



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE
INGENIERÍA TÉCNICA
INDUSTRIAL DE ZARAGOZA**



PROYECTO FINAL DE CARRERA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO
FRENTE A FATIGA DE UNIONES
SOLDADAS DE ACERO DE ALTO
LÍMITE ELÁSTICO**

Autor: Santiago Hurtado Navallas

Especialidad: Mecánica

Director: Jesús Martín Sanjosé – Hugo Malón Litago

Convocatoria: Septiembre 2010



ÍNDICE

ÍNDICE.....	- 1 -
1 INTRODUCCIÓN.....	- 3 -
1.1 INTRODUCCIÓN.....	- 4 -
2 OBJETO	- 6 -
2.1 OBJETO	- 7 -
3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	- 8 -
3.1 INTRODUCCIÓN.....	- 9 -
3.2 CERTIFICADO TÉCNICO	- 10 -
3.3 ENSAYO DE TRACCIÓN	- 12 -
3.3.1 INTRODUCCIÓN.....	- 12 -
3.3.2 OBJETO	- 12 -
3.3.3 NORMA	- 12 -
3.3.4 PROBETAS.....	- 12 -
3.3.5 MÁQUINA DE ENSAYO	- 14 -
3.3.6 PROCEDIMIENTO	- 14 -
3.3.7 RESULTADOS	- 15 -
3.4 ENSAYO DE MICRODUREZA	- 20 -
3.4.1 INTRODUCCIÓN.....	- 20 -
3.4.2 OBJETO	- 20 -
3.4.3 NORMA	- 21 -
3.4.4 PROBETAS.....	- 21 -
3.4.5 MÁQUINA DE ENSAYO	- 21 -
3.4.6 PROCEDIMIENTO	- 22 -
3.4.7 RESULTADOS	- 25 -



3.5	RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN.....	- 28 -
4	ANÁLISIS DE LA VIDA A FATIGA.....	- 35 -
4.1	INTRODUCCIÓN.....	- 36 -
4.2	ENSAYO DE FATIGA.....	- 37 -
4.2.1	OBJETO.....	- 37 -
4.2.2	NORMA.....	- 37 -
4.2.3	PROBETAS.....	- 37 -
4.2.4	MÁQUINA DE ENSAYO.....	- 38 -
4.2.5	PROCEDIMIENTO.....	- 38 -
4.2.6	RESULTADOS.....	- 39 -
4.3	SIMULACIÓN POR ORDENADOR POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	- 49 -
4.3.1	OBJETO.....	- 49 -
4.3.2	PROCEDIMIENTO.....	- 49 -
4.3.3	RESULTADOS.....	- 52 -
4.4	CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LA VIDA A FATIGA.....	- 66 -
5	CONCLUSIONES.....	- 67 -
5.1	CONCLUSIONES.....	- 68 -
6	BIBLIOGRAFÍA.....	- 69 -
6.1	BIBLIOGRAFÍA.....	- 70 -



1 INTRODUCCIÓN



1.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo del acero de alto límite elástico comenzó a partir de la Primera Guerra mundial con fines bélicos. En la actualidad, debido a las propiedades mecánicas que posee este material lo han convertido en imprescindible en sectores como el del transporte o industrial.

En las aplicaciones típicas de este material (grúas, volquetes, camiones, remolques...) nos encontramos uniones mediante soldadura, lo que implica que la región próxima al cordón sufre un sobrecalentamiento que afecta al metal. Este proceso de soldadura modifica las propiedades físicas, supone una variación de la composición y de la estructura cristalográfica y además genera tensiones residuales, factores fundamentales a la hora del diseño del producto para el fabricante.

La demanda de este tipo de acero crece día a día, frecuentemente como sustitución de aceros estructurales, ya que debido a su alto límite elástico suponen un gran ahorro de peso con respecto a estos. También tiene una gran demanda en el sector de la automoción, donde contribuyen en gran medida en el ahorro de peso en las carrocerías.



Figura 1

La simulación por ordenador mediante el método de elementos finitos (MEF) supone una reducción de costes y tiempos en la fase de diseño y fabricación de nuevos productos, permitiendo a las empresas llegar rápidamente al mercado y a menor coste, factores fundamentales en un mercado tan competitivo como el actual.



El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico de resolución de problemas de Mecánica de Sólidos que resulta de gran importancia por su utilidad práctica. Sin embargo, es un método que no proporciona la solución exacta a un problema dado, sino que, en realidad, posibilita obtener una solución aproximada que, con el juicio ingenieril que se le supone al calculista, puede ser más que suficiente para la resolución de un problema práctico.

Dado un sólido, sometido a un sistema de cargas y coaccionado por unas ligaduras, el MEF consiste en subdividir el sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de los nudos de los elementos, de manera que suponemos que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nudos del elemento (desplazamientos nodales); posteriormente, se podrá determinar la matriz de rigidez de cada elemento, las cuales una vez ensambladas (siguiendo los pasos del análisis matricial de estructuras), permitirán la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento. De esa manera, una vez conocidos dichos desplazamientos, podríamos determinar, de una forma aproximada como ya se dijo antes, las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento.

En general, en un problema a analizar por el Método de los Elementos Finitos, conoceremos las fuerzas exteriores aplicadas en algunos de sus nudos y los valores de los desplazamientos en otros (dependiendo de las ligaduras que posea el sólido). La clave del método está en que, tras su aplicación, obtendremos una expresión del tipo:

$$\{F\} = [K]\{u\}$$

En la que, $\{F\}$ es un vector columna, conocido como vector de cargas, en el que están todas las fuerzas exteriores (las directamente aplicadas y las reacciones producidas por las ligaduras) que actúan sobre el sólido; en el miembro de la derecha nos encontramos al vector $\{u\}$, denominado vector de desplazamientos nodales, que representa, de manera ordenada, todos los desplazamientos que experimentan los nudos del modelo, y la matriz $[K]$, que se conoce como matriz de rigidez del sistema estructural.



2 OBJETO



2.1 OBJETO

El objetivo principal de este estudio se centra en prever la vida a fatiga del material una vez soldado. Para ello realizaremos diferentes simulaciones por ordenador basadas en la aplicación del MEF y la comparación con los ensayos de laboratorio.

Para realizar las simulaciones por ordenador es necesario obtener mediante ensayos y cálculos las propiedades del material. Diseñado el modelo en el ordenador se le introducirán dichas propiedades obtenidas, para posteriormente realizar la simulación aplicando varios casos de carga y diferentes criterios de vida a fatiga. Los resultados obtenidos serán comparados con los de los ensayos de laboratorio, para los cuales se han fabricado probetas de dimensiones normalizadas.



3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL



3.1 INTRODUCCIÓN

Para la realización de este estudio es necesario conocer fundamentalmente las propiedades mecánicas del acero **PAS-700**. Para ello disponemos del material, que ha sido mecanizado y soldado para darle la forma y dimensiones de acuerdo a las normativas, obteniendo lo que en el campo de la metalurgia se denominan probetas. Estas probetas serán sometidas a los diferentes ensayos que posteriormente serán descritos.

Los ensayos de tracción y microdureza nos van a permitir conseguir las principales características mecánicas del material y la comparación de estos resultados con los facilitados por el fabricante nos permitirá detectar la existencia de algún posible defecto interno.

Además al realizar la soldadura las propiedades del material se ven afectadas negativamente, por tanto los valores proporcionados por el fabricante no son aplicables a la región próxima al cordón de soldadura.



3.2 CERTIFICADO TÉCNICO

Las características suministradas por el fabricante del acero de alto límite elástico se pueden ver en las siguientes tablas:

Propiedades mecánicas			
Límite elástico, Re (N/mm ²)	Resistencia a tracción, Rm (N/mm ²)	Elongación e <3mm A (%)	Elongación e >3mm A (%)
> 770	> 841	> 10	> 12

Tabla 1

Composición química (%)									
C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti	Mo
<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
0,058	0,18	1,79	0,008	0,002	0,025	0,06	0,008	0,12	0,007

Tabla 2

Se trata de un **PAS-700** según la norma **EN 10051/97**, o **S700MC** según la norma **EN 10149-2**. Es un acero de alto límite elástico y baja aleación, tiene un bajo contenido



en carbono y adición de niobio, vanadio, titanio y molibdeno como elementos microaleantes para conseguir el endurecimiento estructural, el afinamiento del grano y una mejor soldabilidad.

El bajo contenido en azufre, la gran pureza interna y la estructura de grano fino, garantizan un a mejor ductilidad, mayor tenacidad y mayor resistencia a la fatiga.



3.3 ENSAYO DE TRACCIÓN

3.3.1 INTRODUCCIÓN

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta de forma y dimensiones normalizadas a un esfuerzo de tracción en la dirección de su eje, hasta romperla.

3.3.2 OBJETO

Con la realización del ensayo a tracción obtendremos unos resultados que los representaremos en una gráfica donde reflejaremos los valores de las deformaciones producidas en el eje de abscisas y las fuerzas de tracción aplicadas en el eje de ordenadas.

El análisis de dicha gráfica nos permitirá conocer las principales características mecánicas del material; tensión última, resistencia a tracción, alargamiento, límite elástico y módulo de elasticidad.

3.3.3 NORMA

El ensayo se llevará a cabo según la norma **UNE-EN 10002-1:2002**, título materiales metálicos, ensayos de tracción, parte 1: método de ensayo a temperatura ambiente.

3.3.4 PROBETAS

Para la realización de este ensayo se utilizarán tres probetas planas sin cortes ni soldaduras con la forma y dimensiones de la figura 2.

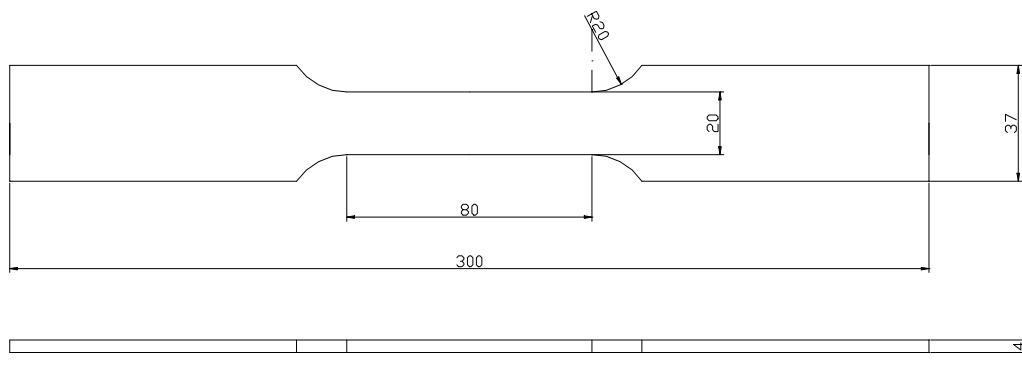


Figura 2

Longitud de calibración inicial: Longitud de la zona de calibración antes de la aplicación de la carga.

$$L_0 = 80 \text{ mm}$$

Longitud total de la muestra de ensayo: Longitud total de la muestra antes de la aplicación del ensayo.

$$L_t = 300 \text{ mm}$$

Área de la sección transversal inicial: Área de la sección transversal de la zona de calibración antes de realizar el ensayo.

$$S_0 = 20 \times 4 = 80 \text{ mm}^2$$

Longitud de calibración final: Longitud de calibración tras la ruptura de la muestra de ensayo.

$$L_u$$



3.3.5 MÁQUINA DE ENSAYO

La máquina utilizada en este ensayo es una Instron 8032 (figura 3). Esta máquina mediante un émbolo movido hidráulicamente produce tracciones, compresiones y flexiones a voluntad.



Figura 3

Para este ensayo somete a un esfuerzo de tracción creciente a la sección transversal de las probetas. Esto provoca un desplazamiento de las mordazas que sujetan la probeta, que comienza a alargarse. La máquina detecta, cuantifica y relaciona las fuerzas aplicadas y las deformaciones producidas.

3.3.6 PROCEDIMIENTO

Para realizar el ensayo se coloca la probeta por sus extremos en las mordazas de la máquina y se aplica una carga a tracción a velocidad constante y cuasiestática. Los



resultados de la carga aplicada y la deformación producida quedan registrados en el ordenador conectado a la máquina. Con estos resultados se realiza la gráfica tensión-deformación, a partir de la cual se determinan diversos parámetros que en el siguiente apartado se muestran.

El ensayo se va a realizar tres veces, sobre tres probetas para obtener resultados más fiables y exactos, además la temperatura del laboratorio debe estar entre el rango que marca la norma (10 °C y 35 °C) ya que este factor afecta al comportamiento del material.

3.3.7 RESULTADOS

Las probetas han roto por la zona de calibración aproximadamente por la mitad, lo que significa que el ensayo tiene validez ya que en caso de romper fuera de esta región la probeta estaría mal dimensionada o un posible defecto interno en el material. En la siguiente figura se muestran las tres probetas después de haber sido sometidas al ensayo a tracción.



Figura 4

Si comparamos las probetas ensayadas con una sin ensayar podemos observar que han sufrido un incremento de longitud además de la reducción de sección que se puede apreciar claramente en la zona de rotura.

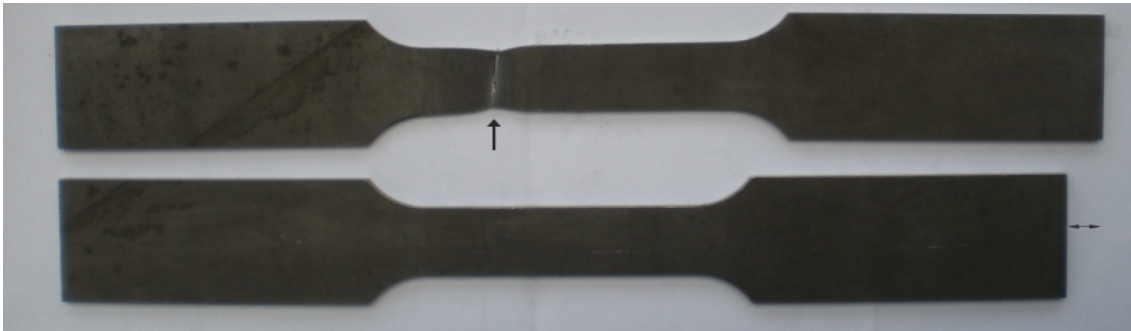


Figura 5

Con los datos registrados en el ordenador conectado a la máquina de ensayo vamos a realizar la gráfica tensión-deformación (figura 6) de los tres ensayos de la que analizando las tres curvas obtendremos las características del material base.

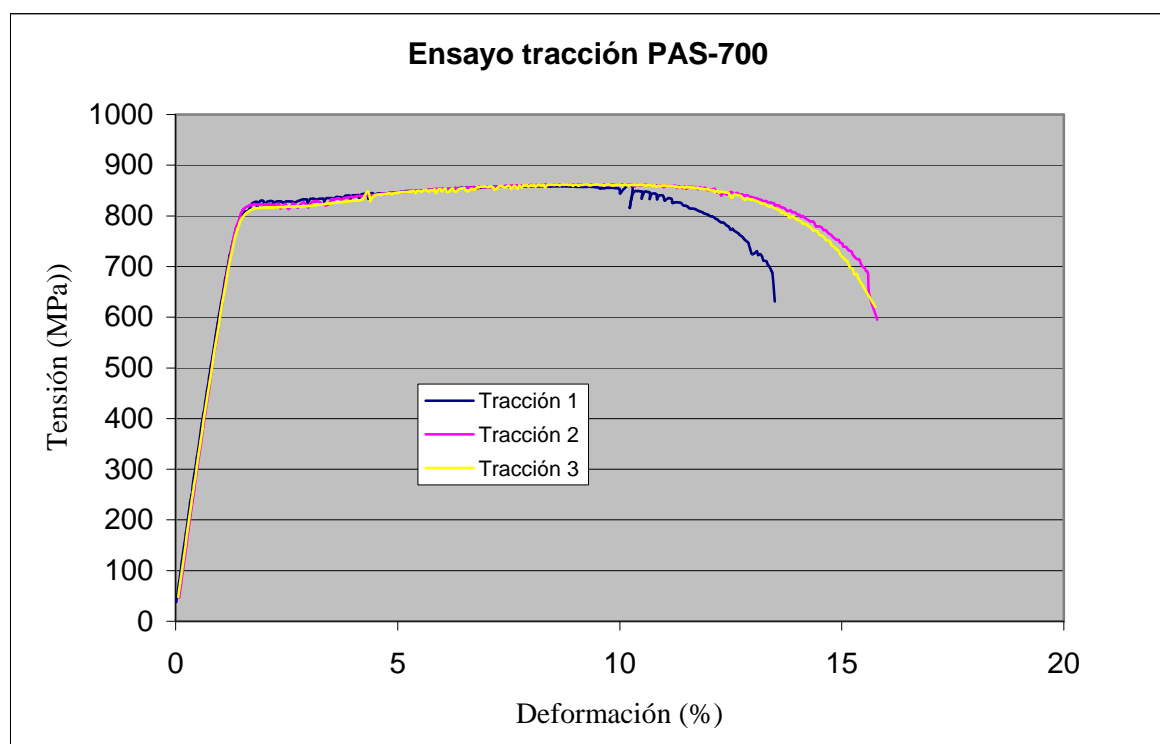


Figura 6



Una vez obtenidas las curvas vamos a proceder a calcular las siguientes características:

Límite de elasticidad:

Se conoce con este nombre a la tensión máxima que puede soportar un metal sin sufrir deformación permanente.

