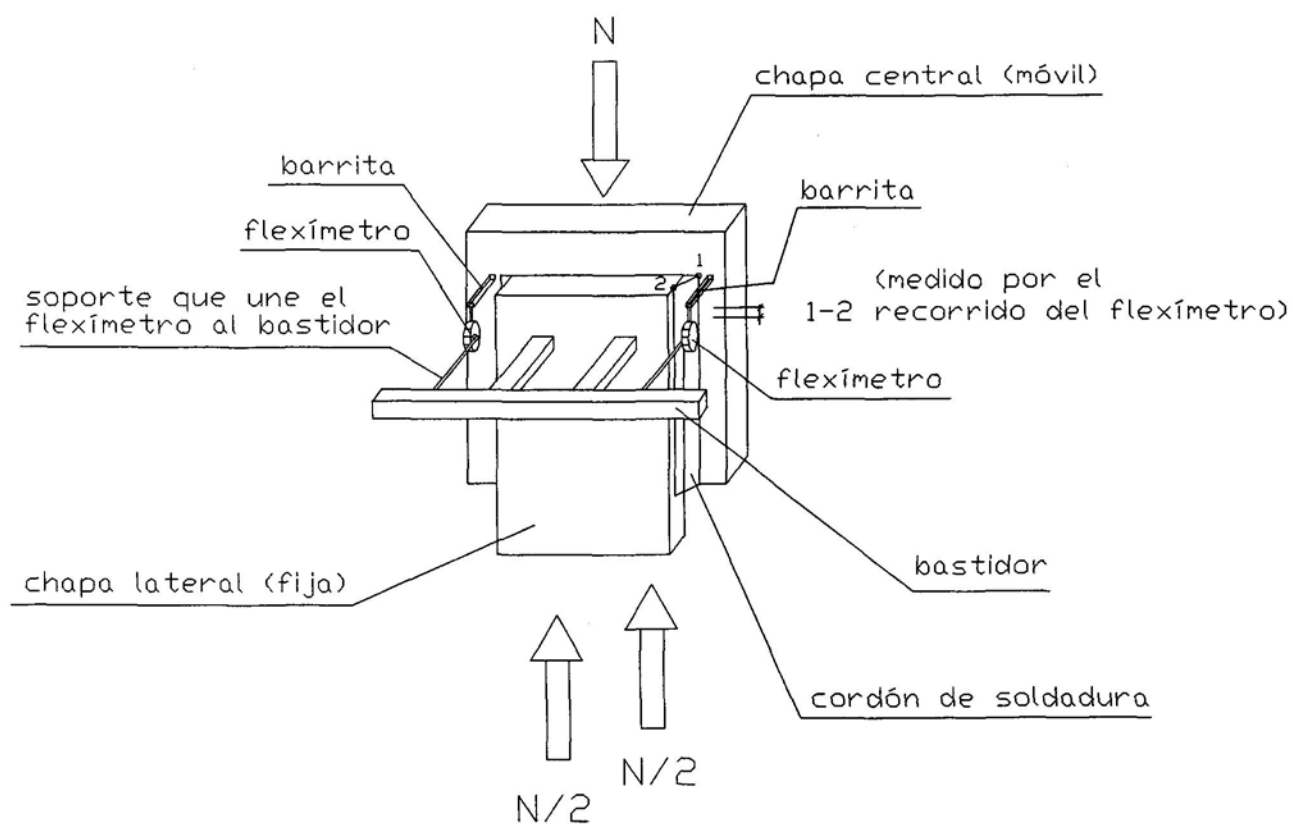


ALZADO

Al encontrarse cada bastidor soldado a la chapa exterior, el flexímetro se mueve solidariamente con el desplazamiento que experimenta el vértice 2 del extremo del cordón.

Y el desplazamiento que mide la punta de cada flexímetro es el correspondiente al extremo de una barra que se encuentra pegada en la chapa central a la altura del vértice 1, con un pegamento de alta resistencia. Por tanto el desplazamiento que mide el flexímetro es el movimiento relativo entre los vértices 1 y 2.

En la siguiente figura se observa un detalle que muestra claramente este comentario.



En el Anejo Fotográfico se observa la instrumentación completa con los ocho flexímetros en las 14 probetas (Fotografías nº17 a 43).

**5.1.2.3.2. Control de la fisuración mediante cal durante la plastificación de los cordones.**

Para controlar el proceso de plastificación de los cordones en las 14 probetas, se “encalaron” las caras exteriores de los mismos, lo cual proporciona una medida visual perfecta de dicho proceso de plastificación.

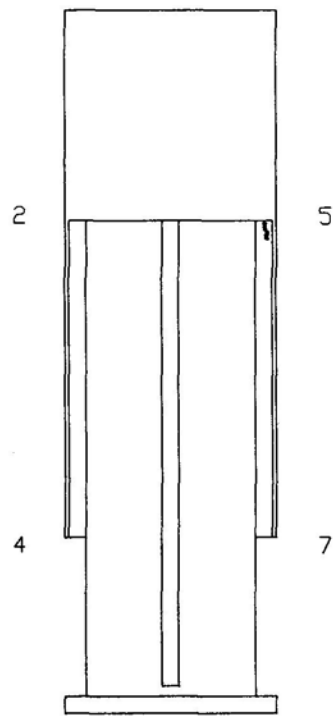
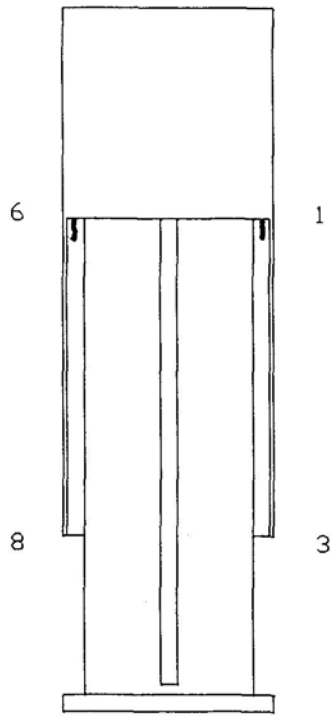
A continuación vamos a reproducir gráficamente cómo se va produciendo la rotura de la cal depositada en la cara externa de los cordones de una probeta, siguiendo el proceso de plastificación registrado para el MODELO 3S.

En las siguientes figuras se observa, para cada escalón de carga del ensayo a compresión, el proceso de agrietamiento de la cal, para cada uno de los cuatro cordones. Cada uno de los cordones se identifica por la situación de los dos flexímetros ubicados en sus extremos.

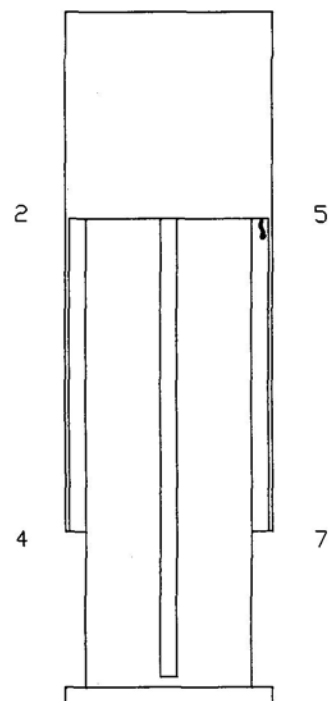
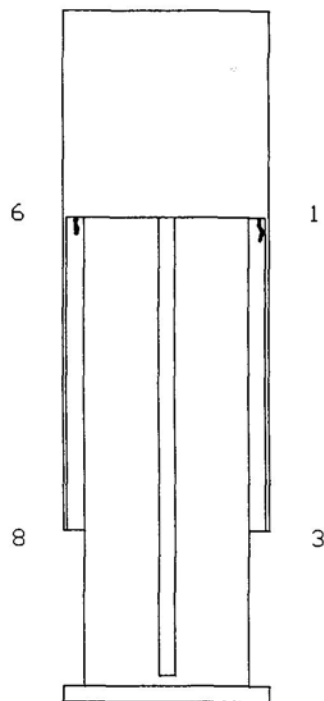
Carga = 40 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 80 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 120 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 140 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 160 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 180 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 190 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 200 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 205 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 210 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 215 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 220 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 225 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración  
Carga = 230 T  $\Rightarrow$  no hay fisuración



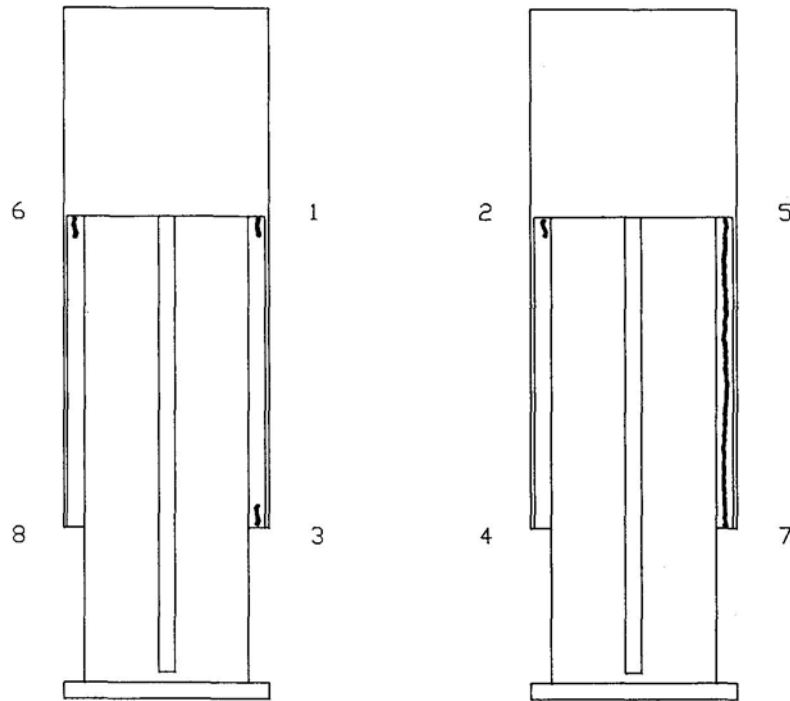
Carga = 240 T



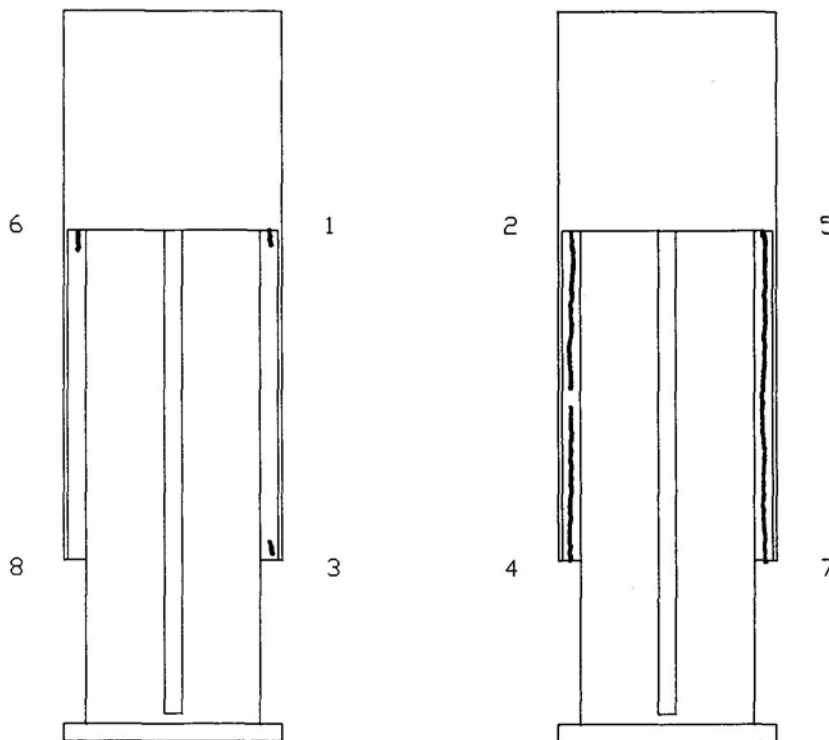
Carga = 250 T



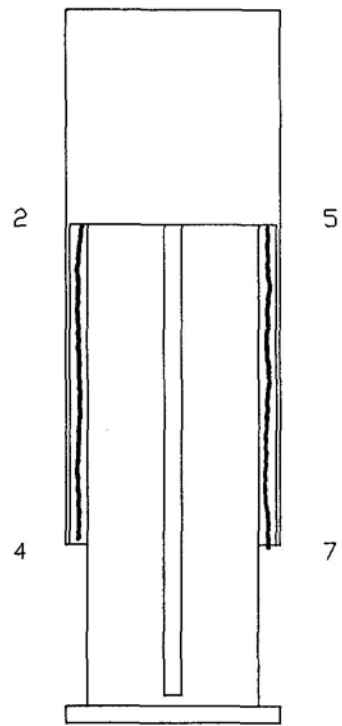
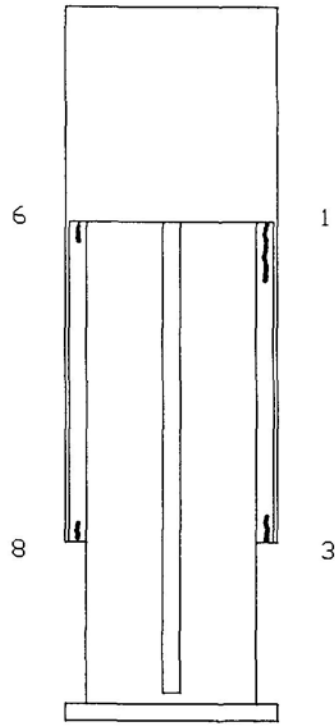
Carga = 260 T



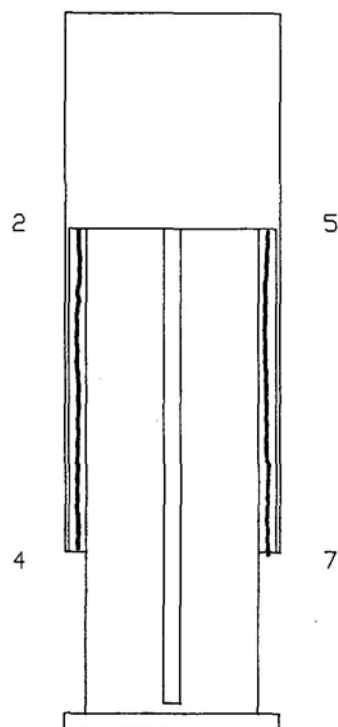
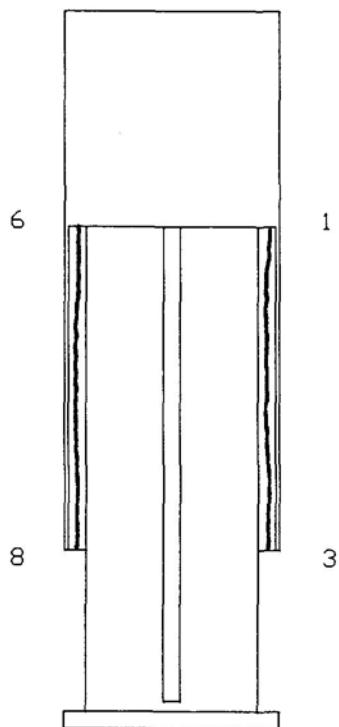
Carga = 270 T



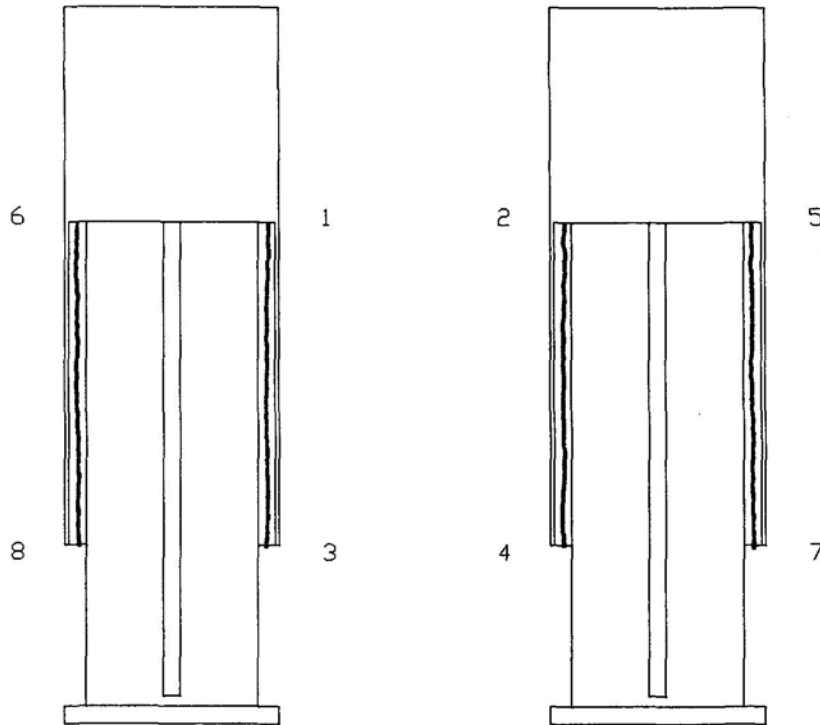
Carga = 280T



Carga = 290 T



Carga = 295T ⇒ ROTURA



Como observamos, el proceso de rotura de la cal depositada en los cordones se produce del siguiente modo:

- el comienzo de la fisuración de la cal en los cordones se produce cuando la fuerza ha alcanzado aproximadamente el 80% de la rotura de la probeta. (en todas las probetas ensayadas el inicio de la fisuración se produjo para una carga situada entre el 70% y el 80% de la carga de rotura)
- el comienzo de la fisuración se produce en algunos de los extremos de los cordones, concretamente en los extremos correspondientes a los flexímetros nº 1, 5 y 6. El hecho de que no se inicie la fisuración al mismo tiempo en los 4 cordones es debido a las lógicas imperfecciones de construcción de la probeta, sobre todo en lo que se refiere al paralelismo

que debería existir en los extremos de la misma para que el apoyo de los dos platos de la prensa fuese absolutamente uniforme. En algunas de las probetas, como en esta que se acaba de mostrar, este apoyo no es homogéneo, de modo que la probeta se carga más de un lado que de otro, y por tanto los cordones situados en el lado más cargado trabajan más.

- la fisuración crece muy rápidamente hacia el centro del cordón con el aumento de carga. Se observa cómo se carga más el cordón 5-7, seguido del 2-4. Es decir, la probeta se carga más en el lado correspondiente a estos cordones. Así, para una carga de 270 T la cal en los cordones 5-7 y 2-4 está muy fisurada, habiendo plastificado prácticamente dichos cordones. A partir de este momento, son los dos cordones del otro lateral los que empiezan a absorber carga, fisurándose a su vez rápidamente con el aumento de carga (cordones 1-3 y 6-8). Con los cuatro cordones ya cargados la probeta soporta un pequeño porcentaje más de carga, hasta que rompe a 295 toneladas.
- este proceso de fisuración se corresponde perfectamente con lo mostrado en el estudio con elementos finitos en el apartado 4.2.2., donde se observa el proceso de plastificación de los cordones de este mismo MODELO 3S. Allí se observa igualmente cómo la plastificación de un cordón alcanza su cara externa cuando se ha alcanzado un alto porcentaje de la carga máxima de rotura del cordón. El estudio con elementos finitos también muestra cómo esta plastificación ocurre antes en los extremos correspondientes al extremo superior de la probeta, que se corresponde en el ensayo con el inicio de la fisuración en los extremos 1, 5 y 6 y como esta plastificación crece rápidamente en todo el cordón.

En el Anejo Fotográfico (Anejo nº6) se observa el estado de fisuración final de la cal en todas las probetas.

#### 5.1.2.4. Ejecución de los ensayos.

Los ensayos a compresión de las 14 probetas se han realizado aplicando la carga de forma escalonada hasta la rotura de la probeta.

En cada incremento de carga se hizo lectura de los 8 flexímetros que instrumentaban cada una de las probetas. El incremento de carga en cada escalón se fue adaptando al desarrollo del ensayo, valiéndonos de la información que nos iba aportando el aumento de la deformación de los flexímetros, junto a la comprobación visual del agrietamiento de la cal depositada en los cordones de soldadura al ir plastificando los mismos.

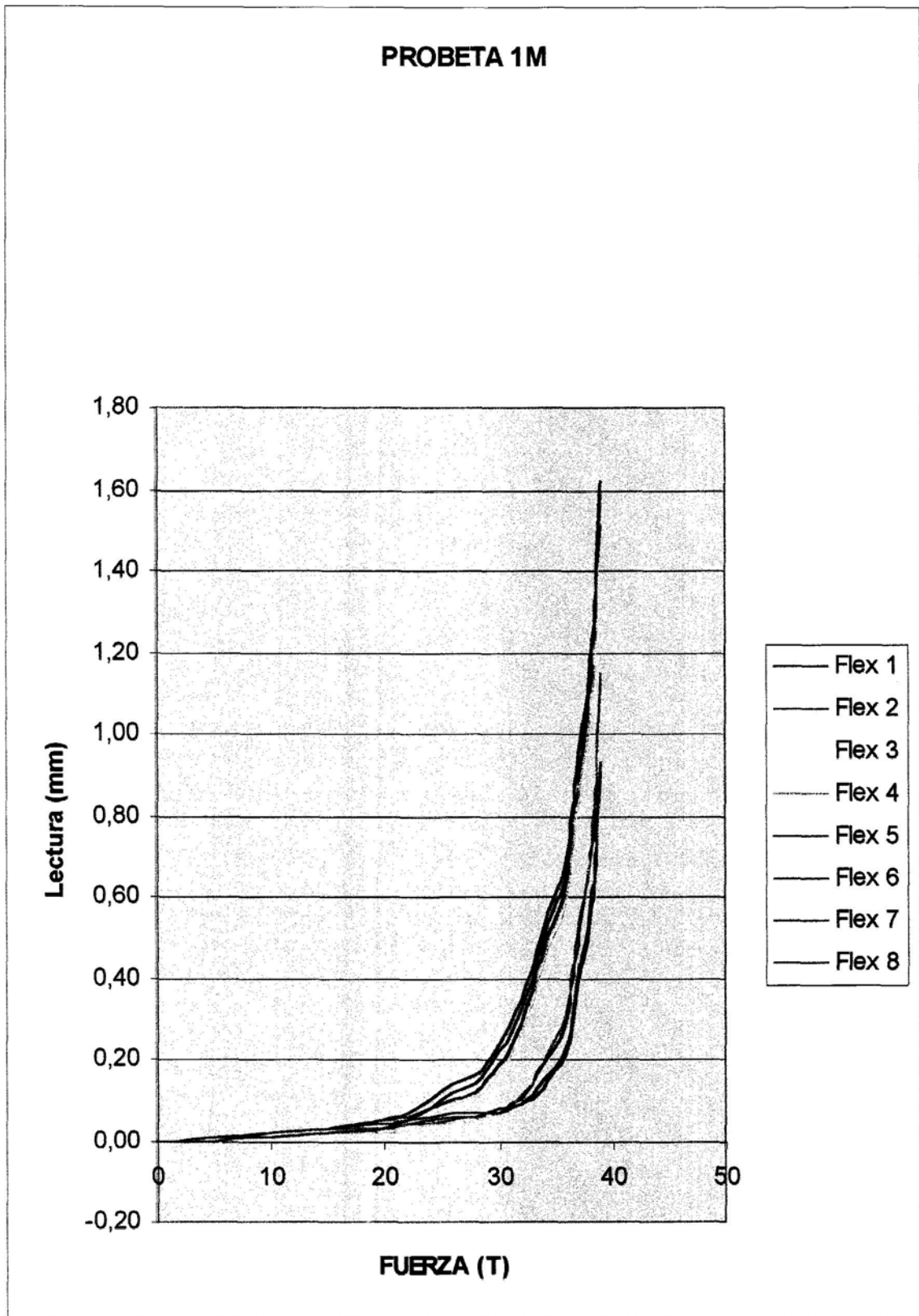
Asimismo, en cada escalón de carga se apuntó el desarrollo del agrietamiento de la cal depositada sobre los 4 cordones de soldadura a romper en cada una de las 14 probetas.

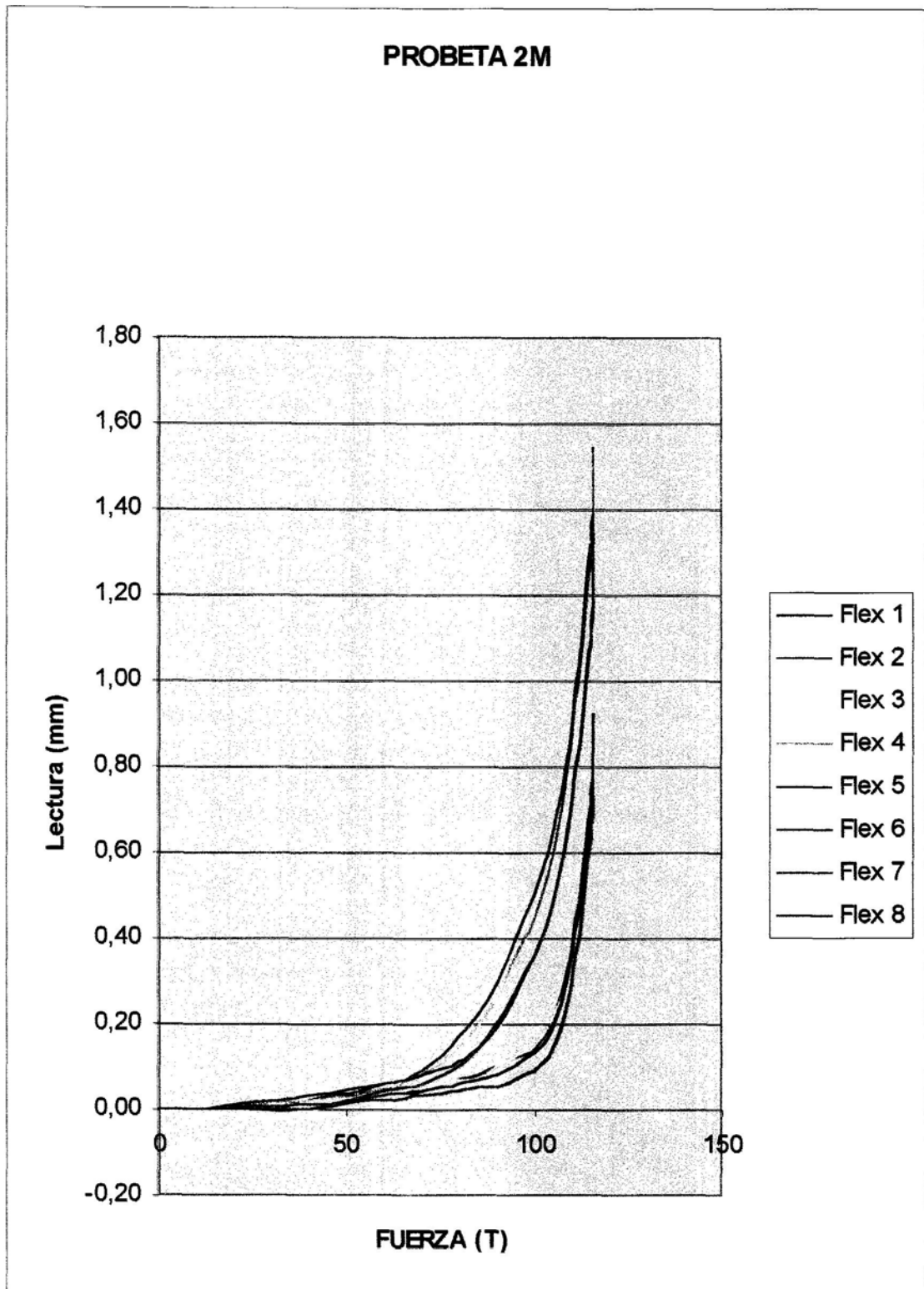
#### 5.1.2.5. Resultados de los ensayos.

##### A) Deformación de los flexímetros hasta rotura

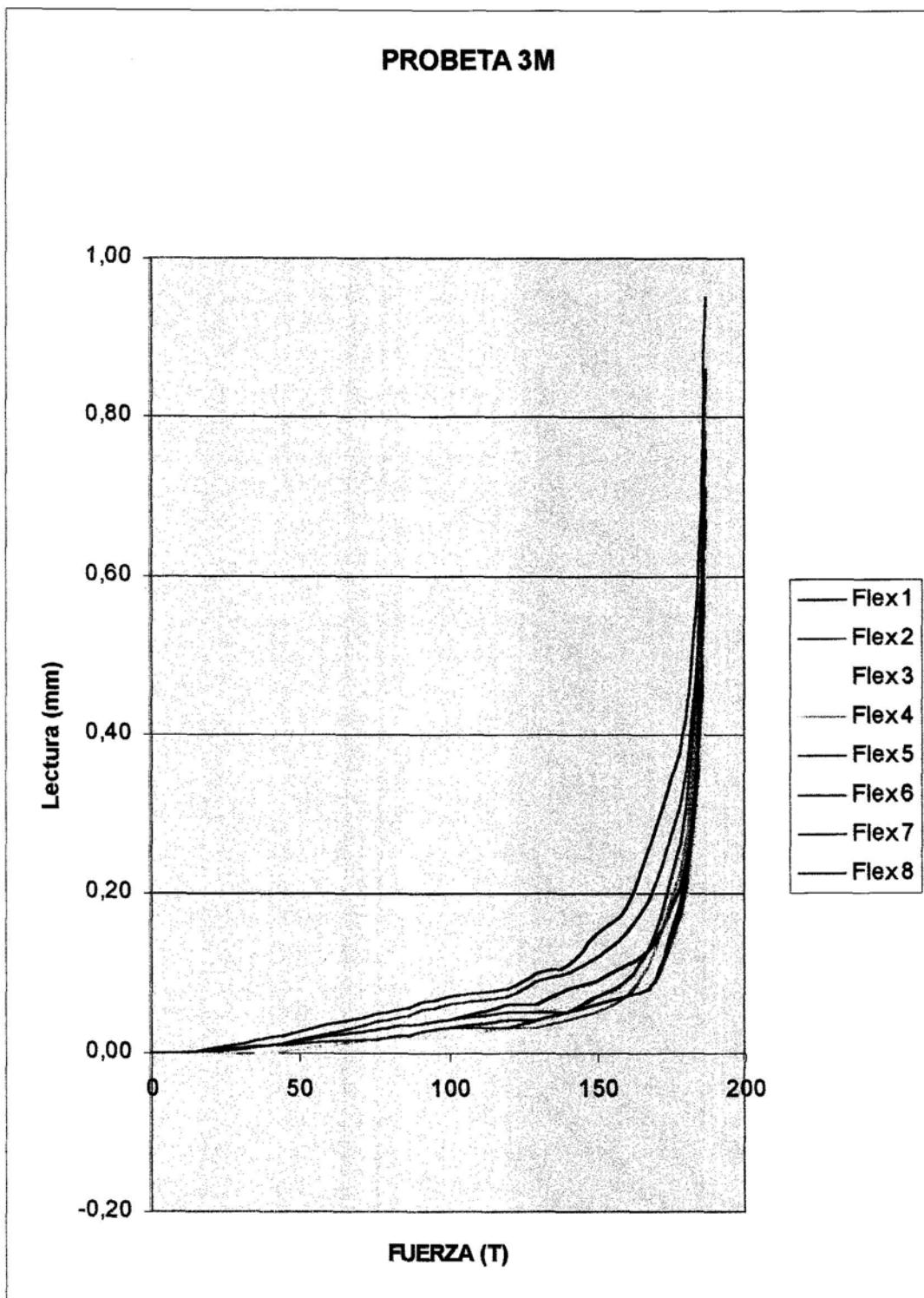
A continuación se presentan unos gráficos con las deformaciones medidas en los 8 flexímetros colocados en cada una de las 14 probetas ensayadas.

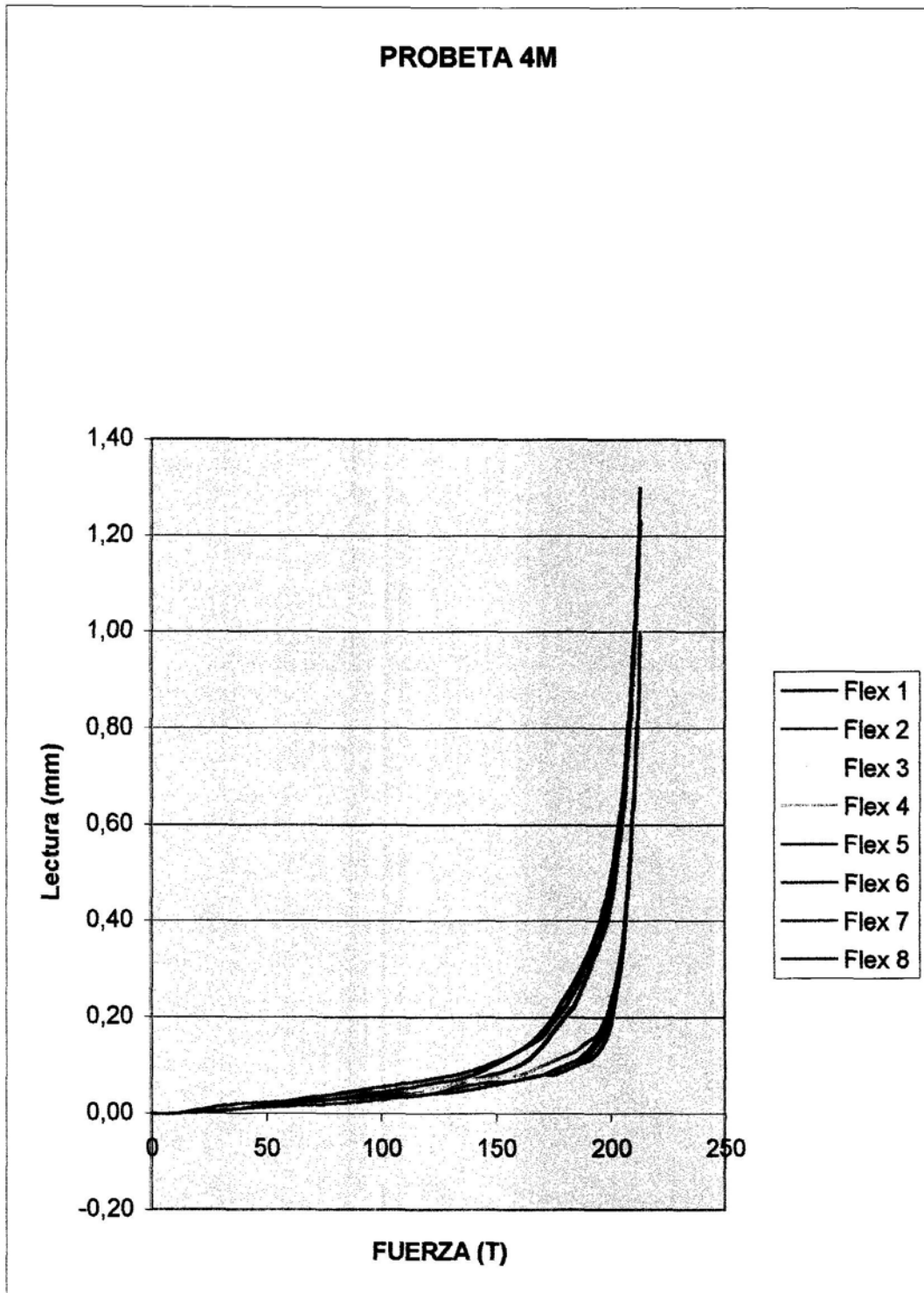
Las lecturas realizadas en todos los escalones de carga llevados a cabo se pueden observar detalladas en el Anejo nº5.

