

## **8. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS**

En el presente capítulo, se muestran los resultados obtenidos al aplicar los métodos descritos en capítulos anteriores a una unión a tope, cuya geometría está descrita a continuación, mediante análisis de elementos finitos (AEF). Se estudiará el efecto que produce un posible desalineamiento angular de la unión sobre el valor de la TPC obtenido. La aparición de estos desalineamientos angulares es muy frecuente debido a las distorsiones residuales que típicamente aparecen en uniones soldadas. Para llevar a cabo los AEF, se usó el programa ANSYS.

### **8.1 Material: Inconel 718**

Las aleaciones Inconel son superaleaciones base níquel-cromo, que cubren un amplio espectro de composiciones y de propiedades. La combinación de níquel y cromo en estas aleaciones provee resistencia tanto a soluciones corrosivas reductoras como oxidantes. El níquel y el cromo actúan también en conjunto para resistir oxidación, carburización y otras formas de deterioro a altas temperaturas. Estas aleaciones no se tornan quebradizas a temperaturas criogénicas, poseen buena resistencia a la tracción y a la fatiga a temperaturas moderadas, y presentan excelentes propiedades de resistencia al flujo y rotura a altas temperaturas. En la mayoría de las aleaciones Inconel las características básicas del sistema níquel-cromo son aumentadas mediante la adición de otros elementos. Algunas de las aleaciones aumentan su resistencia mediante la adición de aluminio, titanio y niobio (columbio). Otras contienen cobalto, cobre, molibdeno o tungsteno para mejorar atributos específicos de resistencia mecánica o a la corrosión. Las aleaciones también contienen hierro en cantidades que varían desde 1% a más del 20%. En la mayoría de los casos los efectos dominantes en las propiedades se deben a los aleantes, salvo el hierro. En general, las aplicaciones de estas aleaciones son muy amplias: recipientes para tratamiento térmico, turbinas, aviación, plantas nucleares generadoras de energía, etc.

Más concretamente, el Inconel 718 es una aleación relativamente reciente ya que su invención data de 1959 y su uso industrial empieza alrededor de 1965. Es una aleación endurecible por precipitación, que contiene una cantidad significativa de hierro, niobio y molibdeno y menores cantidades de aluminio y titanio. Como todas las aleaciones Inconel, combina resistencia a la corrosión y alta resistencia mecánica (resistencia a la rotura y límite elástico) hasta 700° C en su caso, junto con una excelente soldabilidad y resistencia post-soldadura. Su resistencia a los choques (incluso a -40° C) y su tenacidad son bastante buenas así como su resistencia a la corrosión en caliente. La fabricación de piezas en este material es complicada debido a las dificultades que presenta su mecanizado. Esto obliga a emplear técnicas de conformado del tipo "near-net shape forming". Estas técnicas requieren un perfecto conocimiento del comportamiento a deformación en caliente del material. Como ya se ha dicho, su soldabilidad es excelente, sobre todo cuando se compara con otras superaleaciones de base níquel endurecidas con Aluminio y Titanio ya que a temperaturas elevadas, el níquel y sus aleaciones son susceptibles a la fragilización por el azufre, fósforo, plomo, y otras sustancias de bajo punto de fusión. Se utiliza en turbinas de gas, motores de cohetes, aeronaves, bombas y herramienta, en la fabricación de componentes de turborreactores (discos de turbinas y ejes de piezas obtenidas por forja y después, a menudo soldadas). La aleación Inconel 718 también se emplea para matrices de extrusión y contenedores en aquellos casos en los que los aceros no presentan la necesaria resistencia a la temperatura de trabajo.

## Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos

### 8.1.a) Propiedades físicas:

Densidad: 8,19 g/cm<sup>3</sup>

Calor Específico: 435 J/Kg-°C

Punto de Fusión: 1260-1336°C

### 8.1.b) Composición química aproximada (%)

Níquel Ni	Cromo Cr	Molibdeno Mo	Niobio Nb (+Ta)	Manganeso Mn	Titanio Ti	Hierro Fe
50.0-55.0	17.0-21.0	2.80-3.30	4.75-5.50	0.35 máx	0.65-1.15	Resto (17 aprox)
Silicio Si	Fósforo P	Azufre S	Carbono C	Aluminio Al	Cobalto Co	
0.35 máx.	0.015 máx.	0.015 máx	0.08 máx	0.20-0.80	1.0 máx	

### 8.1.c) Propiedades mecánicas

Temp. (°C)	Módulo elást. (MPa)	Coef. de Poisson	Coef. de dilat. Térmica (1/K)	Límite elást. (MPa)
25	$2 \cdot 10^5$	0.284	$1.375 \cdot 10^{-5}$	871
100	$2 \cdot 10^5$	0.284	$1.375 \cdot 10^{-5}$	800
200	$1.99 \cdot 10^5$	0.284	$1.380 \cdot 10^{-5}$	
300	$1.97 \cdot 10^5$	0.284	$1.440 \cdot 10^{-5}$	775
400	$1.94 \cdot 10^5$	0.284	$1.520 \cdot 10^{-5}$	
500	$1.89 \cdot 10^5$	0.284	$1.620 \cdot 10^{-5}$	
600	$1.81 \cdot 10^5$	0.284	$1.740 \cdot 10^{-5}$	
700	$1.69 \cdot 10^5$	0.284	$1.870 \cdot 10^{-5}$	
800	$1.51 \cdot 10^5$	0.284	$1.990 \cdot 10^{-5}$	625
900	$1.27 \cdot 10^5$	0.284	$2.100 \cdot 10^{-5}$	
1000	$0.928 \cdot 10^5$	0.284	$2.160 \cdot 10^{-5}$	120
1100	$0.928 \cdot 10^5$	0.284	$2.160 \cdot 10^{-5}$	
1215	$0.928 \cdot 10^5$	0.284	$2.160 \cdot 10^{-5}$	80

Su dureza Rockwell es de 46 Rc.

## 8.2 Geometría

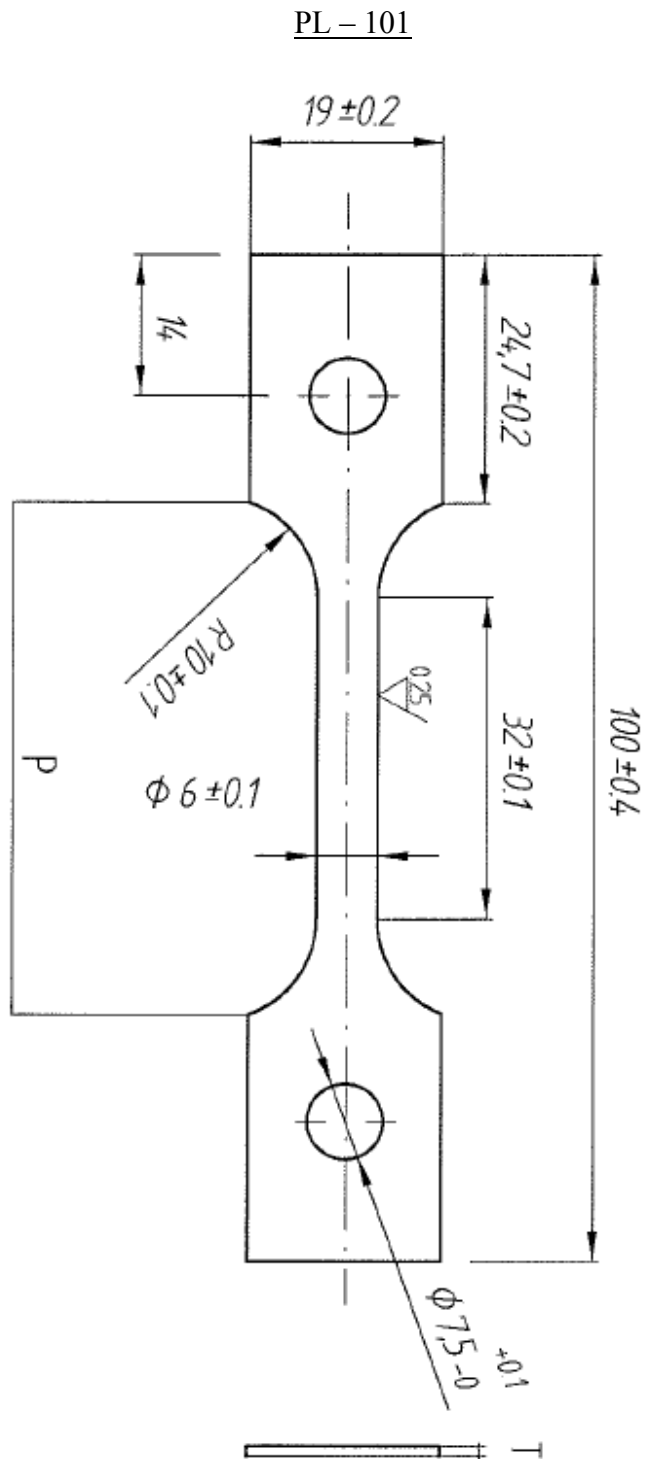


Fig. 8.2.1. Geometría de la probeta PL-101

Se trata de una unión a tope, de pequeño espesor ( $T=2.5$  mm), denominada PL-101 y fabricada de Inconel 718. En la figura 8.2.1 no se muestra el cordón de soldadura que hay en el centro de las probetas reales, se trata de una soldadura TIG cuyo material de aporte es también Inconel 718.

Para determinar la geometría del cordón de soldadura y así realizar un modelo con la geometría real, se escoge una probeta con unas dimensiones del cordón

representativas del conjunto de probetas PL – 101 disponibles y, tras fotografiar el cordón observado al microscopio (Fig. 8.2.2), se midió directamente sobre la fotografía obteniéndose las siguientes dimensiones:



Fig.8.2.2. Fotografía del perfil de una de las probetas PL-101, detalle del cordón de soldadura

Parte superior del cordón:

Sobreespesor = 1 mm

Longitud = 7 mm

Parte inferior del cordón:

Sobreespesor = 0.1 mm

Longitud = 6mm

### **8.3 Modelo, mallas de elementos finitos usadas y objetivos**

Debido a los dos planos de simetría que tiene la geometría de la probeta bajo estudio (ver Fig.8.4.1 en apartado 8.4), los modelos usados para los análisis de elementos finitos en 3-D y 2-D (Fig.8.3.1.a y Fig.8.3.1.b) simulan únicamente 1/4 de la misma, cuyas dimensiones se han especificado en el apartado anterior (8.3). Cabe mencionar que en el modelo en 2-D no se modelará la geometría del cordón de soldadura.

a)

b)

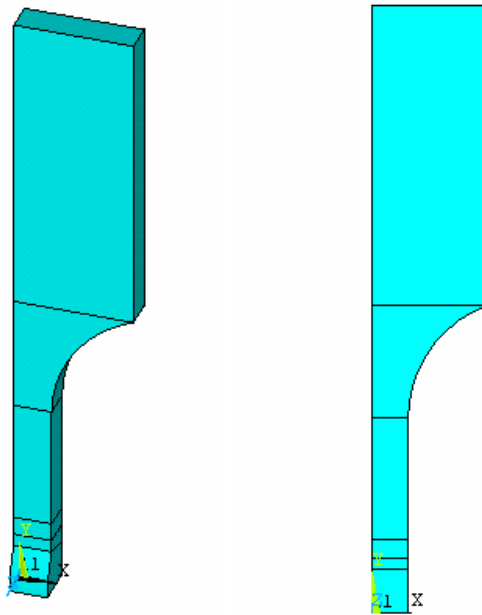


Fig.8.3.1 Modelos: a) en 3D, elementos sólidos; b) en 2D, elementos de placa (ANSYS)

Se realizarán análisis de elementos finitos usando 7 mallas: 4 mallas diferentes sobre modelos en 3-D (elementos tipo solid) y 3 mallas diferentes en modelos planos (2-D) (elementos tipo shell).

El procedimiento general será aplicar sobre la geometría descrita los diferentes métodos de determinación de la tensión de punto caliente que se han desarrollado en los capítulos anteriores. El objetivo principal es ver el efecto que produce un posible desalineamiento angular al realizar la soldadura sobre la tensión de punto caliente calculada y, consecuentemente, sobre la vida a fatiga. Para ello se harán con cada mallado varios modelos con diferentes inclinaciones (Fig.8.3.2). Tras observar los resultados se podrán sacar algunas conclusiones sobre la conveniencia de cada uno de los métodos y la aplicabilidad a esta unión en concreto ya que las uniones a tope y, adicionalmente, de pequeño espesor, están poco estudiadas en la bibliografía existente.

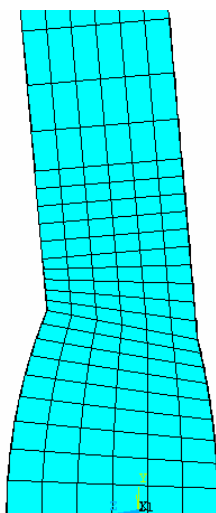


Fig.8.3.2 Perfil de modelo sólido con una desalineación angular de 5°. (ANSYS)

La geometría del modelo ha sido creada paramétricamente mediante comandos de ANSYS, es decir, sería posible generar fácilmente cambios en la geometría y mallado del modelo, pudiendo estudiar otros casos, por ejemplo un mayor espesor u otras dimensiones del cordón de soldadura. También puede observarse en las figuras 8.3.1 y 8.3.2 la dirección usada en los modelos de los ejes de coordenadas. Las mallas usadas se describen en los apartados siguientes.

### **8.3.1 Mallas sobre modelos en 3-D**

Mediante el uso de modelos en 3-D se pretende reproducir la probeta de la manera más fiel posible a su geometría real. Se observa que el tipo de punto caliente que tenemos puede clasificarse dentro del tipo 'a' (ver apartado 3.2). En los siguientes apartados (8.3.1 a - d) se muestran las diferentes mallas usadas sobre modelos 3-D, así como el tipo de elemento usado en cada una, denominados según el programa ANSYS.

#### **8.3.1 a) Malla Fina. Tipo de elemento: Solid45**

Tamaño de elementos en el borde de la soldadura:  $\frac{6}{2 \cdot 18} \times \frac{0.4t}{5} \times \frac{t}{20}$  (mm)

El significado de estas dimensiones, que también se expresarán de la misma forma en los siguientes apartados, es el siguiente:

$\frac{6}{2 \cdot 18}$  : El ancho total de la probeta, 6 mm, dividido entre 2 debido al eje de simetría central, se divide en 18 elementos en la dirección del eje x.

$\frac{0.4t}{5}$  : Hasta el primer punto de evaluación de la tensión superficial, situado a  $0.4t = 1\text{mm}$  del borde de la soldadura, se crean 5 elementos en la dirección del eje y.

$\frac{t}{20}$  : Se crean 20 elementos, en dirección del eje z, para cubrir el espesor  $t = 2.5\text{ mm}$  de la probeta.

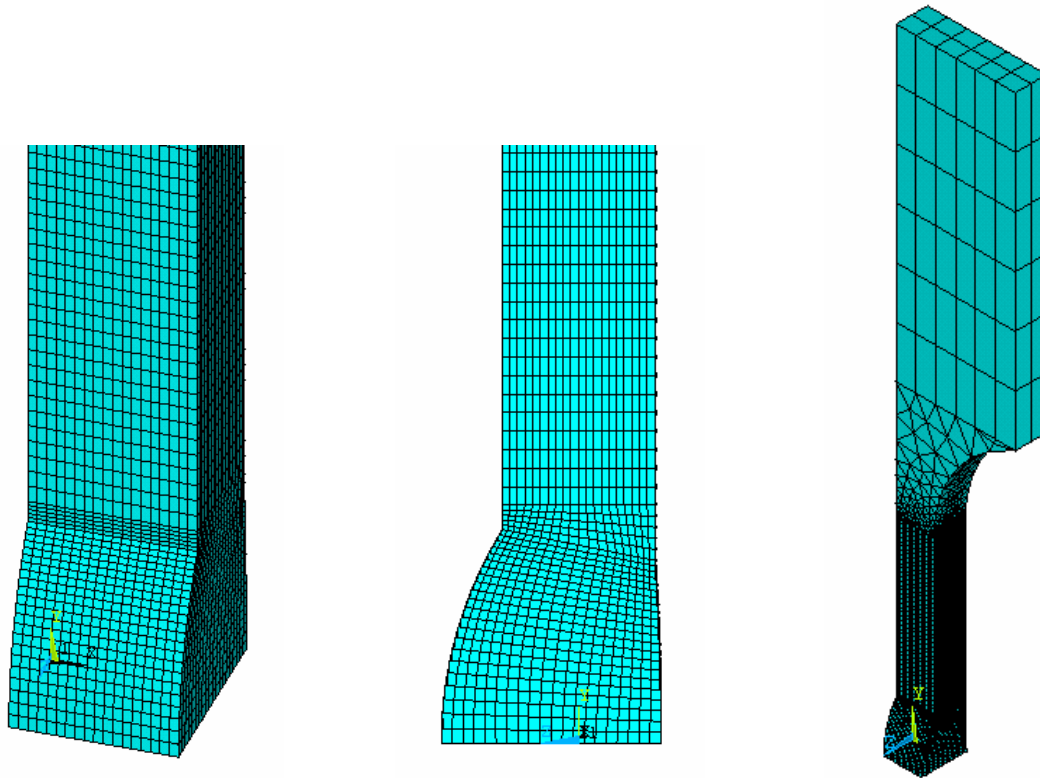


Fig.8.3.1.1 Vistas del cordón de soldadura y el modelo completo. Malla fina de elementos Solid45 (ANSYS)

Solid45 (Fig 8.3.1.2) es un elemento sólido definido por 8 nodos con 3 grados de libertad en cada uno: desplazamientos en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$  nodales. Ésta será la malla con el mayor número de elementos que se use (en total, 29998 elementos). Desde el borde de la soldadura hasta una distancia de  $0.4t$  se realiza un mayor refinado de la malla ya que es la zona más cercana al borde de la soldadura. Este mallado se usará para ver la influencia del tipo de elemento en los resultados en comparación con la malla fina de elementos Solid186, descrita en el siguiente apartado, que es la recomendada por Niemi (2006).

