



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

RESUMEN

Cualquier construcción diseñada está compuesta de multitud de piezas ensambladas entre sí. Es importante que estas uniones sean capaces de resistir y transmitir los esfuerzos, logrando como mínimo, que las uniones sean capaces de aguantar lo mismo que los materiales que unen. Cuando los niveles de carga a transmitir son elevados, se suele recurrir a uniones del tipo escalonado. Estas uniones son efectivas si se optimiza la geometría de dicha unión y se le aplica un modelo de análisis adecuado. Existen métodos unidimensionales para definir la optimización de la geometría, pero el criterio de fallo no se encuentra suficientemente definido actualmente. Este proyecto se basa en la introducción de un modelo de fallo progresivo en un programa de optimización. Para dicho criterio se utilizará el modelo de Hashin como criterio de iniciación, posteriormente se irá reduciendo progresivamente la rigidez del material una vez superado el criterio de iniciación establecido. Para la optimización de la unión se emplea un método de orden cero mientras que el posterior análisis de los resultados, se realizará mediante un programa de elementos finitos ya que mediante el empleo del mismo, resulta posible introducir la plasticidad en el adhesivo obteniendo resultados que se aproximan mejor a lo que sucede en la realidad. Finalmente se analizarán un conjunto de uniones con diferentes configuraciones de carga y topología.

Palabras clave: unión, adhesiva, escalonada, optimización.

Índice

MEMORIA	5
Capítulo 1: Introducción teórica	6
1.1. Características de las uniones escalonadas.	6
1.2. Tipos de uniones.	6
1.3. Adhesivos.	9
1.4. Modos de fallo y comportamiento de las uniones adhesivas.	10
1.5. Modelos analíticos en uniones adhesivas.	11
1.5.1. Adheridos ultrarrígidos.	12
1.5.2. Adheridos deformables.	14
1.5.3. Modelo de adheridos deformables con plasticidad en una unión escalonada.	18
1.5.4. Modelo de Mortensen y Thomsen.	21
1.6. Modelo de fallo progresivo.	23
1.6.1. Modelo constitutivo.	23
1.6.2. Criterio de iniciación.	25
1.6.3. Criterio de evolución.	26
Capítulo 2. Planteamiento del problema y optimización.	28
2.1. Introducción a la optimización.	29
2.2. Métodos de optimización.	30
2.3. Método <i>Sweep</i>	30
2.4. Método <i>Subproblem Approximation</i>	31
2.4.1. Función objetivo.	31
2.4.2. Minimización del subproblema de aproximación.	32
2.4.3. Convergencia.	32
2.5. Método <i>First Order</i>	33
2.5.1. Función objetivo.	33
2.5.2. Direcciones de búsqueda.	34

2.5.3. Convergencia.	35
Capítulo 3. Programa.	36
3.1. Composición del programa.	36
3.1.1. Macro de optimización.	38
3.1.2. Macro Principal.	42
3.1.3. Macro de creación de la geometría.	43
3.1.4. Macro de propiedades del material.	45
3.1.5. Macro de mallado.	50
3.1.6. Macro de las condiciones de contorno.	52
3.1.7. Macro del criterio de evolución.	53
3.1.8. Macro de solución.	54
3.1.9. Macro de postprocesado.	57
3.1.10. Submacro del postproceso.	57
3.1.11. Otras macros.	59
3.2. Algoritmo de solución del programa.	64
Capítulo 4. Resultados.	68
4.1. Unión metal-metal.	68
4.2. Unión compuesto-metal.	79
4.3. Unión laminado de fibra de carbono ortótropo y aluminio.	87
Capítulo 5. Conclusiones.	99
Bibliografía.	100
PRESUPUESTO.	102

MEMORIA

Capítulo 1: Introducción teórica.

Existen diversos tipos de uniones en la actualidad, pero cuando se trata de materiales compuestos, solamente dos tipos de uniones son las usualmente empleadas. Las uniones mecánicas mediante tornillos y las uniones adhesivas. Las uniones mecánicas en materiales compuestos no se comportan de la misma manera que lo realizan en los metales, por lo que se suelen emplear usualmente las uniones adhesivas.

En las uniones mecánicas donde los materiales a unir son metales, se produce una redistribución de tensiones entorno al agujero debido a la ductilidad del metal. En cambio, al utilizar materiales compuestos, no sucede lo mismo debido a la menor ductilidad de estos. Por lo que en las uniones atornilladas con materiales compuestos, la resistencia de la unión siempre será menor que la del compuesto, variando entre el 60% de la resistencia del material para uniones con varias filas de tornillos y el 50% para uniones que solo presentan una fila de tornillos. Además de lo mencionado anteriormente, para materiales altamente anisótropos es imposible realizar una unión atornillada desde el punto de vista práctico.

En cambio, la unión adhesiva en materiales cuasiisótropos está perfectamente establecida y su eficiencia es mayor a las de las uniones atornilladas.

1.1. Características de las uniones escalonadas.

Las uniones adhesivas presentan las siguientes ventajas:

- La concentración local de tensiones se puede minimizar debido a que las cargas se distribuyen por una gran zona y no se requiere de agujeros.
- El incremento de peso debido a la unión es bajo.

Por el contrario, las desventajas son:

- Es imposible desensamblar los componentes sin dañar el elemento adherente.
- Son muy sensibles a la temperatura y a la humedad.
- Es necesario el preparar previamente las superficies a unir.
- Es difícil establecer la integridad de la unión mediante inspección.

1.2. Tipos de uniones.

Existen muchos tipos de uniones adhesivas, a continuación se enumeraran algunas de ellas:

- **Uniones en T.** Suelen sufrir la aparición de esfuerzos de desgarro o pelado. Algunas de las topologías de construcción se pueden apreciar en la siguiente imagen.

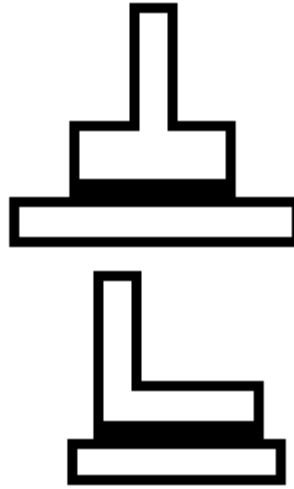


Imagen 1. Ejemplos de uniones en T.

- **Uniones adhesivas a tope.** Apropriadadas para piezas que tengan que sufrir esfuerzos de tracción o compresión. Si se produce una desalineación de la carga, se puede producir el desgarro de la unión, este fenómeno se puede solucionar biselando las caras de la unión.

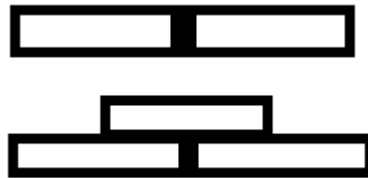


Imagen 2. Ejemplos de uniones adhesivas a tope.

- **Uniones de solape.** Las más empleadas debido a su fácil realización. Las cargas de tracción aplicadas generan esfuerzos de cortadura que, tal y como se explicara posteriormente, es como mejor trabaja el adhesivo. A continuación se enumeraran las tipologías de las uniones a solape:
 - **Simple solape.** En este tipo de uniones se producen tensiones de pelado que se equilibran por el momento generado por la distribución de tensiones, y están diseñadas para cargas pequeñas.



Imagen 3. Unión de simple solape.

- **Doble solape.** Debido a la simetría de la unión, se disminuye las tensiones de pelado. Aguantan una carga mayor que las de simple solape.



Imagen 4. Unión de doble solape.

- **Uniones biseladas.** No surgen tensiones de pelado y presentan buenas eficiencias para ángulos pequeños. Si el ángulo resulta ser muy pequeño, son difíciles de fabricar.



Imagen 5. Unión biselada.

- **Unión Escalonada.** Se emplean para cargas elevadas y son más sencillas de construir que las biseladas. Debido a su simetría, el efecto de la tensión de pelado no es importante. Es fundamental realizar un buen diseño pues una mala distribución de tensiones puede provocar la rotura de la unión.



Imagen 6. Unión escalonada.

1.3. Adhesivos.

El adhesivo es la sustancia que aplicada a las superficies de los materiales permite una unión resistente a la separación. El mecanismo de unión dependerá de la adhesión, que es la fuerza de unión del adhesivo al sustrato, y de la cohesión, que es la fuerza interna del adhesivo. La mayoría de los adhesivos estructurales son termoestables debido a que tienen mayor resistencia que los termoplásticos. Los más importantes son:

- **Resinas epoxi.** Tienen un campo de aplicación muy amplio, alcanzando resistencias muy elevadas. Poseen la capacidad de llenar huecos.
- **Uretanos.** Versátiles y con resistencia elevada. Son tenaces, flexibles y resistentes al impacto.
- **Adhesivos anaeróbicos.** Endurecen en ausencia de oxígeno. Debido a su rápido endurecimiento no se utilizan en ensamblajes de piezas grandes.
- **Cianoacrilatos.** Se trata de un adhesivo anaeróbico muy rápido y de fácil aplicación.
- **Adhesivos acrílicos.** Tienen una gran resistencia al pelado y se pueden aplicar sobre superficies sucias.

Para la selección del adhesivo a utilizar hay que basarse en la temperatura máxima de trabajo. Como referencia señalar que, la temperatura máxima admisible con los adhesivos epoxy es aproximadamente de 70°C. Esta temperatura máxima de trabajo, va a estar limitada por la temperatura de transición vítrea del adhesivo. Por tanto, la temperatura máxima de trabajo junto con la correcta preparación de las superficies a unir y el uso de una tensión mínima baja, determinarán la durabilidad de las uniones adhesivas.

En las uniones de doble solape y escalonadas, la resistencia de la unión dependerá de la energía de deformación a cortadura del adhesivo. Debido a esto, los adhesivos dúctiles se presentan como los candidatos idóneos para este tipo de uniones, debido a que presentan una alta deformación a rotura y un área bajo la curva de tensión-deformación elevada.

Las curvas de tensión-deformación del adhesivo varían con la temperatura, pero la energía de deformación a rotura que es el área bajo la curva, se mantiene constante. Esto implica que para aplicaciones con temperatura máxima de trabajo elevada, conviene utilizar adhesivos frágiles ya que su curva de comportamiento es más favorable.

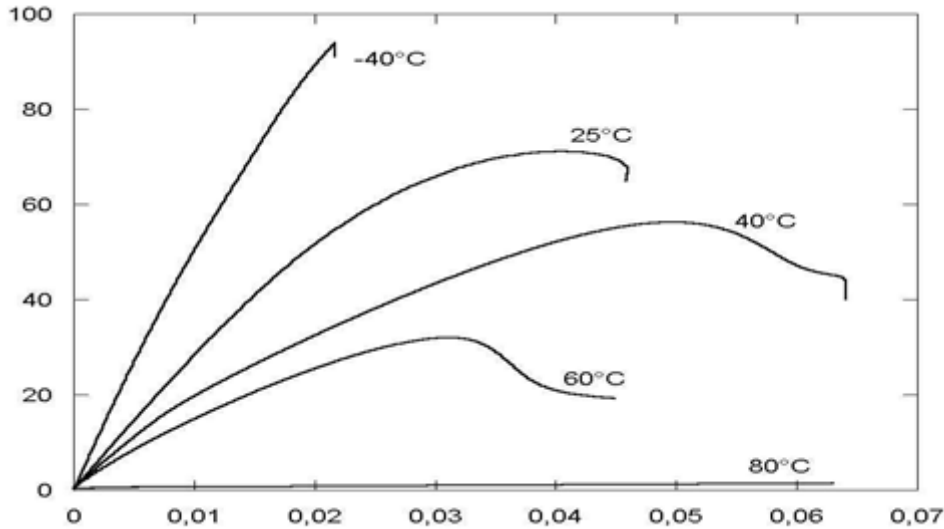


Imagen 7. Curva tensión-deformación adhesivo a distintas temperaturas.

1.4. Modos de fallo y comportamiento de las uniones adhesivas.

Una unión adhesiva puede fallar por los diversos motivos:

- **Fallo de los adheridos.** Dentro de fallo, existen diversos tipos:
 - **Fallo por tracción.** Asociado normalmente al fallo de la fibra.
 - **Fallo por tracción interlaminar.** Asociado a la matriz que une las láminas del laminado.
 - **Fallo por tracción transversal.** Asociado a un fallo de la interfase entre la fibra y la matriz.
- **Fallo cohesivo en el adhesivo.** Es la rotura del adhesivo, este tipo de fallo debe evitarse ya que significaría que la unión está mal diseñada.
- **Fallo de la interfase.** Este fallo es fácilmente evitable ya que es debido a una preparación incorrecta de las superficies a unir.

Las uniones adhesivas trabajan bien cuando son sometidas a esfuerzos de cortadura, pero ante los esfuerzos de tracción su resistencia se ve afectada. Por ello, el tipo de unión a elegir vendrá determinada por el espesor de los adheridos, o lo que es lo mismo, de la carga que debe transmitir la unión. Para cargas bajas, se recomienda la unión de simple solape. Según aumenta la carga y por tanto el espesor de las piezas a unir, se van haciendo más adecuadas las uniones de doble solape. Finalmente las uniones escalonadas son la única solución cuando los espesores de los adheridos son muy elevados.

Dependiendo del tipo de unión, existe un espesor mínimo de los adheridos, por debajo del cual el fallo que se producirá en la unión no es debido al adhesivo, si no a los adheridos.

Por todo lo comentado, conviene que los espesores de los adheridos sean aquellos que harán que la resistencia del adhesivo sea mayor que la de los componentes. En concreto, se emplearan espesores de adheridos que provoquen que el adhesivo sea capaz de soportar el 150% de la carga máxima de los mismos. Además, el espesor del adhesivo ha de ser mínimo, siendo su espesor siempre menor a 0.2 mm.

1.5. Modelos analíticos en uniones adhesivas.

Los modelos que se van a explicar a continuación han sido extraídos [1], [2], [3], [12] y [15].

Existen diversos análisis de tensiones para uniones adhesivas. Brevemente y sin entrar en un detalle excesivo, se va a proceder a explicar los tres modelos del comportamiento de uniones de doble solape y escalonadas. Los dos primeros están explicados para uniones de doble solape, pero posteriormente se ampliara el segundo modelo introduciendo plasticidad en el adhesivo y realizándolo finalmente para las uniones escalonadas. El último modelo es un modelo de uniones escalonadas donde se tiene en cuenta que uno de los adherentes sea un material compuesto.

La distribución de tensiones tangenciales en las uniones depende de la rigidez relativa entre los componentes adheridos y la capa de adhesivo como muestra la siguiente imagen:

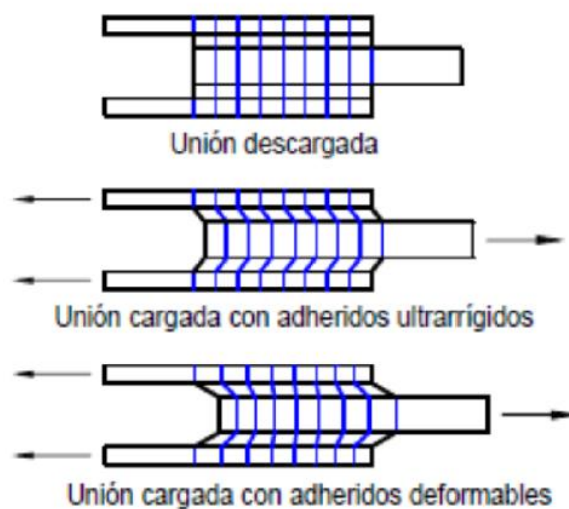


Imagen 8. Comportamiento de las uniones de doble solape.

Si la rigidez de los adheridos es muy alta comparada con la rigidez de cortadura del adhesivo, los desplazamientos en los elementos del adherido serán constantes. En el caso contrario (la rigidez del adherido no sea lo suficientemente elevada), existe una distribución de desplazamientos en los adheridos a lo largo de la unión.

Los dos modelos que se van a exponer a continuación (adheridos ultrarrígidos y adheridos deformables), han sido extraídos del libro de E. Giner y J. Albelda [1].

1.5.1. Adheridos ultrarrígidos.

Este caso no se suele presentar habitualmente en las uniones, pero sirve para comprender mejor el comportamiento de la unión.

Las hipótesis de las que parte este modelo son:

- El comportamiento de los elementos de los adheridos se supone elástico y lineal, siendo sus deformaciones despreciables frente a la deformación angular del adhesivo.
- El comportamiento del adhesivo es lineal.
- Se supone deformación plana.
- No se considera flexión por parte de los adheridos.

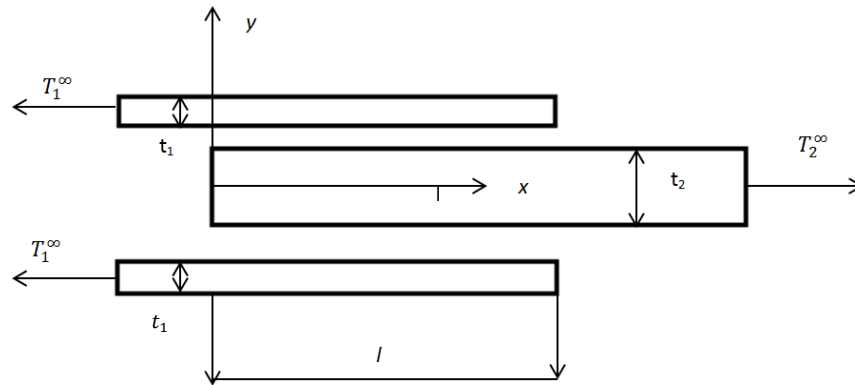


Imagen 9. Unión modelo ultrarrígido.

Las ecuaciones diferenciales de equilibrio interno son:

$$\frac{dT_1}{dx} = -\tau(x) = -G\gamma \quad (1)$$

$$\frac{dT_2}{dx} = 2\tau(x) = 2G\gamma \quad (2)$$

Donde T son los esfuerzos longitudinales por unidad de anchura. Integrando y aplicando las condiciones de contorno:

$$T_1(l) = T_2(0) = 0 \quad (3)$$

Se obtiene:

$$T_1 = -G\gamma x + G\gamma l \quad (4)$$

$$T_2 = 2G\gamma x \quad (5)$$

Si aplicamos la condición para obtener la deformación angular:

$$T_1(0) = T_1^\infty \quad (6)$$

$$T_2(l) = T_2^\infty \quad (7)$$

Y sabiendo que ambas deformaciones angulares son iguales y la unión es simétrica, llegamos finalmente:

$$\sigma_1 = \frac{T_2^\infty}{2t_1} \frac{l-x}{l} \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \frac{T_2^\infty}{t_2} \frac{x}{l} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{T_2^\infty}{2l} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{T_2^\infty}{2Gl} \quad (11)$$

Del modelo obtenido tenemos que la tensión y deformación es constante en el adhesivo tal y como muestran las gráficas siguientes.

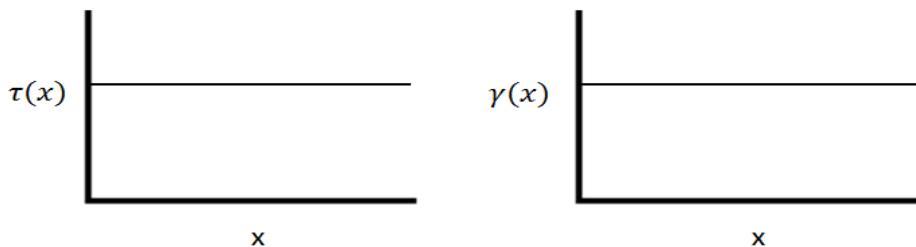


Imagen 10. Tensión tangencial y deformación angular en el adhesivo.

En la realidad, el uso de materiales como aluminio, titanio o plásticos reforzados en la unión no asegura que la rigidez a cortadura del adhesivo sea despreciable frente a la de los adheridos y este modelo no suele representar bien lo que sucede en realidad en estas uniones.

1.5.2. Adheridos deformables.

Este modelo es el modelo de cortadura de Volkersen, es el modelo más simple que tiene cierta validez y que tiene en cuenta la rigidez de los adheridos.

Las hipótesis para este modelo son:

- El comportamiento del material de los adheridos es lineal. Si se trata de un laminado, se supone que la lámina en contacto con el adhesivo está orientada en la dirección de la carga.
- El comportamiento del adhesivo es elástico-perfectamente plástico.
- Se supone deformación plana.
- No se considera la flexión en los materiales adheridos.

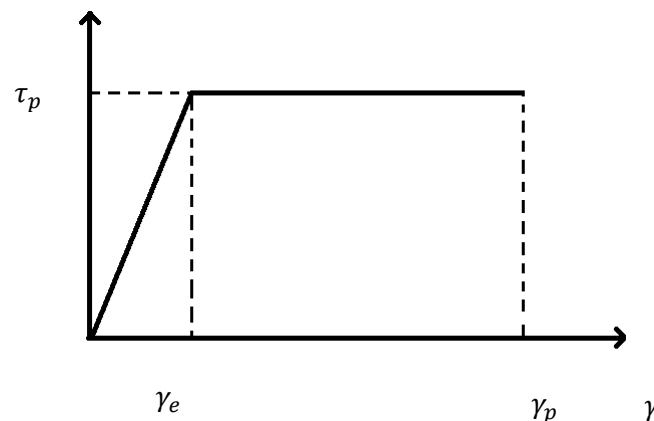


Imagen 11. Modelo plástico perfecto del adhesivo.

El modelo de comportamiento del adhesivo viene dado por:

$$\tau = \begin{cases} G\gamma & 0 \leq \gamma < \gamma_e \\ \tau_p & \gamma_e \leq \gamma \leq \gamma_p \end{cases} \quad (12)$$

Donde γ_e es la deformación en el límite elástico y γ_p es la deformación a rotura. El comportamiento de los adheridos vendrá dado por la ley de Hooke. La deformación angular vendrá dado por:

$$\gamma = \frac{u_2 - u_1}{t} \quad (13)$$

Siendo t, el espesor del adhesivo, las ecuaciones de equilibrio interno serán:

$$\frac{dT_1}{dx} = -\tau(x) \quad (14)$$

$$\frac{dT_2}{dx} = 2\tau(x) \quad (15)$$

Donde T es el esfuerzo longitudinal por unidad de anchura. Y las deformaciones normales en el eje X:

$$\varepsilon_1 = \frac{du_1}{dx} = \frac{T_1}{E_1 t_1} \quad (16)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{du_2}{dx} = \frac{T_2}{E_2 t_2} \quad (17)$$

Si derivamos respecto de X (13), utilizamos (16) y (17), volvemos a derivar respecto de X y utilizando (11) y (12) obtenemos:

$$\frac{d^2\gamma}{dx^2} = \frac{1}{t} \left(\frac{dT_2}{dx} \frac{1}{E_2 t_2} - \frac{dT_1}{dx} \frac{1}{E_1 t_1} \right) \quad (18)$$

En las zonas de comportamiento elástico, se multiplica por G y se aplica la ley de Hooke tenemos:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} = \tau \frac{G}{t} \left(\frac{2}{E_2 t_2} + \frac{1}{E_1 t_1} \right) \quad (19)$$

Con lo que se define la constante λ^2 como:

$$\lambda^2 = \frac{G}{t} \left(\frac{2}{E_2 t_2} + \frac{1}{E_1 t_1} \right) \quad (20)$$

La solución al problema de comportamiento totalmente elástico del adhesivo situando el origen del sistema en el punto de menor tensión tangencial tal y como muestra la siguiente imagen es:

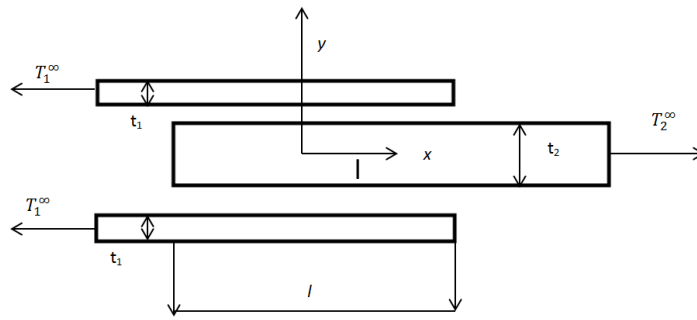


Imagen 12. Modelo de Volkersen.

$$\tau = A ch (\lambda x) \quad (21)$$

$$\gamma = \frac{A}{G} ch (\lambda x) \quad (22)$$

Como es una unión equilibrada, el valor mínimo de τ se alcanzara en el origen del sistema de referencia. Además, por equilibrio, en una sección cualquiera tal y como muestra la imagen 13, debe cumplirse que:

$$T_2^\infty = 2T_1 + T_2 \quad (23)$$

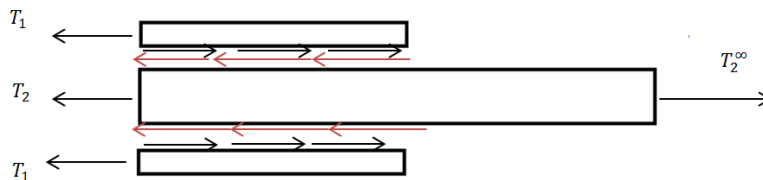


Imagen 13. Equilibrio en una sección de la unión.

Si particularizamos para el punto de menor tensión tangencial que se denotara por el supra índice 0.

$$T_2^\infty = 2T_1^0 + T_2^0 \quad (24)$$

Aplicando la condición de mínima deformación angular del adhesivo en el caso de comportamiento elástico, tenemos:

$$\frac{T_1^0}{E_1 t_1} = \frac{T_2^0}{E_2 t_2} \quad (25)$$

Sustituyendo en la condición de equilibrio anterior para el punto de menor tensión tangencial, dará:

$$T_1^0 = \frac{E_1 t_1}{2E_1 t_1 + E_2 t_2} T_2^\infty \quad (26)$$

Con esta ecuación y a partir de las ecuaciones de equilibrio interno se saca el valor de la constante A. Por lo que finalmente, la ecuación de la tensión tangencial en una unión de doble solape (o en un escalón de la escalonada) sigue la siguiente ecuación:

$$\tau(x) = \frac{T_2^\infty}{4} \frac{\lambda}{\operatorname{sh}\left(\lambda \frac{L}{2}\right)} \operatorname{ch}(\lambda x) \quad (27)$$

Que gráficamente tiene el siguiente aspecto:

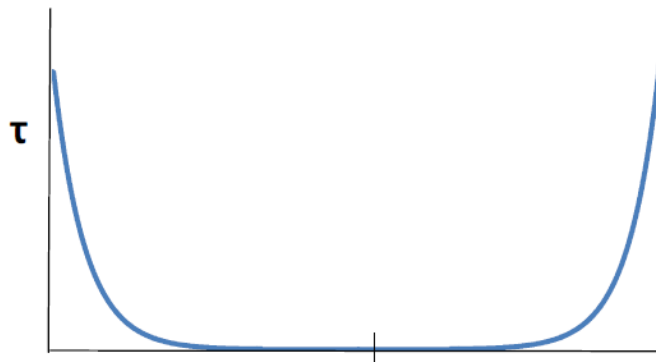


Imagen 14. Distribución de las tensiones en régimen elástico.

Esta distribución solo resulta válida para una unión de doble solape (o para cada escalón de la escalonada) equilibrada y con el adhesivo trabajando en régimen elástico. Se puede observar que las tensiones máximas se alcanzan en los extremos de la longitud del solape, y la mínima tensión se producirá en el centro del solape.

Si la tensión en el adhesivo alcanza la zona de comportamiento plástico, sucederá en los extremos del adhesivo. En estos casos, la ecuación de comportamiento de las deformaciones es constante quedando de la siguiente forma:

$$\frac{d^2\gamma}{dx^2} = \frac{\tau_p}{t} \left(\frac{2}{E_2 t_2} + \frac{1}{E_1 t_1} \right) = cte \quad (28)$$

Y la solución al problema plástico vendrá dada por:

$$\gamma = \frac{\lambda^2 \tau_p}{2G} x^2 + A'x + B' \quad (29)$$

Para calcular las constantes A' y B' debemos identificar en que caso nos encontramos de los siguientes:

- Caso de plastificación del extremo izquierdo o derecho.
- Caso de plastificación de ambos extremos.
- Caso puramente elástico.

1.5.3. Modelo de adheridos deformables con plasticidad en una unión escalonada.

Habiendo explicado el modelo de los adheridos deformables para una unión de doble solape, se va a explicar este mismo modelo, para el supuesto de que existiera plasticidad en ambos extremos pero aplicados a una unión escalonada, ya que como se verá posteriormente, se introducirá un comportamiento real del adhesivo en el programa de elementos finitos.