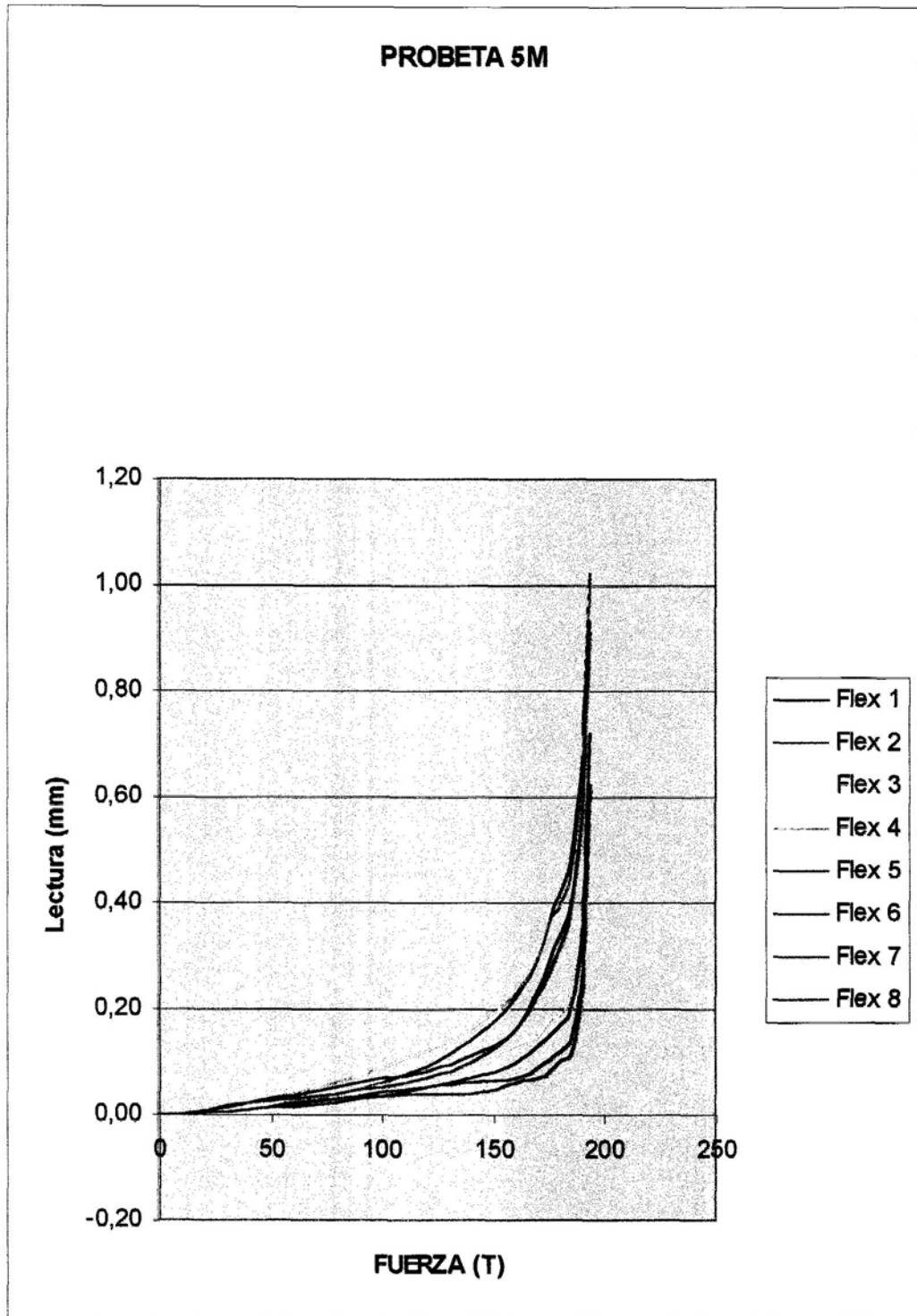


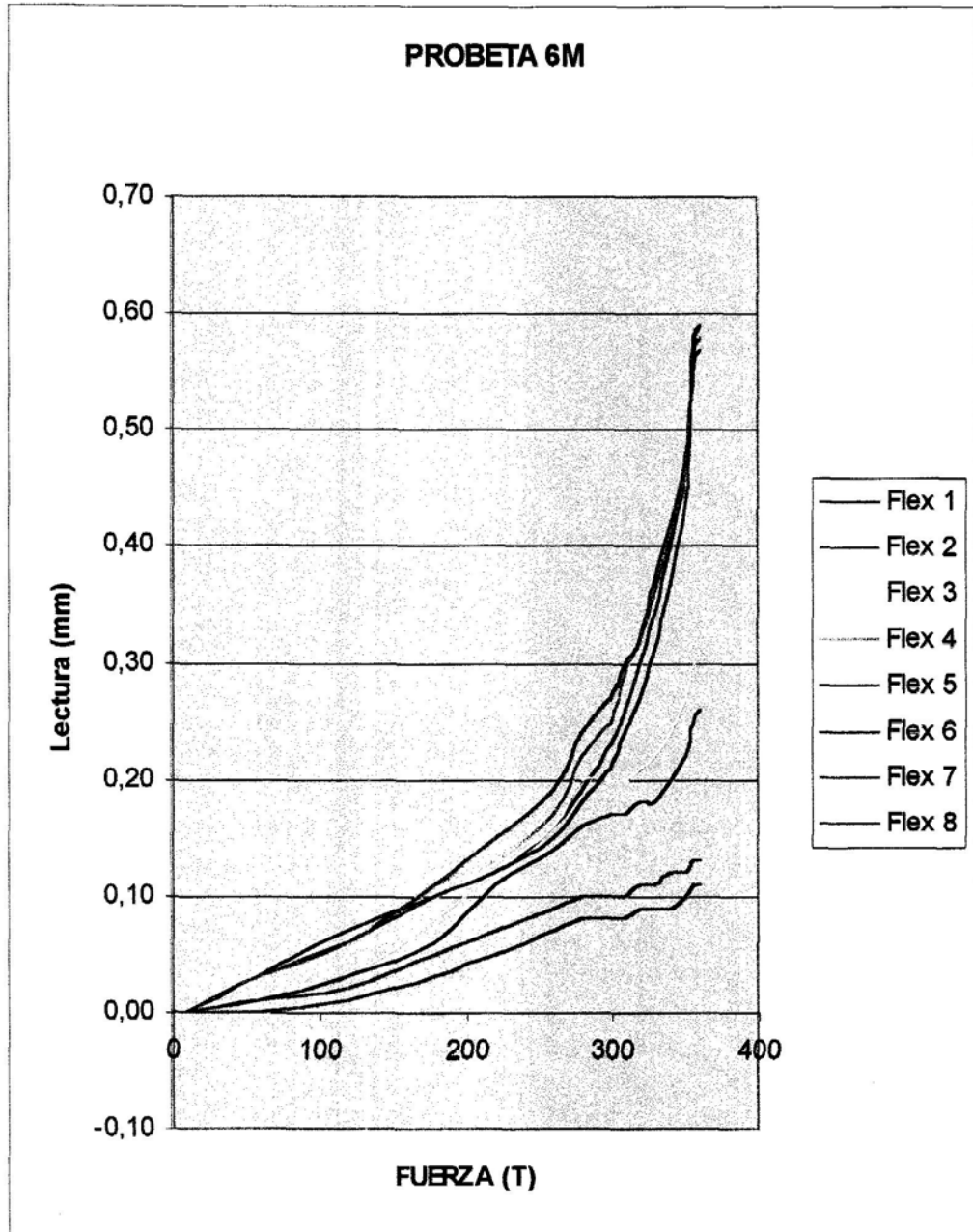


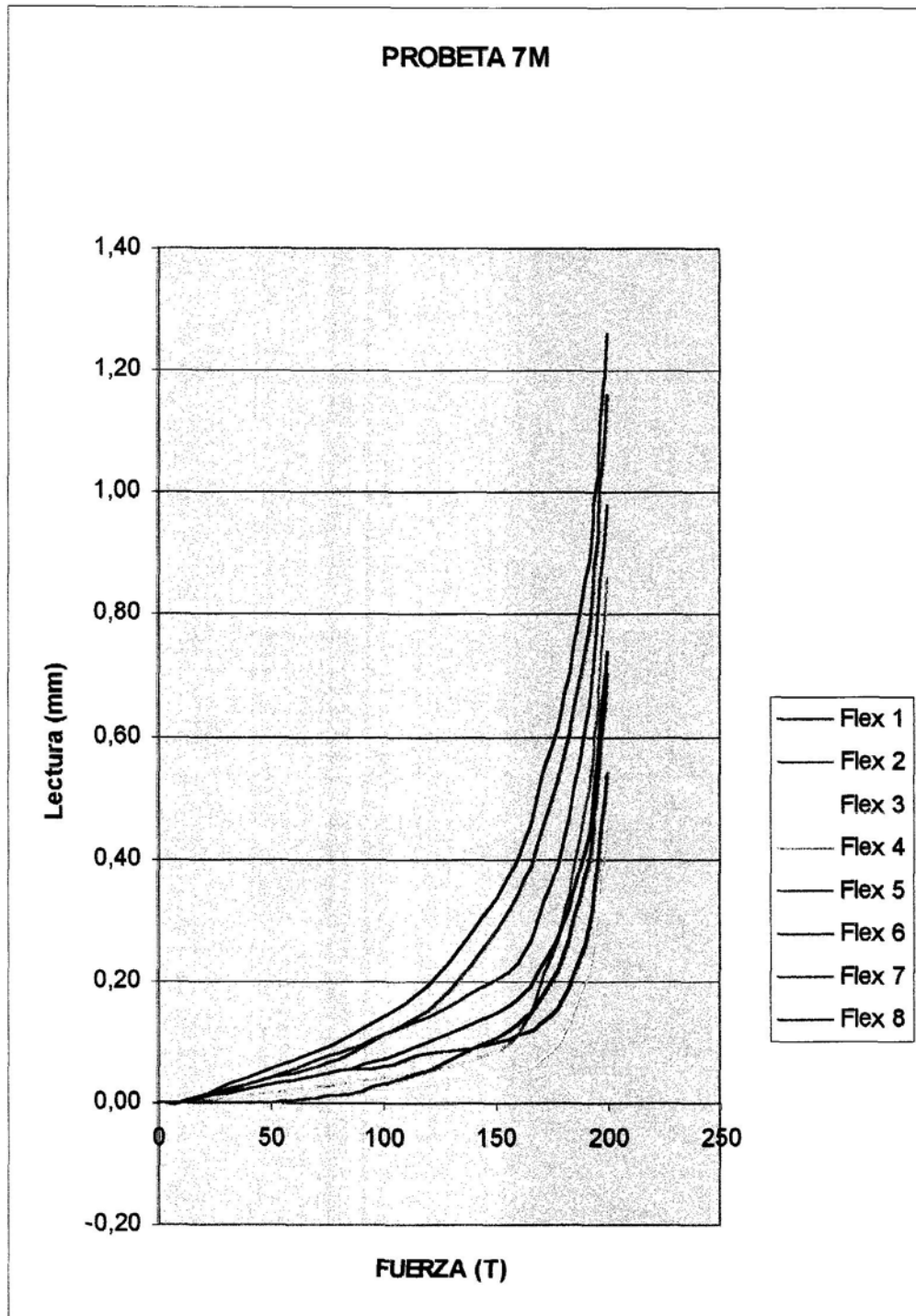


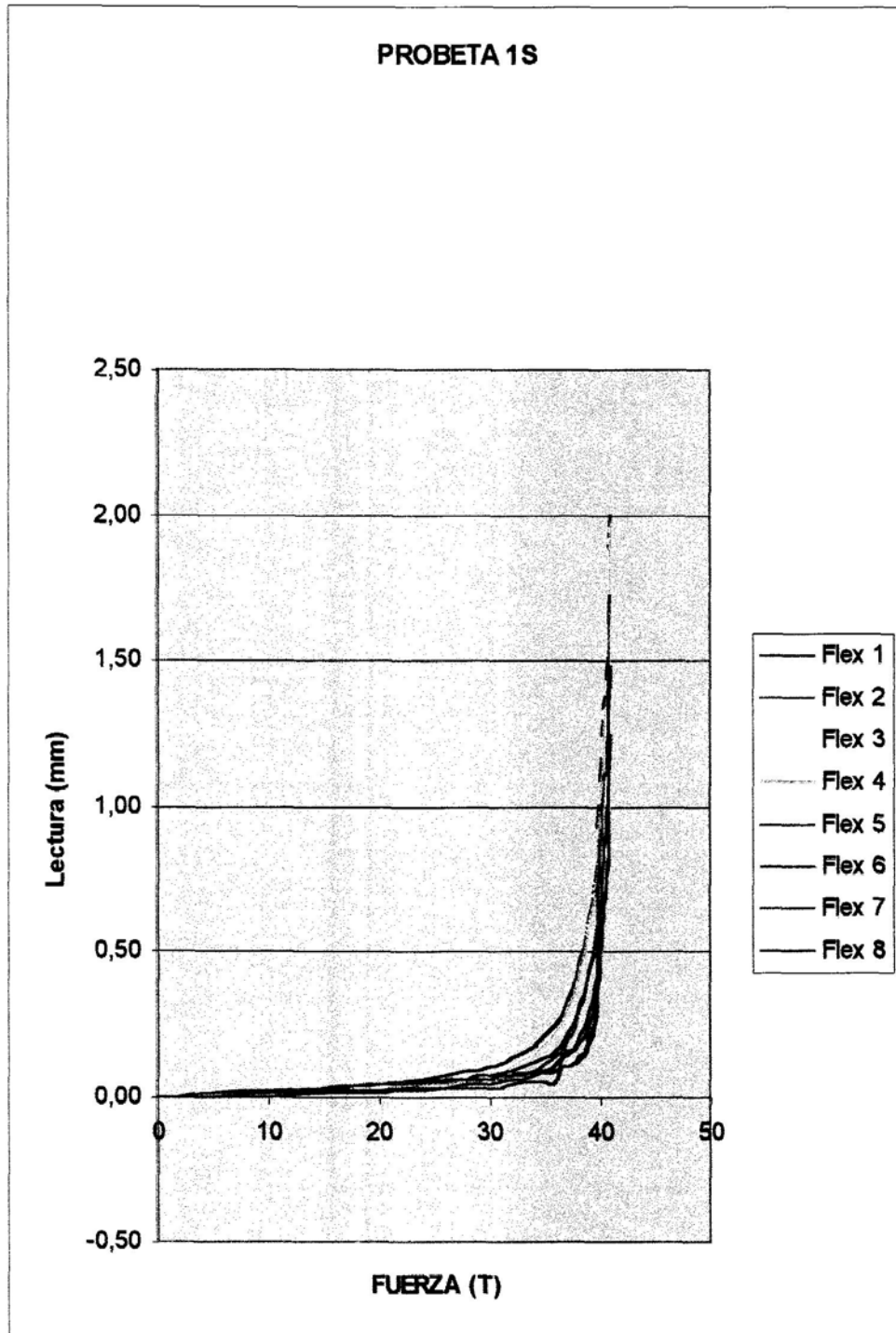


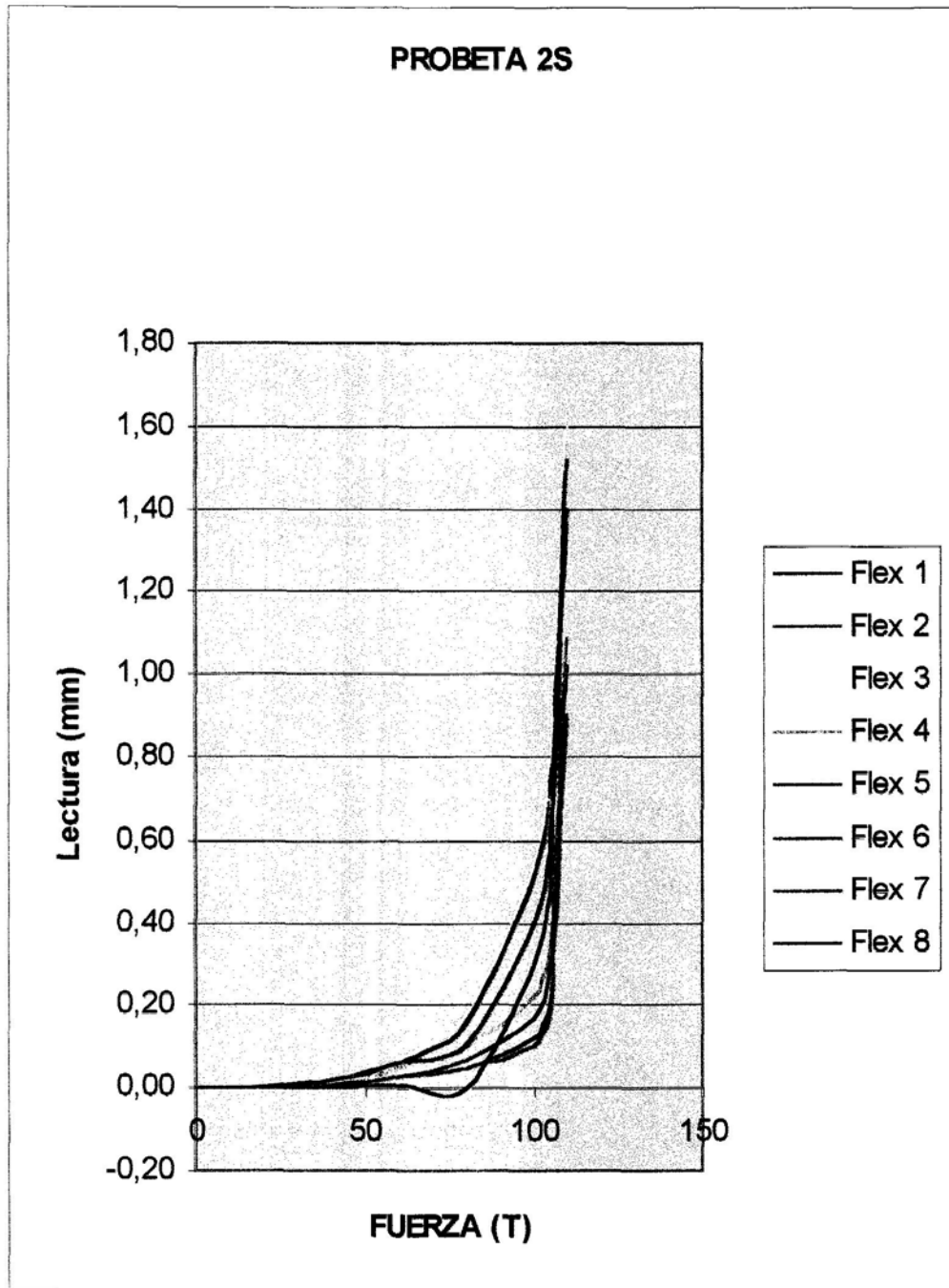


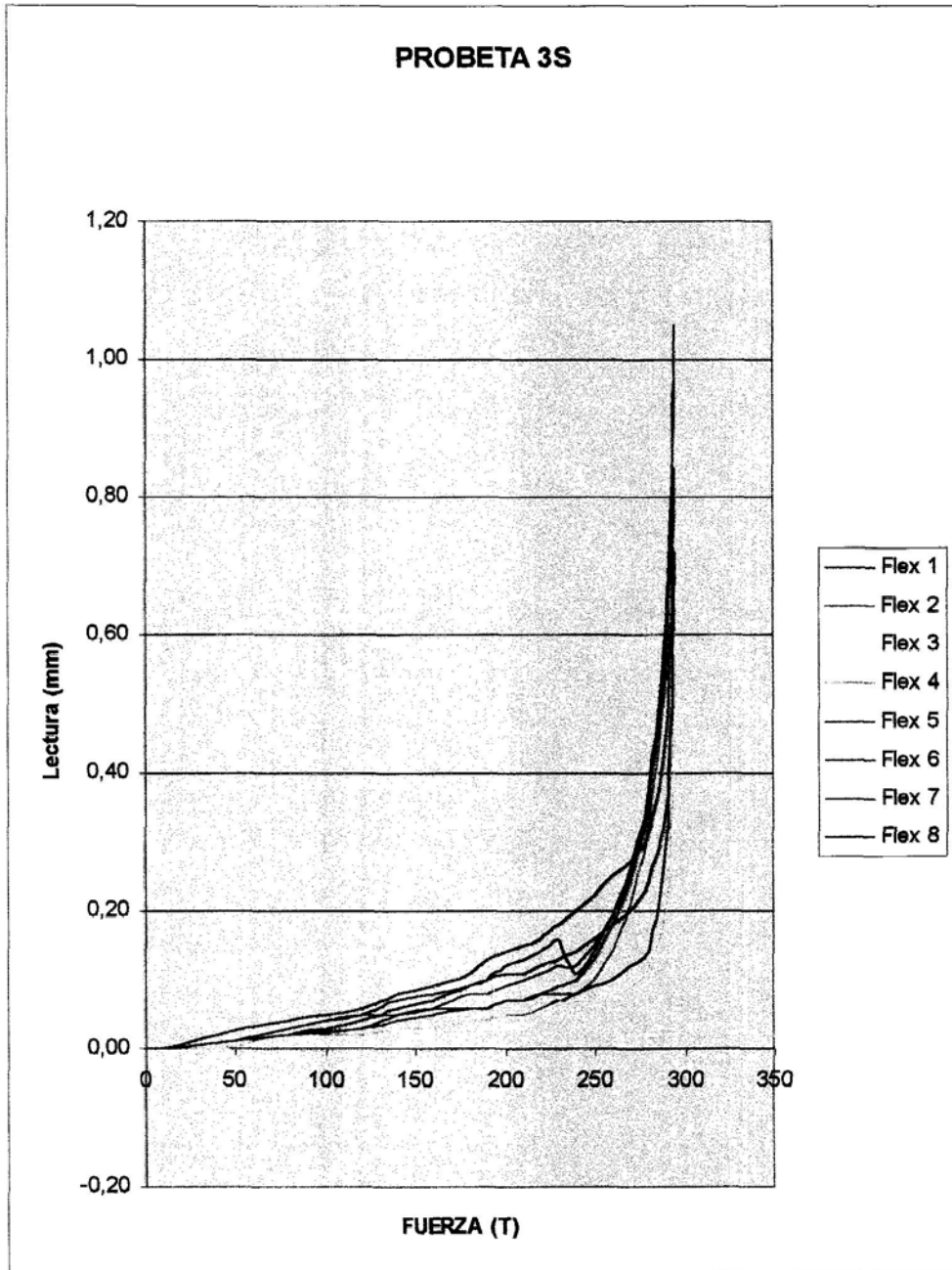




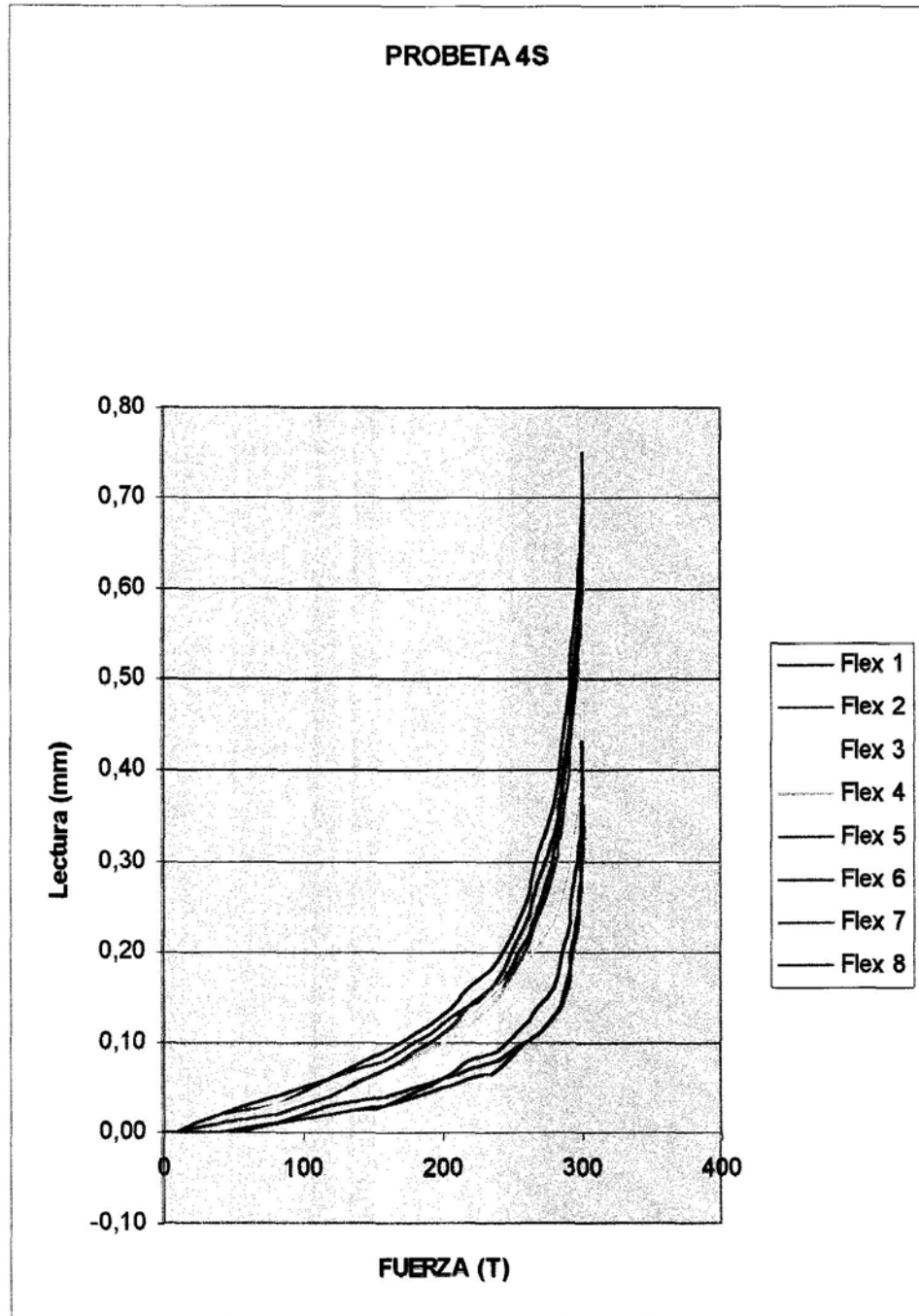


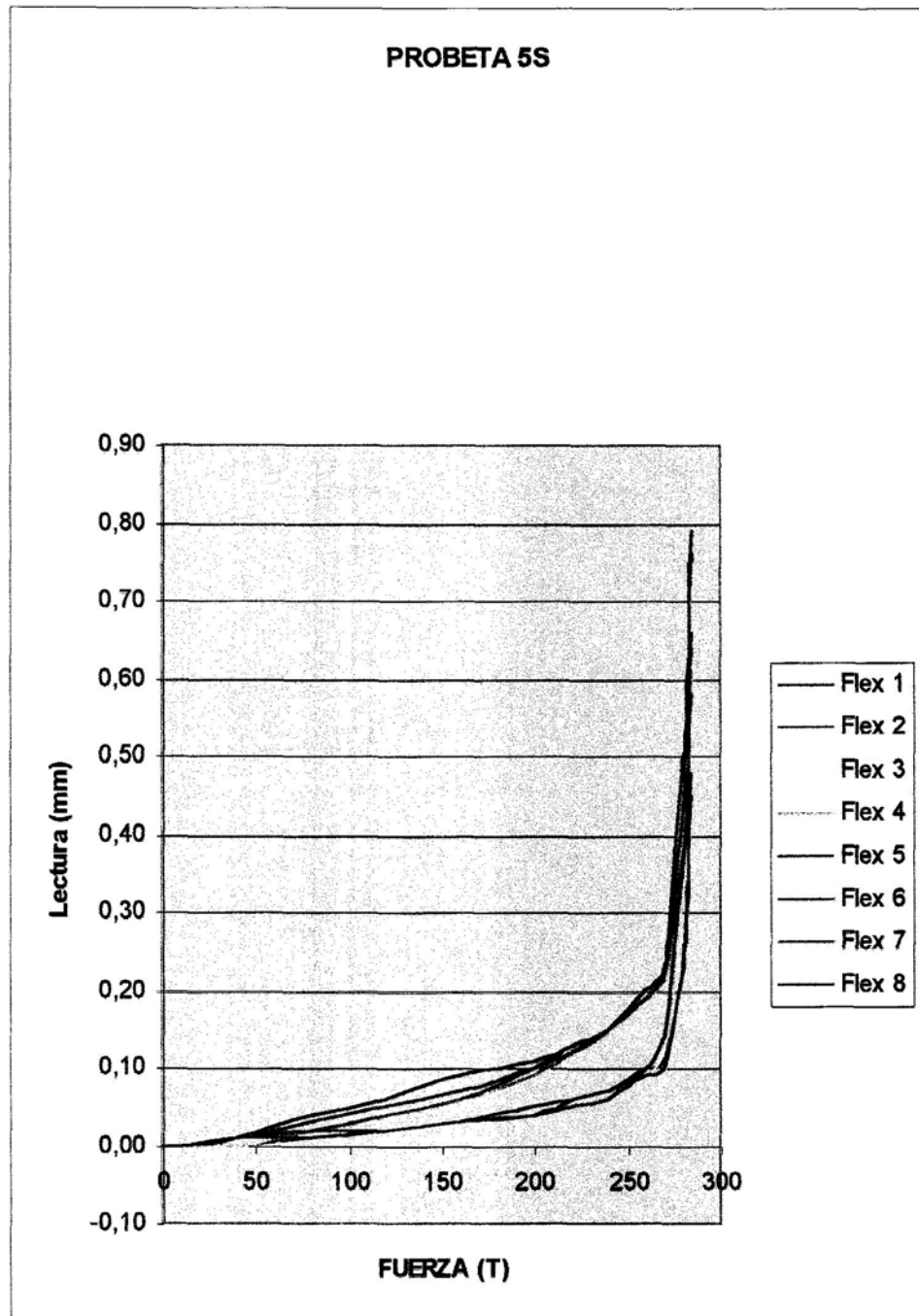


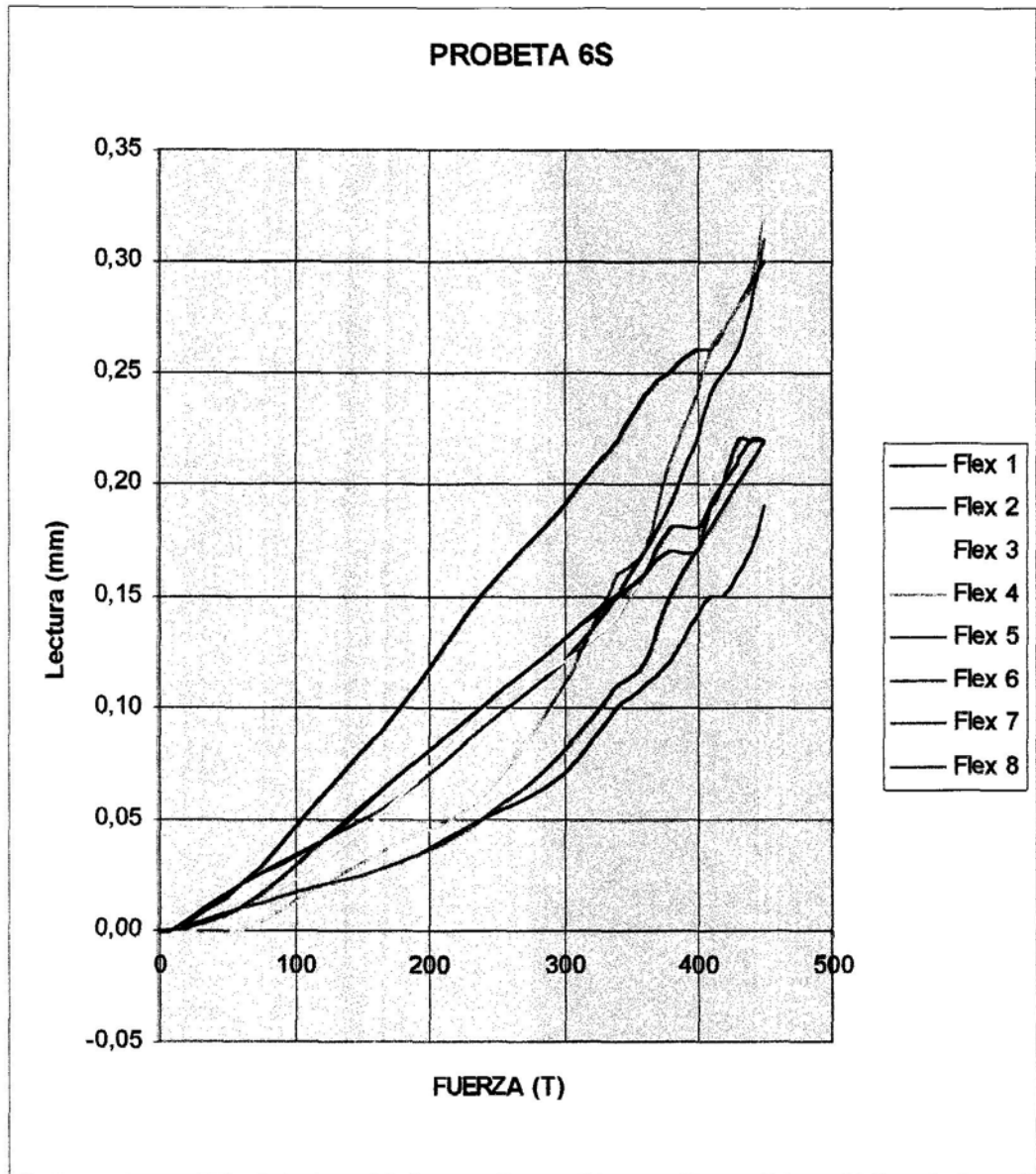


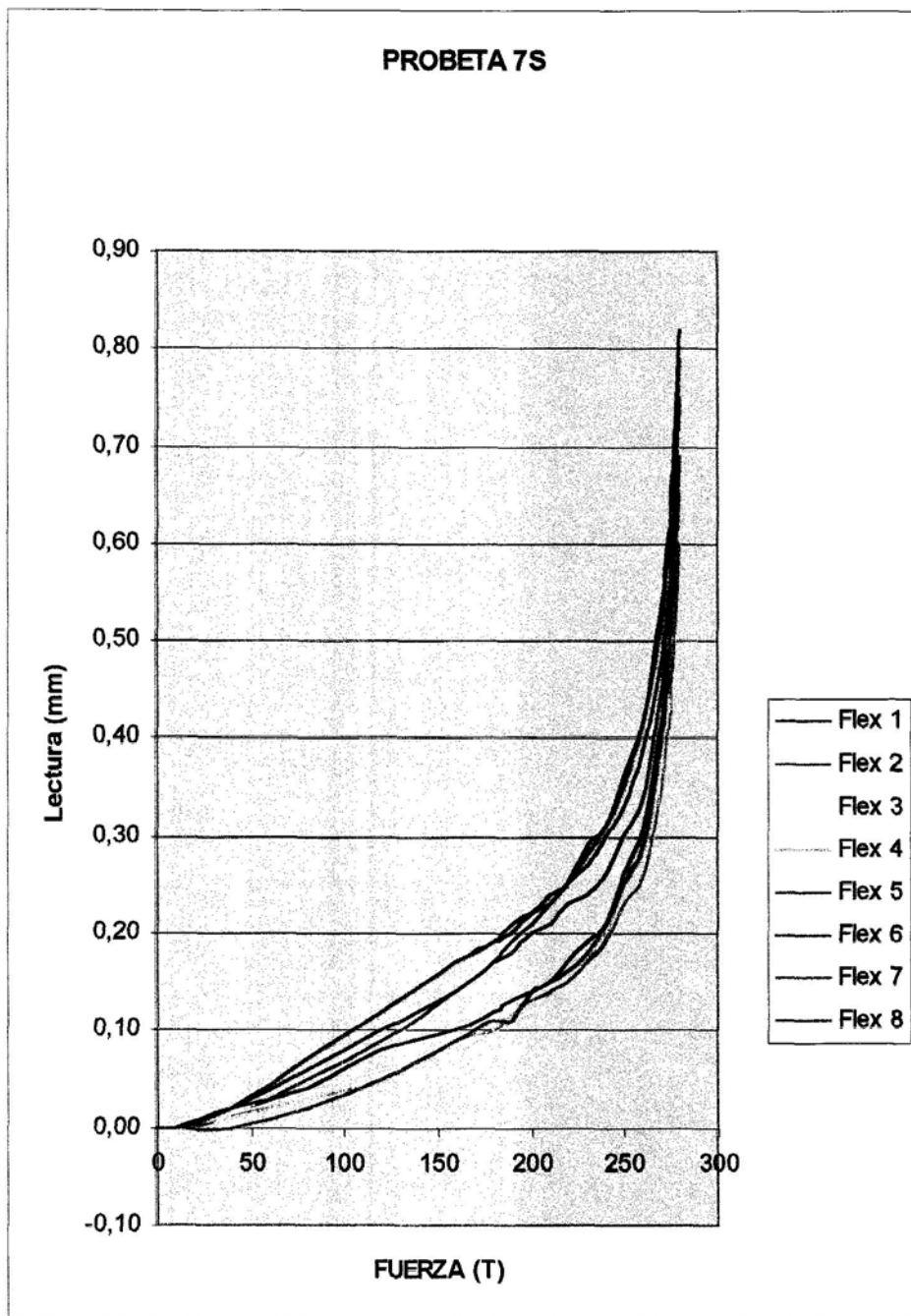












En la siguiente tabla se observan los siguientes datos de interés, correspondientes a los gráficos que se acaban de mostrar:

- Carga en el momento de la última lectura.
- Carga máxima de rotura.
- Corrimiento máximo medido hasta la rotura:  $\Delta x_{1-2}$
- Deformación angular máxima:

$$\gamma_{1-2} = \Delta x_{1-2} / a$$

siendo:

$\Delta x_{1-2}$  = corrimiento máximo medido hasta la rotura.

a = espesor de garganta = 4 mm.

PROBETA ENSAYADA	Carga máxima en el momento de la última lectura (T)	Carga máxima de rotura (T)	Corrimiento máximo medido (mm)	Deformación angular $\gamma_{1-2} = \Delta x_{1-2} / a$
PROBETA N°1M	35.4	35.4	1.62	0.405
PROBETA N°2M	116	116.3	1.54	0.385
PROBETA N°3M	187	188	0.95	0.238
PROBETA N°4M	215	215	1.30*	0.325*
PROBETA N°5M	194	194	1.02	0.255
PROBETA N°6M	360	410	0.59**	0.148**
PROBETA N°7M	200	203	1.26*	0.315*
PROBETA N°1S	40.8	41	2.00	0.500
PROBETA N°2S	110	110	1.63	0.408
PROBETA N°3S	294.5	295	1.05	0.263
PROBETA N°4S	302	307	0.75*	0.188*
PROBETA N°5S	284	284	0.79	0.198
PROBETA N°6S	NO ROMPIÓ	NO ROMPIÓ	NO ROMPIÓ	NO ROMPIÓ
PROBETA N°7S	0.82	280	0.82*	0.205*

En la tabla se observa como en algunas probetas (marcadas con un asterisco (\*)) el corrimiento máximo no se pudo medir justo en el momento de la rotura. Esto es debido a que cuando las deformaciones se disparan en la lectura de los flexímetros durante la realización de los ensayos, queda un margen pequeño de maniobra para retirar todo el instrumental, ya que muchas veces la rotura brusca de los cordones puede dañar a los flexímetros. Por tanto, en los casos indicados con un asterisco (\*) el corrimiento último fue sin duda algo mayor al medido.

En la probeta 6M la retirada de los flexímetros fue mucho antes de la rotura, con lo cual el corrimiento máximo medido (\*\*) fue bastante inferior en este caso al correspondiente al momento de la rotura

Se observa claramente cómo las deformaciones angulares máximas se sitúan entre 0.2 y 0.5, coincidiendo con los valores descritos en la literatura existente.

**B) Carga de rotura de las probetas**

La rotura se produjo en 13 de las 14 probetas ensayadas. La probeta nº 6S no llegó a romper, alcanzando la prensa de compresión una fuerza máxima de 456 toneladas.

Las cargas de rotura en las probetas fueron las siguientes:

PROBETA ENSAYADA	CARGA DE ROTURA
	Tn
PROBETA Nº1M	35.4
PROBETA Nº2M	116
PROBETA Nº3M	188
PROBETA Nº4M	215
PROBETA Nº5M	194
PROBETA Nº6M	410
PROBETA Nº7M	203
PROBETA Nº1S	41
PROBETA Nº2S	110
PROBETA Nº3S	295
PROBETA Nº4S	307
PROBETA Nº5S	284
PROBETA Nº6S	NO ROMPIÓ
PROBETA Nº7S	285

## **6. CONCLUSIONES.**

En el apartado anterior se mostraron los resultados obtenidos en el estudio teórico y experimental de uniones soldadas a solape.

En los siguientes apartados 6.1. y 6.2. se exponen todas las conclusiones sobre este estudio de investigación, contrastando los resultados obtenidos teóricamente mediante el estudio con elementos finitos con los resultados experimentales de las dos campañas de ensayos realizadas.

La presentación de estas conclusiones se realiza en dos partes:

- Conclusiones del estudio en régimen elástico.
- Conclusiones del estudio en régimen plástico.

### **6.1. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EN RÉGIMEN ELÁSTICO.**

El estudio en régimen elástico de cordones en uniones a solape se ha basado fundamentalmente en la fase teórica realizada mediante elementos finitos, ya que en la fase experimental la instrumentación de las probetas ensayadas en laboratorio no da información suficiente sobre el comportamiento de los cordones en régimen elástico.

En el estudio en régimen elástico mediante elementos finitos el número de modelos investigados ha sido amplísimo, de manera que se recogen todas las variables que determinan y modifican el proceso de transmisión de tensiones a través del cordón. Estas variables que intervienen son la longitud del cordón de soldadura, las dimensiones del ancho y espesor de las chapas que forman la unión, y también el espesor del cordón.

En los modelos por tanto se ha jugado con todas estas variables:

- Longitud del cordón
- Espesor de garganta del cordón
- Anchura de la chapa central
- Anchura de las chapas exteriores
- Espesor de la chapa central
- Espesor de las chapas exteriores



A continuación se presentan las conclusiones del estudio realizado.

**6.1.1. Comportamiento en régimen elástico al aumentar la longitud del cordón, manteniendo constantes otras variables del modelo.**

En el gráfico 1 se presenta la fuerza máxima soportada por cada uno de los cordones de la unión estudiada a solape, para longitudes de cordón crecientes, desde 5 cm. hasta 120 cm. Este estudio se ha realizado para dos grupos de modelos: uno con anchura de chapas pequeña (**modelos estrechos**) y otro con anchura de chapas grande (**modelos anchos**), ya que se han observado importantes diferencias de comportamiento entre unos y otros.

En los **modelos estrechos** estudiados las tres chapas que forman la unión son de pequeña anchura, concretamente:

- 16 cm. de anchura para las 2 chapas exteriores.
- 20 cm. de anchura para la chapa central.

En los **modelos anchos** estudiados las tres chapas que forman la unión son de anchura muy superior, concretamente:

- 196 cm. de anchura para las 2 chapas exteriores.
- 200 cm. de anchura para la chapa central.

El resto de variables geométricas fijas en los modelos son las siguientes:

- Longitud de cordón: 30 cm.
- Espesor de cordón: 4 mm.
- Espesor de chapa central: 40 mm.
- Espesor de chapas exteriores: 40 mm.

La fuerza máxima soportada se ha presentado según los dos criterios de resistencia establecidos en el Eurocódigo3:

- **Criterio 1** (o de tensiones tangenciales paralelas al eje del cordón y actuando en el plano de garganta).

- **Criterio 2** (o de tensiones de comparación actuando en el plano de garganta).

Por otra parte, las Normas EM-62 y el Eurocódigo3 señalan la existencia de un límite en la longitud de los cordones en uniones soldadas a solape que transmitan fuerzas paralelas al eje del cordón. Este concepto de longitud eficaz es muy dispar según las dos Normas:

- Según la EM-62  $\Rightarrow$  Longitud eficaz =  $60 \cdot a$ , siendo "a" el espesor de garganta.
- Según el Eurocódigo3  $\Rightarrow$  Longitud eficaz =  $150 \cdot a$ , siendo "a" el espesor de garganta.

En el estudio se han empleado cordones de 4 mm. de espesor de cordón de garganta, y los límites en la longitud de los cordones según estas dos Normas son:

- Norma E.M.62  $\Rightarrow$  Longitud eficaz =  $60 \times 4 = 240 \text{ mm} = 24 \text{ cm}$ .
- Norma Eurocódigo3  $\Rightarrow$  Longitud eficaz =  $150 \times 4 = 600 \text{ mm} = 60 \text{ cm}$ .

Así, se representan los dos límites de la longitud eficaz dados por la antigua Norma Española E.M. 62 y el actual Eurocódigo3.

A continuación se presenta el **gráfico 1** con todos estos resultados.

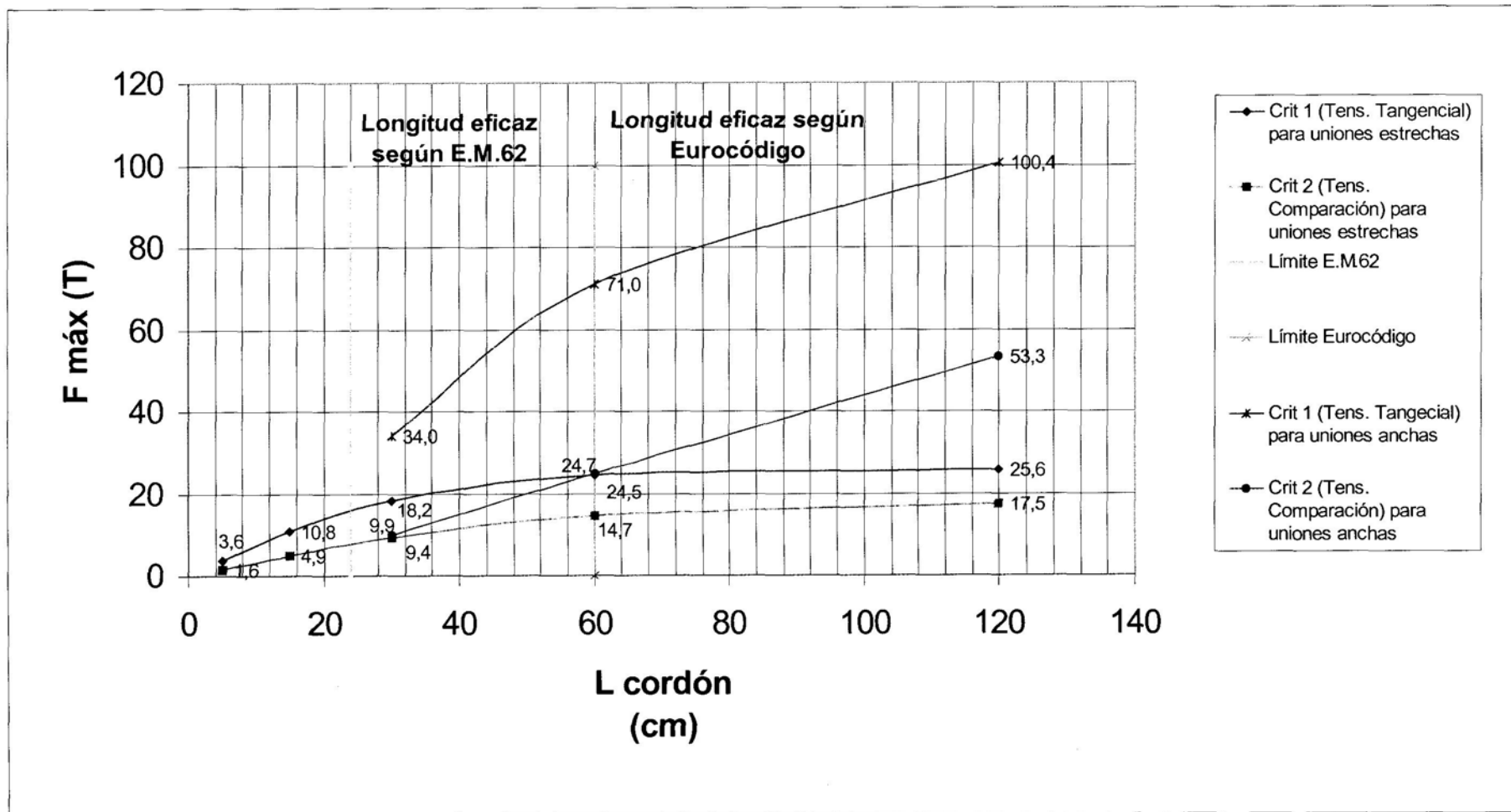


Gráfico 1

Del gráfico observado extraemos las siguientes conclusiones:

1ª) En las curvas correspondientes a **modelos estrechos** se observa cómo en régimen elástico existe una longitud límite o longitud eficaz a partir de la cual el cordón ya no resiste más carga. Esto es debido a que a partir de una cierta longitud el cordón ya no trabaja en su zona central. Por más que aumentemos dicha longitud, la unión se agota al alcanzarse la tensión de plastificación en su extremo, lo cual se observa adoptando tanto el Criterio 1 (de tensiones tangenciales) como el Criterio 2 (de tensiones de comparación). Dicha longitud límite del cordón coincide aproximadamente con el criterio de longitud eficaz dado por el Eurocódigo3, es decir 150 veces el espesor de garganta. El límite dado por la E.M.62 (60 veces el espesor de garganta) es demasiado conservador.

2ª) En las curvas correspondientes a **modelos anchos** se observa claramente cómo incluso el límite recomendado por el Eurocódigo3 se queda muy del lado de la seguridad, es decir en modelos anchos el cordón presenta una punta de tensión mucho más baja en sus extremos, trabajando bastante en su zona central. Esta menor punta de tensión máxima en sus extremos se traduce en una mayor capacidad resistente de estos cordones pertenecientes a modelos anchos, frente a los cordones vistos anteriormente de modelos estrechos, tal y como muestran las fuerzas máximas resistidas para una misma longitud en ambos tipos de modelos. Observamos además otro hecho en estos modelos anchos: las fuerzas máximas resistidas tomando el Criterio 2 (de tensiones de comparación) son bastante menores que las fuerzas máximas resistidas adoptando el Criterio 1 (de tensiones tangenciales). Esto es debido a que las tensiones de comparación crecen en modelos anchos debido a que actúan tensiones transversales más fuertes, perpendiculares al eje del cordón. En modelos estrechos sin embargo dichas tensiones transversales son más moderadas, y las fuerzas máximas adoptando los Criterios 1 y 2 son más parecidas para modelos estrechos.

3ª) Ante cargas estáticas el cordón presenta una gran capacidad de plastificación, como veremos en las conclusiones del estudio en régimen plástico. No obstante, en uniones de elementos estructurales sometidos a cargas cíclicas de valores elevados (como en uniones para puentes metálicos ferroviarios) donde interesa un trabajo en régimen elástico del cordón para evitar problemas de fatiga, el concepto de longitud eficaz debe ser tenido en cuenta a la hora de dimensionar la longitud de los cordones.

**6.1.2. Comportamiento en régimen elástico al aumentar la diferencia de anchura entre las chapas que forman la unión, manteniendo constantes otras variables del modelo.**

En este apartado se estudió en régimen elástico la transmisión de tensiones y la fuerza máxima soportada por el cordón, para un aumento de la diferencia entre anchuras de la chapa central y las chapas exteriores que forman la unión. Concretamente se han estudiado en régimen elástico las tensiones en el cordón al ir aumentando progresivamente la anchura de la chapa central, manteniendo fija la anchura de las chapas exteriores. Se han estudiado 4 modelos, los cuales presentan 16 cm. de anchura de chapas exteriores, y anchura de chapa central creciente: 20 cm, 30 cm, 40 cm y 80 cm.

Por tanto las relaciones anchura chapa central/anchura chapas exteriores son:

$$b_1/b_2 = 20/16 = 1.25$$

$$b_1/b_2 = 30/16 = 1.875$$

$$b_1/b_2 = 40/16 = 2.5$$

$$b_1/b_2 = 80/16 = 5.0$$

El resto de variables geométricas fijas en los modelos son las siguientes:

- Longitud de cordón: 30 cm.
- Espesor de cordón: 4 mm.
- Espesor de chapa central: 40 mm.
- Espesor de chapas exteriores: 20 mm.

En el **gráfico 2** se presenta el cociente entre las tensiones tangenciales existentes en ambos extremos del cordón. El extremo 2 del cordón pertenece al lado donde se aplica la fuerza en la chapa exterior, y el extremo 1 pertenece al lado donde se aplica la fuerza en la chapa central.

Y en el **gráfico 3** se presenta la fuerza máxima soportada por cada uno de los cordones de la unión estudiada a solape, según los dos criterios de resistencia establecidos en el Eurocódigo3:

- **Criterio 1 (o de tensiones tangenciales paralelas al eje del cordón y actuando en el plano de garganta).**
- **Criterio 2 (o de tensiones de comparación actuando en el plano de garganta).**

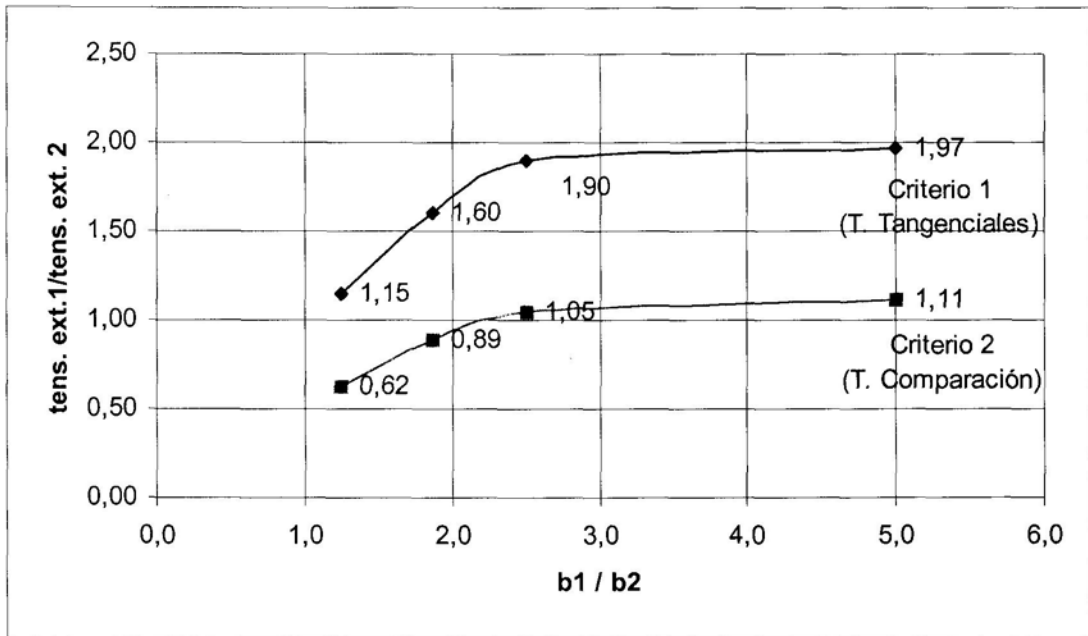


Gráfico 2

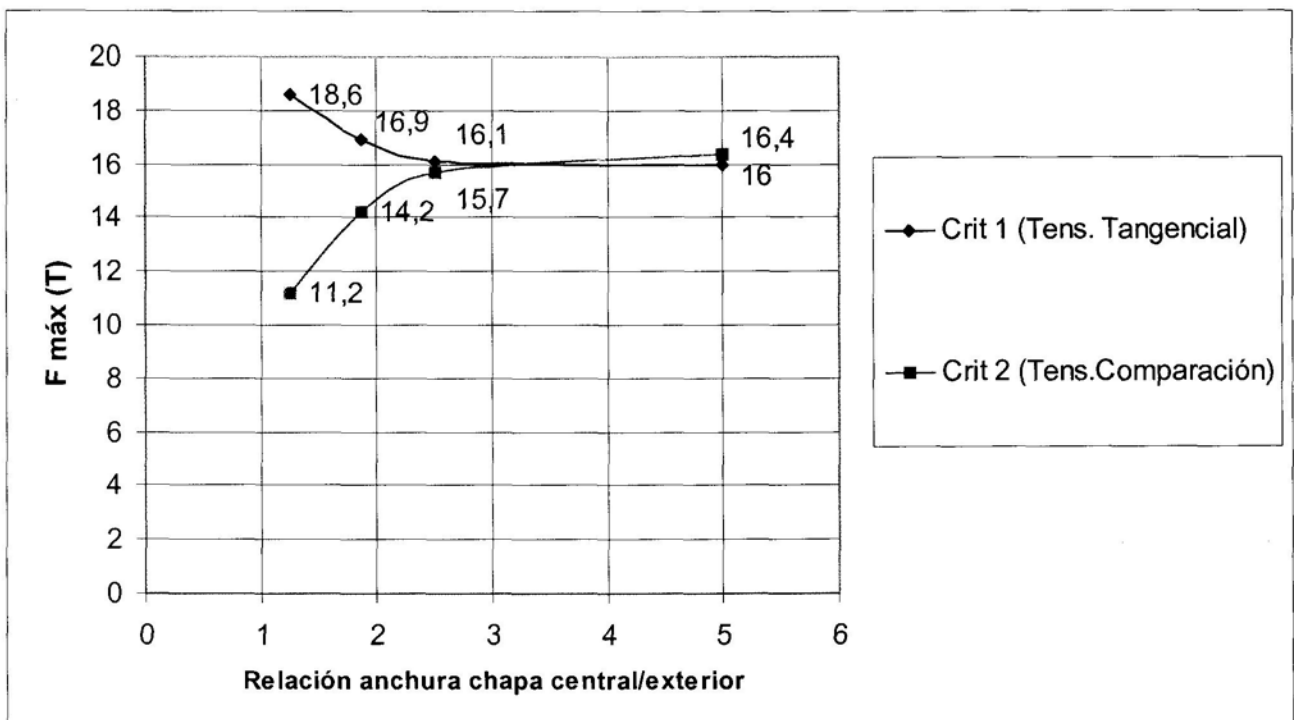


Gráfico 3

De los gráficos observados extraemos las siguientes conclusiones:

1ª) **A medida que crece la diferencia entre la anchura de chapas que forman la unión, las tensiones (tanto las tangenciales como las de comparación) crecen en el extremo del cordón del lado donde se aplica la fuerza en la chapa exterior (extremo 2), y decrecen en el extremo del cordón del lado donde se aplica la fuerza en la chapa central (extremo 1). Es decir, decrecen las tensiones del lado de la chapa cada vez más rígida. Este crecimiento de tensiones en un extremo y disminución en el otro se estabiliza, de manera que a partir de una determinada anchura de la chapa central, por más que aumente la diferencia de anchura entre ambas chapas, se mantienen constantes las tensiones en ambos extremos.**

2ª) **Si adoptamos para la fuerza máxima soportada por el cordón en régimen elástico el Criterio 1 (o de tensiones tangenciales) el cordón resiste más fuerza cuanto más se parezcan las anchuras de ambas chapas, disminuyendo la fuerza que resiste a medida que aumenta la diferencia de anchura entre chapas. Este hecho se recoge en diversos trabajos de investigación (Faltus, Fischer, Rua), y es debido al aumento progresivo de las tensiones tangenciales que actúan en el plano de garganta en el extremo del cordón del lado donde se aplica la fuerza en la chapa exterior, menos rígida (extremo 2), a medida que crece esta diferencia de anchura entre chapas. No obstante, a partir de una cierta relación entre anchura de chapas, por más que crezca esta diferencia de anchuras, la fuerza resistida por el cordón se mantiene constante como se observa en el gráfico 3, ya que no crecen las tensiones tangenciales.**

3ª) **Si adoptamos para la fuerza máxima soportada por el cordón en régimen elástico el Criterio 2 (o de tensiones de comparación) el cordón resiste más fuerza cuanto mayor sea la diferencia de anchura de chapas pero igualmente y a partir de una cierta relación entre anchura de chapas, por más que crezca esta diferencia de anchuras, la fuerza resistida máxima por el cordón se mantiene constante, y es muy similar a la fuerza que resiste tomando el Criterio 1 (de tensiones tangenciales).**

Como vemos, con el **Criterio 2** de tensiones de comparación la fuerza máxima resistida por la unión crece al principio al aumentar la diferencia de anchura de chapas, lo cual puede parecer extraño. Esto es debido a que las tensiones de comparación crecen en un extremo del cordón y disminuyen en el otro, teniendo en el extremo más cargado una máxima tensión de comparación menor en esta transición, hasta que a partir de una determinada

relación de anchura de chapas, la máxima tensión de comparación en el extremo en el que van creciendo se hace mayor. El aumento de las tensiones de comparación en el extremo más cargado es debido al aumento de las componentes de tensiones transversales al eje del cordón, las cuales dejan ya de crecer por encima de una cierta relación de anchura de chapas.

4ª) Tanto adoptando el **Criterio 1** como adoptando el **Criterio 2**, la fuerza resistida se mantiene constante a partir de la relación entre anchuras  $b_1/b_2 \approx 2.5$



**6.1.3. Comportamiento en régimen elástico al aumentar la anchura de ambas chapas, manteniendo constantes otras variables del modelo.**

En este apartado se analizó cómo influye en el desarrollo de las tensiones el aumento progresivo de la anchura del conjunto de las chapas que forman la unión, viendo en régimen elástico la transmisión de tensiones y la fuerza máxima soportada por el cordón.

El estudio se realizó para dos longitudes de cordón, ya que se han encontrado diferencias notables de comportamiento entre cordones de mediana longitud y cordones de gran longitud. Así se estudiaron dos grupos de modelos:

- el primero con cordones de longitud  $L = 30$  cm.
- el segundo con cordones de longitud  $L = 120$  cm.

El resto de variables geométricas fijas en los modelos son las siguientes:

- Espesor de cordón: 4 mm.
- Espesor de chapa central: 40 mm.
- Espesor de chapas exteriores: 40 mm.

A continuación se presenta el **gráfico 4** donde se observa, para los dos grupos de cordones estudiados, la fuerza máxima resistida por la unión en función de la anchura media de las chapas que forman la unión, para los dos criterios de rotura establecidos en el Eurocódigo.

En el **gráfico 5** se observa el cociente entre la tensión tangencial máxima en el extremo más solicitado del cordón y la tensión tangencial mínima en su zona central, para los dos grupos de cordones estudiados.

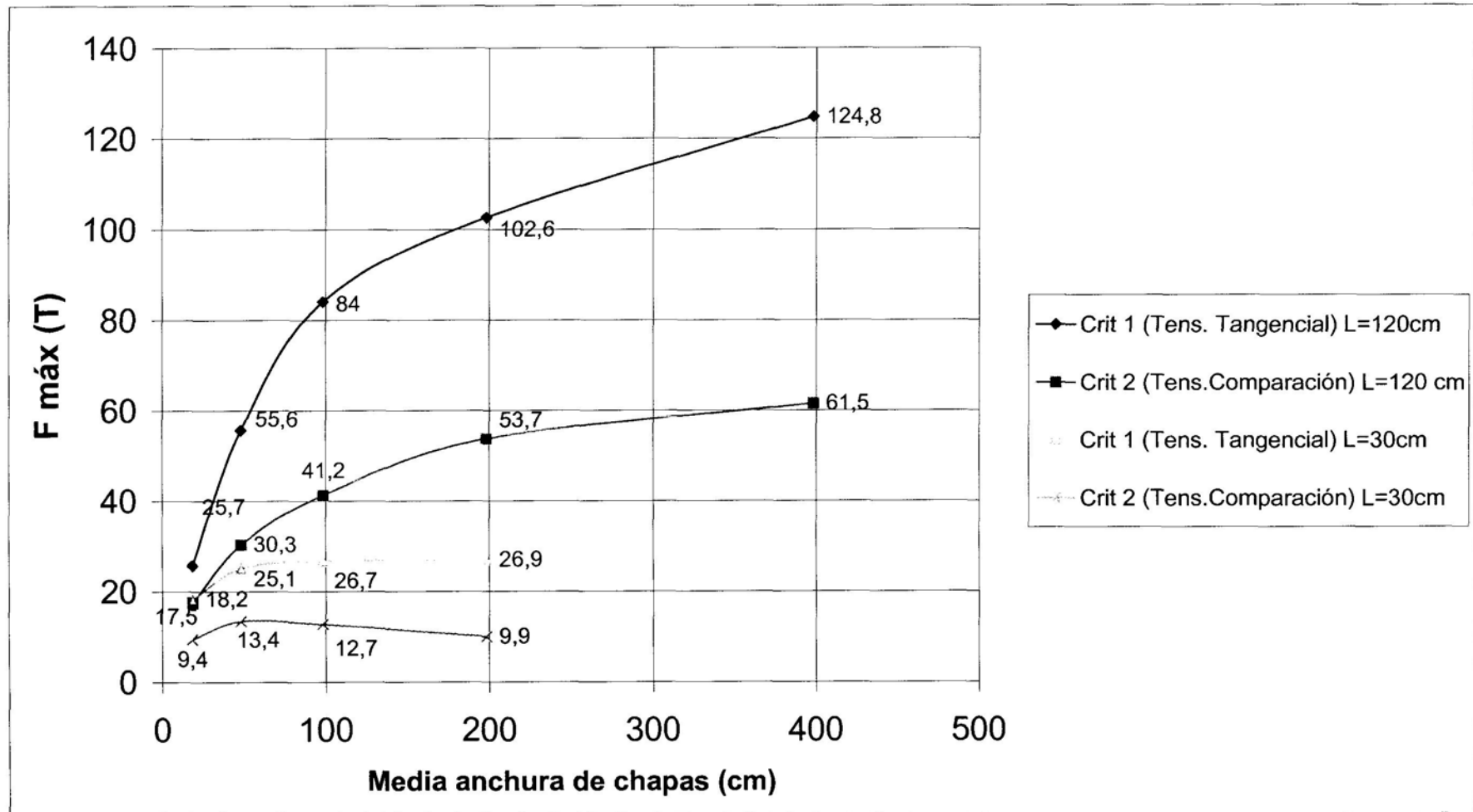


Gráfico 4

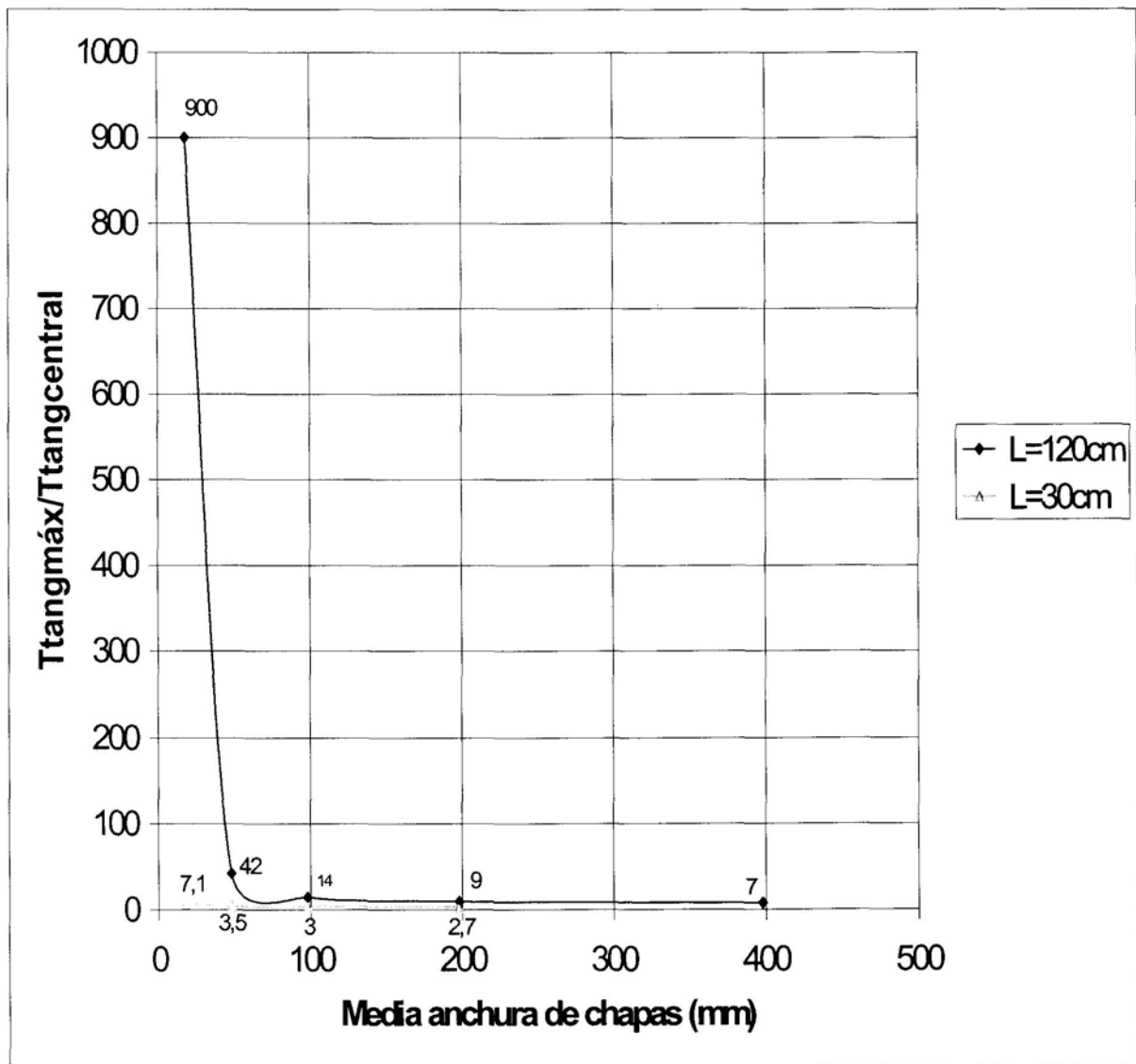


Gráfico 5

De las curvas presentadas se deducen las siguientes conclusiones:

1ª) El empleo en la unión de chapas de mayor anchura produce un trabajo más uniforme del cordón en toda su longitud, disminuyendo los picos de tensiones en sus extremos y aumentando la carga soportada por el cordón en su parte central. En cordones muy largos, como se observa en el gráfico 5 para el segundo grupo de modelos estudiados con  $L=120$  cm., el progresivo aumento de carga en su zona central es mucho mayor al aumentar la anchura de las chapas, que para el caso de cordones más cortos.