Hay varios métodos para calcular el límite elástico dependiendo de los autores, en este caso se va a tomar el que aparece en libro *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* de William D. Callister debido a que es un material de unas características concretas.

La curva tensión-deformación, en su primer tramo es prácticamente una línea recta hasta llegar a la resistencia dúctil superior, a este fenómeno se le llama discontinuidad del punto de fluencia, en este caso se toma como límite elástico el límite de fluencia inferior y no utilizaremos el criterio del 0,2% de la deformación plástica. Por lo que el límite elástico obtenido y su deformación unitaria son:

$$\sigma_e = 795,83 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_e = 0,014$$

Resistencia a la tracción:

Es la tensión correspondiente a la máxima carga que soporta la probeta durante el ensayo.

$$\sigma_m = F_m / S_0$$



Ensayo	σ_m (MPa)	ϵ_m
1	858,7	0,086
2	862,17	0,098
3	861,62	0,095

Tabla 3

El valor de la resistencia a tracción como su deformación unitaria se obtiene con la media de los tres ensayos:

$$\sigma_m = 860,83 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_m = 0,093$$

Tensión última:

Es la última tensión que soporta el material antes de romperse.

$$\sigma_s = F_s / S_0$$

Ensayo	σ_s (MPa)	ϵ_s
1	631,05	0,135
2	595,35	0,158
3	620,56	0,152

Tabla 4

El valor de la tensión última como el de la deformación unitaria resulta:

$$\sigma_s = 615,65 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_s = 0,148$$

*Alargamiento:*

En la zona calibrada de la probeta se marca una longitud inicial, $L_0 = 80\text{mm}$, al efectuar el ensayo la probeta se alarga debido al esfuerzo. El alargamiento es la diferencia entre la longitud de calibración final y la inicial expresada en porcentaje.

$$A = (L_u - L_0) \times 100 / L_0$$

Ensayo	Lu (mm)	A (%)
1	90,8	13,49
2	92,63	15,79
3	92,60	15,25

Tabla 5

El alargamiento porcentual medio resulta:

$$A = 14,85 \%$$



3.4 ENSAYO DE MICRODUREZA

3.4.1 INTRODUCCIÓN

La dureza es una propiedad mecánica de gran utilidad tecnológica, que indica la resistencia que opone un material a la indentación con un penetrador de otro material más duro sometido a una carga determinada. Existe un gran número de procedimientos para medir la dureza; algunos de ellos muestran la dureza macroscópica ya que se actúa sobre una superficie amplia de la probeta y generan huellas de dimensión del orden de mm, mientras que otros, con indentadores más pequeños y cargas más bajas, permiten medir durezas en materiales blandos, en piezas con espesores muy delgados o aspectos particulares de una microestructura.

Estrictamente, el ensayo de dureza es de carácter destructivo, puesto que deja una huella en el material, pero en las ocasiones que se realiza sobre piezas acabadas, al ser la huella muy pequeña, se considera a efectos prácticos, como no destructivo.

Los métodos de ensayos de penetración más utilizados son los de Brinell, Rockwell, Knoop y el método que utilizaremos Vickers.

3.4.2 OBJETO

Puesto que en este estudio la soldadura juega un papel principal, es necesario conocer como afecta el sobrecalentamiento en el material base.

Mediante este ensayo conoceremos las durezas de la zona afectada térmicamente (ZAT) hasta llegar a la zona del material base, lo que nos permitirá mediante una serie de cálculos conocer las resistencias que es capaz de soportar el material para los posteriores cálculos a fatiga.



3.4.3 NORMA

Para hallar la dureza del material se llevará a cabo un ensayo de microdureza Vickers según la norma **UNE-EN ISO 6507-1:2005**.

3.4.4 PROBETAS

Para este ensayo se utilizarán tres probetas, dos de dimensiones idénticas a las utilizadas para el de tracción pero cortadas por la mitad y posteriormente soldadas a tope y la tercera probeta soldada a solape para medir la dureza en la parte posterior al cordón, zona que denominaremos bajo soldadura.

Para facilitar la lectura de las huellas se pulirán las dos probetas dejando un acabado superficial liso y uniforme.

3.4.5 MÁQUINA DE ENSAYO

La máquina utilizada en este ensayo es un microdurómetro Matsuzawa MXT 50, figura 7:



Figura 7

3.4.6 PROCEDIMIENTO

El método Vickers es el que utilizaremos para calcular la dureza en las tres probetas. Esta técnica consiste en aplicar mediante una máquina calibrada una carga P de compresión, utilizando como cuerpo penetrante una punta piramidal de base cuadrada y ángulo en el vértice, entre caras, de 136° . Esta carga P se mantiene un tiempo predeterminado para posteriormente medir las diagonales d_1 y d_2 dejadas por la huella y así calcular el valor de dureza Vickers.

$$HV = \frac{P \text{ (kp)}}{S \text{ (mm}^2\text{)}}$$

Desarrollando la fórmula, sabiendo que S es la superficie de la huella se obtiene:



$$HV = 1,8544 \cdot \frac{P \text{ (kp)}}{d^2 \text{ (mm}^2\text{)}}$$

d = semisuma de las diagonales de la huella, $(d_1 + d_2) / 2$

La temperatura del laboratorio en el momento del ensayo era aproximadamente de 22°C, dentro del margen que marca la norma de 10°C a 35°C. La carga utilizada en el ensayo es de 1 kgf y el tiempo de permanencia 10 segundos.

Para proceder al ensayo la probeta ha de estar bien amarrada a las mordazas de la máquina para evitar desplazamientos, lo que conllevaría una lectura errónea.

Las mediciones se realizarán en tres probetas, dos probetas soldadas a tope y una a solape. Para las probetas a tope (figura 7) se realizarán tres líneas de 15 mm. perpendiculares al cordón de soldadura de separación entre líneas de 5 mm. Para la probeta a solape también se realizará la medición en tres líneas separadas 5 mm. a lo largo de la zona bajo soldadura.

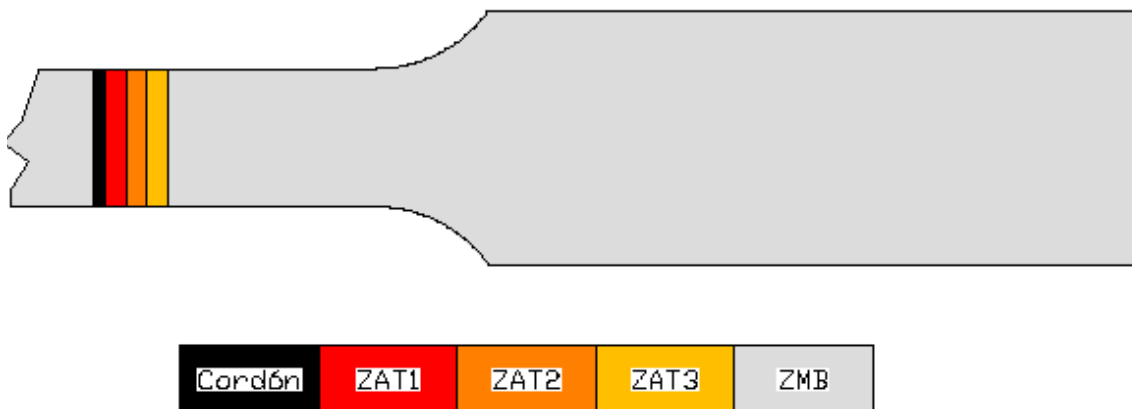


Figura 8

La región próxima al cordón ha sido dividida en tres zonas de 3mm. de longitud cada una, denominadas ZAT 1, 2 y 3 (zona afectada térmicamente), debido al



sobrecalentamiento durante la soldadura es necesario distinguir sus propiedades. El resto de la probeta no afectado por la soldadura lo denominaremos ZMB (zona de material base).

La probeta a solape (figura 8) la utilizaremos para calcular la región denominada ZBS (zona bajo soldadura) que corresponde a la zona posterior al cordón de soldadura.

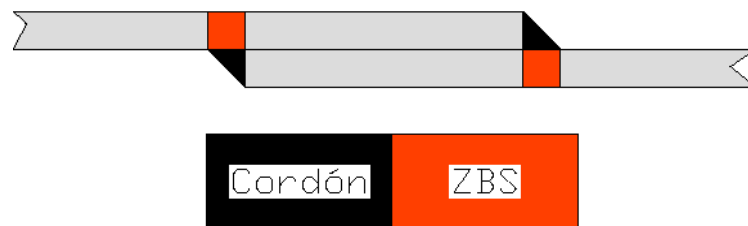


Figura 9



3.4.7 RESULTADOS

La siguiente tabla muestra la dureza HV de la media de las tres líneas ensayadas para la probeta 1 y 2 soldadas a tope:

Punto	Zona	Probeta 1	Probeta 2
1	Cordón	331,07	294,77
2	Cordón	302,70	328,67
3	Cordón	299,37	347,57
4	ZAT 1	266,07	255,93
5	ZAT 1	241,27	291,03
6	ZAT 1	257,40	280,23
7	ZAT 2	274,30	279,53
8	ZAT 2	250,00	284,03
9	ZAT 2	257,00	259,73
10	ZAT 3	275,00	276,27
11	ZAT 3	272,57	290,27
12	ZAT 3	303,63	293,90
13	ZMB	284,80	282,60
14	ZMB	313,80	301,67
15	ZMB	304,67	308,70

Tabla 6

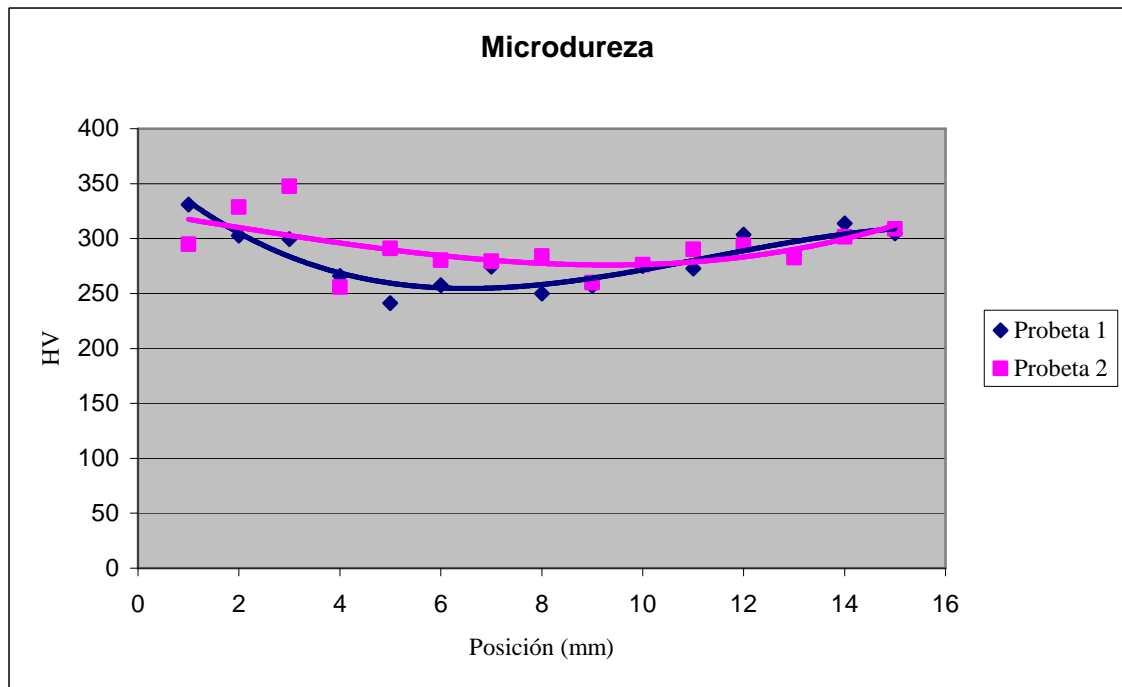


Figura 10

La dureza HV para la probeta soldada a solape en la región ensayada ZBS es:

Punto	Línea 1	Línea 2	Línea 3
1	253,3	248,4	268,6
2	321,4	290,4	281,5
3	260,9	262,4	260,3

Tabla 7

Para obtener un valor de dureza por zona realizaremos la media de los tres puntos ensayados en cada zona. Una vez obtenido el valor de dureza mediante tablas de aproximaciones que comparan dureza y resistencia podremos estimar el valor de resistencia en MPa.



ZONA	HV	σ_m (MPa)
Cordón	317,35	1068,43
ZBS	271,95	912,87
ZAT 1	265,32	886,76
ZAT 2	267,43	895,51
ZAT 3	285,27	961,9
ZMB	299,37	1010,47

Tabla 8

La tabla 8 muestra las medias de dureza HV y resistencia mecánica para cada zona en la que hemos dividido la probeta. El cordón ha sido la zona de mayor resistencia debido al material de aportación, mientras que la ZAT 1 debido a la proximidad es la región de menos resistencia, observamos que la ZBS tiene un valor entre la ZAT 1 y 2 debido al espesor de la probeta.



3.5 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

El objetivo de este capítulo es caracterizar el material para conocer las propiedades mecánicas de las diferentes zonas en la que hemos dividido la probeta.

Para obtener la curva tensión-deformación de cada zona vamos a partir de unas hipótesis y los valores obtenidos en los ensayos, resultando para cada zona un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas.

Las hipótesis empleadas para la obtención del sistema de ecuaciones son:

- El módulo elástico va a considerarse constante en todos los casos, $E = 210.00 \text{ MPa}$.
- La pendiente de la curva plástica constante para todas las zonas.
- El área encerrada bajo la curva tensión-deformación también vamos a considerarla constante para todos los casos.

Planteado el sistema de ecuaciones resultan las siguientes incógnitas, σ_e , A_e y A_m . Una vez resuelto el sistema para cada una de las zonas realizaremos las respectivas curvas de tensión-deformación.



Curva ZMB

Esta curva ha sido tomada como referencia para el cálculo del resto de las curvas, debido a que disponíamos de más datos, obteniendo los valores constantes, E , la pendiente de la curva plástica y el área.