Para estudiar el comportamiento de la unión escalonada, vamos a ver el equilibrio que se producirá en un escalón n de la unión, entre el inicio de la unión y el punto de mínima tensión.

$$T_{2_{i-1}} + 2T_{1_{i-1}} = 2T_{1_i}^0 + T_{2_i}^0 \quad (30)$$

Solamente en los escalones inicial y final el equilibrio será distinto siendo:

$$T_{2_{i-1}} = T_2^\infty \quad T_{1_{i-1}} = 0 \quad (31)$$

$$T_{2_i} = 0 \quad T_{1_i} = T_1^\infty \quad (32)$$

Para el caso en el que plastifiquen ambos escalones tenemos:

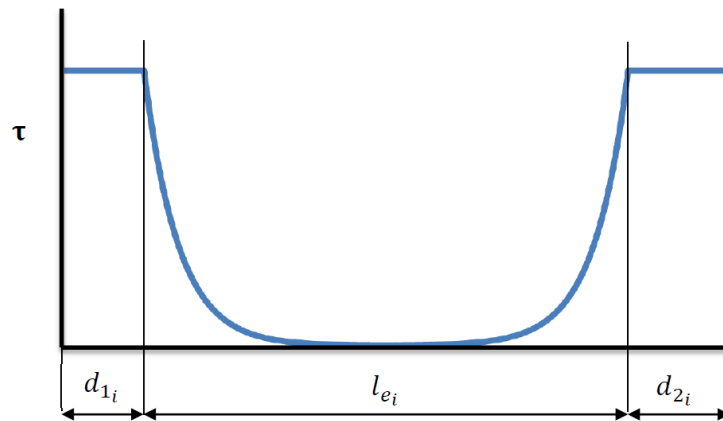


Imagen 15. Distribución de tensiones con el extremo izquierdo plastificado.

En el tramo de comportamiento elástico, las tensiones tangenciales tendrán el valor:

$$\tau(x) = \frac{\tau_p}{ch\left(\lambda_i \frac{l_{ei}}{2}\right)} ch(\lambda_i x) \quad (33)$$

Para hallar los parámetros geométricos se aplica el equilibrio a una de las láminas de la unión. La diferencia de carga al inicio y final del escalón debe ser compensada por la resultante de las tensiones tangenciales que aparecen en el adhesivo tal y como muestra la siguiente imagen:

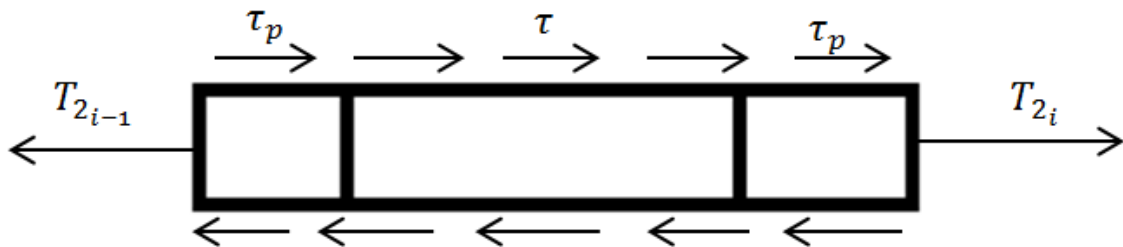


Imagen 16. Equilibrio en un escalón de la unión con extremos plastificados.

La ecuación final tras realizar la integral a lo largo del escalón de las tensiones tangenciales sale de:

$$T_{2i} = T_{2i-1} - 2\tau_p \left(d_{1i} + d_{2i} + \frac{2}{\lambda_i} \tanh\left(\lambda_i \frac{l_{ei}}{2}\right) \right) \quad (34)$$

Para resolver el sistema de ecuaciones sacamos la ecuación de equilibrio en el punto de mínima tensión tangencial, la cual tras operar resulta:

$$T_{2i-1} = T_{2i}^0 + 2\tau_p \left(d_{1i} + \frac{1}{\lambda_i} \tanh \left(\lambda_i \frac{l_{ei}}{2} \right) \right) \quad (35)$$

Obteniendo las constantes A' y B' de la ecuación (29) con las siguientes condiciones de contorno para el extremo izquierdo:

$$\frac{dy}{dx} (x = 0) = -\frac{1}{t} \left(\frac{T_{2i-1}}{E_2 t_2} - \frac{T_{1i-1}}{E_1 t_1} \right) = A' \quad (36)$$

$$\gamma(x = d_{1i}) = \gamma_e = \frac{\lambda_i^2 \tau_p}{2G} d_{1i}^2 - \frac{1}{t} \left(\frac{T_{2i-1}}{E_2 t_2} - \frac{T_{1i-1}}{E_1 t_1} \right) d_{1i} + B' \quad (37)$$

Quedando finalmente para el lado izquierdo:

$$\gamma_i = \frac{\lambda_i^2 \tau_p}{2G} (x^2 - d_{1i}^2) - \frac{1}{t} \left(\frac{T_{2i-1}}{E_2 t_2} - \frac{T_{1i-1}}{E_1 t_1} \right) (x - d_{1i}) + \gamma_e \quad (38)$$

Y para el lado derecho:

$$\gamma_i = \frac{\lambda_i^2 \tau_p}{2G} x^2 - \left(\frac{1}{t} \left(\frac{T_{2i-1}}{E_2 t_2} - \frac{T_{1i-1}}{E_1 t_1} \right) - \frac{\lambda_i^2 \tau_p}{2G} d_{2i} \right) x + \gamma_e \quad (39)$$

Finalmente se calculan las tensiones que dan para el extremo izquierdo:

$$T_2 = T_{2s}^0 - \frac{2\tau_p}{\lambda_i} \left(\frac{\text{sh}(\lambda_i x)}{\text{ch} \left(\lambda_i \frac{l_{ei}}{2} \right)} + \text{th} \left(\lambda_i \frac{l_{ei}}{2} \right) \right) \quad (40)$$

Siendo el subíndice s, la tensión en el tramo elástico por la izquierda. Y para el tramo derecho:

$$T_2 = T_{2s'}^0 - 2\tau_p x \quad (41)$$

Con s' la tensión en el tramo elástico por la derecha.

La obtención de las ecuaciones aportadas en este último apartado, así como un desarrollo completo de estas para su posterior aplicación a una unión escalonada, han sido desarrolladas por Héctor Miralles García en su TFG [12].

1.5.4. Modelo de Mortensen y Thomsen.

F. Mortensen y O.T. Thomsen [2] crearon un modelo de análisis para uniones biseladas y en escalón específico para uniones con elementos compuestos. A continuación se explica brevemente en que consiste su modelo.

En la siguiente imagen se muestra un laminado ortótropo sujeto a unas cargas. El espesor del adherente son t_1 y t_2 fuera del solapamiento. Dentro del solape, los espesores de los adherentes son $t_1(x) = t_1^m$; $t_2(x) = t_2^m$ con $0 \leq x \leq L$.

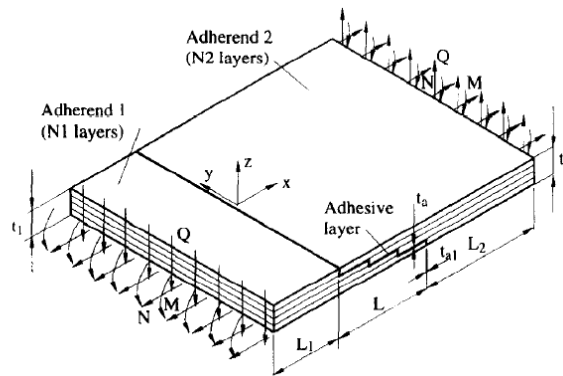


Imagen 17. Ilustración de las fuerzas actuantes en una unión escalonada.

Las hipótesis de este modelo son:

- Las placas están descritas por la teoría de placas de Kirchhoff.
- Los laminados ortótropos se usan en la teoría clásica del laminado.
- Los laminados se comportan de manera elástica.
- Las tensiones son pequeñas y las rotaciones son muy pequeñas.
- El adhesivo se comporta de manera lineal y las propiedades no lineales del adhesivo se introducen mediante una aproximación tangente al módulo en conjunto con un criterio de Von Mises modificado.

El campo de desplazamientos se puede definir como:

$$u_0^i = u_0^i(x); v_0^i = v_0^i(x); w^i = w^i(x) \quad (42)$$

Donde u_0^i es el desplazamiento longitudinal en el plano medio, v_0^i es el desplazamiento en la dirección del espesor en el plano medio y w^i es el desplazamiento transversal en el plano medio. Por tanto:

$$u_{0,y}^i = v_{0,y}^i = w_{,y}^i = w_{,yy}^i = 0 \quad (43)$$

Aplicando en la ecuación (43) las ecuaciones constitutivas del laminado obtenemos

$$\begin{aligned}
 N_{xx}^i &= A_{11}^i u_{0,x}^i + A_{16}^i v_{0,x}^i - B_{11}^i w_{xx}^i \\
 N_{yy}^i &= A_{12}^i u_{0,x}^i + A_{26}^i v_{0,x}^i - B_{12}^i w_{xx}^i \\
 N_{xy}^i &= A_{16}^i u_{0,x}^i + A_{66}^i v_{0,x}^i - B_{16}^i w_{xx}^i \\
 M_{xx}^i &= B_{11}^i u_{0,x}^i + B_{16}^i v_{0,x}^i - D_{11}^i w_{xx}^i \\
 M_{yy}^i &= B_{12}^i u_{0,x}^i + B_{26}^i v_{0,x}^i - D_{12}^i w_{xx}^i \\
 M_{xy}^i &= B_{16}^i u_{0,x}^i + B_{66}^i v_{0,x}^i - D_{16}^i w_{xx}^i
 \end{aligned} \tag{44}$$

Donde M son los momentos resultantes y N las tensiones planas resultantes, mientras que A, B y D son los términos de las matrices de rigidez de un laminado. Para una unión escalonada, los valores de A, B y D varían en cada escalón dependiendo del espesor del adherente y el número de capas en cada escalón.

Para una unión escalonada, se definen las funciones de equilibrio en 3 regiones:

$$-L_1 \leq x \leq 0; 0 \leq x \leq L; L \leq x \leq L + L_2 \tag{45}$$

Las ecuaciones quedan:

$$\left(\begin{array}{cc}
 N_{xx,x}^1 = -\tau_{ax} & N_{xx,x}^2 = \tau_{ax} \\
 N_{xy,x}^1 = -\tau_{ay} & N_{xy,x}^2 = \tau_{ay} \\
 Q_{x,x}^1 = -\sigma_a & Q_{x,x}^2 = \sigma_a \\
 M_{xx,x}^1 = Q_x^1 - \tau_{ax} \frac{t_1^m + t_a}{2} & M_{xx,x}^2 = Q_x^2 - \tau_{ax} \frac{t_2^m + t_a}{2} \\
 M_{xy,x}^1 = Q_y^1 - \tau_{ay} \frac{t_1^m + t_a}{2} & M_{xy,x}^2 = Q_y^2 - \tau_{ay} \frac{t_2^m + t_a}{2}
 \end{array} \right) \text{ Para } 0 \leq x \leq L \tag{46}$$

$$\left(\begin{array}{l}
 N_{xx,x}^i = 0 \\
 N_{xy,x}^i = 0 \\
 Q_{x,x}^i = 0 \\
 M_{xx,x}^i = Q_x^i \\
 M_{xy,x}^i = Q_y^i
 \end{array} \right) \text{ con } i = 1 \text{ en } -L_1 \leq x \leq 0 \text{ y con } i = 2 \text{ en } L \leq x \leq L + L_2 \tag{47}$$

Donde t_1 y t_2 son los espesores del adherido en cada escalón, t_a corresponde al espesor del adhesivo. Las ecuaciones constitutivas del adhesivo son:

$$\tau_{ax} = \frac{G_a}{t_a} (u_2 - u_1) = \frac{G_a}{t_a} \left(u_0^2 - \frac{t_2}{2} \beta_x^2 - u_0^1 - \frac{t_1}{2} \beta_x^1 \right) \quad (48)$$

$$\tau_{ay} = \frac{G_a}{t_a} (v_2 - v_1) = \frac{G_a}{t_a} (v_0^2 - v_0^1) \quad (49)$$

$$\sigma_a = \frac{E_a}{t_a} (w^2 - w^1) \quad (50)$$

Finalmente se llega a un conjunto de 16 ecuaciones tras sacar las derivadas. Ecuaciones que van a ser omitidas debido a su gran número y volumen.

Si se aplican las condiciones de contorno oportunas se llega a la solución del problema.

1.6. Modelo de fallo progresivo.

A continuación se va a explicar en qué consiste un modelo de fallo progresivo, puesto que en el programa diseñado se emplea para el análisis de las uniones. Concretamente se va a explicar el modelo de fallo progresivo de I. Lapczyk y J. A. Hurtado [3].

Un modelo de fallo progresivo tiene en cuenta la reducción de la resistencia del material cuando falla una parte del laminado. La evolución del criterio de fallo se basa en la energía disipada durante el fallo y el incremento de la variable de daño está gobernado por un desplazamiento equivalente definido para cada modo de fallo.

1.6.1. Modelo constitutivo.

El efecto del daño se puede tener en cuenta reduciendo los valores de los coeficientes de rigidez. En este modelo, la relación entre la tensión eficaz $\hat{\sigma}$ y la tensión nominal σ tiene la forma:

$$\hat{\sigma} = M\sigma \quad (51)$$

Donde M es una matriz diagonal y simboliza el daño que sufre el material, la matriz M tiene la forma:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1-d_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-d_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1-d_s} \end{bmatrix} \quad (52)$$

Donde d_f, d_m y d_s son variables de daño para los modos de fallo de la fibra, la matriz y a cortadura respectivamente. Utilizando esta relación y la degradación del ratio de Poisson se obtiene que la matriz de daño presenta la forma:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -v_{21} & 0 \\ \frac{(1-d_f)E_1}{E_2} & \frac{1}{(1-d_m)E_2} & 0 \\ \frac{-v_{12}}{E_1} & 0 & \frac{1}{(1-d_s)G_{12}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Y la correspondiente matriz de rigidez se obtiene de:

$$C = \frac{1}{1 - (1-d_f)(1-d_m)v_{12}v_{21}} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)G_{12} \end{bmatrix} \quad (54)$$

Las variables d_f y d_m pueden tener valores distintos para compresión y tracción, mientras que la variable restante es dependiente de las otras dos de la forma:

$$d_s = 1 - (1-d_{ft})(1-d_{fc})(1-d_{mt})(1-d_{mc}) \quad (55)$$

El ratio de energía disipada durante el proceso de daño es:

$$\dot{\mathcal{K}} = Y_{ft}\dot{d}_{ft} + Y_{fc}\dot{d}_{fc} + Y_{mt}\dot{d}_{mt} + Y_{mc}\dot{d}_{mc} \quad (56)$$

Con Y siendo $Y_i = \frac{\partial G}{\partial d_i}$ donde i denota a cada modo de fallo y G es la energía libre de Gibbs, por tanto la variable Y será una variable de fuerza termodinámica asociada al fallo. Concretamente la energía libre de Gibbs tiene la forma:

$$G = \frac{1}{2E_1} \left(\frac{\langle \sigma_{11} \rangle^2}{(1-d_{ft})} + \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle^2}{(1-d_{fc})} \right) + \frac{1}{2E_2} \left(\frac{\langle \sigma_{22} \rangle^2}{(1-d_{mt})} + \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle^2}{(1-d_{mc})} \right) - \frac{v_{12}\sigma_{11}\sigma_{22}}{E_1} + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}(1-d_s)} \quad (57)$$

Con $\langle x \rangle = \frac{(x+|x|)}{2}$ que es el operador de Macauley. Es fácil comprobar que la energía disipada es siempre positiva si las variables de daño son funciones crecientes.

1.6.2. Criterio de iniciación.

La iniciación del daño se refiere al punto donde comienza la degradación del material. Para este criterio de fallo, el criterio de iniciación se basa en el modelo de Hashin.

El criterio de fallo de Hashin considera cuatro mecanismos de iniciación diferentes. Tracción en la fibra, compresión en la fibra, tracción en la matriz y compresión de la matriz. El criterio de iniciación sigue la siguiente forma:

- Tracción de la fibra $\hat{\sigma}_{11} \geq 0$.

$$F_{ft} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{S_{1c}}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \quad (58)$$

- Compresión de la fibra $\hat{\sigma}_{11} < 0$.

$$F_{fc} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{S_{1c}}\right)^2 = 1 \quad (59)$$

- Tracción de la matriz $\hat{\sigma}_{22} \geq 0$.

$$F_{mt} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{S_{2T}}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \quad (60)$$

- Compresión de la matriz $\hat{\sigma}_{22} < 0$.

$$F_{mc} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S_{21}}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S_{21}}\right)^2 - 1\right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{S_{2c}} + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \quad (61)$$

En las ecuaciones anteriores, S denota la resistencia del material, el subíndice 1 indica que es en la dirección de la fibra, el subíndice 2 indica que es en la dirección de la matriz, el subíndice 12 que es a cortadura en la dirección longitudinal o transversal y C y T denotan si es a tracción, o bien a compresión.

Finalmente el parámetro α determina la contribución de la tensión de cortadura.

1.6.3. Criterio de evolución.

Una vez satisfecho el criterio de iniciación, una carga posterior producirá una degradación en los coeficientes de rigidez del material. Estos coeficientes son controlados por variables de daño que asumen valores entre 0 y 1. Como cabe de esperar, el valor 0 implica que el material no se encuentra dañado, mientras que el valor 1 implica que el material ha fallado completamente por ese modo de fallo.

Tal y como ya se ha comentado anteriormente, la ley de evolución que siguen estas variables de daño está basada en la energía de disipación G_c que propusieron Camanho y Dávila [15].

La evolución de cada variable está asociada a un desplazamiento equivalente que se encuentra expresado en función de las variables del criterio de iniciación. Por tanto, se asume que:

$$d_i = \frac{\delta_{i,eq}^f (\delta_{i,eq} - \delta_{i,eq}^0)}{\delta_{i,eq} (\delta_{i,eq}^f - \delta_{i,eq}^0)} \quad \delta_{i,eq}^0 \leq \delta_{i,eq} \leq \delta_{i,eq}^f \quad i \in \{ft, fc, mt, mc\} \quad (62)$$

Donde $\delta_{i,eq}^0$ es el desplazamiento equivalente con el cual el criterio de iniciación es satisfecho y $\delta_{i,eq}^f$ es el desplazamiento con el cual el material se encuentra completamente dañado. Este término es el relacionado con la energía de disipación de la forma:

$$\delta_{i,eq}^f = \frac{2G_{i,c}}{\sigma_{i,eq}^0} \quad (63)$$

Con $\sigma_{i,eq}^0$ siendo la tensión con la cual el criterio de iniciación se satisface y $G_{i,c}$ es la energía de fractura para cada modo. Finalmente, las tensiones y desplazamientos que satisfacen el criterio de iniciación son multiplicadas por una función de escalado:

$$\delta_{i,eq}^0 = \delta_{i,eq} f_i^{sc} \quad (64)$$

$$\sigma_{i,eq}^0 = \sigma_{i,eq} f_i^{sc} \quad (65)$$

En la siguiente imagen se muestra la curva de tensión deformación que resulta de aplicar el criterio de fallo progresivo a un material. En ella se puede apreciar que, una vez se alcanza la tensión que satisface el criterio de iniciación, un posterior incremento de carga provoca una reducción en la rigidez del material, y por tanto aguanta menos carga, hasta que llega un punto en el cual no soporta carga alguna.

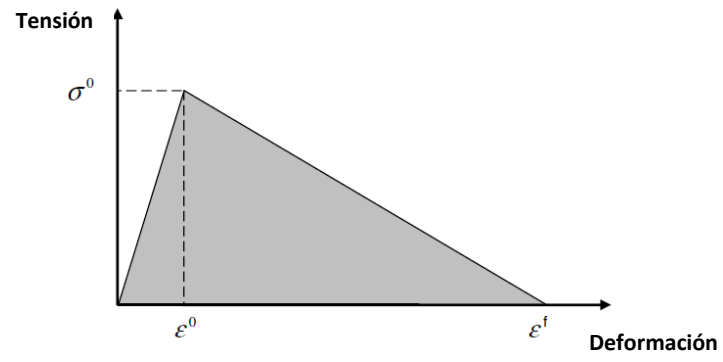


Imagen 18. Curva tensión deformación de un modelo de fallo progresivo.

Capítulo 2. Planteamiento del problema y optimización.

Actualmente existen multitud de algoritmos de optimización y multitud de programas que permiten optimizar un problema. Para poder efectuar los complejos cálculos que resultan de analizar una unión escalonada, tal y como se ha podido comprobar en el capítulo 1, es necesario la utilización de un programa de elementos finitos. En este caso se ha empleado el programa de Ansys.

Ansys es un programa de elementos finitos que permite distintos tipos de análisis. Ansys tiene dos plataformas, *Ansys Workbench* que integra todos los elementos de Ansys (*mechanical, electrical, fluid, etc*) en un espacio de trabajo y *Ansys APDL*. La versión *APDL* es otra plataforma de cálculo al igual que la de *Workbench*. Cada plataforma tiene sus ventajas e inconvenientes, siendo los de cada una de ellas los siguientes:

Ansys APDL.

- Control total sobre el mallado.
- Posibilidad de ejecutar macros.
- Interfaz de usuario poco atractiva y enrevesada.
- Elementos *legacy*.

Ansys Workbench.

- Interfaz más amigable.
- Mayor facilidad para la creación de geometrías.
- Escaso control de la malla.
- Módulos actualizados.

La diferencia más importante radica en el control de total de la malla que tiene la plataforma *APDL*, lo cual es fundamental cuando se trata de obtener resultados precisos. Otro punto que salta a la vista son los llamados elementos *legacy* de la versión *APDL*. Éstos, son elementos o módulos que tiene el programa a los que, los programadores de Ansys han decidido dejar de mantenerlos actualizados en la versión *APDL* (en la *Workbench* sí están actualizados) habiendo eliminado por tanto, su acceso a través de la interfaz. Si bien los elementos siguen estando y se puede hacer uso de ellos, solamente se podrá tener acceso a los mismos acceder a través de comandos. Al ocultarlos e impedir que los usuarios accedan a ellos, Ansys no se hace responsable de los resultados que se obtengan (por falta de actualización), pero eso no implica que los resultados obtenidos sean erróneos, solamente que se están usando versiones no actualizadas de dichos elementos.

El módulo de optimización de Ansys es uno de estos elementos *legacy*. Se decidió emplearlo para la parte de optimización debido a que ya que se realiza todo el programa de generación de geometrías y cálculos en Ansys, es más cómodo y sencillo realizar la optimización también desde Ansys y no tener que emplear así, programas externos.

Puesto que el módulo de optimización es importante en el programa realizado, se va a proceder a explicar los aspectos fundamentales y los algoritmos empleados en este trabajo, así como algunos de los comandos más importantes empleados.

2.1. Introducción a la optimización.

El módulo de optimización de Ansys permite obtener el diseño óptimo para un problema. Para poder realizar la optimización hay que emplear en nuestro diseño 3 tipos de variables.

- **Variables de diseño o DV's.** Estas variables son las variables independientes del problema. Son aquellas variables que definirán el problema y los algoritmos de optimización modificarán para obtener el diseño óptimo. Hay que definir su valor máximo y valor mínimo para restringir el problema de optimización.
- **Variables de estado o SV's.** Son variables dependientes, y su función es restringir el problema de diseño. Suelen ser funciones que dependen de las variables de diseño y al igual que estas, hay que definir un mínimo y un máximo.
- **Función Objetivo o FO.** Es la variable dependiente a minimizar. Debe estar en función de las variables de diseño para que al cambiar estas, el valor de la función objetivo varíe.

También hay que remarcar que los diseños obtenidos pueden ser factibles (*Feasibles*) o no factible (*Infeasibles*). Un diseño factible es aquel que cumple las restricciones de las DV's y las SV's.

Finalmente se va a explicar la diferencia entre un mínimo local y el mínimo global de la función. Un mínimo local es aquel valor que minimiza la función a optimizar pero no implica que sea el valor más pequeño que tomara la función en el espacio de trabajo. Mientras que el mínimo global, es el valor más pequeño que tomara la función objetivo en todo su espacio de trabajo.

A continuación se presenta una imagen donde se puede apreciar un mínimo local, y el mínimo global de una función $f(x)$ para que se entienda mejor la diferencia entre ambos.

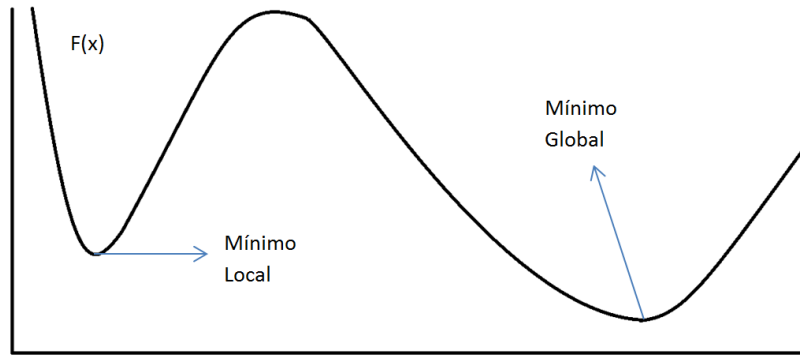


Imagen 19. Mínimo local y global de una función.

2.2. Métodos de optimización.

Ansys ofrece distintos métodos de optimización. A continuación se va a mencionar todos ellos con una breve explicación, para posteriormente entrar en detalle de aquellos métodos que se emplean para la resolución de la unión escalonada.

Los métodos de optimización que Ansys permite son:

- **Single-Loop.** Efectúa un único diseño de optimización. Útil para hacerse a la idea de los posibles valores de la *FO* o *SV*'s.
- **Random.** Como su propio nombre indica, genera valores al azar para las *DV*'s. Útil para crear una base de diseños.
- **Sweep.** Se explicará detalladamente a continuación.
- **Factorial.** Herramienta de optimización estadística que realiza una combinación factorial de cada *DV*.
- **Gradient.** Computa el gradiente de cada *SV* y *FO* con respecto a las *DV*. Debe tener un diseño de referencia del cual partir.
- **Subproblem Approximation.** Se explicará detalladamente a continuación.
- **First Order.** Se explicará detalladamente a continuación.

2.3. Método Sweep.

Este criterio de optimización se basa en escanear el espacio de trabajo alrededor de un diseño definido por el usuario. Básicamente se trata de realizar un barrido de cada *DV*, manteniendo el resto fijas. El método *sweep* introducirá tantos diseños como indica la siguiente ecuación:

$$n_d = n \cdot N_{eval} \quad (66)$$

Con n_d siendo el número total de diseños, n el número de DV y N_{eval} el número de evaluaciones introducidas por el usuario.

2.4. Método *Subproblem Approximation*.

Este es un método de orden cero en el cual solamente requiere el valor de la FO y las SV , no precisando de sus derivadas.

Las variables dependientes son reemplazadas por una aproximación a través de mínimos cuadrados. Además utiliza unas funciones de penalización que permiten que el problema de minimización que originariamente es restringido, se vuelva no restringido. La minimización se realiza en cada iteración en las proximidades de la función de penalización hasta que se alcanza la convergencia o bien alcanza el límite impuesto por el usuario.

2.4.1. Función objetivo.

Sea la función objetivo $f(x)$ donde x es un vector que contiene a las variables de diseño. El primer paso se trata de representar cada variable dependiente por una aproximación denotada \hat{f} . Por ejemplo para la función objetivo $f(x)$ y las variables de estado $g(x)$ quedaría:

$$\hat{f}(x) = f(x) + err \quad (67)$$

$$\hat{g}(x) = g(x) + err \quad (68)$$

Existen diversas formas que pueden tomar las aproximaciones, la más compleja es cuando se realiza una representación cuadrática con términos cruzados que tiene la forma:

$$\hat{f} = a_0 + \sum_i^n a_i x_i + \sum_i^n \sum_j^n b_{ij} x_i x_j \quad (69)$$

La forma de cada coeficiente a_i y b_{ij} son determinados por la función:

$$E^2 = \sum_{j=1}^{n_d} \varphi^{(j)} (f^{(j)} - \hat{f}^{(j)})^2 \quad (70)$$

Donde n_d es el número de diseños y $\varphi^{(j)}$ es un peso asociado al diseño j que selecciona el usuario. Para formar las aproximaciones, debe existir un numero de diseños, si estos diseños no

existieran, se van generando aleatoriamente hasta que llegan al número requerido. Este número de diseños se obtiene de las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} \text{Si } n_d < n + 2 & \text{ genera diseños aleatoriamente} \\ \text{Si } n_d \geq n + 2 & \text{ forma las aproximaciones} \end{aligned}$$

Donde n_d es el número de diseños y n el número total de variables de diseño.