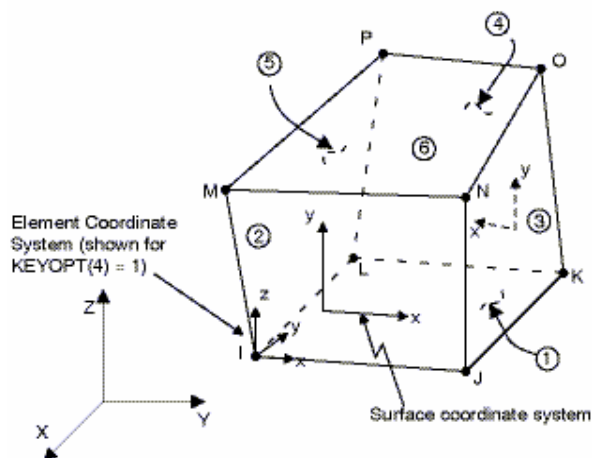


Fig 8.3.1.2 – Elemento de 8 nodos Solid45 (ANSYS)

**8.3.1 b) Malla Fina. Tipo de elemento: Solid186**

Tamaño de elementos en el borde de la soldadura:  $\frac{6}{2 \cdot 6} \times \frac{0.4t}{5} \times \frac{t}{6}$  (mm)

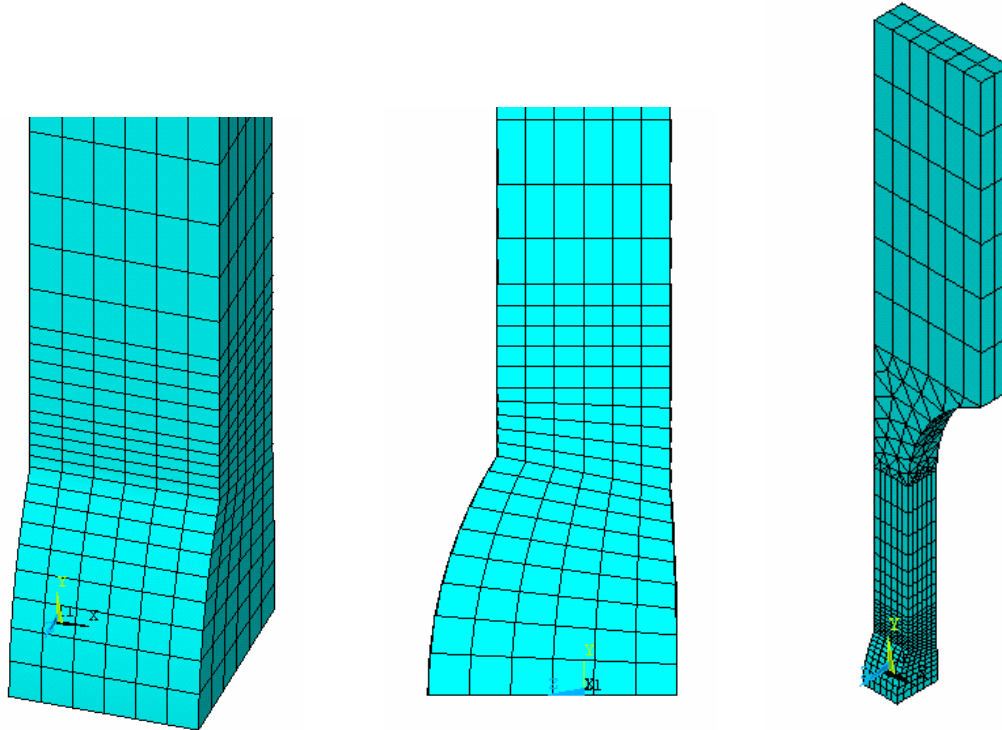


Fig.8.3.1.3. Vistas del cordón de soldadura y el modelo completo. Malla fina de elementos Solid186 (ANSYS)

Solid186 (Fig.8.3.1.4) es un elemento sólido definido por 20 nodos con 3 grados de libertad en cada uno: desplazamientos en las direcciones x, y, z nodales. A diferencia del Solid45, permite desplazamientos cuadráticos. El elemento Solid186 será el que se use en el resto de modelos sólidos de acuerdo a las recomendaciones dadas por Niemi (2006) (ver apartados 5.2, 5.3, 5.3b y 5.4). Este mallado fino consta de 1534 elementos en total. Se separan dos volúmenes, uno desde el borde de la soldadura hasta 0.4t y otro desde 0.4t hasta 1t, con el fin de poder evaluar las tensiones en los nodos en estas localizaciones clave, según Niemi (2006), la tabla 5.1 y la sección 5.2.

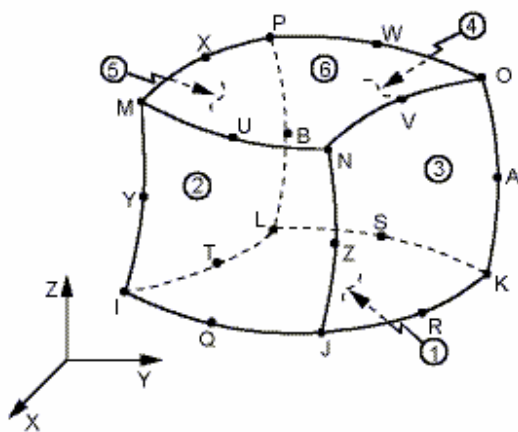


Fig.8.3.1.4 Elemento de 20 nodos Solid186(ANSYS)



**8.3.1 c) Malla Fina Límite. Tipo de elemento: Solid186**

Tamaño de elementos en el borde de la soldadura:  $\frac{6}{2 \cdot 1} \times \frac{0.4t}{1} \times \frac{t}{1}$  (mm)

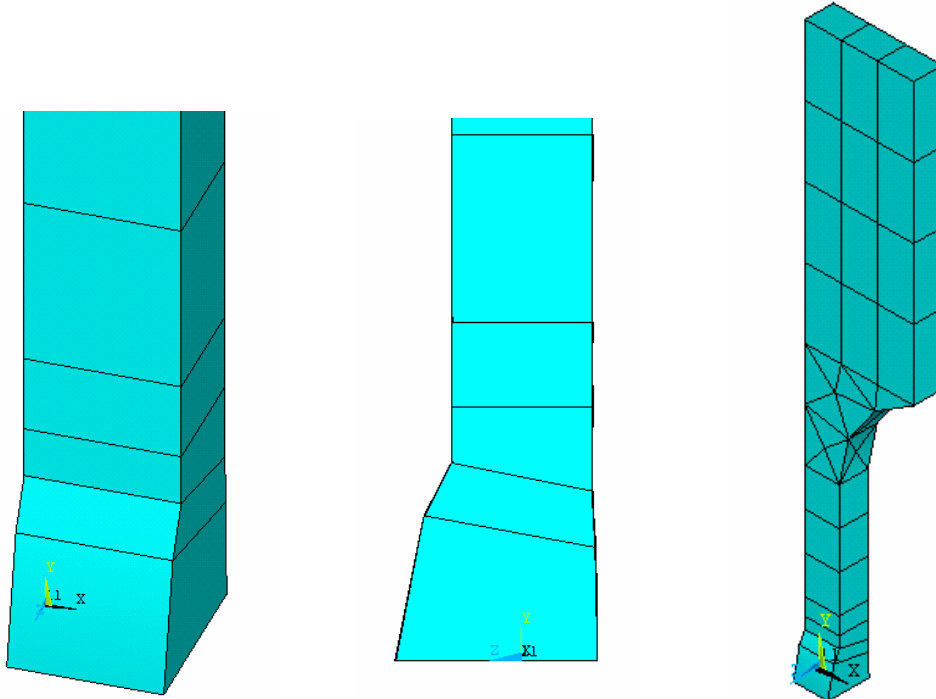


Fig.8.3.1.5. Vistas del cordón de soldadura y el modelo completo. Malla fina límite de elementos Solid186 (ANSYS)

En este caso, también se hace la separación de volúmenes en 0.4t y 1t pero esta vez se ocupan cada uno con un solo elemento. Esta malla tiene los elementos de mayor tamaño que aún pueden clasificarse como malla fina según Niemi (2006) (ver apartados 5.2, 5.3, 5.3b y 5.4), debido a esto se le denomina malla fina límite y tiene en total 70 elementos.

**8.3.1 d) Malla Gruesa. Tipo de elemento: Solid186**

Tamaño de elementos en el borde de la soldadura:  $\frac{6}{2 \cdot 1} \times \frac{0.5t}{1} \times \frac{t}{1}$  (mm)

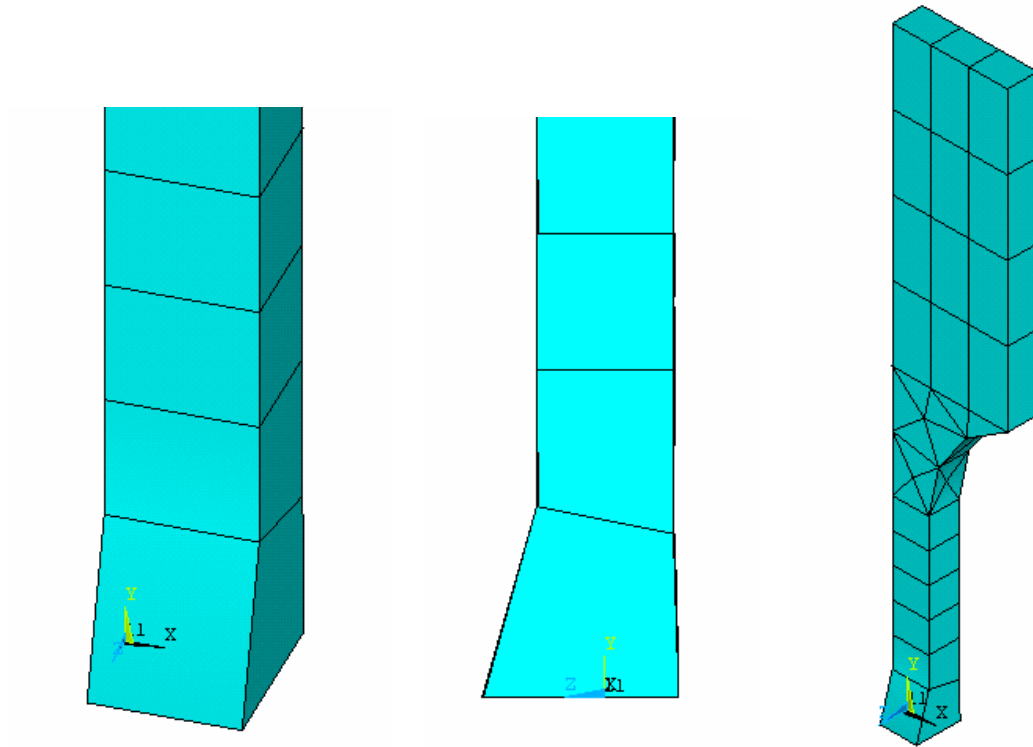


Fig.8.3.1.6. Vistas del cordón de soldadura y el modelo completo. Malla gruesa de elementos Solid186 (ANSYS)

La separación de volúmenes que se realiza aquí es en  $0.5t$  y  $1.5t$ , ocupando cada uno con un solo elemento. Con este tamaño de elemento se entra en la categoría de malla gruesa según Niemi (2006), se tienen 69 elementos en total. Los puntos usados para la extrapolación de tensiones superficiales cambian y las tensiones deben evaluarse en los nodos intermedios de las caras de los elementos (ver apartados 5.2, 5.3 y 5.3b). El cordón de soldadura se modela mediante un solo elemento.

### 8.3.2 Mallas sobre modelos en 2-D

El caso en 2-D se modela mediante elementos planos de 8 nodos tipo Shell93 (Fig. 8.3.2.1) según las recomendaciones dadas por Niemi (2006) (ver apartados 5.2, 5.3 y 5.3a). Estos elementos tienen 6 grados de libertad en cada nodo: desplazamientos en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$  nodales y giros alrededor de los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  nodales. También permiten deformaciones cuadráticas. Se pretende comprobar la validez de un modelo más simplificado, de menor número de elementos y por lo tanto más fácil de modelar y de menor tiempo de cálculo que en el caso en 3-D. Como se comenta también en los apartados 5.3 a), no se modela el cordón de soldadura, por lo tanto no tiene sentido realizar el análisis de elementos finitos si la desalineación angular es  $0^\circ$ .

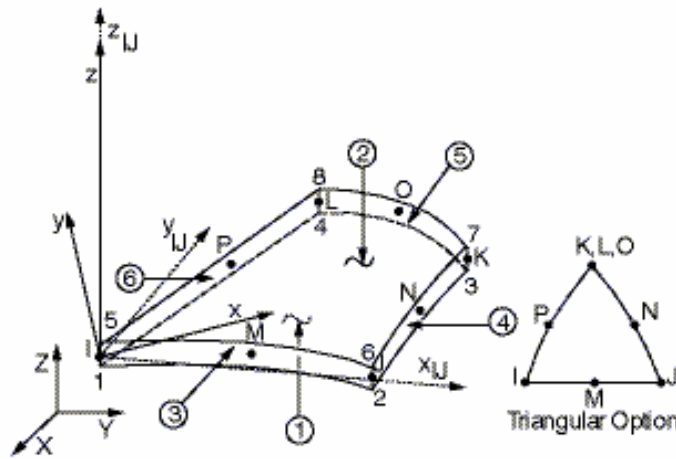


Fig.8.3.2.1. Elemento plano de 8 nodos Shell93 (ANSYS)

En cuanto a la elección del tamaño de los elementos en cada caso pueden hacerse comentarios análogos a los realizados para los modelos en 3-D.

**8.3.2 a) Malla Fina. Tipo de elemento: Shell93**

Tamaño de elementos en el borde de la soldadura:  $\frac{6}{2 \cdot 6} \times \frac{0.4t}{5}$  (mm)

nº de elementos: 252

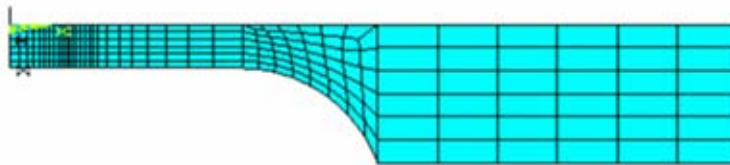


Fig.8.3.2.2. Modelo plano con malla fina de elementos Shell93 (ANSYS)

**8.3.2 b) Malla Fina Límite. Tipo de elemento: Shell93**

Tamaño de elementos en el borde de la soldadura:  $\frac{6}{2 \cdot 1} \times \frac{0.4t}{1}$  (mm)

nº de elementos: 28

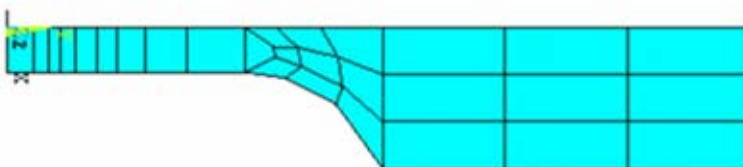


Fig.8.3.2.3. Modelo plano con malla fina límite de elementos Shell93 (ANSYS)

### 8.3.2 c) Malla Gruesa. Tipo de elemento: Shell93

Tamaño de elementos en el borde de la soldadura:  $\frac{6}{2 \cdot 1} \times \frac{0.5t}{1}$  (mm)

nº de elementos: 25

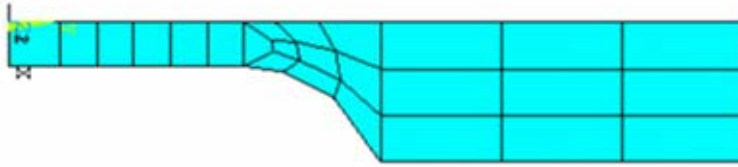


Fig.8.3.2.4. Modelo plano con malla gruesa de elementos Shell93 (ANSYS)

### 8.4 Condiciones de contorno

Se impondrán en el modelo las condiciones de contorno en desplazamientos correspondientes a los dos planos de simetría que tiene la geometría de la probeta (Fig.8.4.1). Se aplica en la superficie superior una tracción de 100 MPa que será en la dirección del eje y en todos los casos, independientemente de la inclinación que se tenga debida al desalineamiento angular (Fig.8.4.2 b). Para restringir el grado de libertad en desplazamiento que aún queda, se impide el desplazamiento en la dirección z sobre los nodos de la línea central de la superficie superior (Fig.8.4.2 a).

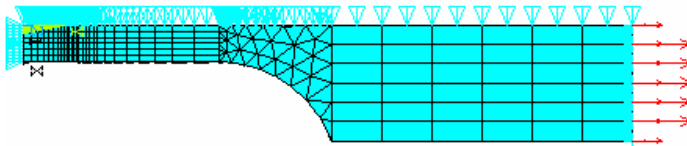


Fig.8.4.1 Vista de 1/4 de la probeta incluyendo las condiciones de contorno en desplazamientos correspondientes a los planos de simetría.

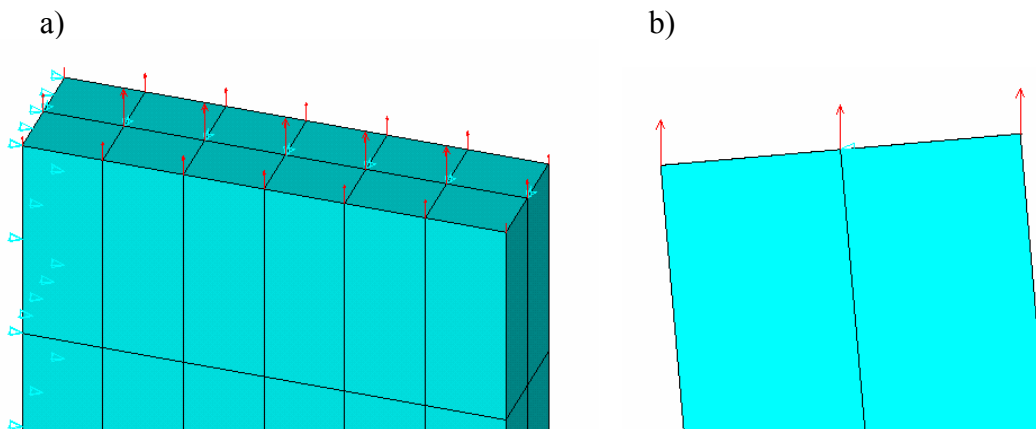


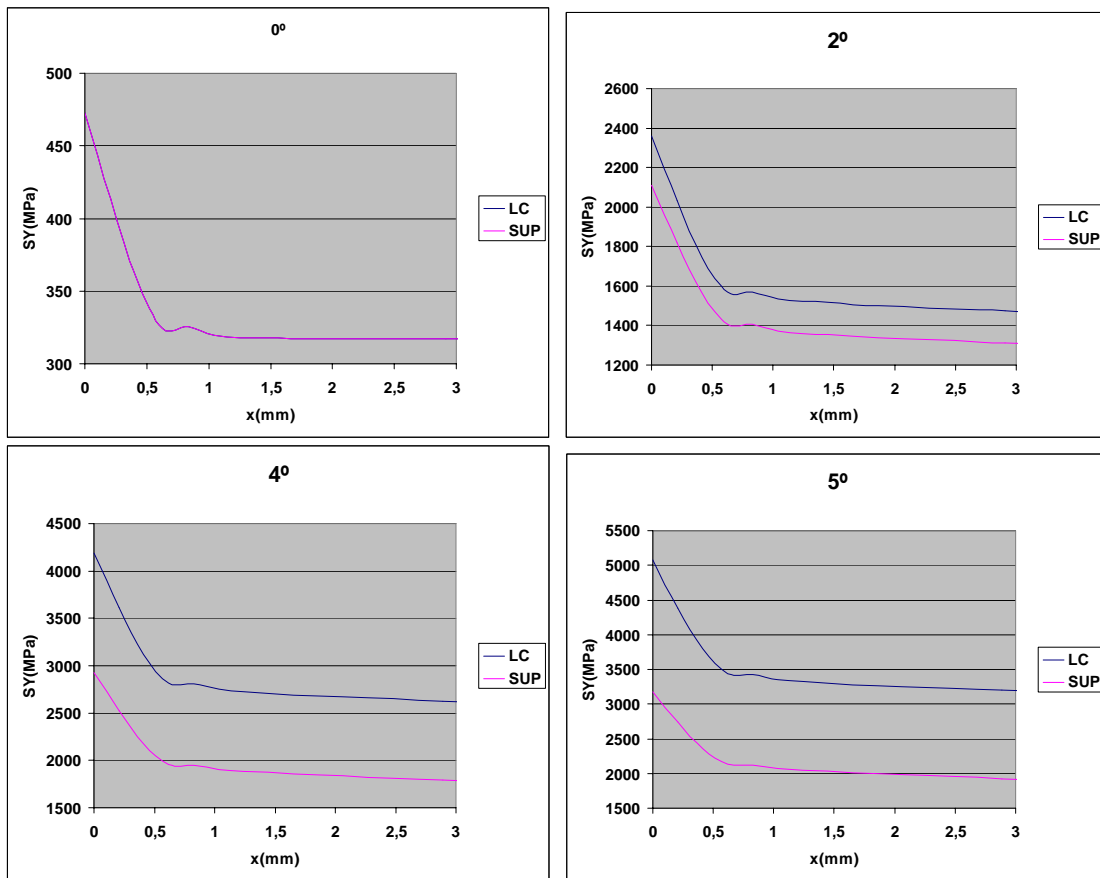
Fig.8.4.2. a) Vista de las condiciones de contorno aplicadas sobre la superficie superior y b) fuerzas en los nodos en dirección del eje global y en una probeta con desalineación angular de 5°.

## Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos

Para la aplicación de las condiciones de contorno se hicieron unos análisis comparativos, considerando diferentes desalineamientos angulares, con el fin de reproducir dos posibles condiciones de agarre de la probeta a las mordazas a la hora de realizar el ensayo de fatiga a tracción.

En las siguientes figuras se muestran los valores de tensión  $\sigma_y$  (denotados en el eje de ordenadas como SY) a lo largo de un camino en la dirección del eje y del modelo que recorre el centro de la probeta (eje de simetría) partiendo del borde de la soldadura (e este camino se la llamará ELS centro, ver apartado 8.5). El análisis se ha llevado a cabo usando la malla fina con elementos Solid45 descrita en 8.3.1 a). Las dos condiciones de contorno comparadas son:

- Impedir el desplazamiento en la dirección z sobre los nodos de la línea central de la superficie superior (denotado en gráficas como LC). Esto se conseguiría mediante un útil ajustado a las mordazas que se adaptase a la inclinación de la probeta según su desalineamiento y deformación, de esta manera se permitiría el giro y no se introduciría momento de empotramiento.
- Impedir los desplazamientos en la dirección z y todas las rotaciones sobre toda la superficie superior (denotado en gráficas como SUP). Esto simularía un agarre normal de las mordazas, que no permite el giro e introduce un momento de empotramiento.



Grupo de gráficas 8.4. Comparación entre condiciones de contorno

Puede observarse en el grupo de gráficas 8.4 cómo mediante la condición de contorno que se ha escogido para realizar el resto de los análisis (condición de contorno a y LC en gráficas) se experimenta un mayor incremento de tensiones al aumentar el desalineamiento, poniendo de manifiesto de una forma más explícita la concentración de tensiones originada por este defecto. Asimismo, se comprueba cómo ambas condiciones de contorno son equivalentes para un desalineamiento angular de 0°.

### 8.5 Aplicación de los métodos de extrapolación de tensiones superficiales

Se muestran gráficamente, en sucesivos grupos de gráficas, a continuación la distribución de tensiones  $\sigma_y$  superficial para cada malla estudiada partiendo del borde de la soldadura en los casos de mallas 3-D y partiendo del centro de la probeta en los casos de mallas 2-D, ya que no se modela el cordón de soldadura. Para cada malla se han obtenido dos distribuciones de tensión superficial con sus correspondientes rectas de extrapolación: una a lo largo de una línea en el centro de la probeta, es decir, en el eje de simetría y otra a lo largo del borde exterior de la misma.

En la siguiente figura (Fig.8.5.1) pueden verse las líneas a lo largo de las cuales se van a obtener las tensiones  $\sigma_y$ . En primer lugar, a lo largo de los caminos ESLe y ESLc, para las extrapolaciones superficiales lineales en el exterior y en el centro de la probeta respectivamente. En segundo lugar se aplicará el método de Dong obteniendo los valores de tensiones necesarios a lo largo de los caminos a través del espesor a diferentes distancias del PC.

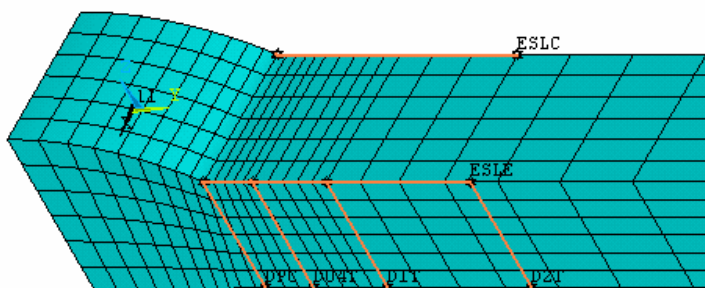


Fig.8.5.1. Diferentes caminos usados para la obtención de tensiones

Las fórmulas de extrapolación utilizadas, tanto para modelos sólidos como planos, son:

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad (5.2) \quad \text{Para mallas finas}$$

$$\sigma_{hs} = 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t} \quad (5.1) \quad \text{Para mallas gruesas}$$

## Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos

Las abreviaturas que se usan en las figuras y tablas son las siguientes:

ESL: Extrapolación superficial lineal

SY:  $\sigma_y$

Fso45: Malla fina de elementos Solid45 (3D)

Fso186: Malla fina de elementos Solid45 (3D)

FLso186: Malla fina límite de elementos Solid45 (3D)

Gso186: Malla gruesa de elementos Solid45 (3D)

Fsh93: Malla fina de elementos Shell93 (2D)

FLsh93: Malla fina límite de elementos Shell93 (2D)

Gsh93: Malla gruesa de elementos Shell93 (2D)

Curvas:

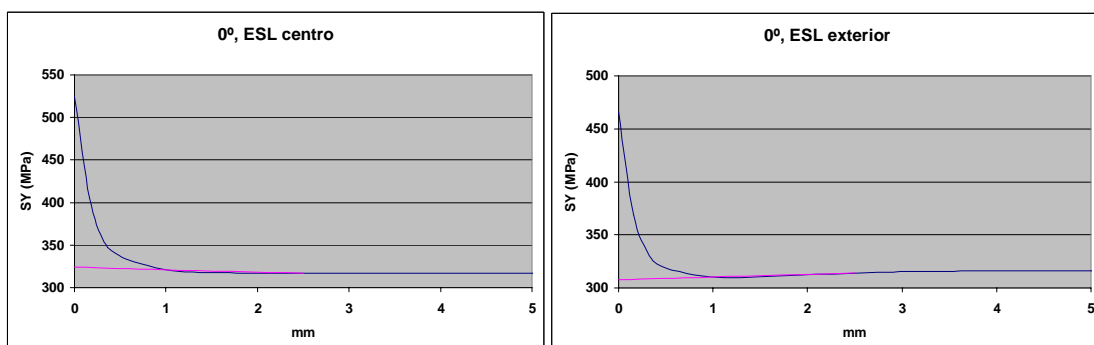


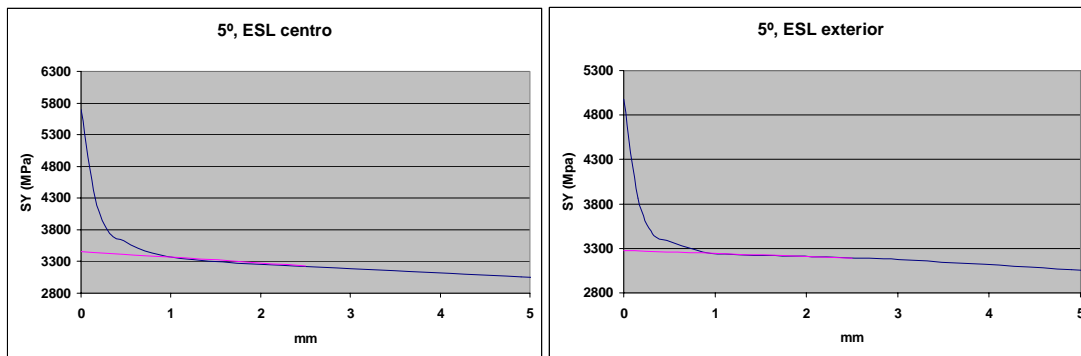
A continuación (apartados 8.5.1 a–d) se muestran las gráficas obtenidas a partir de los diferentes análisis de elementos finitos y sus correspondientes líneas de extrapolación. Más adelante, en el apartado 8.5.1.e) se mostrarán tablas con los resultados numéricos de la tensión de punto caliente  $\sigma_{hs}$  obtenida en cada caso para poder realizar un análisis de los mismos.

### 8.5.1 Modelos sólidos

#### 8.5.1a) Malla Fina (Solid45)

Sólo se realizan los cálculos para los desalineamientos angulares de  $0^\circ$  y  $5^\circ$  (nulo y máximo), pues, como ya se ha comentado, el único objetivo que se busca es la comparación con los resultados obtenidos usando el tipo de elemento Solid186 para corroborar así la recomendación de Niemi (2006) de usar dichos elementos.





Grupo de gráficas 8.5.1.a.  $\sigma_y$ , ESL exterior y centro para malla fina de elementos Solid45 y diferentes desalineaciones angulares

### 8.5.1.b) Malla Fina (Solid186)

El mapa de tensiones  $\sigma_y$  nodales, en el entorno del cordón de soldadura, obtenido de ANSYS tras resolver el modelo con la malla Fso186 se muestra a continuación, donde se puede observar la concentración de tensiones en el borde de la soldadura y la máxima tensión que se alcanza en el centro de la probeta:

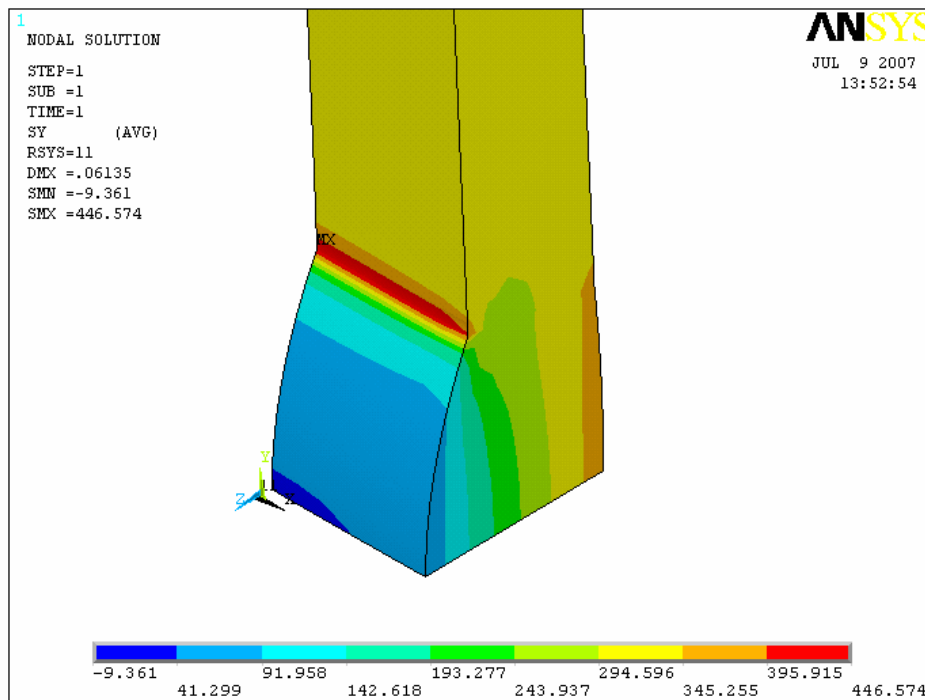
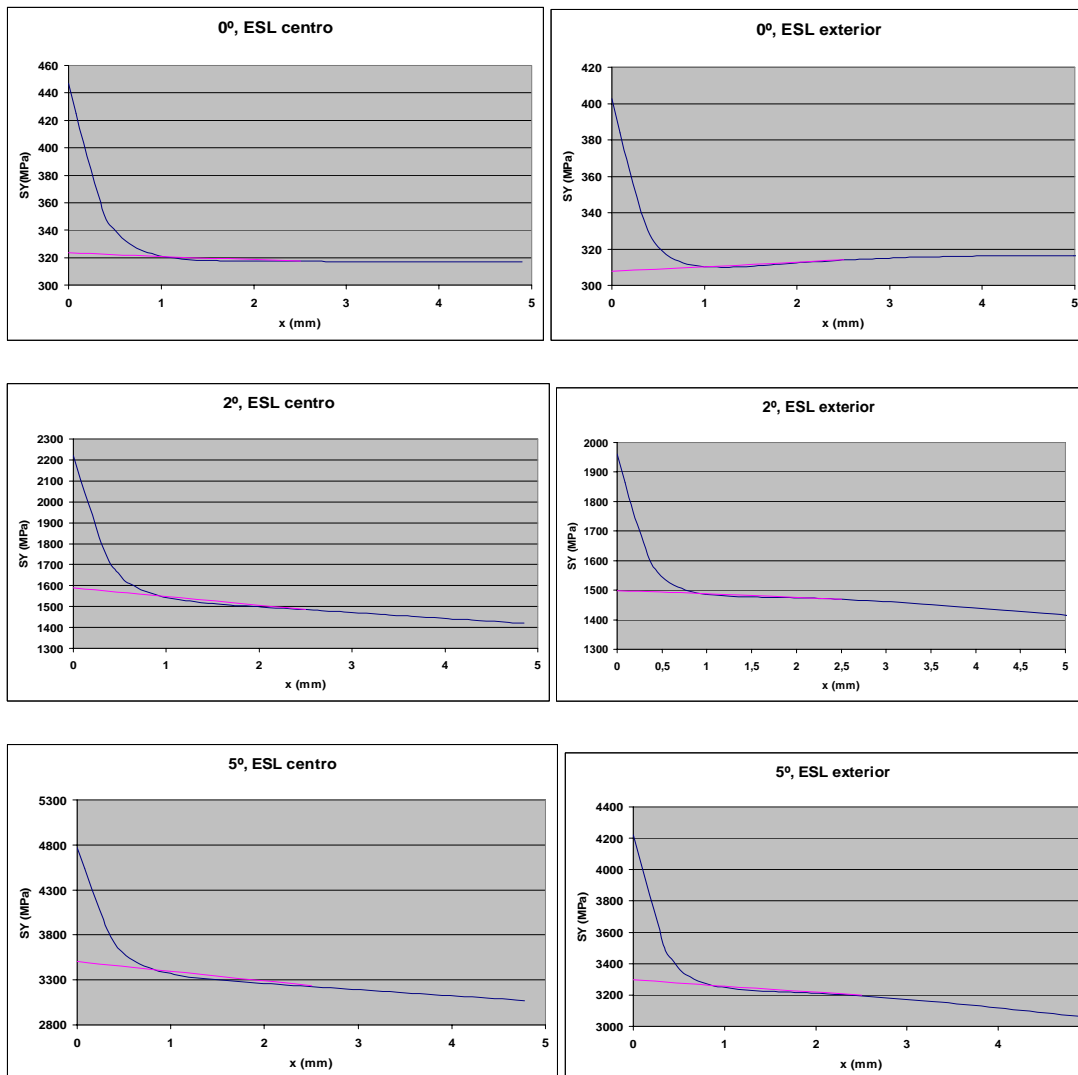


Fig.8.5.1.1 Mapa de tensiones  $\sigma_y$  nodales

Con una malla fina puede recogerse el efecto de entalla en el borde de la soldadura (pico no lineal de tensiones). Esto puede apreciarse en las siguientes distribuciones de tensión (también puede verse para la malla Fso45 en el grupo de gráficas 8.5.1.a). Se observa que, teniendo en cuenta los comentarios realizados en el apartado 6.1, la concentración de tensiones está muy localizada y la ESL de tensiones recoge muy poca del efecto de esta concentración.



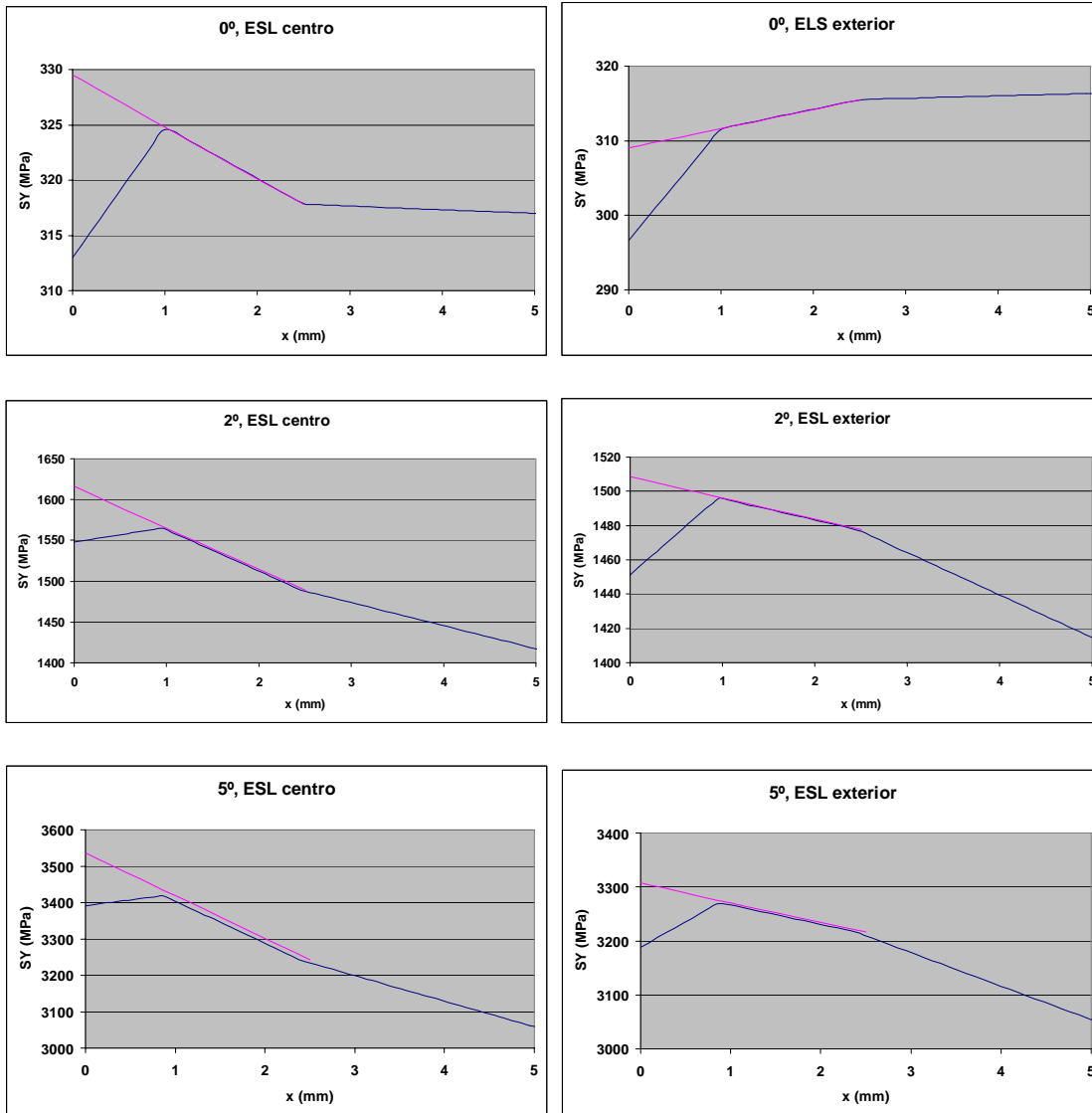


Grupo de gráficas 8.5.1.b.  $\sigma_y$ , ESL exterior y centro para malla fina de elementos Solid186 y diferentes desalineaciones angulares

### 8.5.1.c) Malla Fina Límite (Solid186)

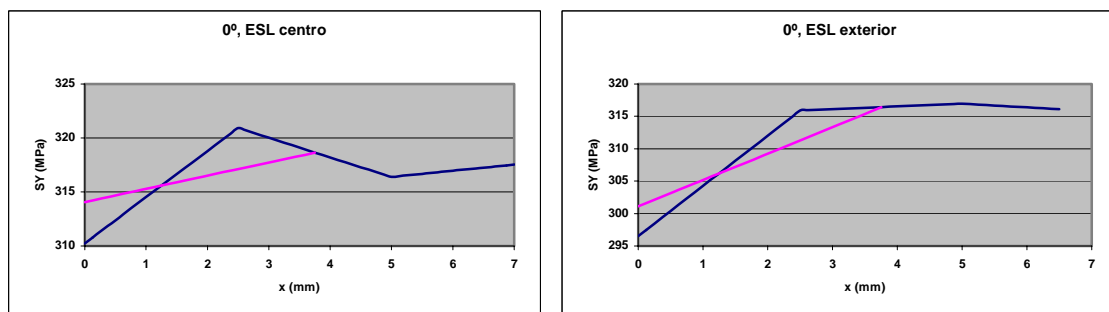
Tanto para las mallas finas límite y las mallas gruesas (8.5.1c y d), en todos los casos de desalineación angular y sin ella, según se comenta en el apartado 5.1, en el postprocesamiento deben seleccionarse sólo aquellos elementos que estén junto al borde de la soldadura y no los que están en el propio cordón de soldadura. De no ser así, el postprocesador muestra la tensión nodal en el borde de la soldadura como una media de los dos elementos localizados a cada lado obteniéndose así un valor de la TPC menor. Esto es importante porque, como se verá en los grupos de gráficas 8.5.1.c y 8.5.1.d, las mallas fina límite y gruesa no son capaces de recoger el pico no lineal de tensiones en el borde de la soldadura. En las mallas finas no es necesario seleccionar sólo los elementos de un lado de el borde de la soldadura pues, con ese tamaño de elementos, la influencia del promediado en el elemento más próximo al borde de la soldadura es muy pequeña.

Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos

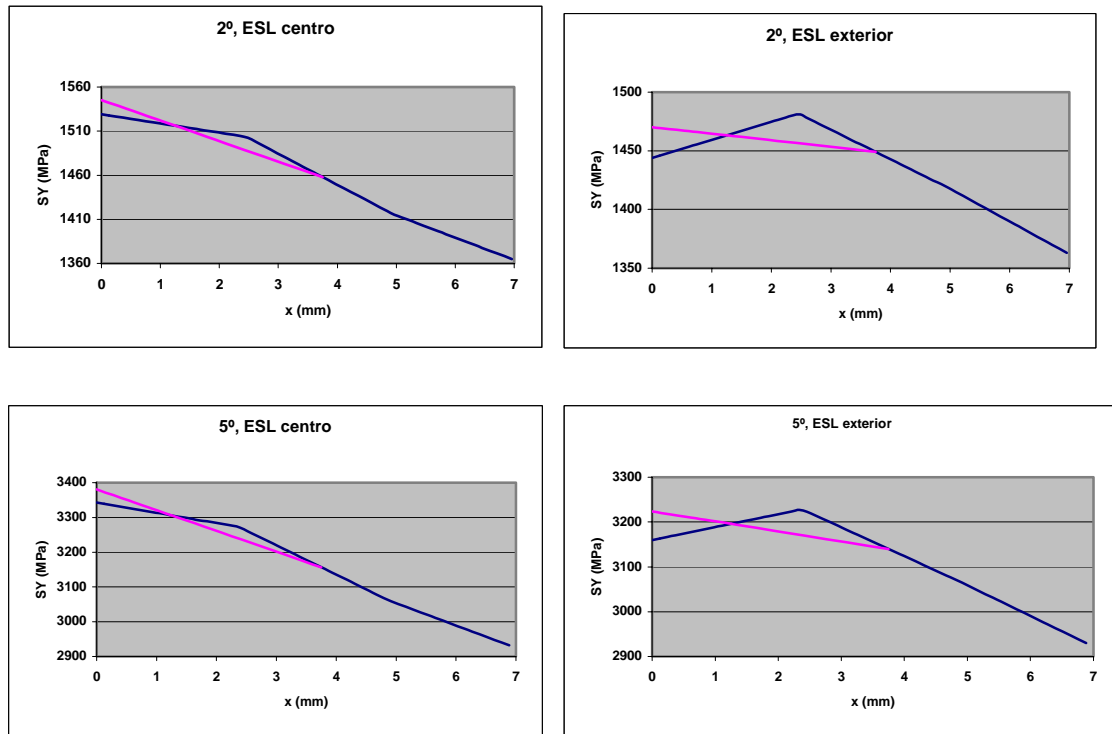


Grupo de gráficas 8.5.1.c.  $\sigma_y$ , ESL exterior y centro para malla fina límite de elementos Solid186 y diferentes desalineaciones angulares

8.5.1.d) Malla Gruesa (Solid186)



## Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos



Grupo de gráficas 8.5.1.d.  $\sigma_y$ , ESL exterior y centro para malla gruesa de elementos Solid186 y diferentes desalineaciones angulares

### 8.5.1.e) Resultados numéricos y comentarios

Como regla general se puede decir que una TPC mayor es un resultado más conservativo que otra TPC menor pues supone una menor vida a fatiga (menor número de ciclos  $N$ ). Por tanto, infravalorar la TPC supondrá predecir una vida a fatiga mayor de la que posiblemente tendrá el componente soldado bajo estudio.

En primer lugar, se muestra en la tabla siguiente los tiempos de cálculo de ANSYS para resolver cada modelo, con  $0^\circ$  de desalineamiento ya que sólo se pretende que sean tiempos orientativos, extrapolables a un modelo mayor o más complejo:

	Nº de elementos	Tiempo de cálculo (seg)
Fso45	29998	95.25
Fso186	1534	19.47
FLso186	70	11.75
Gso186	69	10.76

Tabla 8.5.1.1 Tiempos de cálculo de los modelos 3D

Los valores de la TPC obtenidos en cada caso, según el tipo de mallado, son los siguientes:

$\sigma_{hs}$ (MPa)	$0^\circ$			
	Fso45	Fso186	FLso186	Gso186
ESL centro	323,717	323.472	329.483	314.060
ESL exterior	307,868	307.660	309.090	301.105

Tabla 8.5.1.2. TPC obtenida mediante ESL en centro y exterior de la probeta para un desalineamiento angular de  $0^\circ$

$\sigma_{hs}$ (MPa)	2°		
	Fso186	FLso186	Gso186
ESL centro	1588.839	1616.053	1545.190
ESL exterior	1499.192	1508.595	1470.160

Tabla 8.5.1.3. TPC obtenida mediante ESL en centro y exterior de la probeta para un desalineamiento angular de 2°

$\sigma_{hs}$ (MPa)	5°			
	Fso45	Fso186	FLso186	Gso186
ESL centro	3458,918	3502.335	3536.653	3380.821
ESL exterior	3278,726	3297.528	3307.180	3223.472

Tabla 8.5.1.4. TPC obtenida mediante ESL en centro y exterior de la probeta para un desalineamiento angular de 5°

Se observa cómo en el centro de la probeta se obtienen siempre valores de la TPC mayores que en el borde exterior, por tanto, podría ser el posible lugar de inicio de la grieta y es un valor más representativo de la TPC obtenida por ESL. Puede observarse claramente el efecto sobre el valor de la TPC de un desalineamiento angular al realizar la soldadura. La TPC en un desalineamiento de 2° con respecto a un desalineamiento nulo se incrementa aproximadamente en un 490% con la consiguiente reducción de vida a fatiga que esto supone. Para 5° se incrementa en un 1068% así que se puede decir que en este modelo, realizando una extrapolación de estos resultados, se tiene aproximadamente un incremento del 230% en la TPC por cada grado de desalineamiento. Esto pone claramente de manifiesto la importancia de realizar esta soldadura correctamente.

Si tomamos como los resultados más fiables los obtenidos con la malla Fso186 podemos hacer los siguientes comentarios sobre los resultados de cada una de las otras mallas:

- La malla Fso45 aún siendo mucho más fina y con un nº de elementos mucho mayor (aproximadamente 30000 frente a 1500), al no recoger desplazamientos cuadráticos, la TPC obtenida cuando existe desalineamiento angular es siempre algo menor (siendo prácticamente la misma si no lo hay). Además el tiempo de cálculo es mucho mayor aunque el número de elementos también lo sea, por tanto este refinado en exceso de la maya es poco rentable computacionalmente hablando.
- La malla FLso186 obtiene resultados muy próximos a la malla Fso186 pero siempre más conservativos. Esta malla, por tanto, es muy recomendable ya que requiere un menor esfuerzo computacional y en todos los casos está del lado de la seguridad en cuanto a la vida a fatiga.
- La malla Gso186 tiene tan sólo 1 elemento menos que FLso186 y prácticamente el mismo tiempo de cálculo. Sin embargo, observando las distribuciones de tensiones en el grupo de gráficas 8.5.1.d obtenidas por ANSYS, es obvio que no pueden usarse como puntos de extrapolación los situados a 0.4t y 1t pues se obtendría una TPC mucho menor. Este mallado, por tanto no es recomendable pues se obtiene una TPC muy infravalorada y el coste computacional es prácticamente el mismo que con la malla FLso186. Sin embargo cabría la posibilidad de tomar otros puntos de extrapolación de manera que se obtuviera una variante de la ecuación 5.1 que se adapte mejor a mallas gruesas con esta geometría.

## Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos

Por último se comprueba la influencia de no seleccionar en el postproceso los elementos pertenecientes al cordón de soldadura (ver apartados 5.1 y 8.5.1.c). Se han realizado análisis seleccionando estos elementos (columna de la derecha para cada desalineamiento) para compararlos con los obtenidos anteriormente (columna de la izquierda para cada desalineamiento):

$\sigma_{hs}$ (MPa)	Malla Fina Límite					
	0°		2°		5°	
<b>ESL centro</b>	329.483	329.851	1616.053	1616.053	3536.653	3511.460
<b>ESL exterior</b>	309.090	309.090	1508.595	1508.261	3307.180	3307.848

Tabla 8.5.1.5. Comparación TPC obtenida mediante ESL en centro y exterior de la probeta seleccionando o no los elementos del cordón de soldadura con malla FLso186

$\sigma_{hs}$ (MPa)	Malla Gruesa					
	0°		2°		5°	
<b>ESL centro</b>	314.060	282.125	1545.190	1444.72	3380.821	3188.446
<b>ESL exterior</b>	301.105	273.13	1470.160	1384.011	3223.472	3056.847

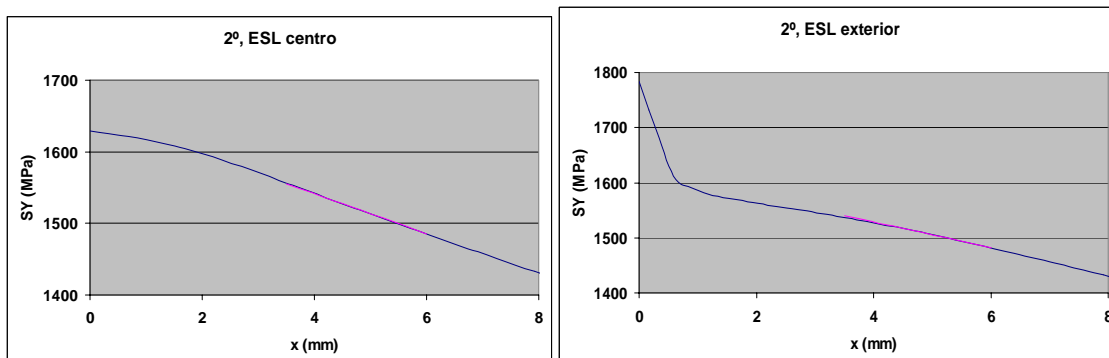
Tabla 8.5.1.6. Comparación TPC obtenida mediante ESL en centro y exterior de la probeta seleccionando o no los elementos del cordón de soldadura con malla Gso186

Con la malla FLso186 sólo se nota este efecto de reducción de la TPC para grandes desalineamientos angulares (al menos mayor a 2°). Si tiene una gran influencia cuando se usa la malla Gso186, siendo este otro inconveniente más en el uso de esta malla.

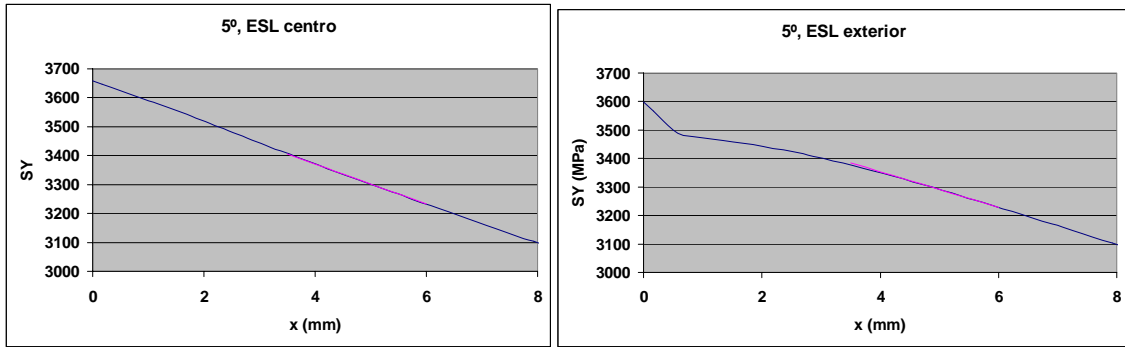
### 8.5.2 Modelos planos

En los modelos planos, al no estar modelado el cordón de soldadura, el origen del eje de abscisas,  $x=0$  mm, se refiere al centro de la probeta y no al borde de la soldadura como en los modelos en 3D. Por tanto, el borde de la soldadura estaría situado en  $x=3.5$ mm desplazando los puntos de extrapolación de tensiones.

#### 8.5.2.a) Malla Fina (Shell93)

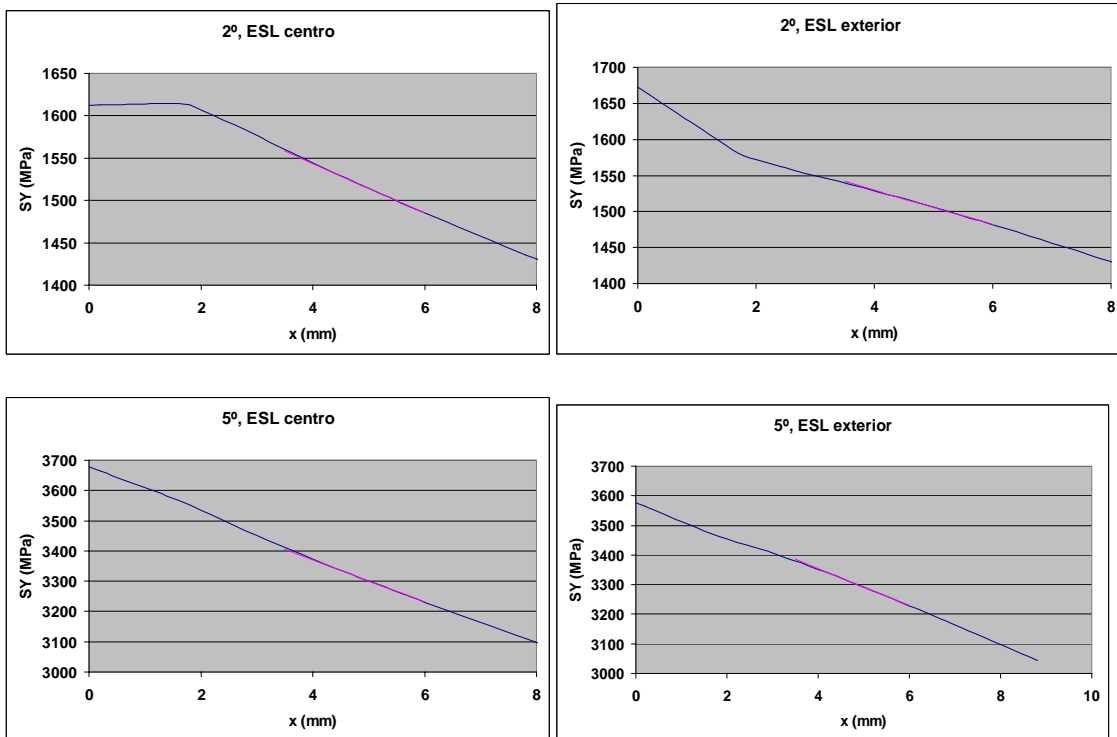


Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos



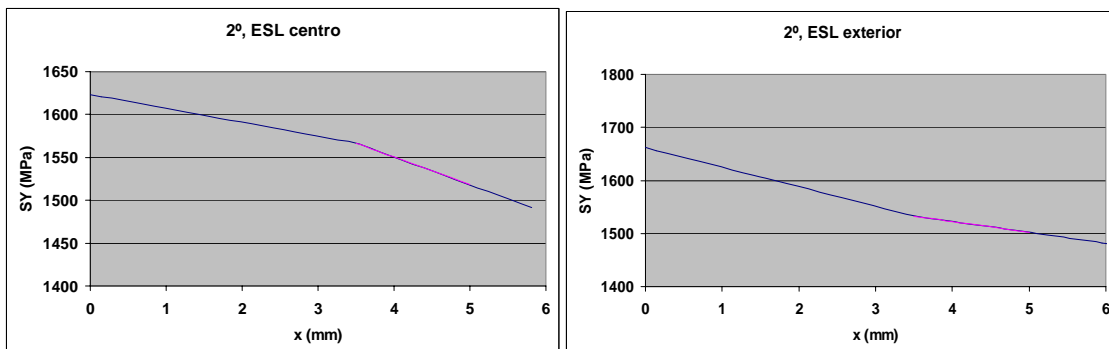
Grupo de gráficas 8.5.2.a.  $\sigma_y$ , ESL exterior y centro para malla fina de elementos Shell93 y diferentes desalineaciones angulares

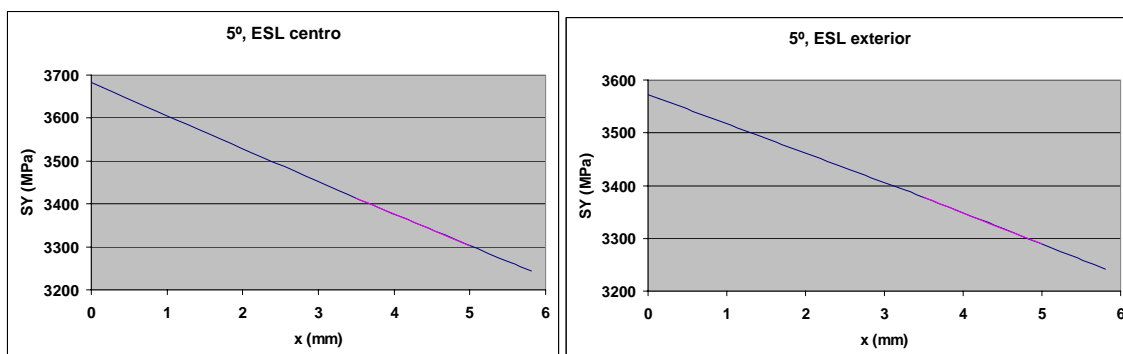
8.5.2.b) Malla Fina Límite (Shell93)



Grupo de gráficas 8.5.2.b.  $\sigma_y$ , ESL exterior y centro para malla fina límite de elementos Shell93 y diferentes desalineaciones angulares

8.5.2.c) Malla Gruesa (Shell93)





Grupo de gráficas 8.5.2.c.  $\sigma_y$ , ESL exterior y centro para malla gruesa de elementos Shell93 y diferentes desalineaciones angulares

### 8.5.2.d) Resultados numéricos y comentarios

En primer lugar, se muestra en la tabla siguiente los tiempos de cálculo de ANSYS para resolver cada modelo, con 2° de desalineamiento:

	Nº de elementos	Tiempo de cálculo (seg)
Fsh93	252	6.516
FLsh93	28	5.312
Gsh93	25	5.234

Tabla 8.5.2.1 Tiempos de cálculo de los modelos 2D

Para este modelo en 2D, por tanto, no hay diferencias significativas en el tiempo de cálculo según la densidad de la malla. A continuación se muestran los resultados obtenidos en los diferentes análisis:

$\sigma_{hs}$ (MPa)	2°		
	Fsh93	FLsh93	Gsh93
ESL centro	1555.573	1558.246	1566.769
ESL exterior	1540.317	1541.519	1532.853

Tabla 8.5.2.2. TPC obtenida mediante ESL en centro y exterior de la probeta para un desalineamiento angular de 2°

$\sigma_{hs}$ (MPa)	5°		
	Fsh93	FLsh93	Gsh93
ESL centro	3404.846	3405.647	3413.262
ESL exterior	3383.810	3385.546	3377.743

Tabla 8.5.2.3. TPC obtenida mediante ESL en centro y exterior de la probeta para un desalineamiento angular de 5°

Se observa que la malla fina límite arroja resultados muy próximos (siempre en exceso, es decir, más conservativos) a los obtenidos con la malla fina al igual que ocurre en modelos 3D. Los resultados obtenidos con la malla gruesa difieren un poco más, por exceso en el centro y defecto en el exterior (ya se comentó en 8.5.1.e que el valor de la TPC en el centro es de mayor interés). Por tanto, mediante la malla fina límite se obtienen resultados satisfactorios y con poco esfuerzo computacional.