- σ_m : 1010,47 MPa
- σ_e : 953,86 MPa
- A_e : 0,45 %
- A_m : 12,12 %

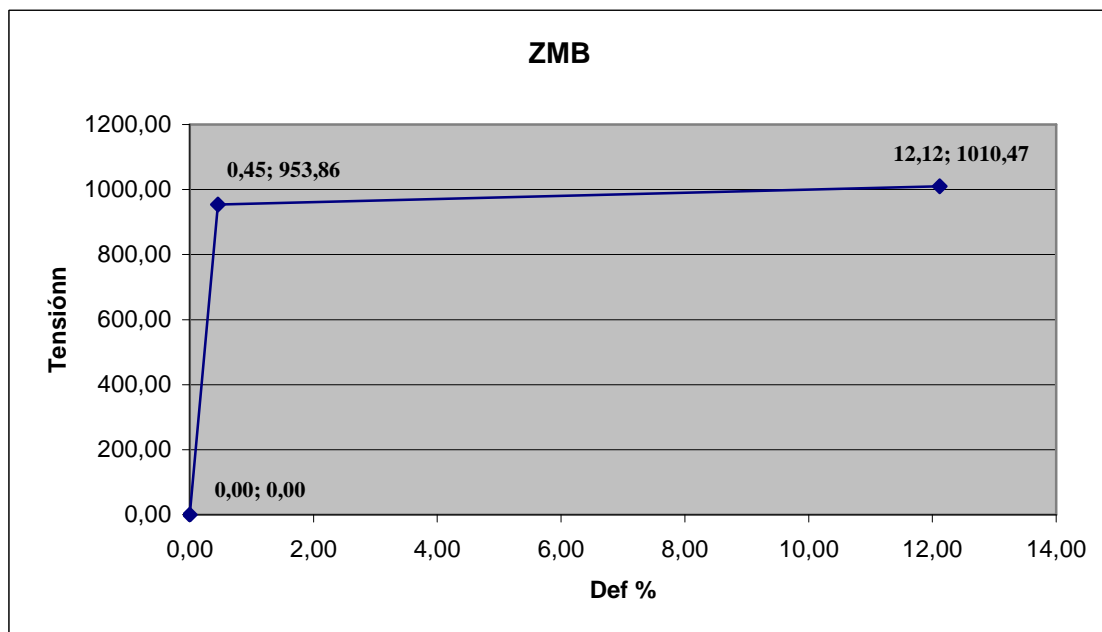


Figura 11



Curva ZBS

- σ_m : 912,87 MPa
- σ_e : 849,53 MPa
- A_e : 0,404 %
- A_m : 13,45 %

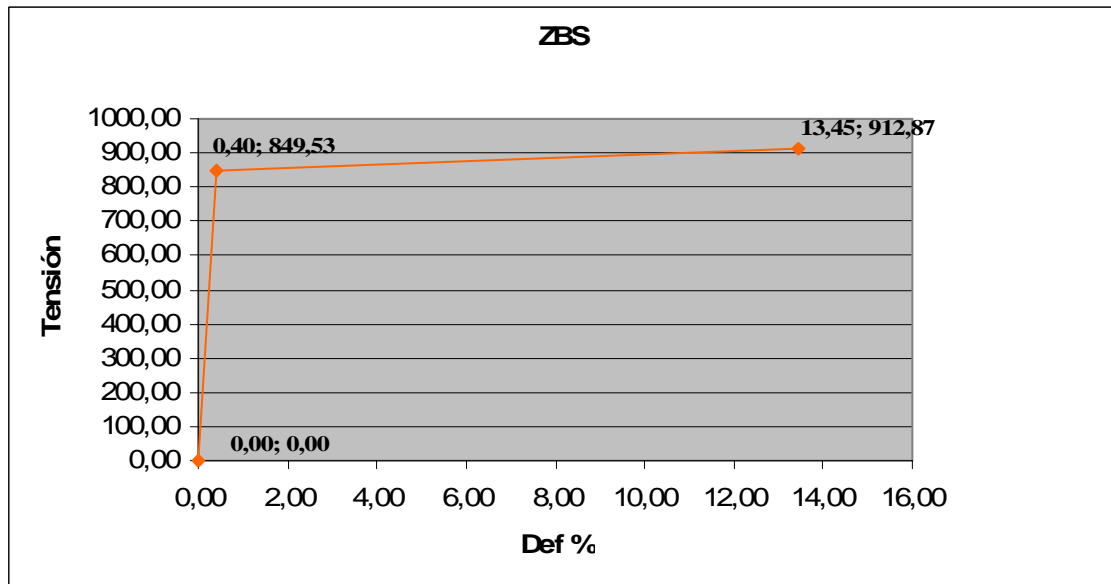


Figura 12



Curva ZAT 1

- σ_m : 886,76 MPa
- σ_e : 821,34 MPa
- A_e : 0,39 %
- A_m : 13,87 %

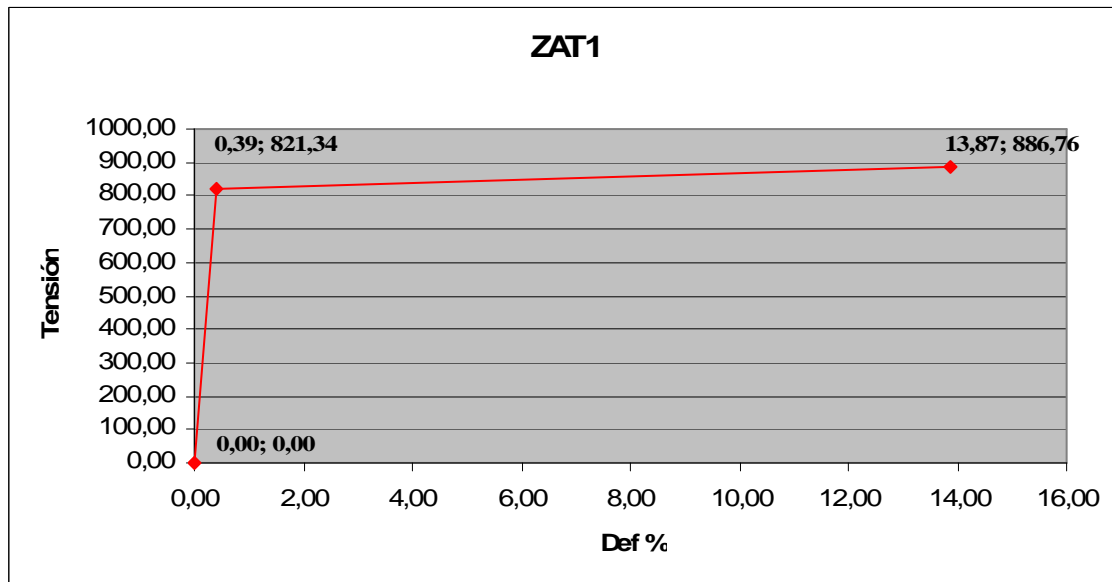


Figura 13



Curva ZAT 2

- σ_m : 895,51 MPa
- σ_e : 830,80 MPa
- A_e : 0,40 %
- A_m : 13,73 %

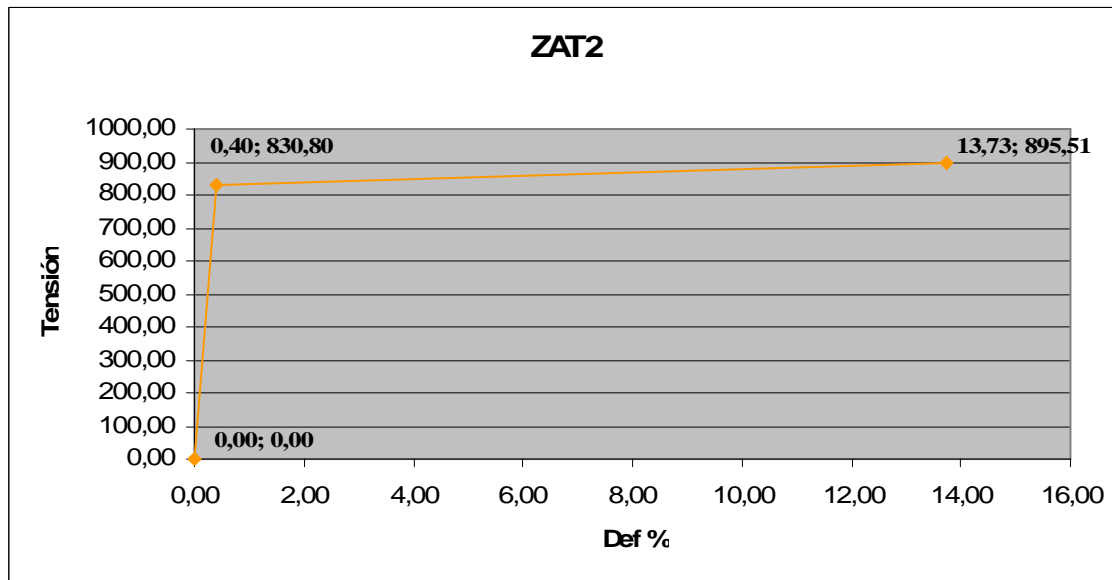


Figura 14



Curva ZAT 3

- σ_m : 961,90 MPa
- σ_e : 902,13 MPa
- A_e : 0,43 %
- A_m : 12,75 %

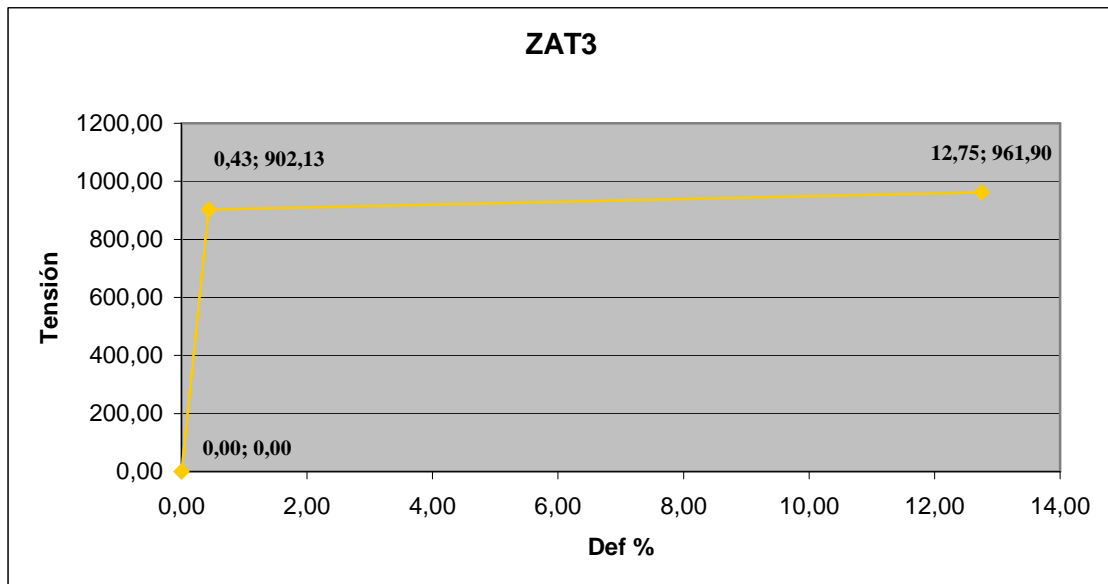


Figura 15



En la figura 16 juntamos las curvas de las diferentes zonas para apreciar la influencia del sobrecalentamiento en las propiedades del material.

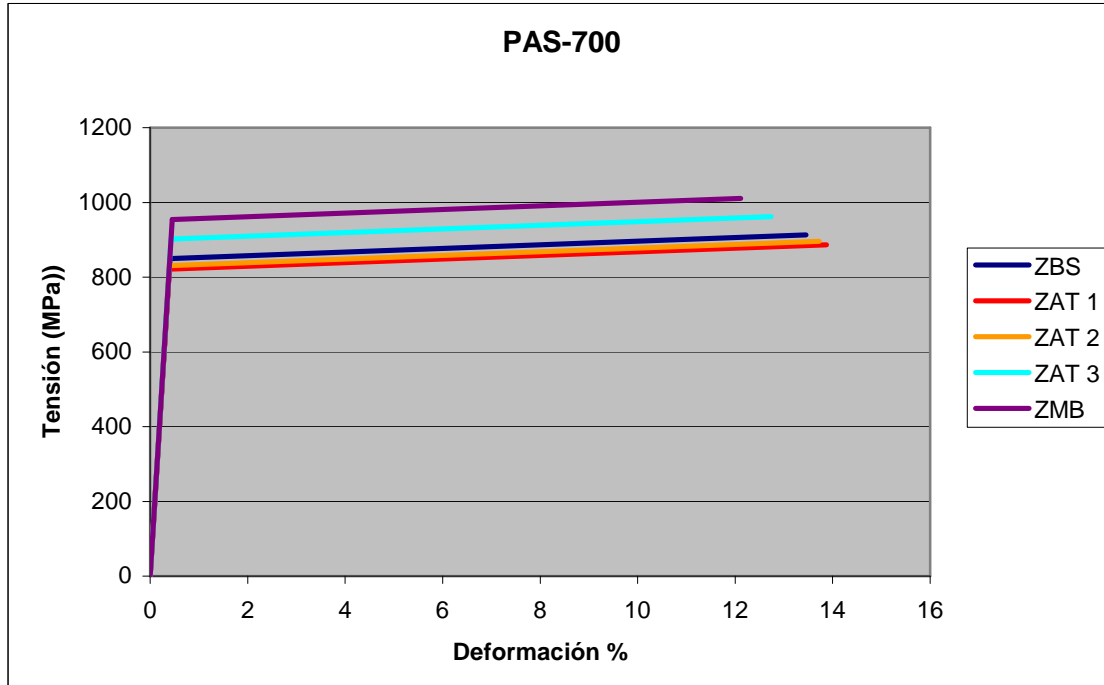


Figura 16

Los resultados de la caracterización para el posterior análisis de vida a fatiga son:

ZONA	σ_e (MPa)	A_e (%)	σ_m (MPa)	A_m (%)
ZBS	912,87	0,40	849,53	13,45
ZAT1	821,34	0,39	886,76	13,87
ZAT2	830,80	0,40	895,51	13,73
ZAT3	902,13	0,43	961,90	12,75
ZMB	953,86	0,45	1010,47	12,12

Tabla 9



4 ANÁLISIS DE LA VIDA A

FATIGA



4.1 INTRODUCCIÓN

Cuando determinadas piezas están sometidas a esfuerzos variables en magnitud y sentido que se repiten con cierta frecuencia, se pueden romper con cargas inferiores a las de rotura, trabajando incluso por debajo del límite elástico siempre que actúen durante un tiempo suficiente, a este fenómeno se le denomina fatiga.

En el proceso de fatiga se distinguen tres fases esenciales: una de incubación en la superficie del metal, otra de maduración progresiva y la última, instantánea, es la rotura efectiva.

Además existen factores que influyen en la vida a fatiga de las piezas, como el propio diseño, la existencia de concentradores de tensiones, el estado de la superficie comenzando la rotura por pequeñas deformaciones macroscópicas. Todo esto hace que la fatiga resulte un fenómeno complejo y una de las principales causas de fallos en piezas.

En este capítulo analizaremos la vida a fatiga de uniones soldadas mediante la simulación virtual por el método de elementos finitos y la realización de ensayos a fatiga en el laboratorio.

En la simulación virtual utilizaremos el módulo de pre y postproceso Patran, en el que definiremos la geometría, el mallado, las propiedades del material, las condiciones de contorno y las cargas para generar un archivo con toda esa información. Este archivo será leído y resuelto por el programa de cálculo Abaqus, para finalmente mostrar los resultados gráficamente en Patran.



4.2 ENSAYO DE FATIGA

4.2.1 OBJETO

En este ensayo obtendremos el número de ciclos que puede aguantar el acero a unas determinadas cargas.

4.2.2 NORMA

El ensayo se lleva a cabo según las normas **UNE-EN ISO 3928 2007**, probetas para ensayos de fatiga, **UNE 7117:1958**, ensayo de fatiga de materiales metálicos. Definiciones y símbolos, y **UNE 7118:1958**, clases y ejecución de los ensayos de fatiga de los materiales metálicos.

4.2.3 PROBETAS

Para este ensayo utilizaremos 15 probetas de acero soldadas a solape. En los extremos hemos soldado unos amarres de metal del mismo espesor (4mm.) que la probeta para que al colocarla en las mordazas de la máquina el eje este alineado.

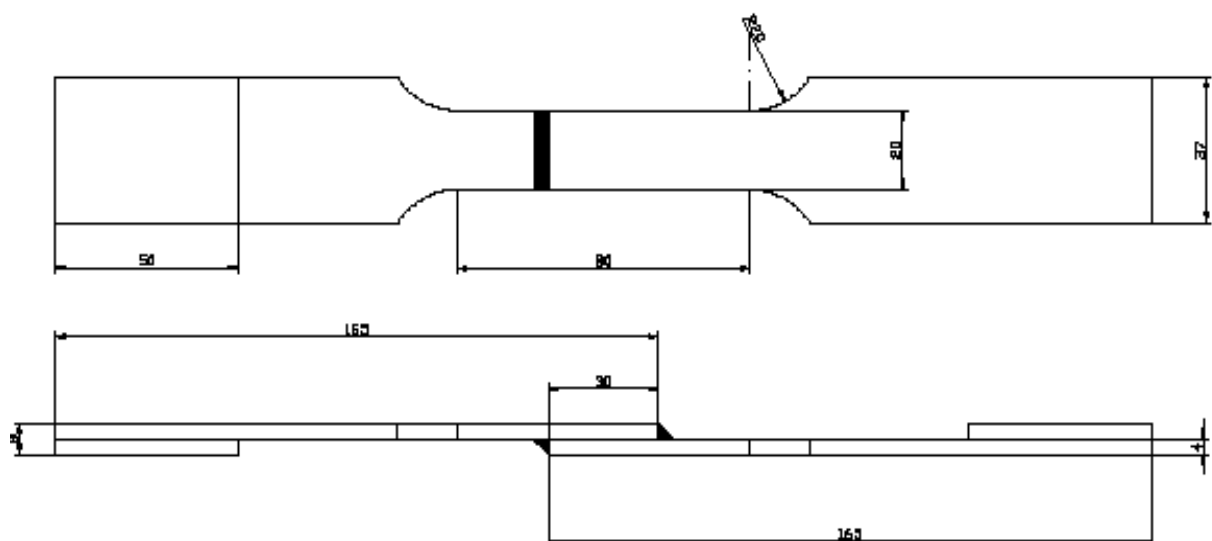


Figura 17



Figura 18

4.2.4 MÁQUINA DE ENSAYO

La máquina que realiza el ensayo es la misma que la utilizada en el ensayo a tracción, Instron 8032.

4.2.5 PROCEDIMIENTO

Se va a realizar un ensayo destructivo de tracción-tracción, que como indica la norma **UNE 7118:1958**, es aquel que se realiza sobre una probeta de sección circular o rectangular, como ocurre en el caso de este ensayo, sometida a esfuerzos axiales alternos de tracción.

Las cargas a las que someteremos las probetas son de tipo cíclico pulsatorio (figura 19), ya que los esfuerzos varían entre dos valores del mismo sentido.

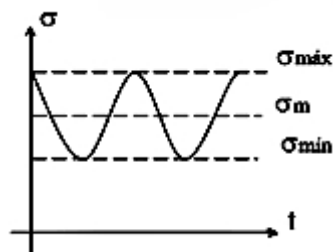


Figura 19



Realizaremos los ensayos para tres casos de carga, con la carga media constante de 20 KN y variando la amplitud 15 KN, 12,5 KN y 10KN. En ningún caso la tensión máxima alcanza la tensión de plastificación del material, por lo que trabajamos por debajo del límite elástico del material.