2.4.2. Minimización del subproblema de aproximación.

El próximo paso consiste en transformar un problema restringido en uno no restringido. Para ello mediante las funciones de penalización se llega a la siguiente expresión:

$$F(x, p_k) = \hat{f} + f_0 p_k \left(\sum_{i=1}^n X(x_i) + \sum_{i=1}^{m_1} G(\hat{g}_i) + \sum_{i=1}^{m_2} H(\hat{h}_i) + \sum_{i=1}^{m_3} W(\hat{w}_i) \right) \quad (71)$$

Donde G , H y W son funciones de penalización para cada variable de estado y x es la función de penalización usada para cumplir las restricciones de las variables de diseño, y p_k es un parámetro que se obtiene por iteración y que se va incrementando para alcanzar una convergencia.

Las funciones de penalización tienen todas unas formas similares a la siguiente:

$$X(x_i) = \left\{ \begin{array}{l} c_1 + \frac{c_2}{\bar{x} - x_i} \text{ si } x_i < \bar{x} - \epsilon (\bar{x} - \underline{x}) \\ c_3 + c_4(x_i - \bar{x}) \text{ si } x_i \geq \bar{x} - \epsilon (\bar{x} - \underline{x}) \end{array} \right\} \quad (72)$$

Con \bar{x} y \underline{x} los límites superior e inferior respectivamente, y c_i constantes calculadas por el programa internamente. Para encontrar el mínimo de la función objetivo, Ansys emplea el algoritmo *SUMT*, que no se va a explicar aquí. Finalmente se determina que variable de diseño es la siguiente a utilizar en la próxima iteración.

2.4.3. Convergencia.

Las iteraciones continuaran hasta que se alcance la convergencia o bien se alcance el límite de diseños que ha especificado el usuario. El método comprueba estas condiciones sólo cuando el número de diseños es igual o excede el número requerido para las aproximaciones.

La convergencia ocurrirá cuando el diseño actual $x^{(j)}$ o el diseño $j-1$ o bien el mejor diseño $x^{(b)}$ es factible y se da una de las siguientes condiciones:

$$|f^{(j)} - f^{(j-1)}| \leq \tau \quad (73)$$

$$|f^{(j)} - f^{(b)}| \leq \tau \quad (74)$$

$$|x_i^{(1)} - x_i^{(j-1)}| \leq \rho_i \quad (75)$$

$$|x_i^{(1)} - x_i^{(b)}| \leq \rho_i \quad (76)$$

Donde τ y ρ son tolerancias definidas por el usuario.

2.5. Método *First Order*.

Este método utiliza las derivadas de la función objetivo y las variables de estado permitiendo una dirección de búsqueda en el espacio de trabajo. Cada iteración se compone de subiteraciones que incluyen la dirección de búsqueda y las derivadas, lo que provoca muchos análisis. Esta situación conlleva que el coste computacional sea elevado, aunque produce resultados más precisos que el resto de métodos de optimización.

2.5.1. Función objetivo.

Al igual que en el caso del método anterior, mediante funciones de penalización se llega a la siguiente función objetivo:

$$F(x, q) = \frac{f}{f_0} + \sum_{i=1}^n P_x(x_i) + q \left(\sum_{i=1}^{m_1} G(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} H(h_i) + \sum_{i=1}^{m_1} W(w_i) \right) \quad (77)$$

Donde f_0 es el valor de la función objetivo de referencia. En este caso las funciones de penalización tiene la forma:

$$G(g_i) = \left(\frac{g_i}{g_i + \alpha_i} \right)^{2\lambda} \quad (78)$$

Con λ siendo un número muy grande, de forma que el valor de la función será muy grande cuando la restricción es violada y muy pequeña en caso contrario.

2.5.2. Direcciones de búsqueda.

Para cada iteración j se crea un vector de direcciones d , por lo que la iteración $j+1$ se obtiene:

$$x^{(j+1)} = x^{(j)} + s_j d^{(j)} \quad (79)$$

Recordemos que x es un vector que contiene a las DV , y s es el valor mínimo de la función Q en la dirección d . La solución de s utiliza un algoritmo de *Golden-section* y una técnica de ajuste cuadrática, y sus límites son los siguientes:

$$0 \leq s_j \leq \frac{S}{100} s_j^* \quad (80)$$

Donde s_j^* se calcula internamente y S es el máximo porcentaje de paso de búsqueda introducido por el usuario. Para la iteración inicial, la dirección de búsqueda se asume negativa y de la forma:

$$d_f^{(0)} = -\nabla Q_p(x^{(0)}) \quad (81)$$

Y para iteraciones posteriores:

$$d^{(j)} = -\nabla Q(x^{(j)}, q_k) + r_{j-1} d^{(j-1)} \quad (82)$$

$$r_{j-1} = \frac{[\nabla Q(x^{(j)}, q) - \nabla Q(x^{(j-1)}, q)]^T \nabla Q(x^{(j)}, q)}{|\nabla Q(x^{(j-1)}, q)|^2} \quad (83)$$

Se pueden hacer correcciones de iteración a iteración debido a que $d^{(j)}$ se puede separar en dos vectores direccionales.

Finalmente queda definir la forma del gradiente:

$$\frac{\partial Q(x^{(j)})}{\partial x_i} = \frac{Q(x^{(j)} + \Delta x_i e) - Q(x^{(j)})}{\Delta x_i} \quad (84)$$

$$\Delta x_i = \frac{\Delta D}{100} (\bar{x}_i - \underline{x}_i) \quad (85)$$

Donde e es un vector con valor 1 en la posición i , y 0 en el resto. ΔD es un parámetro introducido por el usuario, que mide la diferencia entre pasos.

2.5.3. Convergencia.

El método de optimización continuará hasta que se alcance la convergencia o se alcance el límite impuesto por el usuario. Al igual que en el algoritmo de subproblema, estas condiciones se verifican al final de cada iteración. La convergencia se produce si:

$$|f^{(j)} - f^{(j-1)}| \leq \tau \tag{86}$$

$$|f^{(j)} - f^{(b)}| \leq \tau \tag{87}$$

Donde τ es una tolerancia introducida por el usuario.

Capítulo 3. Programa.

En este capítulo se va a explicar sin entrar en detalles de programación, las diversas macros que componen el programa, su estructura interna, cómo se relacionan unas con otras y qué datos son los que el usuario puede modificar para adecuar el programa a sus necesidades. Además se contarán los detalles y pequeños cálculos que se han efectuado para introducir los límites de las variables en caso de que sean necesarios o, en su caso, cómo se ha introducido la plasticidad del adhesivo.

3.1. Composición del programa.

Lo primero que hay que pensar es la función objetivo a minimizar, las variables de diseño y las variables de estado a utilizar en nuestro problema.

Como se ha visto en teoría, uno de los parámetros importantes para el diseño de las uniones escalonadas es la longitud de los escalones. El número de escalones que tiene la unión también es importante, pues si bien sucede que a mayor número de escalones nuestra unión escalonada presentará una tensión media a lo largo de la unión más baja, no es menos cierto que los valores máximos de tensión serán mayores. Por lo tanto, el número de escalones se convierte en una variable de diseño de nuestro problema.

Finalmente, como se va a realizar un modelo bidimensional, al igual que la longitud de los escalones es importante, también lo es la altura de los mismos. Como se ha comentado en la teoría, lo que se pretende es que el adhesivo trabaje a cortadura. Si se tiene una altura de escalón muy elevada, el adhesivo acaba trabajando a tracción. Este modo de trabajo no es adecuado para el adhesivo ya que provocaría una reducción drástica en la resistencia de la unión.

Una vez definidas las variables de diseño de nuestro problema, se va a proceder a definir las variables de estado.

Consideramos, que una unión está mal diseñada si dicha unión falla por culpa del adhesivo, es decir, presenta un fallo cohesivo. Si analizamos el motivo de esta afirmación, es sencillo. En el diseño de uniones escalonadas, lo que pretendemos es que la unión sea capaz de transmitir los esfuerzos de una de las piezas que une a la otra. Una rotura por parte del adhesivo implicaría que la unión no ha sido capaz de transmitir la fuerza, mientras que si se produce una rotura de la unión por parte de alguno de los adherentes, consideraremos que lo que está mal diseñada es la pieza y no la unión, es decir, podría modificarse el material a unir para que aguante más tensión y por tanto no es un fallo de la unión si no de diseño. A continuación se va a mostrar los diversos fallos en los que puede fallar un adherente sin considerarse fallo de la unión. La última pieza representa un posible fallo de un material compuesto en la zona en la que está aplicado el adhesivo.

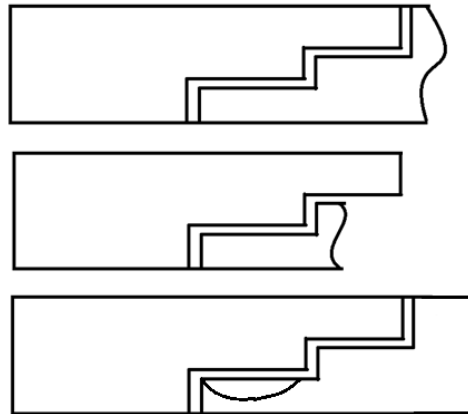


Imagen 20. Modos de fallo considerados al mal diseño de la unión.

Si aplicamos lo mencionado anteriormente a unas variables de estado, obtendremos que para asegurarnos de que estamos maximizando la unión debemos definir que los materiales adheridos no fallen, y eso es fácilmente aplicable si ponemos como variables de estado los coeficientes de seguridad de los materiales adheridos y decimos que el valor mínimo que pueden tomar es 1.5, o lo que es lo mismo:

$$SV_i = R_i \text{ con } R_i \geq 1.5 \quad (88)$$

Ya tenemos definidas las variables de diseño y las variables de estado. Solo nos queda por definir la función objetivo.

En este caso, se ha decidido que a lo largo de la unión, no existan escalones próximos con un valor elevado de deformaciones, logrando que la unión transmita la carga lo más uniformemente posible. Esto implica que la función objetivo definida intentará minimizar la diferencia máxima de deformación angular que se produce a lo largo de la unión.

$$f(\gamma) = \sum_{i=1}^n (|\gamma_i|_{max} - |\gamma_i|_{min})^2 \quad (89)$$

Como se tienen en cuenta los tramos verticales de la unión, la máxima y mínima deformación angular no tiene por qué encontrarse al inicio y al final del escalón como muestra la siguiente imagen obtenida en Ansys de un escalón de la unión.

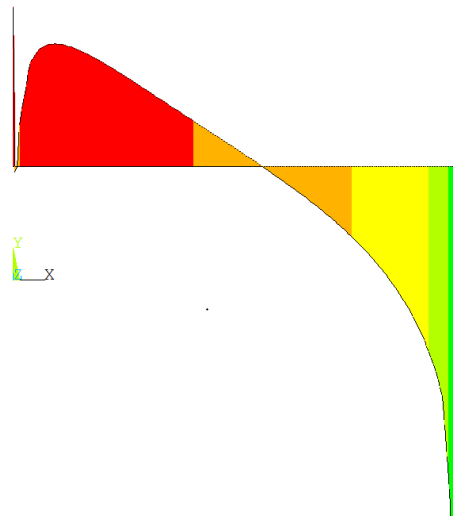


Imagen 21. Distribución de deformación angular a lo largo de un escalón.

Como se ha comentado en el capítulo 2 de la memoria, para resolver este problema se ha utilizado el programa Ansys, que nos permitirá sin necesidad de terceros programas el realizar todos los cálculos necesarios para obtener la unión deseada.

Para resolver este problema, se han realizado distintas macros, tanto por la complejidad que tiene el problema de programación como por el hecho de facilitar de este modo y durante su programación, la corrección de errores. Hay un total de 9 macros.

La macro desde la que se lanza el programa es la macro *OPTIMIZACION.MAC* desde ella se llama a *MAIN.MAC* que es la encargada de gestionar la creación de la geometría, creación de las áreas, propiedades del material, mallado, condiciones de contorno, solución y post-procesado.

A continuación se va explicar individualmente cada una de ellas, los parámetros que contienen, comandos importantes a resaltar en caso de que los hubiera y funcionamiento.

3.1.1. Macro de optimización.

Esta macro es la que el usuario debe ejecutar para que el programa funcione. En ella, el usuario puede modificar los siguientes parámetros:

- Módulos de *Young* de los materiales que va a emplear.
- Coeficientes de *Poisson* de los materiales.
- Número máximo de escalones que puede tener la pieza.
- Número máximo de iteraciones que se le permitirá al método de optimización *subproblem* a realizar si no encuentra convergencia.
- Número de barridos que se le permitirá hacer por variable al método *sweep*.

- La opción, si desea, de que se realice un ensayo final una vez obtenida la geometría definitiva que obtenga la fuerza máxima que es capaz de aguantar el adhesivo.
- El espesor del adhesivo de la pieza.
- El espesor total de la pieza.
- Carga a la que se es sometida la unión.

La macro también tiene variables internas del programa que son inicializadas aquí y que el usuario no debe tocar.

Posteriormente, se inicializan con unos valores elegidos al azar las variables de diseño, las variables de estado y la función objetivo. Los valores de las variables de diseño y las variables de estado pueden ser cualquiera, pero conviene que sean unos valores lógicos dentro del problema que se está tratando. Al igual que pasa con las variables de diseño, se debe seleccionar bien el valor inicial de la función objetivo. Esto se realiza para que haya valores iniciales para el primer diseño, como es lógico este diseño será descartado, pero servirá como datos de partida para comparar los valores de las variables de diseño y función objetivo en el siguiente diseño realizado.

Recordemos que se trata de minimizar la función objetivo, y en nuestro caso, dicha función no puede tomar valores negativos, por lo que asignarle un valor nulo sería cometer un gran error, pues no se podría nunca minimizar el valor de dicha función.

Una vez inicializadas las variables, se llama a la macro que queremos ejecutar, en nuestro caso será la macro *main.mac* que es la que gestiona la creación y análisis de la pieza.

Ahora es el turno de definirle al programa que variables queremos como variables de diseño, cuales como variables de estado y cuál es la función objetivo. Para cada variable hay que imponer unos límites inferiores y superiores e incluso en algunas de ellas una tolerancia.

Para el número de escalones se ha definido que el límite inferior sea de 2, mientras que el límite superior sea de 8. El usuario puede poner un límite superior mayor si así lo desea, pero hay que tener en cuenta que cada escalón tiene asociadas a él 2 variables de diseño, y Ansys solo puede trabajar con un número máximo de variables de diseño de 100.

Para la longitud de los escalones, se van a imponer un límite inferior de 5 mm y un límite superior de 50 cm. Estos valores se han elegido porque definen un rango normal en el que la longitud de los escalones puede tomar valores.

En lo referente a la altura de los escalones, no se han seleccionado las alturas de los escalones propiamente dichas como variables de diseño, si no que se han seleccionado unos factores T . El motivo de no seleccionar como variable de diseño la propia altura de los escalones es sencillo, si dejamos que el programa tome valores al azar de alturas, muchas de las geometrías que generará serán imposibles de realizar (la suma de la altura de los escalones será mayor que la anchura de la pieza) o simplemente tendrán formas poco óptimas. Para asegurarnos que los valores que se

generan van a producir diseños factibles, y como sabemos que el óptimo no será aquel que presente alturas de escalones desproporcionadas, hemos decidido tomar el siguiente criterio.

La idea es que la altura de cada escalón este fija en su valor medio, y el programa pueda variar la altura bien sufriendo un incremento o un decremento de este valor. Si no se piensa detenidamente, puede suceder que vuelvan a salir diseños no factibles, por lo que se va a realizar lo siguiente.

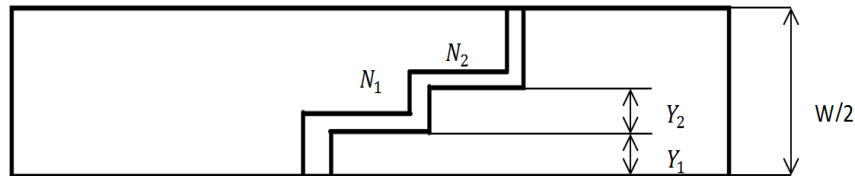


Imagen 22. Parámetros de la unión.

En la imagen superior, se puede ver una unión de tamaño $W/2$ con $N=2$ escalones y cada escalón con una altura Y . Si queremos que la suma de los escalones multiplicada por el factor no supere la altura total, tendremos:

$$\sum \frac{W T}{2(N + 1)} = \frac{W}{2(N + 1)} \quad (90)$$

Si desarrollamos la ecuación tendremos:

$$N \frac{W T}{2(N + 1)} = \frac{W}{2(N + 1)} \quad (91)$$

Despejando, tenemos que $T=1/N$. Ahora bien, como el valor de una variable de diseño nunca va a tomar un valor negativo (debido al programa de Ansys que no lo permite), lo que vamos a hacer es desplazar el rango de la variable T que se sitúa alrededor de 0, a un rango alrededor de 1 tal y como muestra la imagen siguiente:

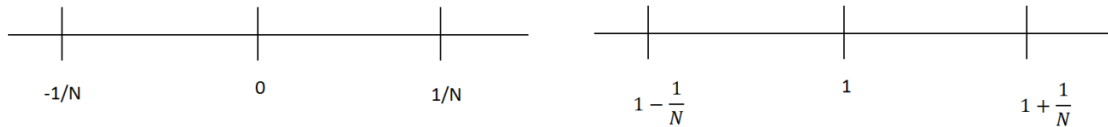


Imagen 23. Rango de valores de la DV de la altura de los escalones.

Por lo que la altura del escalón será:

$$Y_i = \frac{T_n W}{2(N + 1)} \quad (92)$$

Si nos vamos al mínimo valor que puede tomar el número de escalones, que en este caso es 2 y calculamos de la fórmula que permite saber el rango en el que se encuentra T , vemos que es de 0.5 a 1.5. Pero este no es el límite que podemos ponerle a la variable, pues en caso de que $N > 2$, ya no tiene por qué cumplirse la condición:

$$\sum \frac{T_n W}{2(N+1)} = W/2 \quad (93)$$

Por ejemplo, se da en el que todos los T salieran con valor 1.5.

Por lo que en la macro de generación de la geometría que se explicará más adelante se realiza la siguiente comprobación a la hora de asignar los valores a las alturas de los escalones:

$$\text{Si } T_n < 1 - \frac{1}{N} \rightarrow T_n = 1 - \frac{0.9}{N} \quad (94)$$

$$\text{Si } T_n \geq 1 - \frac{1}{N} \rightarrow T_n = 1 + \frac{0.9}{N} \quad (95)$$

El motivo de poner 0.9 no es otro que el de evitar el caso extremo en el que todas las variables T salieran del máximo valor permitido y entonces el sumatorio de las alturas de los N escalones alcanzaran el valor $W/2$ y no se dejara espacio para el escalón $N+1$.

A continuación se introducen los límites para las variables de estado, que como se ha explicado anteriormente, tendrán que tener como límite inferior 1,5. El límite superior nos da igual puesto que supone un mayor coeficiente de seguridad.

Finalmente, se define la variable de la función objetivo y se escogen los modos de optimización, así como algunas opciones de optimización. En este aspecto hay que remarcar que los modos de optimización empleados van a ser, un método de aproximación (*subproblem approximation*) seguido de un barrido (*sweep*) a partir del mejor diseño encontrado.

Se intentó aplicar el método de orden uno (*first*), pero se comprobaron dos cosas:

- La primera de ellas, es que se necesita un diseño base del cual parte la optimización. Como en nuestro caso, no pretendemos mejorar el diseño de una unión existente, si no, diseñar la unión, no conocemos los parámetros iniciales de los cuales partir.
- La segunda, en caso de inventarnos unos parámetros aleatorios, el mínimo encontrado en la solución puede ser un mínimo local, existiendo otra combinación de valores que minimicen aún más la función objetivo. Para poder realizar este método, deberíamos disponer de varios modelos de partida y ver, tras aplicarles el método de optimización, cuál de ellos sería el que presenta una función objetivo menor.

El siguiente esquema muestra como está planteada la macro de optimización:

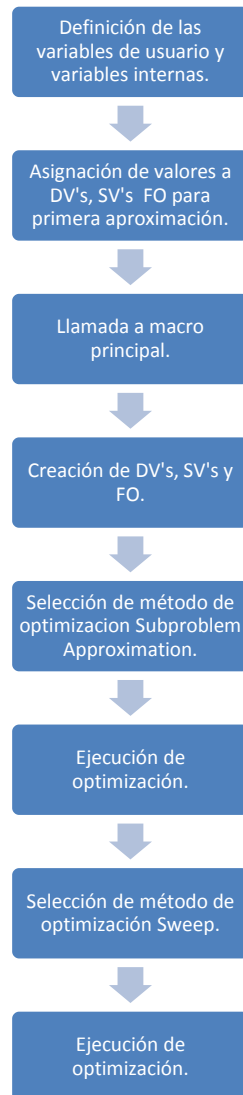


Imagen 24. Esquema de la macro de optimización.

3.1.2. Macro Principal.

La macro principal solamente se encarga de marcar el orden de ejecución de las distintas macros, y mostrar en caso de existir un error en la creación de la geometría, mallado, condiciones de contorno o resolución del problema, un mensaje de error para identificar el fallo.

El orden que establece esta macro es sencillo:

1. Macro de generación de la geometría.
2. Macro de propiedades del material.
3. Macro de mallado.

4. Macro de condiciones de contorno.
5. Macro de criterio de evolución.
6. Macro de cálculo de la solución.
7. Macro de postproceso.
8. En caso de error en alguna de las macros posteriores, mostrar un código con el error.

En el siguiente esquema se muestra el orden de las macros:

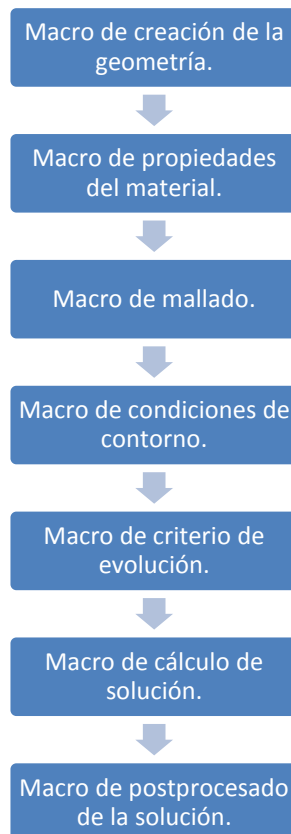


Imagen 25. Esquema del programa.

3.1.3. Macro de creación de la geometría.

Esta macro es la encargada de la creación de la geometría de la unión. Es la macro junto con la de postprocesado que más líneas de comandos contiene debido a su función. Está estructurada en partes para facilitar su programación y revisión.

Lo primero que realiza esta macro es la inicialización de variables internas y comprobaciones de las opciones introducidas por el usuario. Lo siguiente que realiza, es la creación de los vectores que contendrán las alturas y longitudes de los escalones.

Es importante remarcar, que las variables de diseño no son números enteros, pero el número de escalones no puede ser un número real. Para solucionar este inconveniente, lo siguiente que

realiza la macro es un redondeo de la variable de diseño del número de escalones. Realiza un redondeo al entero más cercano. Así por ejemplo si la DV toma un valor de 3.2, el número de escalones será $N=3$, si por el contrario el valor de DV es de 3.8, el valor del número de escalones será de $N=4$.

El siguiente paso a realizar por la macro es la asignación de las longitudes y alturas de cada escalón a las posiciones de los vectores correspondientes. Como ya se explicó en el apartado de la macro de optimización, las alturas de los escalones se crean a partir de las variables de diseño T . Aplicando las ecuaciones (94) y (95) explicadas anteriormente, se sacan las alturas de los escalones.

Tras la creación de vectores auxiliares para la creación de la geometría, se realiza una verificación para cada escalón de la unión. Los valores que salen de la altura de los escalones, no tienen por qué coincidir con la altura de las capas que forman el material. Con un ejemplo numérico pequeño se entenderá mejor lo que se intenta decir.

Supongamos que la altura que nos sale para un escalón es de $Y=0.01875$, y la altura de las capas es de $TK=0.001$. Como se puede ver si dividimos $Y/TK=18.75$, lo que nos indica que la altura del escalón caería en medio de la altura de una capa. Para resolver estas situaciones, se redondea el resultado de Y/TK al entero más cercano y se multiplica posteriormente por TK de nuevo. Si aplicamos esto al ejemplo que tenemos, tendríamos que la altura del escalón sería de 0.019.

Posteriormente se realiza una comprobación de que la geometría sea factible, es decir, que la suma de las alturas de los escalones sea menor a $W/2$.

El siguiente paso es la creación de la geometría, para crear la geometría se comienza poniendo los puntos, después se harán las líneas y finalmente las áreas. Como la unión es simétrica, se decide hacer y estudiar solo mitad de la pieza. Y para seguir un orden, primero se generará los puntos del adherido superior y posteriormente los del adherido inferior.

Sin entrar en mucho detalle de los bucles empleados en la generación de la geometría, sí mencionar que primero se crean las líneas verticales y posteriormente las horizontales. Además, la pieza se encuentra dividida en zonas, por lo que el programa se podría modificar para poner distintos tipos de malla en cada una de las zonas que componen la geometría.

El resultado final que tenemos es el siguiente:

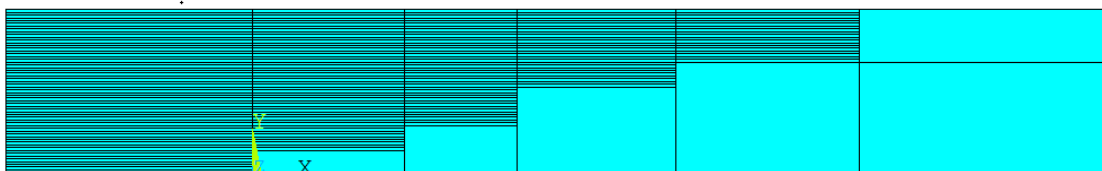


Imagen 26. Pieza sin mallar.

El esquema que correspondería a esta macro es:

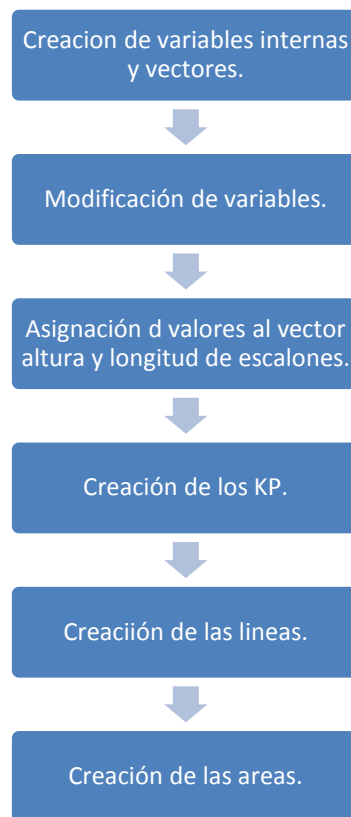


Imagen 27. Esquema de la macro de creación de la geometría.

3.1.4. Macro de propiedades del material.

Esta macro es sencilla, en ella están los comandos de Ansys que permiten asignar los valores de módulo de Young, coeficiente de *Poisson*, elección del tipo de elemento, etc.

Para la elección de elemento se ha seleccionado un elemento estructural, concretamente el *PLANE 182*. Este elemento es empleado en el modelado de sólidos en 2D. Este elemento se define por 4 nodos los cuales tienen dos grados de libertad cada uno (traslaciones en las direcciones x e y). También usaremos la opción del elemento para que trabaje en deformación plana.

Esta macro también tiene los valores que se introducirán para el criterio de iniciación del fallo, que según se ha explicado en teoría son las resistencias del material a los distintos modos de fallo. En caso de ser un material isótropo como puede ser un acero, el valor de la resistencia será el mismo en todos los casos. Los parámetros que el usuario, puede y debe modificar en caso que cambie los materiales de los que se compone la unión son los siguientes:

- S_{1T} y S_{2T} que son las resistencias al fallo a tracción en la dirección longitudinal y en la dirección transversal respectivamente.