Otra gran ventaja que tienen estos modelos planos es que, como se observa en las gráficas, el valor de la tensión obtenida directamente del AEF está muy próximo en todos los casos al valor de  $\sigma_{hs}$  obtenido mediante extrapolación ya que no se ha modelado el cordón. En Cañas (sin fecha) se llega a una conclusión semejante, concluyendo que basta con resolver el modelo sin cordón de soldadura, para calcular la vida a fatiga del componente para cualquier tamaño del cordón.

### 8.5.3. Comparación entre modelos sólidos y planos.

Lo primero que cabría destacar, ya que es la razón de haber realizado modelos en 2D, es que el tiempo de cálculo se reduce aproximadamente a la mitad. A continuación se muestran unas tablas comparativas de los valores de la TPC obtenida con modelos 2D (columna de la izquierda para cada tamaño de malla) y la obtenida con modelos 3D (columna de la derecha para cada tamaño de malla) que se toma como referencia ya que se considera más próxima a la realidad:

$\sigma_{hs}$ (MPa)	2°					
	Fsh93	Fso186	FLsh93	FLso186	Gsh93	Gso186
ESL centro	1555.573	1586.839	1558.246	1616.053	1566.769	1545.190
ESL exterior	1540.317	1499.192	1541.519	1508.595	1532.853	1470.160

Tabla 8.5.3.1. Comparación entre modelos 2D y 3D para un desalineamiento angular de 2°

$\sigma_{hs}$ (MPa)	5°					
	Fsh93	Fso186	FLsh93	FLso186	Gsh93	Gso186
ESL centro	3404.846	3502.335	3405.647	3536.653	3413.262	3380.821
ESL exterior	3383.810	3297.528	3385.546	3307.180	3377.743	3223.472

Tabla 8.5.3.2. Comparación entre modelos 2D y 3D para un desalineamiento angular de 5°

En general, los resultados obtenidos con los modelos 2D son bastante próximos a los obtenidos con modelos 3D, pero hay que tener en cuenta que ignoran por completo las dimensiones del cordón de soldadura y el ángulo de esquina entrante que hay en el borde de la soldadura entre la superficie de la probeta y la superficie del cordón.

### 8.6 Aplicación del método de Dong

Para la aplicación del método de Dong se hará uso de las ecuaciones vistas en el capítulo 6, donde se explica el significado de las variables y las propias ecuaciones. A continuación se detalla de manera más explícita cómo se van a realizar las integrales que aparecen en esas ecuaciones a partir de los valores de tensiones nodales, teniendo en cuenta el sistema de coordenadas que se usa en esta geometría, diferente al que usa Dong al desarrollar sus ecuaciones:

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b \quad (6.1)$$

Para una distribución de tensiones tangenciales monótona en el espesor (sin cambio de signo) se tiene:



$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_y(z) dz = \frac{1}{2n} [\sigma_{y,0} + 2\sigma_{y,1} + 2\sigma_{y,2} + \dots + 2\sigma_{y,n-1} + \sigma_{y,n}] \quad (8.6.1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_m \frac{t^2}{2} + \sigma_b \frac{t^2}{6} &= \int_0^t \sigma_y(z) \cdot z \cdot dz + \delta \int_0^t \tau_{yz}(z) dz = \\ &= \frac{t^2}{6n^2} [\sigma_{y,0} + 6\sigma_{y,1} + 12\sigma_{y,2} + \dots + (n-1)6\sigma_{y,n-1} + (3n-1)\sigma_{y,n}] + \\ &+ \delta \frac{t}{2n} [\tau_{yz,0} + 2\tau_{yz,1} + 2\tau_{yz,2} + \dots + 2\tau_{yz,n-1} + \tau_{yz,n}] \end{aligned} \quad (8.6.2)$$

Siendo n el número de nodos que hay a lo largo de una línea que cruce el espesor t de la probeta y siendo 0 el nodo situado en la superficie en la que se encuentra el punto caliente, numerando los nodos en orden ascendente (0,1,2,...,n-1,n).

Para una distribución de tensiones tangenciales no monótona en el espesor (con cambio de signo), se introduce la variable p, que se refiere al número de nodos que hay en el tramo horizontal a la profundidad t<sub>1</sub> (τ<sub>zy</sub>=0) y n<sub>1</sub> el número de nodos que hay hasta la profundidad t<sub>1</sub>:

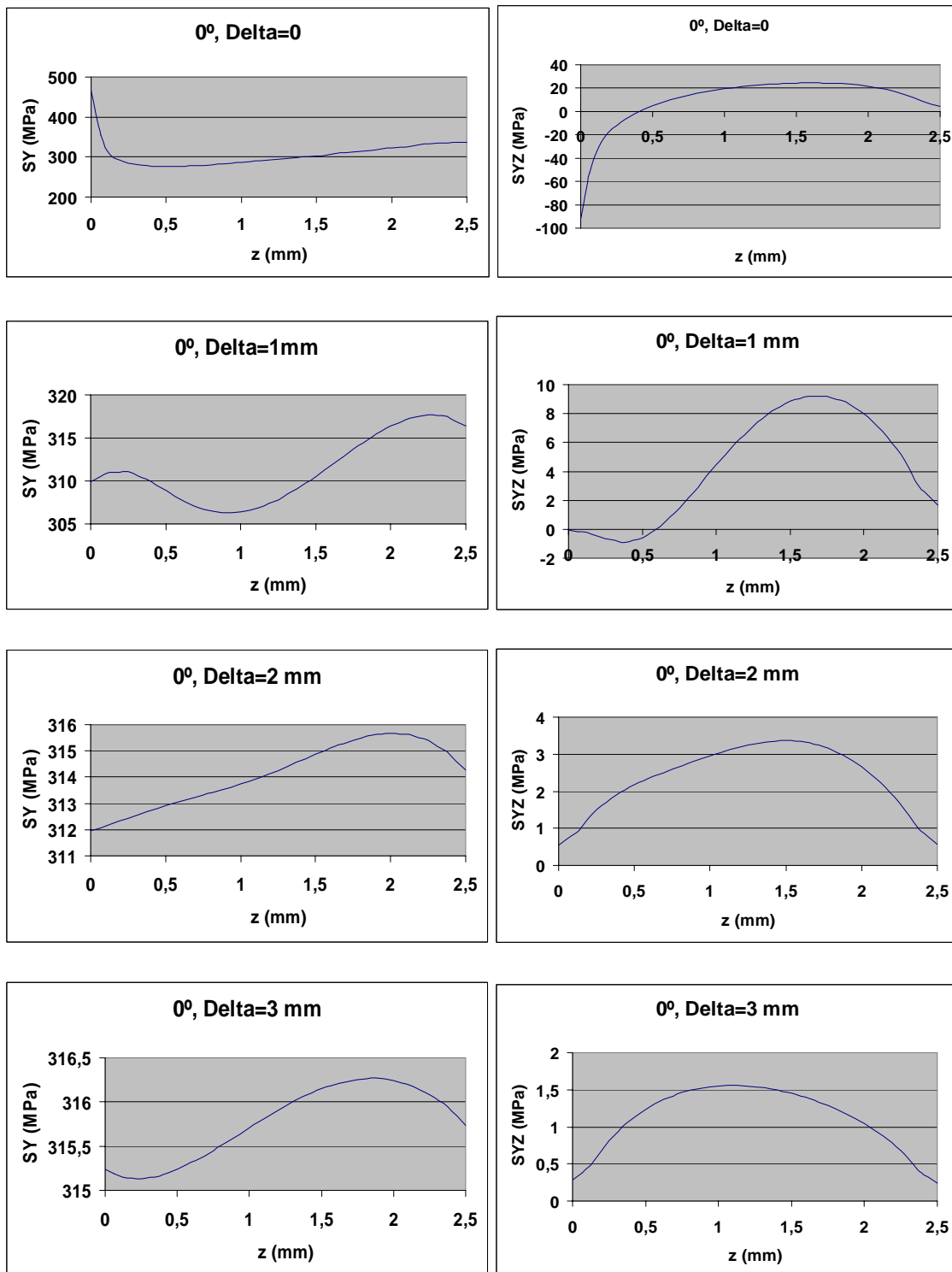
$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \sigma_y(z) dz + \frac{1}{t_1} \int_0^{\delta} \tau_{zy}(y) dy = \\ &= \frac{1}{2n_1} [\sigma_{y,0} + 2\sigma_{y,1} + 2\sigma_{y,2} + \dots + 2\sigma_{y,n_1-1} + \sigma_{y,n_1}] + \\ &+ \frac{\delta}{2t_1 p} [\tau_{zy,0} + 2\tau_{zy,1} + 2\tau_{zy,2} + \dots + 2\tau_{zy,p-1} + \tau_{zy,p}] \end{aligned} \quad (8.6.3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_m \frac{t_1^2}{2} + \sigma_b \frac{t_1^2}{6} &= \int_0^{t_1} \sigma_y(z) \cdot z \cdot dz + \delta \int_0^{t_1} \tau_{yz}(z) dz + \int_0^{\delta} \sigma_z(y) \cdot y \cdot dy = \\ &= \frac{t_1^2}{6n_1^2} [\sigma_{y,0} + 6\sigma_{y,1} + 12\sigma_{y,2} + \dots + (n_1-1)6\sigma_{y,n_1-1} + (3n_1-1)\sigma_{y,n_1}] + \\ &+ \delta \frac{t_1}{2n_1} [\tau_{yz,0} + 2\tau_{yz,1} + 2\tau_{yz,2} + \dots + 2\tau_{yz,n_1-1} + \tau_{yz,n_1}] + \\ &+ \frac{\delta^2}{6p^2} [\sigma_{z,0} + 6\sigma_{z,1} + 12\sigma_{z,2} + \dots + (p-1)6\sigma_{z,p-1} + (3p-1)\sigma_{z,p}] \end{aligned} \quad (8.6.4)$$

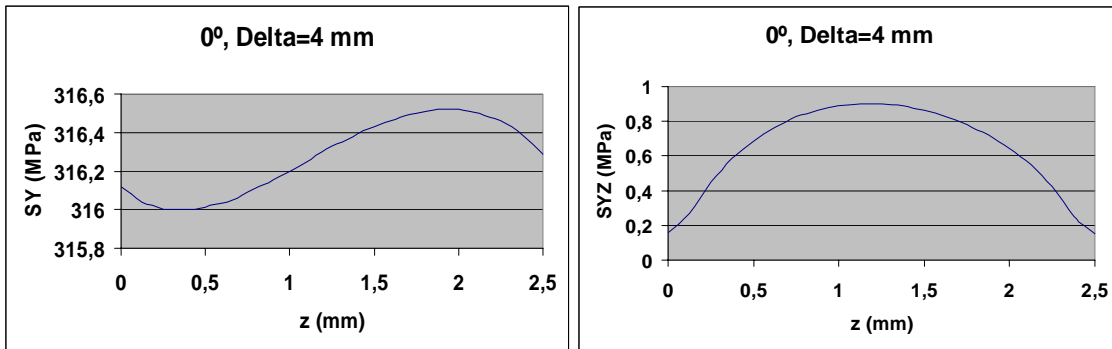
### 8.6.1 Modelos sólidos

#### 8.6.1a) Malla Fina (Solid45)

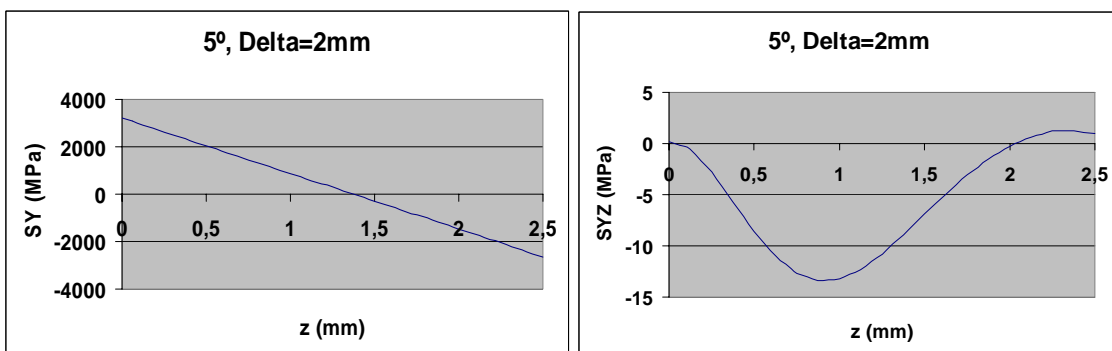
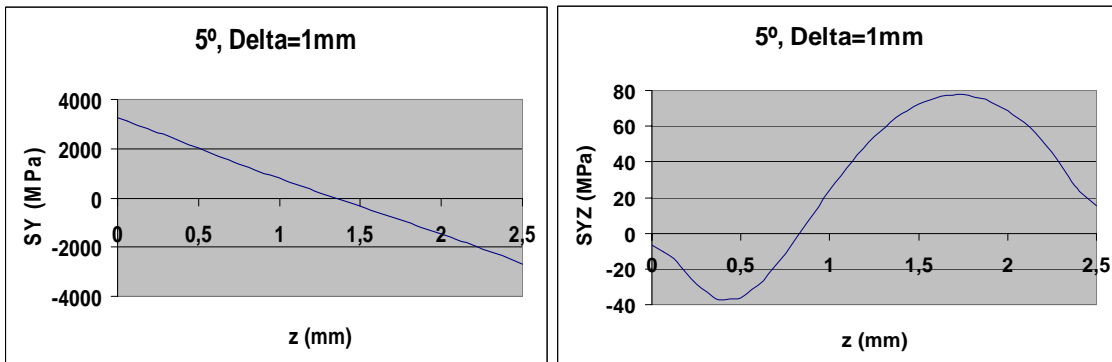
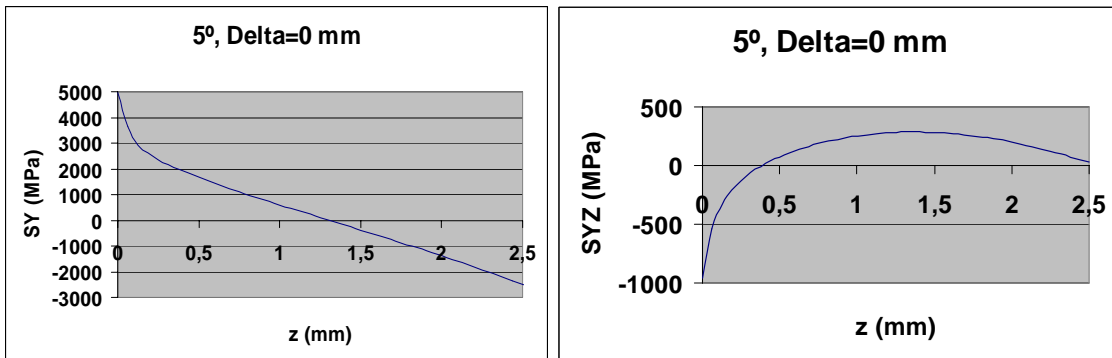
Con esta malla se han realizado análisis para  $0^\circ$  y  $5^\circ$ , prestando una mayor atención a cómo varía la tensión de punto caliente obtenida cuando se aumenta la distancia entre planos  $\delta$ . Se realizarán análisis para  $\delta= 0,1,2,3$  y  $4$  mm. Con las siguientes mallas sólo se obtendrán resultados para  $\delta= 0, 0.4t$  y  $1t$ .

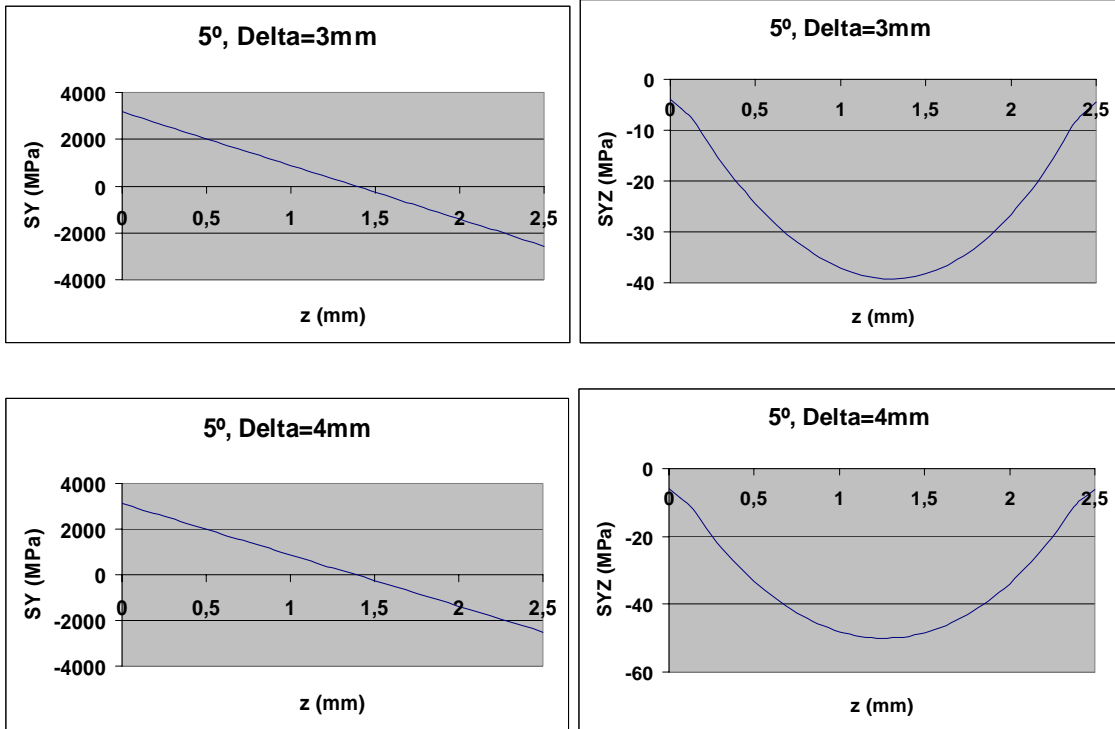


Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos



Grupo de gráficas 8.6.1.a.1 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de 0°.