- $F_m = 20 \text{ KN}$, $F_{m\acute{a}x} = 35 \text{ KN}$, $F_{m\acute{m}n} = 5 \text{ KN}$
- $F_m = 20 \text{ KN}$, $F_{m\acute{a}x} = 32,5 \text{ KN}$, $F_{m\acute{m}n} = 7,5 \text{ KN}$
- $F_m = 20 \text{ KN}$, $F_{m\acute{a}x} = 30 \text{ KN}$, $F_{m\acute{m}n} = 10 \text{ KN}$

4.2.6 RESULTADOS

A continuación mostramos las gráficas tensión-nº ciclos obtenidas de los ensayos a fatiga realizados:



Carga 20 KN, Amplitud 15 KN

Ensayo 1

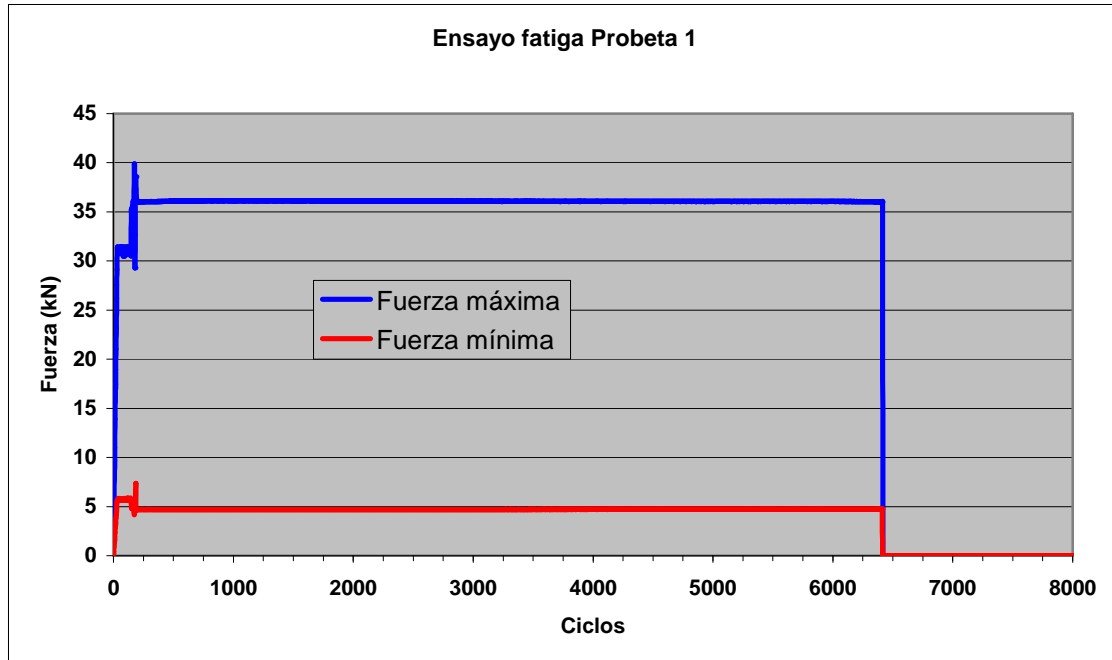


Figura 20

Ensayo 2

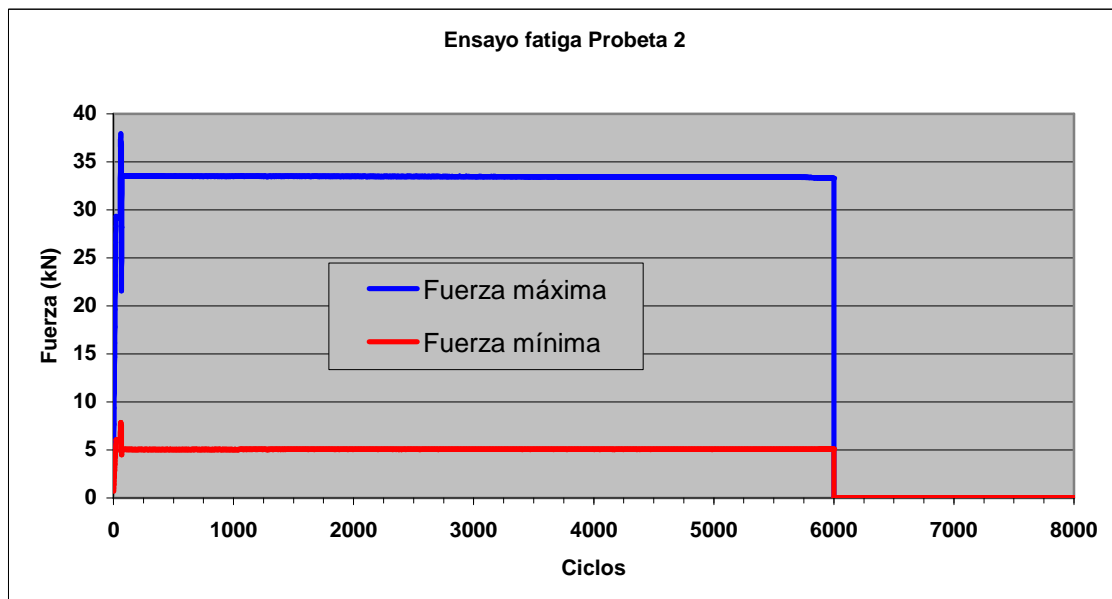


Figura 21



Ensayo 3

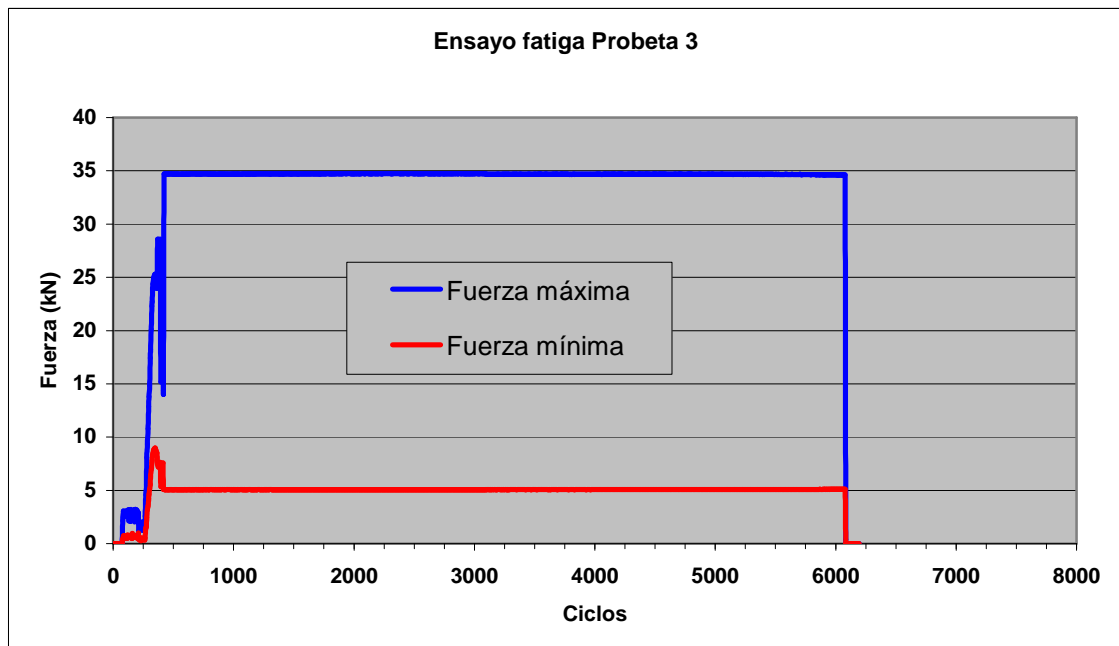


Figura 22

Ensayo 4

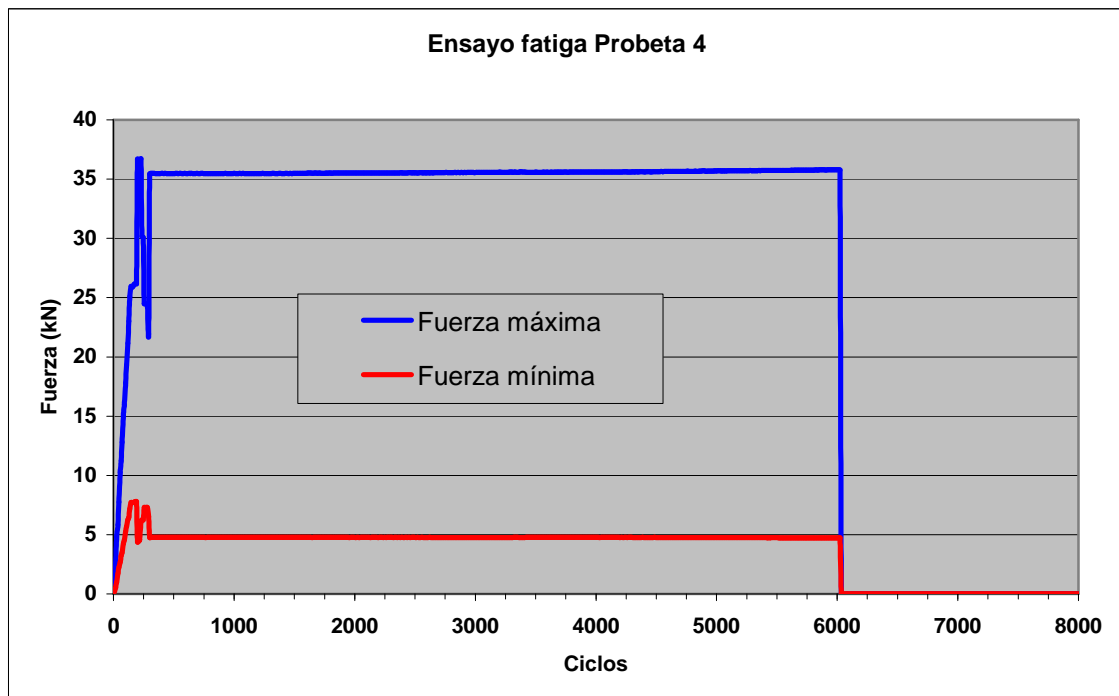


Figura 23



Ensayo 5

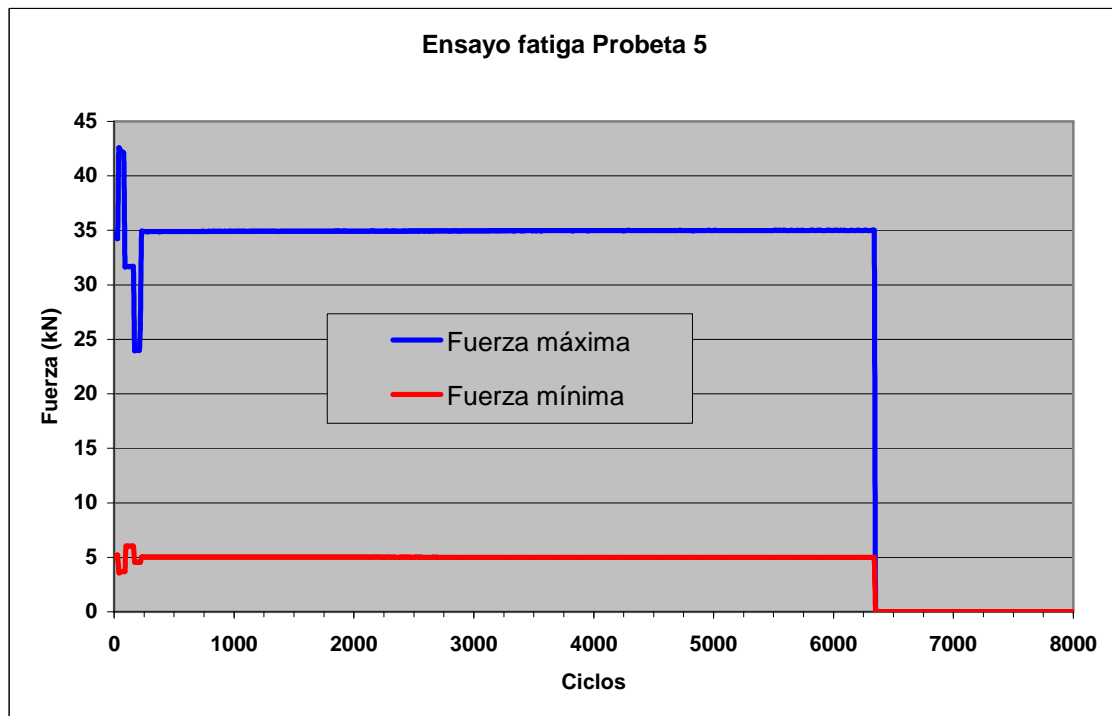


Figura 24



Carga 20 KN, Amplitud 12,5 KN

Ensayo 1

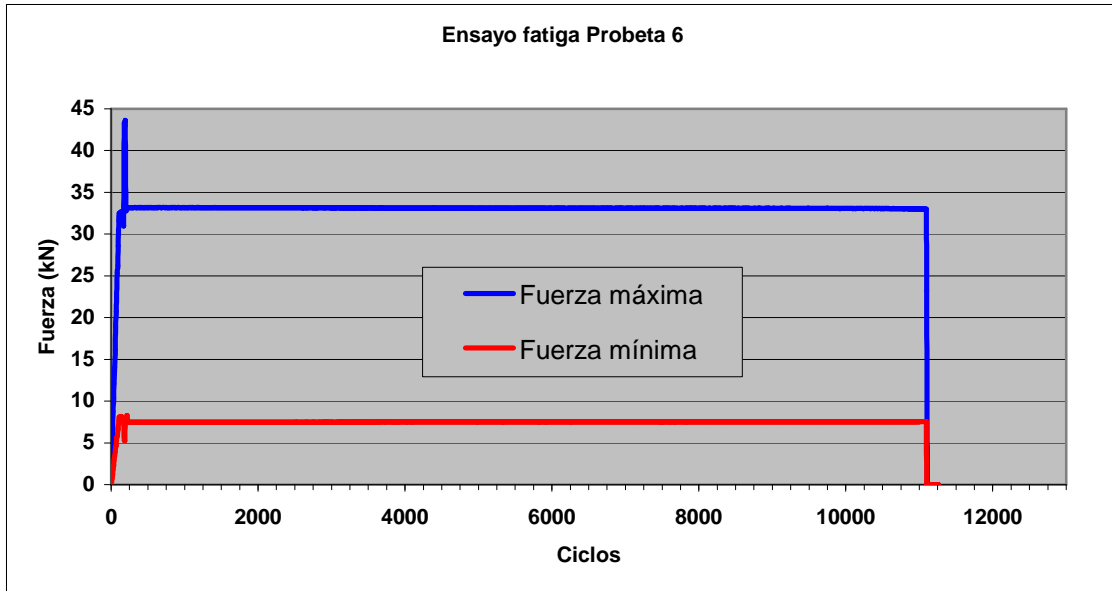