2ª) El aumento de la anchura de chapas en la unión hace crecer las componentes de tensión transversales al eje del cordón, siendo menor por tanto la fuerza máxima resistida adoptando el Criterio 2 (de tensiones de comparación) que adoptando el Criterio 1 (de tensiones tangenciales). En el grupo de cordones de menor longitud ( $L=30$  cm) se ve cómo a partir de una cierta anchura de chapas (gráfico 4), dichas componentes transversales son tan grandes que invierten el signo de las tensiones de comparación, empezando estas a crecer, y disminuyendo por tanto ligeramente la fuerza máxima soportada por el cordón si consideramos el Criterio 2 (de tensiones de comparación) del Eurocódigo 3.

3ª) El aumento de la anchura de chapas en la unión hace disminuir siempre los picos de tensiones tangenciales en los extremos del cordón; por tanto si consideramos el Criterio 1 del Eurocódigo, la carga máxima en régimen elástico crece indefinidamente con el aumento de la anchura de las chapas que forman la unión. No obstante, en el grupo de cordones de menor longitud ( $L=30$  cm) a partir de un valor en la relación (anchura de chapas/longitud del cordón) = 2 aproximadamente, las tensiones tangenciales en los extremos del cordón disminuyen muy poco, y por tanto por más que aumentemos la anchura de chapas la carga máxima en régimen elástico no aumenta apenas.

**6.1.4. Comportamiento en régimen elástico al aumentar el espesor de la chapa central, manteniendo constantes otras variables del modelo.**

En este apartado se estudió cómo influye en el desarrollo de las tensiones el aumento progresivo del espesor de la chapa central que forma la unión, en régimen elástico.

Los espesores estudiados han sido:

- $t_1 = 20$  mm.
- $t_1 = 30$  mm.
- $t_1 = 40$  mm.
- $t_1 = 60$  mm.
- $t_1 = 80$  mm.

El resto de variables geométricas fijas en los modelos son las siguientes:

- Longitud de cordón: 30 cm.
- Espesor de cordón: 4 mm.
- Espesor de chapas exteriores: 20 mm.
- Anchura de chapa central: 20 cm.
- Anchura de chapas exteriores: 16 cm.

En el **gráfico 6** se representa el cociente entre las tensiones tangenciales que se producen entre ambos extremos del cordón, al aumentar el espesor de la chapa central. El extremo 1 del cordón es el situado del lado de la chapa central y el extremo 2 es el situado del lado de las chapas exteriores.

En el **gráfico 7** observamos la fuerza máxima resistida por el cordón en régimen elástico, en función igualmente del espesor de la chapa central, para los dos criterios establecidos en el Eurocódigo.

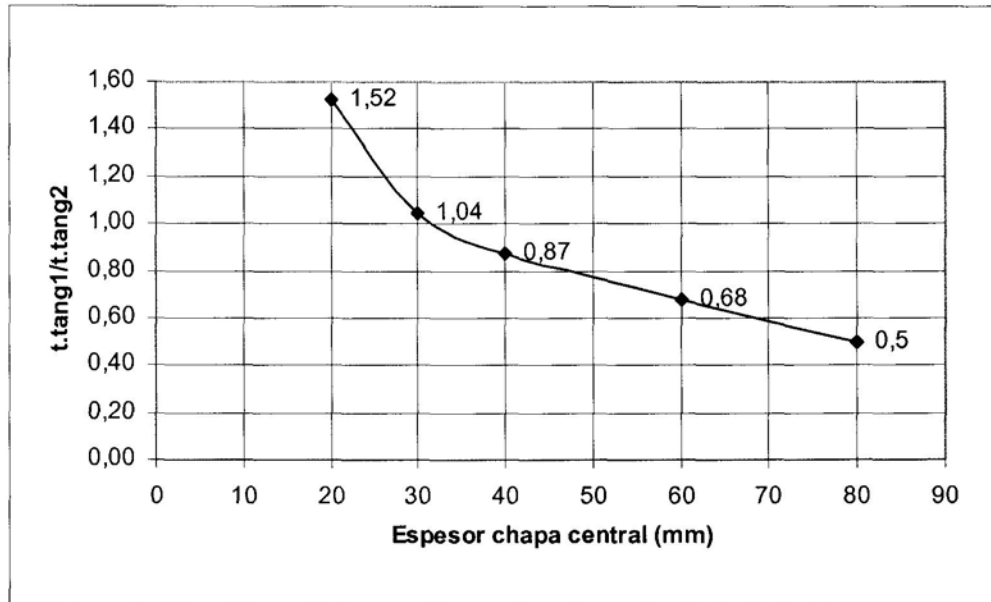


Gráfico 6

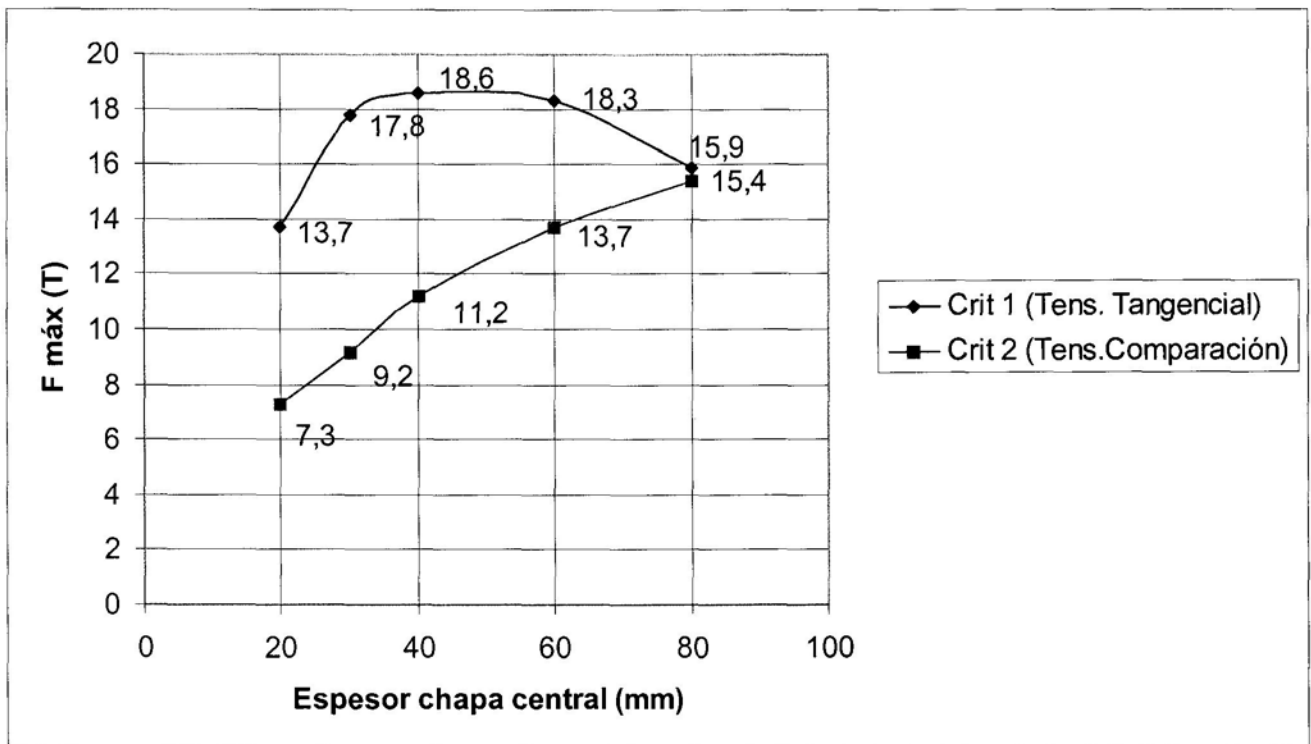


Gráfico 7

De las curvas presentadas se deducen las siguientes conclusiones:

1ª) A medida que crece el espesor de la chapa central disminuyen las tensiones en el extremo del cordón que se une a la chapa central (extremo 1) y crecen las tensiones en el extremo del cordón que se une a las chapas exteriores (extremo 2). Es decir, **decrecen las tensiones del lado de la chapa cada vez más rígida, que es la central.**

2ª) Para un espesor determinado de la chapa central las tensiones en ambos extremos del cordón se igualan, y por tanto el cordón trabajará más uniformemente, **alcanzándose la máxima carga en régimen elástico.** Esto se observa para la curva correspondiente al **Criterio 1** (tensiones tangenciales) del gráfico 7. Para la curva correspondiente al **Criterio 2** (tensiones de comparación) no se llega a alcanzar esta fuerza máxima con los espesores estudiados, se alcanzaría con un espesor de chapa central superior a 80 mm.

6.1.5. Comportamiento en régimen elástico al aumentar el espesor de las chapas exteriores, manteniendo constantes otras variables del modelo.

En este apartado se estudió cómo influye en el desarrollo de las tensiones el aumento progresivo del espesor de las chapas exteriores que forman la unión, en régimen elástico.

Los espesores estudiados han sido:

- $t_2 = 10$  mm.
- $t_2 = 15$  mm.
- $t_2 = 20$  mm.
- $t_2 = 30$  mm.
- $t_2 = 40$  mm.

El resto de variables geométricas fijas en los modelos son las siguientes:

- Longitud de cordón: 30 cm.
- Espesor de cordón: 4 mm.
- Espesor de chapa central: 40 mm.
- Anchura de chapa central: 20 cm.
- Anchura de chapas exteriores: 16 cm.

En el **gráfico 8** se representa el cociente entre las tensiones tangenciales que se producen entre ambos extremos del cordón, al aumentar el espesor de la chapa exterior. El extremo 1 del cordón es el situado del lado de la chapa central y el extremo 2 es el situado del lado de las chapas exteriores.

En el **gráfico 9** observamos la fuerza máxima resistida por el cordón en régimen elástico, en función igualmente del espesor de la chapa exterior.



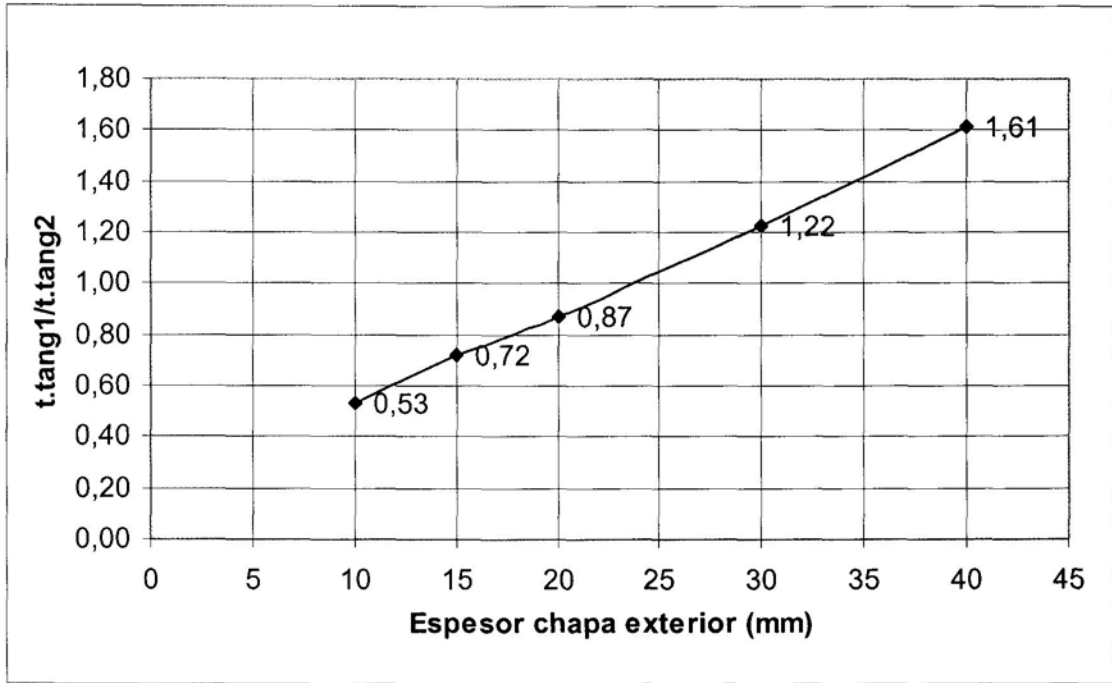


Gráfico 8

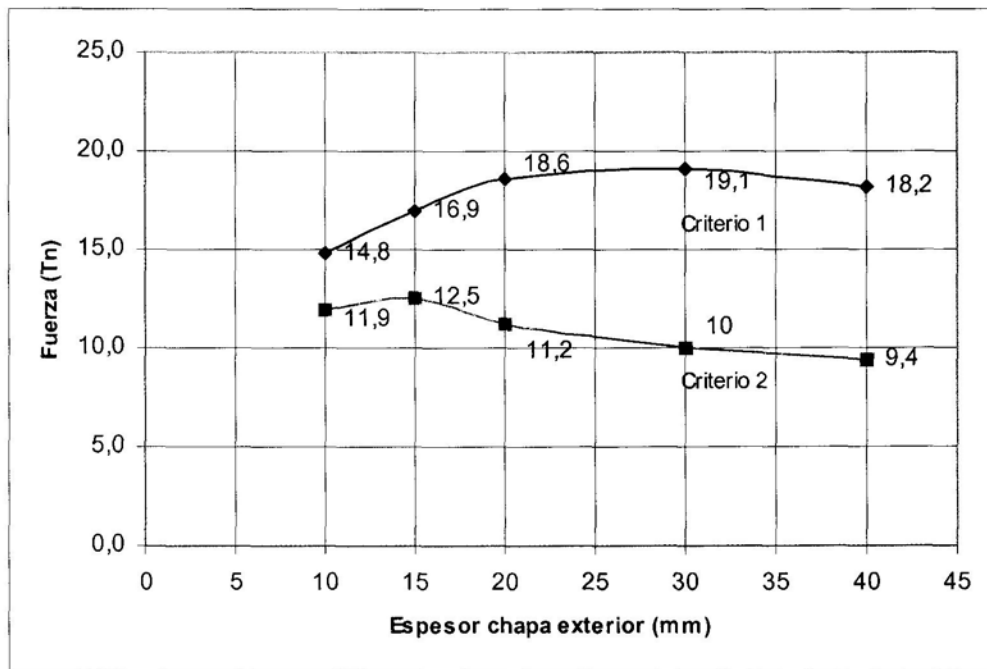


Gráfico 9

De las curvas presentadas se deducen las siguientes conclusiones:

1ª) A medida que crece el espesor de las chapas exteriores ocurre al contrario de lo que se observó en el caso anterior, es decir aumentan las tensiones en el extremo del cordón que se une a la chapa central (extremo1) y disminuyen las tensiones en el extremo del cordón que se une a las chapas exteriores (extremo 2). Es decir, decrecen las tensiones del lado de la chapa cada vez más rígida, que son las exteriores.

2ª) Para un espesor determinado de las chapas exteriores las tensiones en ambos extremos del cordón se igualan, y por tanto el cordón trabajará más uniformemente, alcanzándose la máxima carga en régimen elástico. Esto se observa en el gráfico 7 tanto para el Criterio 1 (tensiones tangenciales) como para el Criterio 2 (tensiones de comparación).

6.1.6. Comportamiento en régimen elástico al aumentar el espesor del cordón de garganta, manteniendo constantes otras variables del modelo.

En este apartado se estudió cómo influye en el desarrollo de las tensiones el aumento progresivo del espesor de garganta del cordón, en régimen elástico.

Los espesores estudiados han sido:

- $a = 4$  mm.
- $a = 8$  mm.
- $a = 12$  mm.
- $a = 16$  mm.

El resto de variables geométricas fijas en los modelos son las siguientes:

- Longitud de cordón: 30 cm.
- Espesor de chapa central: 40 mm.
- Espesor de chapas exteriores: 40 mm.
- Anchura de chapa central: 20 cm.
- Anchura de chapas exteriores: 16 cm.

En el gráfico 10 se representa la máxima fuerza soportada por el cordón, en función del espesor de garganta, según los dos criterios del Eurocódigo.

En el gráfico 11 observamos el cociente entre la tensión tangencial existente en el extremo más solicitado del cordón y la tensión tangencial mínima en su zona central, en función del aumento del espesor de garganta del cordón.

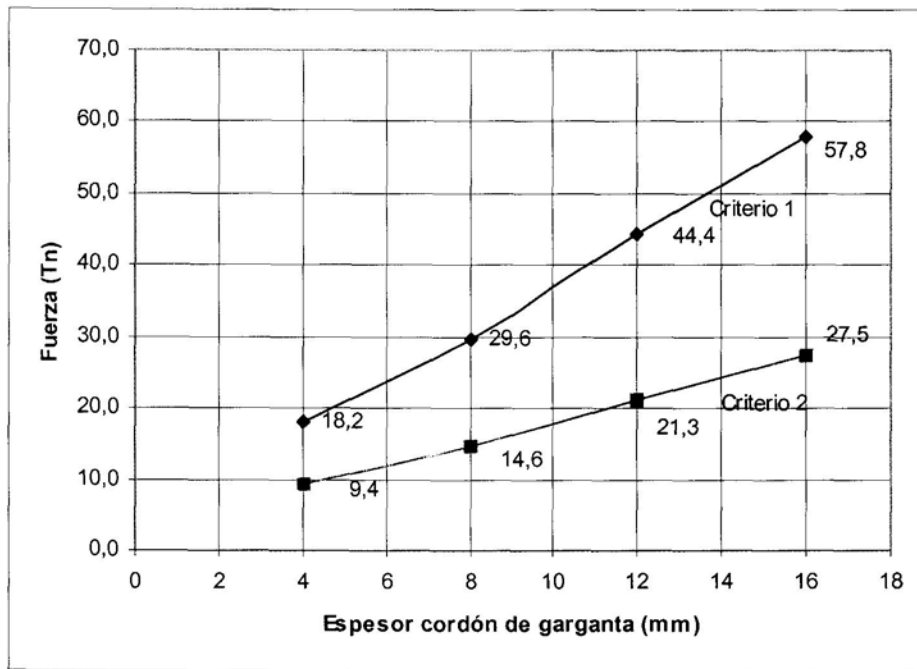


Gráfico 10

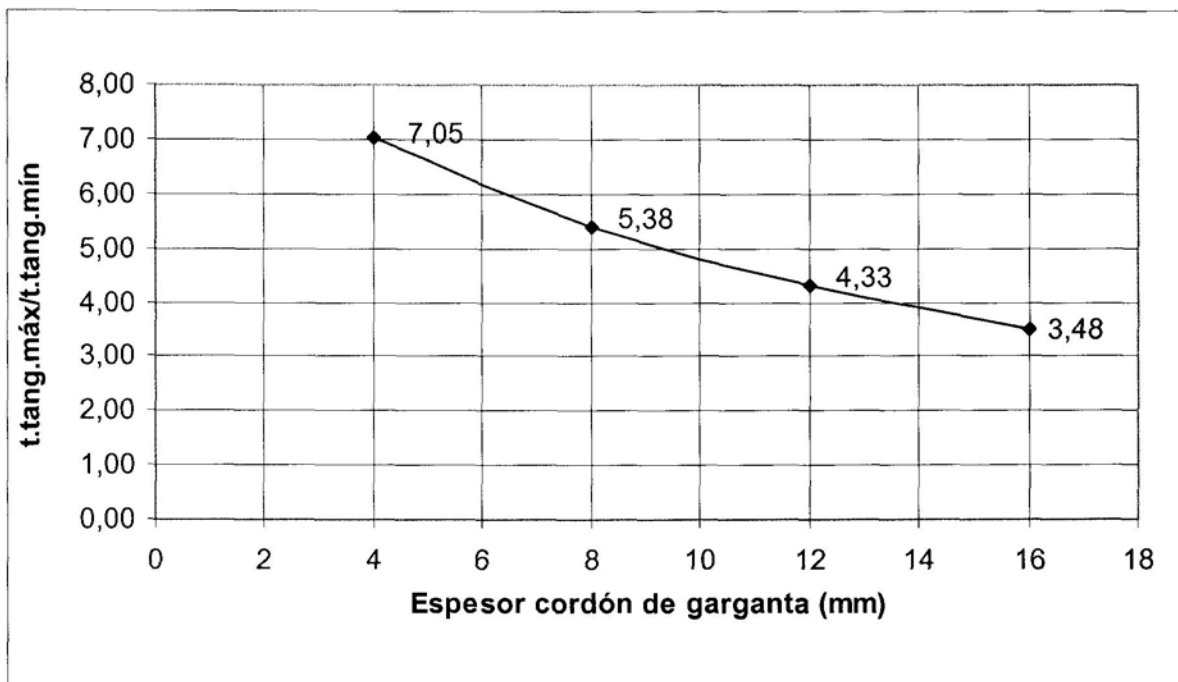


Gráfico 11

De las curvas presentadas se deducen las siguientes conclusiones:

1ª) A medida que crece el espesor de garganta del cordón éste trabaja más uniformemente, disminuyendo los picos de tensiones en sus extremos y aumentando la colaboración en la resistencia de esfuerzos del cordón en su zona central.

2ª) La máxima fuerza resistida por el cordón crece con el aumento del espesor del mismo, pero en los cálculos realizados la fuerza resistida en régimen elástico no es directamente proporcional al espesor del cordón, tal y como indican las Normas. Así, para un cordón de espesor  $a = 16$  mm. la máxima fuerza que debería resistir según las Normas sería 4 veces más que uno de 4 mm. En los cálculos realizados esta relación se encuentra en torno a 3. Fischer (1985) refleja cómo para cordones con grandes espesores de garganta la carga de rotura decrece proporcionalmente, tras realizar una serie de ensayos con cordones de 3, 6, 9 y 12 mm. de espesor. Así, para el mayor espesor de cordón estudiado por Fischer ( $a = 12$  mm) la máxima fuerza que debería resistir según las Normas sería 4 veces más que uno de 3 mm. En los ensayos realizados por Fischer esta relación se encuentra en torno a 2. No obstante, las conclusiones obtenidas por Fischer son en rotura.

## 6.2. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EN RÉGIMEN PLÁSTICO.

Comienzan estas conclusiones en régimen plástico presentando un cuadro donde se refleja un estudio comparativo de las cargas máximas de las uniones objeto de estudio. Se presentan los siguientes resultados:

- 1º: Carga de rotura según el Eurocódigo3, adoptando el Criterio 1 (de máxima tensión tangencial):

$$f_{vw} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{B_w \cdot \gamma_{Mw}}$$

en donde:

$f_{vw}$  es la resistencia a cortante de cálculo en el cordón de soldadura.

$f_u$  es la resistencia última nominal a tracción del cordón. Se toma este valor en vez de la resistencia de las chapas, con objeto de comparar con los resultados teóricos y experimentales el comportamiento del cordón.

$B_w = 1$  (siendo coherentes al adoptar la resistencia del cordón) y  $\gamma_{Mw} = 1$ .

- 2º: carga máxima según un cálculo teórico plástico hasta rotura con elementos finitos, imponiendo un límite a la deformación del cordón de  $\Delta x = 1.5$  mm., correspondiente a una deformación tangencial de  $\gamma = 0.5$  para cordones de garganta  $a = 3$  mm (modelos T) y  $\gamma = 0.375$  para cordones de garganta de  $a = 4$  mm (modelos M y S).

- 3º: relación entre la carga de rotura según el Eurocódigo y la carga máxima según el cálculo teórico plástico hasta rotura con elementos finitos.

- 4º: carga máxima de rotura en los ensayos.

	L(cm)	FUERZA (T)			
		Eurocódigo 3	Teórico E.F. Plástico	Eurocódigo 3 /E.F. Plástico	Experimental Ensayos
Modelo 1T	5	19.9	21.6	92.1%	33.92
Modelo 2T	10	39.8	44.0	90.5%	68.90
Modelo 3T	10	39.8	45.1	88.2%	70.88
Modelo 4T	10	39.8	43.8	90.8%	71.47
Modelo 5T	30	119.4	131.2	91.0%	NO ROMPIÓ
Modelo 1M	5	24.0	27.2	88.2%	35.4
Modelo 2M	15	72.0	103.8	69.3%	116
Modelo 3M	30	144.0	200.9	71.6%	188
Modelo 4M	30	144.0	198.7	72.4%	215
Modelo 5M	30	144.0	201.3	71.5%	194
Modelo 6M	60	288.0	384.0	75.0%	410
Modelo 7M	30	144.0	198.3	72.6%	203
Modelo 1S	5	30.7	34.0	90.3%	41
Modelo 2S	15	92.1	115.0	80.0%	110
Modelo 3S	30	184.2	233.1	79.0%	295
Modelo 4S	30	184.2	235.3	78.3%	307
Modelo 5S	30	184.2	233.7	78.8%	284
Modelo 6S	60	368.4	405.0	91%	NO ROMPIÓ
Modelo 7S	30	184.2	234.3	78.6%	285
Modelo LARGO S	120	736.8	712.0	103.4%	-
Modelo ANCHO S	30	184.2	231.4	79.6%	-

De la tabla anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1ª) Comparando la carga última según el Eurocódigo 3 y según el estudio teórico con elementos finitos plástico en tres dimensiones, se observa lo siguiente:

- En primer lugar para los modelos "T" los resultados son similares (con una coincidencia de entre el 88% y el 92%).

- Para los modelos "M" y "S" realizados con elementos finitos crecen las diferencias al pasar de cordones muy cortos de longitud  $L = 5$  cm. a cordones más largos de  $L = 15$  cm., señal de que se necesitaría discretizar aún más el modelo (No obstante, la discretización de los modelos fue altísima, empleando modelos con nº de elementos situado entre 7.000 y 8.000, y tiempos de cálculo en torno a las 50 horas.). Aún así, los cordones plastifican en su totalidad.
- Para los modelos "M" y "S" cuando se pasa de cordones de longitud  $L = 15$  cm. a cordones más largos de  $L = 30$  cm. y  $L = 60$  cm., las diferencias entre el valor del Eurocódigo y el del cálculo se reducen, a pesar de que al ser cordones más largos necesitarían aún más discretización. Esto es señal de que el concepto de longitud eficaz se hace patente; cuando se ha alcanzado la deformación máxima admisible en el extremo, ha dejado de trabajar una parte apreciable de la zona central del cordón . En el caso del modelo "S" de longitud de cordón  $L = 120$  cm. este hecho es mucho más evidente.

Comparando no obstante la carga última de los resultados teóricos con elementos finitos y los ensayos, se observan valores muy superiores de la carga de rotura en los ensayos.

Así las Normas EM-62 y el Eurocódigo 3 señalan la existencia de un límite en la longitud de los cordones en uniones soldadas a solape que transmitan fuerzas paralelas al eje del cordón. Este concepto de longitud eficaz es muy dispar según se contemple la antigua Norma Española EM-62 y el actual Eurocódigo 3.

Las longitudes eficaces en cordones según estas dos Normas son las siguientes:

- Longitud eficaz según la EM-62:  $60*a$ , siendo "a" el espesor de garganta.
- Longitud eficaz según el Eurocódigo 3:  $150*a$  , siendo "a" el espesor de garganta.



De este modo para los dos espesores de cordones empleados en este trabajo de investigación, el límite en la longitud de cordones sería el siguiente, según estas dos Normas:

- Cordon de garganta  $a = 3$  mm:
  - Norma E.M.62  $\Rightarrow$  Longitud eficaz =  $60 \times 3 = 180$  mm = 18 cm.
  - Norma Eurocódigo 3  $\Rightarrow$  Longitud eficaz =  $150 \times 3 = 450$  mm = 45 cm.
  
- Cordon de garganta  $a = 4$  mm:
  - Norma E.M.62  $\Rightarrow$  Longitud eficaz =  $60 \times 4 = 240$  mm = 24 cm.
  - Norma Eurocódigo 3  $\Rightarrow$  Longitud eficaz =  $150 \times 4 = 600$  mm = 60 cm.

Para cordones de  $L = 60$  cm. los resultados experimentales dan cargas últimas que corresponden a una longitud eficaz superior al 100%, ya que los cordones en el caso de la probeta 6M rompieron para una carga superior a la que plastifica todo el cordón y en el caso de la probeta 6S, aunque no llegó a romper, la prensa alcanzó una fuerza máxima de 456 toneladas, superior también a la fuerza que plastifica todo el cordón. Se deduce por un lado que la capacidad de plastificación de los cordones es muy grande, y por otro que existe una fuerza de rozamiento entre chapas que influye sustancialmente en la carga de rotura final de los cordones, rozamiento que no se ha tenido en cuenta en la modelización con elementos finitos, pero que se ha manifestado en los ensayos realizados. Dicho rozamiento entre chapas puede hacer aumentar la fuerza de rotura considerablemente.

Asumiendo la existencia de dicha fuerza de rozamiento, y comparando los resultados de los ensayos con los valores ofrecidos por el método teórico con elementos finitos parece que para cordones largos la longitud eficaz se acerca más a la indicada por el Eurocódigo 3 de 150 veces el espesor de garganta.

2ª) La influencia de las tensiones transversales al eje del cordón en uniones donde las chapas a unir presenten anchuras muy grandes, hecho que hace aumentar las tensiones de comparación en el plano de garganta (como hemos visto en las conclusiones del estudio elástico), apenas tienen influencia en la capacidad última de los cordones. Comparando los resultados teóricos de los modelos 5S (con anchuras de chapas central y exterior de 50 y 46

cm. respectivamente) y el modelo ANCHO (con anchuras de chapas central y exterior de 200 y 196 cm. respectivamente), las fuerzas máximas para el desplazamiento máximo admisible de  $\Delta x = 1.5$  mm. que agotan el cordón en un caso y en otro son prácticamente iguales.

3ª) El Eurocódigo establece dos criterios a la hora de estudiar el agotamiento de los cordones en uniones a solape:

- **Criterio 1:** de Tensión Tangencial Máxima actuante según el plano de garganta: considera las tensiones tangenciales contenidas en el plano de garganta ( $\tau_{xz}$ ), paralelas a la arista, que son las que equilibran las fuerzas exteriores que actúan sobre el conjunto de la unión.

$$f_{vw} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w * \gamma_{Mw}}$$

- **Criterio 2:** el de las Componentes de Tensión actuantes según el plano de garganta; según este criterio la plastificación del cordón empieza cuando se alcanza la tensión de comparación:

$$\sigma_{co} = \sqrt{\sigma^2 + 3 * (\tau_n^2 + \tau_a^2)}$$

De los ensayos y del estudio realizado con elementos finitos se deduce que las tensiones tangenciales paralelas al eje del cordón y contenidas en su plano de garganta (tensiones  $\tau_{xz}$ ), son las que determinan la capacidad última de los cordones, es decir, de los dos criterios de agotamiento establecido en el Eurocódigo3, el que gobierna la resistencia última de los cordones es el Criterio 1, o de Tensión Tangencial Máxima. Este hecho está relacionado directamente con la conclusión anterior, ya que un aumento de las tensiones transversales al eje del cordón, como ocurre en uniones con chapas muy anchas, hace aumentar la tensión de comparación en el plano de garganta, pero apenas tiene influencia en la capacidad última de los cordones. Por tanto el Criterio 2 o de las Componentes de Tensión establecido en el Eurocódigo3 no gobierna la resistencia última de los cordones en los modelos estudiados. Este razonamiento no obstante es válido en principio

para cargas estáticas. En caso de cargas dinámicas y procesos de fatiga, habría que estudiar la influencia de dichas tensiones transversales, en la carga última de los cordones.

4ª) El estudio tridimensional realizado de los cordones mediante elementos finitos muestra perfectamente el desarrollo de la plastificación del cordón en toda su longitud y espesor, poniéndose de manifiesto varios aspectos muy interesantes:

- 1º) En la dirección longitudinal del plano de garganta la plastificación del cordón no es homogénea, empezando en sus extremos y extendiéndose al centro del cordón.
- 2º) En la dirección transversal del plano de garganta la plastificación tampoco es homogénea, empezando en la arista interior que se une a las chapas, y acabando en la cara externa, cuando ya se ha llegado a un elevado porcentaje de la carga máxima de rotura. Este aspecto coincide plenamente con lo observado en los ensayos, siguiendo el proceso de fisuración de la cal depositada en la cara externa de los cordones.

Se ha puesto de manifiesto la bondad de la instrumentación empleada mediante flexímetros en la campaña de ensayos a compresión, recogiendo perfectamente el proceso de plastificación del cordón y coincidiendo plenamente con los resultados observados con el modelo teórico mediante elementos finitos. Asimismo, el empleo de cal en la cara externa de los cordones recoge perfectamente la última fase de la plastificación completa del cordón.

5ª) Las distintas Normas se encuentran excesivamente del lado de la seguridad al adoptar como resistencia del cordón la resistencia del metal base. Se propone emplear la resistencia correspondiente al metal de aportación empleado como material de soldadura, mucho más acorde con el comportamiento real de los cordones, tal y como se deduce de los ensayos y estudio teórico realizados para tres calidades distintas de cordón.

## **7. NUEVAS APORTACIONES. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.**

### **7.1. NUEVAS APORTACIONES.**

La presente tesis doctoral presenta las siguientes aportaciones al cálculo de uniones soldadas:

- Ofrece el primer estudio del que se tenga conocimiento mediante elementos finitos modelizando en tres dimensiones los volúmenes de chapa y cordón, para uniones soldadas a solape sometidas a cargas estáticas paralelas al eje del cordón. Esto permite estudiar un desarrollo más coincidente con la realidad de las tensiones y deformaciones a través de toda la longitud y todo el espesor del plano de garganta.
- Dicho modelo permite estudiar todas las variables geométricas que afectan a la distribución y transmisión de las tensiones entre chapas y cordón, asunto tratado sólo parcialmente en publicaciones anteriores.
- Realiza el primer estudio contrastado de uniones largas, mediante el empleo de elementos finitos y ensayos de laboratorio, estudiando la longitud eficaz para cordones de gran longitud, tanto en régimen elástico como plástico hasta rotura.

### **7.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.**

La presente investigación ha abierto nuevas puertas para futuros estudios. Las nuevas líneas a desarrollar que se proponen son las siguientes:

- Investigar la influencia que la concentración de tensiones, en el caso de uniones largas o de rigideces muy distintas entre chapas, presenta en estructuras sometidas a fatiga.
- Investigar asimismo la influencia que la concentración de tensiones, en el caso de uniones largas o de rigideces muy distintas entre chapas, presenta en estructuras sometidas a cargas dinámicas.

- Relacionar y estudiar el proceso de concentración de tensiones en los extremos de uniones soldadas con los fenómenos de rotura relacionados con la mecánica de fractura.
  
- Estudiar la influencia del rozamiento entre las chapas a solape unidas por el cordón, ya que dicho rozamiento hace aumentar sensiblemente la fuerza de rotura de la unión; este rozamiento está originado por tres factores:
  - Las deformaciones que sufre el conjunto de la unión después del enfriamiento del cordón en el proceso de soldadura.
  - La curvatura que sufren las chapas al aplicar las fuerzas que solicitan la unión en sus extremos, haciendo que las chapas entren en contacto en la zona solapada.
  - El efecto Poisson o deformación transversal de las chapas al aplicar las cargas que solicitan la unión, que hace que entren en contacto las mismas.

PUBLICACIONES Y BIBLIOGRAFÍA

- **AISC (1983):** "Manual of Steel Construction", Chicago.
- **Ansys (1998)**, Revisión 5.5. Versión Universitaria. Swanson Analysis Systems, Inc.
- **Ballio, G. y Mazzolani, F.M. (1983):** "Theory and Design of Steel Structures". Londres.
- **Bierett, G., Grüning, G. (1933):** "Spannungszustand und Festigkeit von Stirnkehlnahtverbindungen". *Stahlbau* 6 . H. 22, S. 169/73.
- **Bornscheuer, F.W.; Feder, D. (1966):** "Traglastversuche an Laschenverbindungen aus St 37 mit Flanken-und Stirnnähten". *Schw. Schn.* 18, H.7, S. 305/308.
- **Butler, L.J.; Kulak, G.L. (1971):** "Strenght of Fillet Welds as a Function of Direction of Load", *Welding Journal*.
- **Butler, Lorne J.; Shubendu Pal; Kulak G.L. (1972):** "Eccentrically loaded welded connections", *J. Of Structural Division*, ASCE.
- **Cañas J., Picón R., París F., Marín J., Blázquez A. (1998):** "Sobre los criterios de agotamiento de uniones en ángulo sometidas a sollicitaciones estáticas", *Comunicación Privada*, Sevilla.
- **Chen, W.F.; Han, D.J. (1988):** "Plasticity for Structural Engineers". *Springer-Verlag*, Berlín.
- **Clark, P.J. (1971):** "Basis of Design for Fillet Welded Joints under Static Loading". *Proceed. Of Conference on Improving Welded Product Design, Wdg. Inst. Abington*.

- **Comisión XV IIW (1976):** “Design rules for arc-welded connexions in steel submitted to static loads“, *Welding in the World*.
  
- **Comisión XV IIW (1981):** “Recommended practice for testing the strength of fillet welds in structural steels and aluminium alloys“, *Welding in the World*.
  
- **Comisión XV IIW (1981):** “Deformation curves of fillet welds“, *Welding in the World*.
  
- **Dawe, John; Kulak G.L. (1972):**”Welded connections under Combined Shear and Moment“, *J. Of Structural Division, ASCE*.
  
- **EA-95:** Normativa Española para Cálculo de Estructuras de Acero. Ministerio de Fomento.
  
- **Elliott, K.S. (1996); Fessler H.:** ”Elastic-plastic strain distributions at fillet welds“. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Vol 31, NO3. Pág. 215-230.
  
- **Eurocódigo 3 (1992):** Normativa Europea para Diseño y Cálculo de Estructuras de Acero. *Edit. Group*.
  
- **Faltus, F. (1986):** “Joints with Fillet Welds“. *Elsevier*.
  
- **Feder, Diethelm; Werner, Gerhard (1967):** “Einfluß der Nahtdicke auf die statische Festigkeit von Kehlnähten. Schw. Schn. 19, H.7, S. 299/305.
  
- **Feder, Diethelm; Werner, Gerhard (1977):** “Ansätze zur Traglastberechnung von Schweißverbindungen des Stahlbaus (Expresiones para cálculo de uniones soldadas en estructuras metálicas)“, *Schweißen und Schneiden Jahrgang*.

- **Fischer, Mafree; Wenk, Peter (1990):** “Taglastuntersuchungen an vorwiegend ruhend beanspruchten langen Flankenkehlnähten (Investigación de la carga última en cordones de soldadura en ángulo largos sometidos a carga estática)”, *Der stahlbau*.
- **Kamtekar, A.G. (1984):** “The Strenght of Planar Fillet Weld Groups Subjected to a Shearing Force Applied Outside Their Planes”, *J. Construct. Steel Research*.
- **Kamtekar A.G. (1987):** “The Strenght of Inclined Fillet Welds”, *J. Construct. Steel Research*.
- **Kulak, G.L.; y Baker, K.A (1987):** “Fatigue Strenght of a Groove Weld on Steel Backing”, *J. Construct. Steel Research*.
- **Lehnhoff, Therry F.; Green, Gerald W. (1985):** “Fillet Weld Stress Using Finite Element Methods”, *NASA Conference Publication*. Washington DC.
- **Neis, Vernon V. (1985):** “New Constitutive Law for Equal Leg Fillet Welds”, *J. Of Structural Division*, ASCE.
- **Oñate, E. (1992):** ”Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. Análisis estático lineal”. *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Barcelona.
- **Owen, D.R.J.; Hinton, E. (1980):** “Finite Elements in Plasticity:Theory and Practice”. *Pineridge Press Ltd*, Swansea.
- **Pérez Calero, J.L.; Saura Martínez, J. (1995):** “Estudio comparativo de los criterios de agotamiento propuestos en la Normativa Española, el método  $\beta$  y el Eurocódigo, para uniones soldadas en ángulo, ante cargas estáticas, en la edificación”. *Revista Hormigón y Acero*, No. 197, pág 21-25.
- **Quintero, F. (1993):** “Estudio mediante elementos finitos de cordones de soldadura en ángulo”, *Comunicación privada*, Madrid.



- **Rúa Alvarez, E. (1992):** "Estudio Teórico y Experimental de Uniones Soldadas en Angulo", *Comunicación privada*, Madrid.
  
- **Strating, J.; Van Douwen A.A.; Van't Hullenaar J.W.; Wagemans L.A.G.:** "The influence of a longitudinal stress on the strength of fillet welds". *IIW-Dok. XV-315-71 u. Rep. 6-71-7, Stevin laboratory, Delft University of Technology.*
  
- **Swannell, Peter (1981):** "Rational Design of Fillet Weld Groups", *J. Of Structural Division*, ASCE.
  
- **Swannell, Peter (1981):** "Weld Group Behaviour", *J. Of Structural Division*, ASCE. Mayo.
  
- **Weiskopf, W.H., Male M. (1930):** "Stress Distribution in Side-welded Joints". *Wdg. J. Res. Suppl*, 9.
  
- **Westergaard, H.M. (1952):** "Theory of Elasticity and Plasticity". *John Wiley&Sons*, New York.
  
- **Zienkiewicz, O.C. (1980):** "El método de los elementos finitos". *Ed. Reverté*, Barcelona.

**ANEJOS**

**ANEJO N°1:**

**CERTIFICADOS DE CALIDAD DE MATERIALES EMPLEADOS EN LOS  
CORDONES ENSAYADOS**

Anejo nº1. Certificados de calidad de materiales empleados en los cordones ensayados

Cordón empleado en los modelos ensayados a tracción:

**UNION IBERICA DE SOLDADURA, S.A.**

Avenida de Portugal, 76  
GIJON (Asturias)  
ESPAÑA

Tel.: 98 - 534 36 00  
Fax.: 98 - 535 86 48

Cliente / Customer :  
UNION IBERICA DE SOLDADURA, S.A.  
Asturias, nº 9 A  
41010 - SEVILLA

**CERTIFICADOS DE ENSAYOS**  
Test Certificate

Certificado Nº/Cert. no.: 10198      Nº Pedido/Order no.:  
Nº Fabricación/Fabr. no.: 46023304      Colada/Heat:  
Producto/Product: UZ e      Diámetro/Diameter: 4.0  
Norma/Specification: ASME SEC. II Parte C; SFA 5.1      Clasificación/Classification: E 6013

ANÁLISIS QUÍMICO / Chemical Analysis									
C	Si	Mn	S	P					
0.076	0.314	0.443	0.011	0.016					

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS / Mech. Properties						
L. ELÁSTICO yield point N/mm <sup>2</sup>	R. A TRACCIÓN tens. strength N/mm <sup>2</sup>	ALARGAMIENTO a 5 µ Elongation 2"	ESTRICCION Striction %	TEMP. ENSAYO Test. temp. °C	IMPACTO - KV Impact Joules	
509	574	26.0				

**OBSERVACIONES / Remarks :**

Este producto cumple con los requisitos de la norma SFA 5.1 de la sección II, Parte C del código ASME.



Gijon, 04/03/98

Anejo nº1. Certificados de calidad de materiales empleados en los cordones ensayados

Cordón O.K.46, empleado en los modelos ensayados a compresión:

09 05 '99 LUN 11:48 FAX 958470747 DRAGADOS OFFSHORE  
 04 05 '99 JUE 02:56 FAX 954526112 SOLDASUR S.A.

**ESAB Ibérica, S.A.**

CERTIFICADO Nº 00021563  
 CERTIFICATE

Customer: 000214570 Alhambra Paving Ltd. Madrid, Spain  
 Order: 000035376 PDR. RAFAEL JIMENEZ  
 Client: SOLDASUR, S.A. PO. IND. AEROPUERTO NAVE 00046 SEVILLA

Part	Material	Quantity	Weight	Lot No.
4601403008	OK 46.00 4.00-350 NK PLUS	24.354.00	PCB 911306	

Chemical analysis: Date report: 20/05/99

Element	C	SI	MN	S	P	CR	NI	NO
Metall	0.00	0.20	0.30	0.05	0.05			

Tensile test: Date report: 20/05/99

Property	Value	Unit
Yield strength	400	MPa
Tensile strength	520	MPa
Elongation	22	%

Impact test: Date report: 20/05/99

Property	Value	Unit
Impact energy	420	J
Charpy	35	J

Remarks: The goods are in accordance with the order and the contract. The goods are in accordance with the order and the contract. The goods are in accordance with the order and the contract.

AMS A/SFA E.1: E 6013  
 DIN 1913: E 43 32 (FC) 2  
 EN 499: E 39 0 RC 11

Product/Company: ALCOBENDAS  
 Date: 20/05/99

ESAB Ibérica, S.A.  
 Garantía de Calidad  
 Quality Assurance Department

ESAB

We hereby certify that aforementioned products are in accordance with the contract and that the goods, with indicated results, have been tested according to instructions in the said contract.

Director/Address: C. Aragónes, 17 Zona Ind. 28108 ALCOBENDAS Madrid (España) Spain  
 C. E. Ref. No: A-28011690  
 Telefon./Phone: 34-91-561 55 80

ESAB FILLARC Aerts

UNIVERSIDAD DE GRANADA  
 / 9 FEB. 2001  
 COMISION DE DOCTORADO

Cordón utilizado en el Puente de Öresund, empleado en los modelos ensayados a compresión:



LINCOLN-KD, S.A

**CERTIFICADO DE CONFORMIDAD DE PRODUCTO**

Producto	OUTERSHIELD 61K2-B	D x L (mm)	1,2
Clasif.	AWS 5.29 E80T1-K2 EN 758 T 50 A 1.5Ni P M2	Lote No.	317396061
Cliente	DRAGAGE OFF SHORE Bajo de la cabeza s/n 11510-PUERTO REAL (Cádiz)	Pedido Cliente No.	
		Pedido LKD No.	

**Composición química (% peso), metal depositado Valores actuales según EN 10204 '3.1**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	V	Al	
0,047	0,23	1,5	0,012	0,007	0,05	1,56	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	
Ti	B	Co	W	As	Sn	Sb	Pb					N
0,04	0,005				0,01							0,005

**Ensayos mecánicos de metal depositado**

**Valores actuales según EN 10204 '3.1**

**Ensayo de Tracción**

Cond.	Temp. ensayo	Rp 0.2	ReH	Rm	A5
	(°C)	MPa	MPa	MPa	(%)
AW	20	630		666	22

**Ensayo Impacto, Charpy entalla V (CVN)**

Temp. ensayo	CVN Valores Individuales	CVN Promedio
(°C)	(J)	(J)
-40		115
-50		103

**Información adicional**

**Otros ensayos**

**Valores actuales según EN 10204 '3.**

Hidrógeno difusible, metal depositado  
BDH, seg. IIV II-1155-91 (ml/100g)

**Observaciones**

Gas a emplear en la soldadura: 80% Ar + 20% CO2

Los valores típicos para las propiedades del metal depositado proceden de los resultados del muestreo estadístico de los ensayos de rutina o de las homologaciones anuales por las Sociedades de Clasificación según EN 10204, párrafo 2.2.

Los valores actuales de análisis químico y/o ensayos mecánicos, han sido obtenidos de muestras del Lote citado, según EN 10204, párrafo 3.1.B.

El producto arriba identificado ha sido fabricado, ensayado y suministrado en cumplimiento con el Programa de Garantía de Calidad, que cumple los requisitos de EN 29002 / ISO 9002 o norma similar.

Certificamos que el producto cumple con las normas citadas anteriormente.