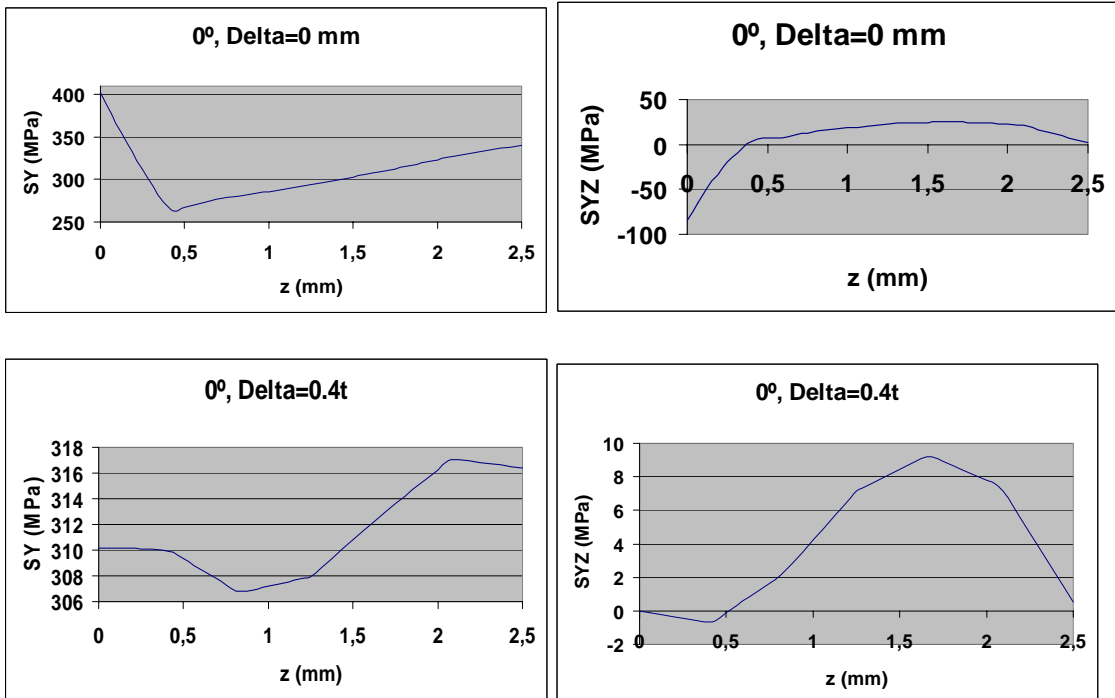




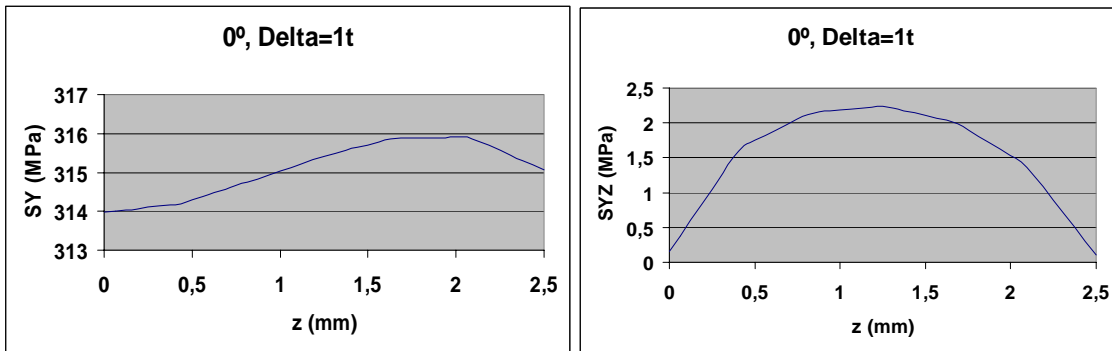
Grupo de gráficas 8.6.1.a.2 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de  $5^\circ$ .

### 8.6.1.b) Malla Fina (Solid186)

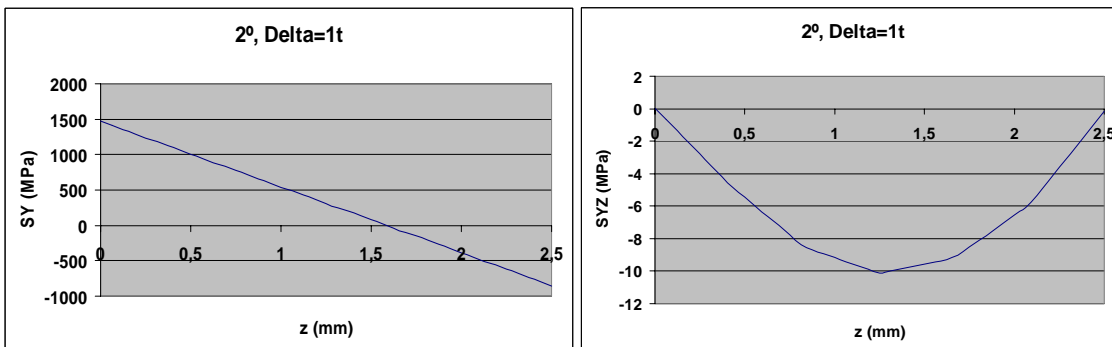
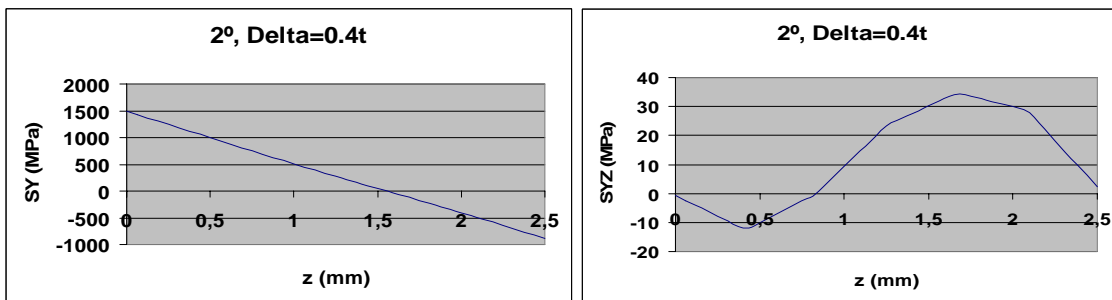
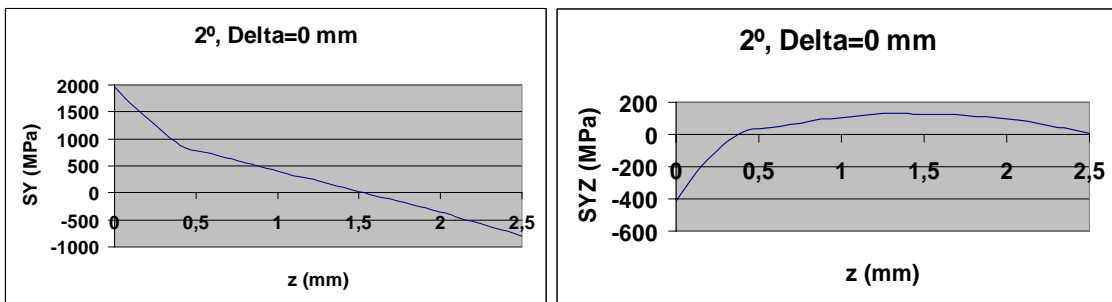
Para las mallas con elementos Solid186, se realizarán AEF para  $0^\circ$ ,  $2^\circ$  y  $5^\circ$  de desalineamiento angular. Adicionalmente, para cada uno de ellos, se evaluará la tensión de punto caliente para los valores de  $\delta = 0$  mm,  $\delta = 0.4t = 1$  mm y  $\delta = 1t = 2.5$  mm.



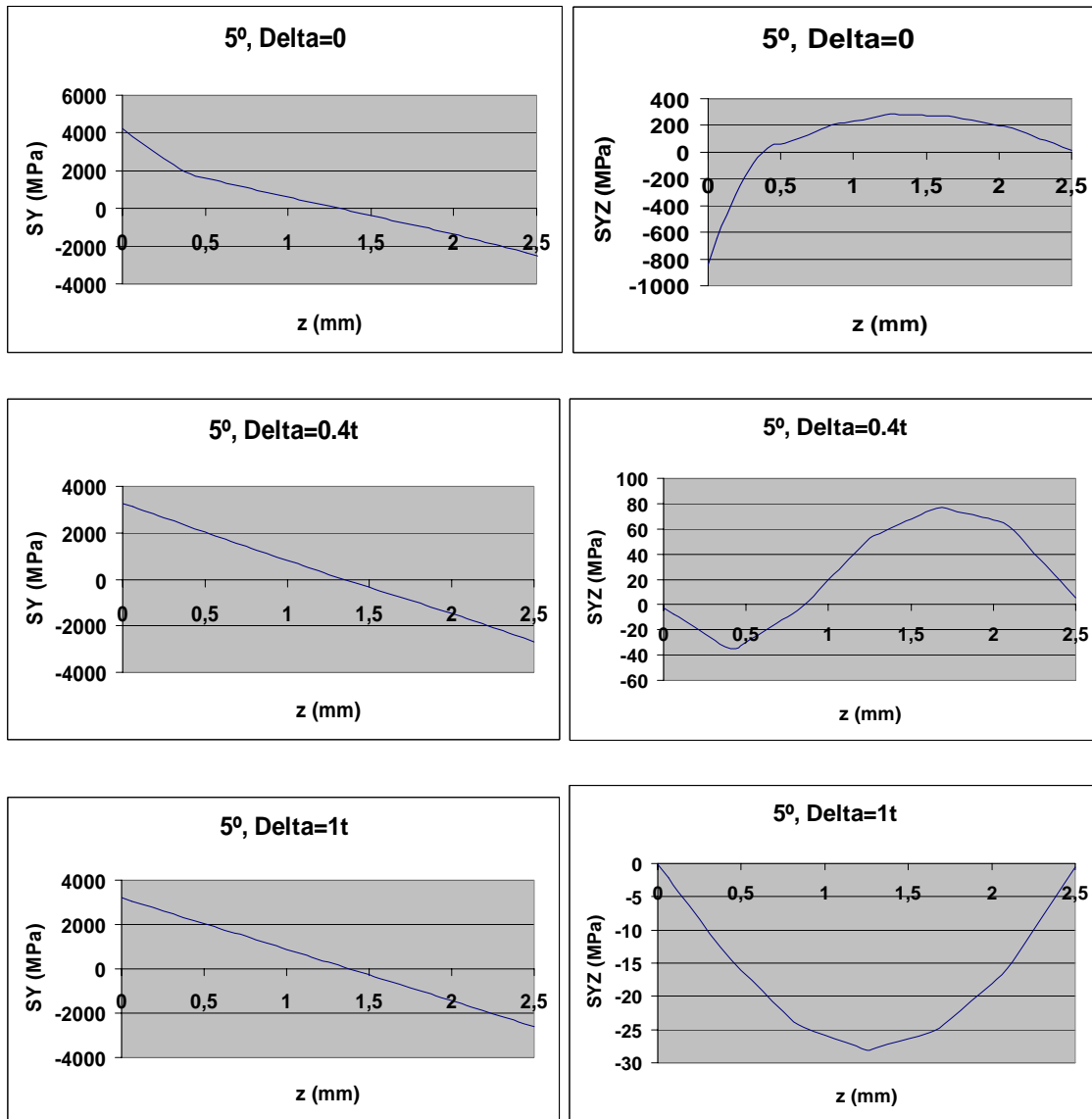
Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos



Grupo de gráficas 8.6.1.b.1 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de 0°.

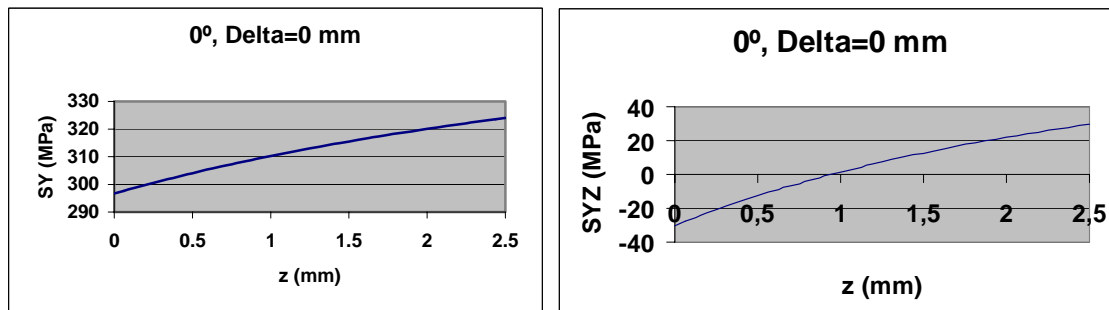


Grupo de gráficas 8.6.1.b.2 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de 2°.

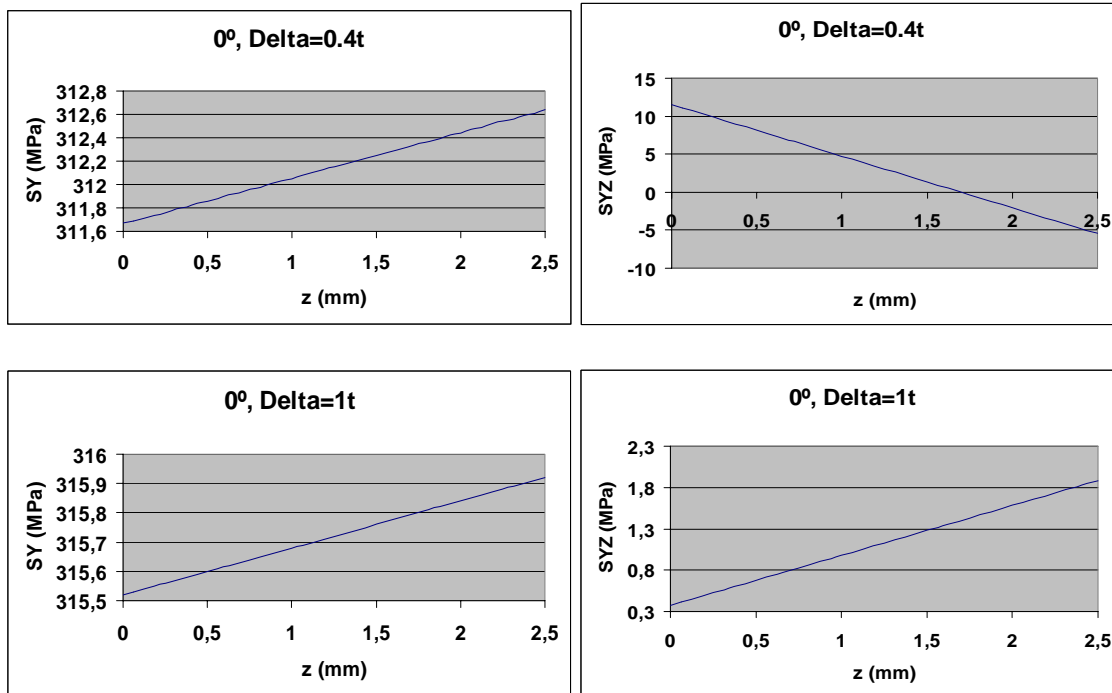


Grupo de gráficas 8.6.1.b.3 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de 5°.

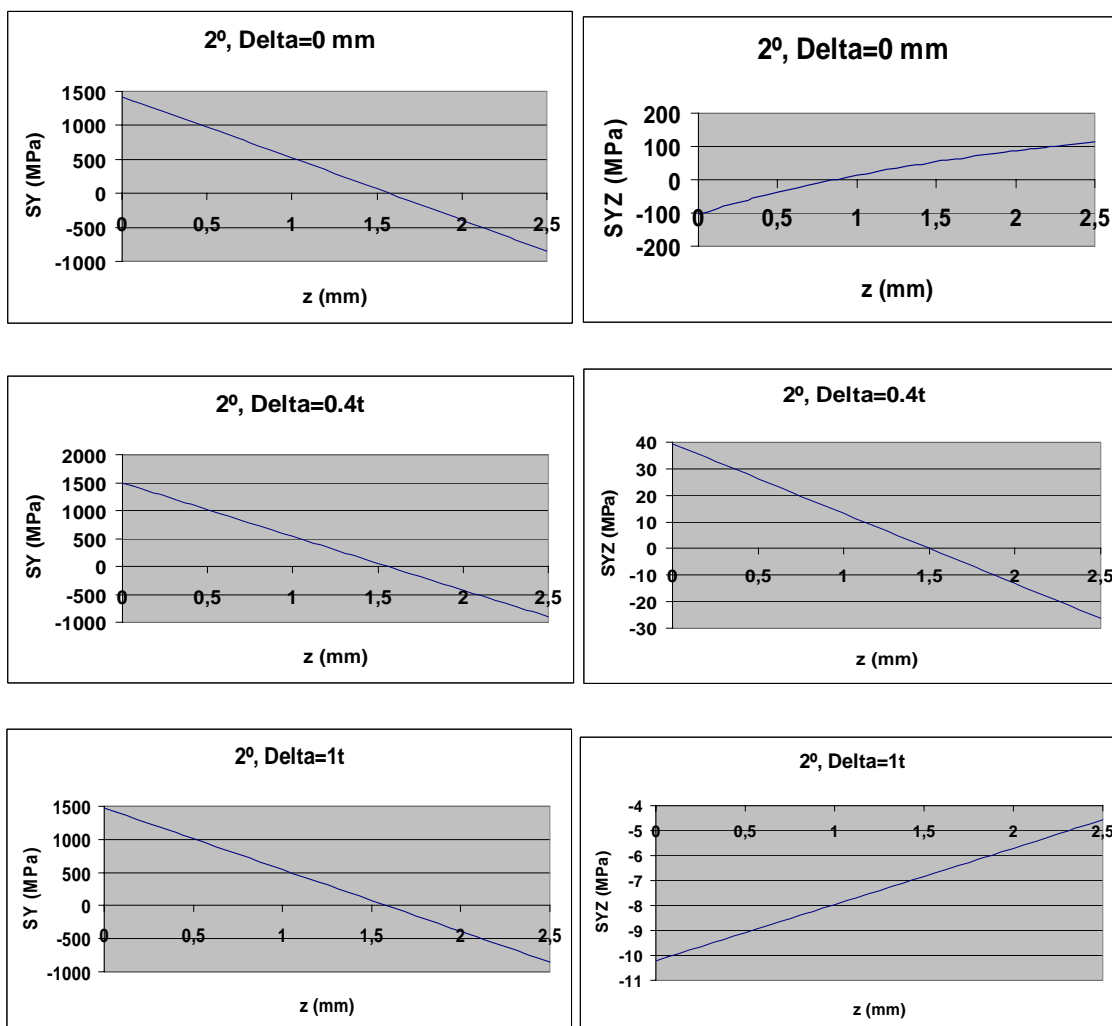
### 8.6.1.c) Malla Fina Límite (Solid186)



Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos

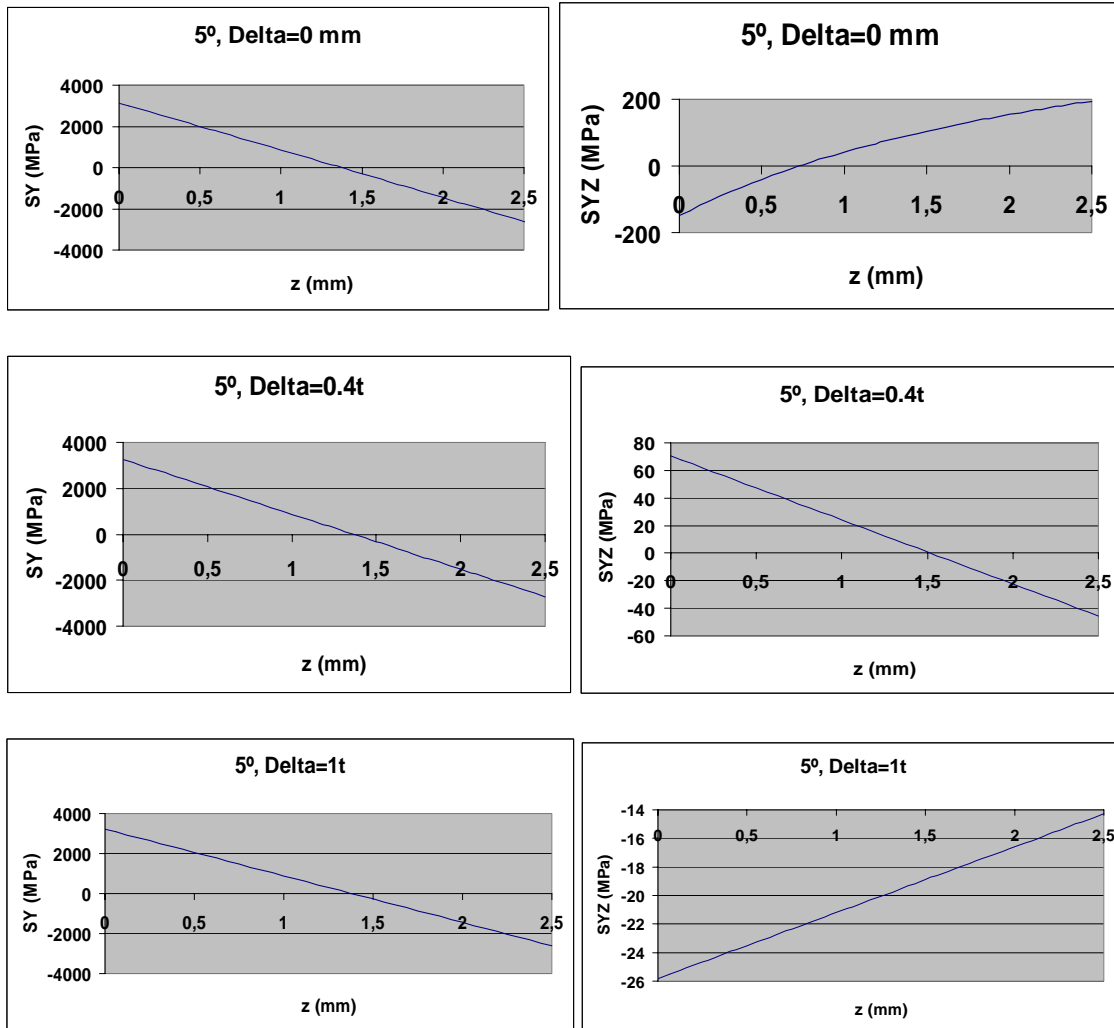


Grupo de gráficas 8.6.1.c.1 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de  $0^\circ$ .



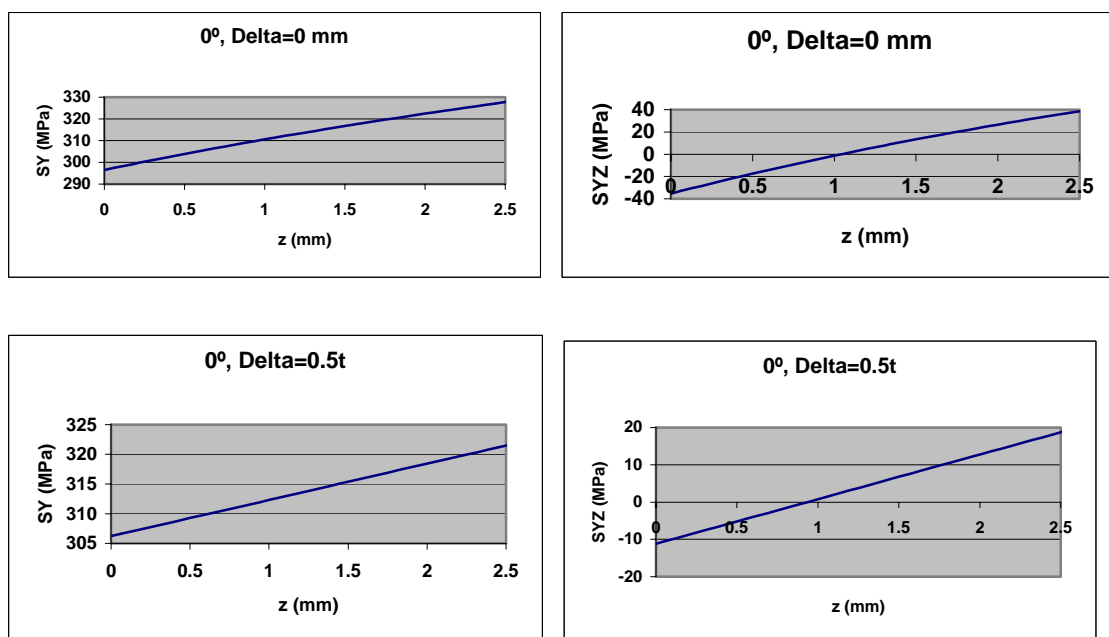
Grupo de gráficas 8.6.1.c.2 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de  $2^\circ$ .

Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos



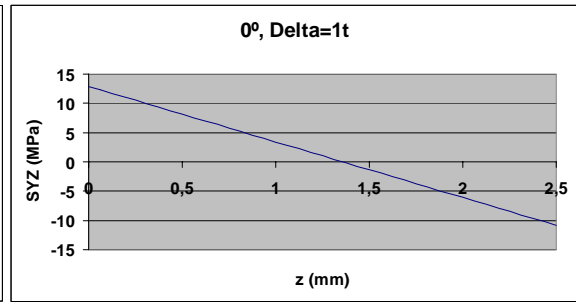
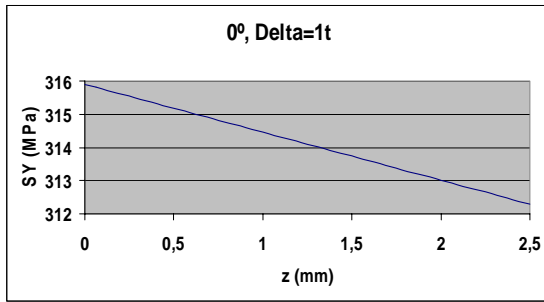
Grupo de gráficas 8.6.1.c.3 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de 5°.

8.6.1.d) Malla Gruesa (Solid186)

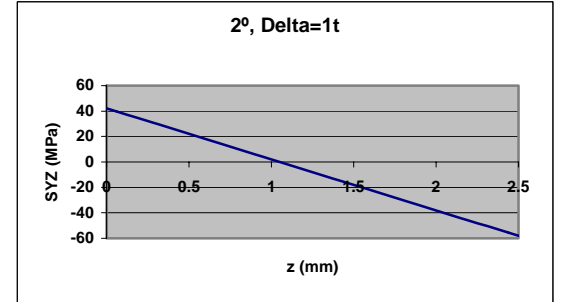
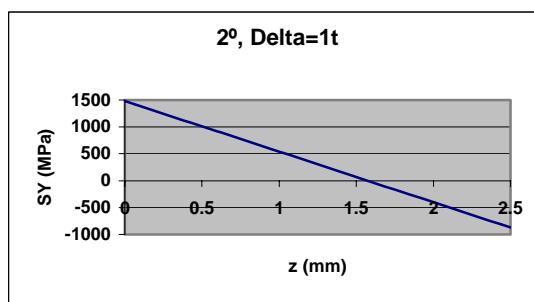
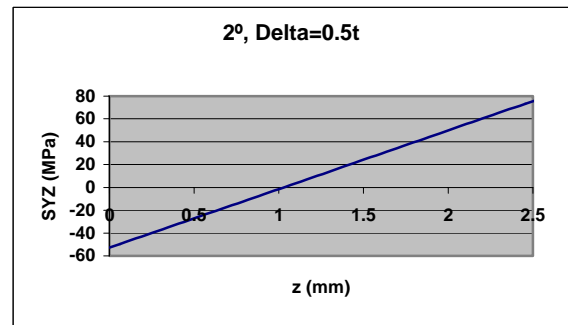
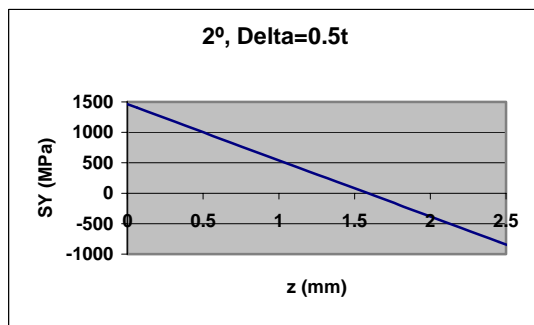
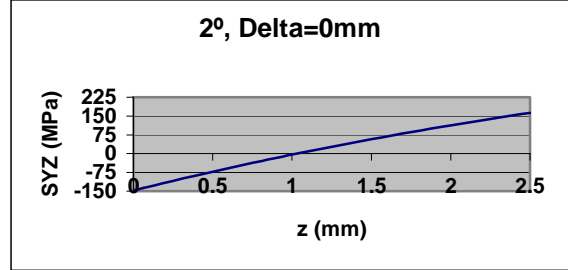
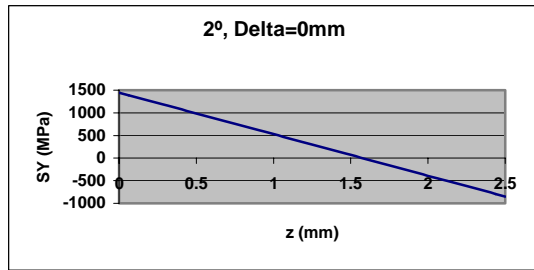




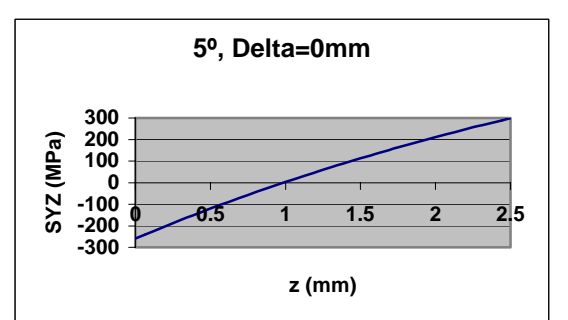
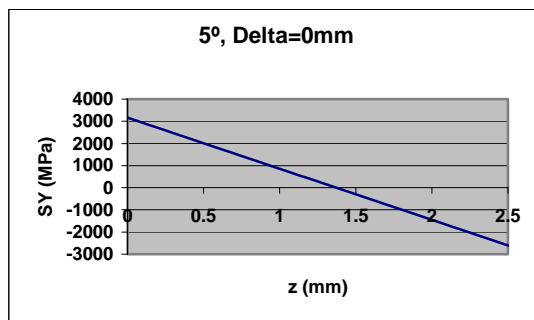
Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos

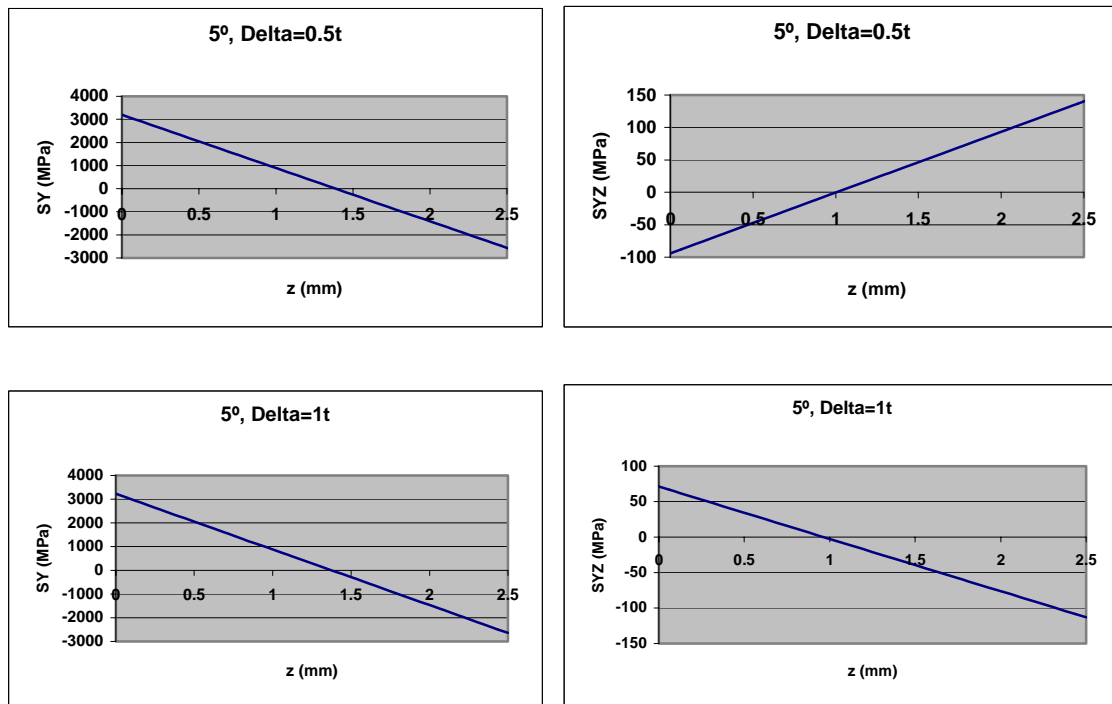


Grupo de gráficas 8.6.1.d.1 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de  $0^\circ$ .



Grupo de gráficas 8.6.1.d.2 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de  $2^\circ$ .





Grupo de gráficas 8.6.1.d.3 Distribuciones de tensión  $\sigma_y$  y  $\tau_{zy}$  en el espesor a diferentes distancias (Delta) del borde de la soldadura con una desalineación angular de  $5^\circ$ .

### 8.6.1.e) Resultados numéricos y comentarios

Las cantidades señaladas con asterisco (\*) en las tablas que se muestran a continuación (8.6.1.1 a 8.6.1.4), han sido calculadas con las ecuaciones de distribución monótona de tensiones tangenciales  $\tau_{zy}$  a pesar de que ésta tenga un cambio de signo a lo largo del espesor. Se verá que se obtienen mejores resultados de esta manera que realizando el balance de fuerzas y momentos teniendo en cuenta los esfuerzos sobre la sección horizontal en  $t_1$ . Esto es debido a que, para una aplicación estricta del método de Dong en modelos 3D, según se explica en el apartado 6.4, hay que tener en cuenta las componentes tangenciales  $\tau_{yx}$  y  $\tau_{zx}$  a lo largo de las caras laterales de los elementos. La introducción de estas componentes en el equilibrio compensarían los efectos de los esfuerzos sobre la sección horizontal a la profundidad  $t_1$ . En los análisis realizados se ha despreciado el efecto de las componentes tangenciales  $\tau_{yx}$  y  $\tau_{zx}$  a lo largo de las caras laterales de los elementos pues se obtiene prácticamente el mismo valor que sin tenerlas en cuenta. Como también se explica en 6.4, la utilidad de introducir estas componentes es para minimizar la dependencia de los resultados con el tamaño de la malla, dependencia que en los resultados mostrados a continuación es pequeña.

Mediante los análisis realizados empleando elementos Solid45, se observa cómo varían los resultados con la distancia  $\delta$ . En los análisis realizados para una desalineación angular de  $0^\circ$ , no se encuentra un efecto claro sobre la tensión de punto caliente obtenida al aumentar la distancia entre planos  $\delta$  pero si puede observarse que la tensión de punto caliente obtenida varía poco. Por tanto, no se encuentra un acuerdo con los resultados de Poutiainen (2004), que concluyó que si no se tienen en cuenta las tensiones tangenciales  $\tau_{yx}$  y  $\tau_{zx}$  en el equilibrio, la tensión estructural será menor al aumentar  $\delta$ . Sin embargo, para una desalineación angular de  $5^\circ$  (o distinta de  $0^\circ$  en

*Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos*

general) se observa el efecto contrario al obtenido por Poutiainen (2004), es decir, si no se tienen en cuenta las tensiones tangenciales  $\tau_{yx}$  y  $\tau_{zx}$  en el equilibrio, la tensión estructural es mayor al aumentar  $\delta$ .

$\sigma_{hs}$ (MPa) Dong	Fso45	
	0°	5°
Dong $\delta=0$ mm	*324.518	*3051.702
Dong $\delta=1.005$ mm	*316.857	*3257.266
Dong $\delta=1.9875$ mm	323.667	*3240.026
Dong $\delta=3.1225$ mm	323.652	3369.710
Dong $\delta=4.03$ mm	322.383	3454.931

Tabla 8.6.1.1. TPC para diferentes  $\delta$  y malla Fso45

Con los elementos Solid186, analizaremos el efecto que tiene el cambio en el tamaño de los elementos de la malla para los desalineamientos angulares de 0°, 2° y 5°. Adicionalmente, se han añadido en las tablas los resultados obtenidos para una distancia aproximada de  $\delta=2t$  (será una distancia en torno a los 5 mm, dependiendo del tamaño de los elementos en cada malla, ya que se deben evaluar en los nodos), de los cuales no se muestran las gráficas en apartados anteriores, para ver la tensión de punto caliente que se obtiene al tomar un valor relativamente alto de la distancia  $\delta$ . Se debe tener en cuenta, como se comenta en el apartado 6.3.5 y también se hizo al aplicar la ESL, el seleccionar sólo los elementos de interés en frente del borde de la soldadura para evitar el promediado de tensiones que daría como resultado una TPC infravalorada.

$\sigma_{hs}$ (MPa)	0°					
	Fso186		FLso186		Gso186	
Dong $\delta=0$ mm	$\sigma_m=306,955$ $\sigma_b=12,775$	*319.730	$\sigma_m=312,084$ $\sigma_b=13,461$	*325.546	$\sigma_m=313,179$ $\sigma_b=15,558$	*328.738
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	$\sigma_m=311,287$ $\sigma_b=5,477$	*316.765	$\sigma_m=312,151$ $\sigma_b=6,808$	*318.959	$\sigma_m=313,881$ $\sigma_b=3,855$	*310.025
Dong $\delta=2.5$ mm	$\sigma_m=315,117$ $\sigma_b=8,588$	323.705	$\sigma_m=315,720$ $\sigma_b=6,579$	322.299	$\sigma_m=314,096$ $\sigma_b=7,962$	*322.059
Dong $\delta=5.43$ mm ( $\delta=5$ mm para Gso186)	$\sigma_m=316,422$ $\sigma_b=3,665$	320.088	$\sigma_m=316,560$ $\sigma_b=1,309$	*317.870	$\sigma_m=317,015$ $\sigma_b=3,5887$	*320,603

Tabla 8.6.1.2. TPC obtenidas mediante el método de Dong para una desalineación angular de 0° con diferentes tamaños de malla y distancias  $\delta$ .