Figura 25

Ensayo 2

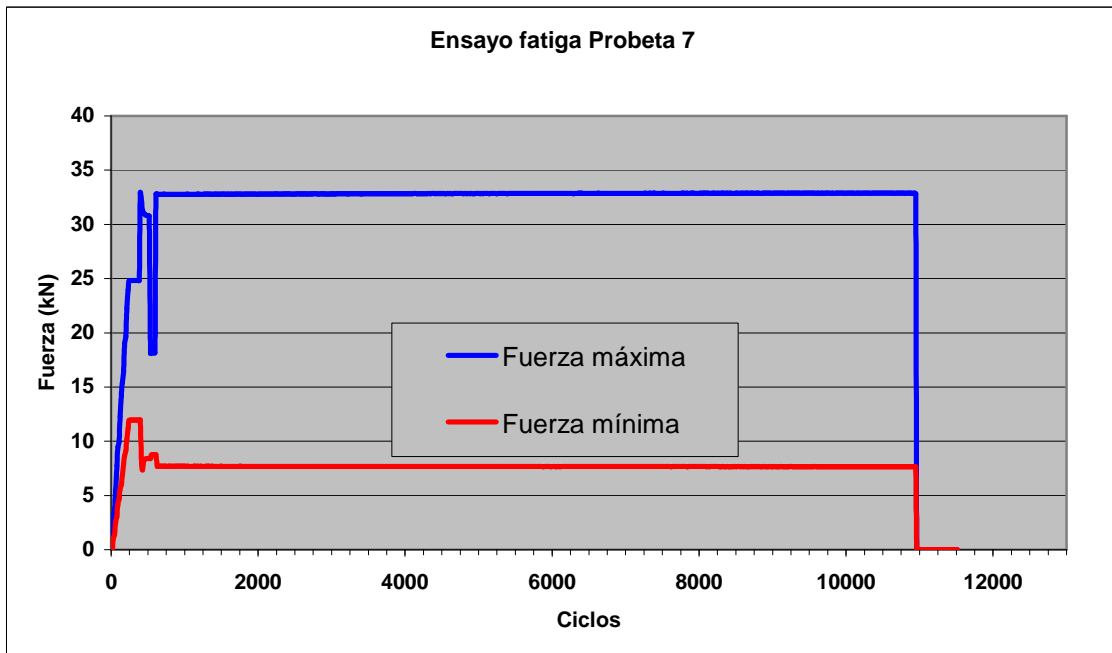


Figura 26



Ensayo 3

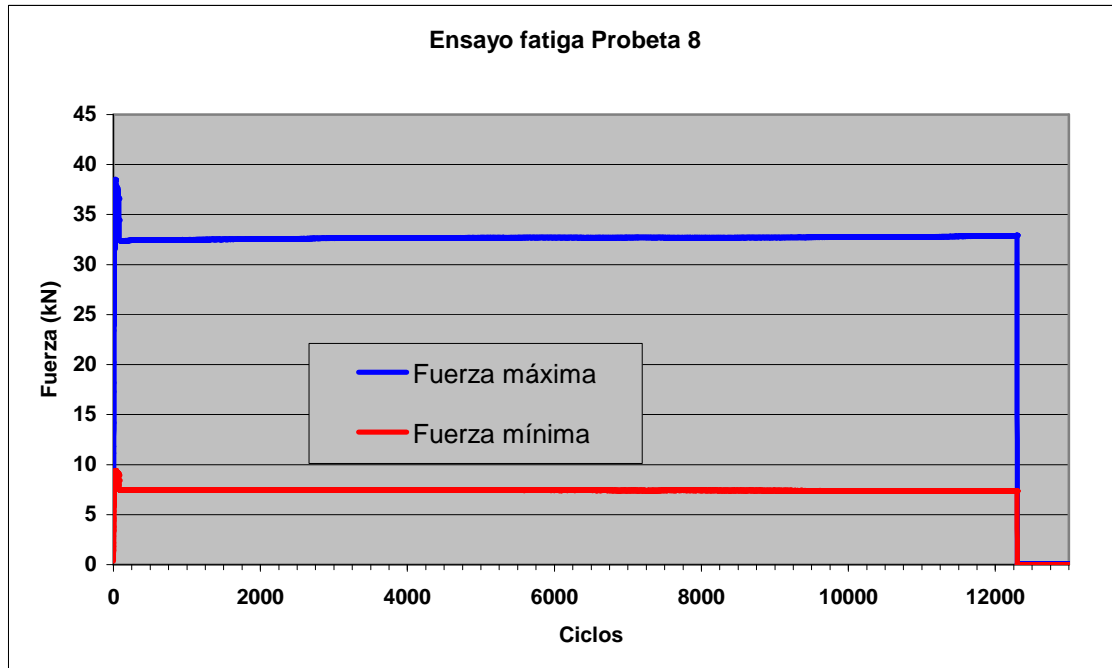


Figura 27

Ensayo 4

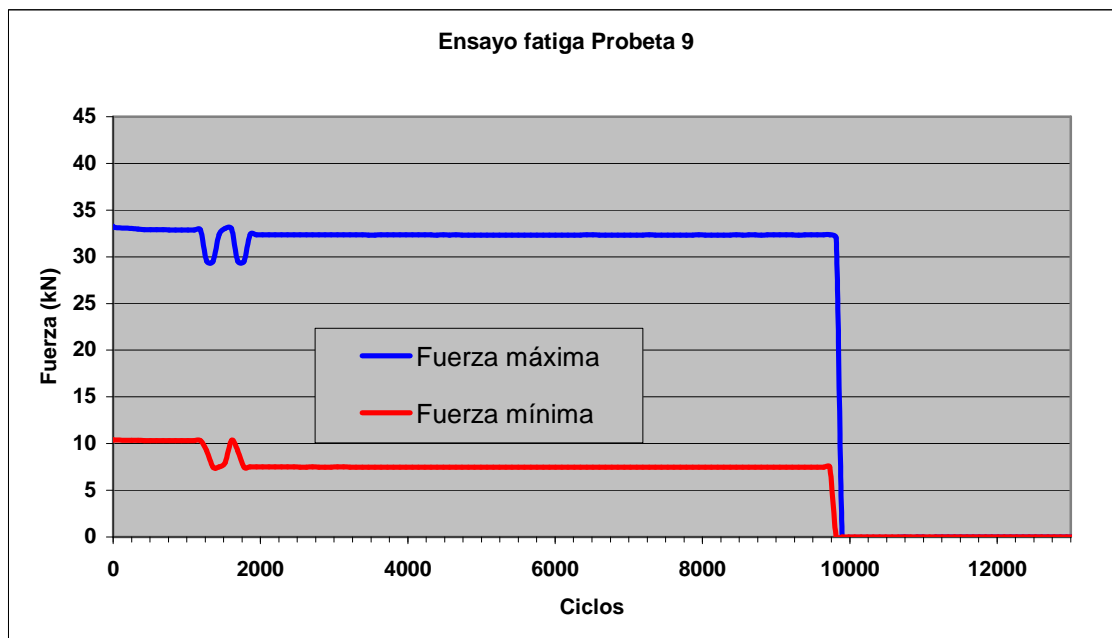


Figura 28



Ensayo 5

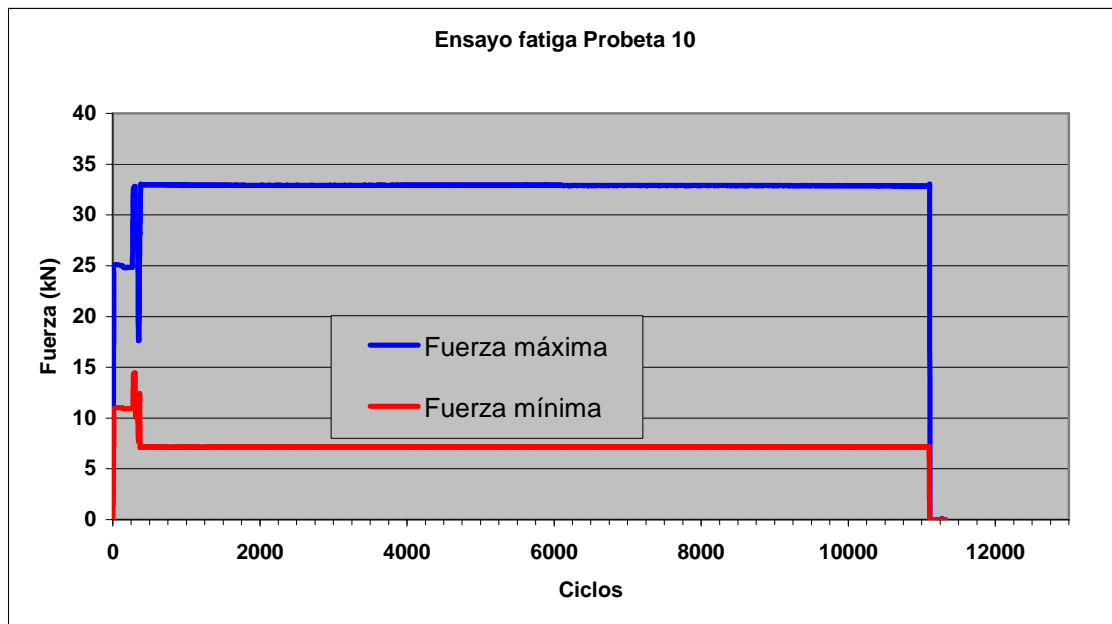


Figura 29



Carga 20 KN, Amplitud 10 KN

Ensayo 1

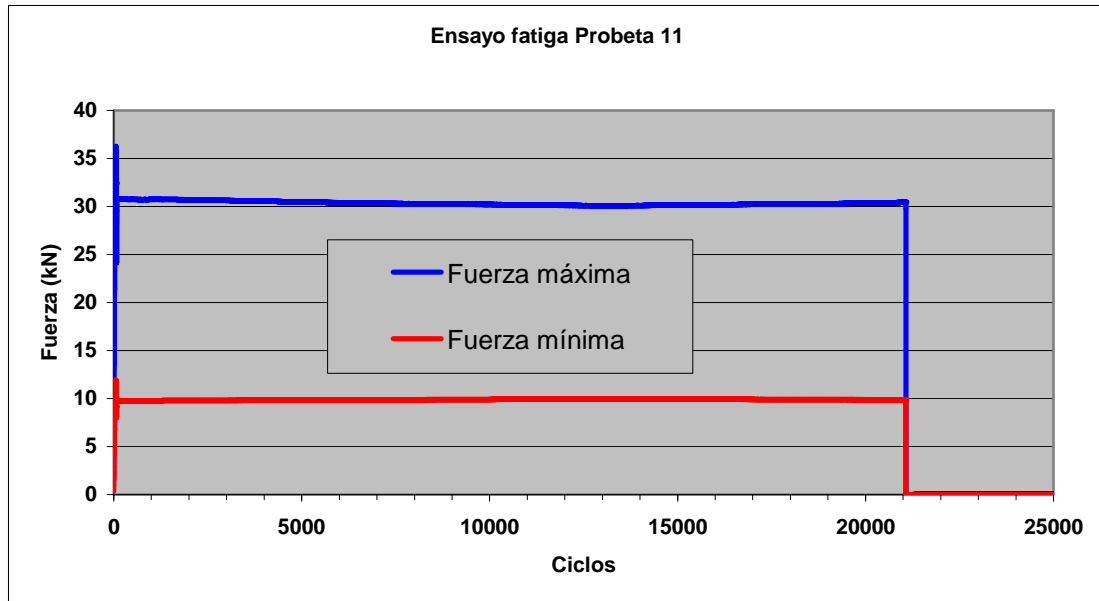


Figura 30

Ensayo 2

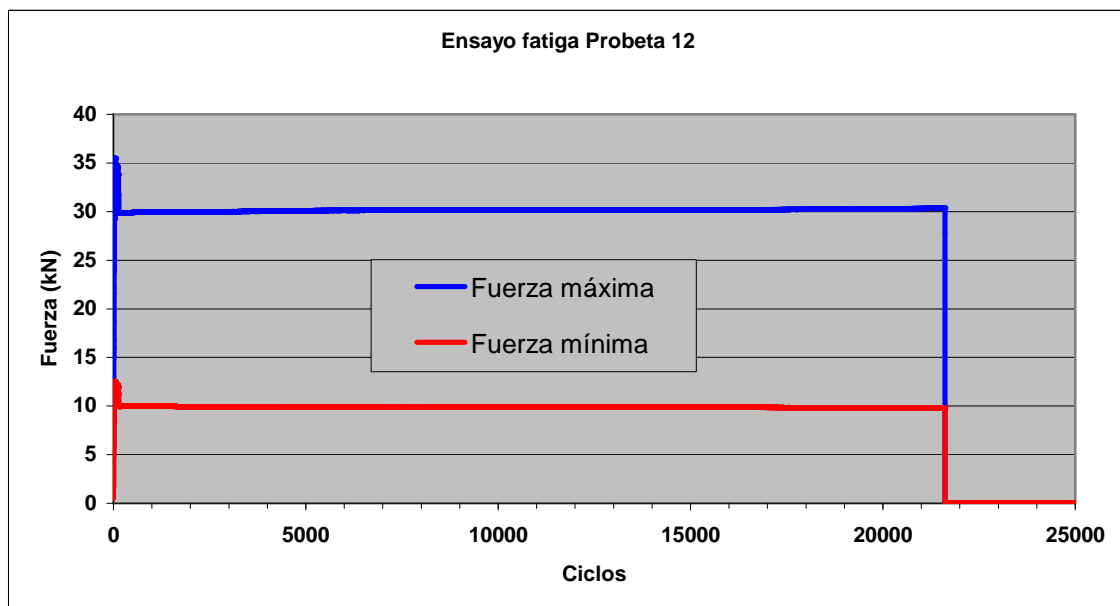
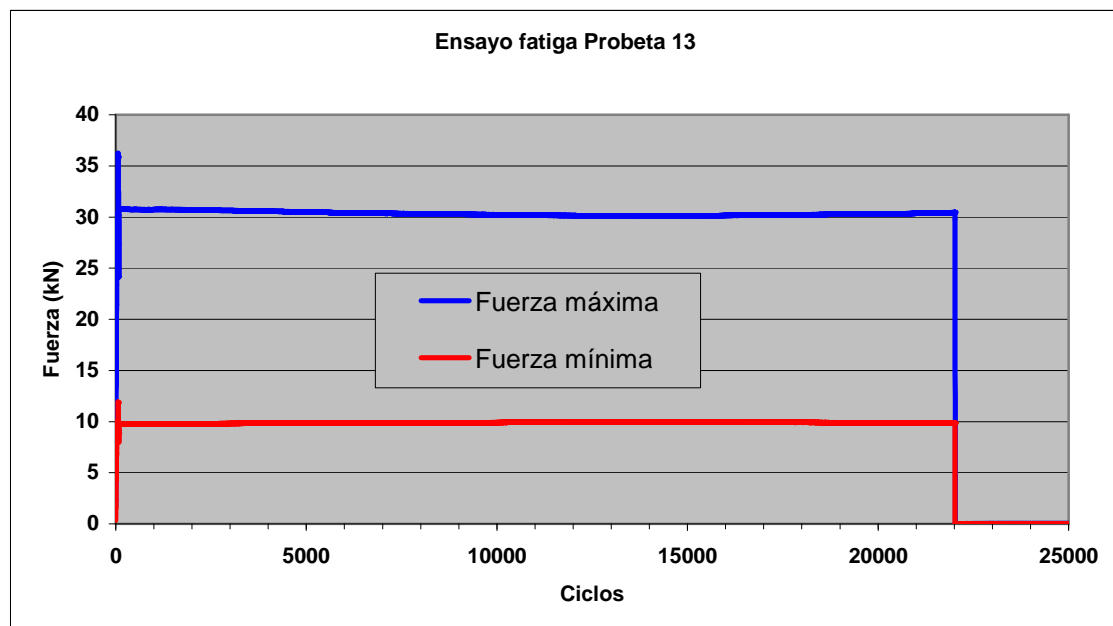
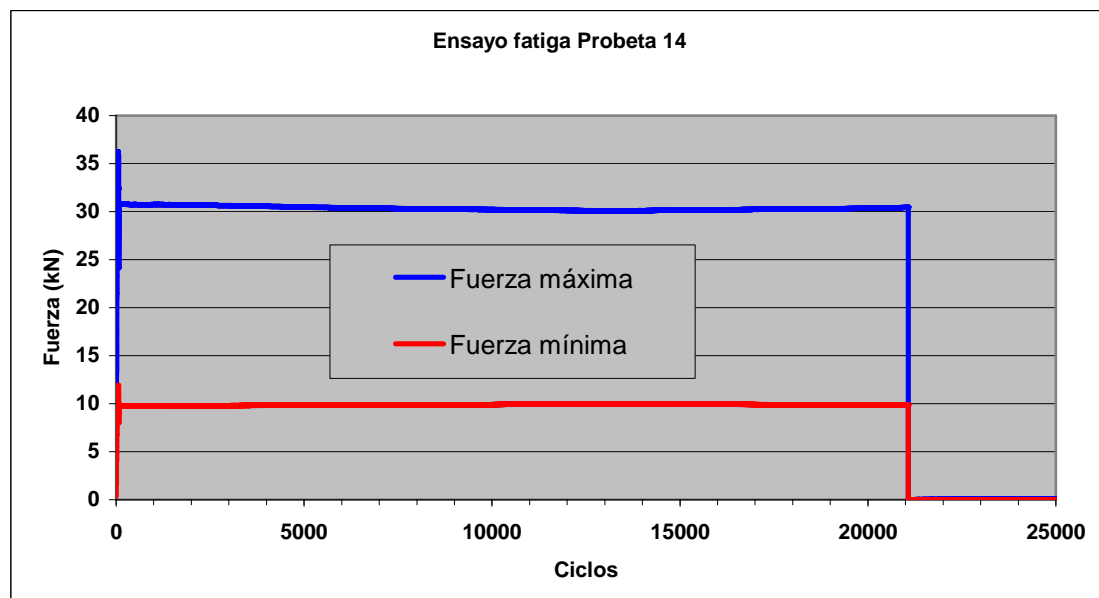


Figura 31

*Ensayo 3**Figura 32**Ensayo 4**Figura 33*



Ensayo 5

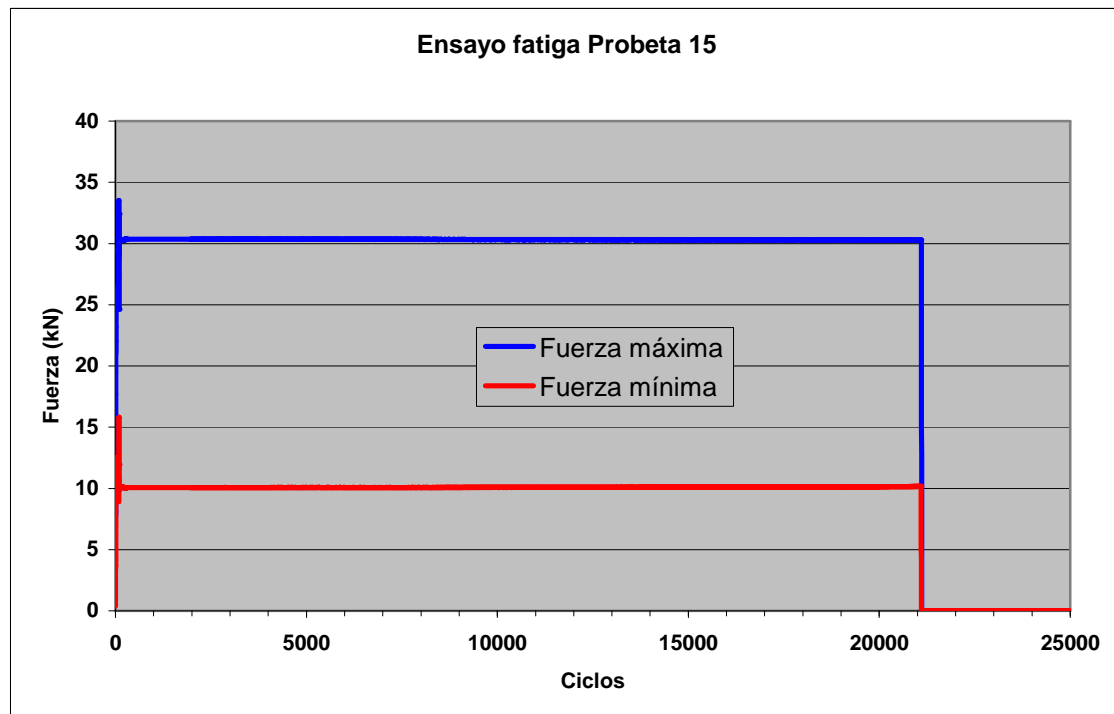


Figura 34

En la siguiente tabla mostramos las medias de los resultados de la vida a fatiga de las probetas ensayadas en función de las cargas aplicadas ($F_m = 20\text{KN}$, para amplitud $S = 15$, $S = 12,5$, $S = 10$).