- S_{1C} y S_{2C} que son las resistencias al fallo a compresión en la dirección longitudinal y transversal (en valor negativo).
- S_{12S} que es la resistencia a cortadura.

El resto de parámetros que contiene no conviene cambiarlos a no ser que se tuvieran valores de ellos para el material en concreto, puesto que son variables que se utilizan para calcular el criterio de fallo, y los valores establecidos son valores típicos para un material compuesto, un adhesivo y un metal.

Además de lo ya mencionado, en esta macro se introduce la curva de tensión-deformación del adhesivo. Se podría haber supuesto un adhesivo que se comportara en régimen lineal, pero entonces los resultados obtenidos a lo largo de las alturas de los escalones no habrían sido válidos, pues las tensiones saldrían infinitas debido a que el problema es singular. Para evitar este suceso, se decidió introducir un comportamiento plástico en el adhesivo.

Cuando el adhesivo alcance el comportamiento plástico, la tensión en lugar de seguir creciendo, alcanza un valor constante como se puede ver en el capítulo 1 de la memoria. Además y como se está usando un programa de elementos finitos, se decidió introducir un comportamiento lo más real posible por parte del adhesivo. Por lo que en lugar de introducir un comportamiento elástico-perfectamente plástico como en la teoría del capítulo 1, se introdujo el siguiente modelo bilineal *ESDU/Grant* para el comportamiento del adhesivo [10].

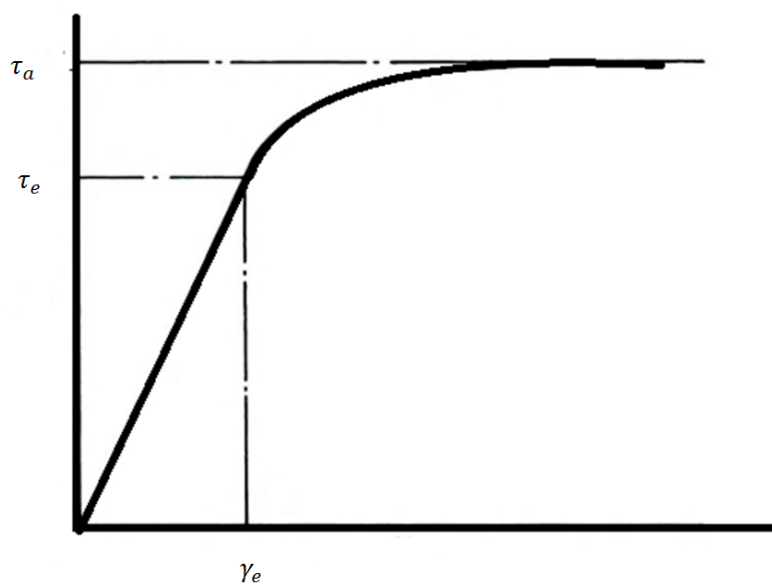


Imagen 28. Curva tensión-deformación modelo bilineal del adhesivo.

Las ecuaciones que rigen este comportamiento son:

$$\text{Si } \gamma < \gamma_e \quad \tau = \gamma G_e \quad (96)$$

$$Si \gamma > \gamma_e \quad \tau = \tau_e + \left(\frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta} \right) \quad (97)$$

Con:

$$\alpha = \gamma G_e - \tau_e \quad (98)$$

$$\beta = \tau_{max} - \tau_e \quad (99)$$

El adhesivo seleccionado para la unión es el *FM 300K Epoxy* de la empresa *CYTEC* por tener todos los datos necesarios para el modelado del adhesivo en la hoja de catálogo. La curva de tensión-deformación que aporta el fabricante es la siguiente:

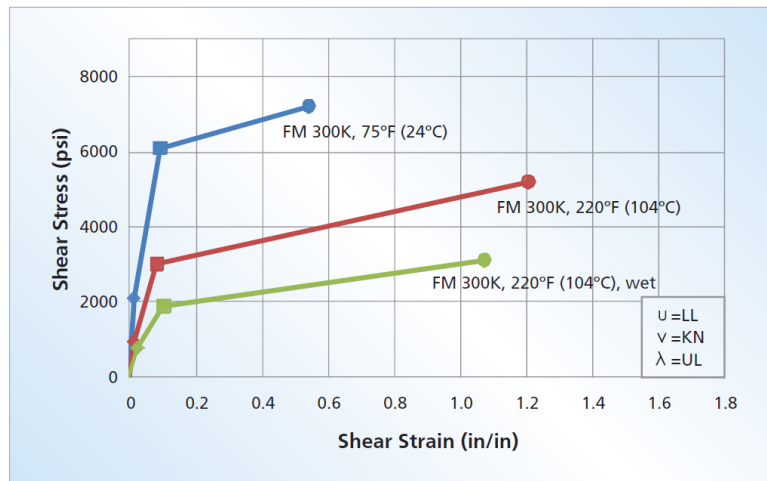


Imagen 29. Curvas de tensión-deformación aportadas por el fabricante.

Y las propiedades del adhesivo, también sacadas del catálogo del fabricante, son:

- $\tau_e = 14.2 \text{ MPa}$.
- $\gamma_e = 0.0156$
- $G_e = \frac{\tau_e}{\gamma_e} = 907.5 \text{ MPa}$.
- $\tau_p = 49.8 \text{ MPa}$.
- $\gamma_p = 0.5446$

Como se puede observar, la gráfica muestra la curva tensión de cortadura ante la deformación angular. En Ansys hay que introducir la curva tensión-deformación por lo tanto hay que transformar dichas tensiones y deformaciones. Aplicamos la siguiente relación:

$$E = 2G_e(1 + \nu) \quad (100)$$

$$\frac{\gamma}{2} = \varepsilon \quad (101)$$

Si utilizamos como módulo de *Poisson* el valor 0.38. Este valor ha sido obtenido de bibliografía, pues el fabricante no proporciona este valor, como la diferencia no variará mucho de un valor a otro, el error introducido no será muy elevado.

Sabemos que los siguientes estados tensionales son equivalentes:

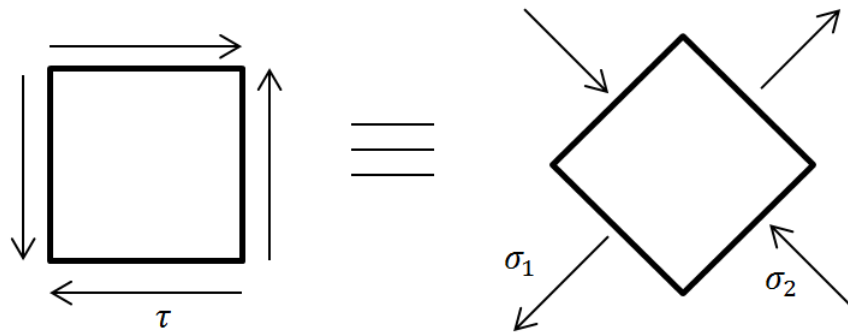


Imagen 30. Estados tensionales.

Entonces por el círculo de *Mohr* tenemos:

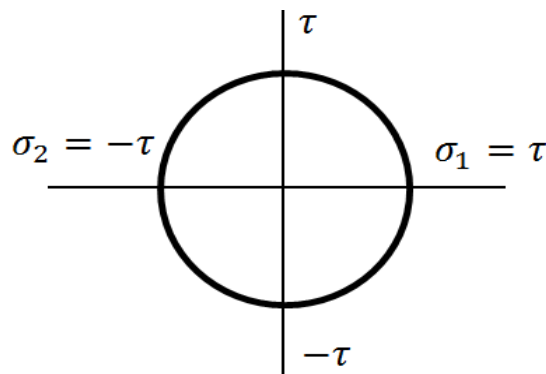


Imagen 31. Círculo de Mohr.

Por lo que si aplicamos la ley de Hooke en el tramo lineal tendremos:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (102)$$

Y para el rango plástico utilizamos la ecuación (97) pero adaptada, quedando:

$$\sigma = \sigma_e + \left(\frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta} \right) \quad (103)$$

Con:

$$\alpha = \varepsilon E - \sigma_e \quad (104)$$

$$\beta = \sigma_{max} - \sigma_e \quad (105)$$

En la siguiente gráfica se puede ver la curva en tensión de cortadura ante deformación angular y la curva de tensión deformación:

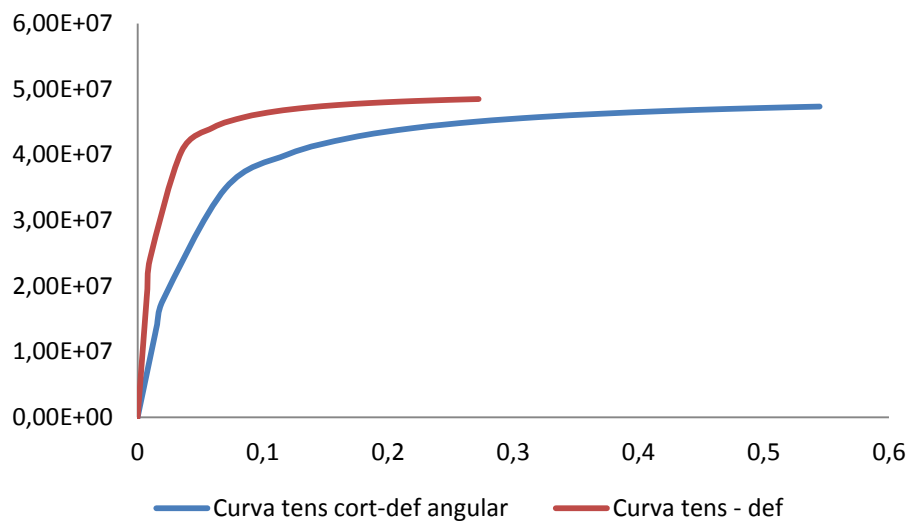


Imagen 32. Graficas de tensión-deformación del adhesivo calculadas.

En Ansys la gráfica queda finalmente:

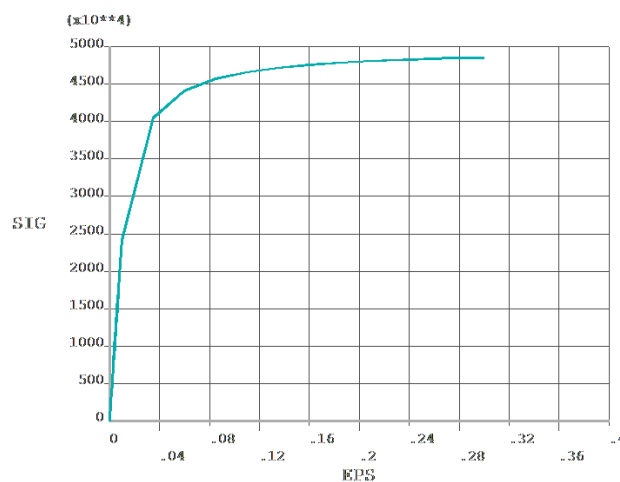


Imagen 33. Gráfica de tensión-deformación en Ansys.

Finalmente se mostrara el esquema que indica lo que realiza esta macro.

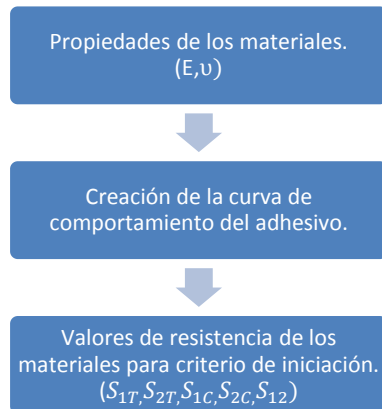


Imagen 34. Esquema de la macro de propiedades.

3.1.5. Macro de mallado.

La macro de mallado se encarga de asignar a cada área los atributos del material y de elegir el tamaño de la malla y mallar.

Lo primero que tiene esta macro es el valor de un factor que el usuario puede modificar. Este factor multiplicara al espesor del adhesivo para obtener el tamaño de la malla deseado. Después, se crean los componentes asociados a las respectivas zonas, facilitando la asignación posterior de los materiales a las áreas.

Si el usuario decide que uno de los materiales sea un material compuesto, se debe rellenar un fichero *.txt llamado *CAPAS.txt* donde el primer número representa el número total de capas que tiene la pieza, y los números posteriores representan cuantas capas tiene el material en una disposición definida. Para que quede más claro se va a utilizar un ejemplo muy sencillo. Decir también, que el material compuesto sólo puede ser ortótropo, pues no se puede introducir (a no ser que se calcule) las diversas resistencias del material. Por tanto, el material sólo puede tener una disposición de capas a 0° y 90° . A continuación, se va a poner un ejemplo simple:

Si queremos que nuestra pieza tenga 5 capas de laminado con la composición $(90/0/90/0/90)$ con la altura de cada capa de 2 cm , deberíamos escribir en *CAPAS.txt* lo siguiente:

```
5.00,20.00,20.00,20.00,20.00,20.00
```

El programa interpretaría, en este supuesto, que el material va a tener 5 capas, y que las 20 primeras capas de 1 mm del material pertenecerán al material correspondiente a 90° , las 20 siguientes al material correspondiente a 0° , etc.

De aquí se extrae que el programa está limitado a 3 tipos de uniones escalonadas. Las metal-metal, las compuesto-metal y las compuesto-compuesto siempre que uno de los materiales sea

unidireccional y el otro unidireccional u ortótropo. La siguiente imagen muestra cómo queda la pieza al utilizar esa configuración de material. Cada color representa un material, siendo el azul para el 0° y el verde para el 90° .

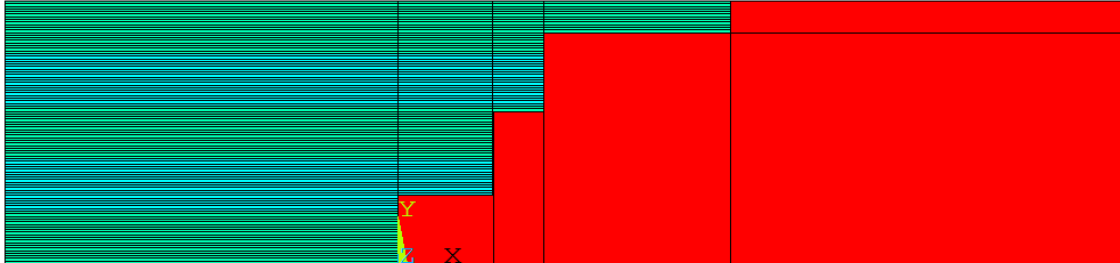


Imagen 35. Pieza con distinta orientación de las capas.

Se pueden seguir diferentes criterios de mallado, pero en este caso se han seguido estos dos:

- En la zona del adhesivo, se ha intentado que haya al menos dos elementos en la anchura del espesor. El motivo de esto es, que de este modo el programa, podrá tener valores en los nodos que quedan en mitad del adhesivo, y el valor será lo más próximo a la realidad. Poner un número de elementos excesivo, provocará un aumento considerable en el tiempo de cálculo por lo que tampoco se pueden poner muchos elementos en el adhesivo.
- En toda la pieza, que el mallado sea lo más regular posible. Se pretende que a lo largo de la pieza el mallado sea regular, viéndose una transición entre el adhesivo y el adherente. El motivo de esto no es sino, evitar errores elevados en el cálculo debido a tener una malla muy distorsionada.

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de cómo quedaría el mallado de la pieza.

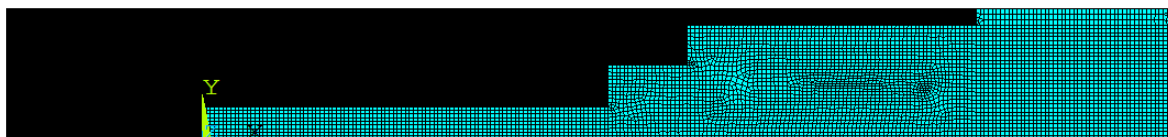


Imagen 36. Mallado de la pieza.

El color negro se debe al poco tamaño que tiene la malla, pero se puede apreciar claramente en la parte derecha el mallado regular.

Finalmente, se muestra el esquema de lo que realiza esta macro.

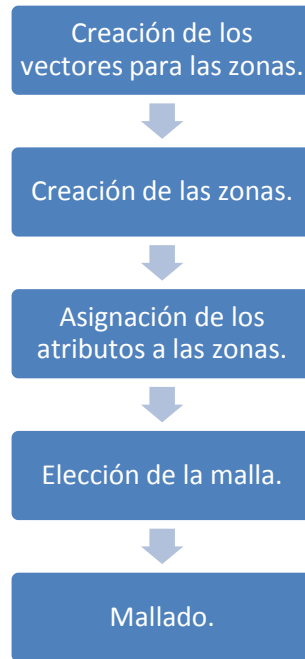


Imagen 37. Esquema de la macro de mallado.

3.1.6. Macro de las condiciones de contorno.

Macro sencilla que se encarga de introducir las condiciones de contorno en la unión. Las condiciones de contorno introducidas son las siguientes:

- Cara inferior, desplazamientos verticales nulos.
- Cara del extremo izquierdo, desplazamientos horizontales nulos.
- Cara del extremo derecho, se aplica una presión de valor la que indique el usuario.

En la siguiente imagen se muestra las condiciones de contorno puestas:

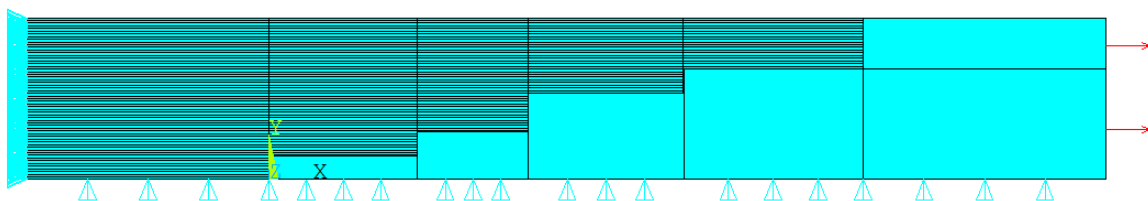


Imagen 38. Pieza con las condiciones de contorno.

Y el esquema de esta macro es:

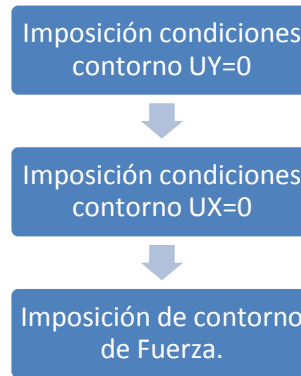


Imagen 39. Esquema de la macro de condiciones de contorno.

3.1.7. Macro del criterio de evolución.

En esta macro se introduce el criterio de evolución de la pieza. Debido a los pocos comandos que tiene la macro y que es el mismo repetido para cada material, se va a proceder a su explicación.

Antes de empezar a introducir los criterios de iniciación y evolución del material, se realizan una serie de comandos que modifican las opciones de graficado de los resultados. Sin entrar en los comandos detalladamente, pues no tiene ninguna utilidad su explicación minuciosa, solamente se dirá que se quita el *POWERGRAPHICS* para permitir así, que vaya más rápido el programa a la hora de dibujar la malla de la pieza, se escala la pieza y se pone que muestre los grandes desplazamientos. Estas opciones se podrían introducir en cualquier otra macro antes de realizar el comando *SOLVE*.

Para el establecer el criterio de iniciación se emplea el comando siguiente:

TB, DMGI, MAT, NTEMP, NPTS, FCRT

TBDATA, STLOC, C1, C2, C3, C4

Donde *C1*, *C2*, *C3* y *C4* es el criterio de iniciación a para cada modo de fallo. Entre los criterios de fallo que se pueden emplear está el de *Hashin* (habría que poner un 4), *Puck* (3) o *LaRc04* (6). En cuanto a los modos de fallo:

- C1 representa el fallo de la fibra a tracción.
- C2 es la fibra a compresión.
- C3 es la matriz a tracción.
- C4 es la matriz a compresión.

MAT es el número de material para el cual se selecciona el criterio de fallo. *NTEMP* es el número de temperaturas para las cuales hay datos, *NPTS* es el número de puntos que se introducen para cada temperatura y *FCRT* define el criterio de fallo como criterio de iniciación de daño. *STLOC* es la posición inicial que permite la introducción de los distintos datos.

Para definir el criterio de evolución emplearemos los comandos:

TB, DMGE, MAT, NTEMP, NPTS, MPDG

TBDATA, STLOC, CI, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8

- C1 es la energía disipada por unidad de área para el daño de fibra a tracción.
- C2 es el coeficiente de amortiguamiento viscoso de la fibra a tracción.
- C3 es la energía disipada por unidad de área para la fibra a compresión.
- C4 es el coeficiente de amortiguamiento viscoso para fibra a compresión.
- C5 es la energía disipada por unidad de área para el fallo de la matriz a tracción.
- C6 es el coeficiente de amortiguamiento viscoso para matriz a tracción.
- C7 es la energía disipada por unidad de área para el daño de matriz a compresión.
- C8 es el coeficiente de amortiguamiento viscoso para matriz a compresión.

El esquema para esta macro es muy simple y es el siguiente:

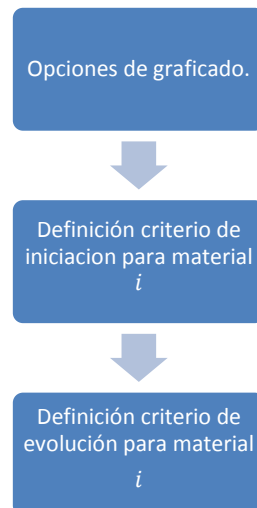


Imagen 40. Esquema de la macro del criterio de evolución.

3.1.8. Macro de solución.

Pese a que se trata de la macro de solución del problema que se encargará de ejecutar el comando *SOLVE*, esta macro también contiene todas las opciones para la configuración de la solución.

Empezaremos analizando las opciones que se seleccionan.

- Se selecciona que en la solución se tengan en cuenta grandes desplazamientos.
- Se selecciona lo que queremos que el programa muestre y guarde.
- Se selecciona el tiempo de aplicación de la carga.

- Se selecciona que el incremento del tiempo no sea automático.
- Se seleccionan el número de subpasos.
- Se selecciona que la carga sea aplicada linealmente y no en forma de rampa.

Posteriormente se ejecuta el comando *SOLVE*.

Esta macro, al igual que las macros de generación de geometría, mallado y condiciones de contorno posee bucles que controlan si surge algún error para mostrárselo al usuario. En las anteriores macros, no se presentaban mayores problemas y por ese motivo se han omitido. Ahora bien, en esta macro el bucle de error puede presentar problemas de programación y se cree adecuado el incluir este detalle para que pueda ayudar en el futuro si alguien lo necesitase.

En este caso, solamente se realiza el cálculo de un paso y por tanto el bucle para detectar si ha habido un error puede ir a continuación del *SOLVE*. Pero en el caso de que la macro calculara en más pasos, la introducción del bucle de error no debería ir en ella sino, en la propia función *LSSOLVE* debido a que ésta, es la que ejecuta comandos posteriores al cálculo del primer paso.

De las opciones existentes para alcanzar la solución comentada anteriormente, se van a explicar tanto los motivos que han llevado a seleccionar determinadas opciones como por ejemplo, el tener en cuenta grandes desplazamientos, como la decisión de fijar nosotros el incremento de tiempo y no dejarlo de manera automática.

En lo referente a optar porque el programa tenga en cuenta en su solución grandes desplazamientos es sencillo. Se debe al adhesivo, como se puede ver, el módulo de *Young* del adhesivo que tiene un valor de 2.5 GPa es mucho menor que el de cualquier material metálico o compuesto que se seleccione como adheridos. Por tanto, la deformación que pueda sufrir el adhesivo si puede entrar dentro del rango de grandes desplazamientos, y por eso es importante hacer que el programa lo tenga en cuenta.

En cuanto a establecer nosotros el incremento de tiempo, su explicación también es sencilla. Si dejásemos al programa calcular los incrementos de tiempo automáticamente, la variación en el incremento de tiempo es tan pequeña que el tiempo para calcular la solución se dispara. No habría problema si se tratara de un cálculo único, pero al tratarse de un programa de optimización donde este cálculo se repite muchas veces, el tener un elevado tiempo de cálculo implicaría tener mucho tiempo el programa en ejecución y bloqueado al resto de usuario o para su utilización en otras cosas.

Como en las anteriores macros, se presenta un esquema con los pasos seguidos:

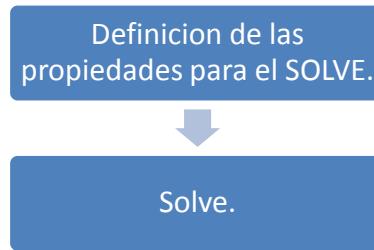


Imagen 41. Esquema de la macro de solución.

En este apartado además se va a explicar brevemente cómo funciona el criterio de convergencia del programa.

Ansys realiza un análisis no lineal de la solución debido a la introducción de los grandes desplazamientos. Ansys muestra en imagen cada norma con su respectivo criterio de convergencia para cada iteración de equilibrio. La *U* hace referencia a los desplazamientos, mientras que la *F* se refiere a las fuerzas. *CRIT* se refiere al valor del criterio, mientras que *L2* y *INF* hace referencia a las normas empleadas por Ansys. Sin entrar en muchos detalles, la norma *L2* comprueba la raíz cuadrada del sumatorio de los modos de combinación al cuadrado, mientras que la *INF* comprueba cada restricción de desplazamiento por separado.

En la imagen siguiente se puede ver el caso en el cual la norma de fuerzas y el criterio correspondiente no convergen, lo que implica que la pieza se ha roto.

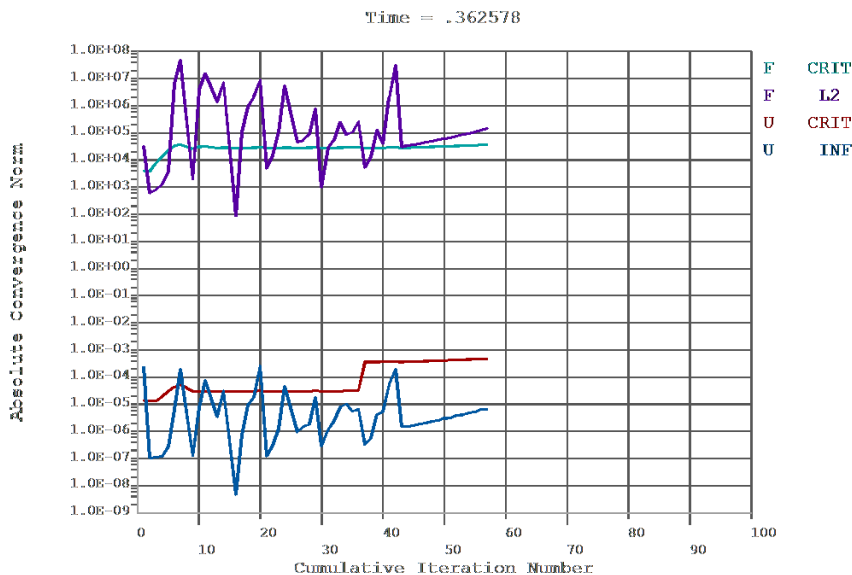


Imagen 42. Grafico del criterio de convergencia en Ansys.

3.1.9. Macro de postprocesado.

La macro de postprocesado solamente se encarga de recoger los el coeficiente de seguridad de la unión.

Lo primero que realiza esta macro es saber en qué subpaso de la solución se encuentra y el número de pasos que ha realizado. Posteriormente se obtiene para cada punto de equilibrio o subpaso el valor del máximo criterio de fallo, para posteriormente sacar el coeficiente de seguridad del adhesivo. Finalmente se llama a una macro para que esta siga trabajando los datos.

El motivo de crear otra macro a la cual llamar sólo desde ésta se debe puramente a la facilidad que esto suponía a la hora de verificar el funcionamiento de dicha macro.

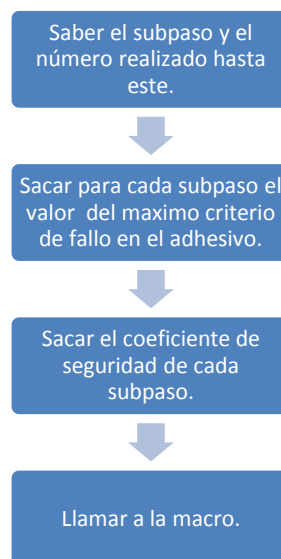


Imagen 43. Esquema de la macro de postprocesado.