Compañía	Emitido por	Función	Fecha	Cert. No.
Lincoln KD, S.A.	L. Abaurrea	D. Garantía Calidad	09/03/99	99/1404
Sede social: Laureà Miró, 396-398 08980 Sant Feliu de Llobregat (Barcelona)		Tel. 93.685.96.00 Fax 93.685.96.16		

UNIQUE Nº 02 - 0100

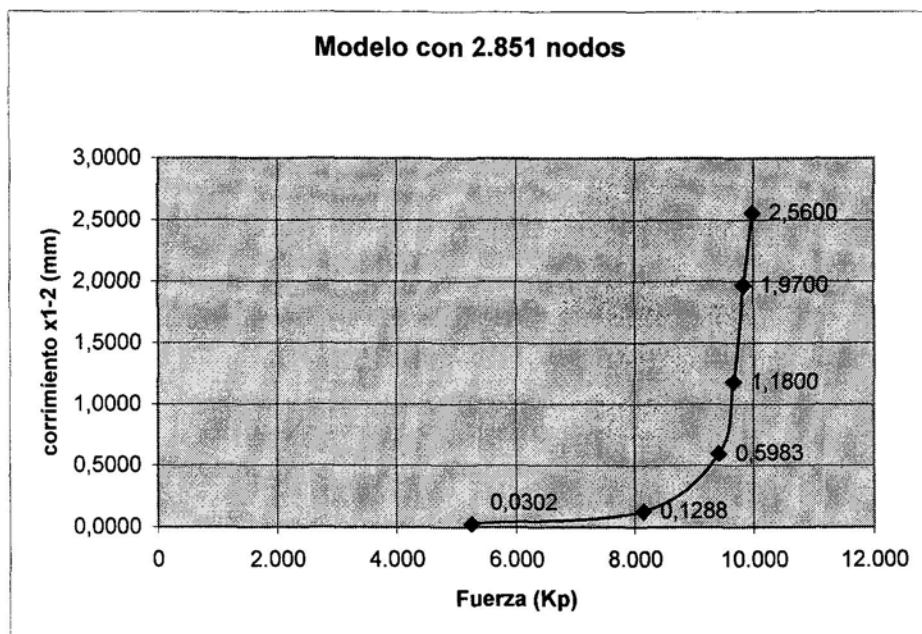
**ANEJO N°2:**

**CALIBRACIÓN DEL MODELO**

**CALIBRACIÓN**

**Modelo con 2.851  
nodos**

T	Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
0,45540	5.237	0,0302
0,70805	8.143	0,1288
0,81897	9.418	0,5983
0,84030	9.663	1,1800
0,84623	9.832	1,9700
0,85030	9.986	2,5600

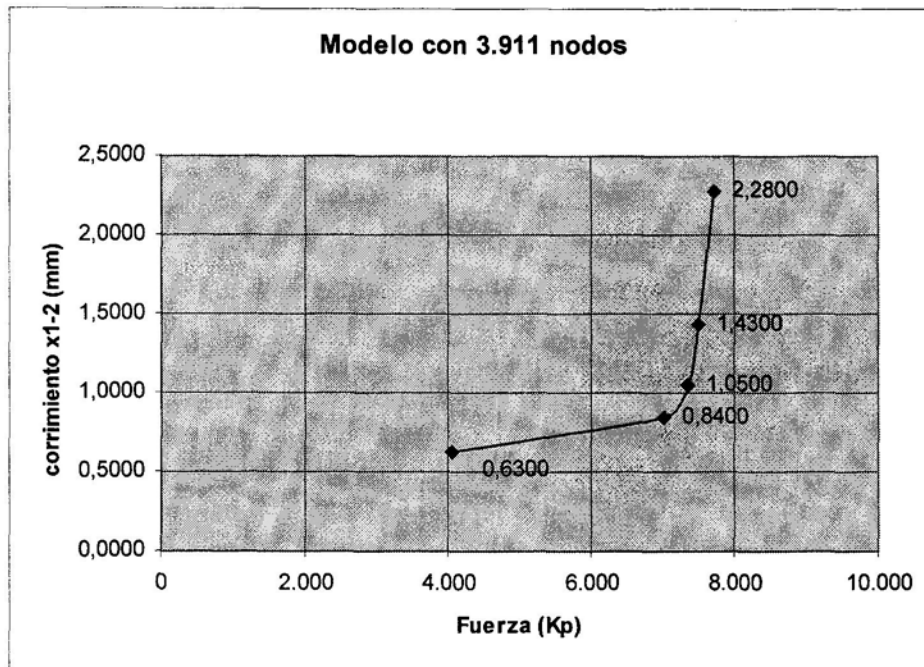




**CALIBRACIÓN**

**Modelo con 3.911 nodos**

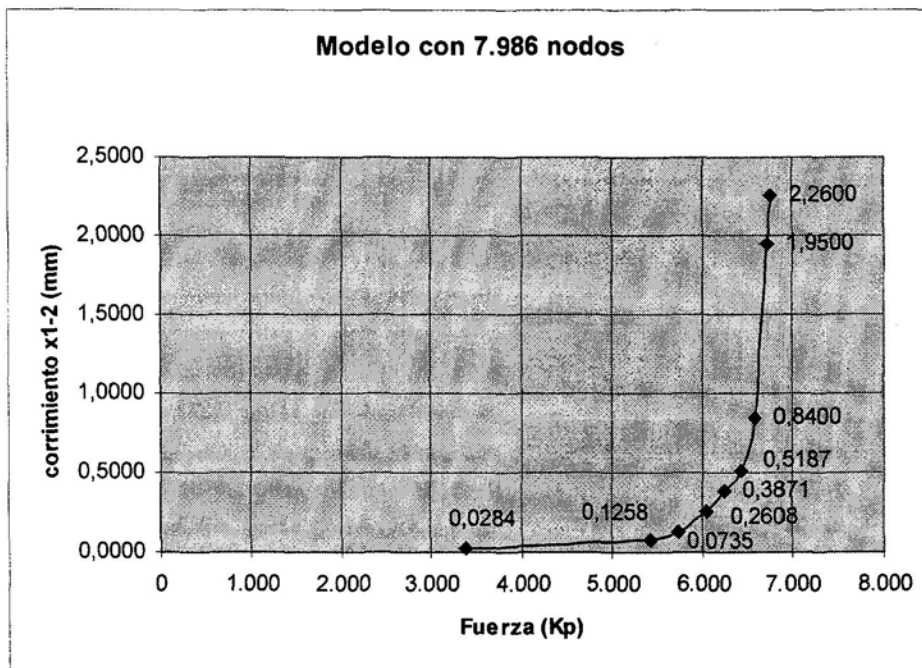
T	Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
0,45000	4.050	0,6300
0,77876	7.009	0,8400
0,81560	7.340	1,0500
0,83120	7.481	1,4300
0,85726	7.715	2,2800



**CALIBRACIÓN**

**Modelo con 7.986 nodos**

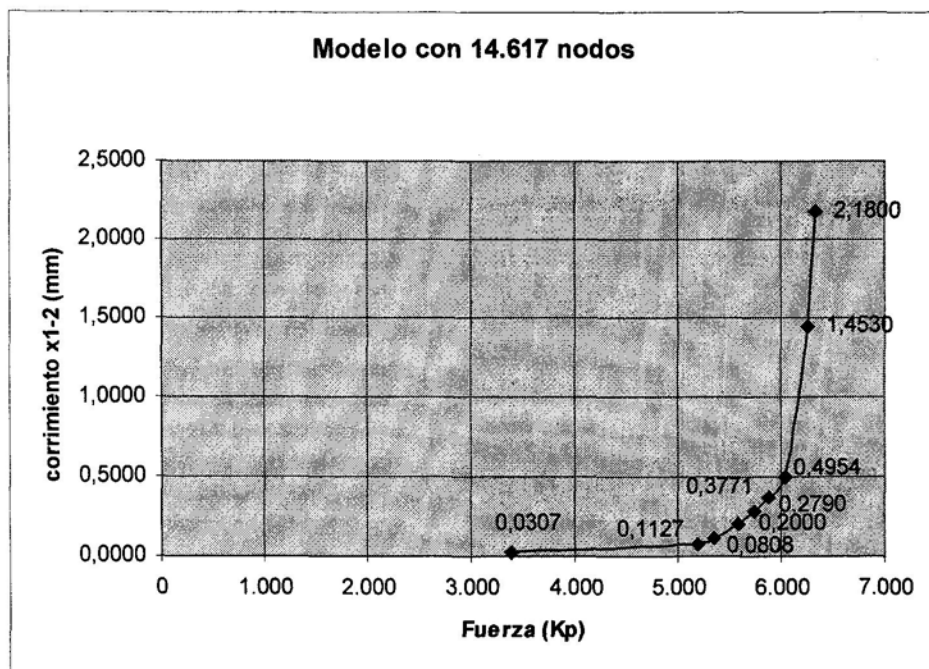
T	Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
0,45000	3.375	0,0284
0,72500	5.438	0,0735
0,76565	5.742	0,1258
0,80629	6.047	0,2608
0,83498	6.262	0,3871
0,85916	6.444	0,5187
0,87948	6.596	0,8400
0,89724	6.729	1,9500
0,90227	6.767	2,2600



**CALIBRACIÓN**

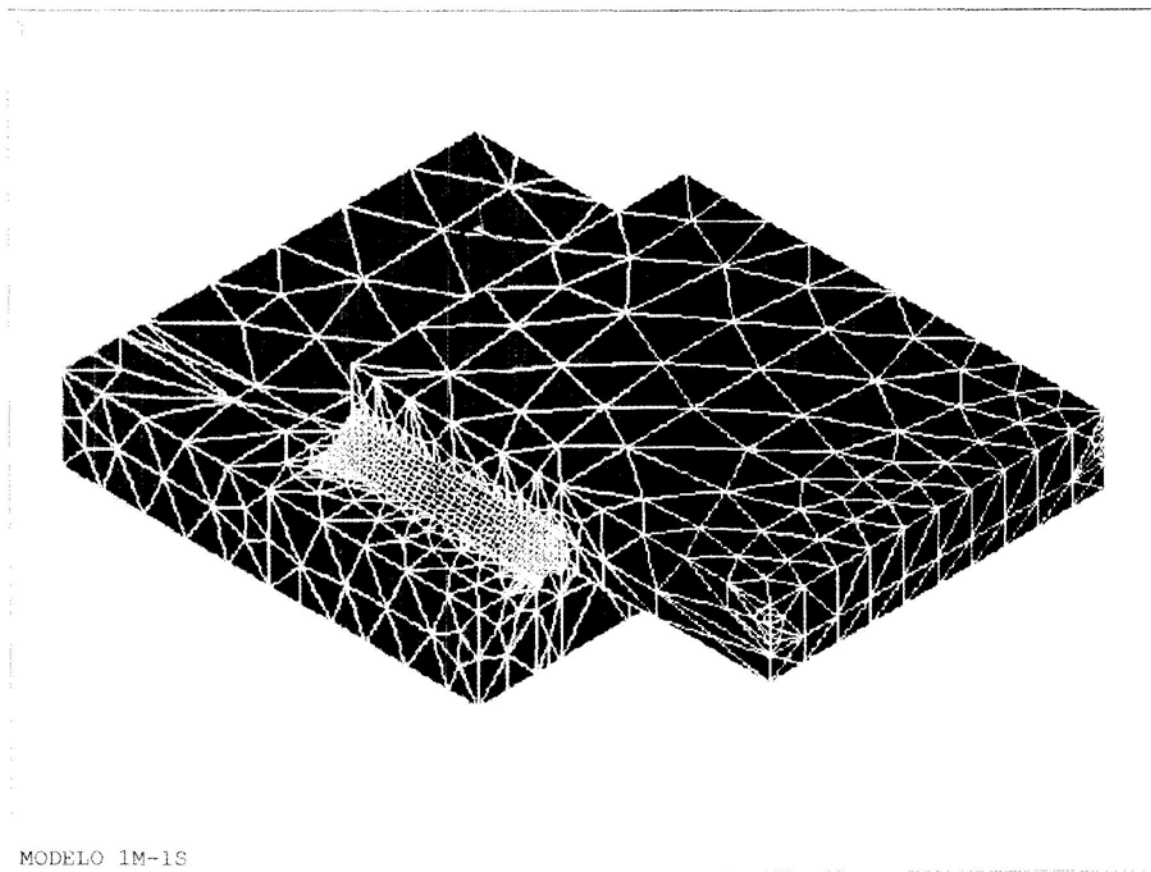
**Modelo con 14.617 nodos**

T	Fuerza (T)	Corrimiento $\Delta x_{1-2}$ (mm)
0,45000	3.375	0,0307
0,69415	5.206	0,0808
0,71415	5.356	0,1127
0,74539	5.590	0,2000
0,76539	5.740	0,2790
0,78539	5.890	0,3771
0,80539	6.040	0,4954
0,83539	6.265	1,4530
0,84539	6.340	2,1800

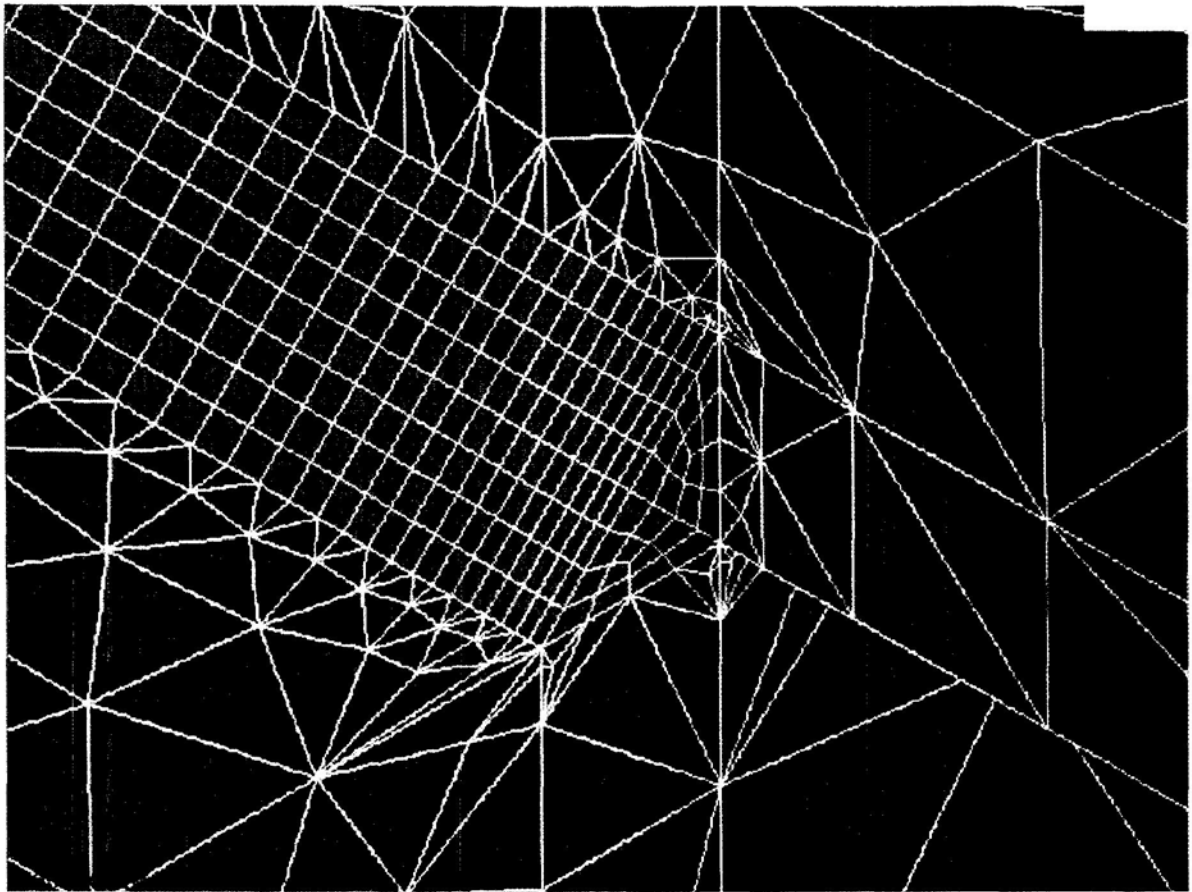


**ANEJO N°3:**

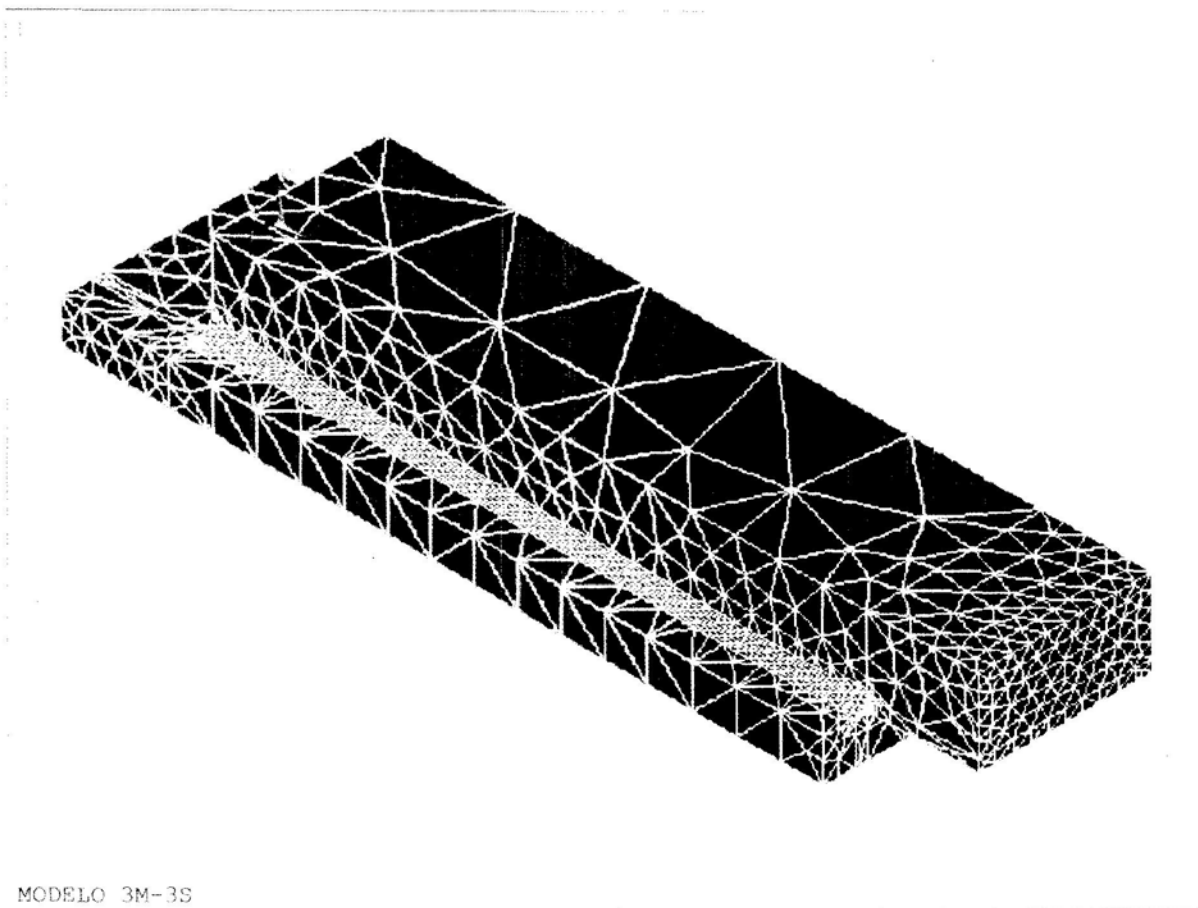
**MODELIZACIÓN CON ELEMENTOS FINITOS**



**Modelo 1M-1S. Longitud de cordón  $L= 5\text{cm}$ . Perspectiva del modelo**

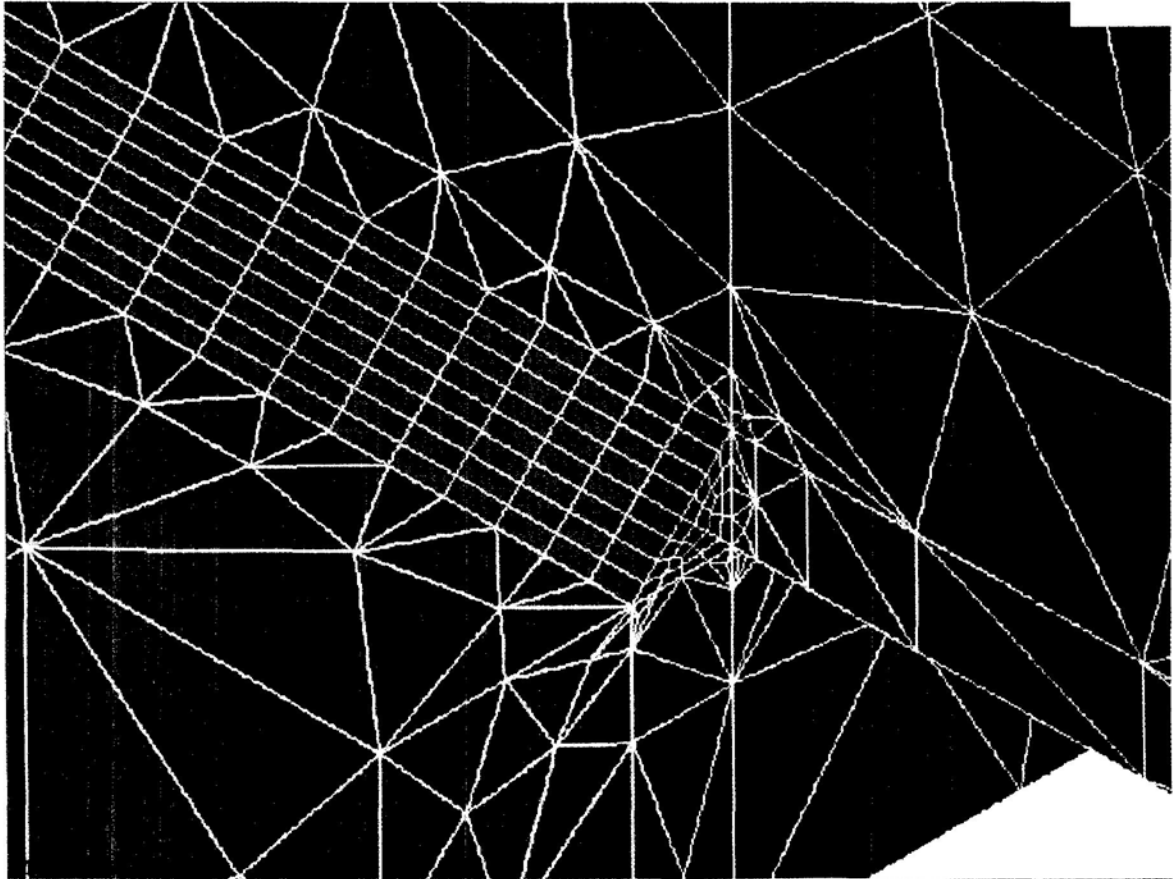


**Modelo 1M-1S. Longitud de cordón  $L=5\text{cm}$ . Detalle del extremo del cordón en su unión con las chapas.**



MODELO 3M-3S

**Modelo 3M-3S. Longitud de cordón  $L= 30\text{cm}$ . Perspectiva del modelo**



**Modelo 3M-3S. Longitud de cordón  $L=30\text{cm}$ . Detalle del extremo del cordón en su unión con las chapas.**

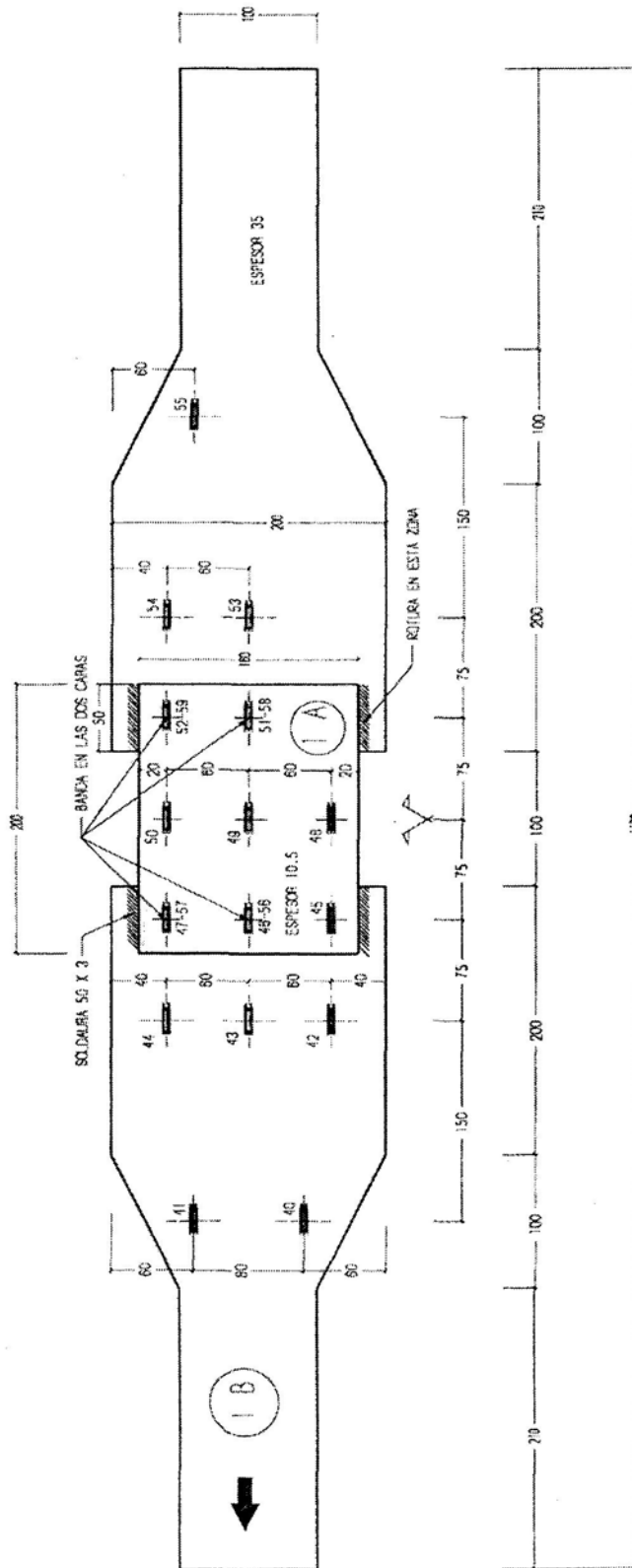


**ANEJO N°4:**

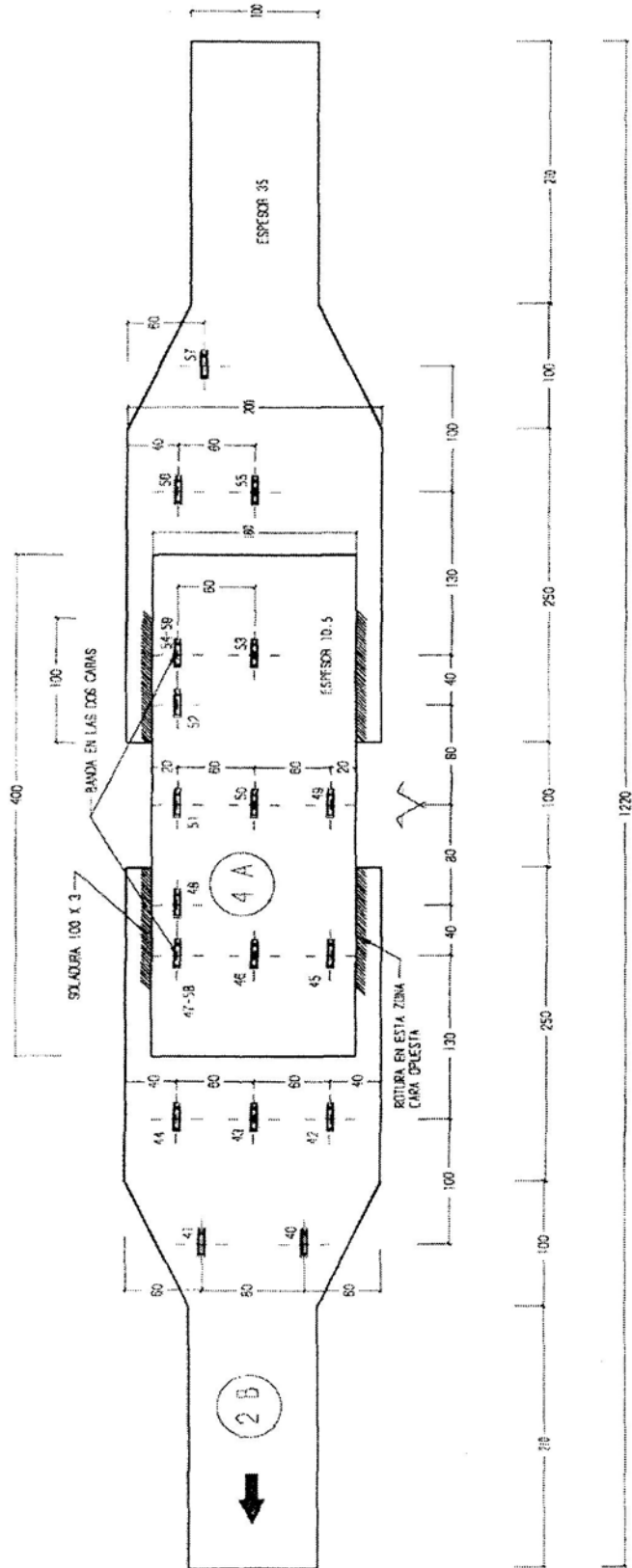
**INSTRUMENTACIÓN DE LAS PROBETAS ENSAYADAS A TRACCIÓN**

**4A) SITUACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS EN LAS PROBETAS**

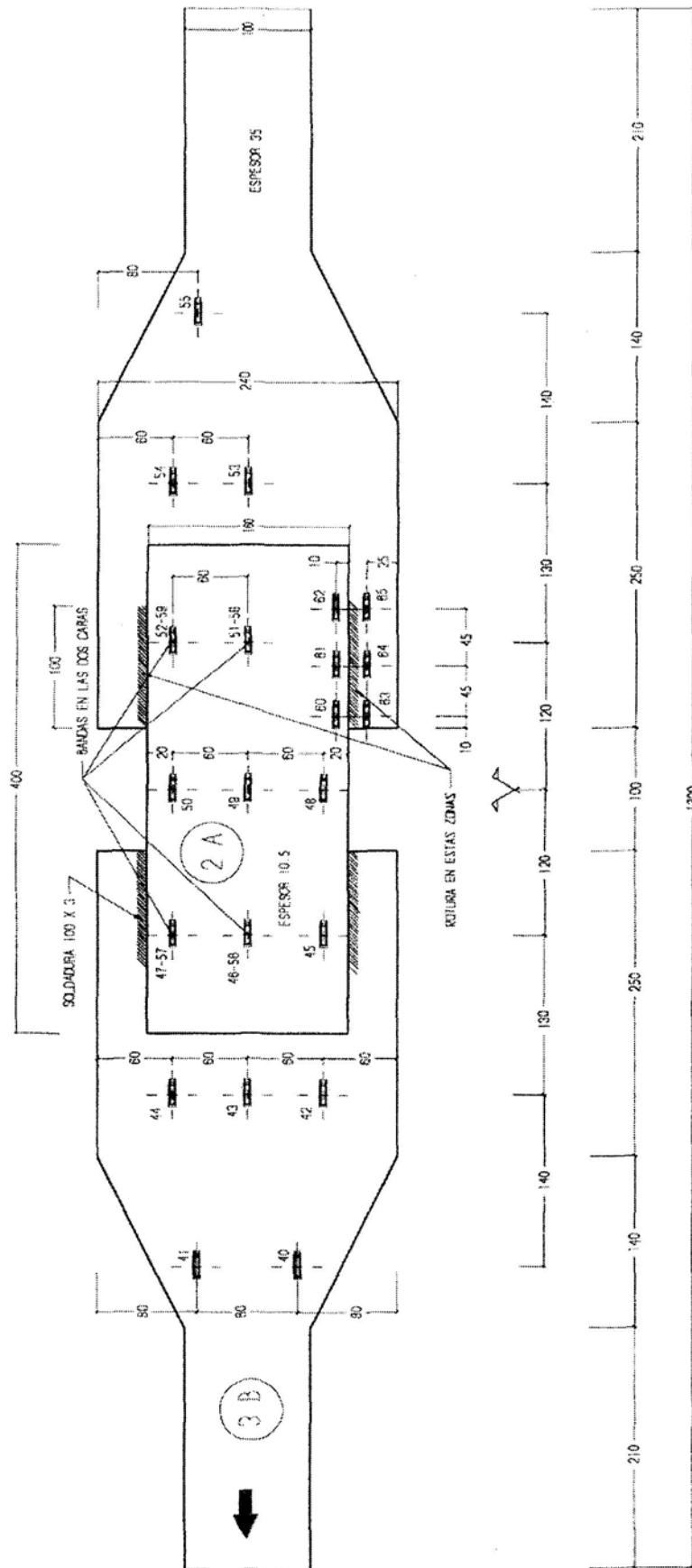
### PROBETA 1T



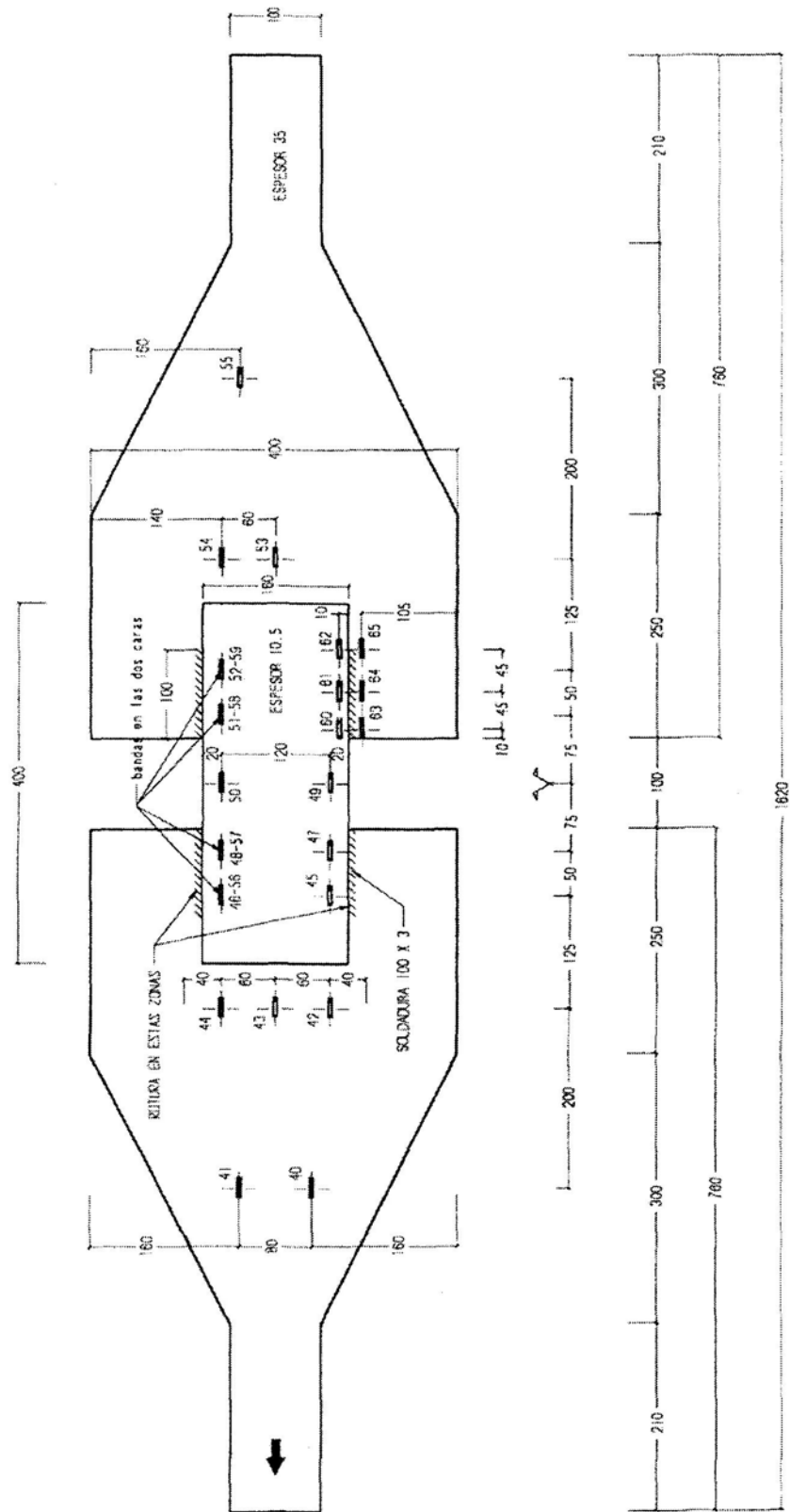
### PROBETA 2T



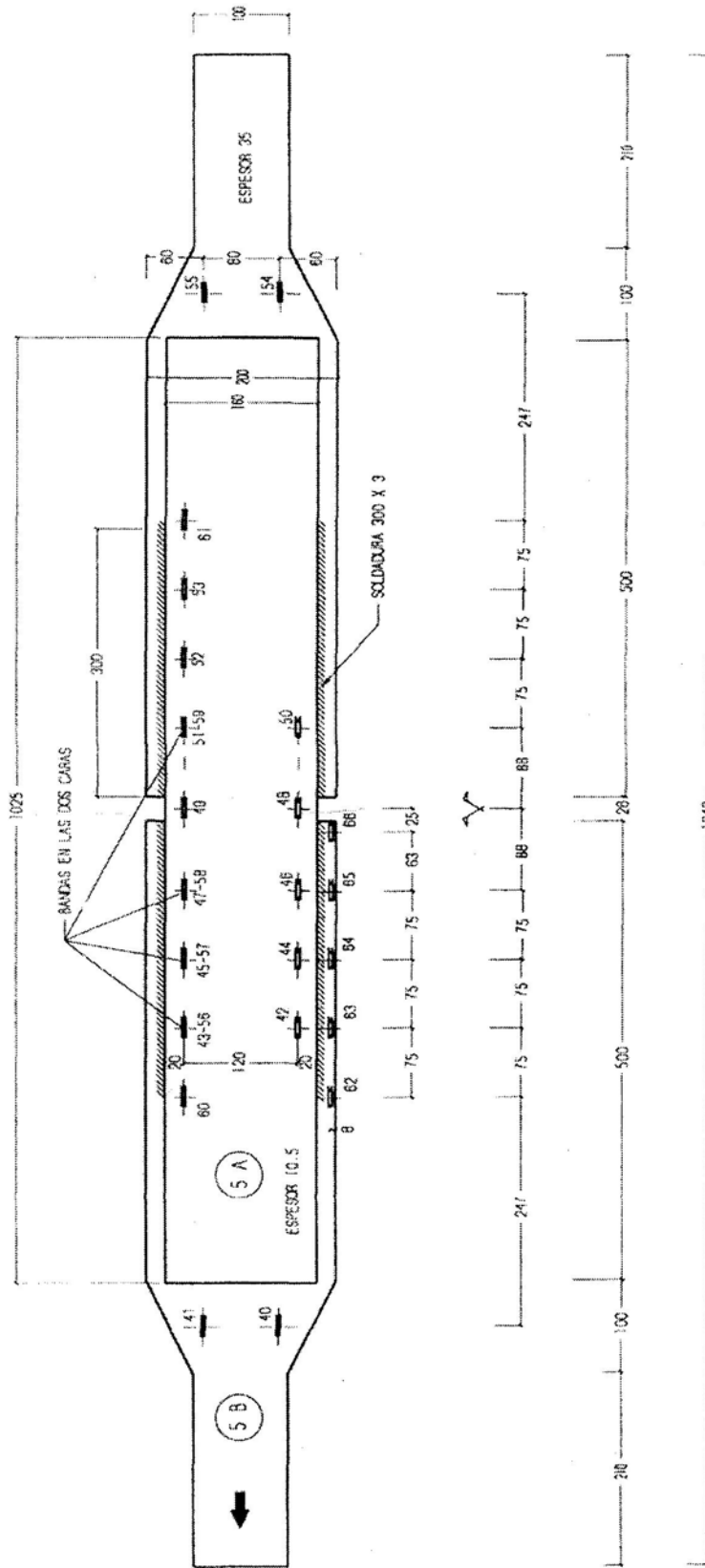
### PROBETA 3T



PROBETA 4T



PROBETA 5T



**4B) LECTURAS DE MICRODEFORMACIONES**



E.T.S.I. de CAMINOS  
Laboratorio de Estructuras

Probeta nº1  
Longitud soldadura 50 mm

**PROBETA 1T**

Unidades: Kp. microdeformaciones  
Signos: + tracciones  
- compresiones

Fecha: 23-sep-98

Carga nominal prensa	0	5.000	10.000	15.000	20.000
Carga real	1	5.300	10.600	15.900	21.200

Galga nº

40	3	77	107	151	196
41	1	94	134	189	246
42	0	39	66	105	145
43	1	23	41	65	93
44	1	41	77	125	178
45	-1	97	187	312	462
46	1	24	36	54	72
47	1	78	161	274	420
48	2	83	171	270	352
49	3	0	0	-5	-14
50	-2	81	178	290	386
51	-3	-7	3	14	26
52	-3	44	136	265	408
53	-1	-21	-3	22	45
54	-1	-13	20	70	119
55	3	-68	-30	24	70
56	0	89	211	361	524
57	2	13	28	50	70
58	-3	173	310	454	604
59	-5	45	66	91	109

Anejo nº 4B. Lectura de microdeformaciones

25.000    30.000    32.000        0

26.500    31.800    33.920        0

245        301        -136        -8

314        411        295        68

193        247        -82        -1

126        171        -10        17

245        335        244        87

661        938        650        632

92        108        107        41

631        1.017        1.285        786

428        420        -402        -333

-35        -133        -146        -244

480        601        876        7

40        45        12        -44

635        1.048        1.457        803

79        124        -43        34

179        270        231        67

128        220        126        25

696        936        840        462

87        71        -82        -76

771        933        408        66

128        136        -120        -155

ROTURA 33,920 Kp

En la zona sin galga próxima a la nº 48

E.T.S.I. de CAMINOS  
Laboratorio de Estructuras

PROBETA 2T

Probeta nº2  
Longitud soldadura 100 mm

Unidades: Kp. microdeformaciones

Signos: + tracciones  
- compresiones

Fecha: 23-sep-98

Carga nominal prensa	0	10.000	20.000	30.000	40.000	45.000	50.000
Carga real	1	10.600	21.200	31.800	42.400	47.700	53.000
Galga nº							
40	3	93	218	335	466	518	574
41	0	110	249	374	518	584	649
42	-6	69	165	250	342	384	419
43	1	80	189	280	387	439	484
44	0	77	180	264	359	412	455
45	-1	23	66	104	156	180	199
46	-4	47	125	204	304	362	414
47	-1	50	101	138	187	216	254
48	2	137	312	458	644	755	880
49	1	144	347	516	710	790	847
50	-5	107	246	380	537	624	695
51	-7	150	349	541	798	939	1.076
52	0	88	233	365	539	642	758
53	1	60	135	213	309	365	423
54	-1	8	35	47	74	87	102
55	1	155	758	2.743	5.043	5.955	7.705
56	-2	77	183	263	367	421	461
57	-2	110	252	358	508	582	646
58	5	18	31	34	53	64	68
59	1	37	58	71	90	96	100

Anejo nº 4B. Lectura de microdeformaciones

55.000	60.000	62.000	64.000	65.000	0
58.300	63.600	65.720	67.840	68.900	0
620	672	693	718	766	-60
715	790	821	854	923	4
452	491	508	521	561	-50
533	583	606	630	684	18
494	543	563	580	636	-9
219	241	246	254	246	-89
475	552	591	618	648	259
302	353	373	387	375	-50
1.030	1.224	1.312	1.399	1.502	413
899	931	931	918	838	-422
770	834	856	867	823	-47
1.216	1.365	1.427	1.488	1.514	240
892	1.066	1.150	1.244	1.380	210
481	555	586	608	637	158
127	166	189	216	242	-76
7.638	14.646	92.780	51.438	33.987	579.945
506	560	578	599	651	60
716	791	826	860	929	101
83	97	99	98	-135	154
106	103	90	64	32	-199

ROTURA 68,900 Kp

En la zona de la cara opuesta a la galga nº 45

E.T.S.I. de CAMINOS  
Laboratorio de Estructuras

Probeta nº3  
Longitud soldadura 100 mm

PROBETA 3T

Unidades: Kp. microdeformaciones  
Signos: + tracciones  
- compresiones

Fecha: 29-sep-98

Carga nominal prensa	0	10.000	20.000	30.000	40.000	45.000	50.000	52.000	54.000	56.000	58.000	60.000	62.000	64.000	66.000	68.000	0
Carga real	12	11.000	22.681	32.844	42.832	47.822	52.804	54.896	57.034	58.890	60.974	62.756	64.874	67.148	69.200	70.876	-318
Galga nº																	
40	3	424	518	618	713	757	796	814	828	844	857	867	878	888	890	867	54
41	2	480	602	722	830	881	935	954	973	992	1.010	1.030	1.045	1.058	1.069	1.062	159
42	1	241	306	375	438	469	498	508	521	530	542	550	558	565	567	557	44
43	4	260	329	403	468	501	536	544	558	570	582	593	601	609	615	606	68
44	2	255	323	393	453	485	515	526	536	548	556	565	574	579	582	571	46
45	-318	1.274	-1.253	-1.236	-1.194	-1.195	-895	-852	-824	-570	-123	314	555	718	1.902	4.833	-1.099
46	1	124	190	271	357	399	451	470	492	517	543	570	595	624	650	667	275
47	3	103	135	166	190	201	213	219	223	228	234	234	237	237	229	206	-65
48	2	313	512	742	961	1.057	1.169	1.211	1.257	1.304	1.353	1.397	1.446	1.494	1.542	1.590	230
49	2	230	353	486	620	684	758	786	814	845	880	910	940	972	999	1.031	93
50	-3	296	478	657	827	915	1.003	1.035	1.067	1.101	1.142	1.178	1.206	1.246	1.292	1.337	-25
51	-4	104	189	271	363	414	471	488	512	536	556	584	604	632	664	698	513
52	0	75	98	105	103	98	87	86	78	74	68	65	62	59	56	7	358
53	0	169	247	326	399	437	469	485	497	511	521	527	539	548	544	531	42
54	-3	155	231	300	365	399	435	446	458	466	479	487	499	503	511	494	25
55	-3	220	328	436	548	606	655	683	706	719	745	755	778	785	796	785	21
56	2	-14	28	64	90	99	110	116	119	122	130	136	140	145	145	124	-126
57	0	16	82	154	237	281	331	347	372	397	421	450	479	513	549	602	368
58	2	0	34	63	86	100	118	126	133	146	156	169	181	195	202	194	-52
59	1	24	89	158	234	277	327	346	369	391	420	450	483	518	557	615	244
60	1	214	427	695	1.045	1.231	1.426	1.482	1.560	1.627	1.681	1.747	1.808	1.859	1.903	1.983	716
61	0	182	253	381	442	513	543	547	584	574	598	596	602	576	525	265	239
62	2	-32	-52	-78	-127	-113	-125	-142	-63	-113	-119	-120	-84	-95	-97	2	360
63	1	62	110	159	231	278	308	320	350	349	364	373	396	419	432	463	146
64	18	82	125	209	290	311	331	350	363	360	379	393	417	428	455	504	109
65	7	138	234	329	406	438	465	472	497	526	528	549	557	568	585	545	9

ROTURA 70,876 Kp  
En las zonas de las galgas nº 52 y 61

E.T.S.I. de CAMINOS  
Laboratorio de Estructuras

Probeta nº4  
Longitud soldadura 100 mm

PROBETA 4T

Unidades: Kp. microdeformaciones  
Signos: + tracciones  
- compresiones

Fecha: 01-oct-98

Carga nominal prens    1 10.000 20.000 30.000 40.000 45.000 50.000 52.000 54.000 56.000 58.000 60.000 62.000 64.000 66.000 68.000 68.000    0

Carga real                66 10.700 21.479 32.450 43.392 48.784 54.514 56.430 58.498 59.610 61.642 63.968 66.372 68.390 69.338 70.894 71.474 67.844    0

Galga nº

40	1	68	142	221	308	352	404	425	443	455	478	502	524	553	564	584	591	509	113
41	0	70	148	230	319	364	415	434	456	468	488	511	530	563	574	589	594	491	101
42	-2	53	113	176	242	276	312	327	341	351	367	384	400	423	433	444	449	378	48
43	-3	55	117	184	255	291	331	347	364	369	387	405	422	447	456	470	474	392	66
44	0	58	118	184	253	288	326	339	357	364	380	397	411	435	443	453	457	367	56
45	-1	24	46	71	78	76	74	75	70	71	69	65	56	44	39	7	-11	-484	-110
46	-4	19	37	64	94	103	114	118	125	129	132	131	124	106	94	33	-13	-286	16
47	-1	173	360	546	739	848	972	1.022	1.076	1.101	1.169	1.239	1.308	1.416	1.463	1.563	1.621	1.689	463
48	-2	176	373	579	811	936	1.077	1.127	1.186	1.219	1.289	1.351	1.419	1.516	1.555	1.613	1.639	1.274	445
49	0	147	313	491	705	806	896	926	958	974	1.006	1.040	1.064	1.102	1.127	1.151	1.168	1.136	-107
50	-11	147	321	490	681	784	889	926	966	986	1.020	1.055	1.079	1.119	1.140	1.154	1.158	951	-41
51	-12	156	347	555	787	911	1.055	1.111	1.168	1.203	1.271	1.338	1.404	1.502	1.547	1.614	1.637	1.439	454
52	-9	46	91	127	163	172	189	197	204	208	214	222	227	231	232	224	219	163	36
53	-9	50	109	170	234	267	303	317	333	340	358	373	391	411	421	434	438	352	73
54	-10	44	102	162	222	257	293	303	317	327	342	358	374	392	399	412	418	335	58
55	-12	64	152	241	339	385	438	459	481	491	513	536	560	588	602	616	621	505	104
56	-10	43	64	82	93	96	98	99	100	99	101	102	101	99	97	95	94	56	-70
57	-2	157	342	541	743	855	987	1.043	1.099	1.124	1.184	1.256	1.317	1.402	1.446	1.507	1.550	1.545	578
58	-5	160	342	538	761	885	1.021	1.077	1.132	1.160	1.225	1.288	1.355	1.436	1.477	1.526	1.550	1.478	323
59	-11	29	58	77	85	86	88	89	90	90	88	82	64	33	2	-59	-84	-216	-345
60	-2	144	332	538	786	943	1.129	1.195	1.262	1.297	1.367	1.429	1.478	1.533	1.564	1.567	1.584	1.556	91
61	5	52	113	169	234	254	265	272	280	282	284	298	303	317	336	336	342	286	-109
62	2	-10	-37	-72	-106	-136	-172	-184	-200	-200	-209	-220	-231	-233	-239	-251	-253	-220	-20
63	-6	-3	-9	-10	-13	-12	-15	-21	-24	-25	-15	-9	-6	1	5	2	-1	-17	-27
64	0	20	60	98	130	161	192	210	222	230	247	266	281	314	323	321	324	275	87
65	-2	23	65	108	166	192	214	222	230	240	262	281	298	319	325	333	337	280	9

ROTURA 71,474 Kp  
En las zonas de las galgas nº 45 y 46

E.T.S.I. de CAMINOS  
Laboratorio de Estructuras

Probeta nº5  
Longitud soldadura 300 mm

## PROBETA 5T

Unidades: Kp. microdeformaciones  
Signos: + tracciones  
- compresiones

Fecha: 26-sep-98

Carga nominal prensa	122.000	124.000	126.000	128.000	130.000	132.000	134.000	136.000	138.000	140.000	142.000	144.000	146.000	148.000	150.000	152.000	154.000	156.000	158.000	160.000	162.000	162.000	0
Carga real	123.113	125.359	126.753	128.731	129.171	131.481	132.605	134.985	137.437	139.441	141.359	142.871	145.335	146.803	149.511	151.027	153.469	154.965	157.185	159.295	161.383	161.395	51
Galga nº																							
40	1.311	1.334	1.358	1.382	1.382	1.402	1.426	1.446	1.470	1.494	1.522	1.547	1.567	1.586	1.614	1.640	1.661	1.686	1.714	1.744	1.779	1.780	127
41	1.325	1.350	1.367	1.382	1.380	1.395	1.404	1.417	1.421	1.431	1.440	1.444	1.455	1.476	1.493	1.518	1.542	1.560	1.581	1.610	1.643	1.639	-13
42	513	519	527	537	536	542	549	558	565	572	581	590	593	603	606	611	618	615	609	609	623	615	-2
43	459	467	473	476	478	481	488	489	493	498	501	506	509	516	519	522	520	518	510	506	522	512	-172
44	847	866	884	902	904	924	940	962	980	1.000	1.024	1.046	1.065	1.085	1.105	1.126	1.147	1.151	1.152	1.157	1.191	1.191	242
45	814	831	847	863	864	877	893	911	928	942	958	977	993	1.010	1.031	1.050	1.064	1.070	1.072	1.079	1.113	1.109	146
46	1.275	1.302	1.334	1.364	1.367	1.396	1.423	1.456	1.486	1.519	1.550	1.586	1.611	1.643	1.669	1.701	1.724	1.737	1.749	1.773	1.836	1.853	475
47	1.296	1.330	1.357	1.388	1.391	1.416	1.437	1.478	1.499	1.526	1.552	1.580	1.598	1.623	1.654	1.673	1.699	1.714	1.724	1.746	1.782	1.790	370
48	2.761	2.796	2.835	2.872	2.869	2.907	2.950	2.985	3.030	3.080	3.133	3.194	3.253	3.298	3.361	3.453	3.639	4.929	9.298	16.253	23.587	26.236	22.799
49	3.593	3.732	3.871	4.004	4.026	4.148	4.277	4.441	4.602	4.799	5.001	5.232	5.484	5.793	6.267	6.909	8.155	12.222	16.715	20.432	20.432	20.432	20.432
50	1.407	1.440	1.477	1.511	1.515	1.548	1.588	1.625	1.662	1.701	1.740	1.782	1.816	1.850	1.895	1.943	1.982	2.020	2.046	2.082	2.133	2.168	724
51	1.468	1.501	1.542	1.577	1.580	1.610	1.638	1.680	1.706	1.741	1.777	1.811	1.841	1.870	1.910	1.932	1.955	1.963	1.968	1.979	2.020	2.032	450
52	868	881	899	917	916	934	953	969	983	1.006	1.024	1.040	1.055	1.077	1.096	1.113	1.126	1.129	1.128	1.139	1.166	1.167	163
53	488	495	502	506	506	514	519	525	530	535	544	552	556	558	568	570	570	564	563	561	575	568	-79
54	1.453	1.477	1.489	1.507	1.504	1.517	1.537	1.553	1.566	1.578	1.590	1.606	1.623	1.639	1.661	1.685	1.703	1.724	1.744	1.776	1.809	1.824	143
55	1.513	1.545	1.570	1.594	1.603	1.624	1.651	1.674	1.695	1.720	1.743	1.773	1.794	1.824	1.848	1.879	1.905	1.938	1.960	2.002	2.043	2.054	387
56	413	414	422	423	431	433	437	442	448	451	455	462	466	475	483	484	492	500	514	520	519	521	-107
57	712	727	747	761	764	781	796	815	829	844	860	885	897	920	939	962	985	1.019	1.064	1.095	1.115	879	165
58	1.133	1.156	1.188	1.218	1.220	1.250	1.279	1.312	1.338	1.374	1.402	1.430	1.466	1.497	1.535	1.574	1.610	1.663	1.723	1.768	1.792	578	387
59	1.286	1.315	1.355	1.387	1.390	1.425	1.459	1.494	1.529	1.561	1.594	1.634	1.666	1.702	1.737	1.780	1.821	1.876	1.938	1.993	2.018	634	578
60	-69	-64	-74	-69	-67	-65	-74	-77	-81	-79	-92	-88	-75	-83	-96	-90	-84	-89	-88	-89	-94	29	-403
61	29	43	35	37	37	48	35	35	33	31	27	22	36	33	20	27	41	28	24	23	23	6	-484
62	941	956	968	986	984	1.004	1.007	1.039	1.051	1.075	1.093	1.108	1.126	1.136	1.157	1.170	1.189	1.181	1.186	1.189	1.229	72	-320
63	621	633	635	653	650	667	673	696	703	723	731	747	759	772	785	803	825	825	826	823	843	75	-323
64	580	582	589	604	607	614	624	635	636	643	646	661	671	681	680	694	707	708	709	708	724	34	-432
65	419	417	421	432	427	430	426	437	436	444	446	441	447	450	445	449	457	461	460	472	478	-125	-533
66	181	182	176	182	179	185	181	185	185	187	187	190	191	184	190	194	197	199	199	197	190	-110	-521