	F 20KN S=15	F 20KN S=12,5	F 20 KN S=10
Nº ciclos	6250	11050	21420

Tabla 10



4.3 SIMULACIÓN POR ORDENADOR POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

4.3.1 OBJETO

Mediante la simulación virtual trataremos de predecir la vida a fatiga de los modelos diseñados según dos metodologías distintas, el análisis de predicción según el IIW (Internacional Institute of Welding) y ZMB (Zona Material Base).

4.3.2 PROCEDIMIENTO

En primer lugar definiremos los tres modelos a simular, uno de tipo placa y dos volumétricos, creando la correspondiente geometría y mallado en Patran. La diferencia entre los modelos volumétricos es la geometría y mallado del cordón. La geometría de los modelos es idéntica a las probetas ensayadas a fatiga.

Modelo tipo placa:

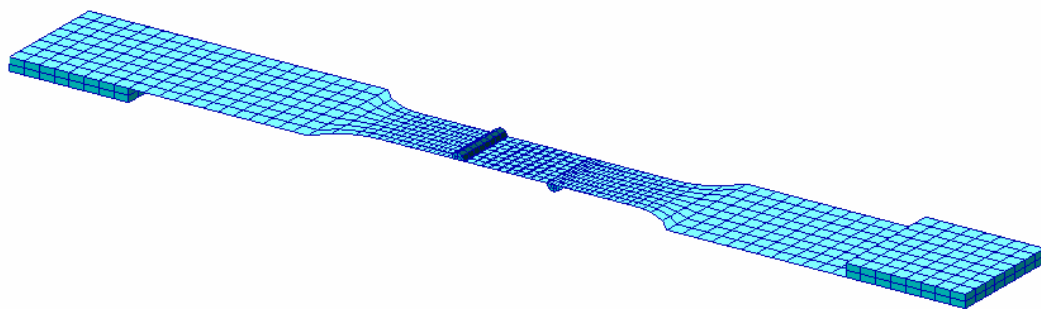


Figura 35



Modelo volumétrico cordón triangular:

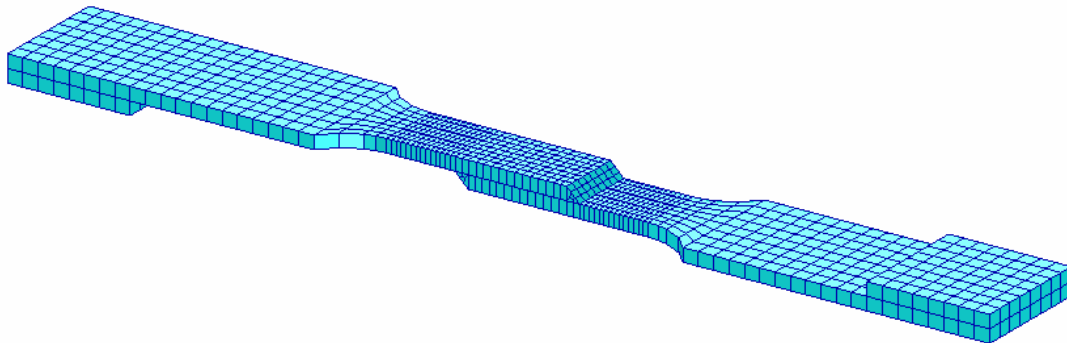


Figura 36

Modelo volumétrico cordón arco de circunferencia:

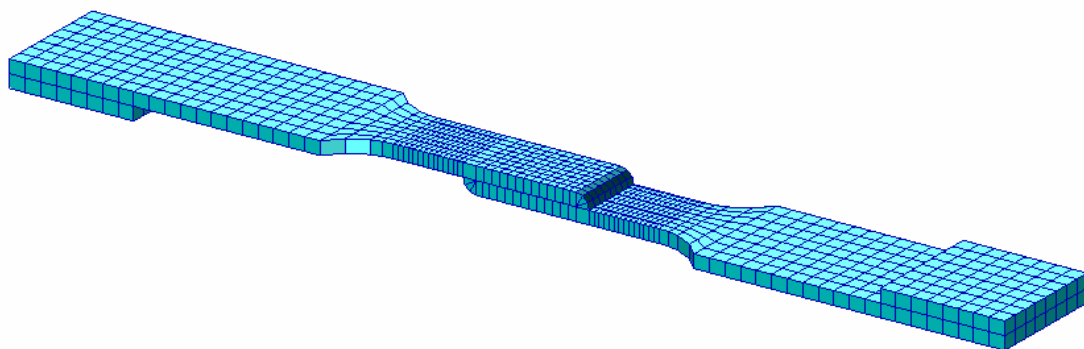


Figura 37

El tamaño de los elementos influye en el resultado, por tanto en las zonas próximas al cordón hemos reducido el tamaño de los elementos para minimizar el error, a pesar de que supone un mayor coste computacional al igual que el empleo de elementos volumétricos.

Una vez definida la geometría y mallado de cada modelo, introduciremos las condiciones de contorno y las cargas simulando la máquina de ensayos, una carga media de 20 KN para las amplitudes de 15 KN, 12,5 KN y 10 KN.



Definiremos las propiedades del material, para ello los modelos han sido divididos por grupos (material base, ZAT 1, 2 y 3 y zona bajo soldadura) para asignar a cada grupo sus respectivas características mecánicas obtenidas en el capítulo anterior.

Con toda esta información generaremos un archivo que será resuelto por el programa de cálculo por elementos finitos Abaqus. Además para obtener la información necesaria sobre el tipo de análisis de predicción de vida a fatiga, generaremos el fichero externo “Propiedades de materiales.txt”. En este fichero especificaremos la metodología a emplear en el análisis, en nuestro caso utilizaremos dos metodologías de predicción de vida a fatiga, el método del International Institute of Welding (IIW) y el método (ZMB).

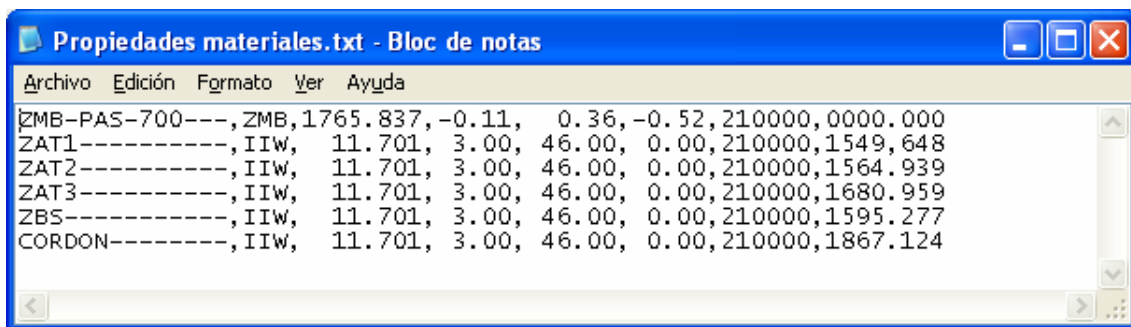


Figura 38

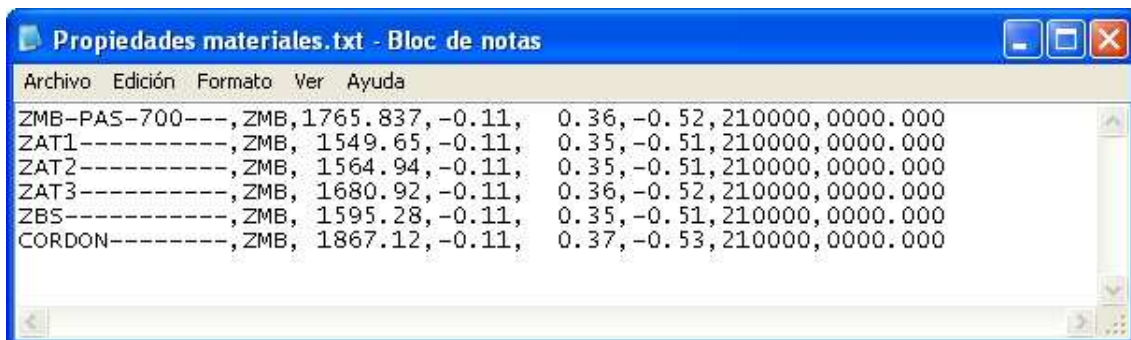


Figura 39

El fichero “Propiedades materiales.txt” como puede observarse en las figuras 23 y 24 consta de ocho columnas. La primera columna indica el nombre del material, la segunda especifica la metodología a emplear en el análisis según el IIW o ZMB. El resto



de columnas aportan el valor de los parámetros necesarios para realizar el análisis de vida a fatiga.

Si el método a emplear es el expuesto por el IIW las seis columnas restantes corresponden a valores de las curvas de resistencia a fatiga.

En el caso de ZMB las seis columnas restantes corresponden a los parámetros de fatiga según los seis criterios a utilizar. Estos son: el método de correlación de cuatro puntos, el método de correlación de cuatro puntos modificado, el método de la pendiente universal, el método Mitchell, el método de la pendiente universal modificado y la ley uniforme del material.

Finalmente con el módulo de post-proceso Patran podremos leer los resultados obtenidos.

4.3.3 RESULTADOS

A continuación mostramos los resultados de predicción de vida a fatiga según los diferentes métodos empleados. La carga media (F_m) empleada es de 20 KN para las amplitudes (S) de 15 KN, 12,5 KN y 10 KN.

Los resultados obtenidos para los tres modelos con el análisis según ZMB:



Modelo tipo placa

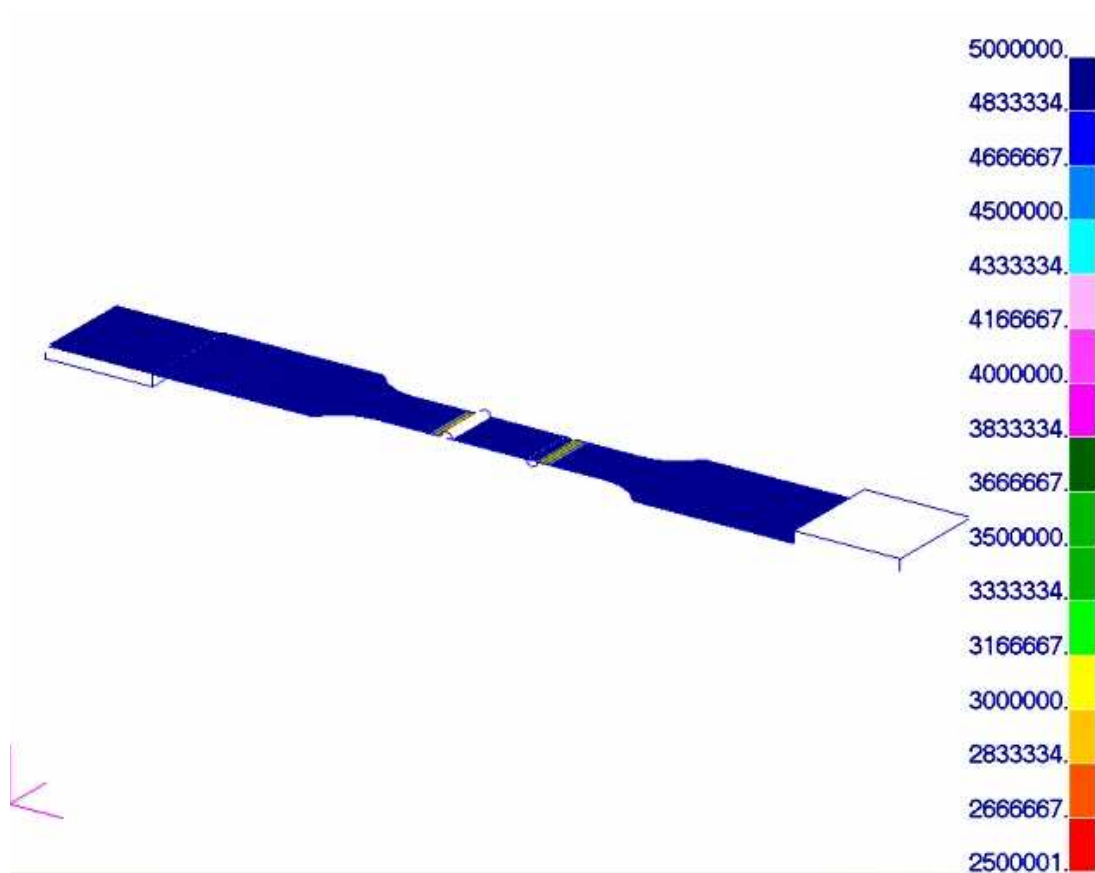


Figura 40



Modelo volumétrico cordón triangular

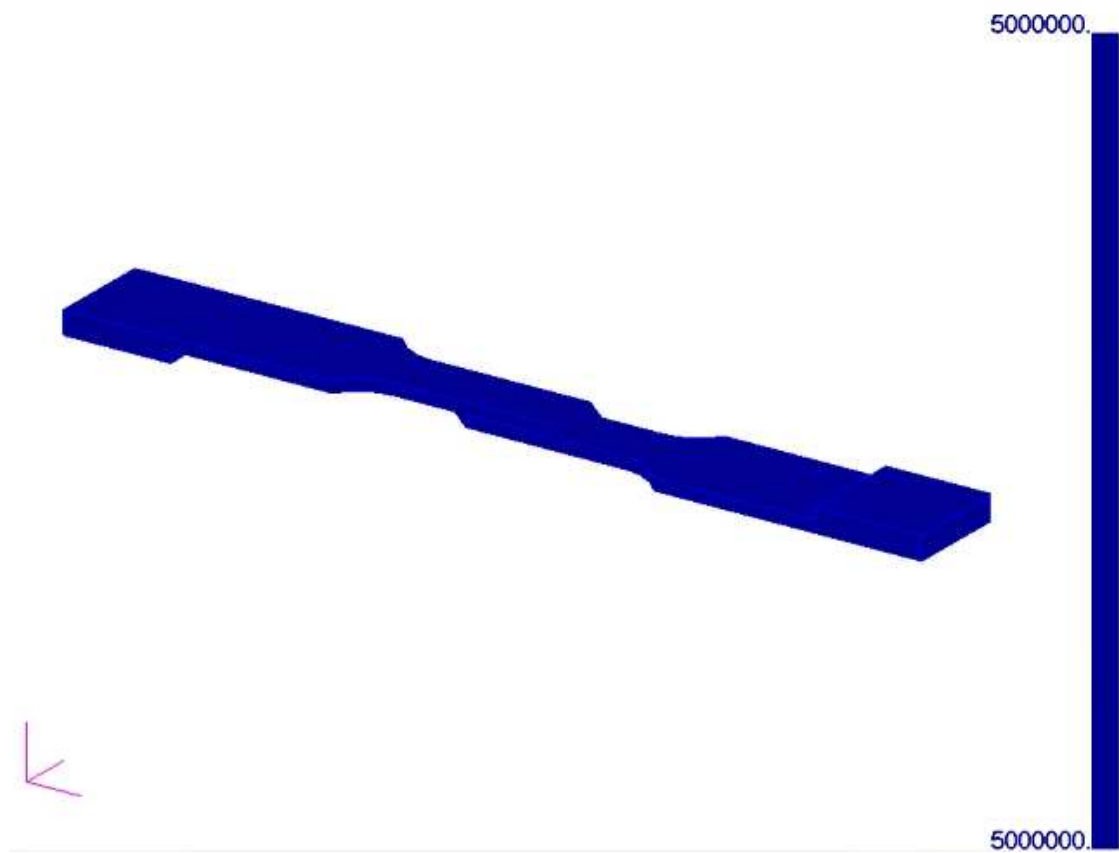


Figura 41



Modelo volumétrico cordón redondo

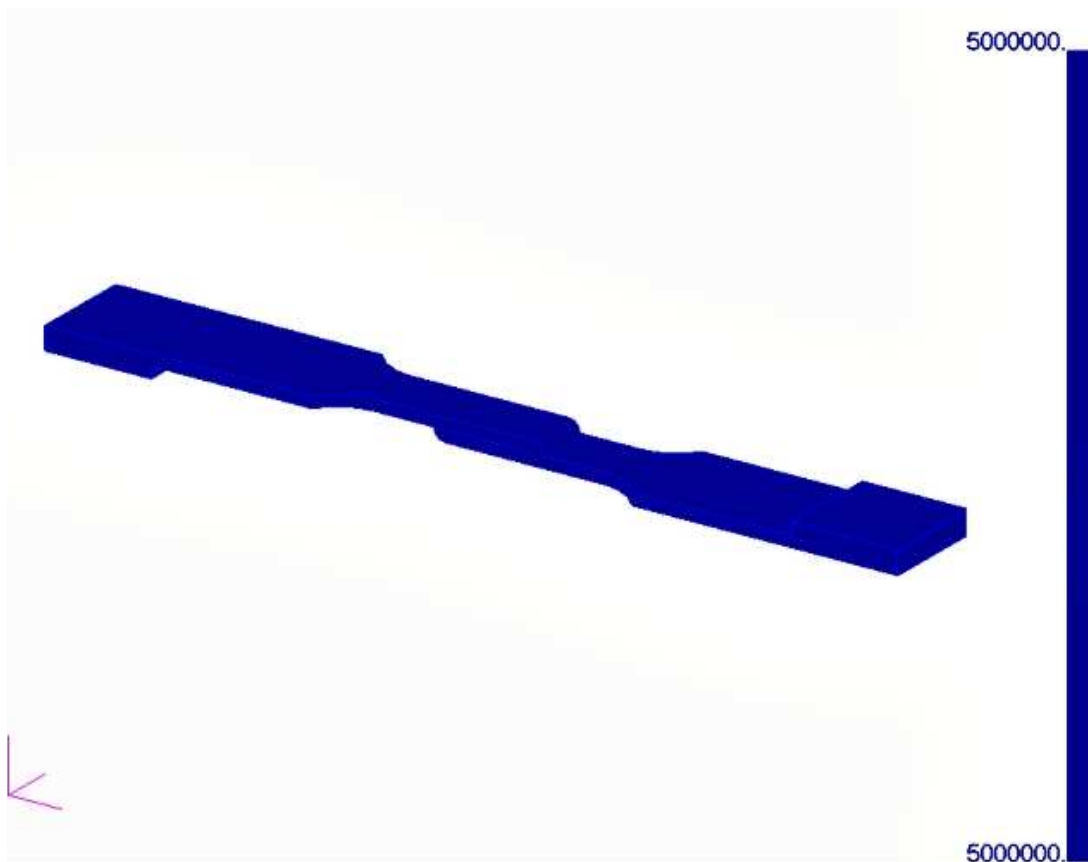


Figura 42

Los valores obtenidos mediante el análisis ZMB para los modelos volumétricos no resultan válidos en ningún caso de carga. Mientras que para el modelo tipo placa, para el caso de carga 20 kn con una amplitud de 10 kn resulta una vida a fatiga de 2.500.000 ciclos, valor muy elevado puesto que este método no tiene en cuenta la soldadura.



A continuación mostramos los resultados de vida a fatiga según el método del IIW para el método Mitchell.