3.1.10. Submacro del postproceso.

Esta macro es llamada de la macro del subproceso y no de la macro principal. La función que realiza es la de comprobar en que subpaso se produce el fallo del adhesivo. Si la pieza no falla en ninguno de los subpasos, se toma el último subpaso, si por el contrario, el adhesivo falla, se escoge el subpaso inmediatamente inferior al fallo. Esto se realiza así, solamente para estar del lado de la seguridad. Posteriormente se saca el coeficiente de seguridad del resto de los materiales.

Seguidamente, se crean los caminos o *path* que van a servirnos para tomar los valores necesarios y poder realizar los cálculos pertinentes. Recordemos que lo que nos interesa conocer es la

deformación angular que se produce en los extremos de cada escalón. Lo que se realiza, es conocer los puntos iniciales y finales de cada escalón y posteriormente crear un *path* que recorre toda la unión. Después, se cargan los parámetros que se van a obtener de cada camino y, posteriormente, se toma el valor absoluto de los valores. Esto se realiza así para saber realmente cual es el mínimo y el máximo de la deformación angular en la unión sin que el signo afecte al valor.

A continuación se calcula la función objetivo tal y como se ha explicado en el capítulo 2 de la memoria. Si el usuario lo desea, la macro finaliza mostrando una imagen de la función objetivo a lo largo de la unión y guardándola en un fichero. Esta opción solo es válida si la macro no se ejecuta en modo *batch*.

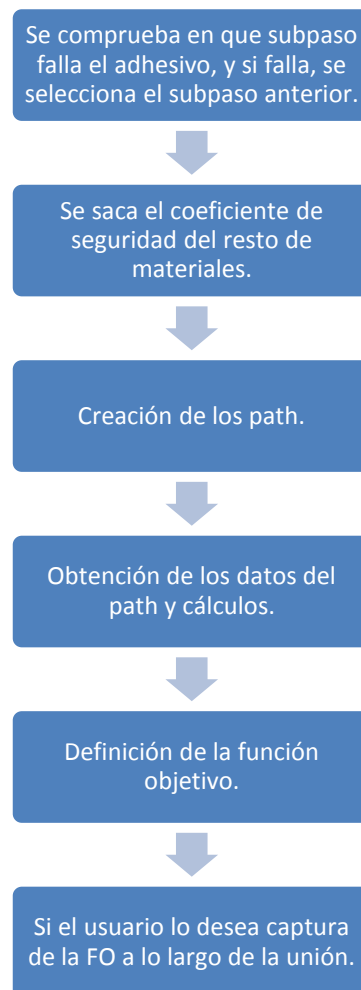


Imagen 44. Esquema de la submacro de postproceso.

3.1.11. Otras macros.

En este apartado se van a nombrar otras dos macros que se han creado pero que no se utilizan expresamente en el proceso de optimización de la unión sino que, se pueden emplear posteriormente una vez se ha obtenido el mejor diseño.

La primera de estas macros sirve para conocer por parte del usuario cual sería la carga máxima aproximada que aguantaría el adhesivo con los parámetros que han salido tras aplicar la optimización.

La macro es una copia de la macro de postproceso combinada con la macro de solución. Lo primero que realiza es llamar a la macro de solución. Posteriormente, se comprueba que el último subpaso de cálculo no ha fallado (coeficiente de seguridad mayor a 1.5), si el último subpaso hubiera fallado, significaría que el adhesivo no ha aguantado la carga diseñada y por tanto ya se conocería la carga máxima que provoca el fallo del adhesivo.

Lo que se hace a continuación es ir aumentando la carga progresivamente para continuar resolviendo la unión con la nueva carga. El aumento de la carga se realiza de forma variable, permitiendo una aproximación más rápida al inicio y reduciendo la velocidad de la aproximación cuanto más cerca se está de la fuerza que provoca la ruptura de la unión.

Se entenderá mejor lo que se intenta explicar al poner las condiciones del aumento de carga.

- Si el coeficiente de seguridad del adhesivo es mayor o igual a 20, aumentamos la tensión 10 veces. Es decir, $T^*=10*T$.
- Si el coeficiente de seguridad del adhesivo se encuentra entre 10 y 20, aumentaremos la tensión en 5.
- Finalmente si el coeficiente de seguridad es menor o igual a 10, duplicaremos la tensión.

Una vez realizado esto, lo siguiente que realiza la macro es el postproceso de la solución, los pasos seguidos son los mismos. Se guarda el coeficiente de seguridad del adhesivo para cada subpaso y se identifica en cual se ha producido el fallo en caso de que se produzca.

Posteriormente se leen los coeficientes de seguridad del resto de materiales, se crean los *path* y se calcula la función objetivo de nuevo.

Hay que decir, que cuando el coeficiente de seguridad alcance en algún momento un valor menor o igual a 1.5, se calculará la máxima tensión a la cual no se ha producido la rotura del adhesivo. Acto seguido se actuara sobre una variable control que evitara que el bucle se produzca una próxima vez.

Para saber cuál es la carga máxima que ha soportado el adhesivo, lo que se hace es aplicar la siguiente formula:

$$T_{rotura} = \frac{T_{actual} (n^{\circ} \text{ paso rotura} - 1)}{n^{\circ} \text{ pasos totales}} \quad (106)$$

Esto se puede aplicar así debido a que se ha introducido que la carga se va incrementando linealmente. El valor de la tensión que se obtiene es un valor que no provocará el fallo del adhesivo, queda claro que no se va a saber con exactitud cuál es la tensión exacta que provocará la rotura del adhesivo debido al planteamiento que se ha seguido. El valor obtenido quedará por lo tanto del lado de la seguridad, quedando un cierto margen para aumentar la carga. No obstante, el usuario puede saber el coeficiente de seguridad obtenido en el paso antes de la rotura y bajo su criterio decidir si aumenta la tensión aplicada de la unión o, hacerse una idea del margen que le queda para alcanzar la tensión crítica.

En las uniones escalonadas, el fallo de la unión no se producirá si el adhesivo rompe en los tramos verticales de los escalones. Como se ha explicado, el adhesivo está pensado para trabajar a cortante y no a tracción por lo que el adhesivo en sus tramos horizontales sigue trabajando, y por lo tanto la unión aguantará sin romperse hasta que la grieta se produzca en uno de estos tramos. Por ello, el usuario puede al utilizar esta macro ver el coeficiente de seguridad de los tramos horizontales antes de que se produzca la rotura inminente del tramo vertical y evaluar cuanta carga más puede soportar la unión. Como se ha comentado anteriormente, este resultado se queda del lado de la seguridad ya que sólo muestra la carga máxima que provoca el fallo en cualquier parte del adhesivo, que siempre se producirá en un tramo vertical.

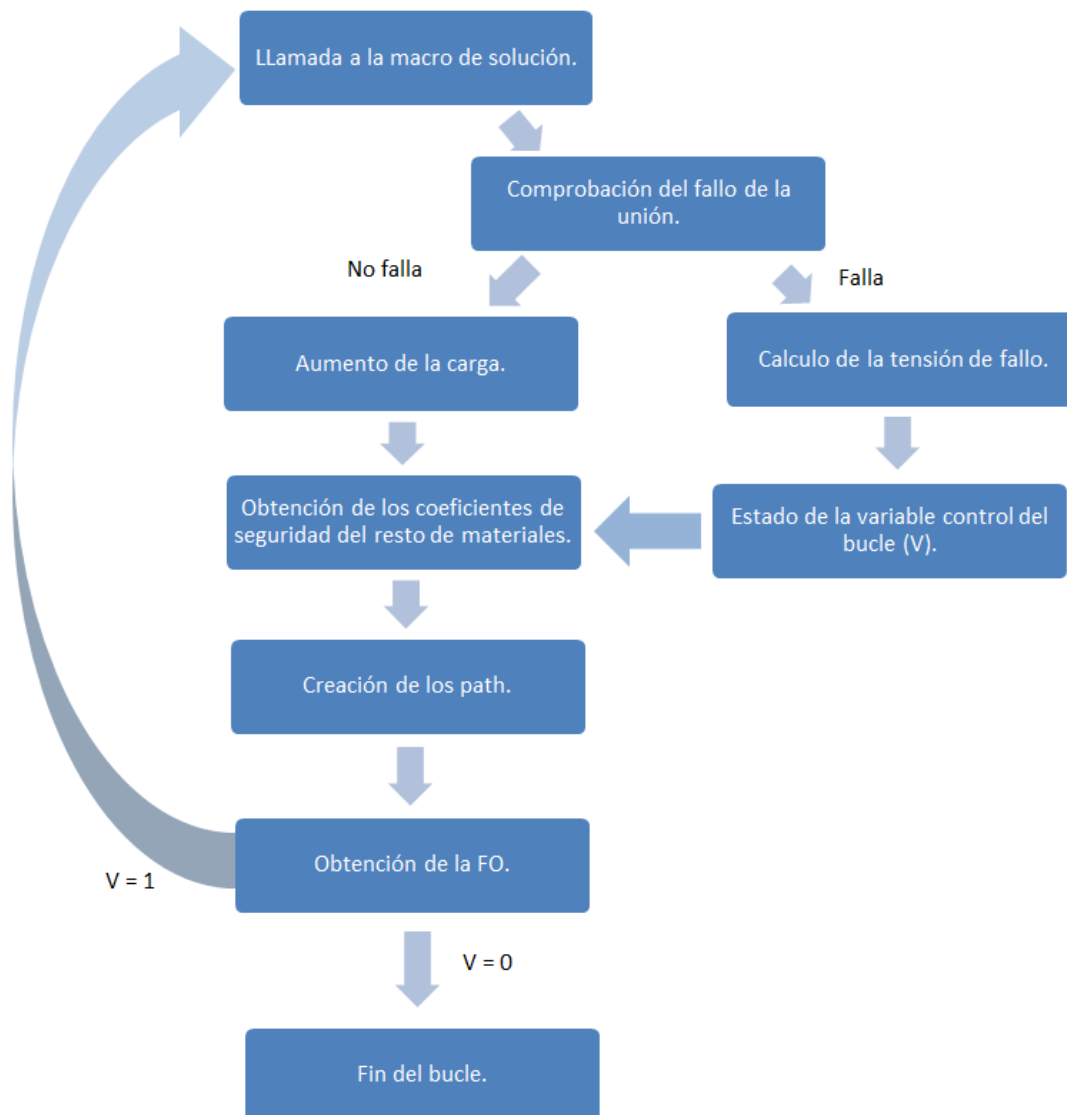


Imagen 45. Esquema de la macro de obtención de carga máxima.

Para acabar las macros adicionales que el usuario puede ejecutar una vez ha obtenido el mejor diseño con el método de optimización, se encuentra la macro que extruye la pieza convirtiéndola en una pieza en 3D, aplica las nuevas condiciones de contorno y ejecuta el *SOLVE*.

En realidad esta macro es una combinación de los comandos de la macro de condiciones de contorno y solución pero con unas ciertas modificaciones y añadidos extras. Lo primero que se realiza en la macro, es la definición de un elemento tridimensional. Posteriormente se ejecuta una extrusión sobre la pieza bidimensional, la cual ya se encuentra mallada y con los atributos sobre las áreas asignados. En la extrusión se especifica un valor para su profundidad, en este caso se toma un valor igual al triple del valor de la anchura. También se extruye junto con las áreas, el mallado y el nuevo elemento, pasando los atributos de cada área al volumen correspondiente.

Se elige la disposición espacial de los nodos y cuantas secciones van a existir a lo largo del volumen. En este caso y puesto que el número de nodos aumenta considerablemente cuantas más secciones defines así como con el tamaño de la malla, se ha elegido que haya cinco secciones junto con las caras exteriores y que éstas, se distribuyan espacialmente cercanas a las caras exteriores. La siguiente imagen muestra un ejemplo de lo explicado anteriormente:

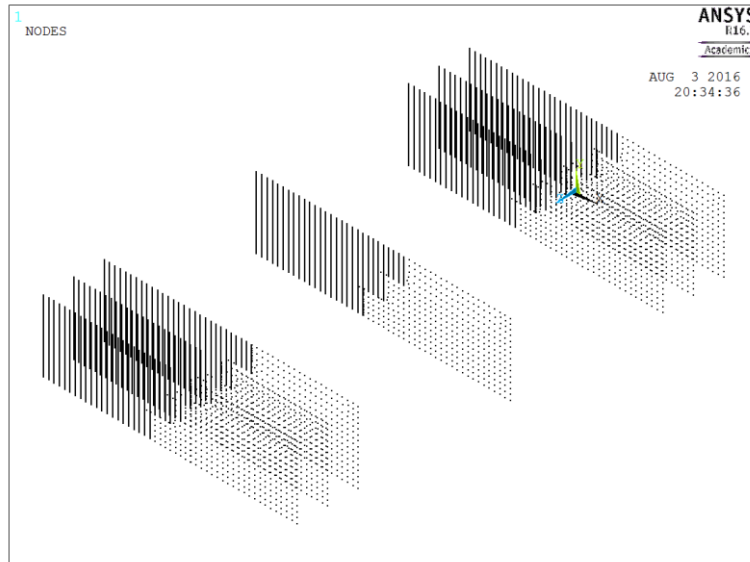


Imagen 46. Distribución de los nodos en la pieza tridimensional.

La pieza extruida queda:

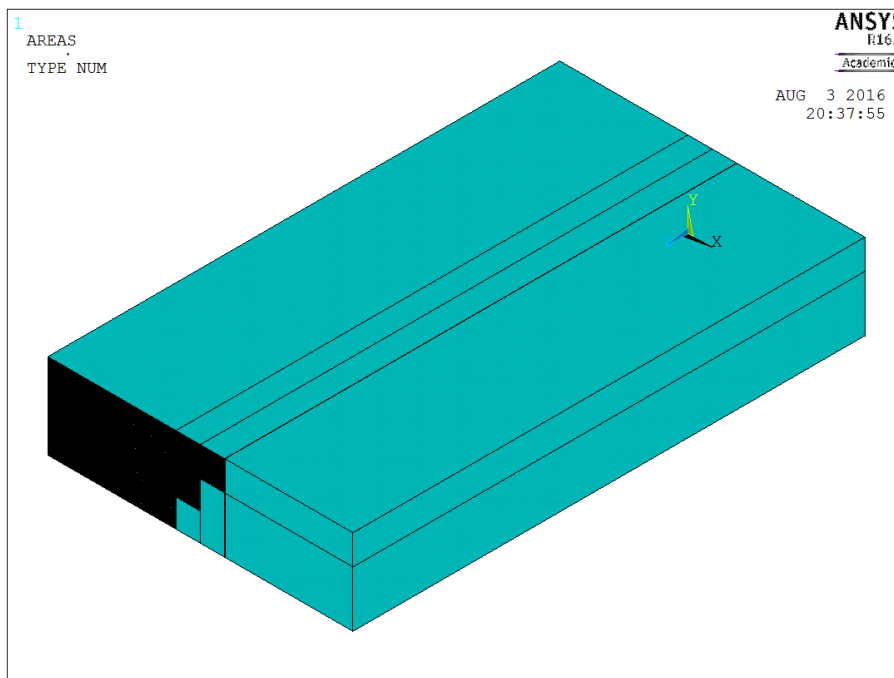


Imagen 47. Pieza tridimensional.

Posteriormente se imponen las condiciones de contorno sobre las áreas. A diferencia del caso bidimensional, se añade una restricción en ambos extremos de la pieza impidiendo su desplazamiento en la dirección Z (dirección en la que se ha realizado la extrusión). Tras aplicarle las condiciones de contorno, la pieza queda así:

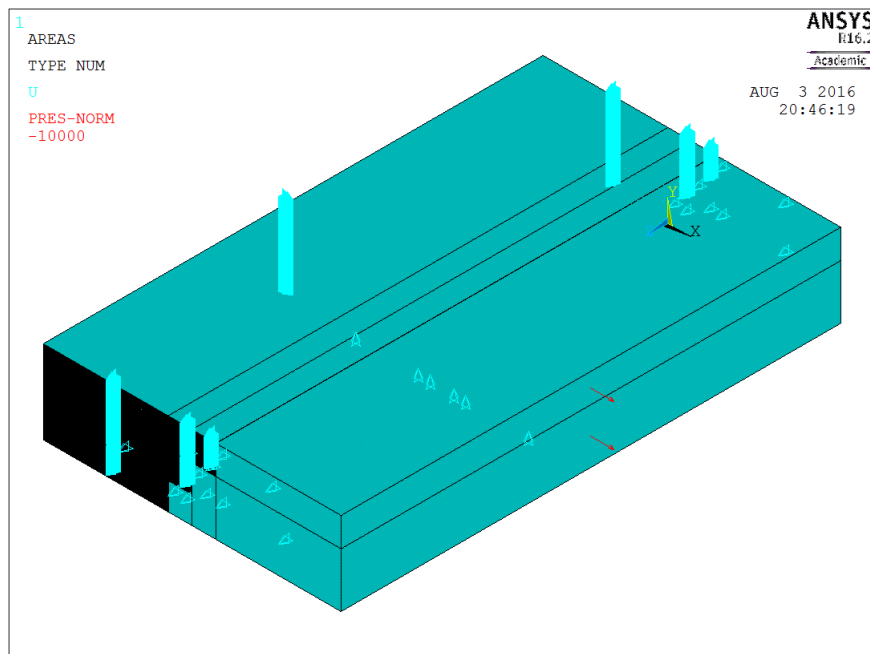


Imagen 48. Condiciones de contorno en la pieza tridimensional.

Finalmente se llama a la macro de solución para efectuar la solución de la pieza. El esquema que sigue esta macro es el siguiente:

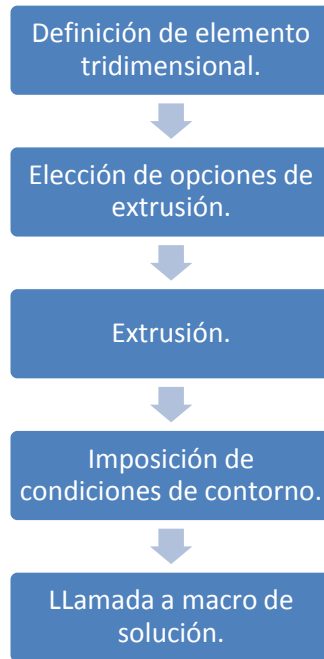


Imagen 49. Esquema de la macro de generación de la unión en 3D.

3.2. Algoritmo de solución del programa.

A continuación se va a presentar un esquema que representa el algoritmo que sigue el programa para la optimización de la unión, se van a omitir los detalles poco importantes de las macros secundarias y se van a efectuar dos esquemas puesto que uno solo no resultaba suficiente.

El usuario introducirá en la macro de optimización la anchura de la pieza y las demás opciones comentadas en la macro de optimización. Posteriormente introducirá los valores de las propiedades del material en la macro de las propiedades y definirá las energías de fractura en la macro del criterio de evolución. Una vez realizado todo esto, se recomienda la utilización del modo *batch* de Ansys.

El modo *batch* de Ansys es un tipo de ejecución del programa. En lugar de abrir el programa para que el usuario pueda ver la pantalla de ejecución, los menús o introducir los comandos deseados, el programa se ejecuta él solo sin necesidad de llegar a abrirse. El usuario solamente debe introducir el archivo que quiere ejecutar y el programa lo va ejecutando hasta que encuentra un error. La ventaja de ejecutarlo en modo *batch* es que permite omitir los errores que puedan surgir, como por ejemplo el error por fallo en la convergencia de la solución o el fallo por geometría imposible de realizar, sin que el usuario tenga que estar pulsando continuamente una tecla para permitir que el programa continúe.

El tiempo que se está ejecutando el programa varía dependiendo de muchos factores, por ejemplo: del número de escalones introducido, la anchura de la pieza, la carga introducida, la potencia del ordenador, etc.

El usuario no verá la transición del método de optimización *subproblem* al método *sweep*. Para conocer el número total de diseños realizados, ver en qué diseño se ha realizado la transición del método de optimización *subproblem* al *sweep*, ver cuál ha sido el mejor diseño o simplemente ver cómo han ido variando las variables a lo largo de las distintas optimizaciones, el usuario debe mirar el fichero **.out*.

Finalmente y si así lo desea, el usuario puede cargar el mejor diseño y aplicarle las macros auxiliares que permiten conocer la carga máxima que aguanta el adhesivo o generar la unión en tres dimensiones y ver qué valores de tensiones o desplazamientos obtiene.

Hay que remarcar que el modo *batch* continua ejecutando el programa a pesar de los errores encontrados. Si surgiera un error a la hora de hacer la geometría, mallar la pieza o de convergencia de la solución, Ansys otorgará valores muy elevados a la función de diseño y las variables de estado de modo que ese diseño quedará anulado por cualquier otro que si sea válido.

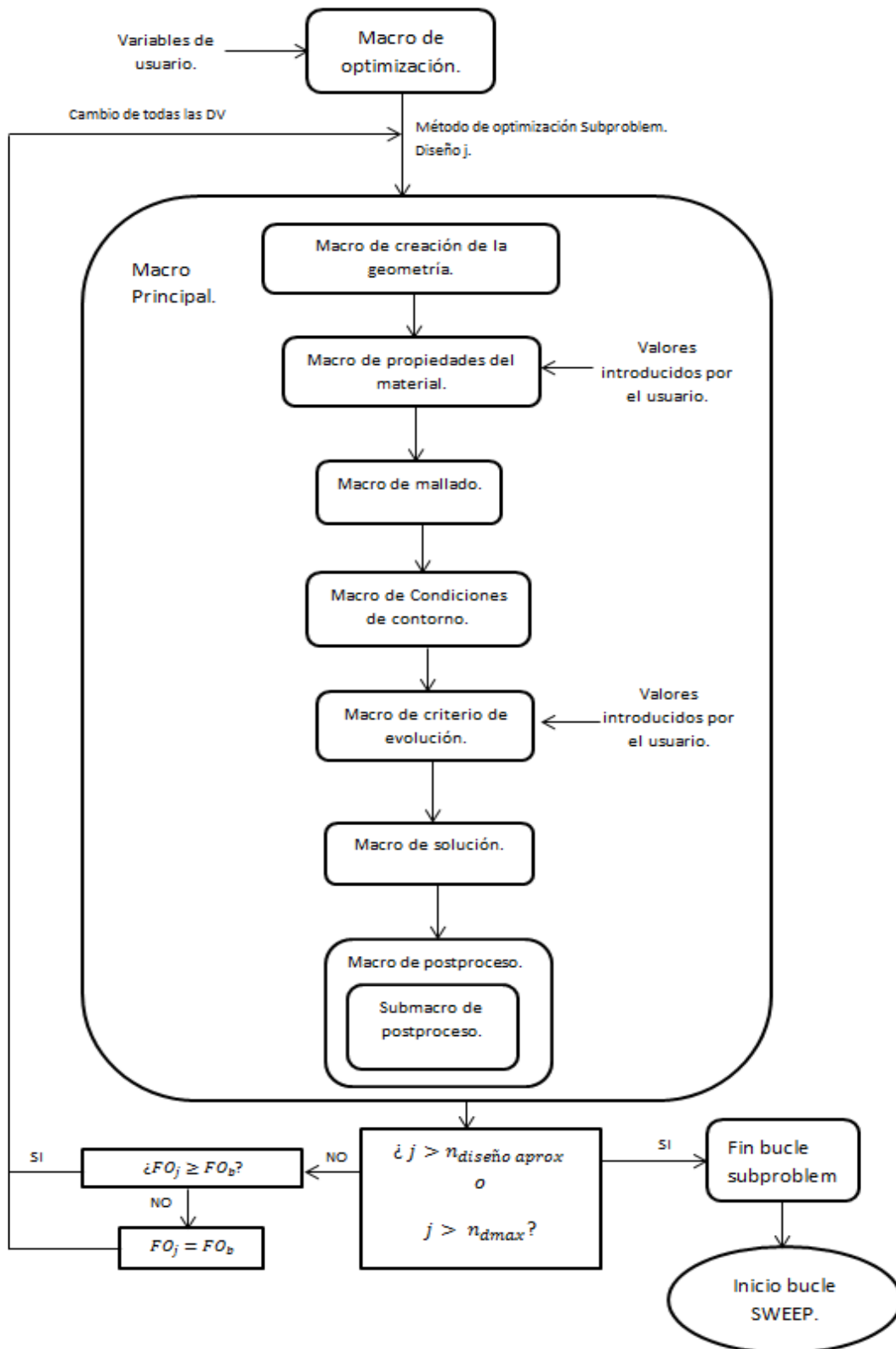


Imagen 50. Esquema del algoritmo de la macro (I).

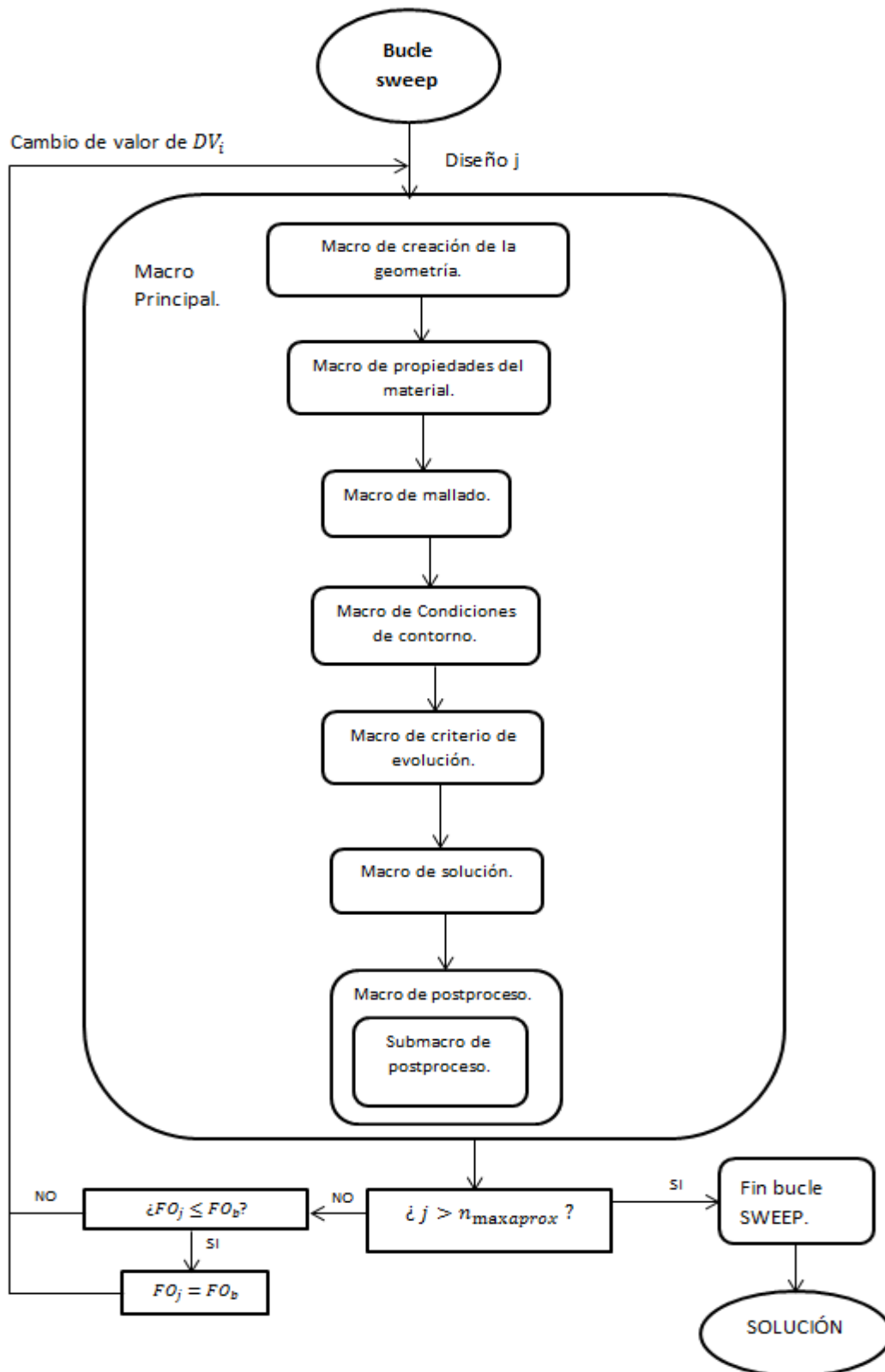


Imagen 51. Esquema del algoritmo de la macro (II).

Capítulo 4. Resultados.