NO SE PRODUJO LA ROTURA

**ANEJO N°5:**

**INSTRUMENTACIÓN DE LAS PROBETAS ENSAYADAS A COMPRESIÓN.  
LECTURA DE FLEXÍMETROS**



**PROBETA 1M**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)																							
		0	1	5	10	15	20	22	24	26	28	29	30	31	32	33	34	35	36	36,5	37	37,5	38	38,5	39
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,19	0,23	0,29	0,37	0,47	0,54	0,63	0,76	0,84	0,96	1,09	1,21	1,59
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09	0,10	0,14	0,19	0,23	0,29	0,39	0,46	0,57	0,68	0,79	1,13
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,18	0,21	0,27	0,34	0,44	0,51	0,59	0,72	0,81	0,93	1,05	1,18	1,55
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,11	0,14	0,19	0,25	0,31	0,42	0,49	0,59	0,69	0,82	1,15
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,13	0,17	0,21	0,29	0,36	0,44	0,54	0,63	0,90
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,10	0,14	0,16	0,19	0,24	0,29	0,34	0,42	0,52	0,60	0,68	0,81	0,90	1,03	1,16	1,28	1,62
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,11	0,15	0,18	0,23	0,31	0,38	0,47	0,57	0,67	0,93
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08	0,12	0,14	0,17	0,22	0,26	0,32	0,39	0,49	0,57	0,65	0,79	0,89	1,01	1,14	1,27	1,51

**PROBETA 2M**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)													
		0	10	40	60	70	80	85	90	95	100	105	110	115	116
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,21	0,36	0,71	0,92
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,02	0,06	0,09	0,17	0,22	0,29	0,39	0,50	0,64	0,87	1,32	1,54
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,05	0,07	0,07	0,10	0,12	0,15	0,21	0,35	0,67	0,87
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,02	0,05	0,08	0,15	0,20	0,26	0,35	0,45	0,59	0,84	1,28	1,53
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,03	0,06	0,08	0,11	0,14	0,19	0,26	0,36	0,48	0,69	1,08	1,31
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,07	0,09	0,14	0,28	0,63	0,83
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,00	0,04	0,06	0,10	0,14	0,20	0,27	0,36	0,48	0,70	1,10	1,34
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,10	0,13	0,19	0,34	0,68	0,90

**PROBETA 3M**

**Lectura de  
flexímetros**

		CARGAS (T)													
		0	10	40	80	100	120	130	140	150	160	170	180	185	187
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,06	0,06	0,08	0,09	0,11	0,14	0,24	0,42	0,67
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10	0,12	0,15	0,21	0,35	0,56	0,85
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,19	0,37	0,63
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,13	0,27	0,48	0,78
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,02	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,15	0,18	0,28	0,42	0,65	0,95
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,21	0,41	0,71
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09	0,15	0,31	0,53	0,86
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,23	0,44	0,76

**PROBETA 4M**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)																		
		0	10	40	80	120	140	160	170	175	180	185	190	195	200	205	208	210	212	213
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10	0,14	0,17	0,20	0,23	0,29	0,35	0,43	0,60	0,77	0,92	1,10	1,23
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,15	0,20	0,33	0,49	0,64	0,83	0,99
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07	0,09	0,13	0,16	0,19	0,22	0,26	0,31	0,37	0,46	0,64	0,81	0,96	1,14	1,29
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,13	0,15	0,17	0,23	0,35	0,51	0,66	0,84	1,00
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,18	0,32	0,48	0,63	0,81	0,98
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07	0,09	0,13	0,17	0,20	0,24	0,28	0,33	0,39	0,49	0,65	0,82	0,96	1,15	1,30
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,16	0,21	0,34	0,51	0,64	0,82	0,99
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,06	0,08	0,13	0,16	0,19	0,22	0,26	0,32	0,38	0,47	0,65	0,80	0,95	1,14	1,30

**PROBETA 5M**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)													
		0	10	40	80	120	140	160	170	175	180	185	190	192	194
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,06	0,07	0,09	0,10	0,12	0,15	0,24	0,42	0,62
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,02	0,04	0,09	0,14	0,22	0,30	0,36	0,42	0,50	0,64	0,82	1,02
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07	0,10	0,13	0,15	0,18	0,19	0,24	0,32	0,51	0,72
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,02	0,06	0,12	0,16	0,23	0,30	0,36	0,40	0,47	0,61	0,81	1,01
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,02	0,05	0,08	0,11	0,16	0,24	0,29	0,34	0,41	0,54	0,74	0,93
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	0,08	0,10	0,12	0,21	0,40	0,61
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,02	0,04	0,07	0,10	0,16	0,23	0,27	0,32	0,40	0,53	0,73	0,91
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05	0,07	0,10	0,13	0,15	0,17	0,21	0,31	0,51	0,72

**PROBETA 6M**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS(T)																
		0	10	60	120	180	220	260	280	300	300	310	320	330	340	350	355	360
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,03	0,06	0,10	0,12	0,16	0,19	0,23	0,23	0,26	0,30	0,34	0,40	0,47	0,58	0,59
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,08	0,12	0,16	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,22	0,24	0,27	0,30	0,31
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,03	0,06	0,11	0,13	0,17	0,22	0,25	0,25	0,29	0,32	0,36	0,41	0,47	0,56	0,58
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,03	0,07	0,10	0,12	0,15	0,18	0,21	0,21	0,24	0,27	0,31	0,37	0,44	0,55	0,57
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05	0,07	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,03	0,06	0,11	0,15	0,19	0,24	0,27	0,27	0,30	0,32	0,37	0,42	0,48	0,57	0,59
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,06	0,11	0,14	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,20	0,22	0,25	0,26

**PROBETA 7M**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)												
		0	10	40	80	100	120	140	160	170	180	190	195	200
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,02	0,05	0,06	0,08	0,09	0,11	0,13	0,17	0,26	0,37	0,54
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,03	0,08	0,11	0,14	0,18	0,23	0,31	0,42	0,61	0,76	0,98
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,11	0,20	0,29	0,47
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,07	0,11	0,19	0,30	0,48	0,62	0,86
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,04	0,10	0,14	0,19	0,28	0,40	0,52	0,65	0,85	1,00	1,26
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,09	0,13	0,17	0,24	0,37	0,49	0,70
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,03	0,07	0,11	0,15	0,23	0,34	0,44	0,56	0,74	0,90	1,16
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,02	0,05	0,07	0,10	0,13	0,17	0,22	0,29	0,41	0,54	0,74

**PROBETA 1S**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)																				
		0	1	5	10	15	20	22	24	26	28	29	30	31	32	33	34	35	36	36,5	37	37,5
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15	0,17	0,21	0,25	0,28	0,32	0,37
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,09	0,11	0,13	0,15	0,19	0,23	0,26	0,30	0,35
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11	0,14	0,16	0,19	0,22
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,14	0,16	0,16
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,14	0,16

		CARGAS (T)											
		38	38,5	39	39,5	39,7	40	40,2	40,4	40,5	40,7	40,8	40,9
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,43	0,51	0,61	0,74	0,86	1,01	1,17	1,30	1,41	1,62	1,77	2,00
	<b>FLEX 2</b>	0,29	0,35	0,43	0,54	0,65	0,78	0,93	1,05	1,15	1,36	1,50	1,72
	<b>FLEX 3</b>	0,41	0,49	0,60	0,73	0,84	0,99	1,16	1,28	1,38	1,60	1,76	1,97
	<b>FLEX 4</b>	0,27	0,33	0,42	0,54	0,64	0,78	0,94	1,05	1,15	1,36	1,50	1,72
	<b>FLEX 5</b>	0,12	0,14	0,18	0,25	0,31	0,41	0,55	0,62	0,71	0,88	1,02	1,21
	<b>FLEX 6</b>	0,18	0,20	0,24	0,33	0,41	0,52	0,68	0,84	0,92	1,11	1,23	1,48
	<b>FLEX 7</b>	0,13	0,15	0,20	0,27	0,34	0,43	0,56	0,64	0,74	0,91	1,04	1,24
	<b>FLEX 8</b>	0,19	0,23	0,29	0,38	0,46	0,57	0,72	0,81	0,91	1,08	1,22	1,42



**PROBETA 2S**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)							
		0	10	40	60	80	100	105	110
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,02	0,06	0,16	0,51	0,74	1,52
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,07	0,17	0,30	1,02
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,02	0,07	0,18	0,54	0,79	1,63
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,00	0,05	0,10	0,22	0,34	1,09
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,12	0,20	0,90
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,02	0,06	0,11	0,40	0,61	1,40
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,10	0,19	0,89
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,30	0,51	1,36

**PROBETA 3S**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)																					
		0	10	40	80	120	140	160	180	190	200	210	220	230	230	240	250	260	270	280	290	294	294,5
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,16	0,18	0,20	0,24	0,35	0,55	0,72
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,05	0,06	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,15	0,19	0,25	0,36	0,57	0,85	1,01
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,12	0,22	0,43	0,57
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,10	0,14	0,21	0,32	0,55	0,82	0,98
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,13	0,14	0,16	0,16	0,11	0,14	0,19	0,26	0,37	0,62	0,88	1,05
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	0,09	0,11	0,13	0,14	0,15	0,16	0,18	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,31	0,46	0,69	0,84
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,13	0,18	0,24	0,35	0,60	0,86	1,02
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,30	0,54	0,67

**PROBETA 4S**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)																
		0	10	40	80	120	160	200	220	240	260	270	280	285	290	295	300	302
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,10	0,11	0,13	0,14	0,16	0,21	0,27	0,35
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,02	0,03	0,06	0,08	0,12	0,14	0,16	0,21	0,25	0,31	0,36	0,41	0,50	0,59	0,68
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,11	0,13	0,16	0,19	0,21	0,24	0,26	0,29	0,34	0,40	0,48
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,07	0,10	0,12	0,15	0,20	0,24	0,29	0,33	0,38	0,47	0,55	0,65
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,02	0,04	0,06	0,09	0,13	0,16	0,19	0,25	0,31	0,36	0,41	0,47	0,56	0,64	0,75
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07	0,10	0,11	0,13	0,14	0,17	0,22	0,28	0,36
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,07	0,11	0,14	0,17	0,23	0,28	0,33	0,37	0,43	0,52	0,60	0,70
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,06	0,08	0,09	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,28	0,33	0,43

**PROBETA 5S**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)														
		0	10	40	80	120	160	200	220	240	260	270	280	282	283	284
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,06	0,09	0,11	0,13	0,15	0,20	0,22	0,42	0,54	0,64	0,76
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,10	0,11	0,22	0,31	0,38	0,48
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12	0,32	0,42	0,53	0,64
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,06	0,09	0,12	0,15	0,19	0,22	0,37	0,44	0,52	0,61
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07	0,09	0,10	0,22	0,28	0,37	0,45
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10	0,12	0,15	0,20	0,23	0,48	0,56	0,69	0,79
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,10	0,13	0,15	0,19	0,22	0,36	0,41	0,51	0,58
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,10	0,14	0,35	0,43	0,55	0,66

**PROBETA 6S**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)																
		0	10	60	120	180	240	300	340	340	360	380	400	410	420	430	440	450
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,02	0,06	0,1	0,15	0,19	0,22	0,22	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,02	0,04	0,06	0,09	0,12	0,15	0,15	0,17	0,19	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,31
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,06	0,10	0,12	0,14	0,14	0,16	0,17	0,17	0,20	0,22	0,22	0,23	0,24
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,06	0,11	0,16	0,16	0,17	0,21	0,24	0,26	0,27	0,28	0,29	0,32
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,10	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,19
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07	0,10	0,13	0,15	0,15	0,16	0,18	0,18	0,19	0,20	0,22	0,22	0,22
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08	0,11	0,11	0,12	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,02	0,04	0,07	0,10	0,13	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22

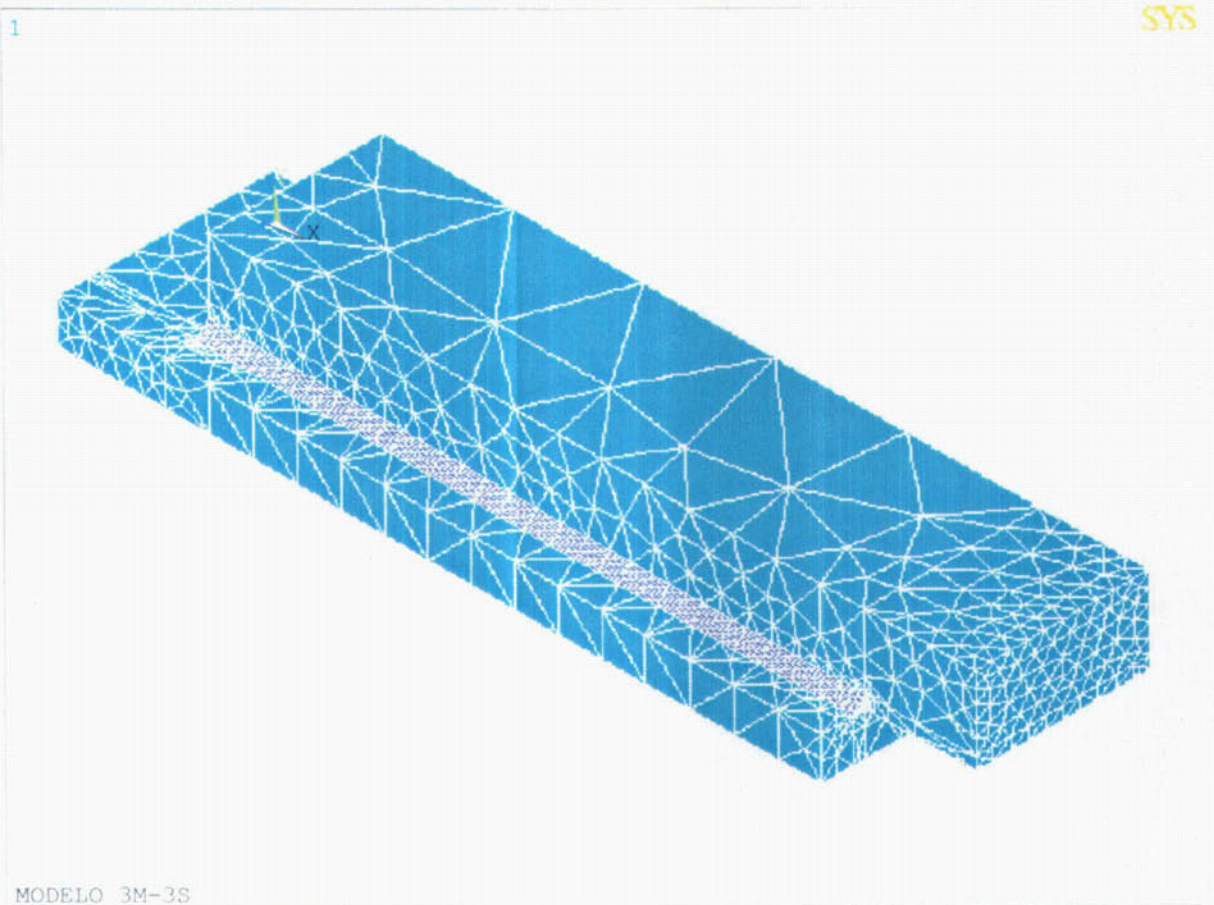
**PROBETA 7S**

**Lectura de flexímetros**

		CARGAS (T)																	
		0	10	40	80	120	160	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	275	280
DESPLAZAMIENTOS (mm)	<b>FLEX 1</b>	0,00	0,00	0,02	0,07	0,12	0,17	0,19	0,20	0,22	0,23	0,25	0,28	0,31	0,35	0,42	0,52	0,63	0,79
	<b>FLEX 2</b>	0,00	0,00	0,01	0,05	0,09	0,14	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,30	0,33	0,39	0,48	0,58	0,75
	<b>FLEX 3</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,06	0,08	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15	0,17	0,20	0,25	0,30	0,40	0,49	0,65
	<b>FLEX 4</b>	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,09	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15	0,17	0,19	0,23	0,26	0,35	0,44	0,60
	<b>FLEX 5</b>	0,00	0,00	0,02	0,06	0,10	0,14	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23	0,24	0,26	0,30	0,34	0,45	0,56	0,74
	<b>FLEX 6</b>	0,00	0,00	0,02	0,07	0,12	0,17	0,19	0,21	0,22	0,24	0,25	0,29	0,31	0,36	0,42	0,54	0,64	0,82
	<b>FLEX 7</b>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,09	0,11	0,11	0,14	0,15	0,16	0,18	0,21	0,25	0,29	0,40	0,51	0,69
	<b>FLEX 8</b>	0,00	0,00	0,02	0,04	0,08	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15	0,17	0,19	0,21	0,26	0,31	0,42	0,52	0,68

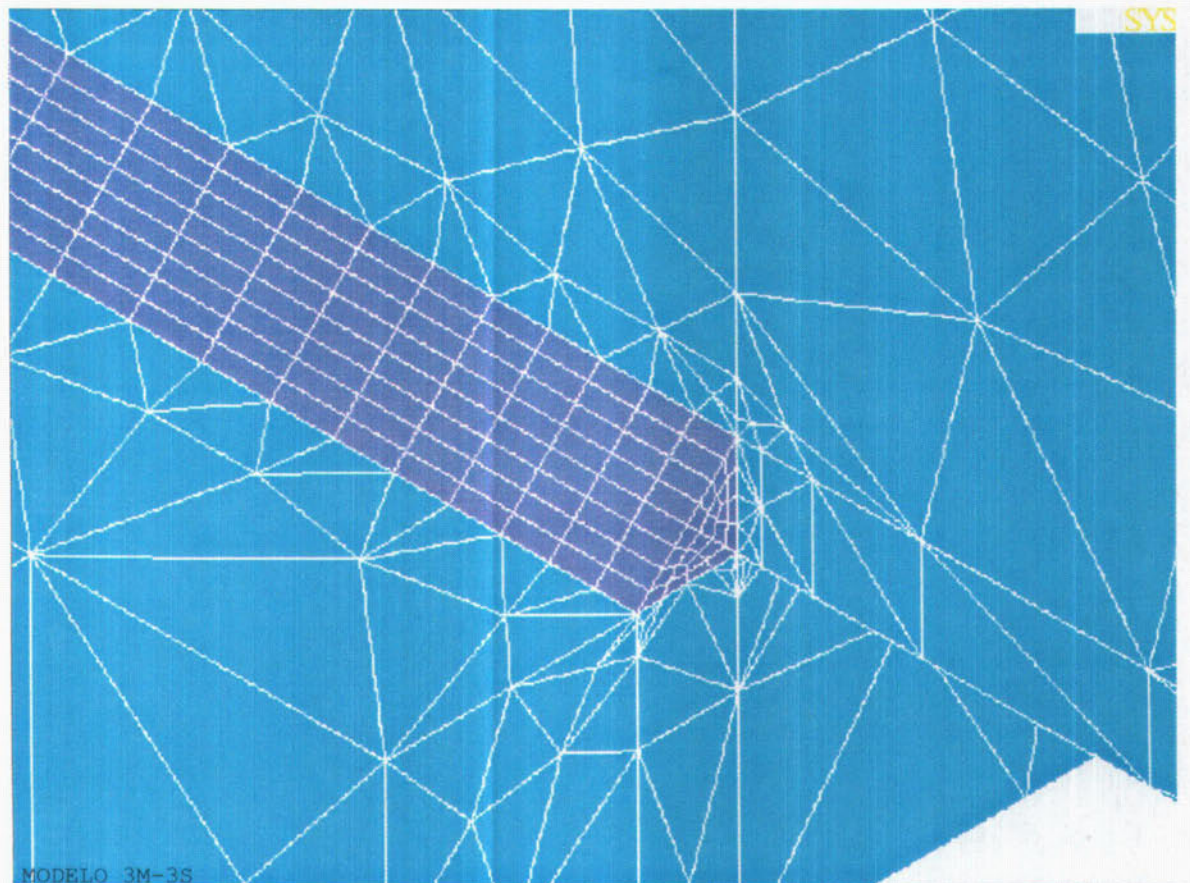
**ANEJO N°6:**

**FOTOGRAFÍAS**



**Modelo 3M-3S. Longitud de cordón  $L=30\text{cm}$ . Perspectiva del modelo**





**Modelo 3M-3S. Longitud de cordón  $L= 30\text{cm}$ . Detalle del extremo del cordón en su unión con las chapas.**



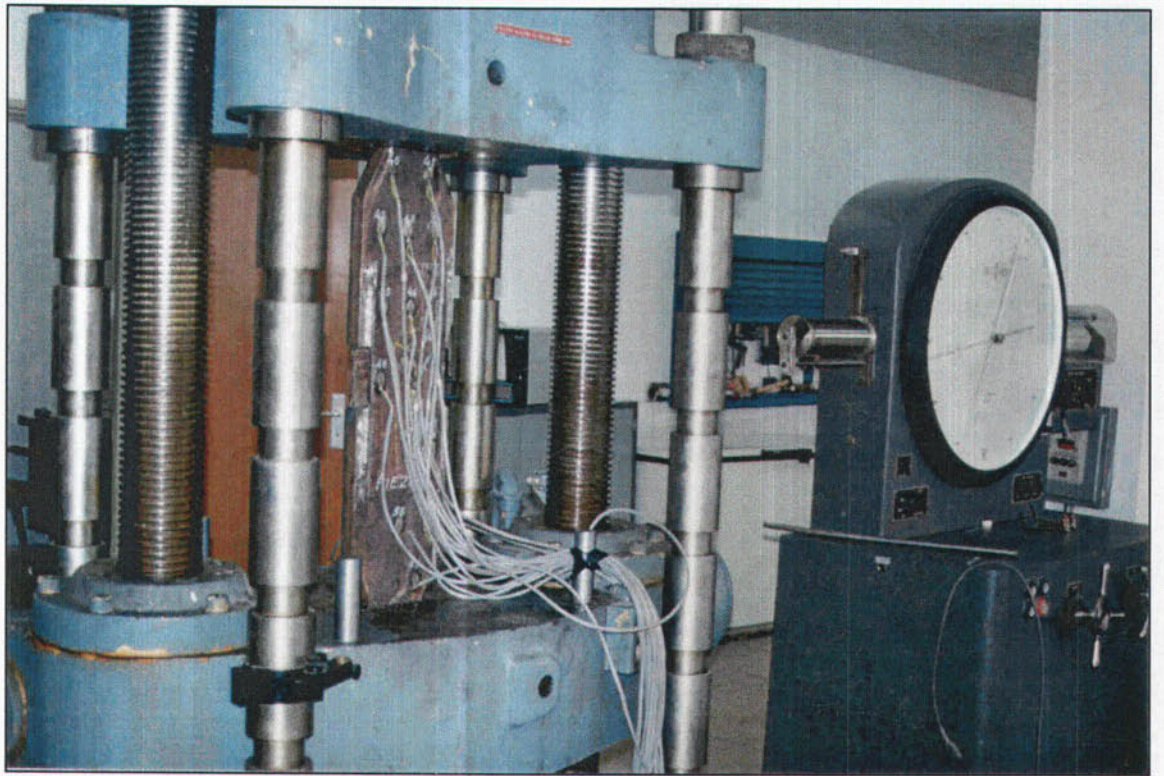


FOTO N°1: Prensa empleada en los ensayos a tracción.



FOTO N°2: Perspectiva de la probeta 1T.





FOTO Nº3: Probeta 1T en la prensa de tracción.



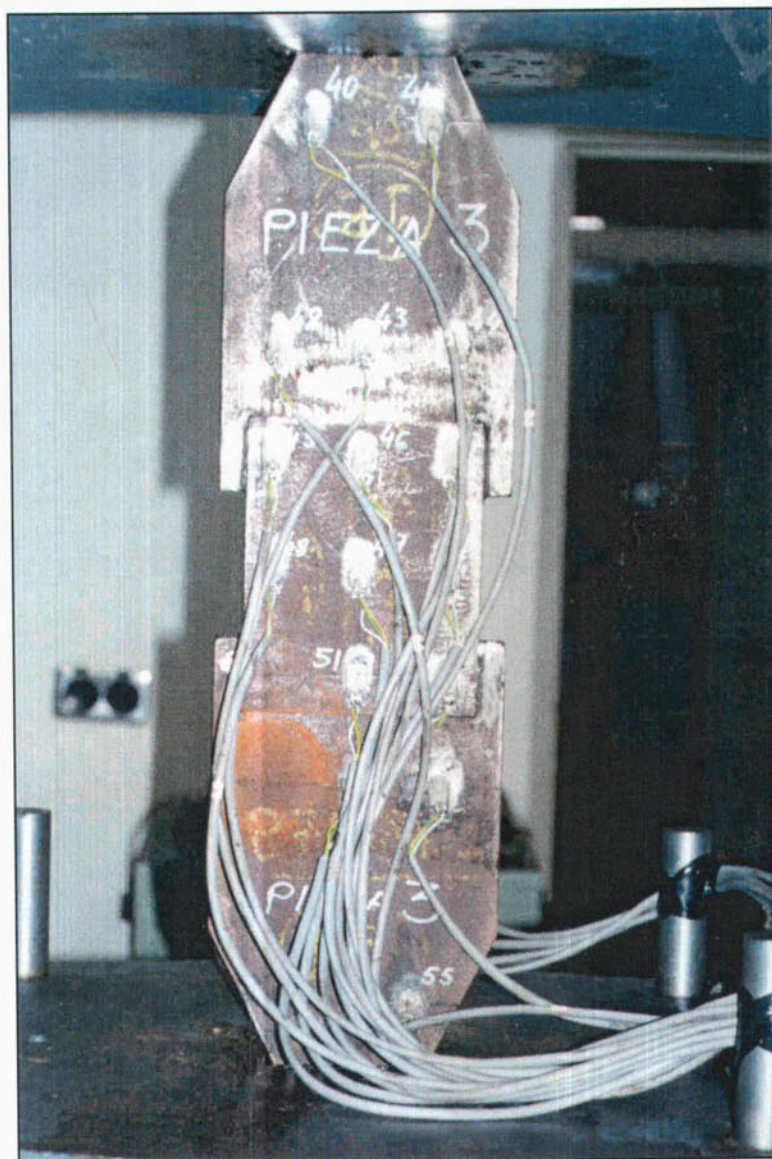


FOTO N°4: Detalle de instrumentación con galgas extensiométricas en la probeta 1T.

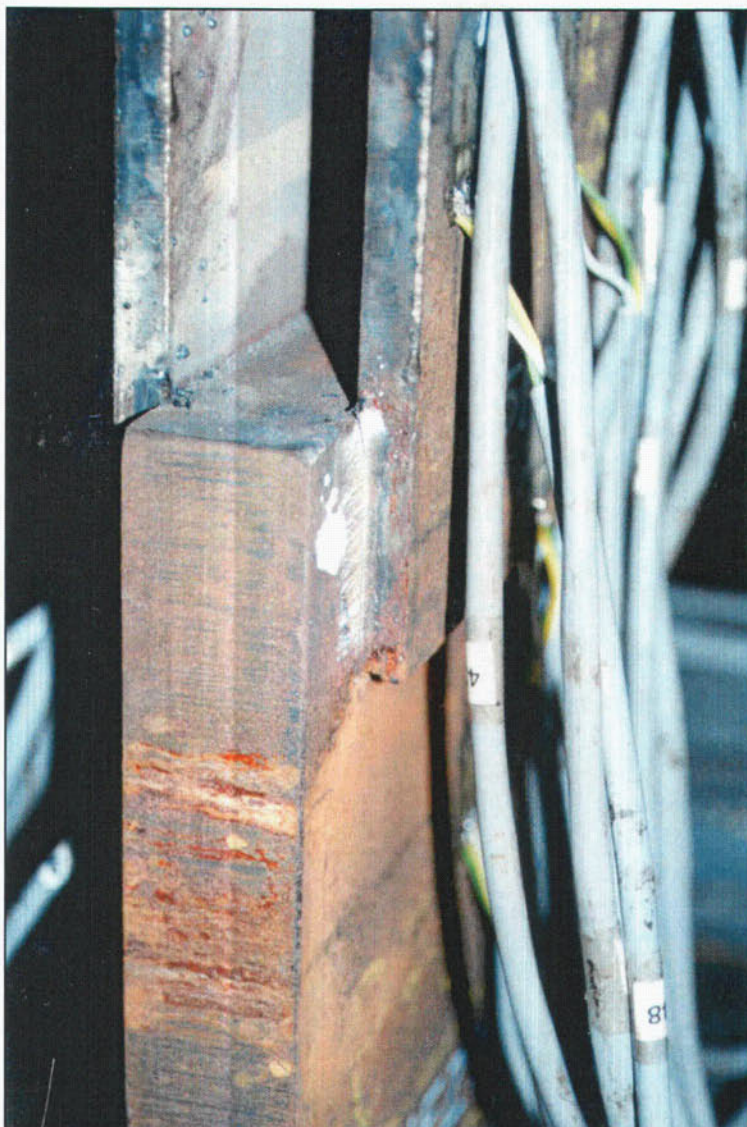


FOTO N°5: Detalle de rotura de soldadura en la probeta 1T tras el ensayo de tracción, por el plano de garganta.



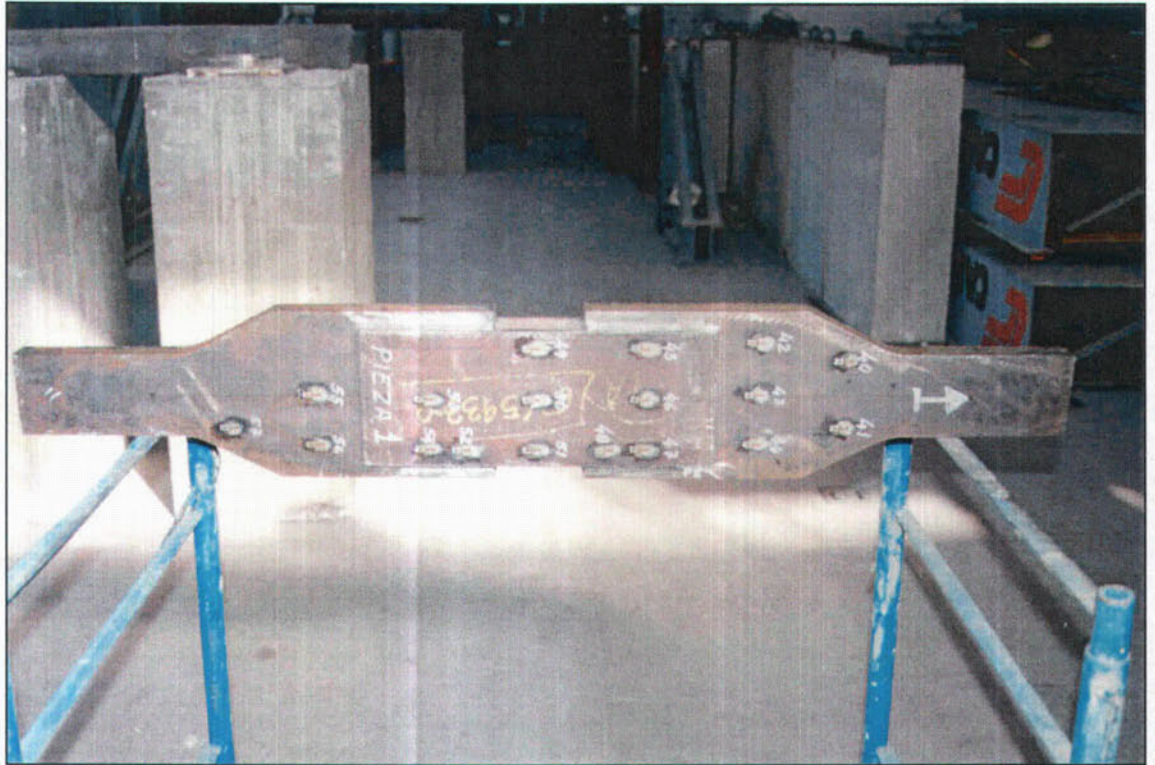


FOTO N°6: Vista de la probeta 2T.

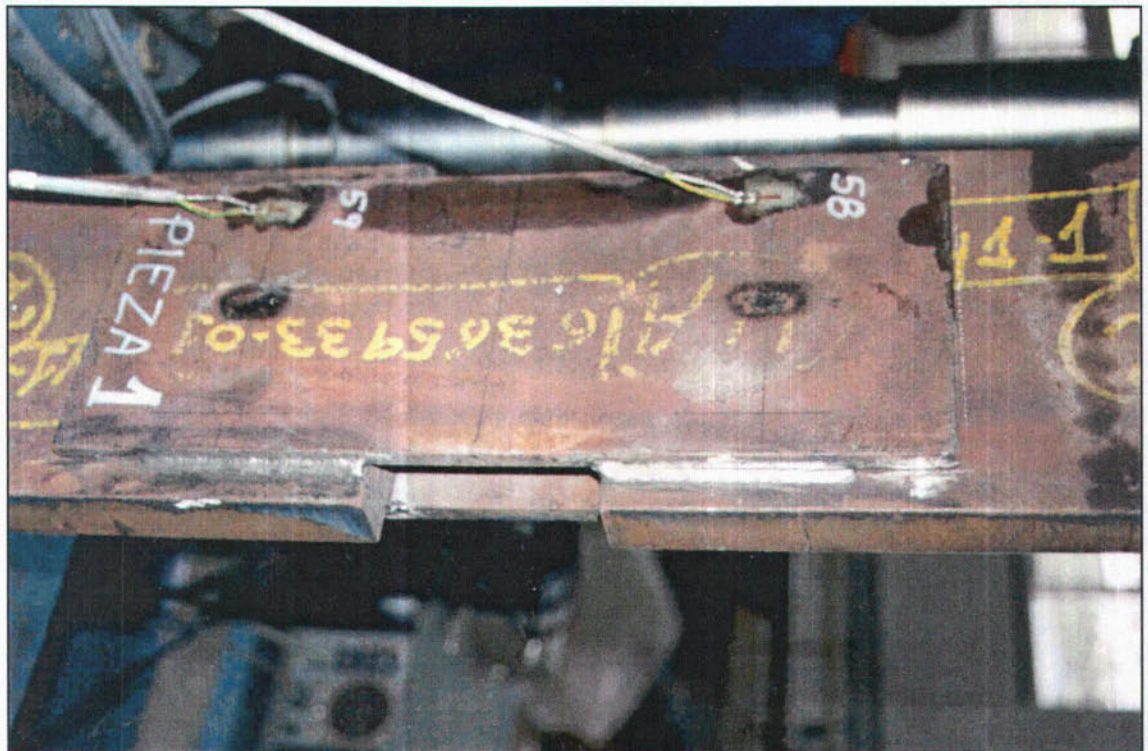


FOTO N°7: Detalle de rotura de soldadura por el plano de garganta en la probeta 2T.



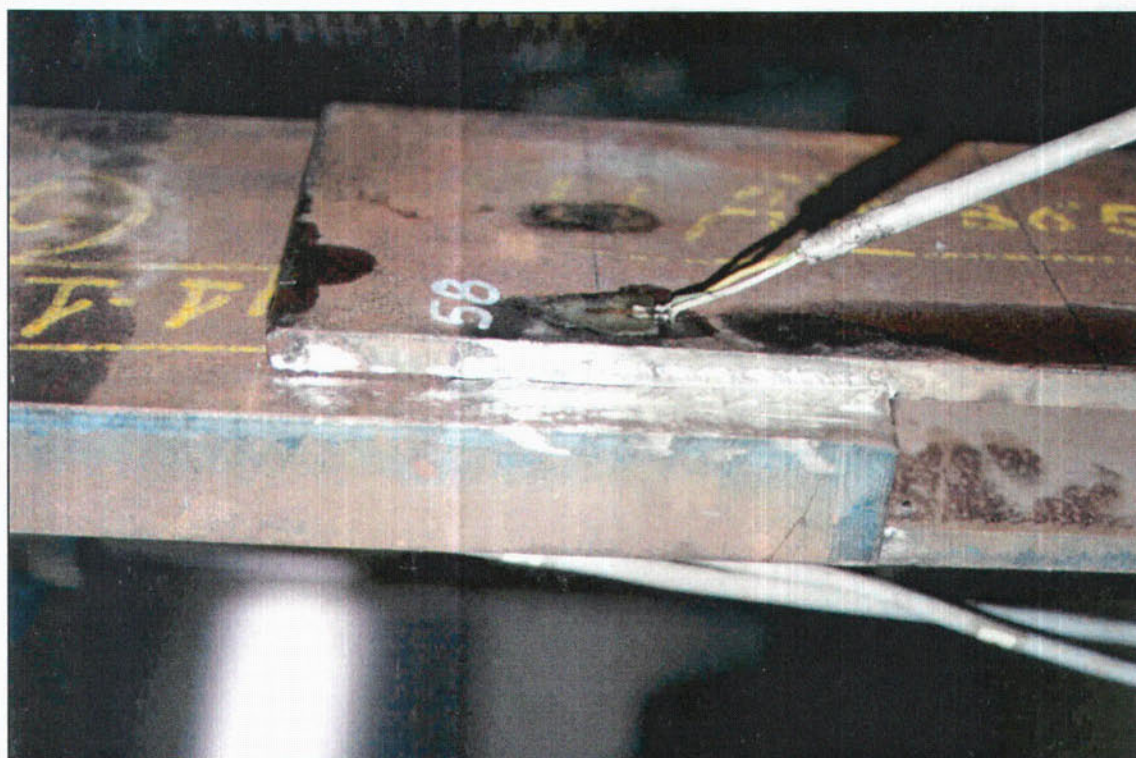


FOTO N°8: Nuevo detalle de rotura de soldadura en la probeta 2T, con la ubicación de una galga extensiométrica.



FOTO N°9: Perspectiva de la probeta 3T.



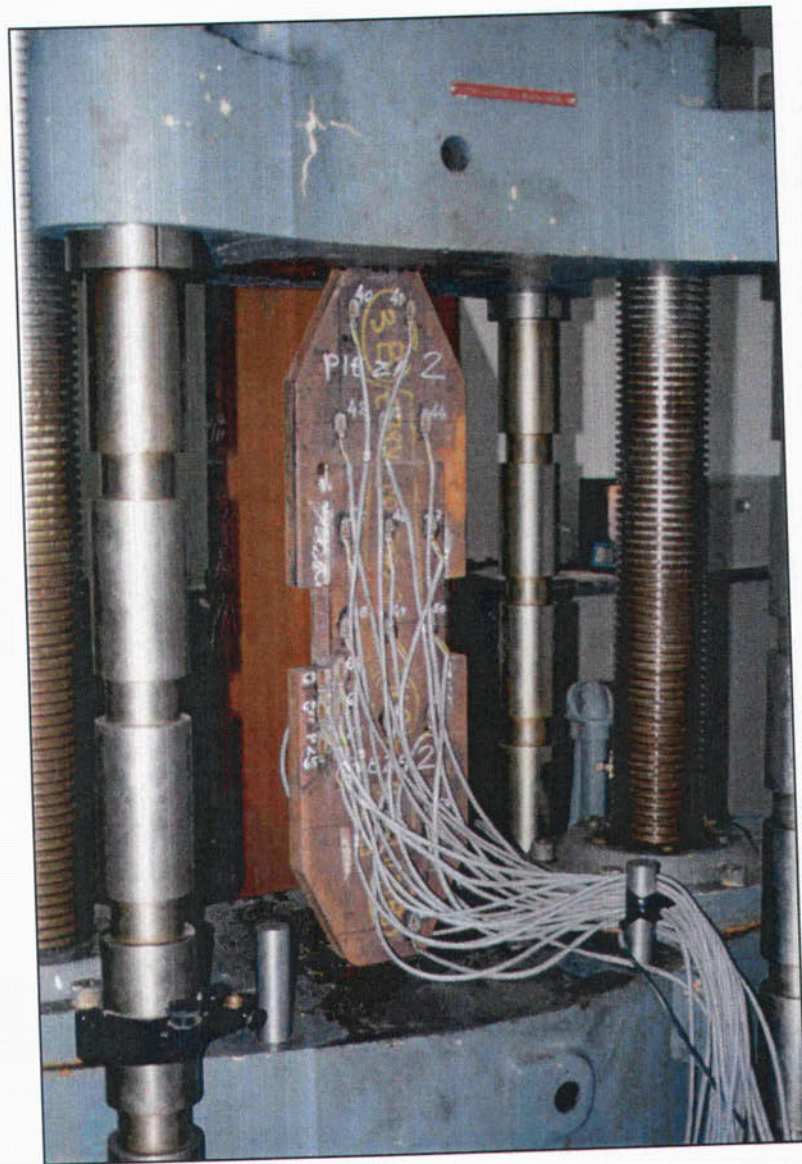


FOTO N°10: Probeta 3T en la prensa de tracción.



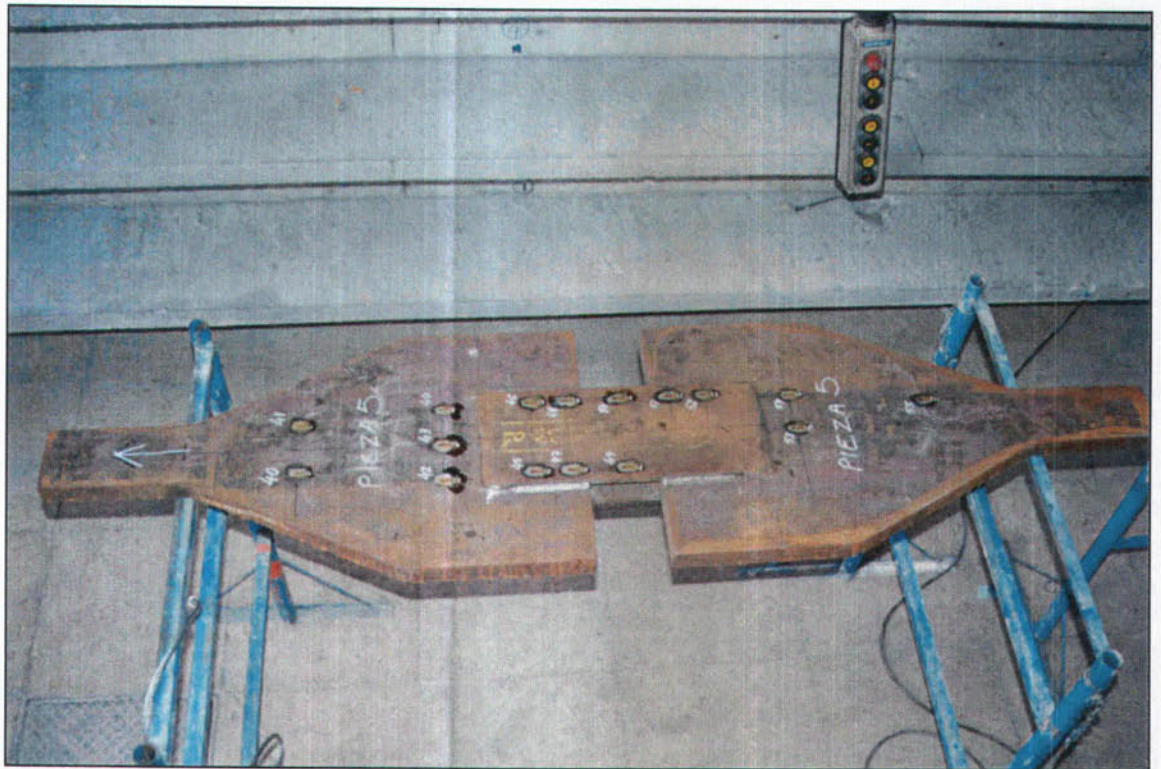


FOTO N°11: Vista de la probeta 4T.

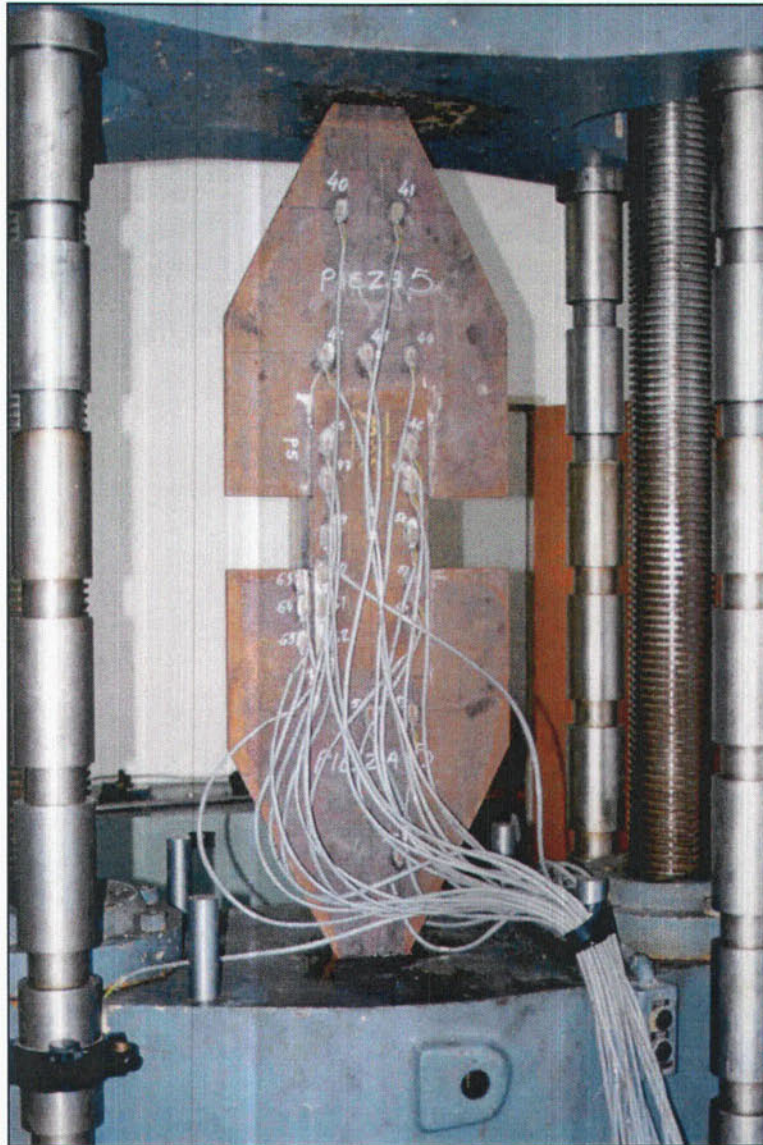


FOTO N°12: Probeta 4T en la prensa de tracción.





FOTO N°13: Vista de la probeta 5T.

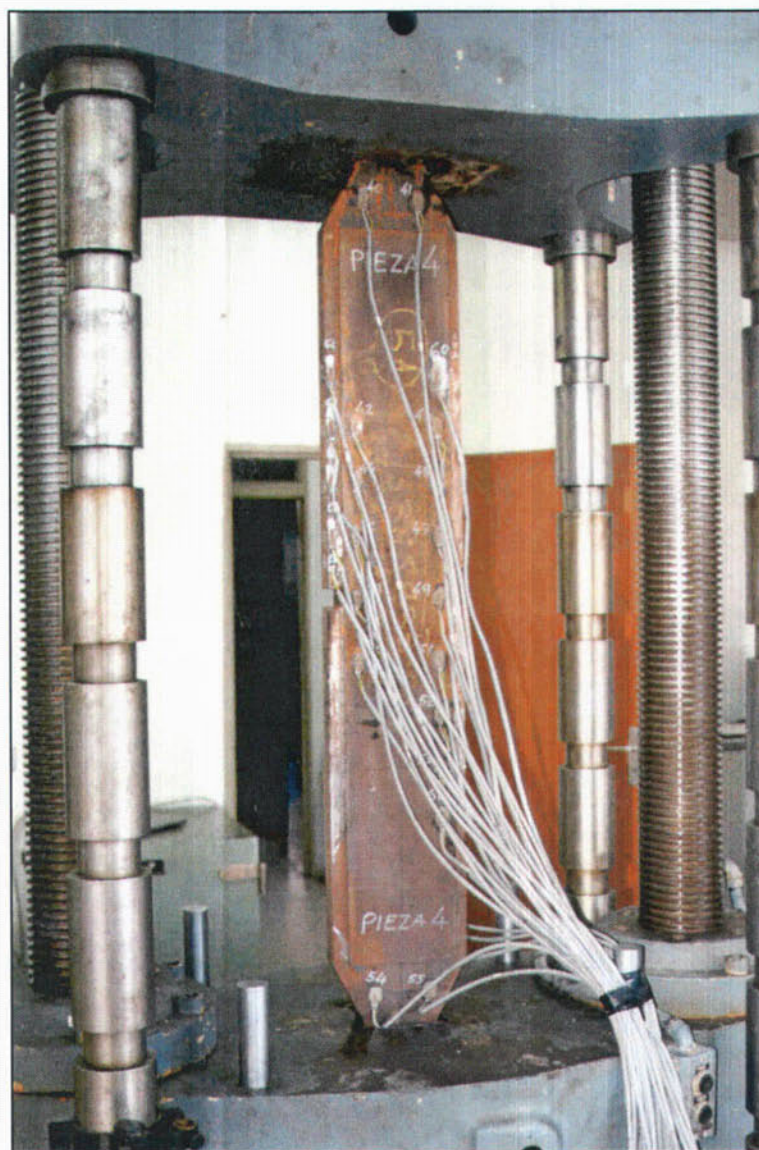


FOTO N°14: Probeta 5T en la prensa de tracción.