Modelo tipo placa

- $F_m = 20$ kn, S (amplitud) = 15 kn

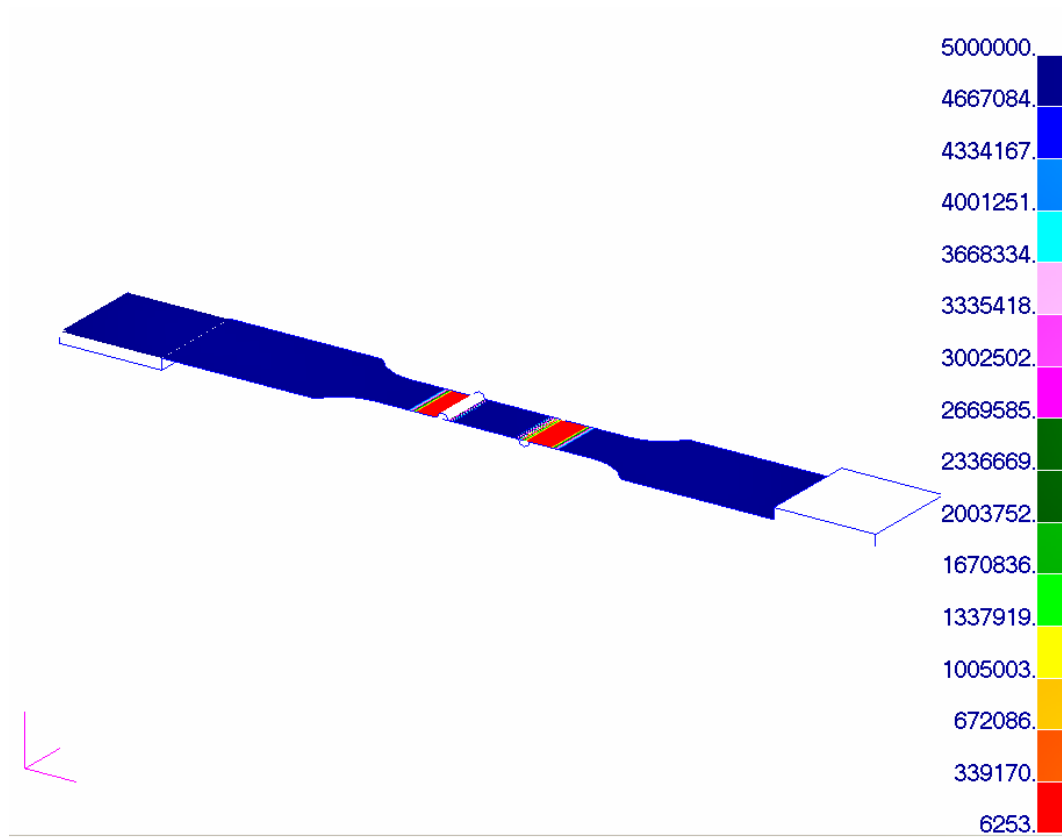


Figura 43



- $F_m = 20 \text{ kn}$, $S \text{ (amplitud)} = 12,5 \text{ kn}$

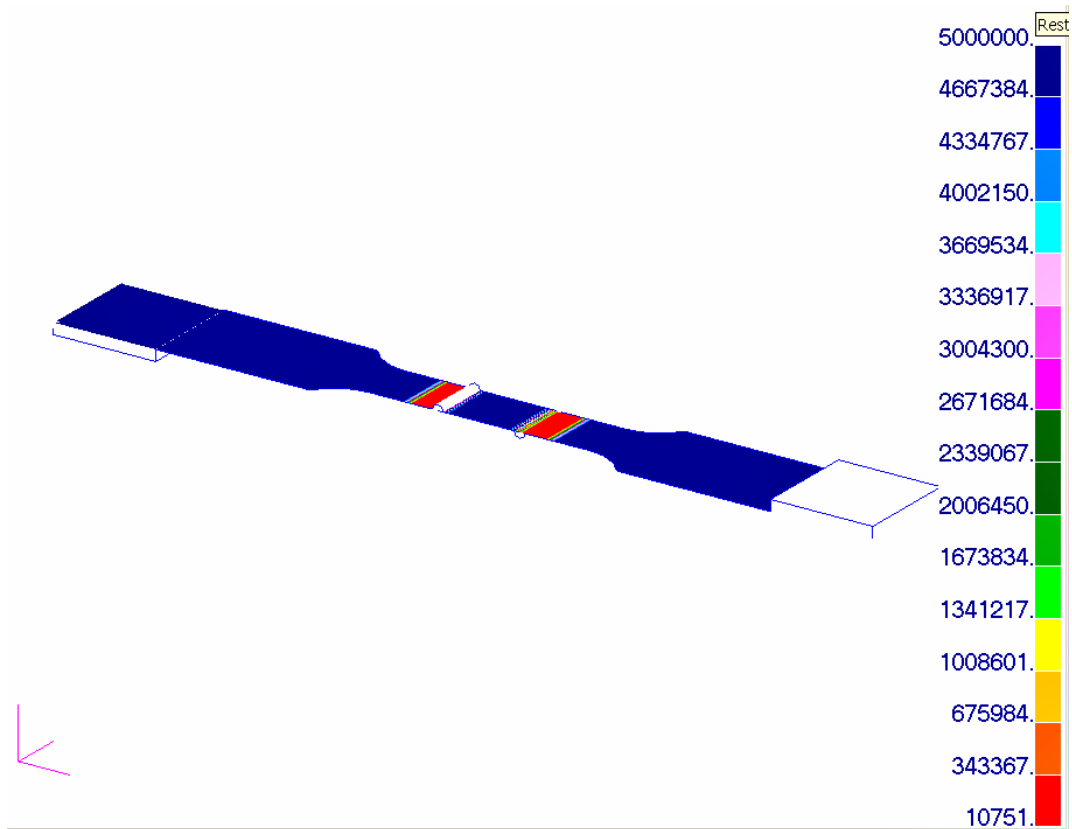


Figura 44



- $F_m = 20 \text{ kn}$, S (amplitud) = 10 kn

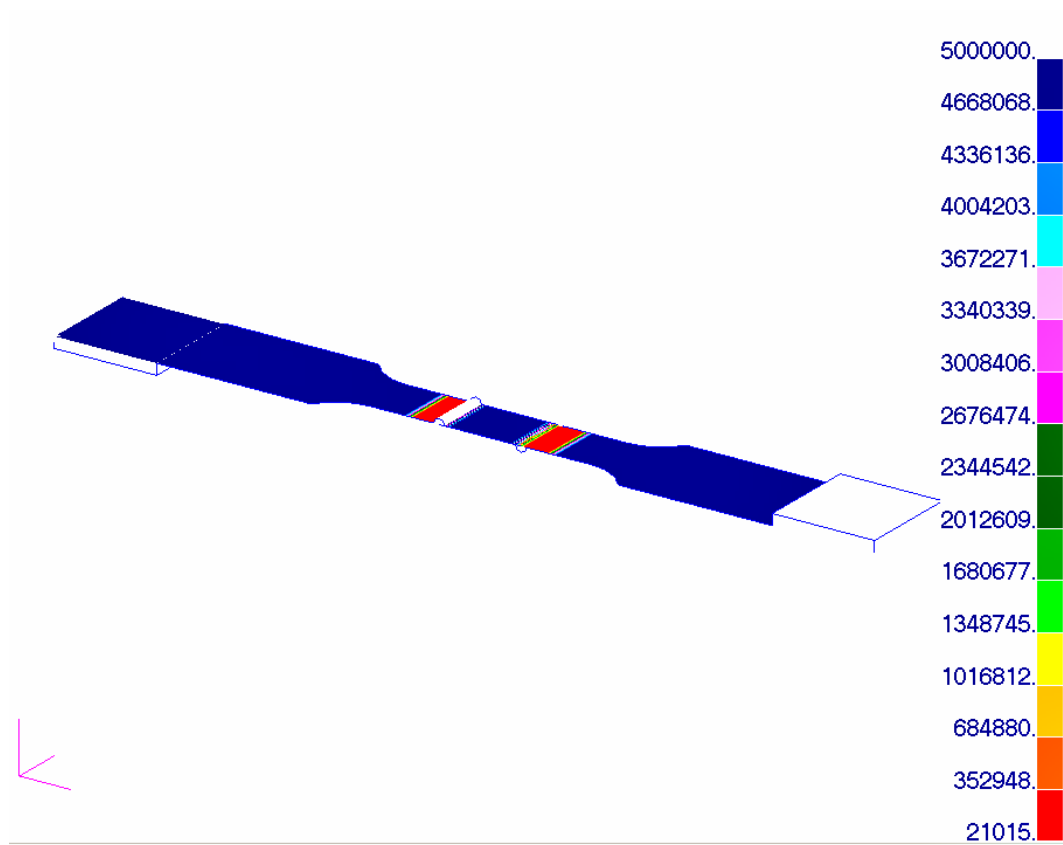


Figura 45



Modelo volumétrico cordón triangular

- $F_m = 20 \text{ kn}$, S (amplitud) = 15 kn

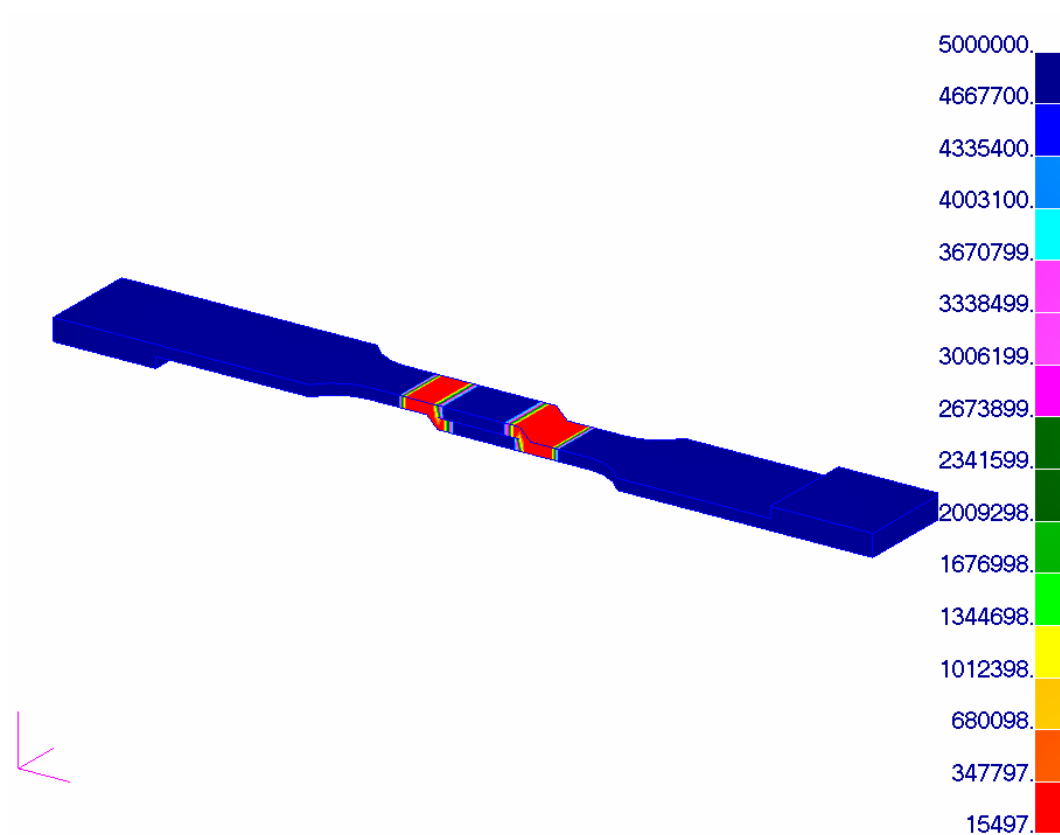


Figura 46



- $F_m = 20 \text{ kn}$, $S \text{ (amplitud)} = 12,5 \text{ kn}$

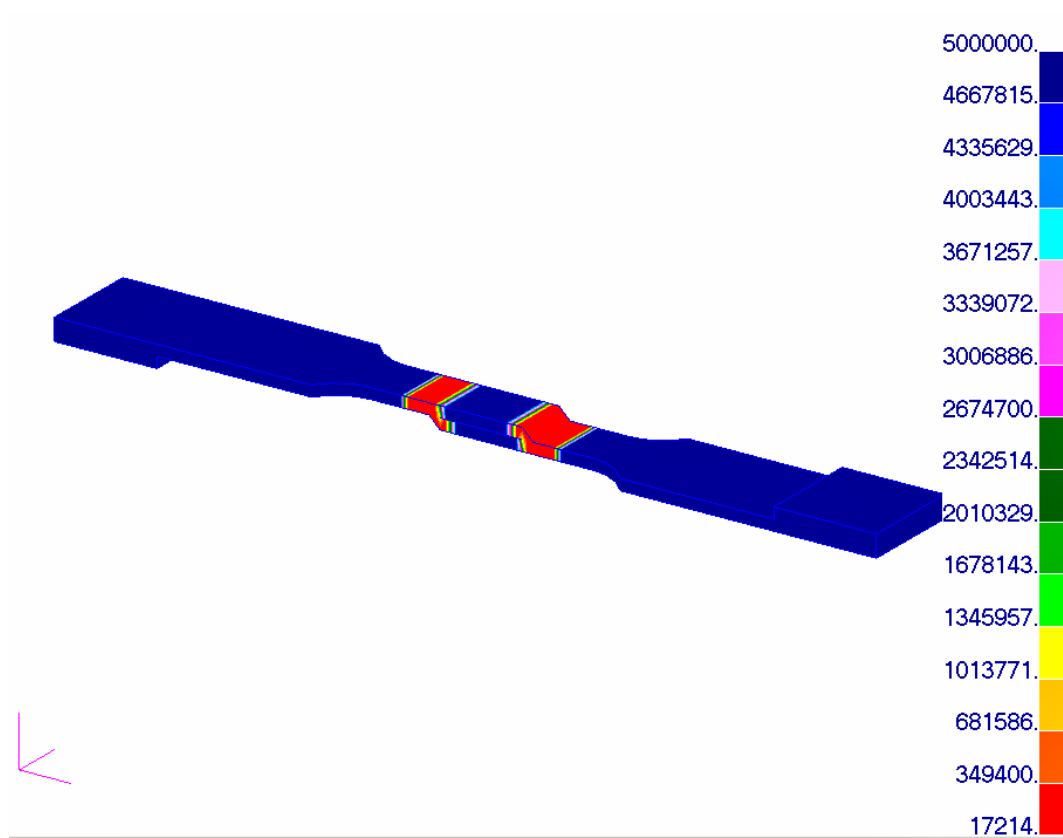


Figura 47



- $F_m = 20 \text{ kn}$, S (amplitud) = 10 kn

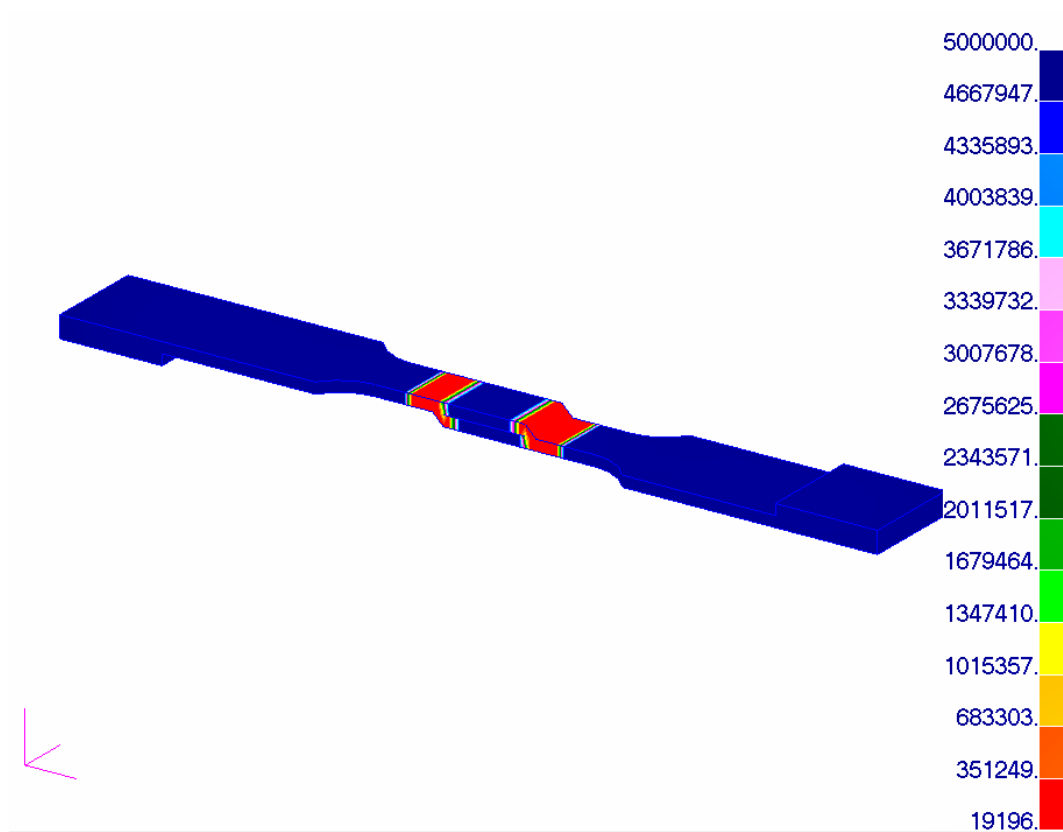


Figura 48



Modelo volumétrico cordón redondo

- $F_m = 20 \text{ kn}$, S (amplitud) = 15 kn

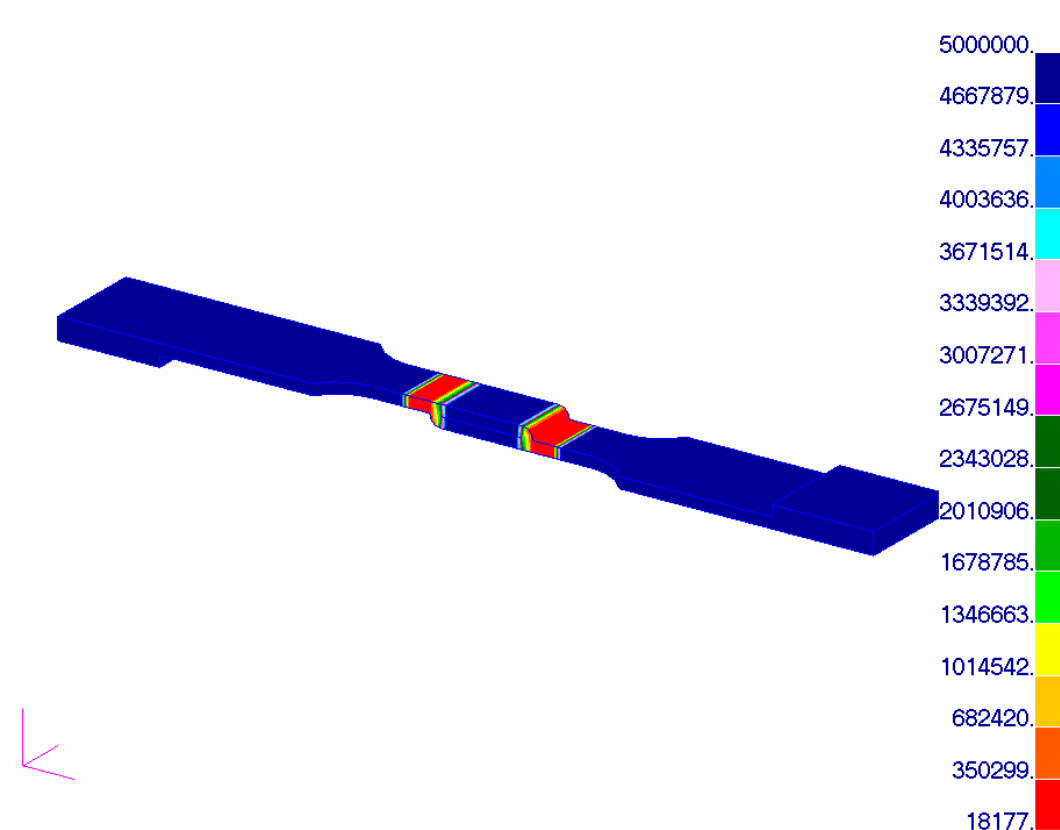


Figura 49



- $F_m = 20 \text{ kn}$, $S \text{ (amplitud)} = 12,5 \text{ kn}$

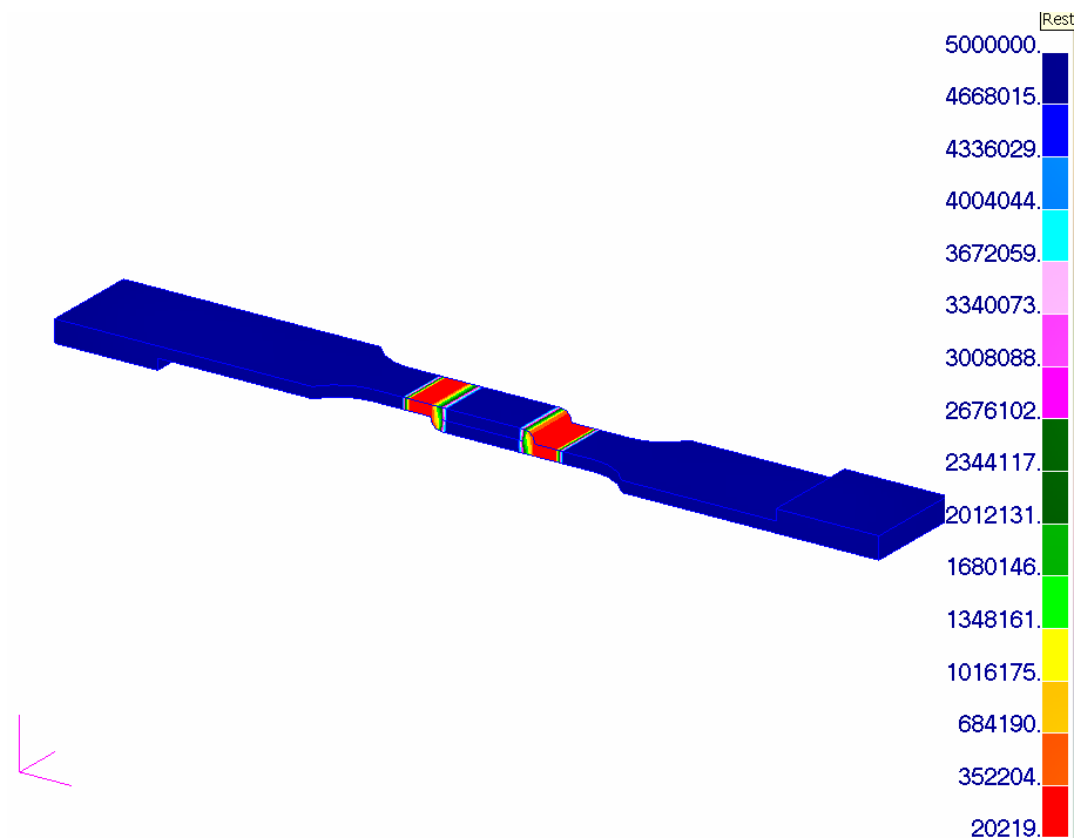


Figura 50



- $F_m = 20 \text{ kn}$, S (amplitud) = 10 kn

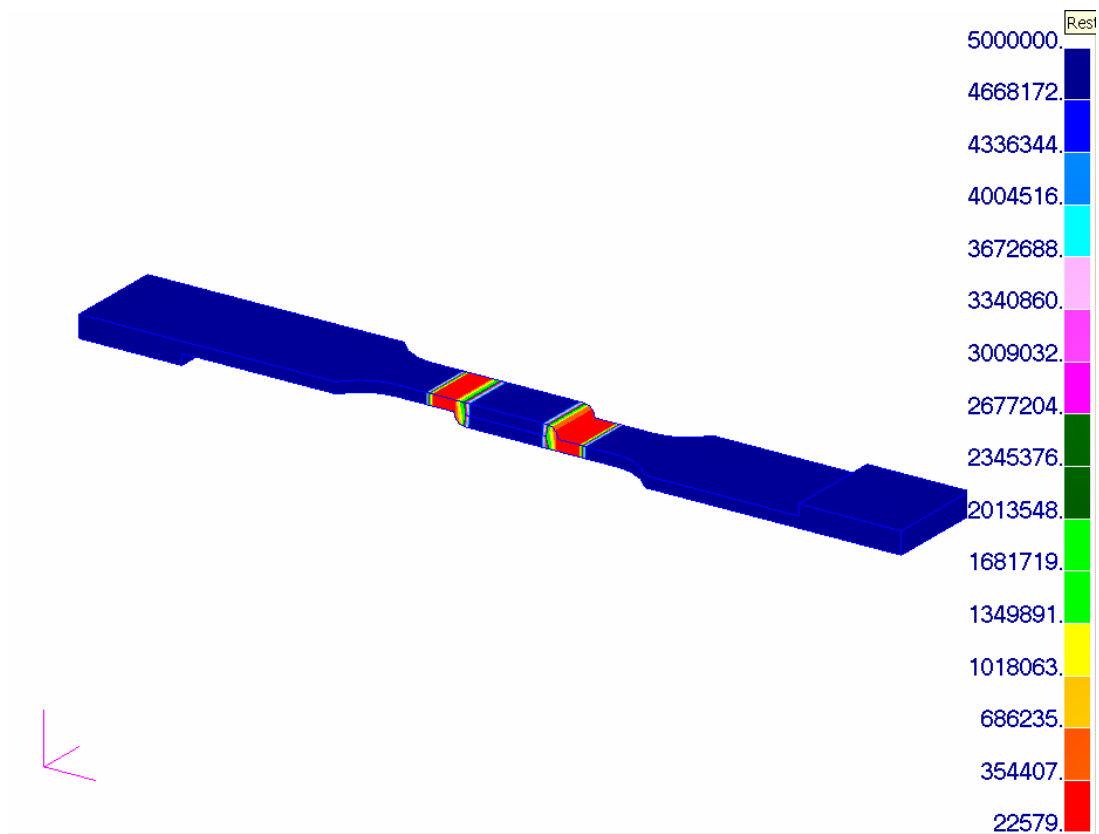


Figura 51

La tabla 11 muestra los resultados de vida a fatiga según el método del IIW para los diferentes criterios calculados (el método de correlación de cuatro puntos, el método de correlación de cuatro puntos modificado, el método de la pendiente universal, el método Mitchell, el método de la pendiente universal modificado y la ley uniforme del material). Todos ellos para una carga media (F_m) de 20 KN y las amplitudes (S) de 15 KN, 12,5 KN y 10 KN.



			Criterio					
			Correl. 4 puntos	Correl. 4 puntos mod.	Ley uniforme	Mitchell	Pend. universal	Pend. universal mod.
Nº Ciclos	Modelo placa	S = 10 KN	20983	21491	21461	21015	22373	21575
		S = 12,5 KN	10665	10995	10980	10751	11445	11037
		S = 15 KN	6225	6395	6387	6253	6657	6420
	Modelo volum. Cordón training.	S = 10 KN	19180	19229	19228	19196	19279	19230
		S = 12,5 KN	17205	17244	17243	17214	17288	17245
		S = 15 KN	15504	15524	15523	15497	15564	15525
	Modelo volum. Cordón redondo	S = 10 KN	22543	22602	22601	22579	22650	22608
		S = 12,5 KN	20197	20240	20239	20219	20283	20245
		S = 15 KN	18175	18196	18195	18177	18234	18201

Tabla 11

Podemos observar que los resultados son similares en función del criterio a seguir. El modelo tipo placa experimenta una importante variación en el número de ciclos conforme disminuimos la amplitud. Sin embargo, no es así para los modelos volumétricos que lógicamente aumenta su número de ciclos al disminuir la amplitud de la carga pero de manera más atenuada.



4.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LA VIDA A FATIGA

Los valores obtenidos en la simulación según el método de ZMB no son válidos para nuestro diseño, ya que este método no tiene en cuenta el factor de la soldadura.

Los obtenidos con el modelo tipo placa según el método del IIW, independientemente del criterio utilizado, son muy próximos a los obtenidos en el ensayo a fatiga.

Los modelos volumétricos se aproximan para la mínima amplitud, mientras que el error aumenta para las amplitudes de 12,5 y 15 KN.



5 CONCLUSIONES



5.1 CONCLUSIONES

Hemos comprobado en la caracterización del material que la zona próxima al cordón de soldadura es la más afectada, obteniendo los valores de resistencia más bajos.

A pesar de ello, la soldadura es un método de unión muy utilizado, pero debilita considerablemente el material, por tanto este factor es necesario tenerlo en cuenta a la hora del diseño. Los resultados obtenidos por el método que no tiene en cuenta la soldadura, ZMB, no se aproximan lo más mínimo a los obtenidos en el ensayo a fatiga en el laboratorio.

Las simulaciones realizadas por el método del IIW nos han dado unos resultados fiables, debido a que nuestro modelo presentaba una unión soldada.



6 BIBLIOGRAFÍA



6.1 BIBLIOGRAFÍA

“Componentes de Máquinas. Fatiga de alto ciclo” Antonio José Blesa, Eugenio Giner, Juan José Ródenas, José Enrique Tarancón, Francisco José Valero. Ed. Pearson, Prentice may.

“Tecnología del acero” José María Laceras Esteban.

“Introducción a la ciencia y a la ingeniería de los materiales” William D. Callister Jr. Ed. Reverté.

“Tecnología de materiales” José Antonio Puértolas, Ricardo Ríos, Miguel Castro.

“Ciencia de los materiales. Teoría-ensayos-tratamientos” P. Coca Rebolledo, J. Rosique Jiménez. Ed. Pirámide.

Referencias web:

www.itesa.es

www.metalasa.es

www.sciencedirect.com