$\sigma_{hs}$ (MPa)	2°					
	Fso186		FLso186		Gso186	
Dong $\delta=0$ mm	$\sigma_m=270,388$ $\sigma_b=1140,100$	*1410.482	$\sigma_m=294,521$ $\sigma_b=1162,615$	*1457.440	$\sigma_m=298,878$ $\sigma_b=1147,125$	*1446.004
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	$\sigma_m=290,316$ $\sigma_b=1204,299$	*1494.615	$\sigma_m=296,156$ $\sigma_b=1215,861$	*1512.018	$\sigma_m=302,190$ $\sigma_b=1196,058$	*1498.249
Dong $\delta=2.5$ mm	$\sigma_m=309,260$ $\sigma_b=1198,610$	1507.869	$\sigma_m=311,798$ $\sigma_b=1210,230$	1522.027	$\sigma_m=305,124$ $\sigma_b=1128,473$	*1433.598
Dong $\delta=5.43$ mm ( $\delta=5$ mm para Gso186)	$\sigma_m=316,127$ $\sigma_b=1293,140$	1609.268	$\sigma_m=316,643$ $\sigma_b=1270,710$	1587.357	$\sigma_m=318,142$ $\sigma_b=1263,210$	1581.352

Tabla 8.6.1.3. TPC obtenidas mediante el método de Dong para una desalineación angular de 2° con diferentes tamaños de malla y distancias  $\delta$ .

$\sigma_{hs}$ (MPa)	5°					
	Fso186		FLso186		Gso186	
Dong $\delta=0$ mm	$\sigma_m=223,053$ $\sigma_b=2856,769$	*3079.822	$\sigma_m=271,196$ $\sigma_b=2929,659$	*3200.855	$\sigma_m=279,050$ $\sigma_b=2884,222$	*3163.270
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	$\sigma_m=259,336$ $\sigma_b=2999,410$	*3258.745	$\sigma_m=275,114$ $\sigma_b=3025,826$	*3300.94	$\sigma_m=284,363$ $\sigma_b=2849,769$	*3266.588
Dong $\delta=2.5$ mm	$\sigma_m=300,452$ $\sigma_b=3006,460$	3306.915	$\sigma_m=305,171$ $\sigma_b=3032,080$	3337.250	$\sigma_m=292,915$ $\sigma_b=3061,370$	*3354.283
Dong $\delta=5.43$ mm ( $\delta=5$ mm para Gso186)	$\sigma_m=315,014$ $\sigma_b=3239,060$	3554.079	$\sigma_m=316,332$ $\sigma_b=3174,890$	3491.224	$\sigma_m=318,364$ $\sigma_b=3161,470$	3479.832

Tabla 8.6.1.4. TPC obtenidas mediante el método de Dong para una desalineación angular de 5° con diferentes tamaños de malla y distancias  $\delta$ .

La componente de flexión  $\sigma_b$ , va cobrando importancia frente a la de membrana  $\sigma_m$ , a medida que aumenta la desalineación angular. Vuelve a comprobarse, en todas las mallas, que para una desalineación angular distinta de 0° la TPC aumenta al aumentar la distancia  $\delta$  siendo más notable este aumento en mallas más finas y por tanto, excepto para 0°, la TPC calculada directamente en el borde de la soldadura ( $\delta=0$ mm) es la menor y menos conservativa. En general, el menor incremento en la TPC se da para  $\delta$  entre  $0.4t$  y  $1t$ , por tanto este puede ser el rango más aconsejable para el cálculo de la TPC.

Adicionalmente se han realizado los cálculos según las expresiones para distribuciones no monótonas de tensiones tangenciales  $\tau_{zy}$  (cambio de signo a lo largo del espesor en la profundidad  $t_1$ ), para  $\delta=0$  y  $\delta=1$ mm sobre la malla fina de elementos Solid186, distancias a las que las gráfica de  $\tau_{zy}$  presentan un cambio de signo cuando se usa dicha malla (usando ecuaciones 8.6.3 y 8.6.4). Estos cálculos se realizan únicamente en la malla fina con objeto de conocer más exactamente la distancia  $t_1$ .

$\sigma_{hs}$ (MPa)	0°	
	Fso186	
Dong $\delta=0$ mm	$\sigma_m=299,345$ $\sigma_b=53,794$	353,140
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	$\sigma_m=318,457$ $\sigma_b=87,837$	406,294

Tabla 8.6.1.5. TPC obtenidas mediante el método de Dong para distribuciones no monótonas de tensiones tangenciales  $\tau_{zy}$  y un desalineamiento angular de 0°.

$\sigma_{hs}$ (MPa)	2°	
	Fso186	
Dong $\delta=0$ mm	$\sigma_m=1002,045$ $\sigma_b=697,360$	1699,400
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	$\sigma_m=1117,833$ $\sigma_b=592,118$	1709,950

Tabla 8.6.1.6. TPC obtenidas mediante el método de Dong para distribuciones no monótonas de tensiones tangenciales  $\tau_{zy}$  y un desalineamiento angular de 2°.

$\sigma_{hs}$ (MPa)	5°	
	Fso186	
Dong $\delta=0$ mm	$\sigma_m=2036,895$ $\sigma_b=1643,537$	3680,430
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	$\sigma_m=2305,399$ $\sigma_b=1459,560$	3765,000

Tabla 8.6.1.7. TPC obtenidas mediante el método de Dong para distribuciones no monótonas de tensiones tangenciales  $\tau_{zy}$  y un desalineamiento angular de 5°.

*Cpítulo 8: Resultados de análisis de elementos finitos*

Comparando las tablas 8.6.1.2 a 8.6.1.4 con las tablas 8.6.1.5 a 8.6.1.7, se observa que se obtienen unos valores mucho mayores de la tensión de punto caliente en este último grupo, debido a la contribución en el equilibrio de esfuerzos de las tensiones  $\tau_{zy}$  y  $\sigma_z$ , que, como se dijo al comienzo de este mismo apartado, no se ven compensadas por las tensiones tangenciales  $\tau_{yx}$  y  $\tau_{zx}$ .

Para ver la importancia, ya comentada, de no seleccionar en el postprocesamiento los elementos del cordón de soldadura evitando así la infravaloración de la TPC, se realizaron varios análisis seleccionando estos elementos. Los resultados, para las mallas FLso186 y Gso186, se muestran en las siguientes tablas donde, para cada grado de desalineamiento, la columna de la derecha es la obtenida manteniendo seleccionados los elementos del cordón en el postprocesamiento.

$\sigma_{hs}$ (MPa)	Malla Fina Límite					
	0°		2°		5°	
Dong $\delta=0$ mm	325.546	330.523	1457.440	1430.428	3200.855	3147.781
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	318.959	318.959	1512.018	1512.018	3300.94	3300.940

Tabla 8.6.1.8 Comprobación del promediado de tensiones en malla FLso186

$\sigma_{hs}$ (MPa)	Malla Gruesa					
	0°		2°		5°	
Dong $\delta=0$ mm	328.738	341.135	1446.004	1335.870	3163.270	2945.095
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	310.025	318.903	1498.249	1376.446	3266.588	3134.132

Tabla 8.6.1.9 Comprobación del promediado de tensiones en malla Gso186

Se observa que, con la malla FLso186, sólo se ve influencia al evaluar la TPC en el propio borde de la soldadura ( $\delta=0$ ). Para la malla Gso186 se ve que, efectivamente, queda infravalorada (no para desalineamiento 0°) pero sólo si se calcula hasta  $\delta=0.4t=1$  mm, para  $\delta$  mayores no se ve efecto alguno. Por tanto, si se calculase la TPC mediante el método de Dong en una malla relativamente gruesa, bastaría tomar  $\delta=t$  para que el efecto del promediado dejase de influir.

**8.6.2 Modelos planos**

Se recuerdan las expresiones desarrolladas por Dong para modelos de placas (ver apartado 6.3.4). Para calcular las componentes de la tensión estructural en la sección A-A, se usarán tres componentes de las tensiones resultantes en la sección B-B,  $f_{x'}$ ,  $f_{z'}$  y  $m_{y'}$ :

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_{x'}}{t} + \frac{6(m_{y'} + \delta \cdot f_{z'})}{t^2} \tag{6.9}$$

Utilizando un sistema de ejes local como se indica en la figura:

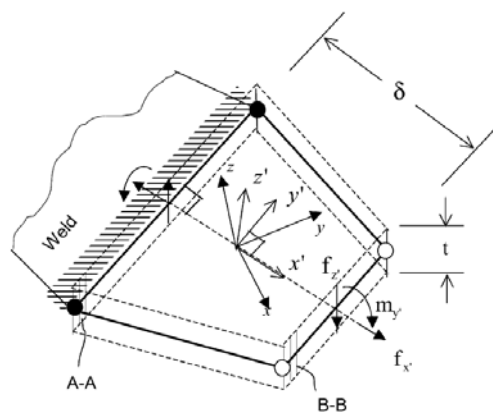


Fig. 6.3.4.1. Métodos para el cálculo de la tensión estructural para elementos de placa adyacentes a la soldadura

Para modelos de placas, al ser en 2D, no se dispone de la distribución de tensiones en el espesor, por lo que pasamos directamente a analizar los resultados numéricos obtenidos para los desalineamientos angulares de 2° y 5°.

### 8.6.2.a) Resultados numéricos y comentarios

Los resultados de los análisis en modelos 2D se muestran en las tablas siguientes:

$\sigma_{hs}$ (MPa)	2°					
	Fsh93		FLsh93		Gsh93	
Dong $\delta=0$ mm	$\sigma_m=316,473$ $\sigma_b=1230,704$	1547,177	$\sigma_m=316,472$ $\sigma_b=1242,528$	1559,000	$\sigma_m=316,472$ $\sigma_b=1200,192$	1516,664
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gsh186)	$\sigma_m=316,474$ $\sigma_b=1236,028$	1552,502	$\sigma_m=316,472$ $\sigma_b=1246,588$	1563,060	$\sigma_m=316,472$ $\sigma_b=1160,38$	1476,852
Dong $\delta=2.5$ mm	$\sigma_m=316,474$ $\sigma_b=1237,317$	1553,791	$\sigma_m=316,472$ $\sigma_b=1253,254$	1569,726	$\sigma_m=316,472$ $\sigma_b=1133,926$	1450,398

Tabla 8.6.2.1 Resultados del método de Dong en modelo plano para desalineación angular de 2°

$\sigma_{hs}$ (MPa)	5°					
	Fsh93		FLsh93		Gsh93	
Dong $\delta=0$ mm	$\sigma_m=315,461$ $\sigma_b=3086,704$	3402,165	$\sigma_m=315,46$ $\sigma_b=3102,912$	3418,372	$\sigma_m=315,46$ $\sigma_b=2997,312$	3312,772
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gsh186)	$\sigma_m=315,460$ $\sigma_b=3086,702$	3402,163	$\sigma_m=315,46$ $\sigma_b=3113,182$	3428,642	$\sigma_m=315,46$ $\sigma_b=2897,95$	3213,41
Dong $\delta=2.5$ mm	$\sigma_m=315,462$ $\sigma_b=3090,028$	3405,49	$\sigma_m=315,46$ $\sigma_b=3129,787$	3445,247	$\sigma_m=315,43$ $\sigma_b=2831,707$	3147,167

Tabla 8.6.2.5 Resultados del método de Dong en modelo plano para desalineación angular de 5°

Hay poca variación entre los valores obtenidos con las diferentes mallas 2D pero en general se obtienen valores mayores de la TPC que con mallas 3D. La principal característica de estos modelos es su bajo coste computacional y adicionalmente, para la obtención de estos resultados, la aplicación del método de Dong es más sencilla que en modelos 3D.

### 8.6.3 Comparación entre modelos sólidos y planos

En las tablas siguientes se recogen los resultados obtenidos mediante el método de Dong en modelos 2D y 3D (elementos shell y solid):

$\sigma_{hs}$ (MPa)	2°					
	Fsh93	Fso186	FLsh93	FLso186	Gsh93	Gso186
Dong $\delta=0$ mm	1547.177	1410.482	1559.000	1457.440	1516.664	1446.004
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para mallas Gruesas)	1552.502	1494.615	1563.060	1512.018	1476.852	1498.249
Dong $\delta=2.5$ mm	1553.791	1507.869	1569.726	1522027	1450.398	1433.598

Tabla 8.6.3.1. Comparación entre modelos 2D y 3D para un desalineamiento angular de 2°.

$\sigma_{hs}$ (MPa)	5°					
	Fsh93	Fso186	FLsh93	FLso186	Gsh93	Gso186
Dong $\delta=0$ mm	3402.165	3079.822	3418.372	3200.855	3312.772	3163.270
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para mallas Gruesas)	3402.163	3258.745	3428.642	3300.940	3213.410	3266.588
Dong $\delta=2.5$ mm	3405.490	3306.915	3445.247	3337.250	3147.167	3354.283

Tabla 8.6.3.2. Comparación entre modelos 2D y 3D para un desalineamiento angular de 5°.

Comparando las columnas de 2 en 2 (para un mismo tamaño relativo de malla) en general, las TPC obtenidas en modelos 2D son mayores que las de modelos 3D excepto en algunos casos sobre mallas gruesas. También, en mallas 2D, hay menos variación de los resultados al aumentar  $\delta$  y las TPC calculadas con  $\delta=0$  son más similares a las calculadas con  $\delta=1$  y 2.5 mm que en los casos de mallas 3D. Las TPC calculadas con  $\delta=0$  también son las menores en todos los casos excepto en mallas gruesas.

### 8.6.4 Comparación entre el método de Dong y la ESL de tensiones

En las tablas siguientes se recogen todos los resultados obtenidos hasta ahora. En primer lugar, para los modelos 3D, se comparan las TPC calculadas mediante la aplicación del método de Dong con las obtenidas por ESL de tensiones en el borde exterior y en el centro de la probeta (para Dong con  $\delta=0$  y 1mm se incluyen tanto los resultados obtenidos con las fórmulas de distribución de tensiones monótona, ecuaciones 8.6.1 y 8.6.2, marcadas con asterisco, y no monótona, ecuaciones 8.6.3 y 8.6.4).

$\sigma_{hs}$ (MPa)	0°		
	Fso186	FLso186	Gso186
ESL exterior	307.660	309.090	301.105
ESL centro	323.472	329.483	314.060
Dong $\delta=0$ mm	*319.730	325.546	328.738
	353.140		
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	*316.765	318.959	310.025
	406.294		
Dong $\delta=2.5$ mm	323.705	322.299	322.059

Tabla 8.6.4.1 Comparación entre métodos de cálculo. Desalineación angular de 0°. Modelos 3D.

$\sigma_{hs}$ (MPa)	2°		
	Fso186	FLso186	Gso186
ESL exterior	1499.192	1508.595	1470.16
ESL centro	1588.839	1616.053	1545.190
Dong $\delta=0$ mm	*1410.482 1699.400	1457.440	1446.004
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	*1494.615 1709.950	1512.018	1498.249
Dong $\delta=2.5$ mm	1507.869	1522.027	1433.598

Tabla 8.6.4.2 Comparación entre métodos de cálculo. Desalineación angular de 2°. Modelos 3D.

$\sigma_{hs}$ (MPa)	5°		
	Fso186	FLso186	Gso186
ESL exterior	3297.528	3307.180	3223.472
ESL centro	3502.335	3536.653	3380.821
Dong $\delta=0$ mm	*3079.822 3680.430	3200.855	3163.270
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	*3258.745 3765.000	3300.940	3266.588
Dong $\delta=2.5$ mm	3306.915	3337.250	3354.283

Tabla 8.6.4.3 Comparación entre métodos de cálculo. Desalineación angular de 5°. Modelos 3D.

Según se muestra en la figura 6.1.1, observando las gráficas de las distribuciones de tensiones  $\sigma_y$  superficiales a medida que nos acercamos al borde de la soldadura (grupos de gráficas 8.5.1.a y b), podemos clasificar esta unión como Tipo I. Como se explica en el apartado 6.1, mediante la tensión de punto caliente obtenida por extrapolación superficial en las uniones Tipo I se recoge muy poco el efecto de la concentración de tensiones por lo que sería de esperar que mediante el método de Dong se obtuviesen mejores resultados. Sin embargo, los resultados obtenidos mediante los dos métodos son muy similares resaltando únicamente que, para desalineamientos angulares distintos de 0°, las TPC calculadas mediante el método de Dong con  $\delta=0$  son las menores y las que más se alejan del resto de TPC en cada mallado.

Para modelos planos, los resultados obtenidos se recogen en las siguientes tablas:

$\sigma_{hs}$ (MPa)	2°		
	Fsh93	FLsh93	Gsh93
ESL exterior	1540.317	1541.519	1532.853
ESL centro	1555.573	1558.246	1566.769
Dong $\delta=0$ mm	1547.177	1559.000	1516.664
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	1552.502	1563.060	1476.852
Dong $\delta=2.5$ mm	1553.791	1569.726	1450.398

Tabla 8.6.4.4 Comparación entre métodos de cálculo. Desalineación angular de 2°. Modelos 2D.



$\sigma_{hs}$ (MPa)	5°		
	Fsh93	FLsh93	Gsh93
ESL exterior	3383.810	3385.546	3377.743
ESL centro	3404.846	3405.647	3413.262
Dong $\delta=0$ mm	3402.165	3418.372	3312.772
Dong $\delta=1$ mm ( $\delta=1.25$ mm para Gso186)	3402.163	3428.642	3213.410
Dong $\delta=2.5$ mm	3405.490	3445.247	3147.167

Tabla 8.6.4.5 Comparación entre métodos de cálculo. Desalineación angular de 5°. Modelos 2D.

En los resultados de modelos 2D, excepto con la malla Ssh93, se aprecia una menor dispersión entre las TPC obtenidas mediante los diferentes métodos.

Tanto en modelos 2D como en modelos 3D, no se aprecia un grado claramente mayor de insensibilidad al tamaño de la malla en el método de Dong al compararlo con el método de ESL de tensiones (en el capítulo 6 se habla de la insensibilidad a la malla del método de Dong comprobada en numerosas investigaciones sobre varias geometrías).

### 8.7 Aplicación del método de Xiao y Yamada

El método desarrollado por Xiao y Yamada, dada la geometría que tenemos bajo estudio, sólo tiene aplicación en los modelos sólidos (ver capítulo 7). En la siguiente tabla se muestran los valores de tensión  $\sigma_y$  a 1 mm bajo el borde de la soldadura sobre la cara exterior de la probeta, en las diferentes mallas utilizadas:

$\sigma_y$ (MPa)	Fso186	FLso186	Gso186
0°	285.97	307.73	294.72
2°	405.47	524.59	502.13
5°	597.99	853.62	812.35

Tabla 8.7.1 Tensión  $\sigma_y$  a 1 mm bajo el borde de la soldadura.

Se obtienen valores muy inferiores, a la tensión de punto caliente obtenida mediante otros métodos. Como se comenta en el apartado 7.5, este método no obtiene buenos resultados en los casos en los que las tensiones de flexión ( $\sigma_b$ ) son dominantes con respecto a las de membrana ( $\sigma_m$ ), especialmente cuando el espesor de la chapa base es pequeño. También se recomienda de modo general que el tamaño de los elementos de la malla en la región del borde de la soldadura no debe ser superior a 1 mm con objeto de que el AEF proporcione la tensión a 1mm con suficiente precisión y esto no se cumple con las mallas FLso186 y Gso186.