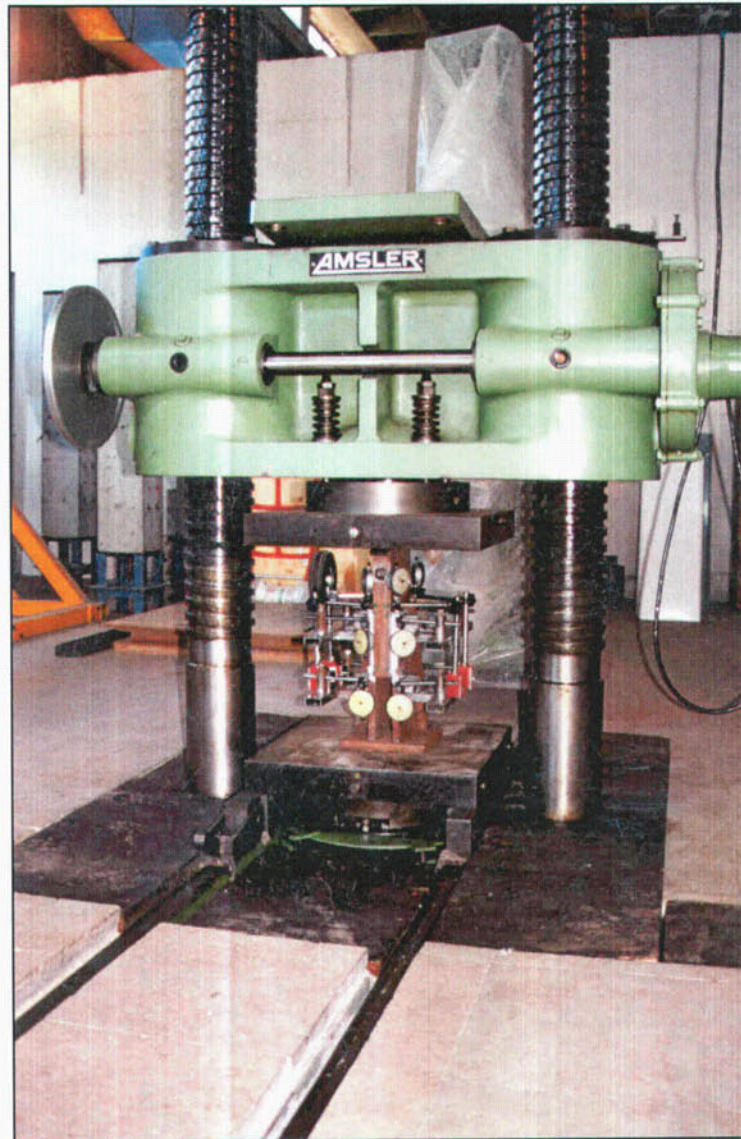


FOTO N°15: Prensa AMSLER, empleada en los ensayos a compresión.



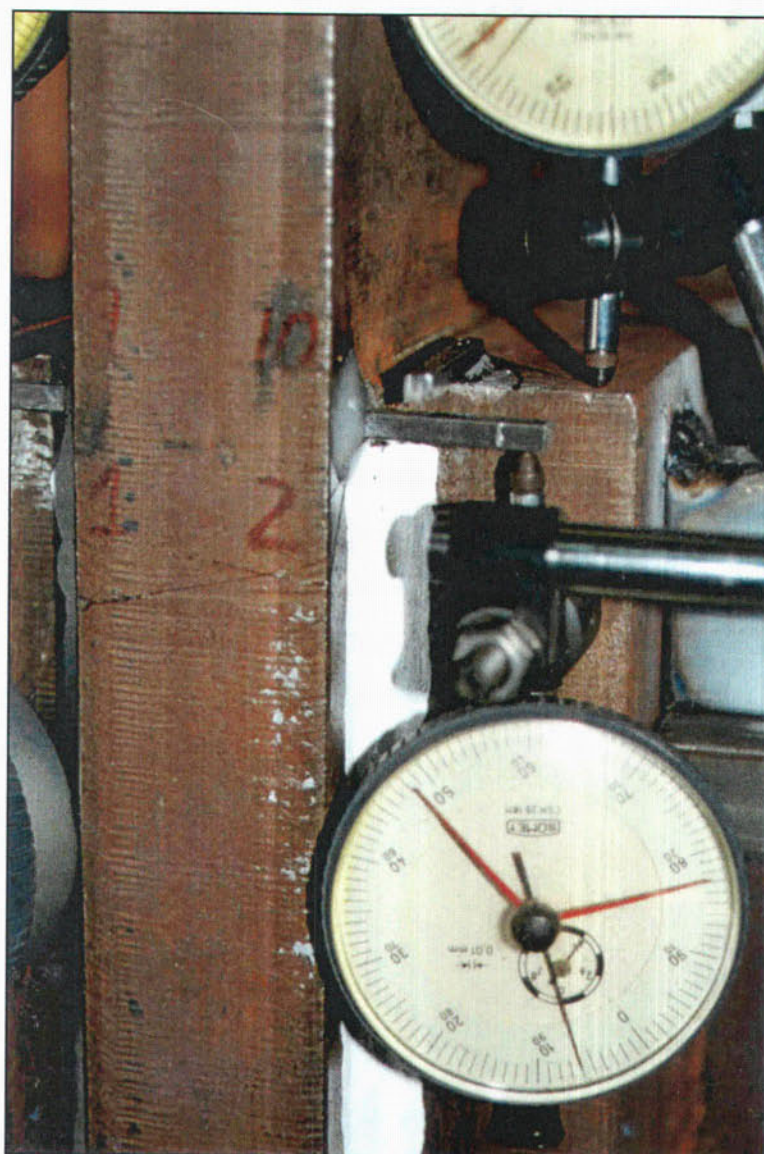


FOTO N°16: Detalle del dispositivo de medida con flexímetros.

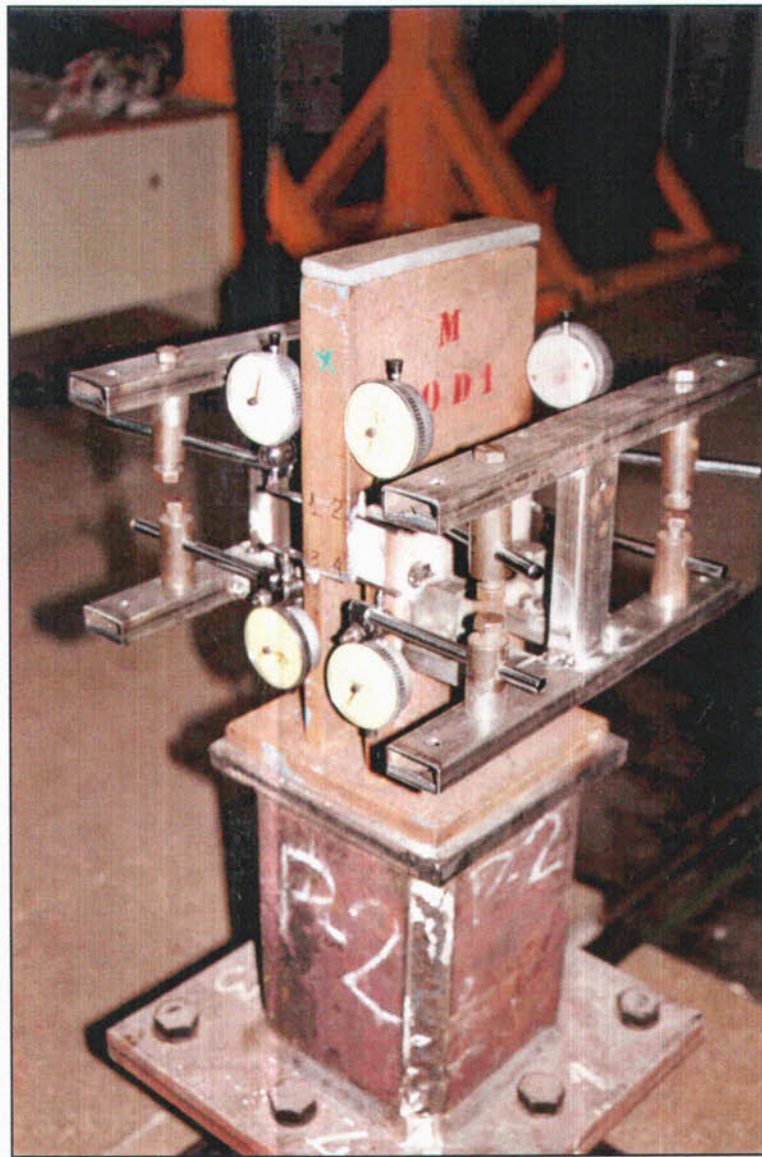


FOTO N°17: Probeta 1M con el equipo de flexímetros. En las soldaduras se ha realizado la pintura con cal.



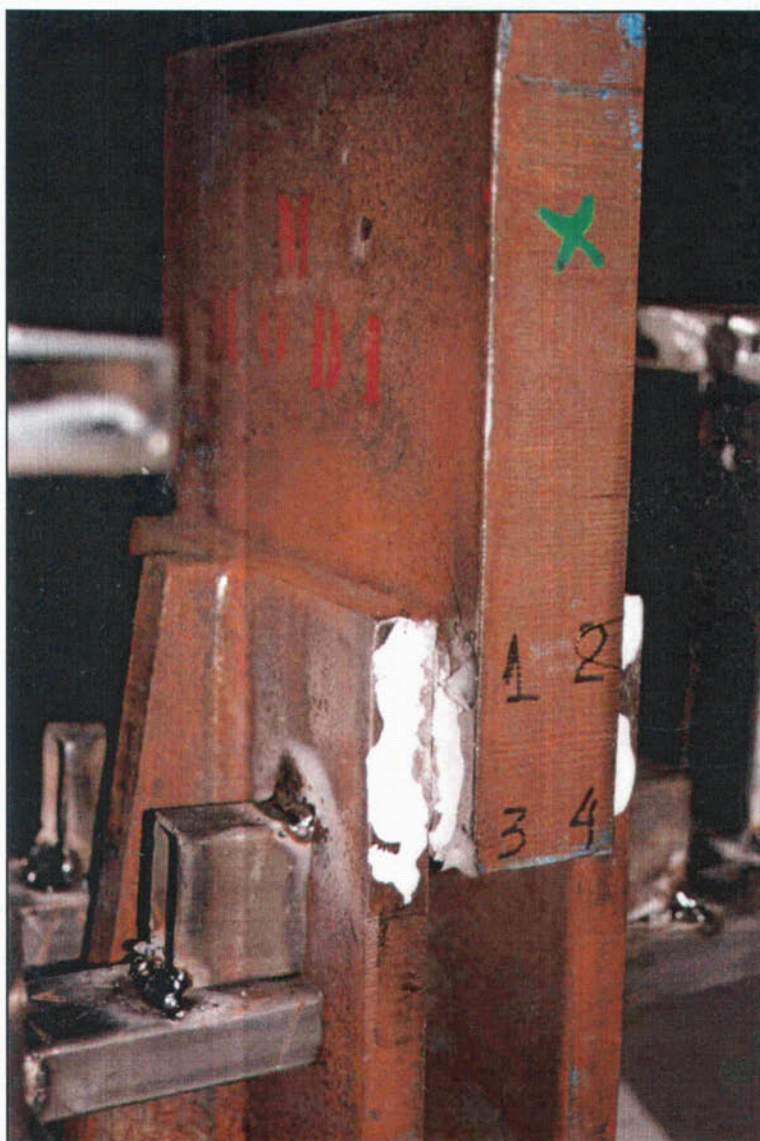


FOTO N°18: Probeta 1M después del ensayo. Se observa la rotura por el plano de garganta en la soldadura 1-3. La cal se encuentra desprendida en dicha zona de rotura.



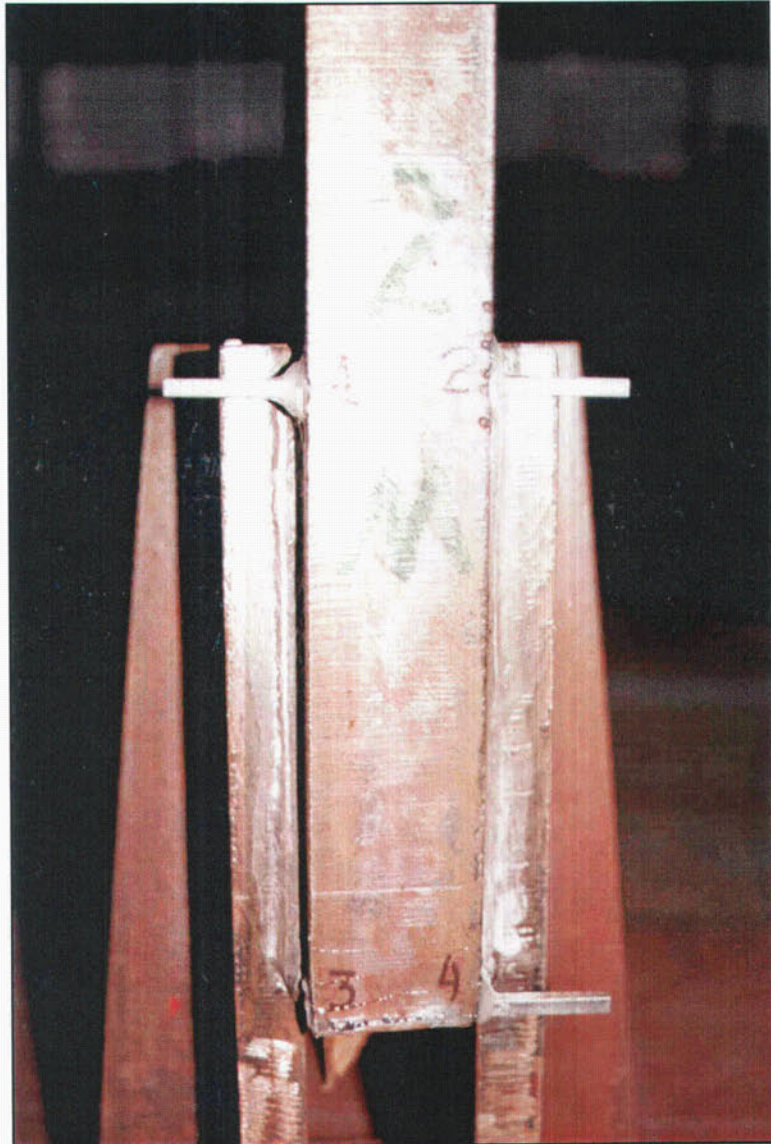


FOTO N°19: Probeta 2M después de la rotura. Las soldaduras se limpiaron de los restos de cal, para poder observar el plano de rotura.

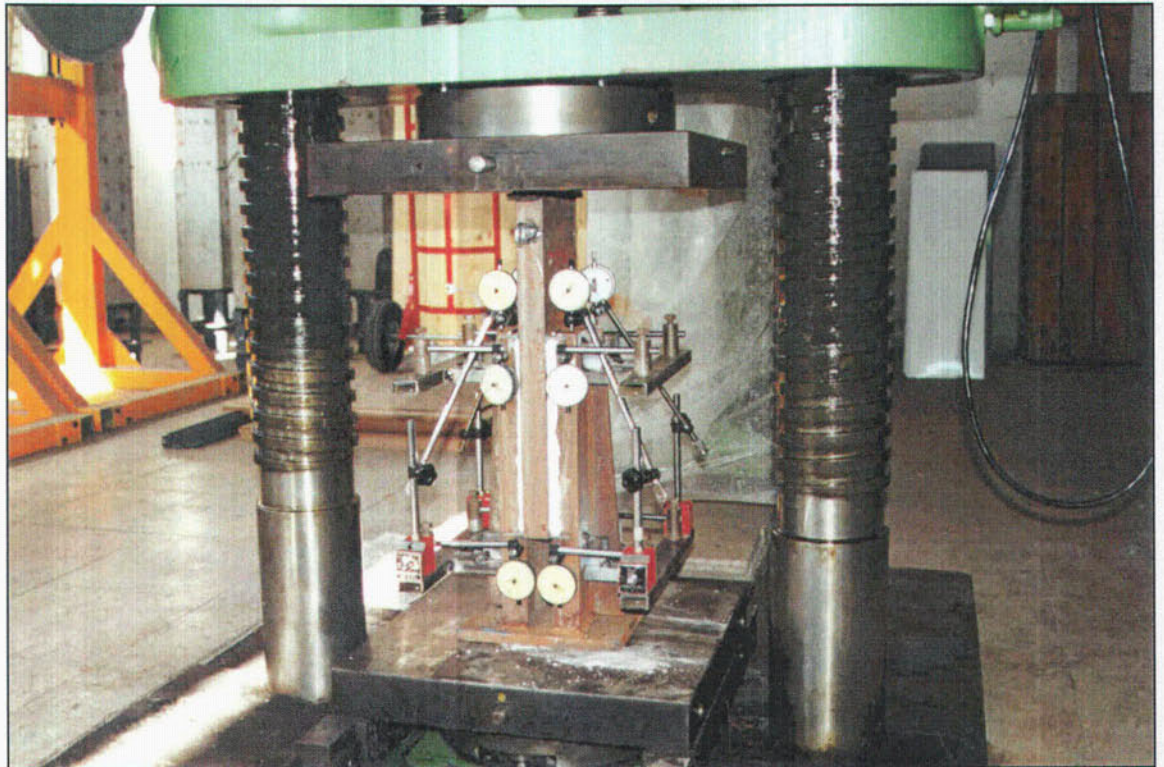


FOTO N°20: Probeta 3M situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal. Obsérvese la banda de neopreno situada en el contacto entre la probeta y el plato fijo, colocada con objeto de que las imperfecciones en el acabado de la cara superior de la probeta afecten lo menos posible al reparto homogéneo de la carga.



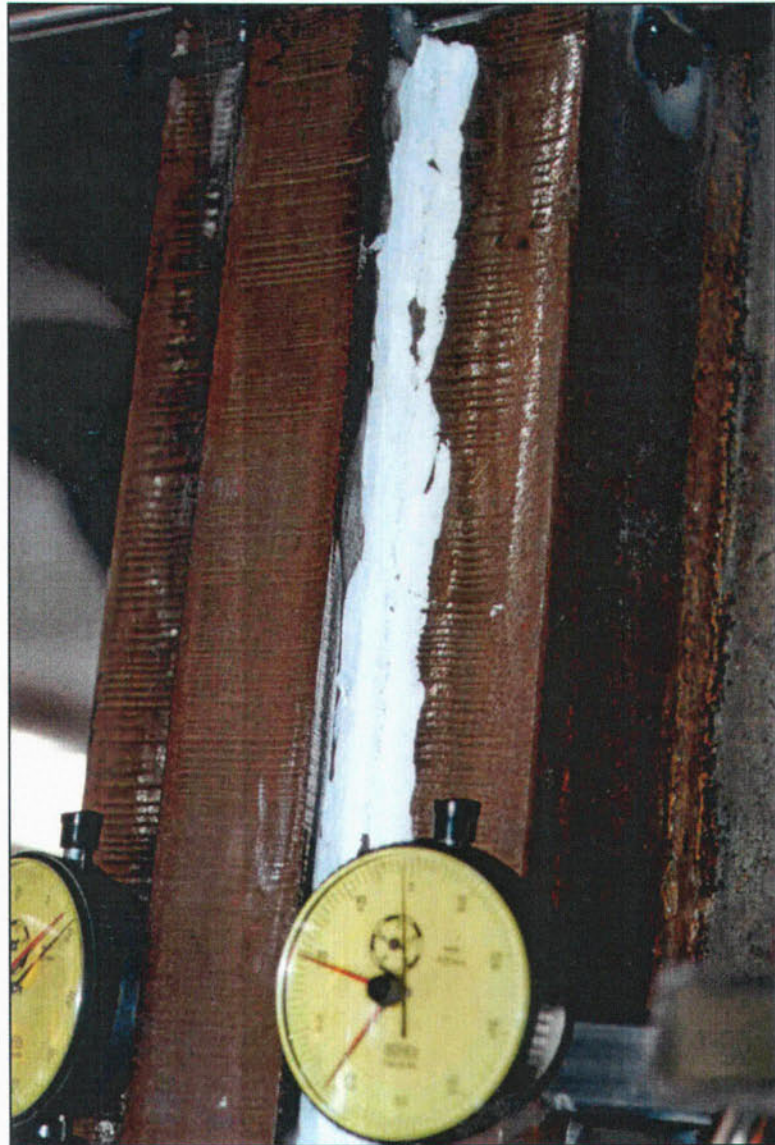


FOTO Nº21: Probeta 3M. La fotografía se ha tomado durante el ensayo de rotura. Se observa la cal agrietada en toda la longitud de la soldadura (30 cm.), señal de que dicha soldadura se encuentra prácticamente plastificada.

UNIVERSIDAD DE GRANADA  
/ 9 FEB. 2001  
COMISION DE DOCTORADO



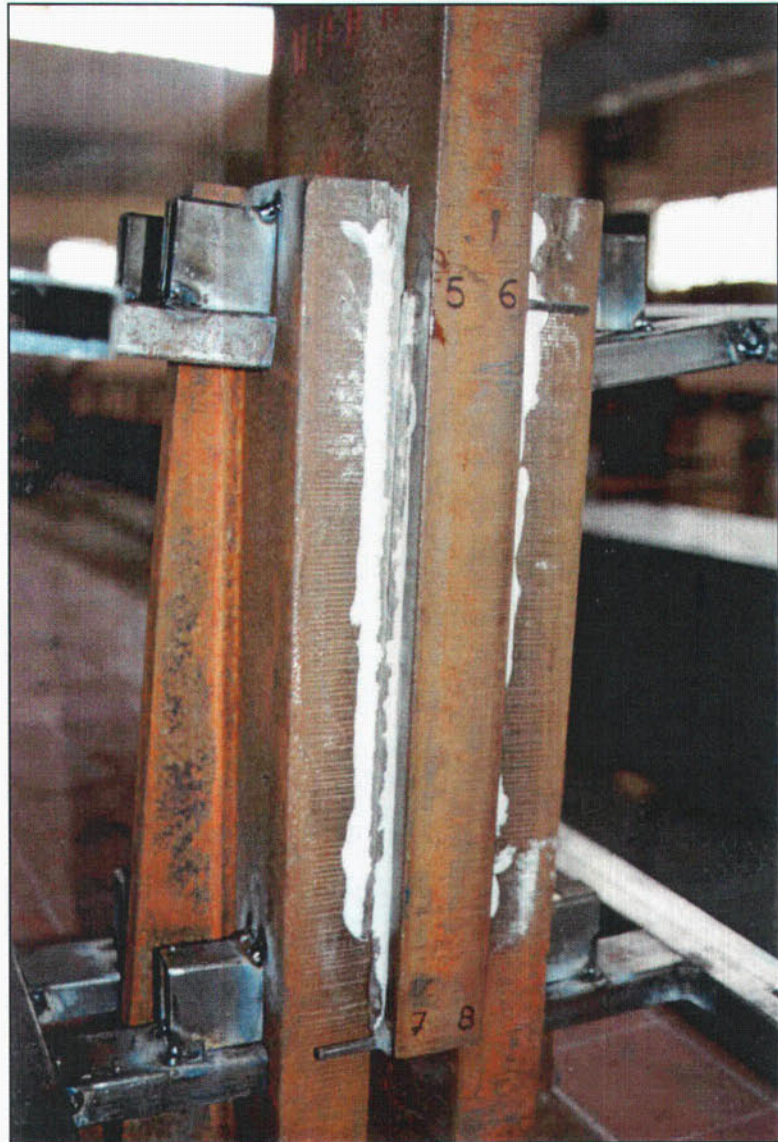


FOTO N°22: Probeta 3M ya rota. La cal se desprendió completamente en toda la zona de rotura. Se observa nítidamente el plano de rotura, por la sección de garganta, en la soldadura 5-7.



FOTO Nº23: Detalle de la probeta 3M ya rota. En este caso se observa nítidamente el plano de rotura, también por la sección de garganta, en la soldadura 1-3.





FOTO N°24: Nuevo detalle de la probeta 3M rota con las soldaduras limpias de cal, apreciándose el plano de rotura en la soldadura 5-7.



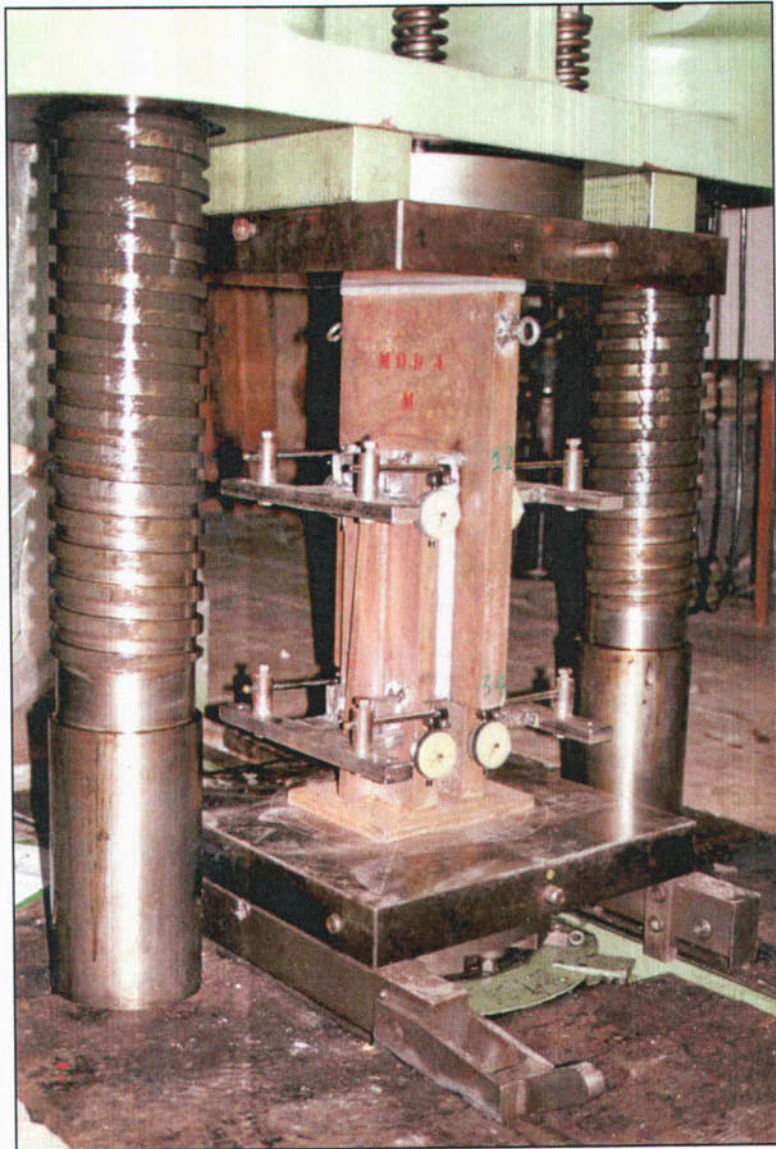


FOTO N°25: Probeta 4M situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con cal, habiéndose situado la banda de neopreno en el contacto entre la probeta y el plato fijo.





FOTO N°26: Detalle de la probeta 4M ya rota con las soldaduras limpias de cal, apreciándose el plano de rotura en la soldadura 1-3.



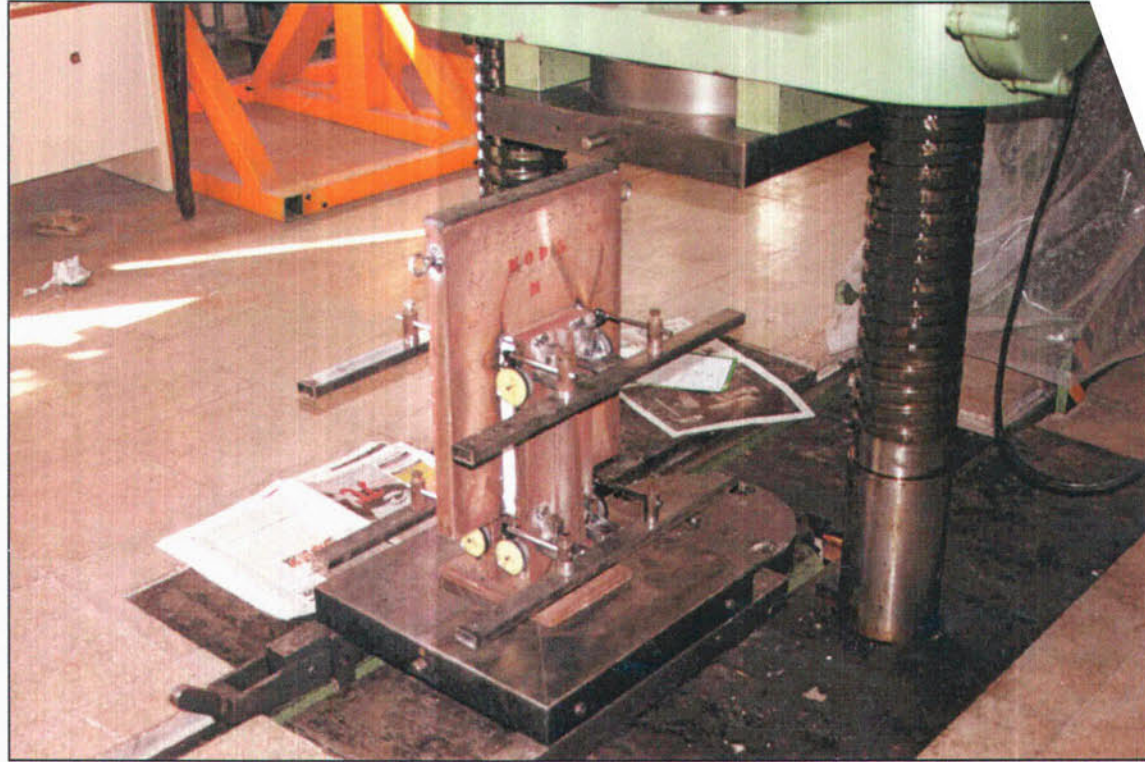


FOTO N°27: Probeta 5M situándose en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal. En la parte superior de la probeta se ha situado la banda de neopreno para el contacto entre la probeta y el plato fijo.



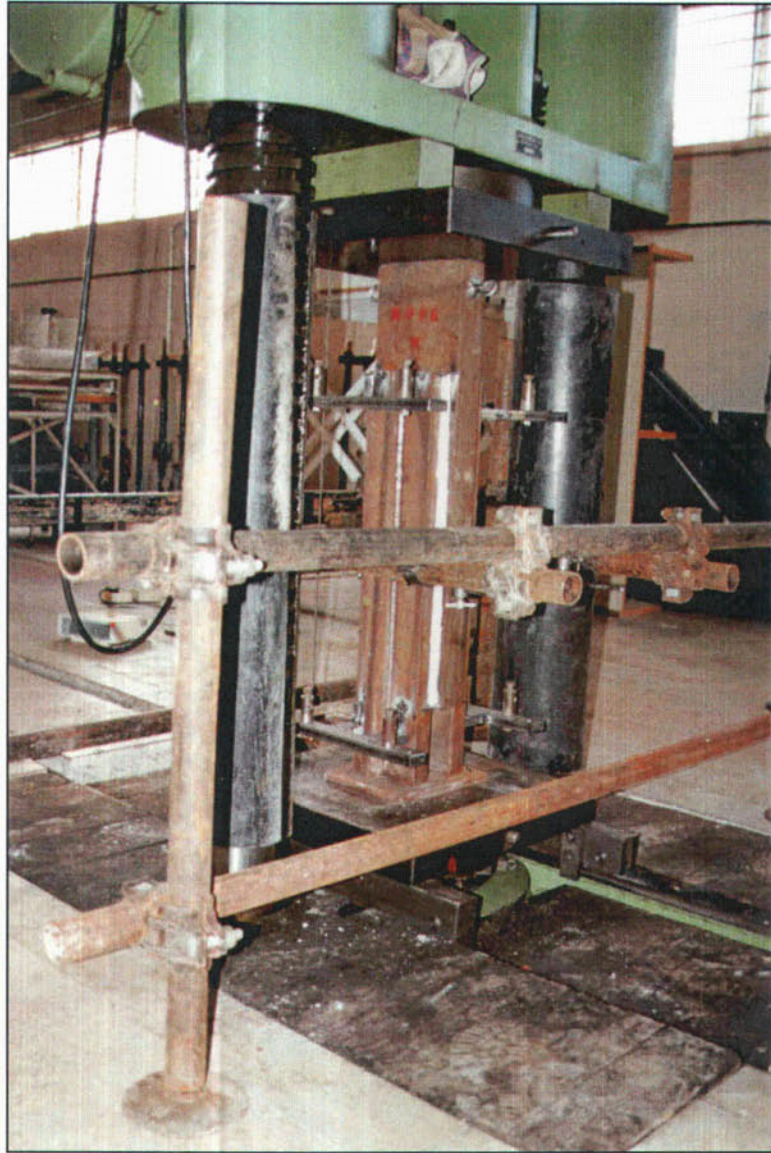


FOTO N°28: Probeta 6M situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal, habiéndose situado la banda de neopreno en el contacto entre la probeta y el plato fijo.



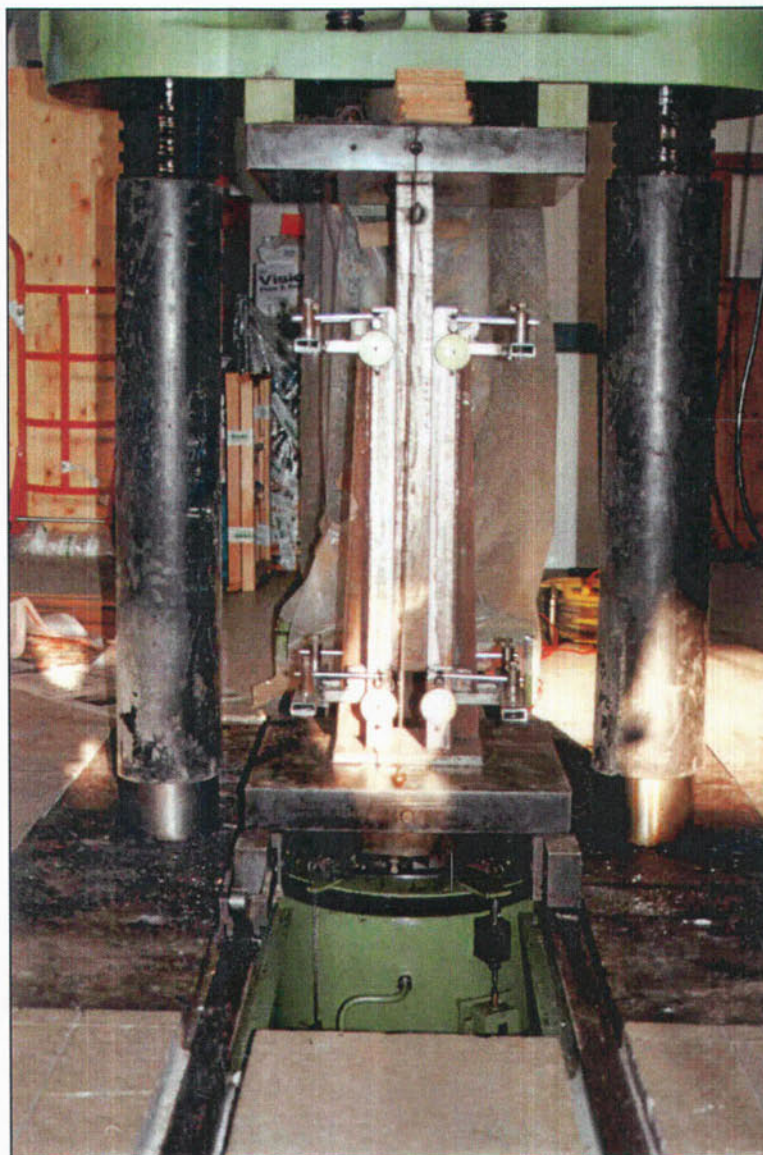


FOTO N°29: Otra perspectiva de la probeta 6M situada en la prensa de compresión.

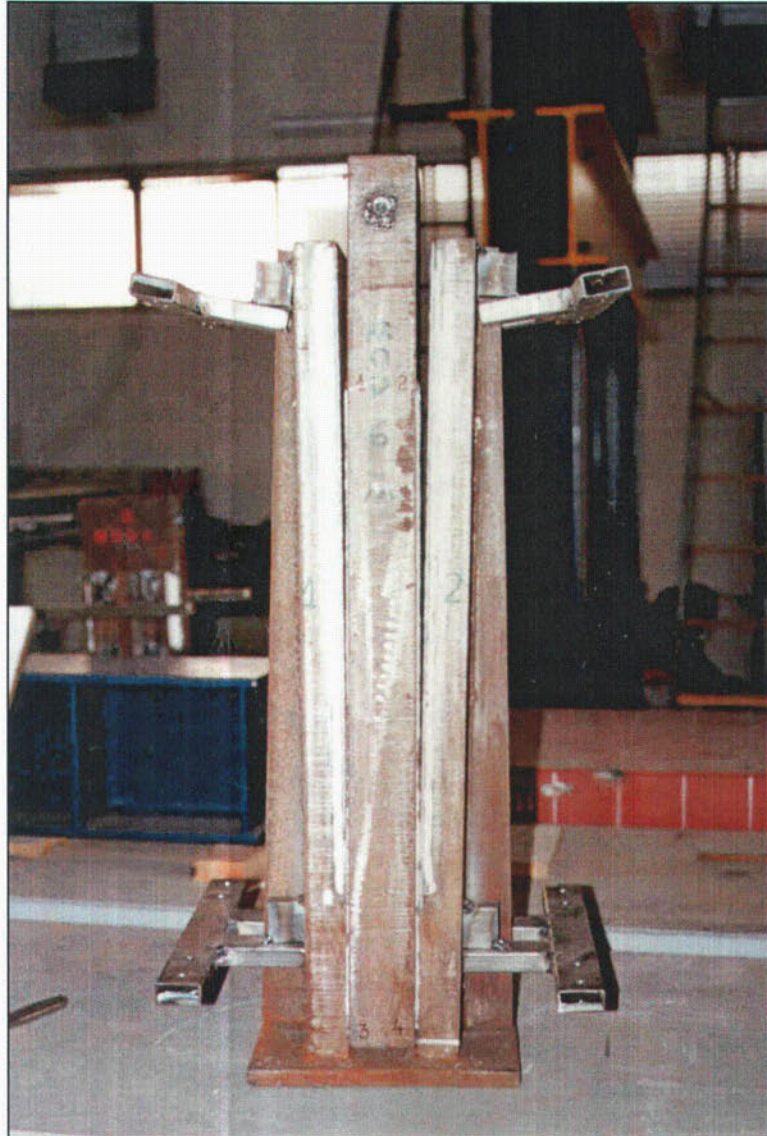


FOTO N°30: Detalle de la probeta 6M ya rota. Se encuentran completamente arrancadas las soldaduras 1-3 y 2-4. La rotura nuevamente se produce por la sección de garganta de las soldaduras.





FOTO N°31: Probeta 7M situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con cal, habiéndose situado la banda de neopreno en el contacto entre la probeta y el plato fijo.



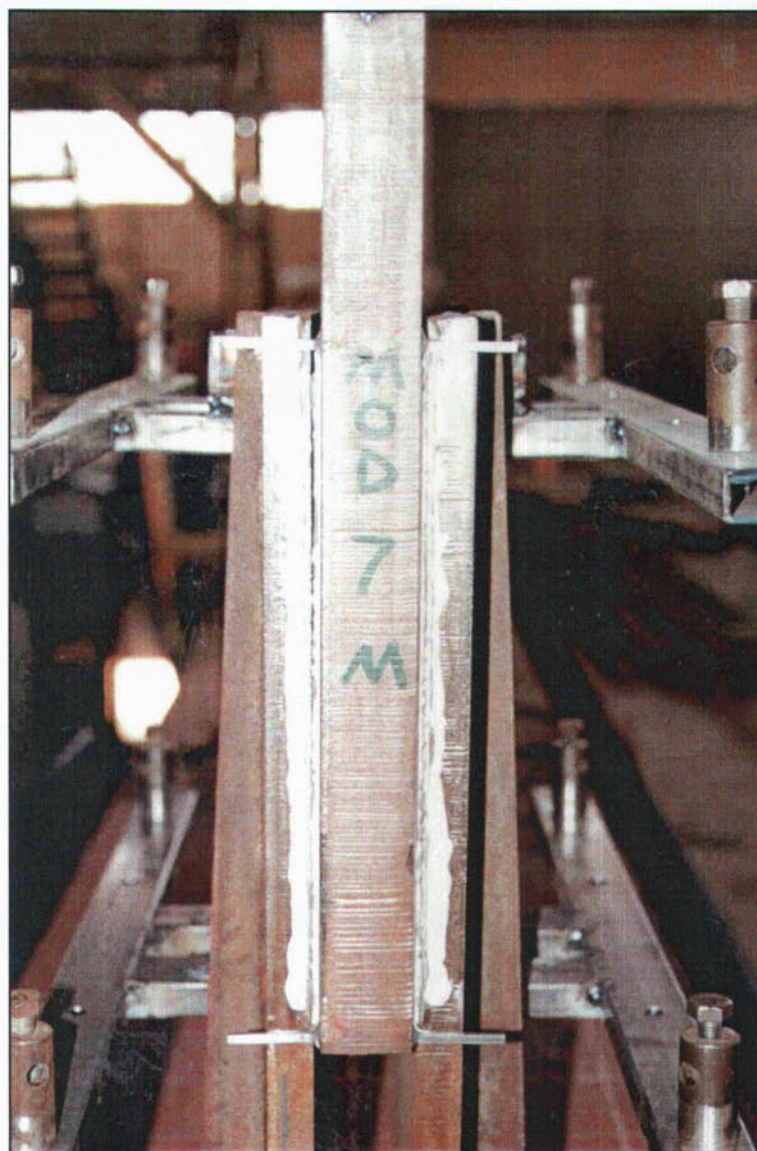


FOTO N°32: Detalle de la probeta 7M ya rota. Se observa en la fotografía la rotura de las soldaduras 1-3 y 2-4. La rotura nuevamente se produce por la sección de garganta de las soldaduras.

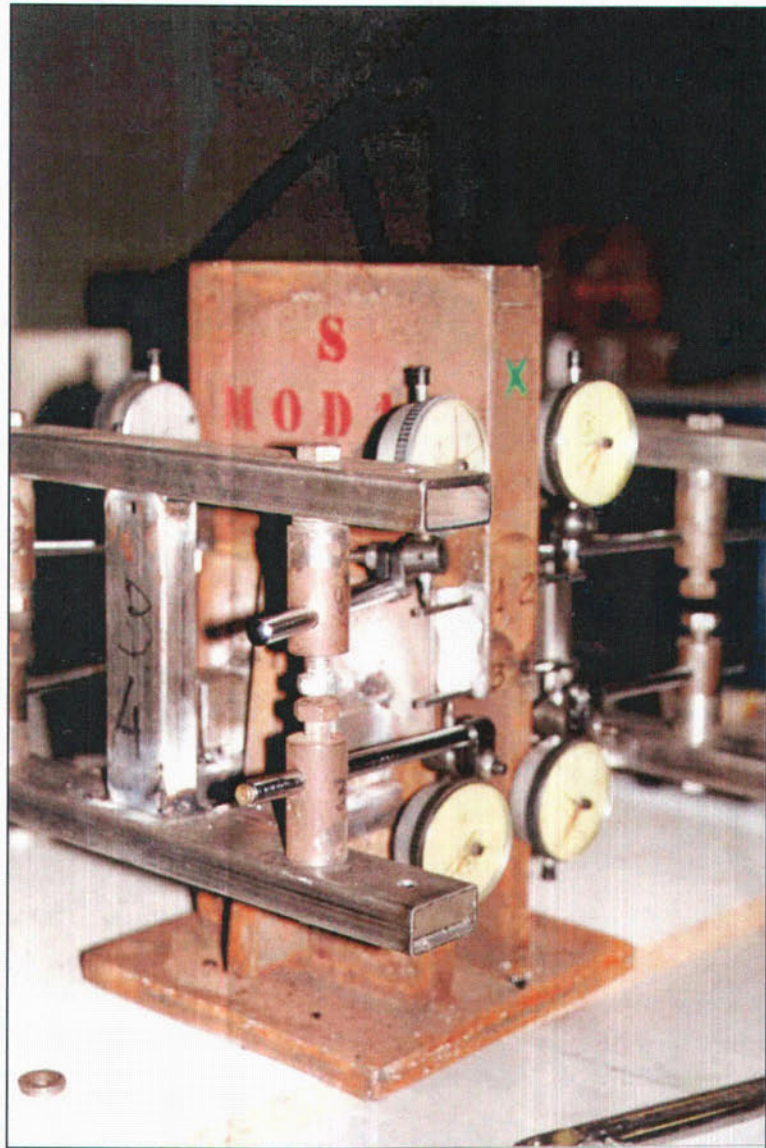


FOTO N°33: Probeta 1S con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal.



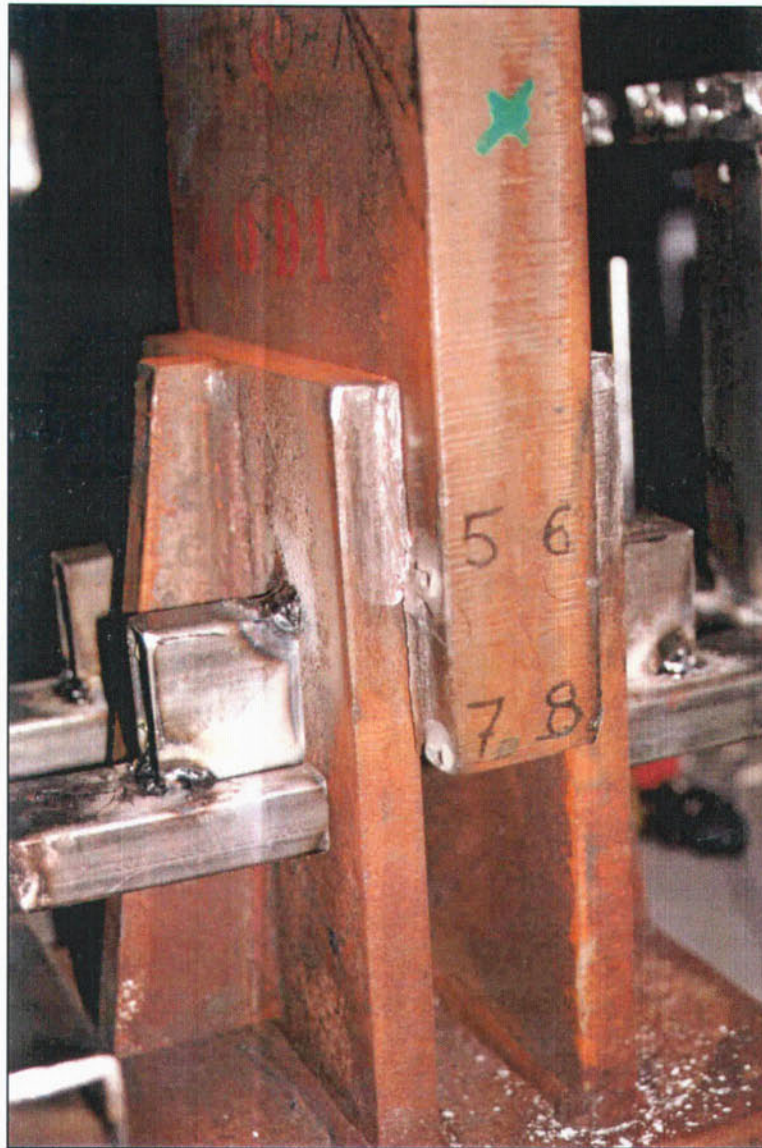


FOTO N°34: Detalle de la probeta 1S ya rota, con las soldaduras limpias de cal. Se observa en la fotografía la rotura de las soldaduras 5-7 y 6-8 por la sección de garganta.





FOTO N°35: Probeta 2S situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal, habiéndose situado la banda de neopreno en el contacto entre la probeta y el plato fijo.