En el este capítulo de la memoria se van a mostrar diferentes resultados obtenidos utilizando diferentes combinaciones de anchuras y materiales, así como el empleo de las dos macros extras que puede utilizar el usuario para generar la pieza tridimensionalmente o saber la carga máxima que puede aplicar para la rotura del adhesivo.

Se van a estudiar tres casos. Una unión metal-metal, una unión compuesto-compuesto unidireccional y una unión compuesto-metal.

4.1. Unión metal-metal.

La primera unión a analizar es una unión metal-metal. En concreto, se trata de una unión entre dos piezas de acero. Las siguientes tablas muestran las características de la unión:

Módulo de <i>Young</i> acero	210.00 GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i> acero	2.50 GPa
Módulo de <i>Young</i> adhesivo	0.38
Coefficiente de <i>Poisson</i> del adhesivo	0.30
Espesor adhesivo	0.10 mm
Anchura de la unión	6.40 cm
Carga impuesta	1.00 Mpa.

Tabla 1. Propiedades del material.

Material	Acero
S_{1T}	400.00 MPa
S_{1C}	-400.00 MPa
S_{2T}	400.00 MPa
S_{2C}	-400.00 MPa
S_{12s}	350.00 MPa

Tabla 2. Límites de rotura del acero.

Material	Adhesivo
S_{1T}	48.50 MPa
S_{1C}	-48.50 MPa
S_{2T}	48.50 MPa
S_{2C}	-48.50 MPa
S_{12}	48.50 MPa

Tabla3. Límites de rotura para el adhesivo.

Material	Acero
G_{1T}	107000.00 J/m ²
G_{1C}	107000.00 J/m ²
G_{2T}	107000.00 J/m ²
G_{2C}	107000.00 J/m ²

Tabla 4. Energía del acero.

Material	Adhesivo
G_{1T}	7898.22 J/m ²
G_{1C}	7898.22 J/m ²
G_{2T}	7898.22 J/m ²
G_{2C}	7898.22 J/m ²

Tabla 5. Energía del adhesivo.

VARIABLES DE DISEÑO	Valor
N	3
L_1	0.10000
L_2	0.01929
L_3	0.07125
T_1	1.09090
T_2	1.48640
T_3	1.27030

Tabla 6. Valores de DV's para la optimización acero-acero.

VARIABLES DE ESTADO	Valor
Coefficiente de seguridad material 1 (SV1)	236.47
Coefficiente de seguridad material 3 (SV2)	244.66
Función Objetivo	0.1656 e-7

Tabla 7. Valores de SV's y FO para la optimización acero-acero.

Nº Diseños totales	Nº Mejor diseño
105	30

Tabla 8. Número de diseños realizado.

La pieza presenta el siguiente aspecto:

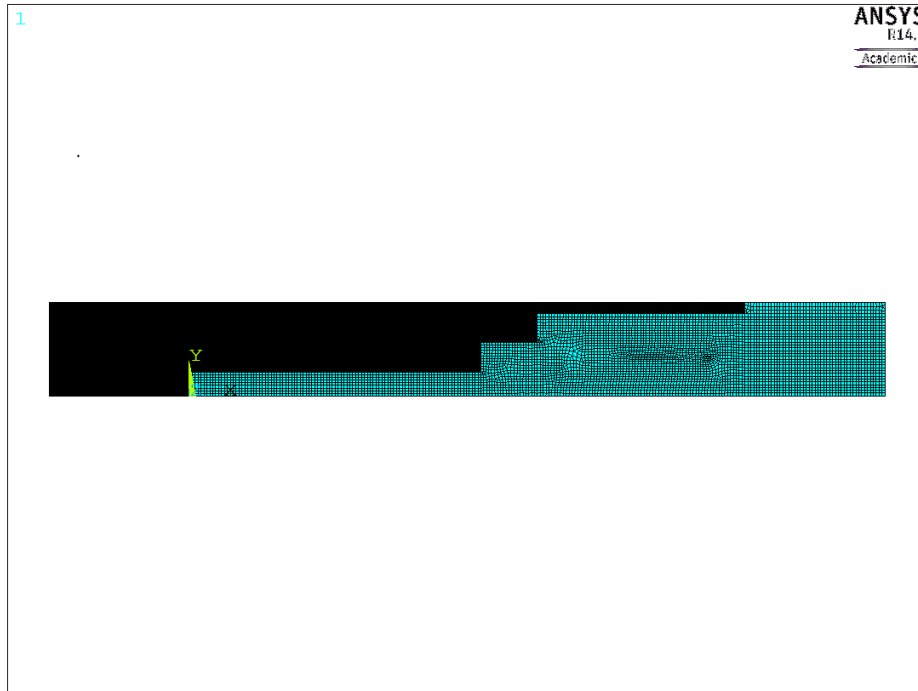


Imagen 52. Mejor diseño unión acero-acero.

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos del mejor diseño de la unión:

- Función Objetivo.

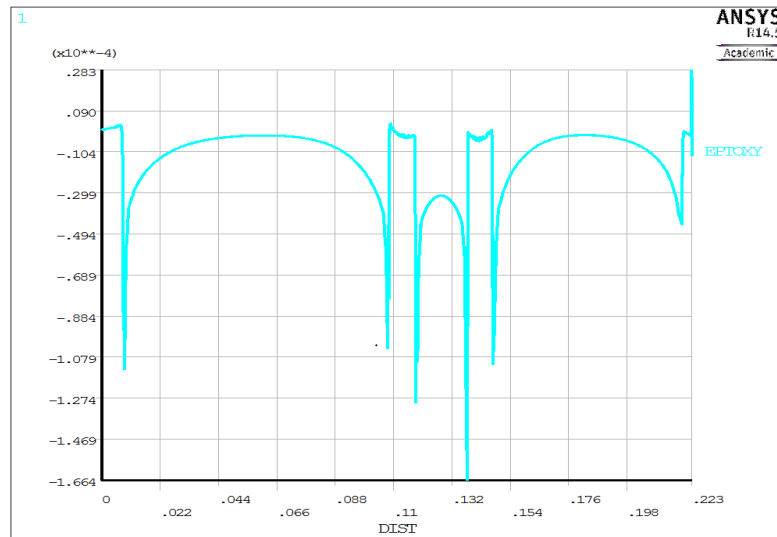


Imagen 53. Función objetivo unión acero-acero.

En la imagen, se puede apreciar como la distribución de la deformación angular a lo largo del escalón se mantiene uniforme y por tanto, el programa realiza bien la optimización. Los picos obtenidos son en los puntos de transición de la unión entre el tramo horizontal y el tramo vertical y por tanto presentan valores mayores de deformación.

- Tensión principal en la dirección X.

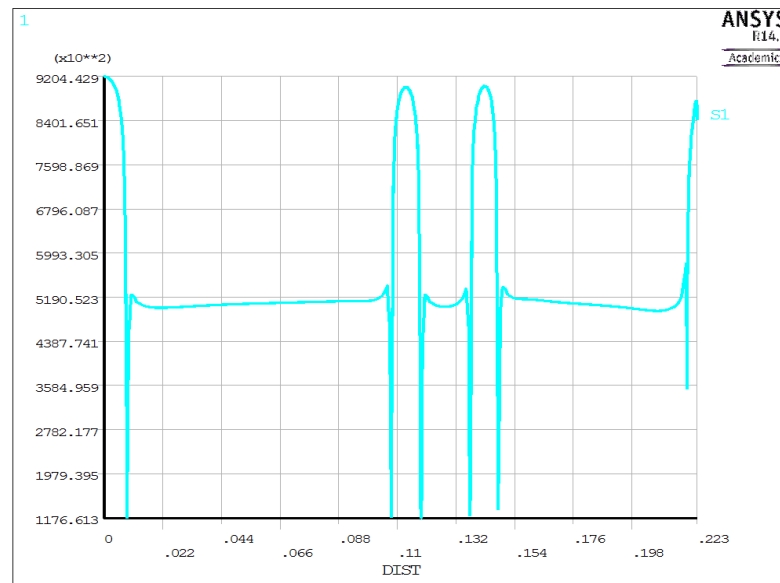


Imagen 54. Tensión principal en X unión acero-acero.

Esta imagen muestra como la tensión en los tramos verticales del adhesivo son mayores, pues el adhesivo ante esfuerzos de tracción no trabaja adecuadamente.

- Tensión principal en la dirección Z.

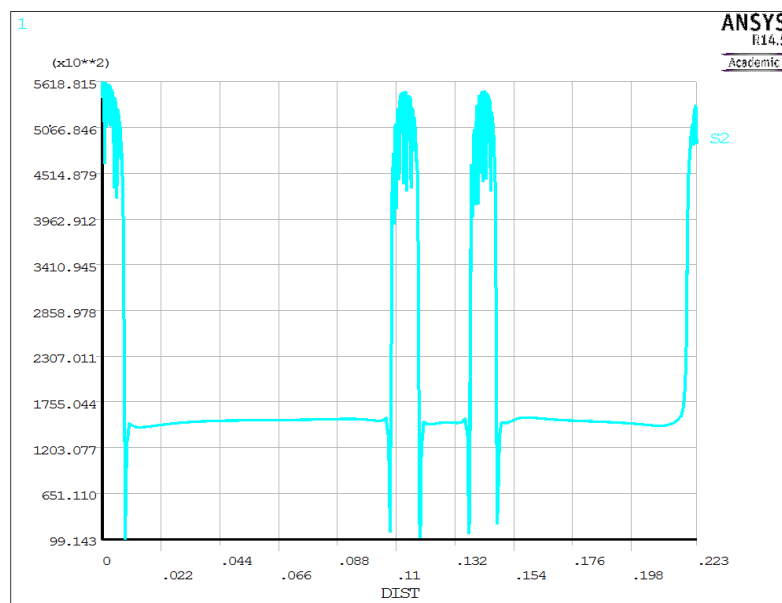


Imagen 55. Tensión principal en Z unión acero-acero.

- Tensión principal en la dirección Y.

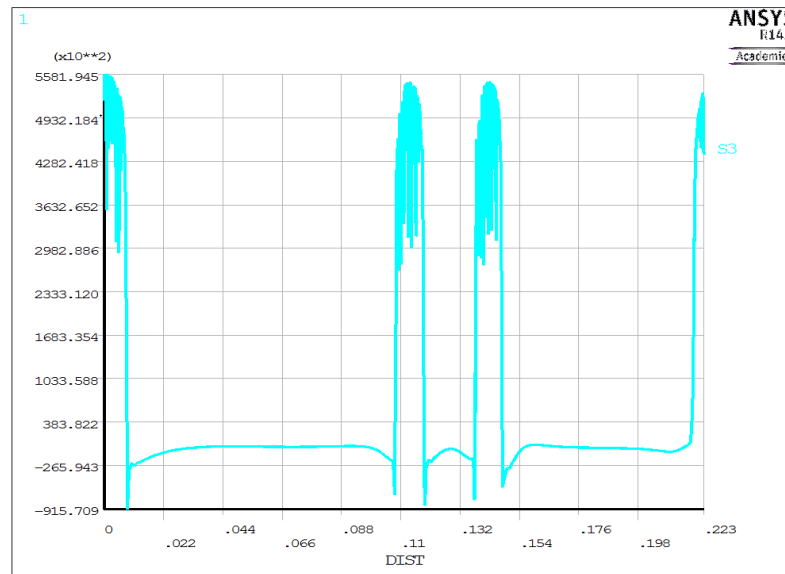


Imagen 56. Tensión principal en Y unión acero-acero.

De la imagen anterior se puede apreciar si se compara con la gráfica de la tensión principal en X como los valores máximos en los tramos verticales corresponden del orden de magnitud con los valores alcanzados por los tramos horizontales. Esto se debe a que el adhesivo en su tramo vertical ya no está trabajando ante un esfuerzo de tracción sino, de cortante y por lo tanto presenta valores semejantes a los hallados en la gráfica de tensión en dirección X.

- Tensión de cortadura.

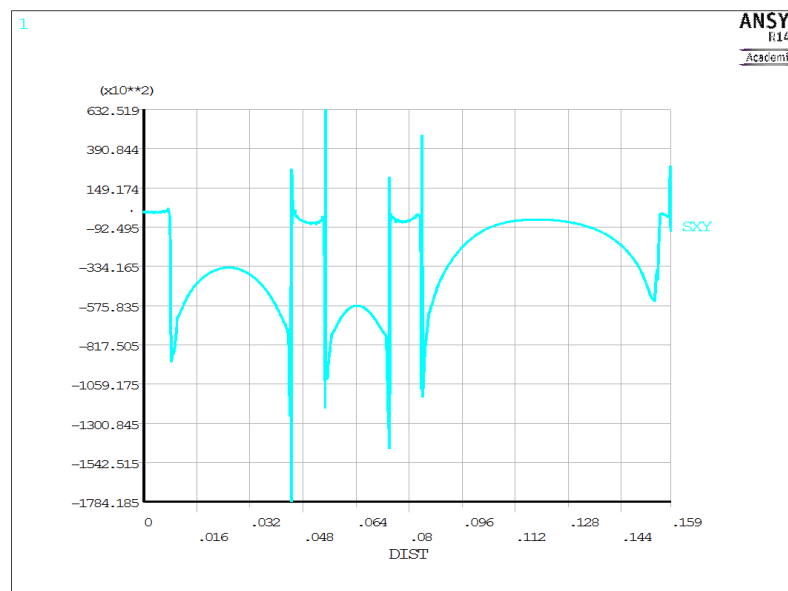


Imagen 57. Tensión de cortadura unión acero-acero.

- Comparativa de las tensiones principales.

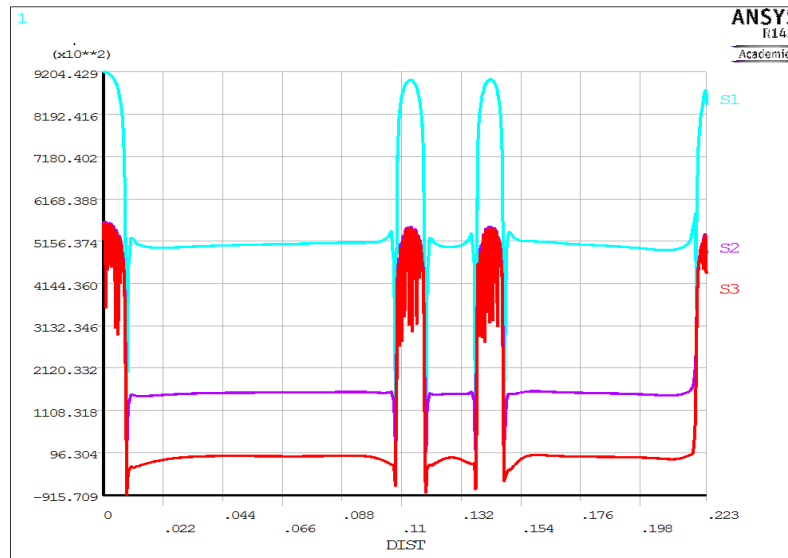


Imagen 58. Comparativa tensiones principales acero-acero.

En esta grafica comparativa se puede apreciar mejor lo comentado anteriormente de los modos en los que está trabajando el adhesivo en los tramos horizontales y verticales. La mayor tensión que se alcanza en el adhesivo es en los tramos verticales, debido a lo comentado anteriormente por lo que, el inicio de una grieta se producirá por uno de estos escalones.

- Criterio de *Tsai Wu*.

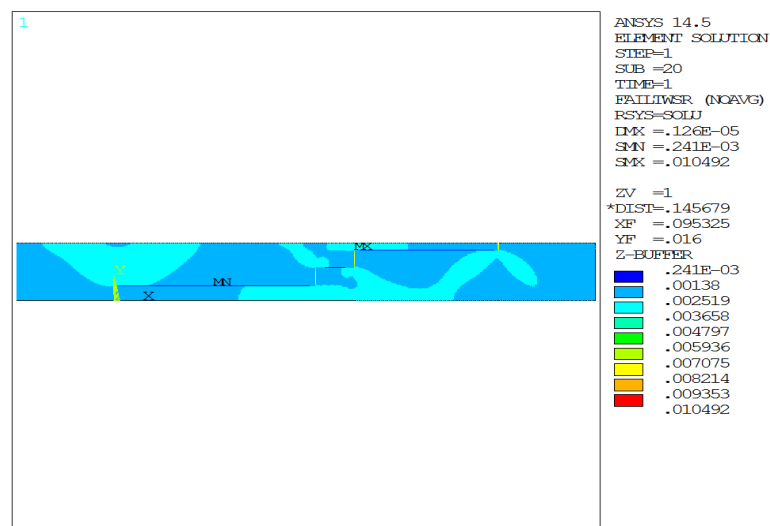


Imagen 59. Criterio Tsai Wu unión acero-acero.

- Criterio máxima tensión.

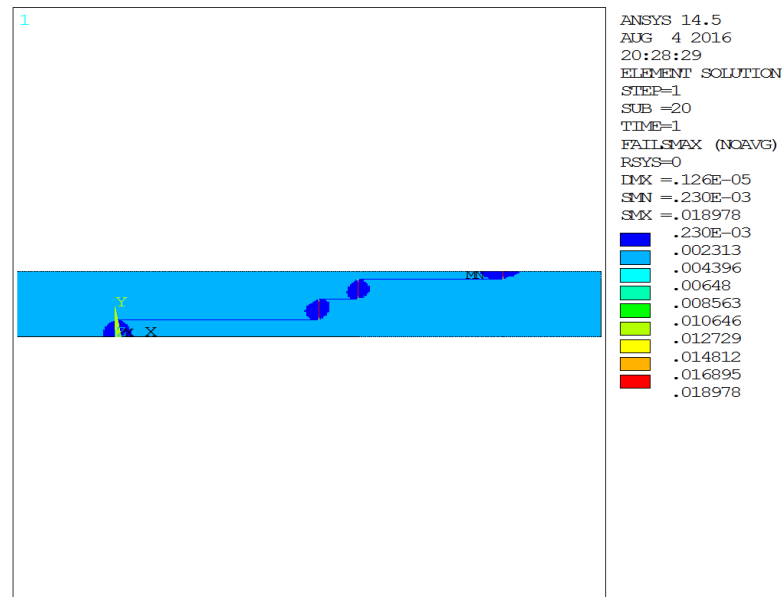


Imagen 60. Criterio de máxima tensión unión acero-acero.

Las dos imágenes anteriores muestran como las zonas críticas de la unión son los tramos verticales, los cuales presentan un coeficiente de seguridad menor (mayor valor en los criterios de fallo) y por tanto el inicio de una grieta se producirá en uno de estos tramos.

Para comprobar que los resultados obtenidos por el programa son adecuados, se va a proceder a comparar los resultados con los resultados obtenidos en un artículo de divulgación científica [4]. En él se realiza un ensayo mediante elementos finitos de la siguiente unión escalonada de acero:

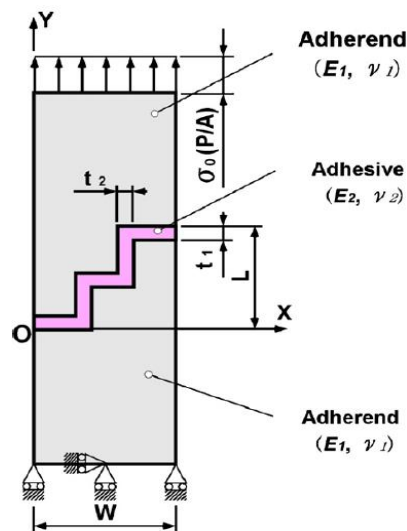


Imagen 61. Unión de estudio en el análisis del artículo (Ichikawa, Shin y Sawa, 2008).

El resultado que obtienen es:

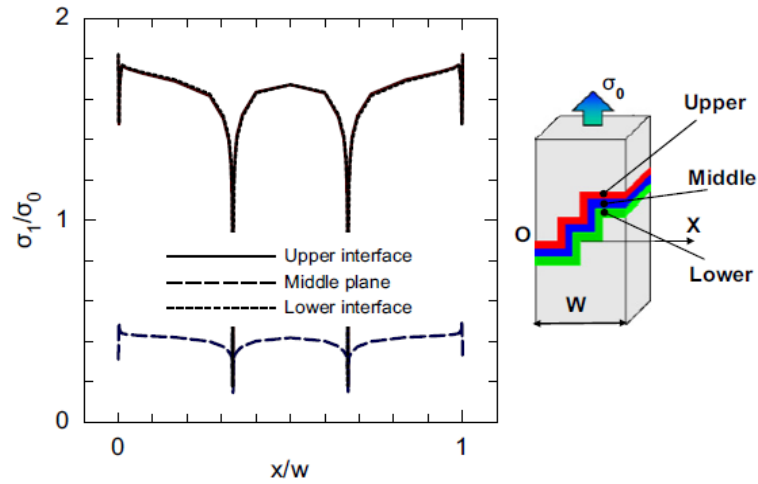


Imagen 62. Tensiones de la unión del análisis del artículo (Ichikawa, Shin y Sawa, 2008).

Si se analizan los resultados obtenidos por el programa realizado de optimización y se comparan con los obtenidos por el artículo académico se observa como la tensión en la dirección X que aporta Ansys a lo largo de toda la unión, guarda similitud en la forma de la función con las obtenidas en el artículo académico. Hay que mencionar que los ejes en ambas uniones no son los mismos y es precisamente debido a ese motivo, que se debe comparar la tensión en la dirección X en lugar de la tensión en dirección Y. Además hay que mencionar que en la imagen superior, no están representadas las tensiones en los escalones, por lo que habría que eliminar de la gráfica obtenida en Ansys, los tramos de los escalones verticales.

Para finalizar, comentaremos que en el artículo obtienen una resistencia de la unión de 28 MPa. Por lo que a continuación, se procede a aplicar a la geometría obtenida del mejor modelo la macro realizada para conocer la carga máxima que puede aguantar el adhesivo.

Tras aplicarle la macro que obtiene la carga máxima que puede aguantar el adhesivo, se obtienen los siguientes resultados:

- Función Objetivo.

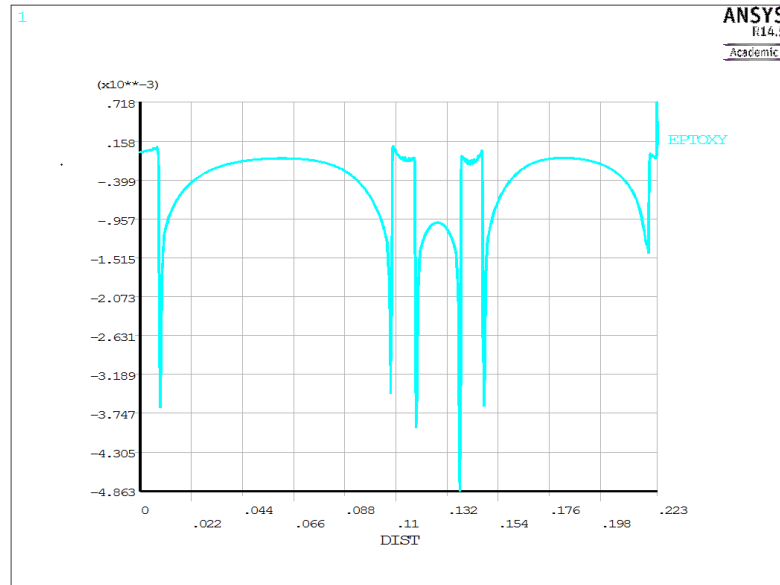


Imagen 63. Función objetivo unión acero-acero en carga máxima.

- Tensión principal en la dirección X.

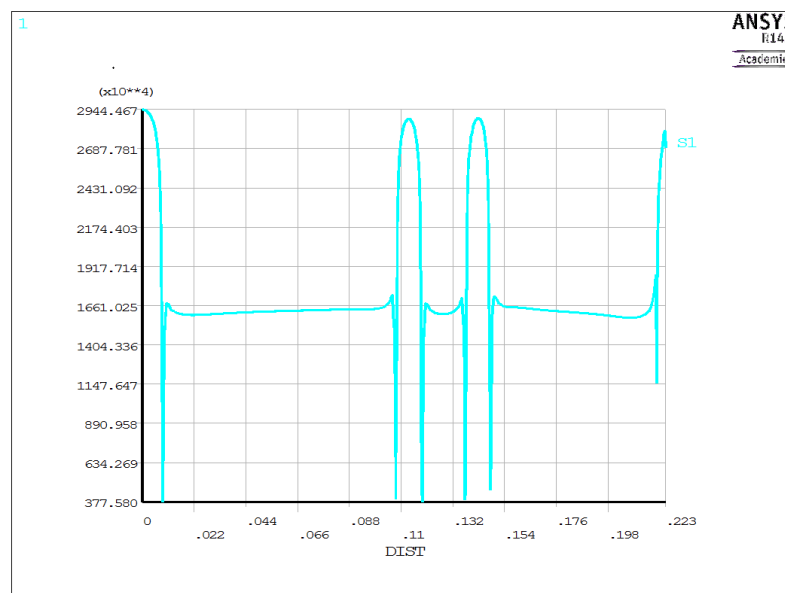


Imagen 64. Tensión principal X unión acero-acero en carga máxima.

Como se puede apreciar, la forma de las gráficas es la misma, pero sus valores han aumentado al aumentar la carga. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos tras aplicar la macro:

Carga máxima	32.00 MPa
Coef. Seguridad acero (parte izquierda)	7.39
Coef. Seguridad acero (parte derecha)	7.64
Coef. Seguridad adhesivo	1.65
Función Objetivo	1.7275 e-5

Tabla 9. Valores obtenidos unión acero-acero en carga máxima.

Podemos por lo tanto llegar a la conclusión que, la unión optimizada con la misma anchura de la pieza estudiada en el artículo, consigue un inicio de la rotura del adhesivo en sus tramos verticales con mayor carga que la rotura de la pieza obtenida en el artículo. Por lo cual, se puede decir que la unión obtenida aguantará más de 32 MPa y por tanto aguanta más que la pieza del artículo. Conviene señalar que los autores del artículo en ningún momento buscan la optimización geométrica de la unión sino el estudio de su comportamiento.

Finalmente, a la pieza inicial, se le aplica la macro que genera la geometría en 3D, las siguientes imágenes muestran los resultados obtenidos:

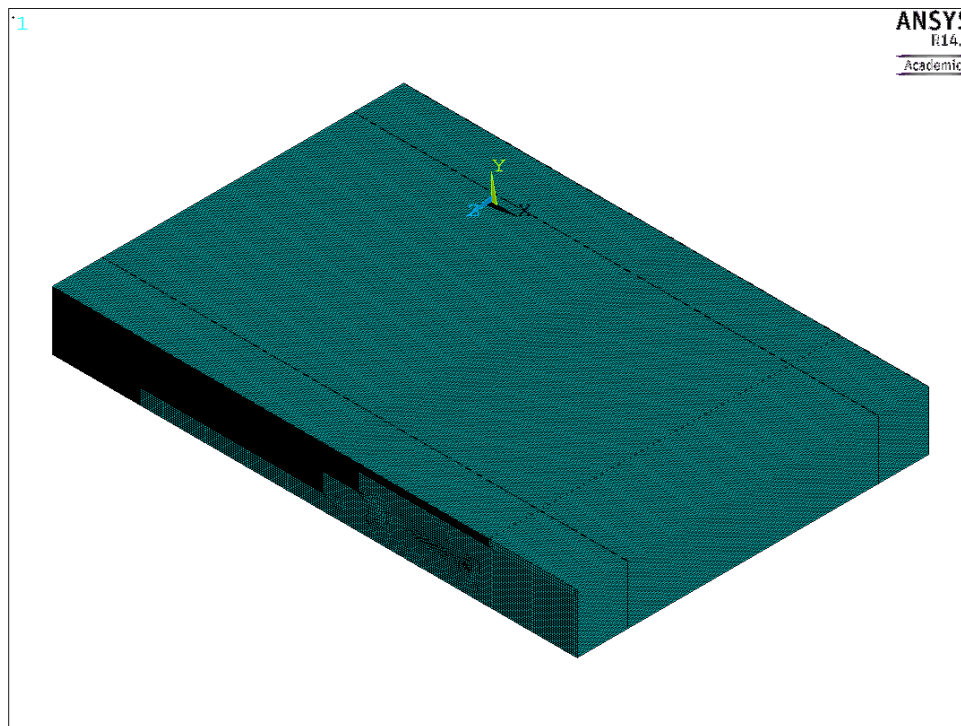


Imagen 65. Unión acero-acero tridimensional.