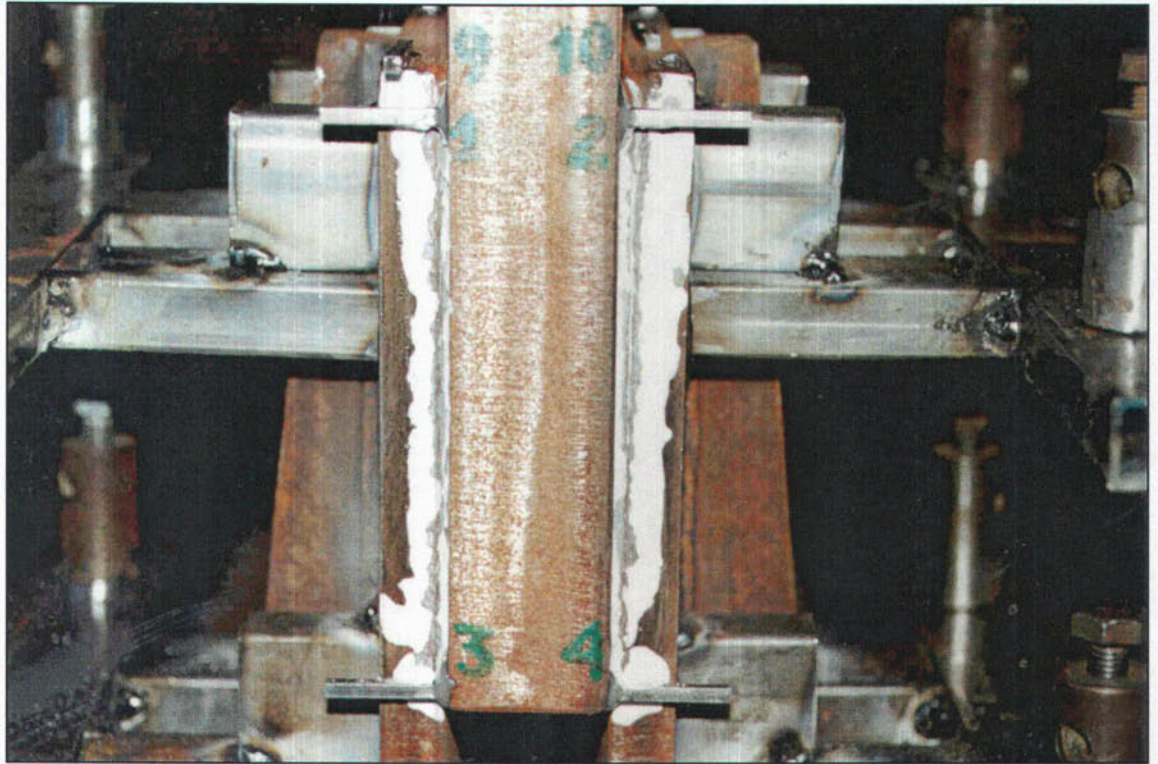
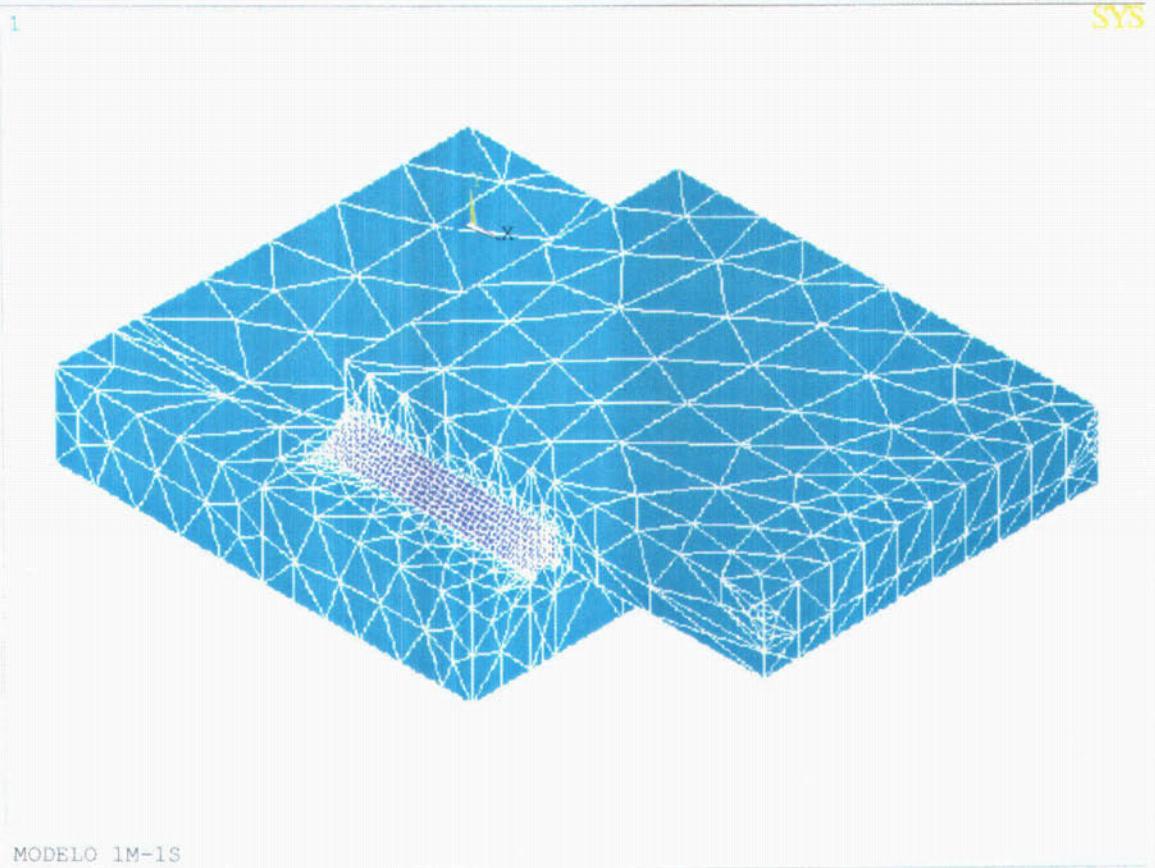
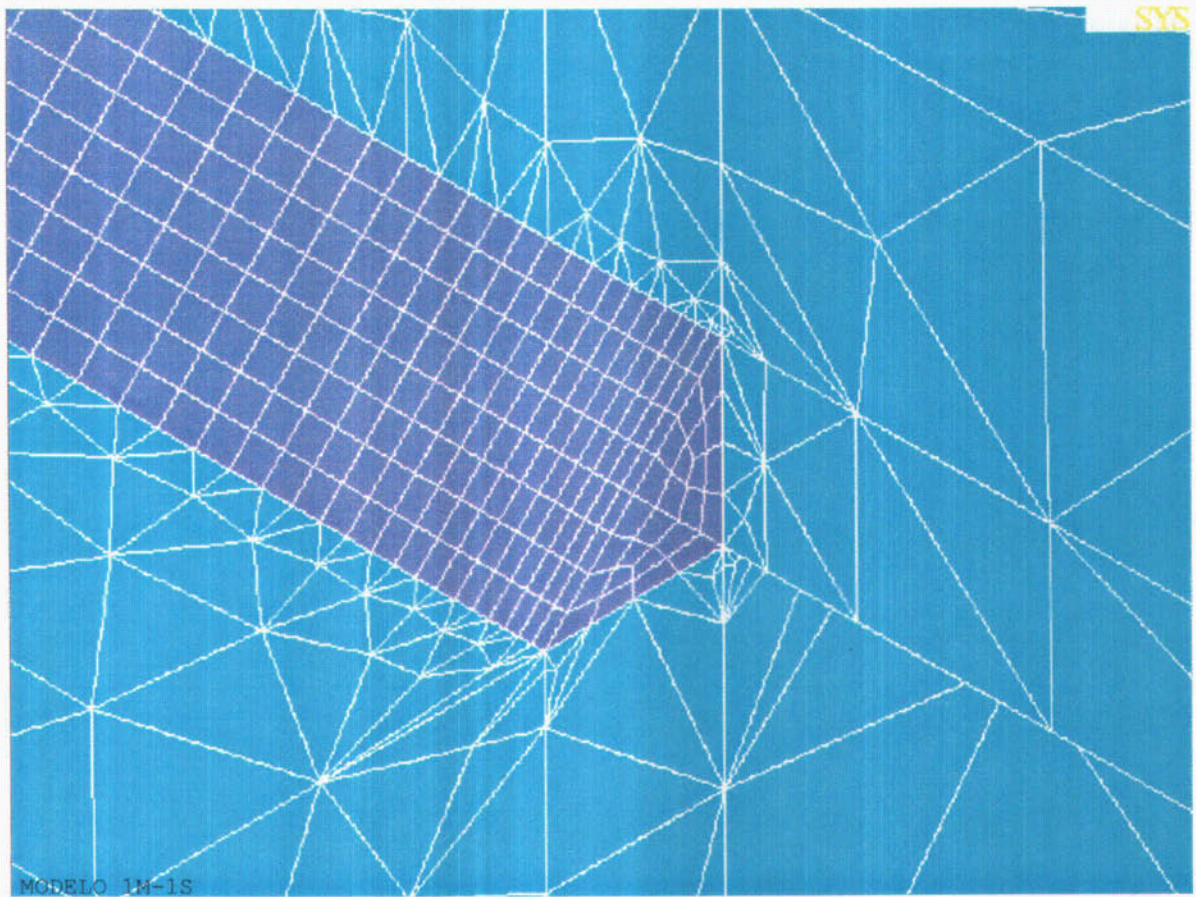


FOTO N°36: Detalle de la probeta 2S ya rota. Se observa en la fotografía la rotura de las soldaduras 1-3 y 2-4. La rotura nuevamente se produce por la sección de garganta de las soldaduras.



**Modelo 1M-1S. Longitud de cordón  $L=5\text{cm}$ . Perspectiva del modelo**

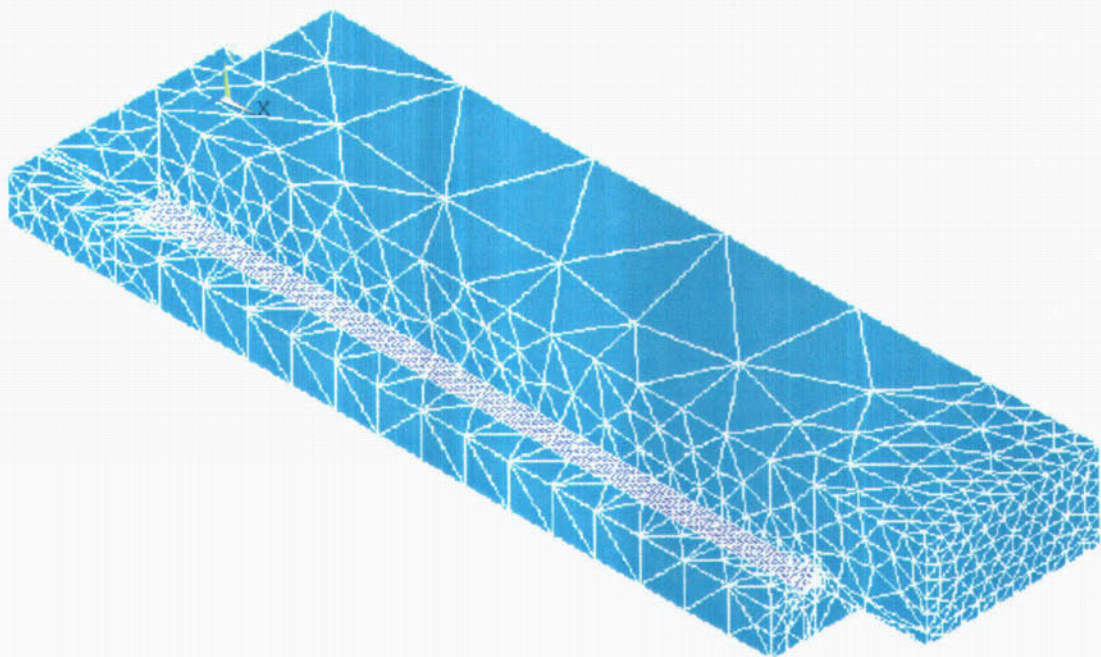




**Modelo 1M-1S. Longitud de cordón  $L= 5\text{cm}$ . Detalle del extremo del cordón en su unión con las chapas.**

1

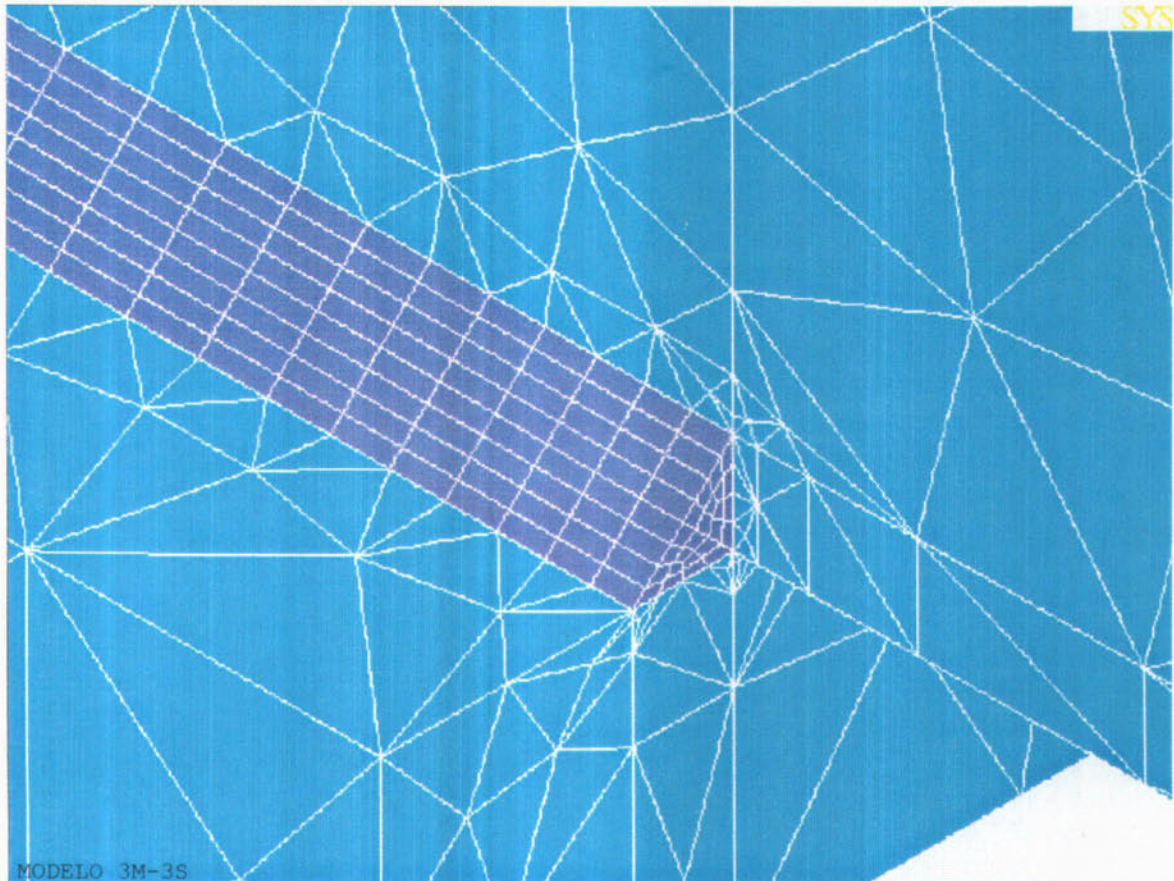
SYS



MODELO 3M-3S

**Modelo 3M-3S. Longitud de cordón  $L=30\text{cm}$ . Perspectiva del modelo**





**Modelo 3M-3S. Longitud de cordón  $L=30\text{cm}$ . Detalle del extremo del cordón en su unión con las chapas.**



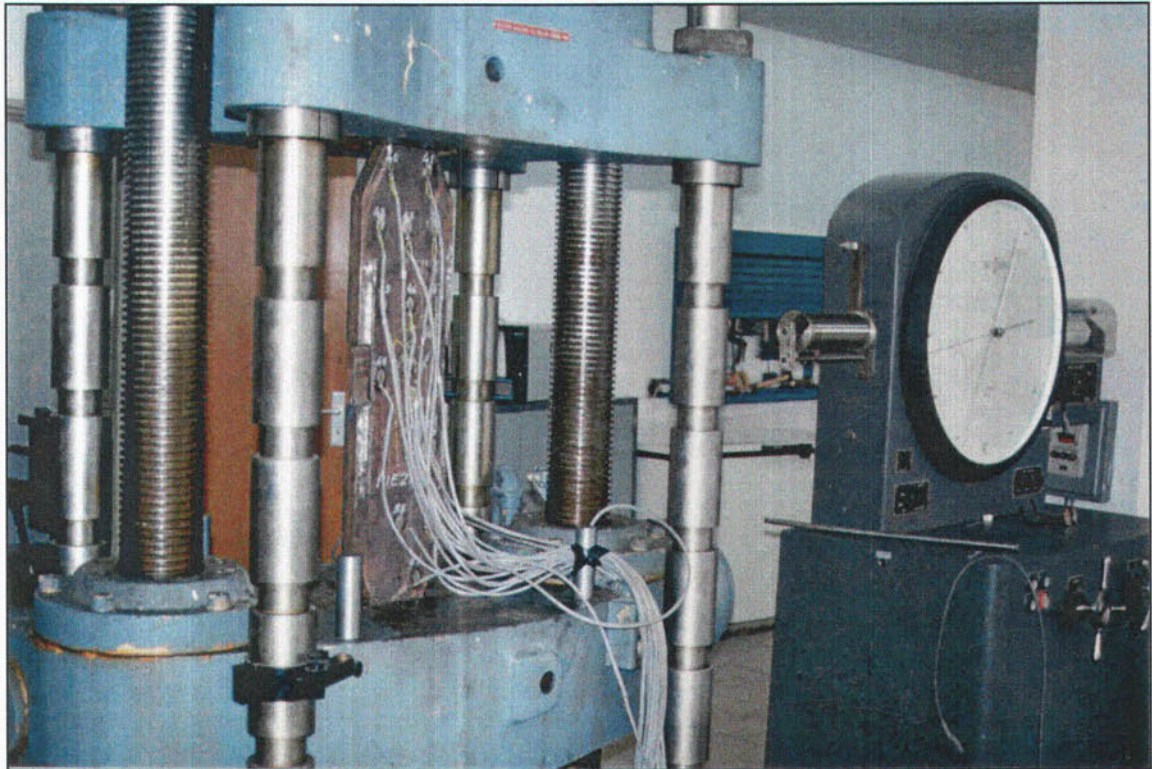


FOTO N°1: Prensa empleada en los ensayos a tracción.

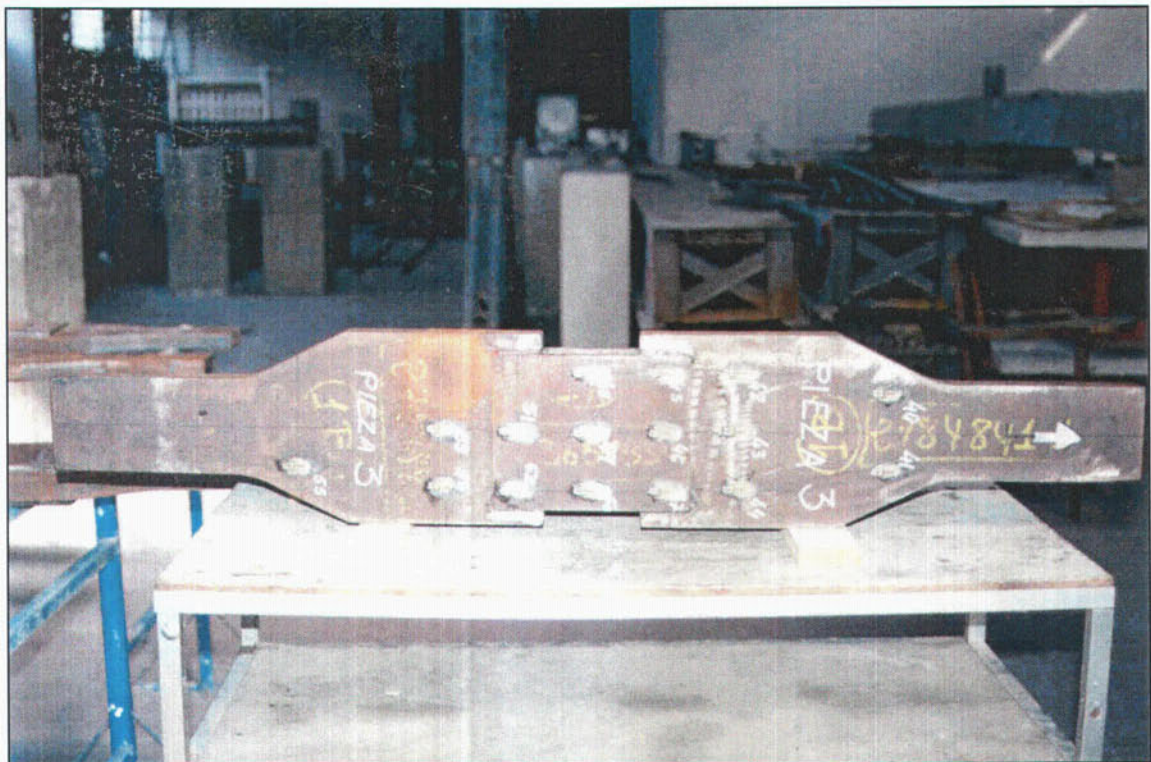


FOTO N°2: Perspectiva de la probeta 1T.





FOTO N°3: Probeta 1T en la prensa de tracción.



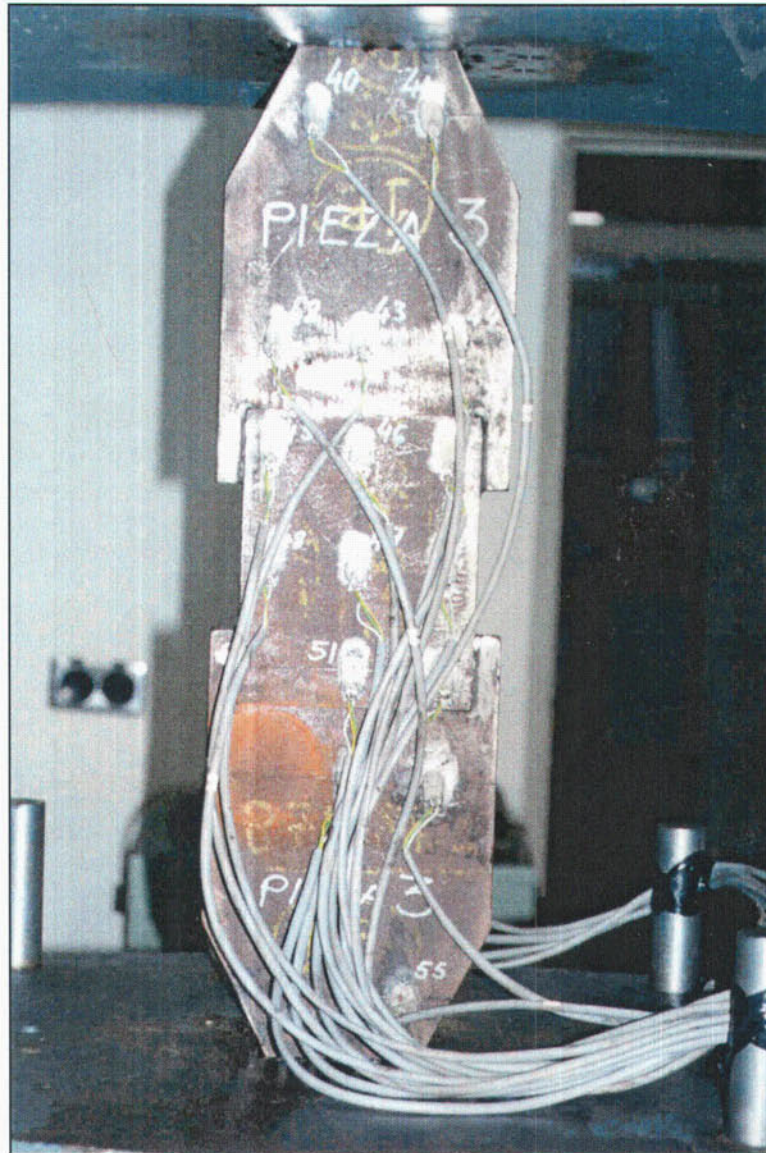


FOTO N°4: Detalle de instrumentación con galgas extensiométricas en la probeta 1T.



FOTO N°5: Detalle de rotura de soldadura en la probeta 1T tras el ensayo de tracción, por el plano de garganta.



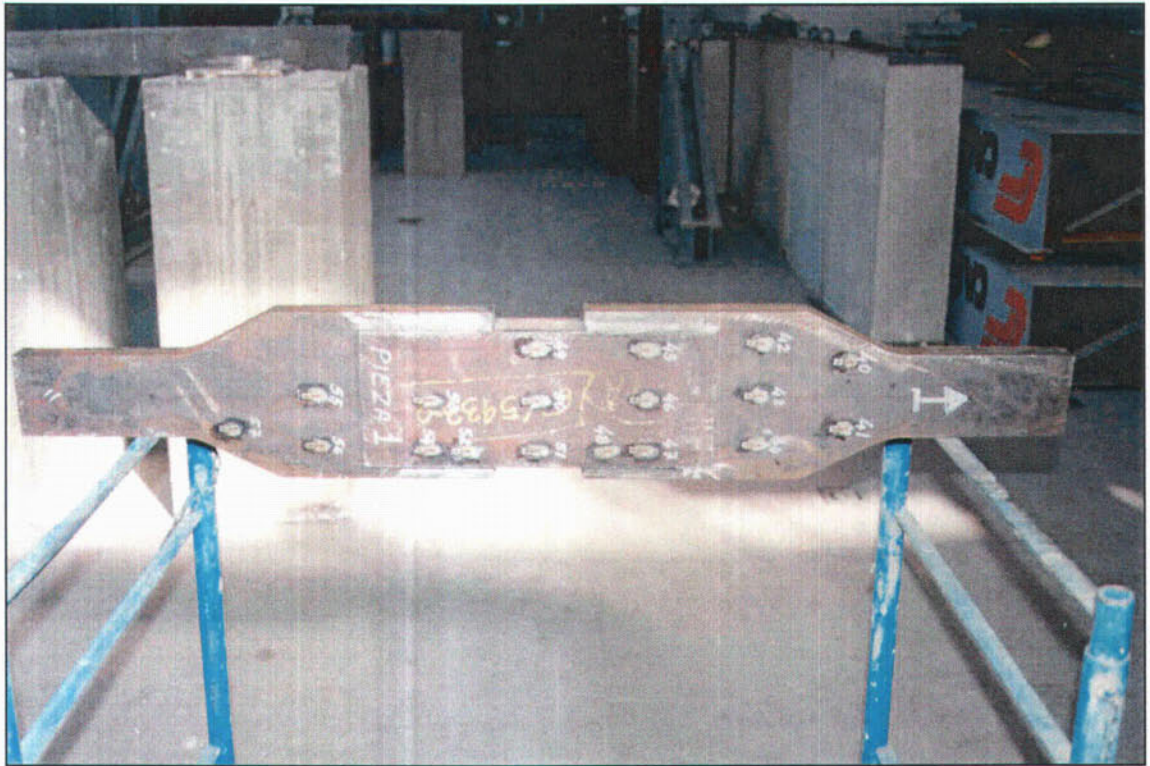


FOTO N°6: Vista de la probeta 2T.

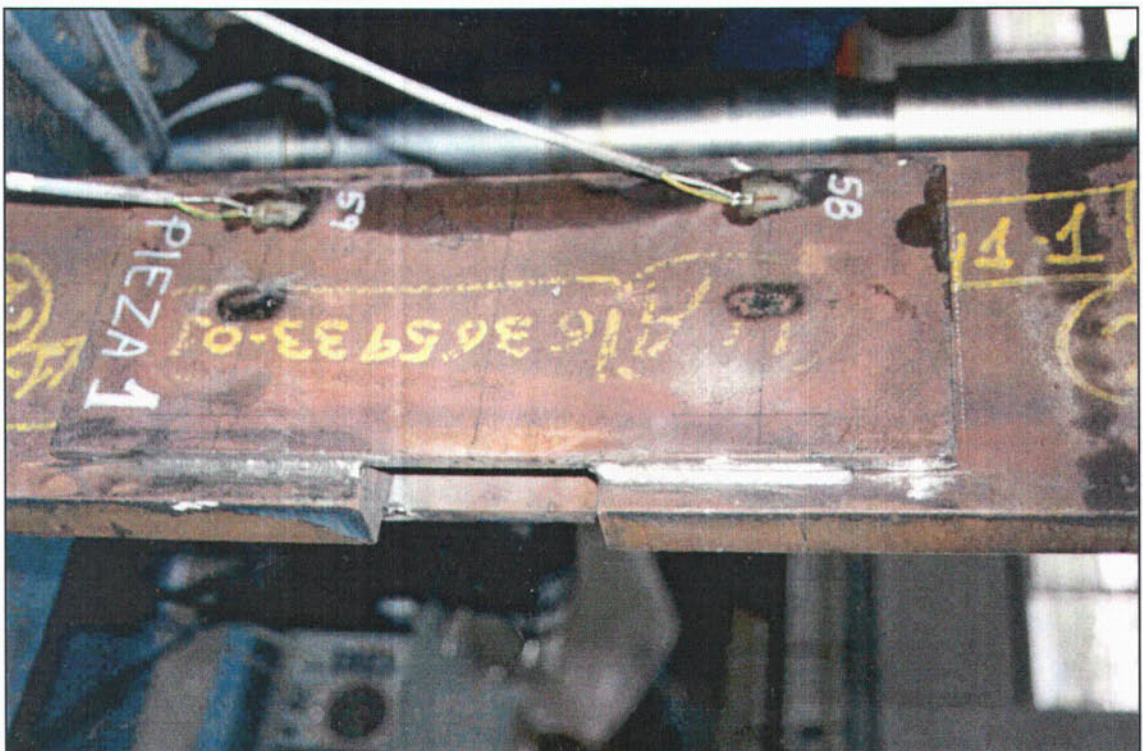


FOTO N°7: Detalle de rotura de soldadura por el plano de garganta en la probeta 2T.



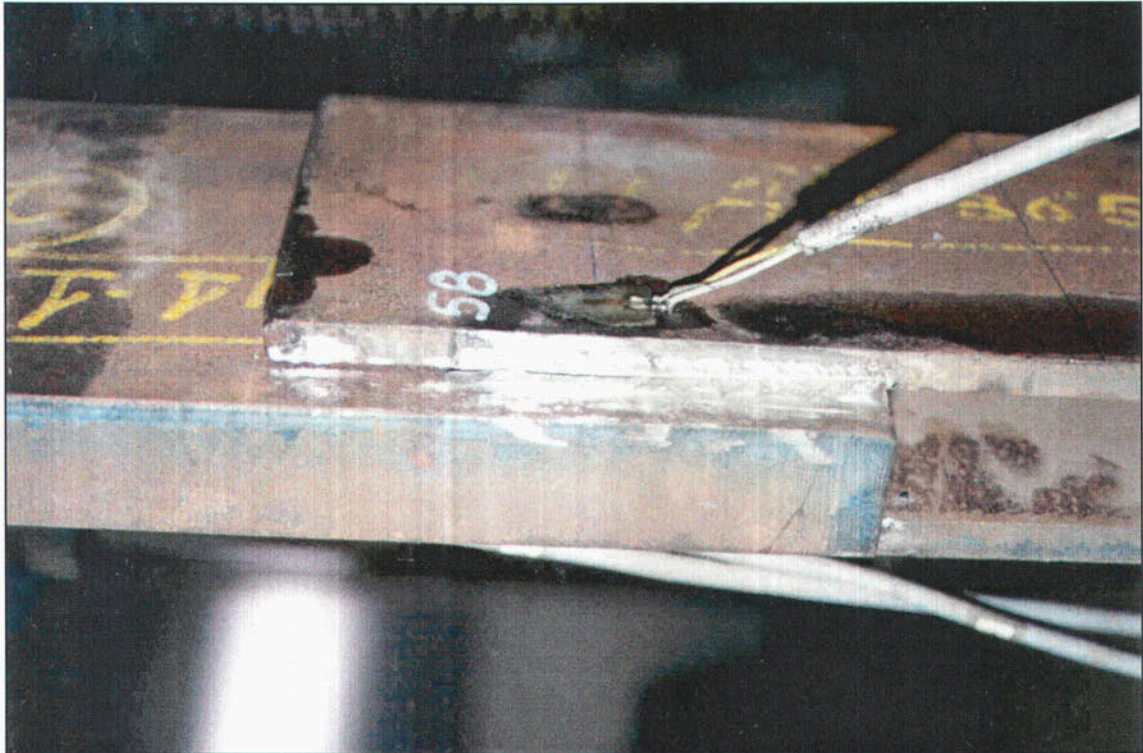


FOTO N°8: Nuevo detalle de rotura de soldadura en la probeta 2T, con la ubicación de una galga extensiométrica.



FOTO N°9: Perspectiva de la probeta 3T.



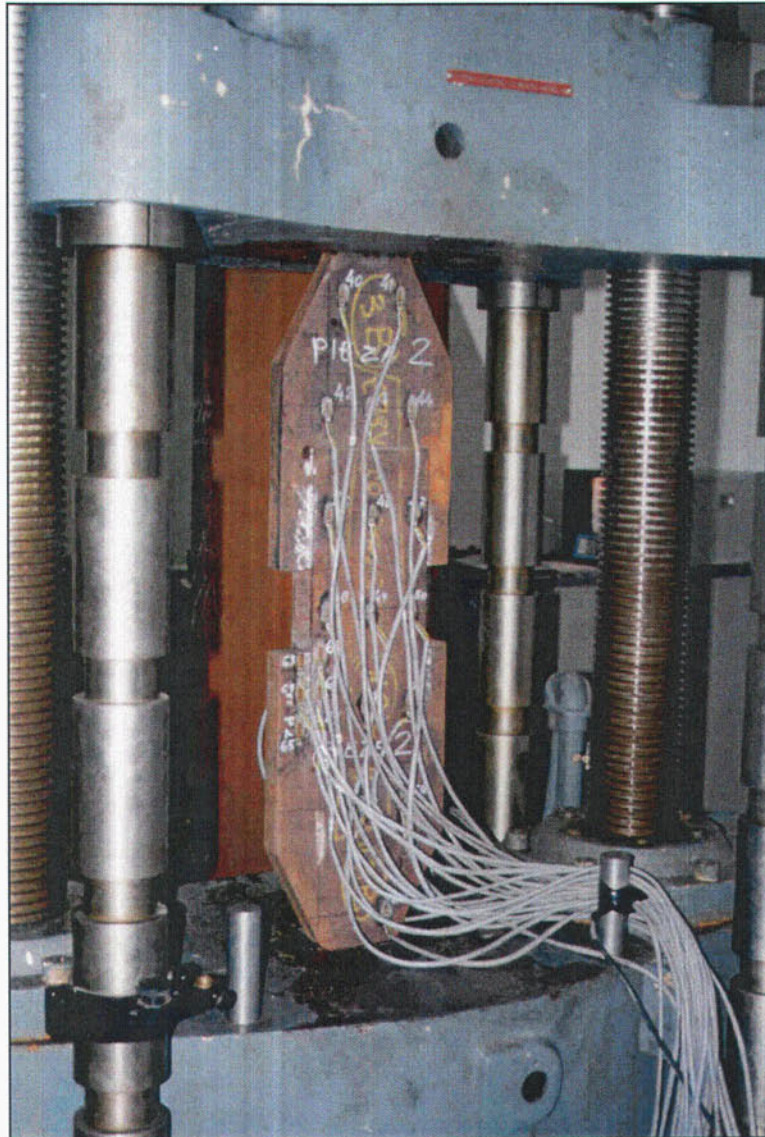


FOTO N°10: Probeta 3T en la prensa de tracción.

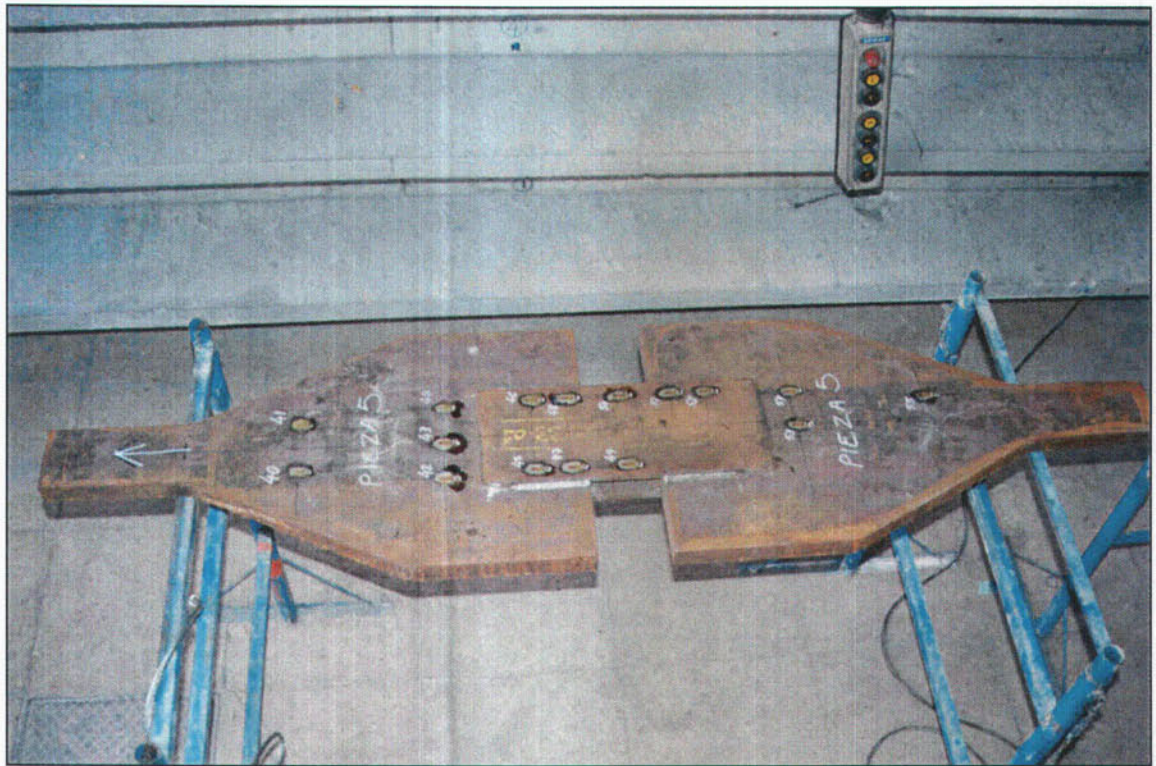


FOTO N°11: Vista de la probeta 4T.



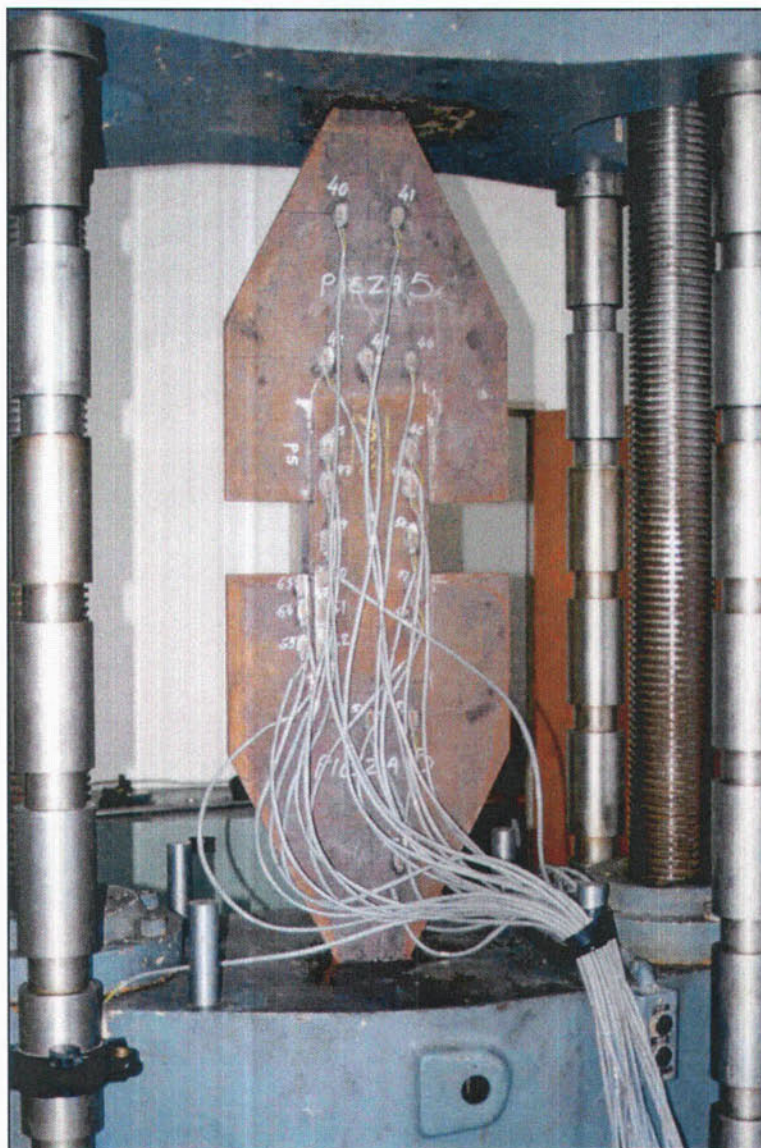


FOTO N°12: Probeta 4T en la prensa de tracción.





FOTO N°13: Vista de la probeta 5T.



FOTO N°14: Probeta 5T en la prensa de tracción.



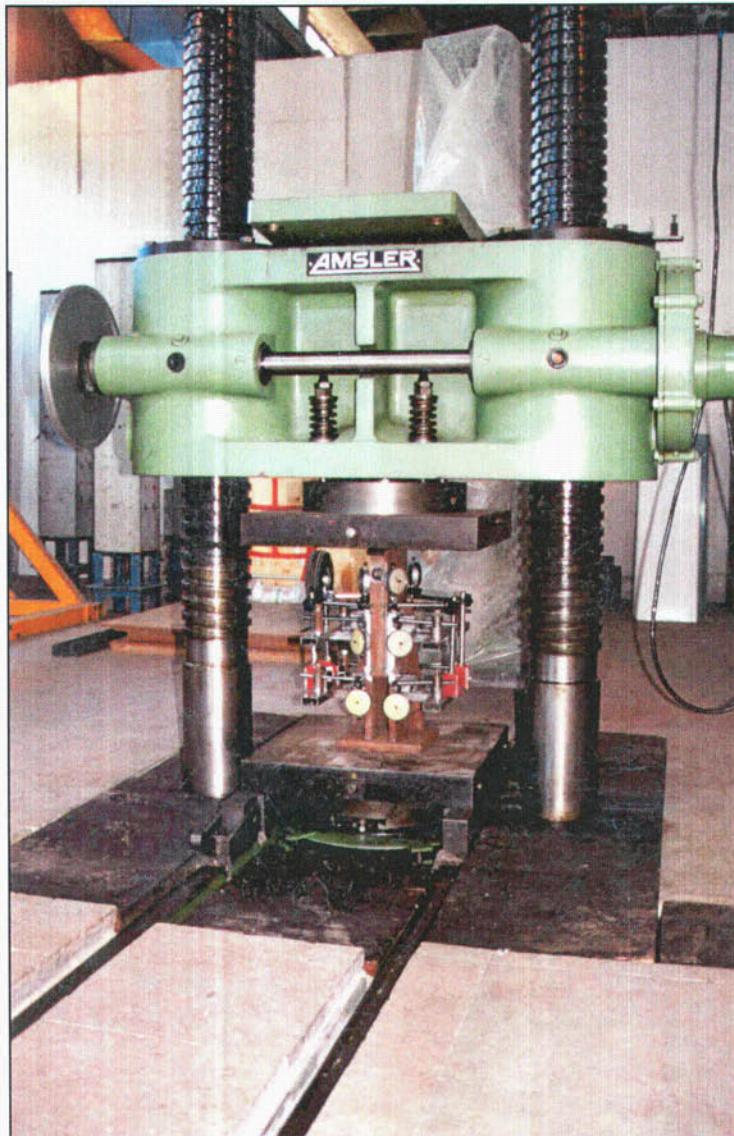


FOTO N°15: Prensa AMSLER, empleada en los ensayos a compresión.

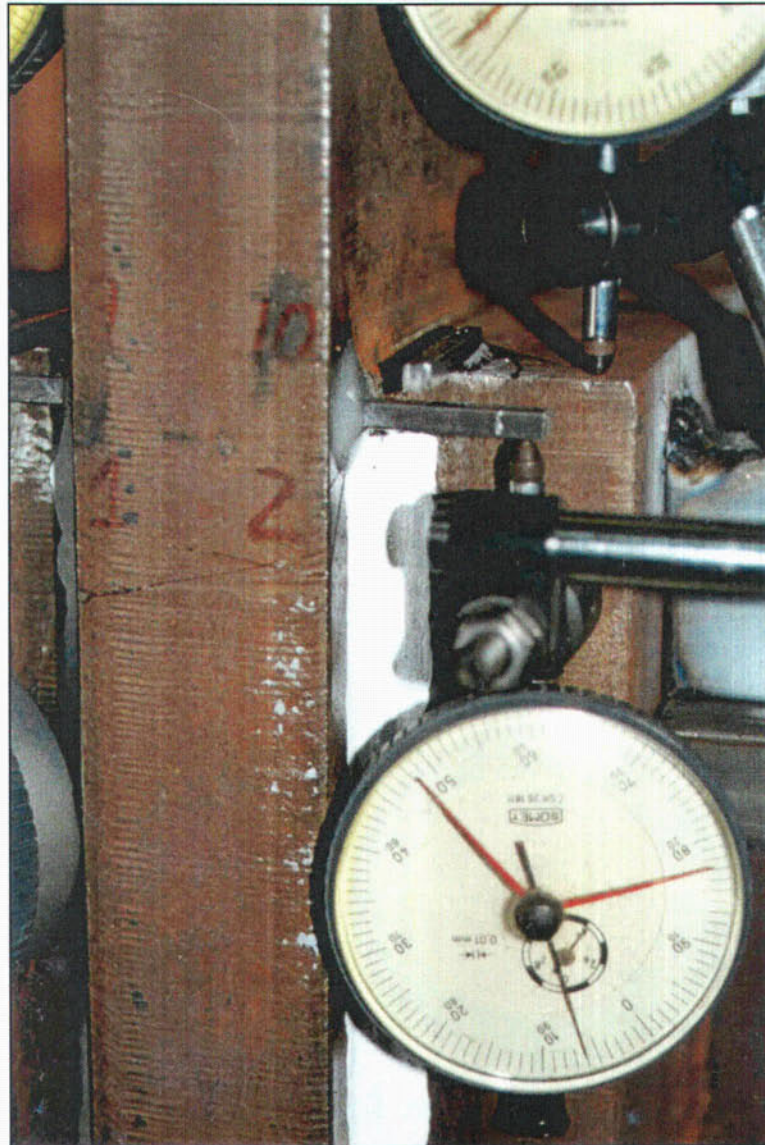


FOTO N°16: Detalle del dispositivo de medida con flexímetros.



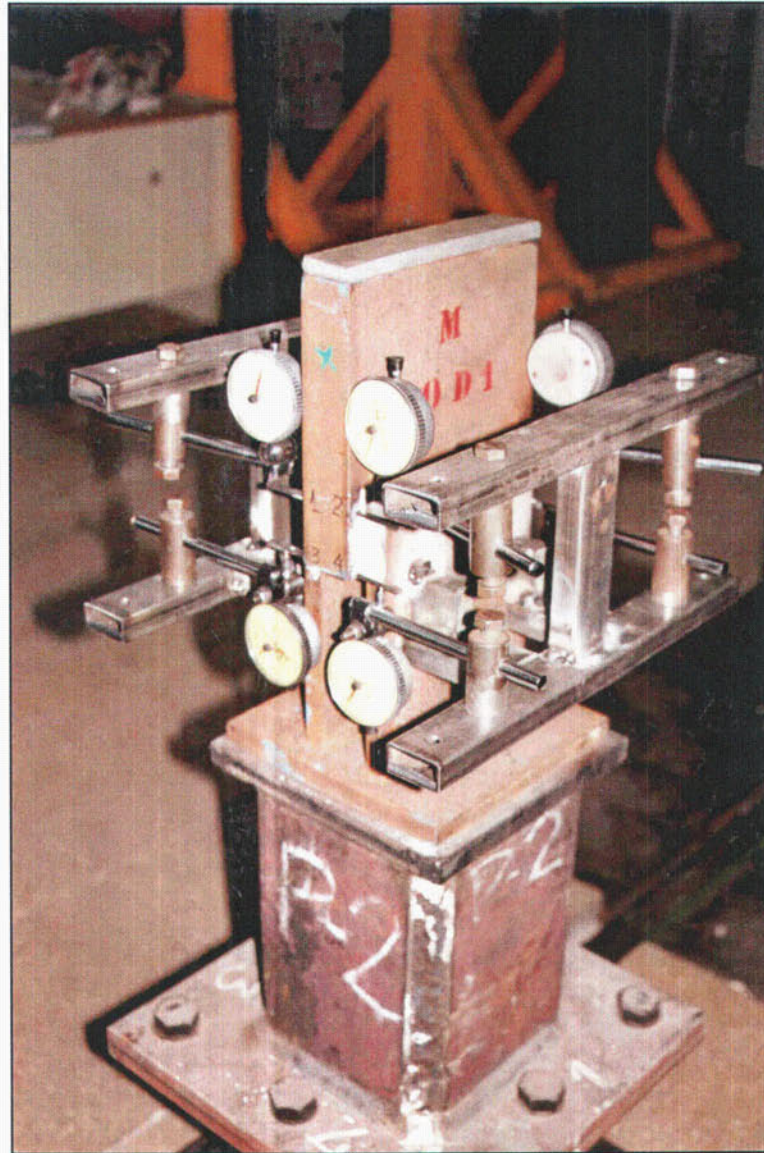


FOTO N°17: Probeta 1M con el equipo de flexímetros. En las soldaduras se ha realizado ya la pintura con cal.

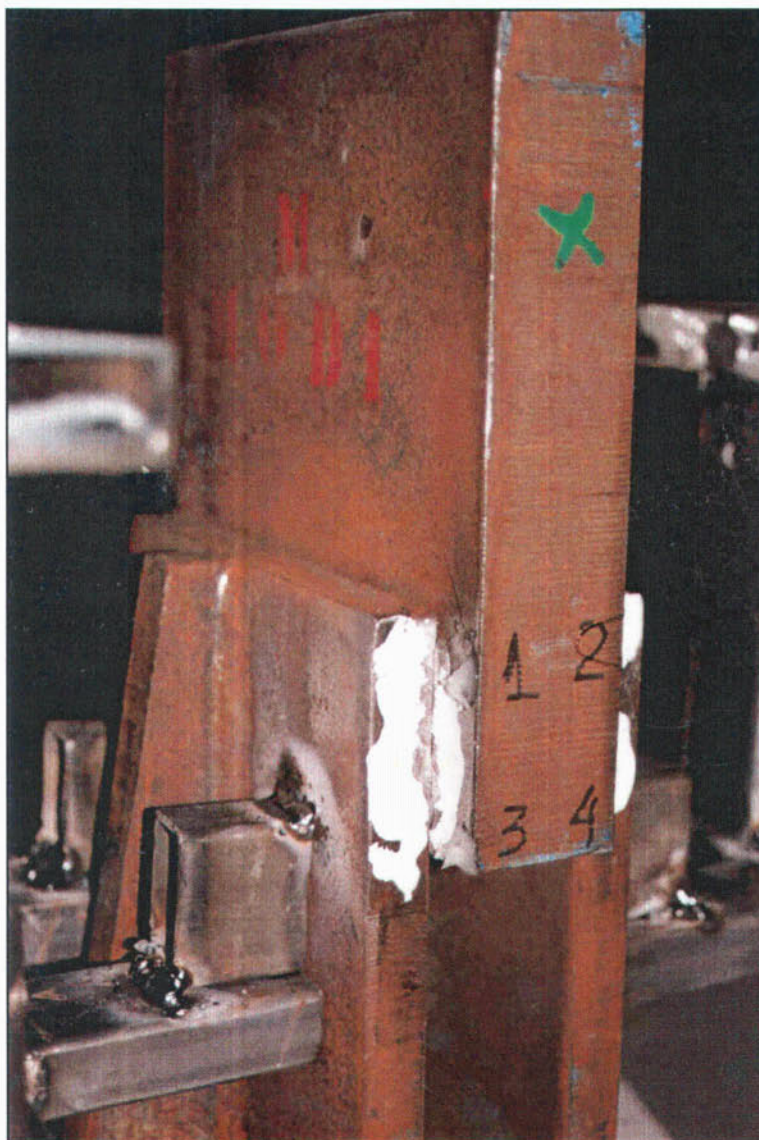


FOTO N°18: Probeta 1M después del ensayo. Se observa la rotura por el plano de garganta en la soldadura 1-3. La cal se encuentra desprendida en dicha zona de rotura.





FOTO N°19: Probeta 2M después de la rotura. Las soldaduras se limpiaron de los restos de cal, para poder observar el plano de rotura.



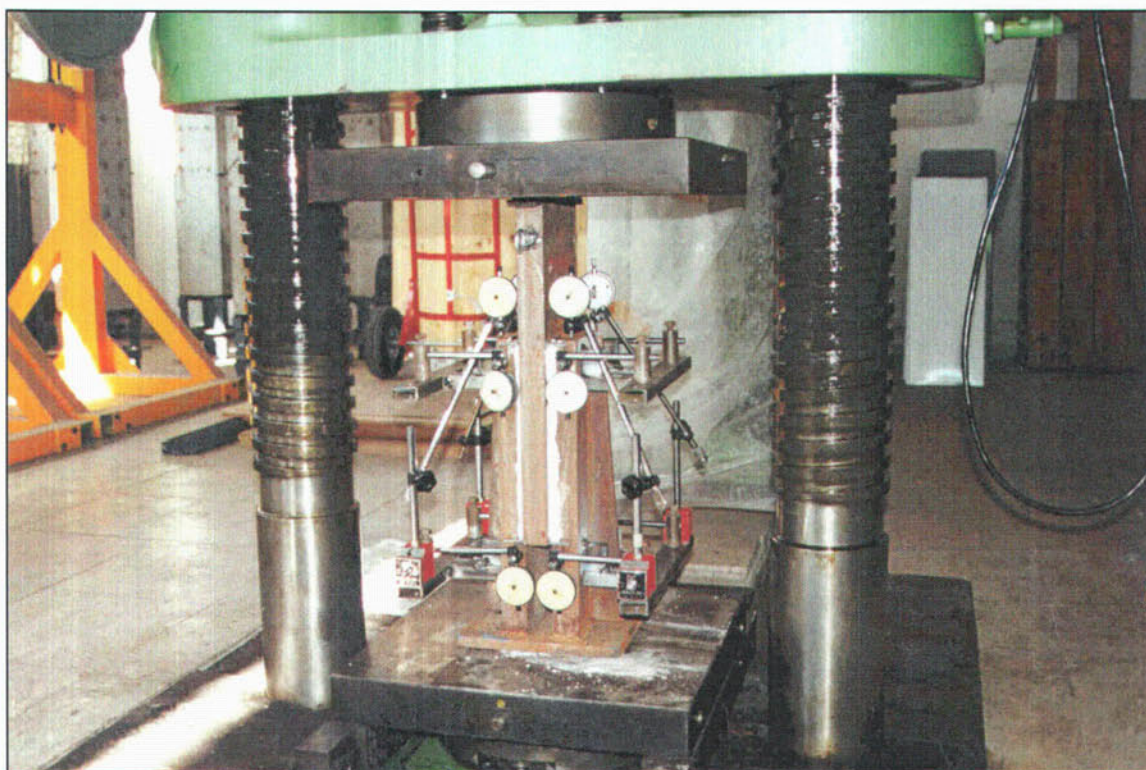


FOTO N°20: Probeta 3M situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal. Obsérvese la banda de neopreno situada en el contacto entre la probeta y el plato fijo, colocada con objeto de que las imperfecciones en el acabado de la cara superior de la probeta afecten lo menos posible al reparto homogéneo de la carga.