La mayor deformación angular que presenta la pieza se sitúa en el último escalón vertical con un valor de $0.116e-3$ tal y como muestra la siguiente imagen ampliada en dicha zona:

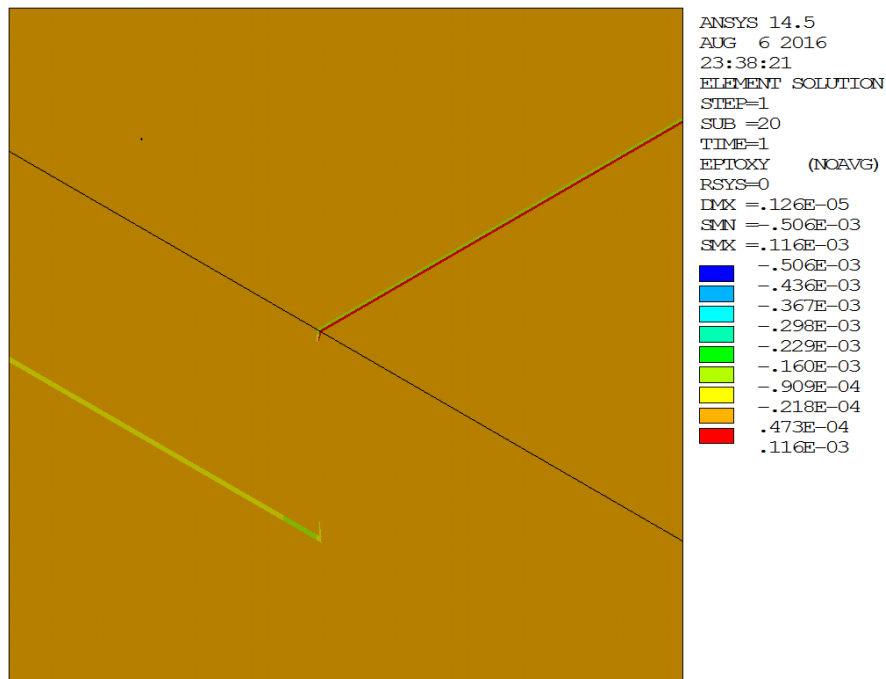


Imagen 66. Unión acero-acero 3D deformación angular.

El punto de rotura de la pieza se presentará también en el último escalón ya que se obtiene en esa zona el valor más grande, lo que implicará que el coeficiente de seguridad será menor por tratarse de la inversa del valor obtenido. En la siguiente imagen se aprecia como a lo largo de la unión del último escalón es donde se obtiene el mayor valor.

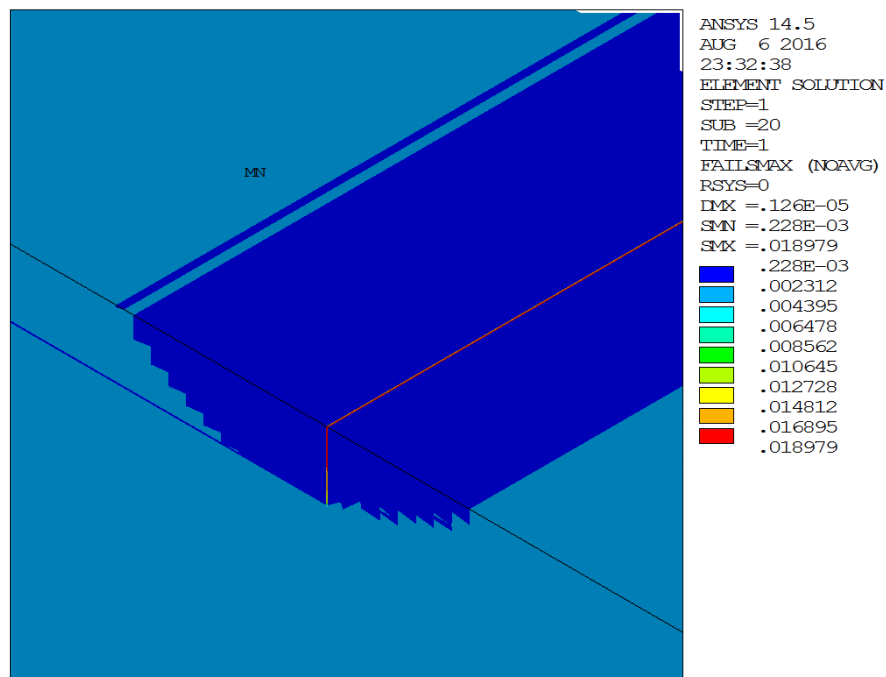


Imagen 67. Unión acero-acero 3D criterio de máxima tensión.

La tensión de cortadura a lo largo de la unión tridimensional es la siguiente:

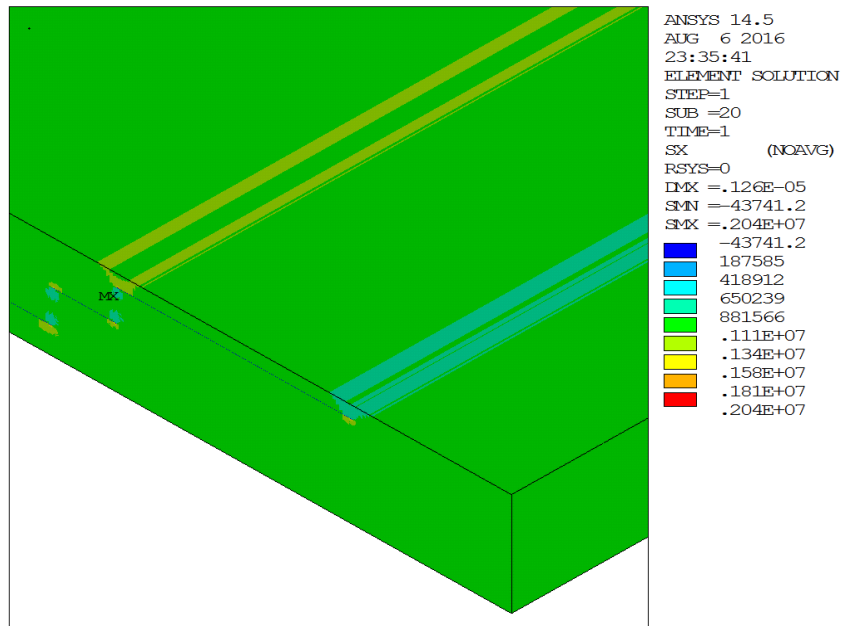


Imagen 68. Unión acero-acero 3D tensión de cortadura.

4.2. Unión compuesto-metal.

A continuación se va a estudiar una unión de fibra de carbono unidireccional y aluminio. Los datos del adhesivo son los pertenecientes a las tablas 3 y 5, los datos del resto de materiales son los siguientes:

Módulo de Young aluminio	73.08 GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i> aluminio	0.33
Módulo de <i>Young</i> adhesivo	2.50 GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i> del adhesivo	0.38
Espesor adhesivo	0.10 mm
Anchura de la unión	30 cm
Ex fibra de carbono	142.03 GPa
Ey fibra de carbono	7.79 GPa
Ez fibra de carbono	7.79 GPa
<i>Poisson</i> XY fibra de carbono	0.34
<i>Poisson</i> YZ fibra de carbono	0.34
<i>Poisson</i> XZ fibra de carbono	0.40
Gxy fibra de carbono	4.00 GPa
Gyz fibra de carbono	4.00 GPa
Gxz fibra de carbono	2.75 GPa
Carga impuesta	100.00 MPa

Tabla 10. Propiedades de los materiales unión F. Carbono-Al.

Material	Aluminio
S_{1T}	572.00 Mpa
S_{1C}	-572.00 Mpa
S_{2T}	572.00 Mpa
S_{2C}	-572.00 Mpa
S_{12s}	331.00 Mpa

Tabla 11. Valores de rotura Al.

Material	Fibra de carbono
S_{1T}	2606.00 Mpa
S_{1C}	-1682.00 Mpa
S_{2T}	72.39 Mpa
S_{2C}	-298.85 Mpa
S_{12}	115.83 Mpa

Tabla 12. Valores de rotura fibra de carbono.

Material	Aluminio
G_{1T}	20000.00 J/m ²
G_{1C}	20000.00 J/m ²
G_{2T}	20000.00 J/m ²
G_{2C}	20000.00 J/m ²

Tabla 13. Energía aluminio.

Material	Fibra de carbono
G_{1T}	146756.29 J/m ²
G_{1C}	106302.00 J/m ²
G_{2T}	262.70 J/m ²
G_{2C}	2329.18 J/m ²

Tabla 14. Energía fibra de carbono.

Variables de diseño	Valor
N	7
L_1	0.273
L_2	0.281
L_3	0.176
L_4	0.014
L_5	0.010
L_6	0.028
L_7	0.079
T_1	1.135
T_2	0.921
T_3	1.485
T_4	1.495
T_5	1.275
T_6	1.395

T_7	1.030
-------	-------

Tabla 15. Valores de las variables de diseño de la unión F. Carbono-Al.

Variables de estado	Valor
Coficiente de seguridad material 1 (SV1)	22.474
Coficiente de seguridad material 3 (SV2)	18.999
Función Objetivo	0.2512e-5

Tabla 16. Valores de las SV y FO de la unión F. Carbono-Al.

Nº Diseños totales	Nº Mejor diseño
180	141

Tabla 17. Diseños totales realizados y mejor diseño de la unión F. Carbono-Al.

Tiempo de simulación
4.5 días

Tabla 18. Duración de la optimización de la unión F. Carbono-Al.

La pieza presenta el siguiente aspecto:

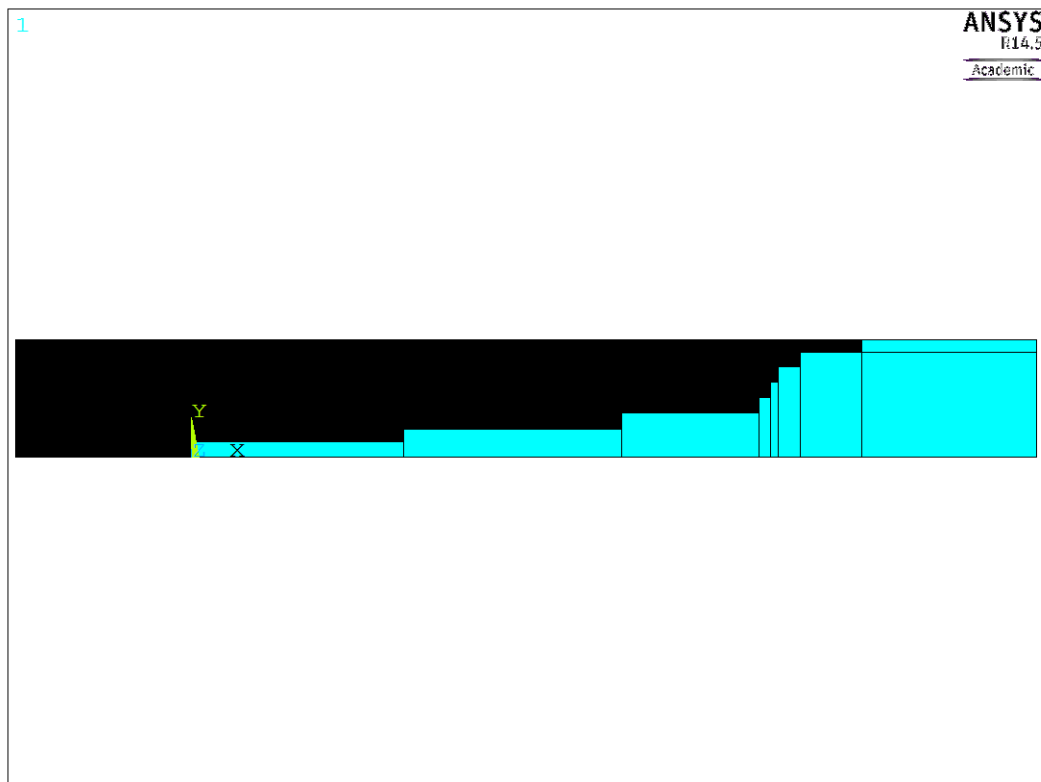


Imagen 69. Mejor diseño unión carbono-aluminio.

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos del mejor diseño de la unión:

- Función Objetivo.

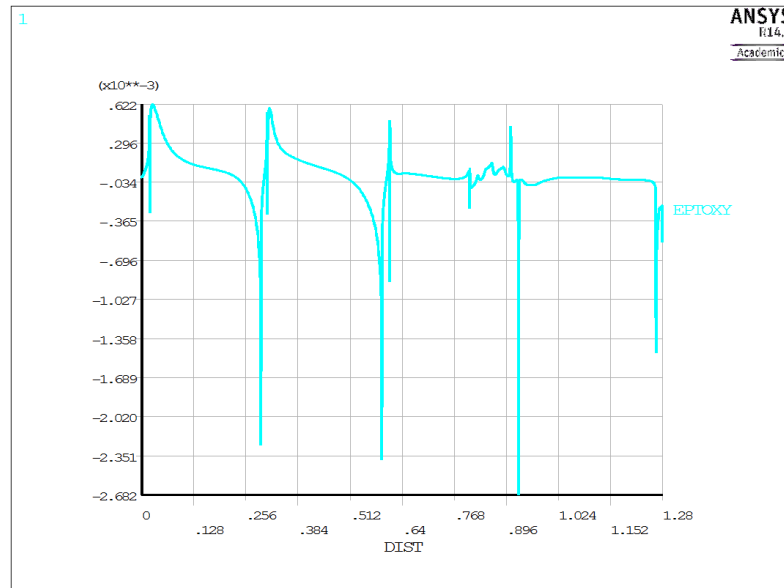


Imagen 70. Función objetivo unión carbono-aluminio.

- Tensión principal en la dirección X.

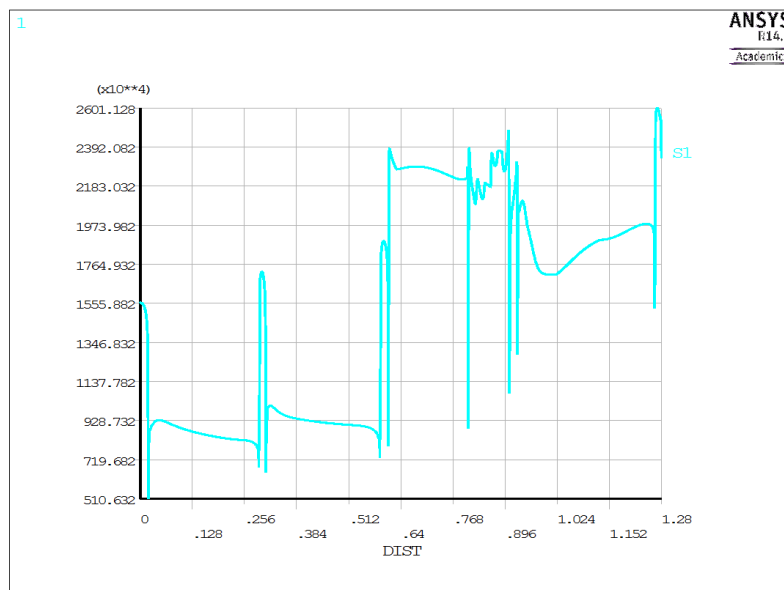


Imagen 71. Tensión principal en X unión carbono-aluminio.

En la gráfica anterior se puede apreciar como en los escalones intermedios donde la longitud de éstos es pequeña, la tensión no tiene una tendencia parecida al resto de escalones. Pero si se puede ver como los escalones iniciales y el escalón final son los que menos cargados están. Lo que explicaría el motivo de que en las uniones escalonadas, en cuanto falla uno de los escalones

iniciales (fallo del tramo longitudinal, no del vertical) suele fallar la unión debido a la rápida propagación de la grieta. Esto se debe a que la tensión que aguantan estos escalones es traspasada completamente al siguiente escalón, éste al estar más cargado falla rápidamente y esto al reproducirse a sucesivos escalones acaba provocando el fallo de la pieza.

- Tensión principal en la dirección Z.

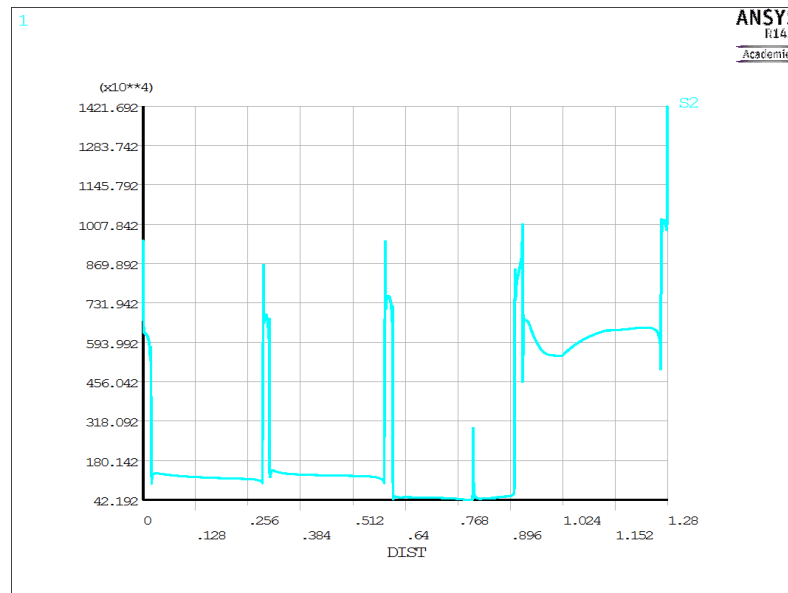


Imagen 72. Tensión principal en Z unión carbono-aluminio.

- Tensión principal en la dirección Y.

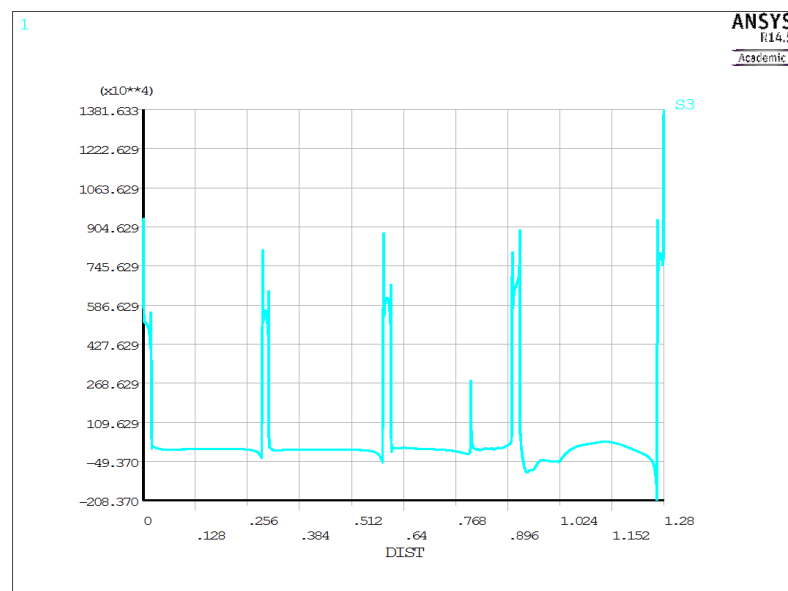


Imagen 73. Tensión principal en Y unión carbono-aluminio.

- Tensión de cortadura.

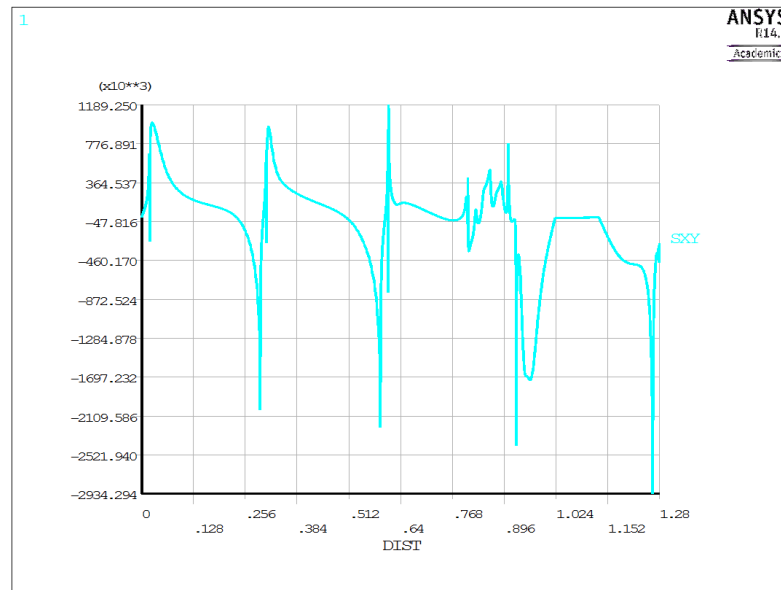


Imagen 74. Tensión de cortadura unión carbono-aluminio.

- Comparativa de las tensiones principales.

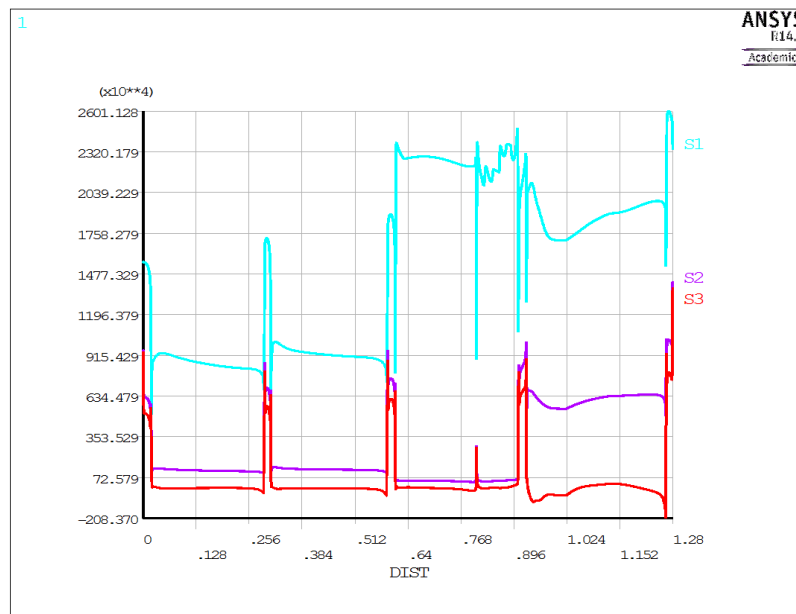


Imagen 75. Comparativa tensiones principales unión carbono-aluminio.

A diferencia de la unión acero-acero que tenía solamente tres escalones, en esta unión se puede ver como los escalones centrales soportan la mayor carga de la unión. Otro aspecto que se manifiesta en esta unión con mayor número de escalones es que las tensiones que sufre el adhesivo en sus tramos verticales en la dirección Y, ya no alcanzan en los escalones intermedios el

valor de la tensión en X. Este hecho demuestra que la tensión a cortadura que sufre el adhesivo se mantiene más o menos constante a lo largo del adhesivo, evitando alcanzar puntos en los cuales el adhesivo pueda romper.

- Criterio de *Tsai Wu*.

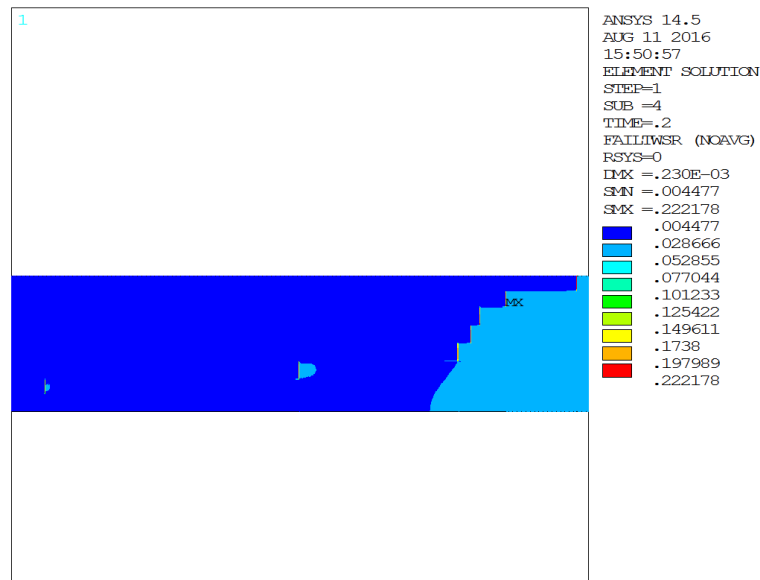


Imagen 76. Criterio Tsai Wu unión carbono-aluminio.

- Criterio máxima tensión.

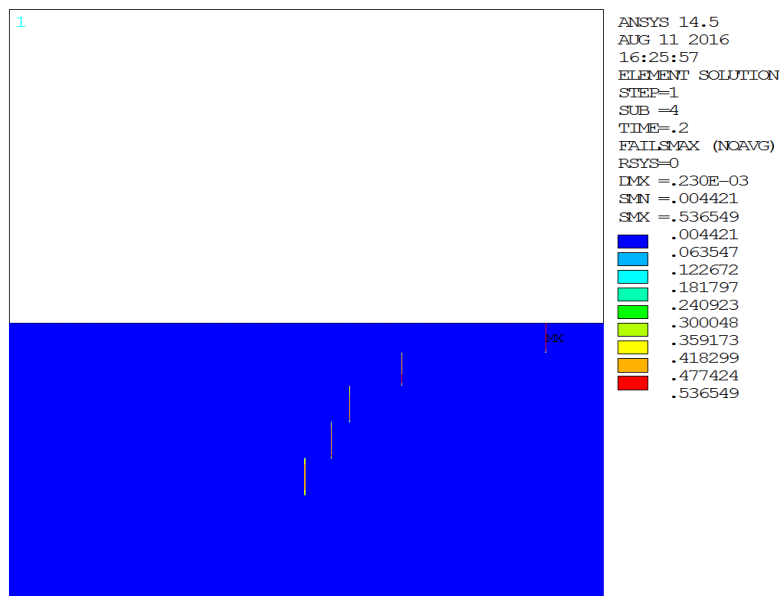


Imagen 77. Criterio de máxima tensión unión carbono-aluminio.

De las imágenes que muestran los criterios de fallo se puede extraer que la grieta aparecerá en el último escalón en su tramo vertical. En los tramos horizontales se puede apreciar como el adhesivo no presenta fallo alguno. Lo que implicará que en esta unión si se incrementara la carga, seguramente lo que fallaría sería alguno de los adheridos, concretamente el aluminio. Decir, que el adhesivo fallará en sus tramos verticales pero eso no implica que la unión obtenida vaya a fallar, pues el coeficiente de seguridad en los tramos horizontales de la unión resulta muy elevado.

Esta unión presenta un coeficiente de seguridad de 1.86 lo que implica que el adhesivo se encuentra a punto de fallar. La macro que obtiene la carga máxima está diseñada para identificar la carga límite que provoca el inicio del fallo del adhesivo como se ha explicado antes. Pero esto no va a implicar el fallo de la unión.

Para demostrar este hecho, se ha introducido manualmente una carga de 300 Mpa a la unión y se ha vuelto a calcular una solución. En ella se puede apreciar como el fallo se producirá en el aluminio, siendo entonces una rotura debida al diseño de la pieza pero no de la unión.

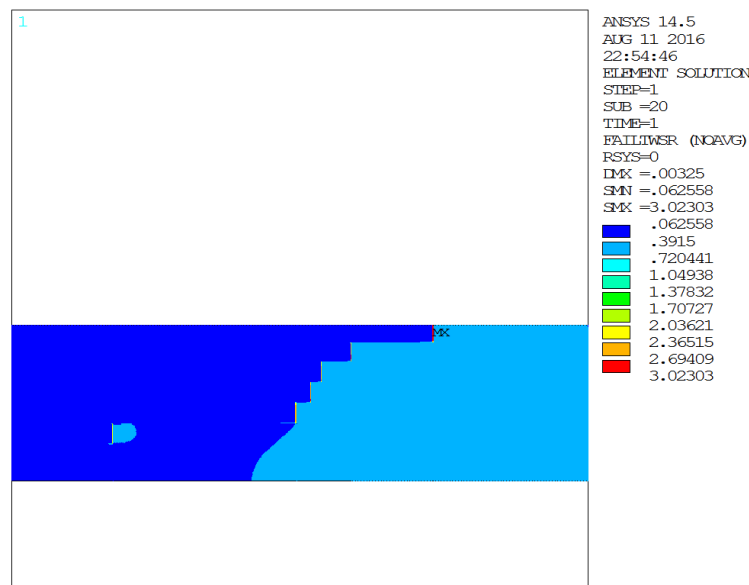


Imagen 78. Criterio de fallo máxima tensión unión fibra-de carbono-aluminio.