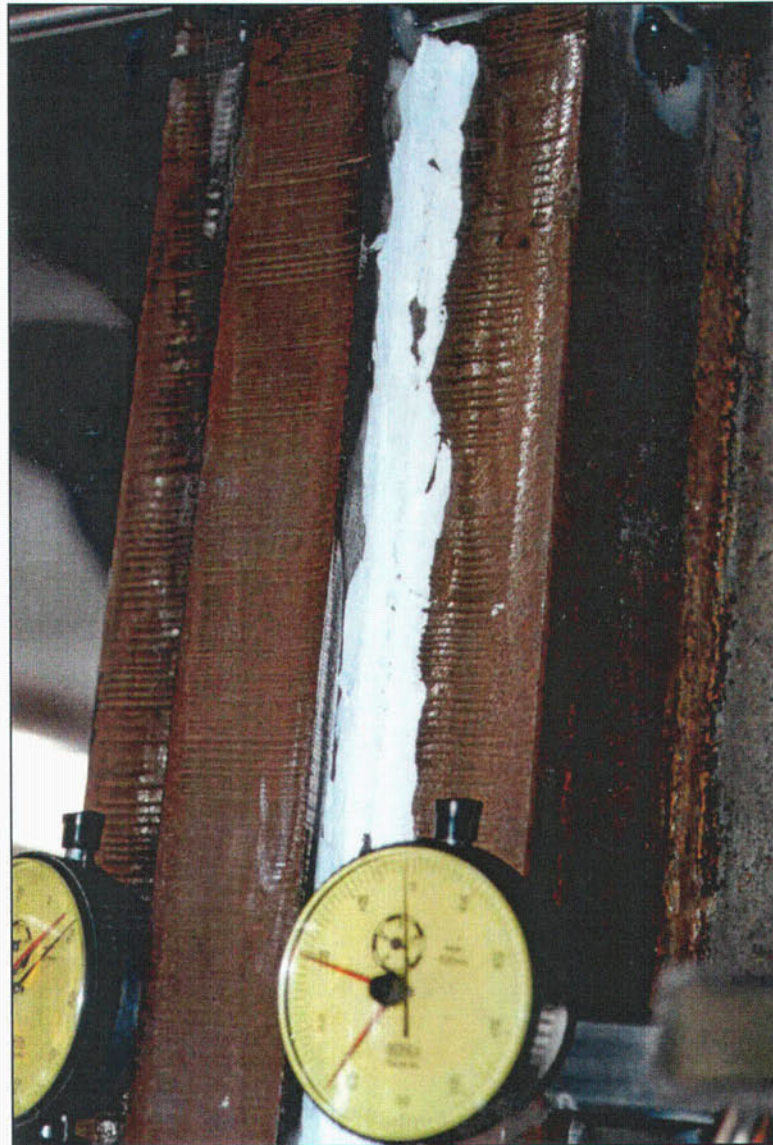


FOTO Nº21: Probeta 3M. La fotografía se ha tomado durante el ensayo de rotura. Se observa la cal agrietada en toda la longitud de la soldadura (30 cm.), señal de que dicha soldadura se encuentra prácticamente plastificada.

UNIVERSIDAD DE GRANADA  
/ 9 FEB. 2001  
COMISION DE DOCTORADO



FOTO N°22: Probeta 3M ya rota. La cal se desprendió completamente en toda la zona de rotura. Se observa nítidamente el plano de rotura, por la sección de garganta, en la soldadura 5-7.





FOTO N°23: Detalle de la probeta 3M ya rota. En este caso se observa nítidamente el plano de rotura, también por la sección de garganta, en la soldadura 1-3.

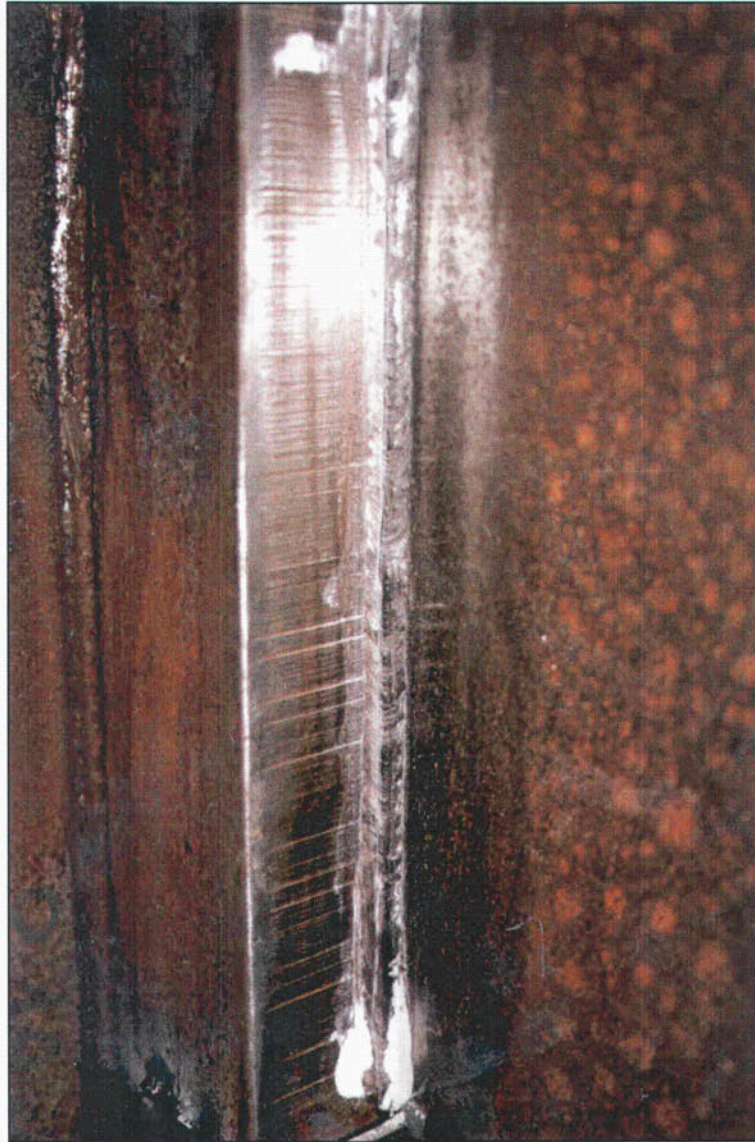


FOTO N°24: Nuevo detalle de la probeta 3M rota con las soldaduras limpias de cal, apreciándose el plano de rotura en la soldadura 5-7.



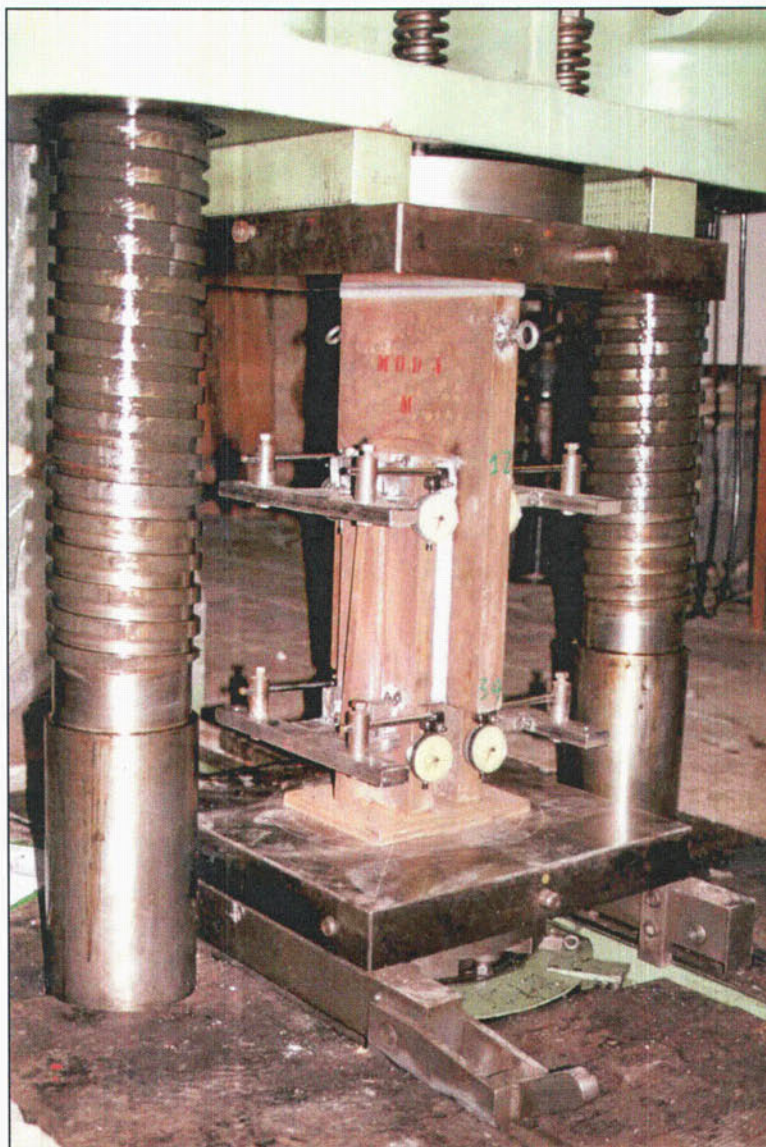


FOTO N°25: Probeta 4M situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con cal, habiéndose situado la banda de neopreno en el contacto entre la probeta y el plato fijo.





FOTO N°26: Detalle de la probeta 4M ya rota con las soldaduras limpias de cal, apreciándose el plano de rotura en la soldadura 1-3.

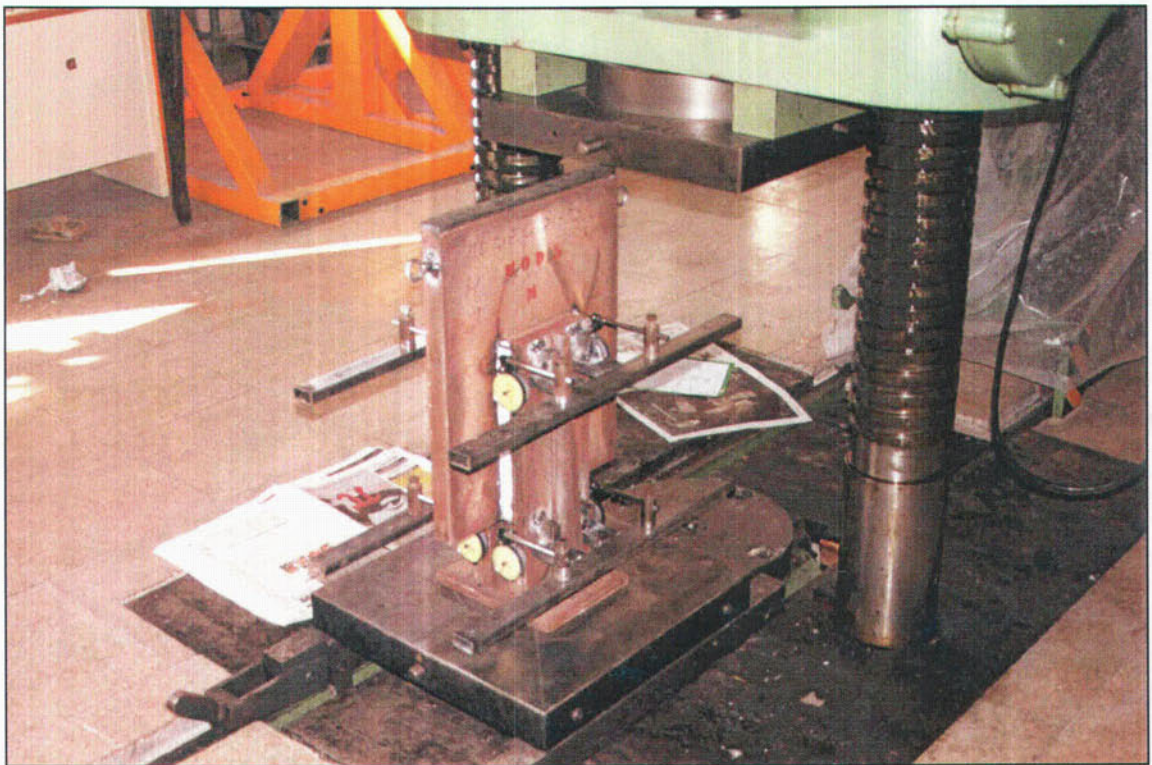


FOTO N°27: Probeta 5M situándose en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal. En la parte superior de la probeta se ha situado la banda de neopreno para el contacto entre la probeta y el plato fijo.



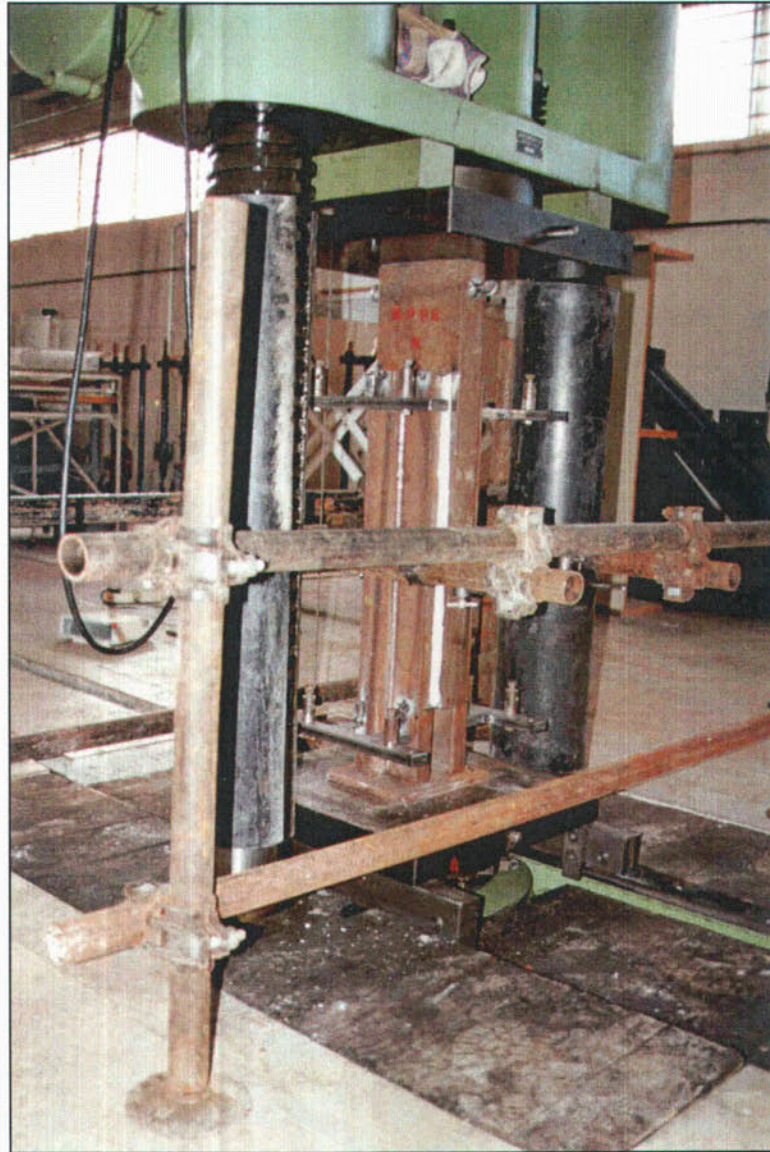


FOTO N°28: Probeta 6M situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal, habiéndose situado la banda de neopreno en el contacto entre la probeta y el plato fijo.

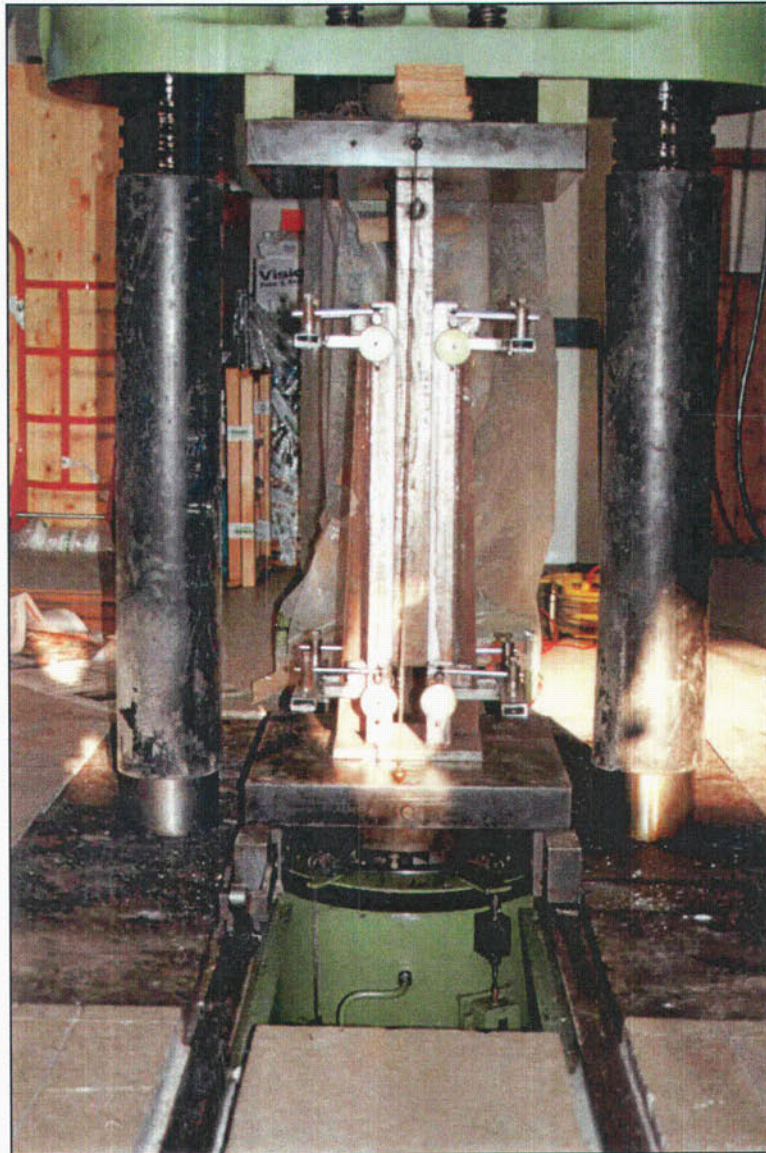


FOTO N°29: Otra perspectiva de la probeta 6M situada en la prensa de compresión.



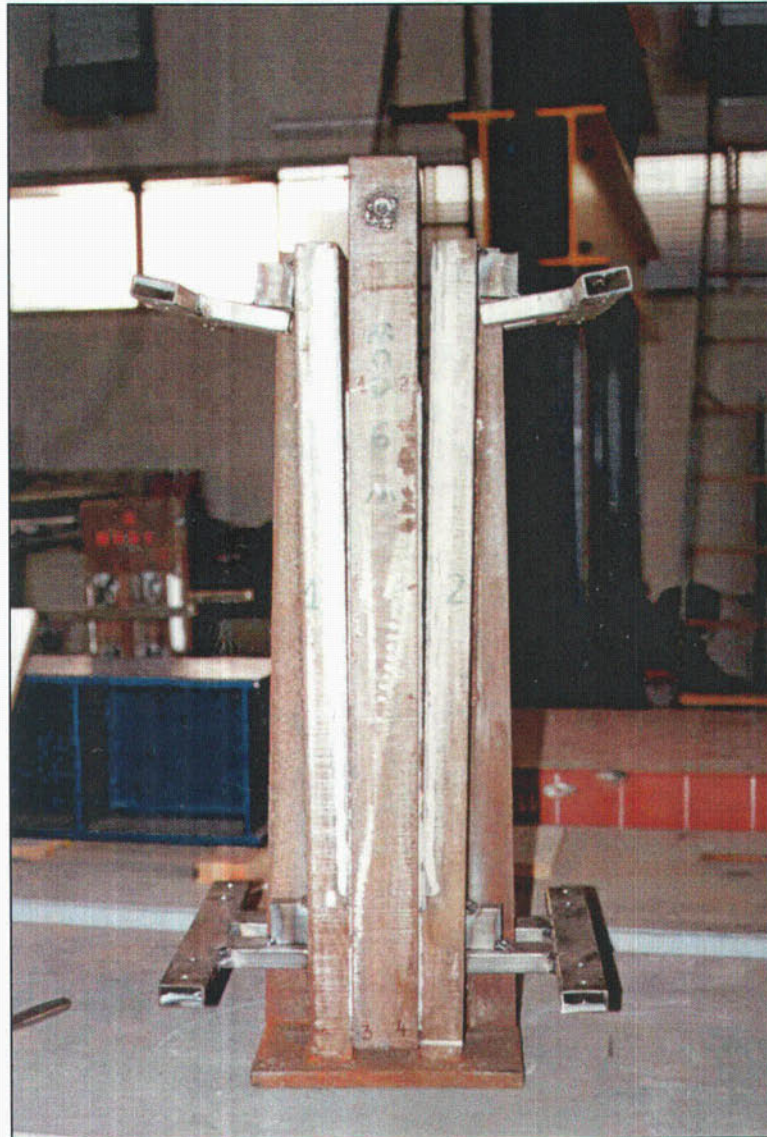


FOTO N°30: Detalle de la probeta 6M ya rota. Se encuentran completamente arrancadas las soldaduras 1-3 y 2-4. La rotura nuevamente se produce por la sección de garganta de las soldaduras.



FOTO N°31: Probeta 7M situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con cal, habiéndose situado la banda de neopreno en el contacto entre la probeta y el plato fijo.



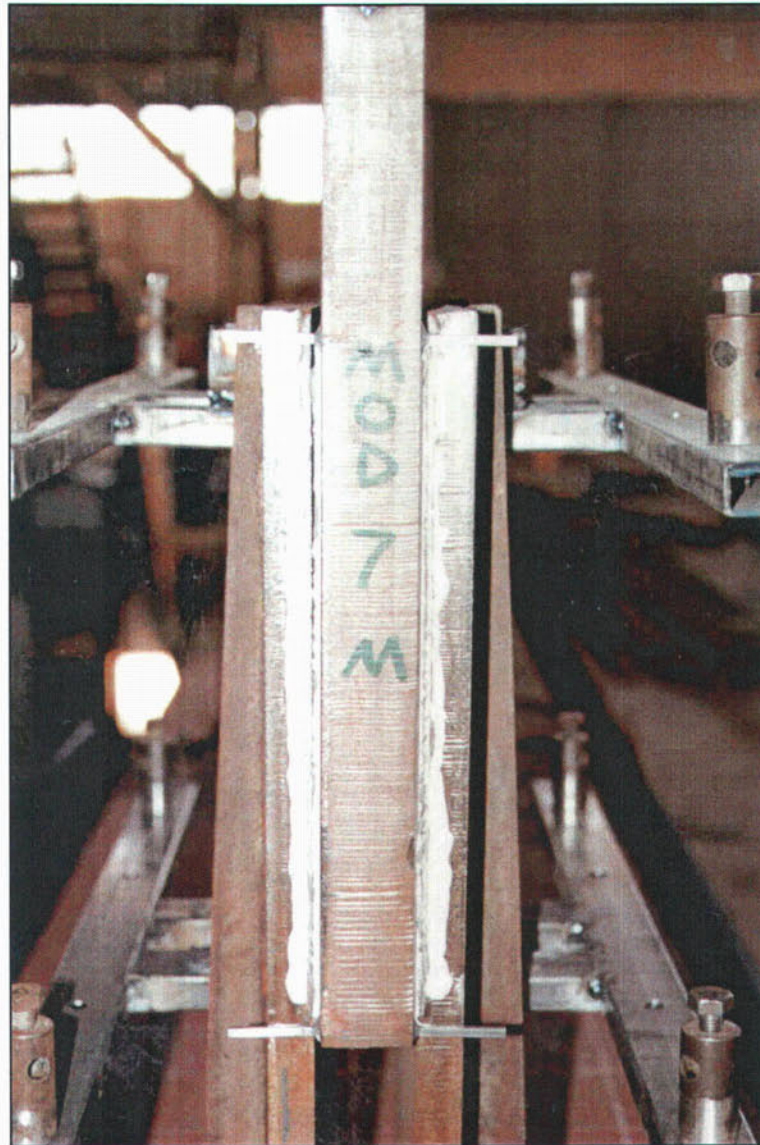


FOTO N°32: Detalle de la probeta 7M ya rota. Se observa en la fotografía la rotura de las soldaduras 1-3 y 2-4. La rotura nuevamente se produce por la sección de garganta de las soldaduras.

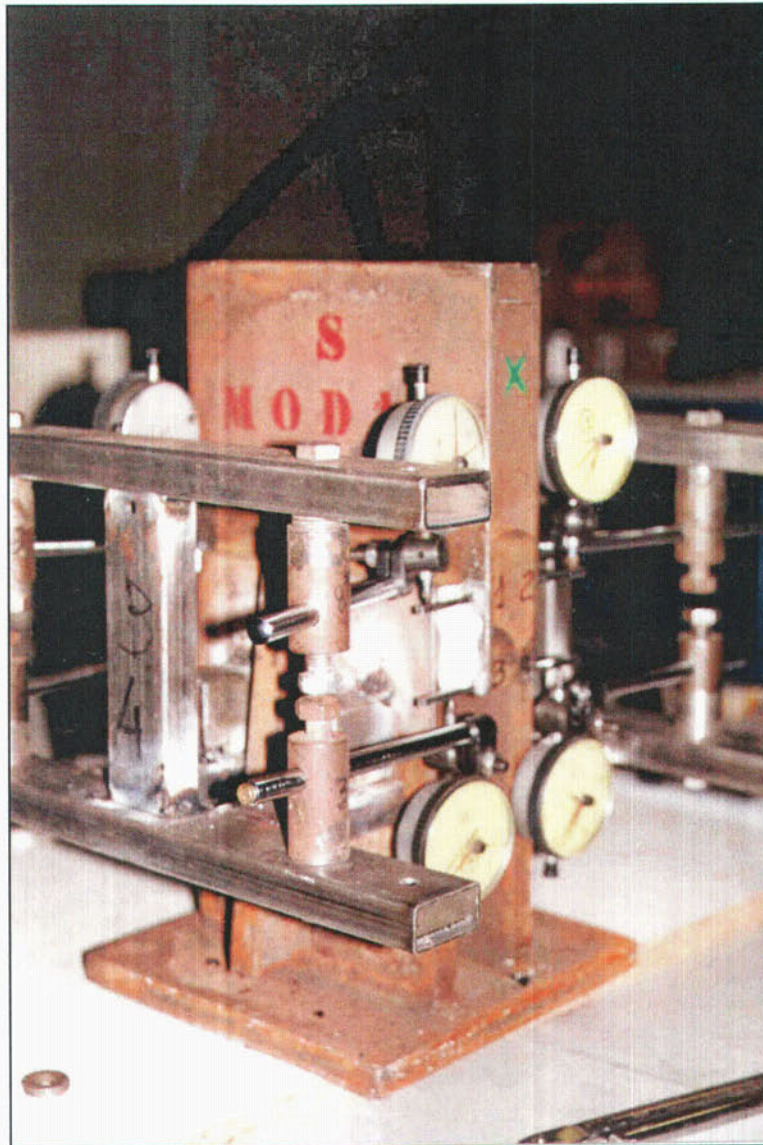


FOTO Nº33: Probeta 1S con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal.



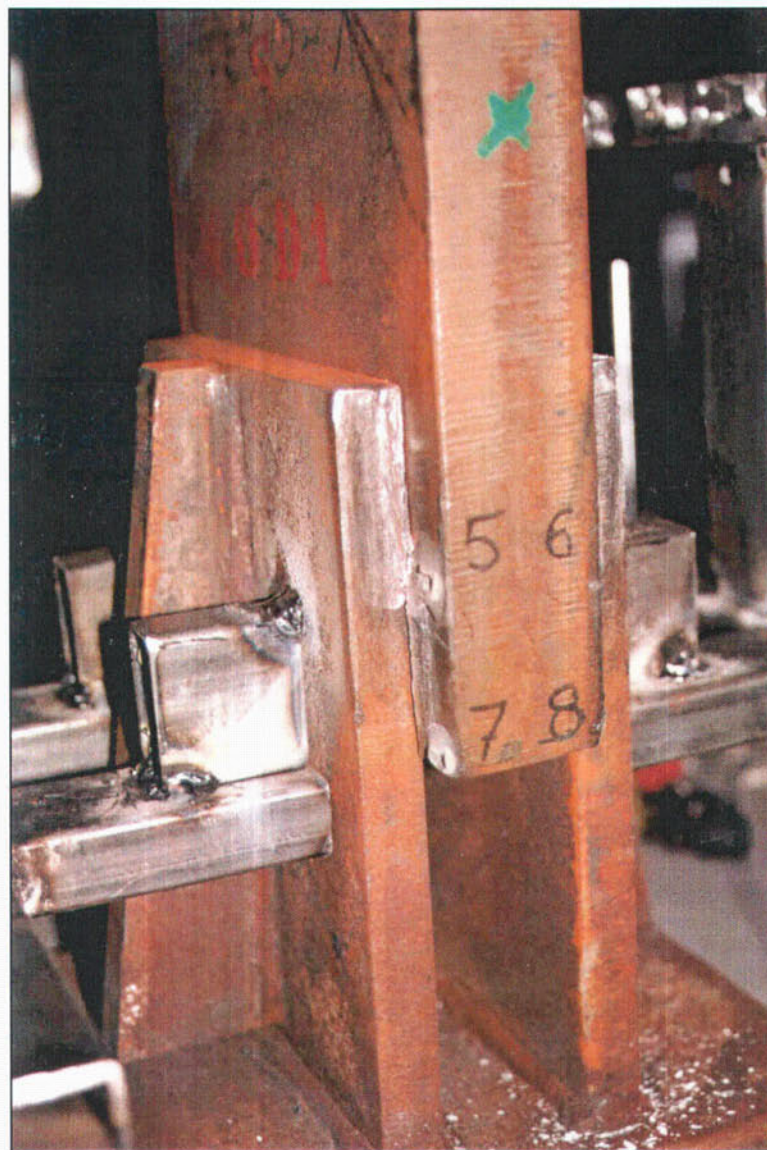


FOTO N°34: Detalle de la probeta 1S ya rota, con las soldaduras limpias de cal. Se observa en la fotografía la rotura de las soldaduras 5-7 y 6-8 por la sección de garganta.

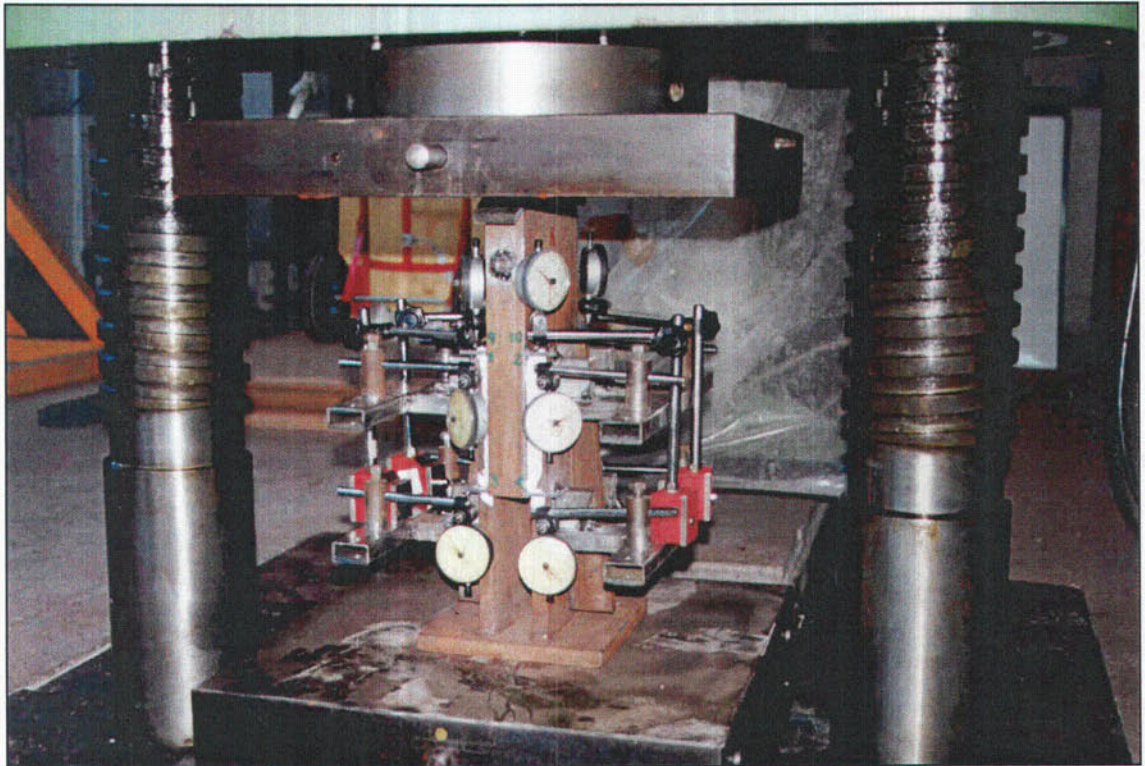


FOTO N°35: Probeta 2S situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con la cal, habiéndose situado la banda de neopreno en el contacto entre la probeta y el plato fijo.



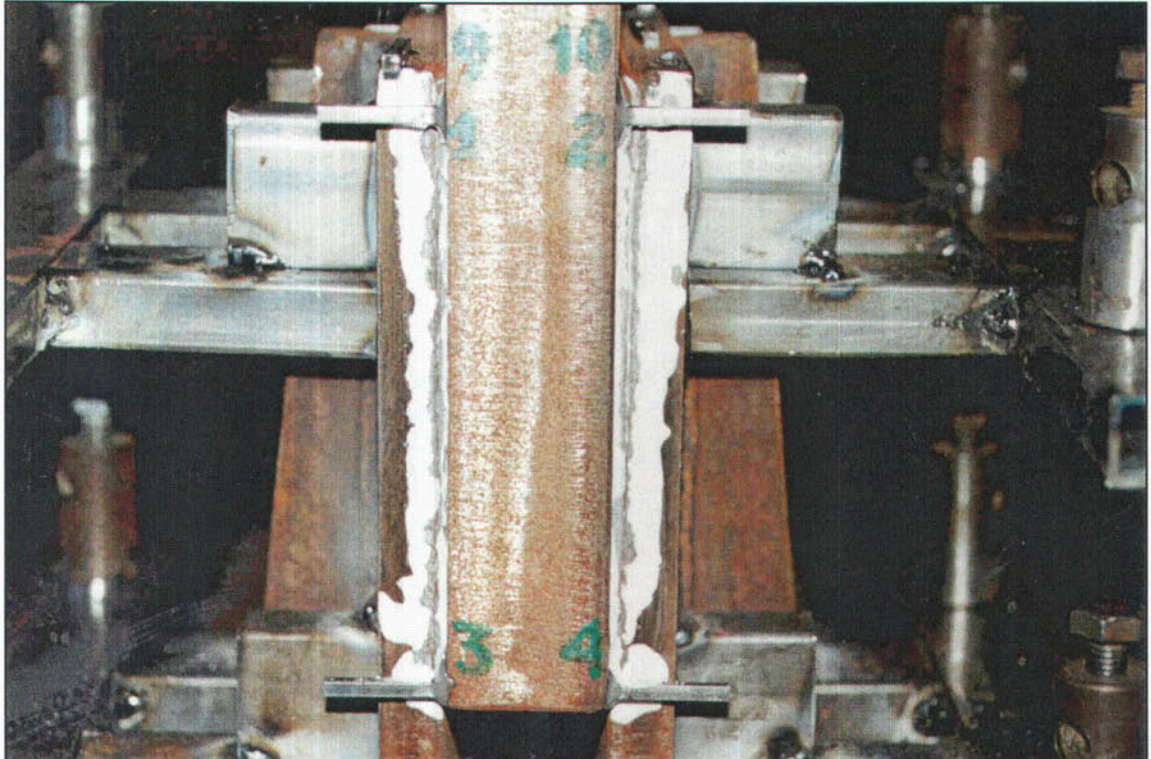


FOTO N°36: Detalle de la probeta 2S ya rota. Se observa en la fotografía la rotura de las soldaduras 1-3 y 2-4. La rotura nuevamente se produce por la sección de garganta de las soldaduras.



FOTO N°37: Detalle de la probeta 3S ya rota. Se observa en la fotografía la rotura de las soldaduras 1-3 y 2-4. La rotura también se produce por la sección de garganta de las soldaduras.



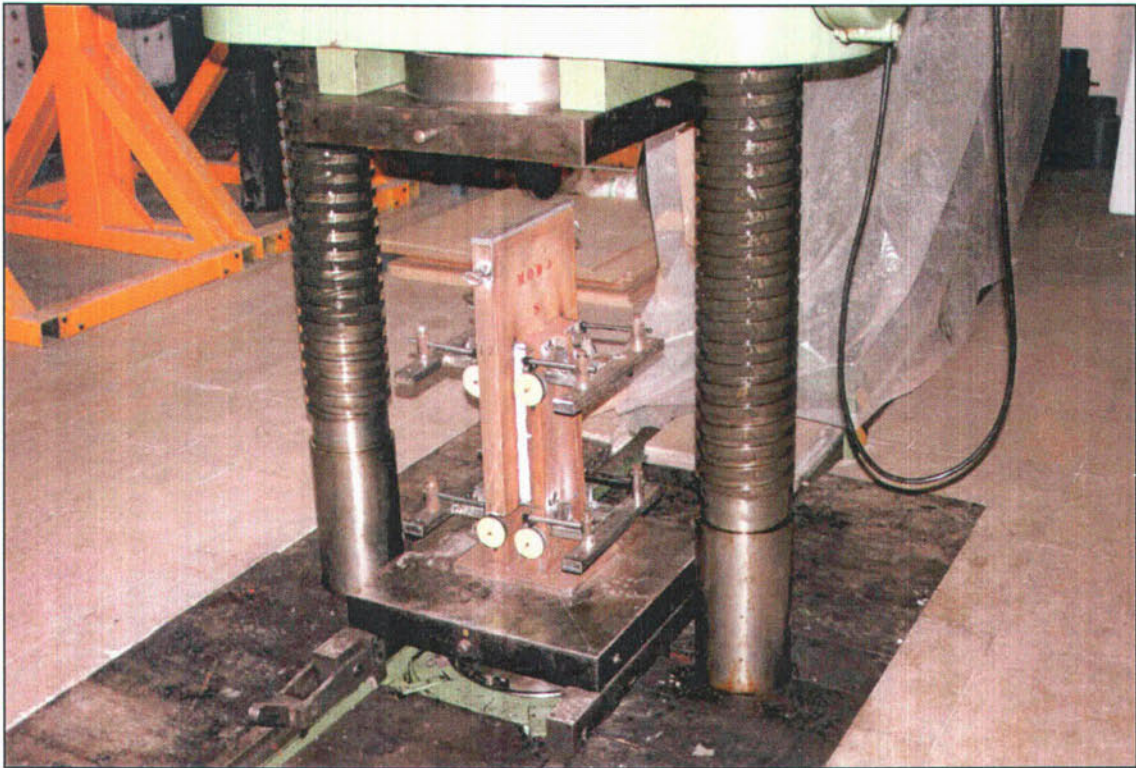


FOTO N°38: Probeta 4S situada en la prensa de compresión, con toda su instrumentación con flexímetros. Las soldaduras se encuentran pintadas con cal, habiéndose situado la banda de neopreno en el contacto entre la probeta y el plato fijo.

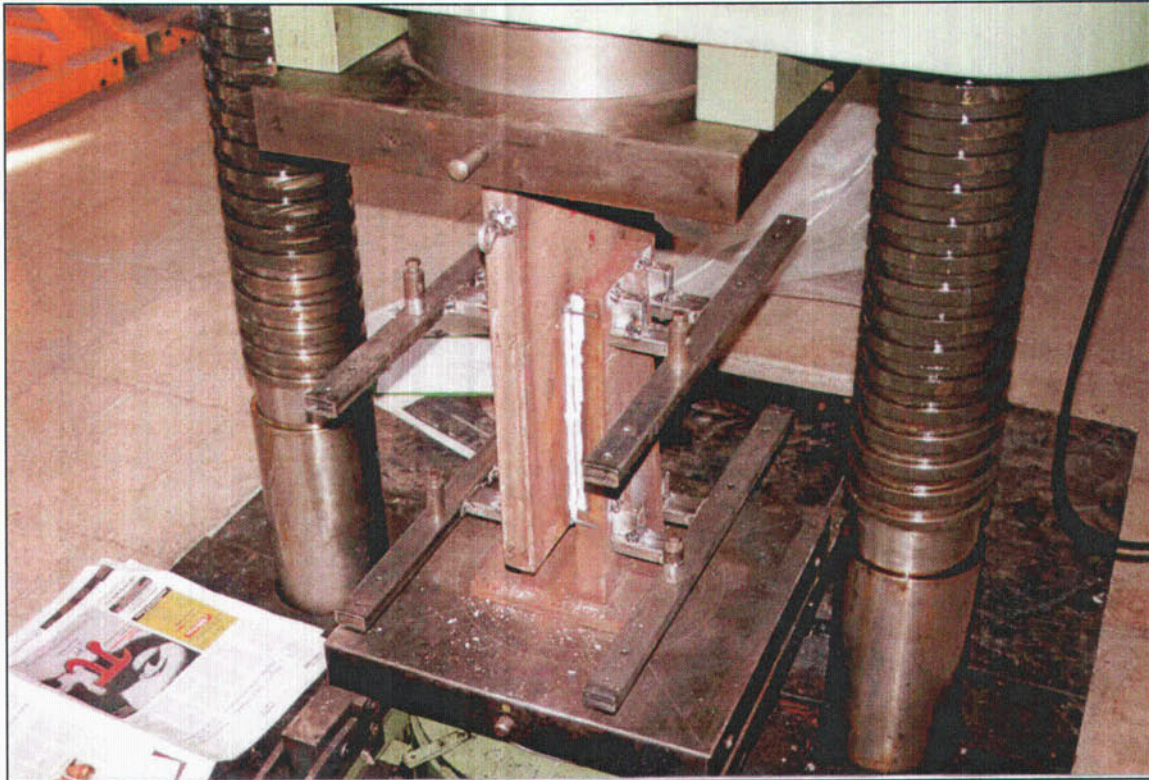


FOTO N°39: Probeta 5S justamente después de romper en el ensayo en la prensa de compresión. La instrumentación se retiró justo antes de la rotura para evitar dañar los flexímetros. En la fotografía se observa el plano de rotura en la soldadura 2-4.



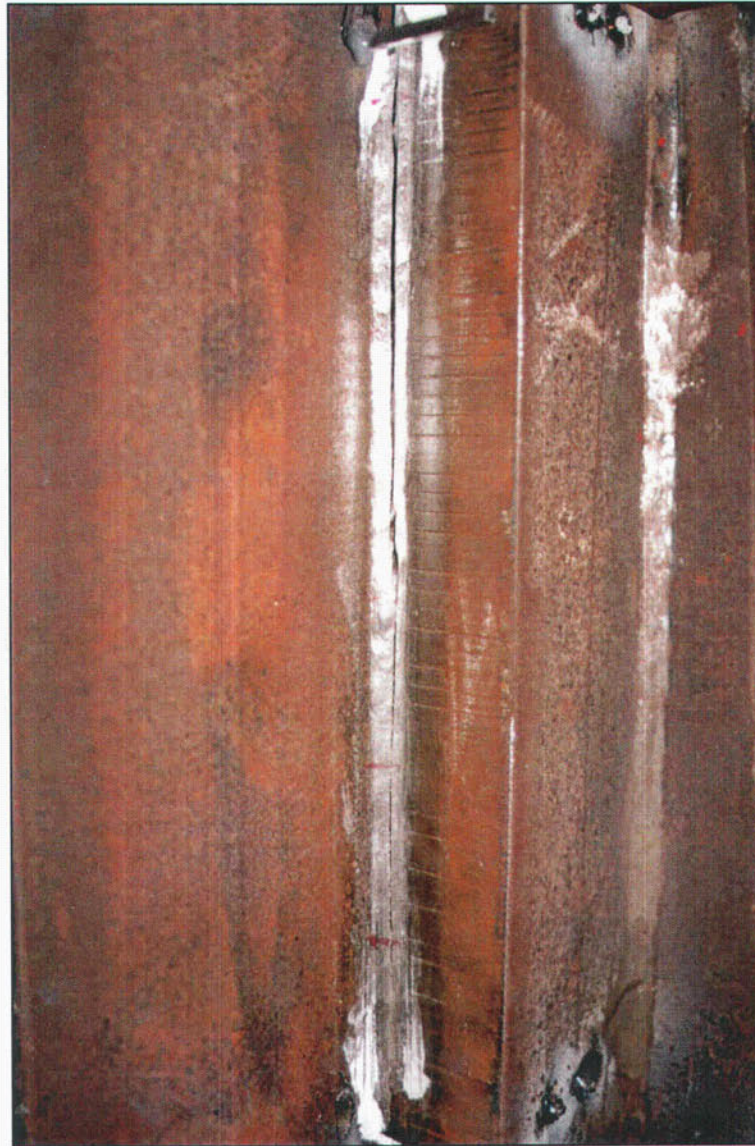


FOTO N°40: Detalle de la probeta 5S ya rota, con las soldaduras limpias de cal. Se observa claramente el plano de garganta roto en la soldadura 2-4.

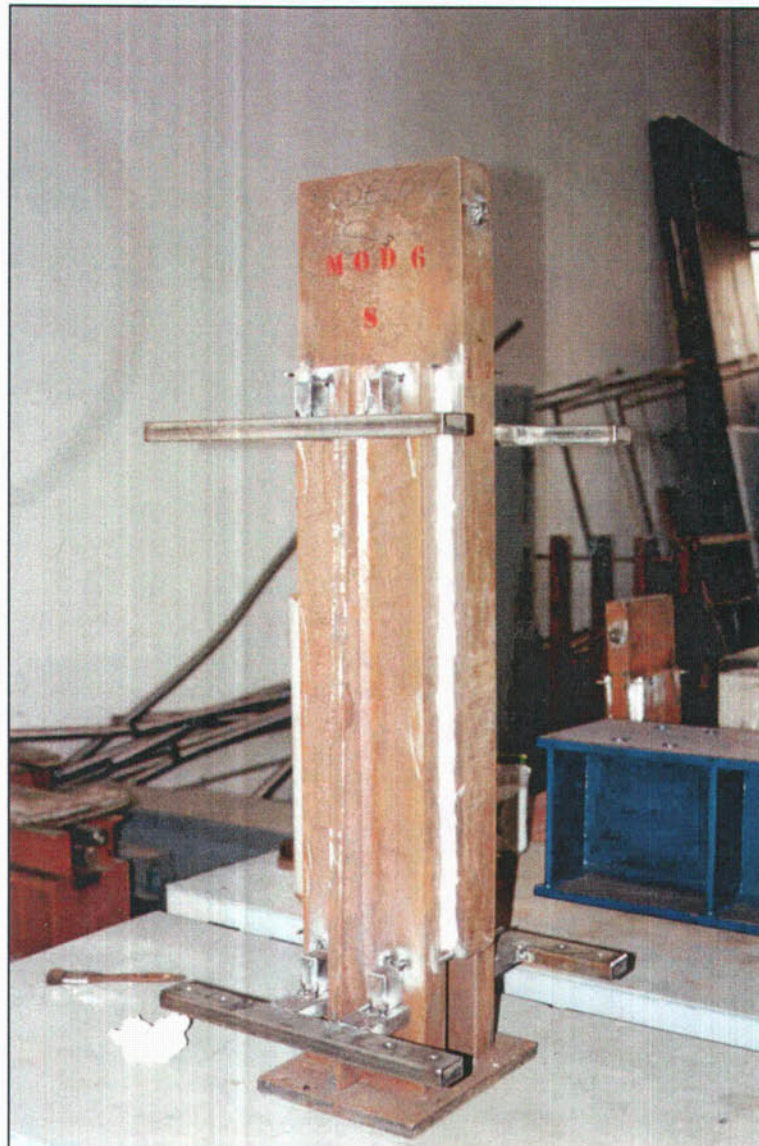


FOTO N°41: Detalle de la probeta 6S tras el ensayo. No llegó a romper, manteniéndose la cal casi intacta sobre las soldaduras, señal de que no llegaron a plastificar apenas.





FOTO N°42: Detalle de la probeta 7S ya rota. Se observa en la fotografía la rotura de la soldadura 6-8. La rotura igualmente se produce por la sección de garganta de las soldaduras.

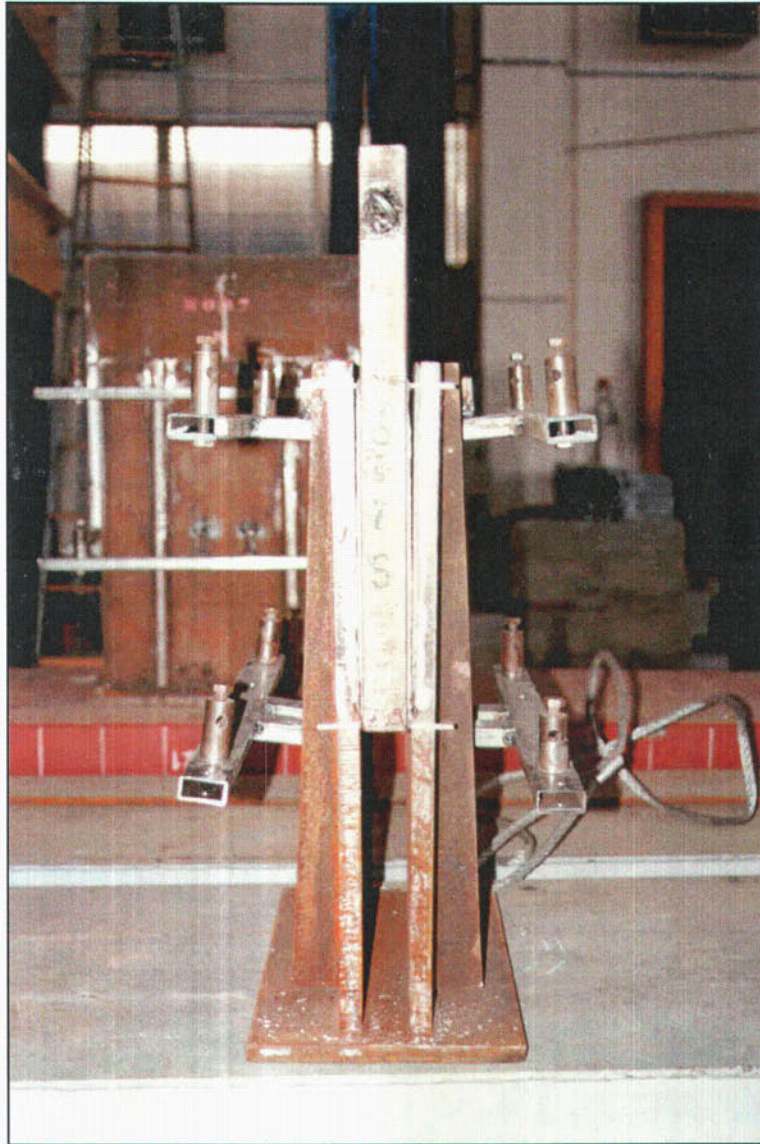


FOTO N°43: Otro detalle de la probeta 7S ya rota. En esta fotografía se observa nuevamente la rotura de la soldadura 6-8 y la 5-7, completamente arrancadas ambas.