En este ejemplo, se puede observar como la longitud de los escalones centrales es muy pequeña. Esto es debido a que los límites de las variables de diseño impuestos en el problema son muy poco restrictivos. Por ejemplo en cuanto a la longitud mínima que pueden tomar los escalones (recordemos que es 1 mm) puede provocar que el resultado obtenido sea imposible de reproducir en la realidad debido a las limitaciones de la herramienta con la cual se va a proceder a fabricar las piezas. Además, también puede ser que el número de puntos a evaluar para cada variable de diseño del modo de optimización *SWEEP* sea muy pequeño y por tanto no exista variación apreciable del valor de la variable de diseño, o al contrario, que el valor del incremento de la

variable de diseño sea elevado y por tanto no se alcance el valor deseado. Por tanto, podemos concluir que hemos encontrado un mínimo de la función objetivo, pero no podemos asegurar que sea el mínimo global de la función.

Para estos casos donde el diseño obtenido muestra ciertas irregularidades, o presenta valores imposibles de realizarse durante la fabricación de la unión, se podrían efectuar diversas soluciones para comprobar si el diseño obtenido es el mínimo global de la función. Cabe destacar las siguientes soluciones:

- Aplicación del método de optimización *FIRST ORDER* a partir del diseño obtenido.
- Aplicación del método *SWEEP* modificando el número total de puntos de evaluación para cada variable de diseño al diseño obtenido (introducir más puntos).
- Aplicación del programa entero de nuevo, pero cambiando los límites de las variables de diseño deseadas.

Como se trata de mostrar diversos ejemplos obtenidos mediante la utilización del programa y no de realizar un diseño exhaustivo de una unión que vaya a aplicarse en un caso real. Y, además del tiempo extra que supondría el volver a aplicar algunos de los métodos mencionados anteriormente a dicha unión, se ha desestimado el encontrar el mínimo absoluto de la unión, pero sí cabe mencionar que la unión obtenida es válida como demuestran los resultados anteriormente mostrados y por tanto cumple con las exigencias demandadas. Por lo cual la solución obtenida de la unión es válida para el ejemplo académico que estamos contemplando.

4.3. Unión laminado de fibra de carbono ortótropo y aluminio.

Esta unión que se va a estudiar a continuación es otra unión de un compuesto con el aluminio. Esta vez, aparte de modificar la anchura de la pieza y la carga aplicada se va a introducir un cambio en el material compuesto. En lugar de estudiar el caso de un laminado unidireccional como el caso anterior, se va a estudiar un laminado ortótropo con la composición {0,90,0,90,0} con espesor de cada capa de 20 mm para ver el comportamiento de la unión.

A continuación se va a detallar los datos de los materiales al igual que se ha realizado en los casos anteriores:

Módulo de <i>Young</i> aluminio	73.08 Gpa
Coficiente de <i>Poisson</i> aluminio	0.33
Módulo de <i>Young</i> adhesivo	2.50 Gpa
Coficiente de <i>Poisson</i> del adhesivo	0.38
Espesor adhesivo	0.10 mm
Anchura de la unión	20 cm
Ex fibra de carbono	142.03 Gpa
Ey fibra de carbono	7.79 Gpa
Ez fibra de carbono	7.79 Gpa

<i>Poisson XY</i> fibra de carbono	0.34
<i>Poisson YZ</i> fibra de carbono	0.34
<i>Poisson XZ</i> fibra de carbono	0.40
<i>Gxy</i> fibra de carbono	4.00 Gpa
<i>Gyz</i> fibra de carbono	4.00 Gpa
<i>Gxz</i> fibra de carbono	2.75 Gpa
Carga impuesta	30.00 MPa

Tabla 19. Valores de la unión Laminado-Al.

Material	Fibra de carbono 0°
S_{1T}	2606.00 MPa
S_{1C}	-1682.00 MPa
S_{2T}	72.39 MPa
S_{2C}	-298.85 MPa
S_{12}	115.83 MPa
Material	Fibra de carbono 90°
S_{1T}	72.39 MPa
S_{1C}	-298.85 MPa
S_{2T}	2606.00 MPa
S_{2C}	-1682.00 MPa
S_{12}	115.83 MPa

Tabla 20. Valores de rotura laminado ortótropo.

Material	Fibra de carbono 0°
G_{1T}	146756.29 J/m ²
G_{1C}	106302.00 J/m ²
G_{2T}	262.70 J/m ²
G_{2C}	2329.18 J/m ²
Material	Fibra de carbono 90°
G_{1T}	262.70 J/m ²
G_{1C}	2329.18 J/m ²
G_{2T}	146756.29 J/m ²
G_{2C}	106302.00 J/m ²

Tabla 21. Valores de energía laminado ortótropo.

VARIABLES DE DISEÑO	Valor
N	7
L_1	0.275
L_2	0.249
L_3	0.082
L_4	0.278
L_5	0.300
L_6	0.204
L_7	0.112
T_1	0.947

T_2	0.614
T_3	0.966
T_4	0.959
T_5	1.198
T_6	1.419
T_7	1.030
Variables de estado	Valor
Coefficiente de seguridad material 1,0° (SV1)	19.006
Coefficiente seguridad material 1,90° (SV2)	1.607
Coefficiente de seguridad material 3 (SV3)	18.033
Función Objetivo	0.32429e-5

Tabla 23. Resultados unión laminado ortótropo-Al.

Nº Diseños totales	Nº Mejor diseño
155	101
Tiempo de simulación	
3 días	

Tabla 24. Número de diseños y tiempo de simulación de la unión laminado ortótropo-Al.

Los datos correspondientes al aluminio son los de las tablas (11) y (13). Las propiedades del adhesivo son los de las tablas (3) y (5).

La pieza resultante queda de la forma:

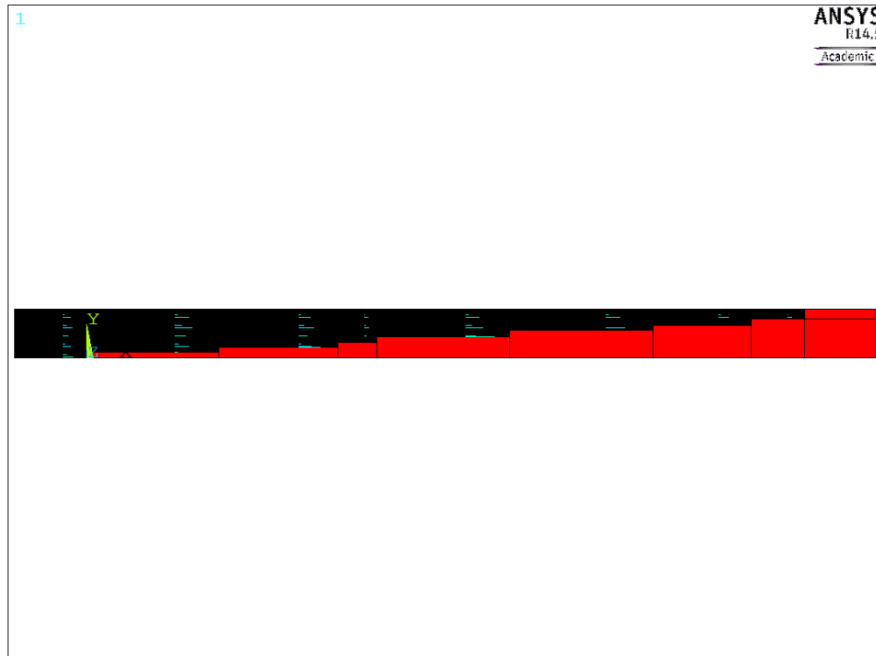


Imagen 79. Unión laminado ortótropo-Al.

Como en la imagen anterior no se puede apreciar las capas del laminado debido a la longitud de la unión, en la siguiente imagen se muestra un zoom de la pieza donde se pueden apreciar las capas del laminado:

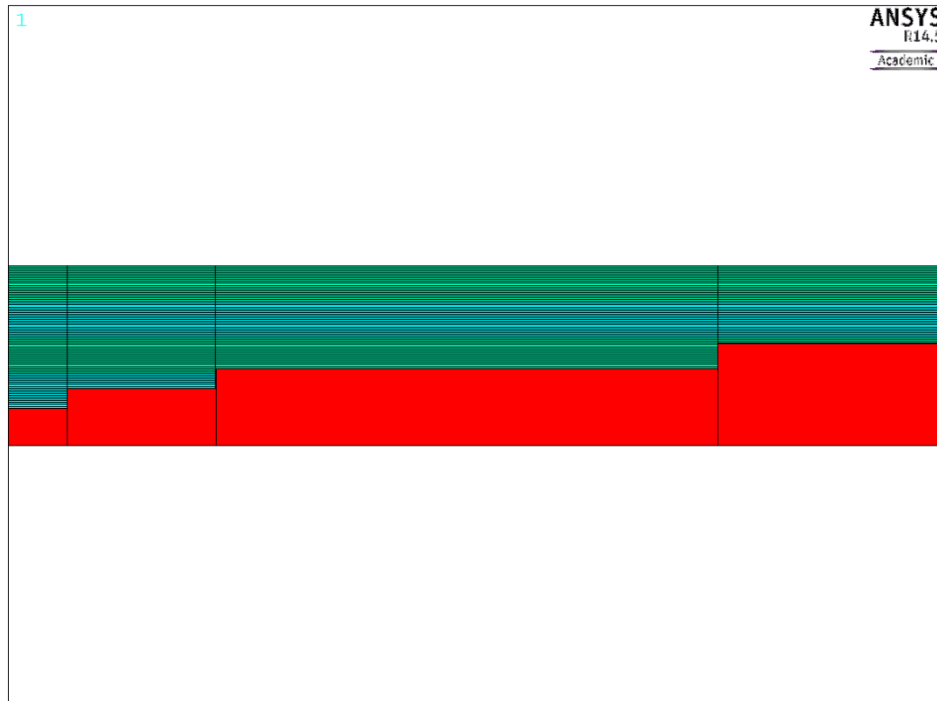


Imagen 80. Zoom de la unión laminado ortótropo-Al.

El color verde representa las capas de fibra de carbono a 90° , mientras que las azules representan la fibra de carbono orientada a 0° . Al igual que para las uniones anteriores los datos obtenidos para esta unión son:

- Función Objetivo.

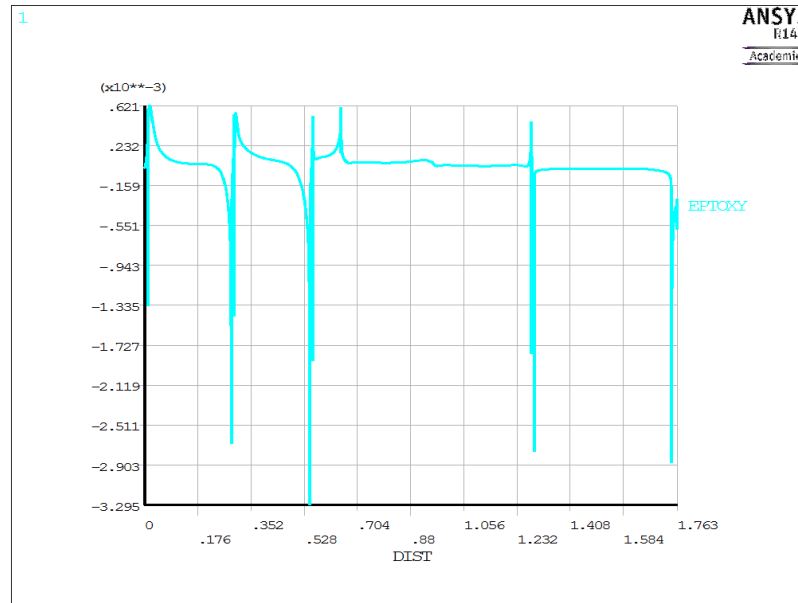


Imagen 81. Función objetivo unión laminado ortótropo-AI.

- Tensión principal en la dirección X.

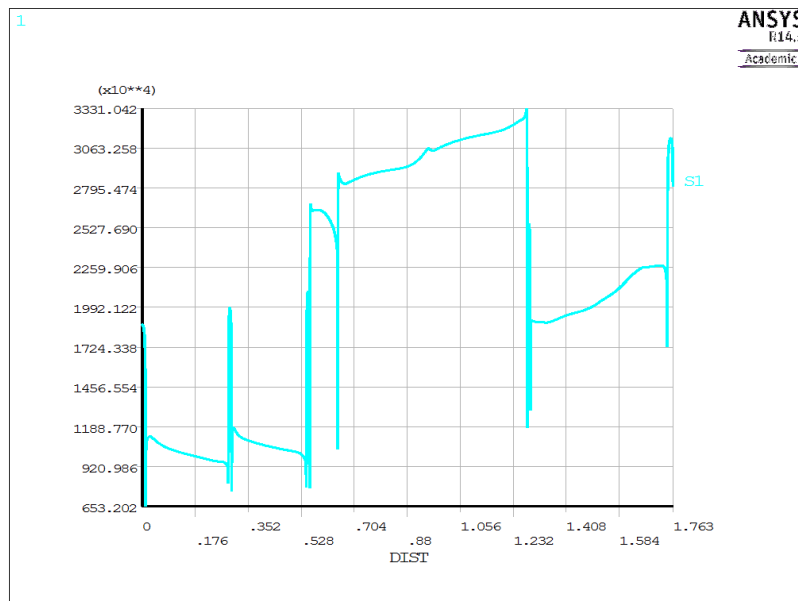


Imagen 82. Tensión principal en X unión laminado ortótropo-AI.

- Tensión principal en la dirección Z.

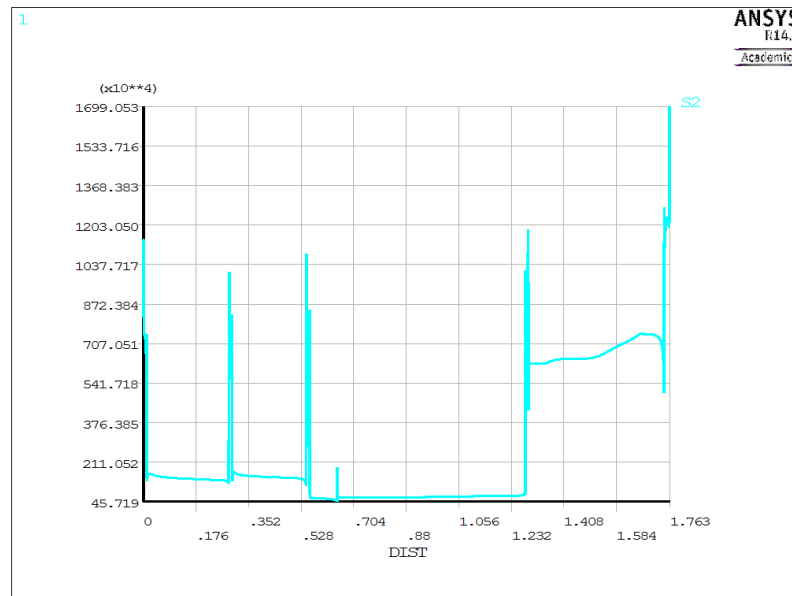


Imagen 83. Tensión principal en Z unión laminado ortótropo-Al.

- Tensión principal en la dirección Y.

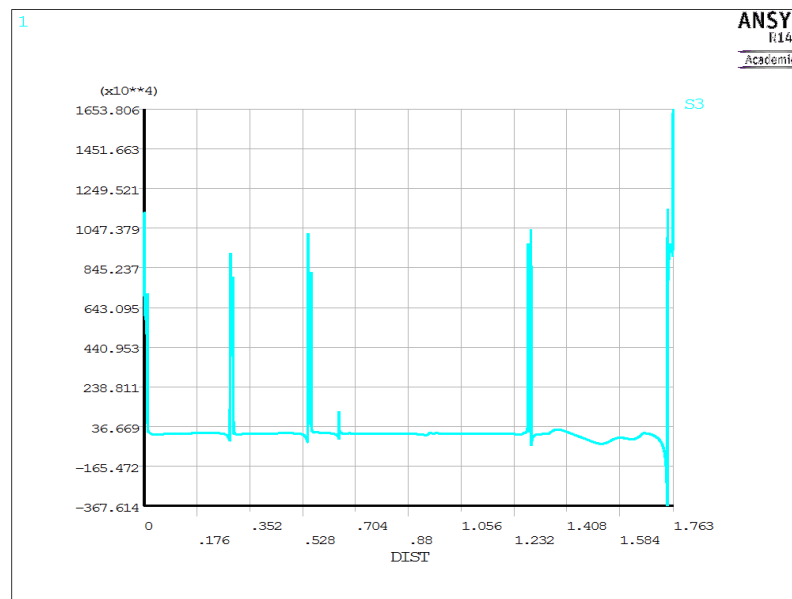


Imagen 84. Tensión principal en Y unión laminado ortótropo-Al.

- Criterio de *Tsai Wu*.

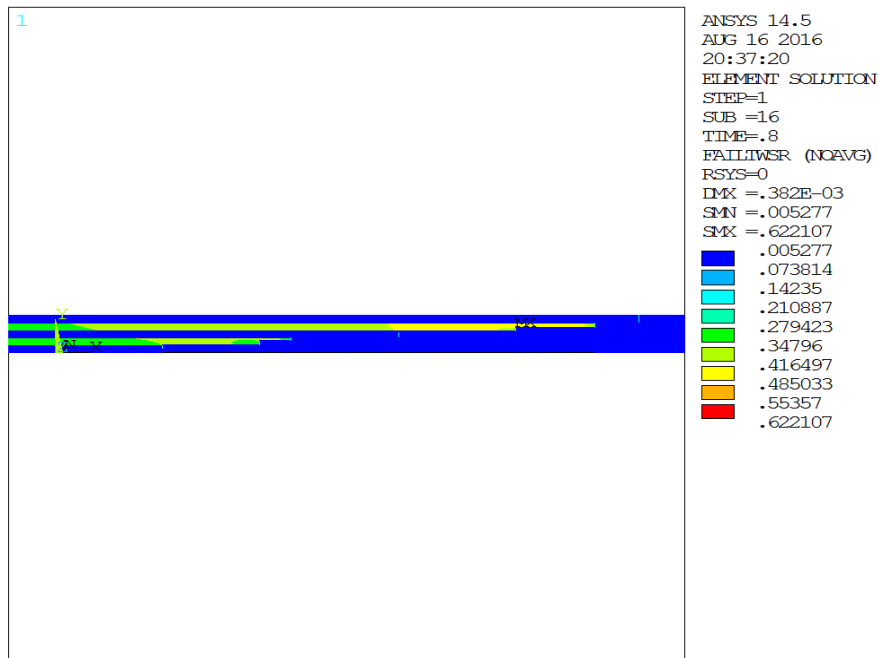


Imagen 87. Criterio *Tsai Wu* unión laminado ortótropo-Al.

- Criterio máxima tensión.

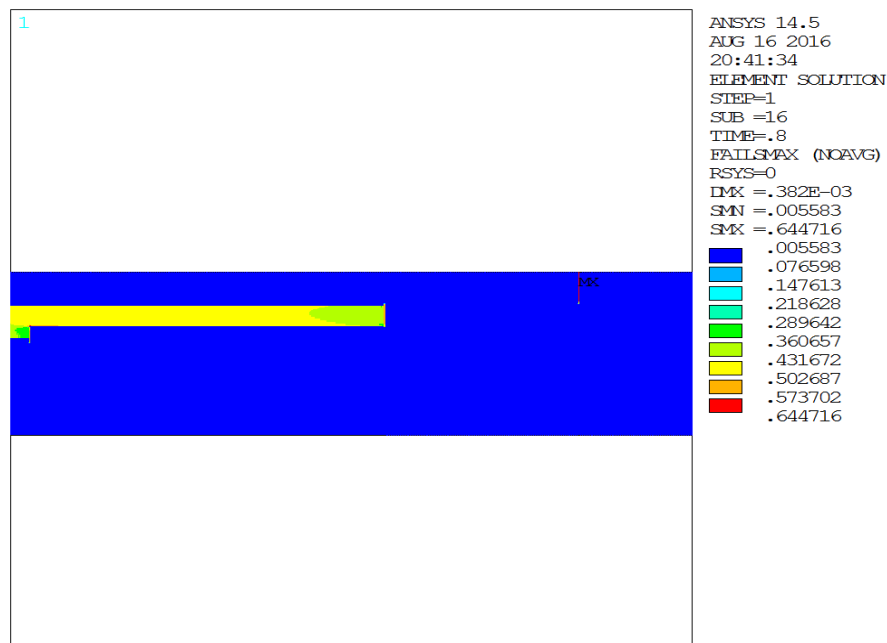


Imagen 88. Criterio de máxima tensión unión laminado-Al.

Al igual que sucedía con las uniones anteriores, se observa que lo primero en fallar serán los tramos verticales más cercanos a la ubicación donde se produce la carga. Por el contrario, en los

tramos horizontales el adhesivo presenta un coeficiente de seguridad muy elevado por lo cual, lo que acabará rompiendo será el material adherido y no el adhesivo. En esta unión en concreto, también podemos apreciar como las capas con orientación de 90° presentan un coeficiente de seguridad menor que las capas a 0° . Esto es debido a que estas capas, la resistencia en la dirección 1 de la fibra es muy baja.

Los resultados obtenidos de los coeficientes de seguridad nos indican que el material elegido para esta unión no es el adecuado. Al tratarse de un laminado ortótropo compuesto por cuarenta capas de 1mm orientadas a 90° y sesenta capas de 1mm orientadas a 0° , el comportamiento del material ante una carga axial es deficiente, puesto que el 40% de las capas del material, la fibra se encuentra orientada en la dirección perpendicular a la de la carga (dirección en la cual su resistencia es mucho menor). Además y como puede apreciarse en las imágenes 80, 87 u 88, la capa con orientación 90° se encuentra cortada debido a un escalón, lo que provoca que los resultados obtenidos en cuanto a la longitud de algunos escalones centrales sea un poco extraña y no concuerde del todo con lo que dice la teoría.

La solución más lógica en este caso pasaría por la sustitución del laminado ortótropo por otro material que se adapte mejor a la carga aplicada, como pudiera ser un material compuesto unidireccional o un laminado ortótropo pero con mayor número de capas con la fibra orientada en la misma dirección que la carga aplicada.

Por tanto, y conociendo que el material compuesto aplicado no es el idóneo para esta unión, podemos concluir que la pieza aguantará una carga mayor a la impuesta en la simulación, y dicha carga provocará el fallo de alguno de los adherentes y no de la unión.

4.4. Unión fibra de carbono-fibra de carbono unidireccional.

Para finalizar se va a estudiar una última unión donde los adheridos serán fibra de carbono unidireccional, estando la fibra orientada en la dirección de la carga. Las propiedades de la fibra de carbono unidireccional corresponden a las tablas 12 y 14. Las características de la unión, junto con el resto de propiedades de la fibra de carbono son:

Módulo de Young adhesivo	2.50 Gpa
Coficiente de Poisson del adhesivo	0.38
Espesor adhesivo	0.10 mm
Anchura de la unión	60 cm
Ex fibra de carbono	142.03 Gpa
Ey fibra de carbono	7.79 Gpa
Ez fibra de carbono	7.79 Gpa
Poisson XY fibra de carbono	0.34
Poisson YZ fibra de carbono	0.34
Poisson XZ fibra de carbono	0.40
Gxy fibra de carbono	4.00 Gpa

Gyz fibra de carbono	4.00 Gpa
Gxz fibra de carbono	2.75 Gpa
Carga impuesta	500.00 MPa

Tabla 25. Propiedades unión Fibra C.- Fibra C.

Variables de diseño	Valor
N	3
L_1	0.300
L_2	0.280
L_3	0.203
T_1	1.480
T_2	1.257
T_3	0.861
Variables de estado	Valor
Coefficiente de seguridad material 1 (SV1)	43.375
Coefficiente seguridad material 3 (SV2)	36.223
Función Objetivo	0.38819e-6

Tabla 26. Valores de las variables de la unión Fibra C.- Fibra C.

Nº Diseños totales	Nº Mejor diseño
152	38
Tiempo de simulación	
5 días	

Tabla 27. Número total de diseños y tiempo de simulación de la unión Fibra C.- Fibra C.

La unión resulta de la siguiente forma:

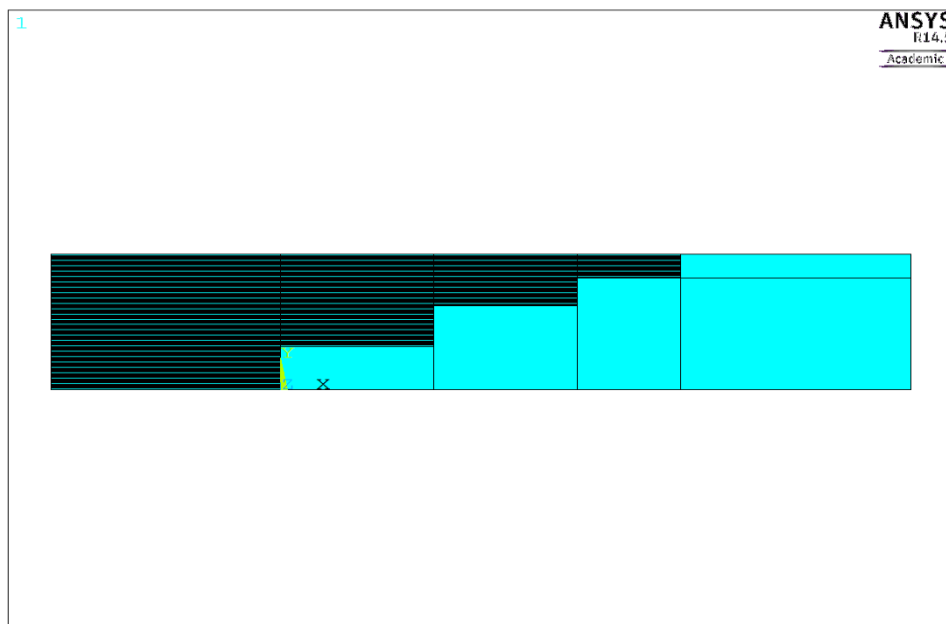


Imagen 89. Unión Fibra C- Fibra C unidireccional.

Como se puede apreciar en los ejemplos anteriores, el criterio más restrictivo será el criterio de máxima tensión, por lo que para este ejemplo se ha decidido poner una imagen solamente de dicho criterio de fallo. Por lo tanto los resultados obtenidos para esta unión son:

- Función Objetivo.

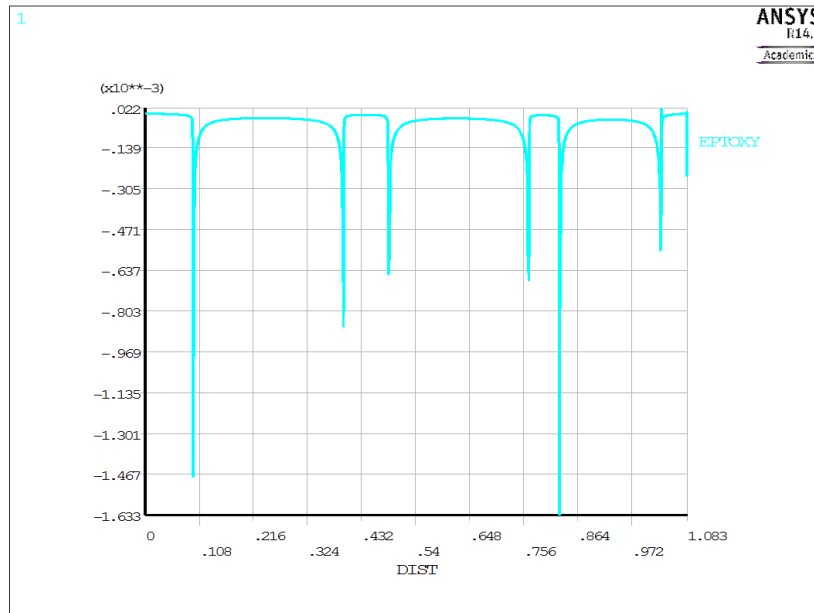


Imagen 90. Función objetivo unión Fibra C- Fibra C unidireccional.

- Tensión principal en la dirección X.

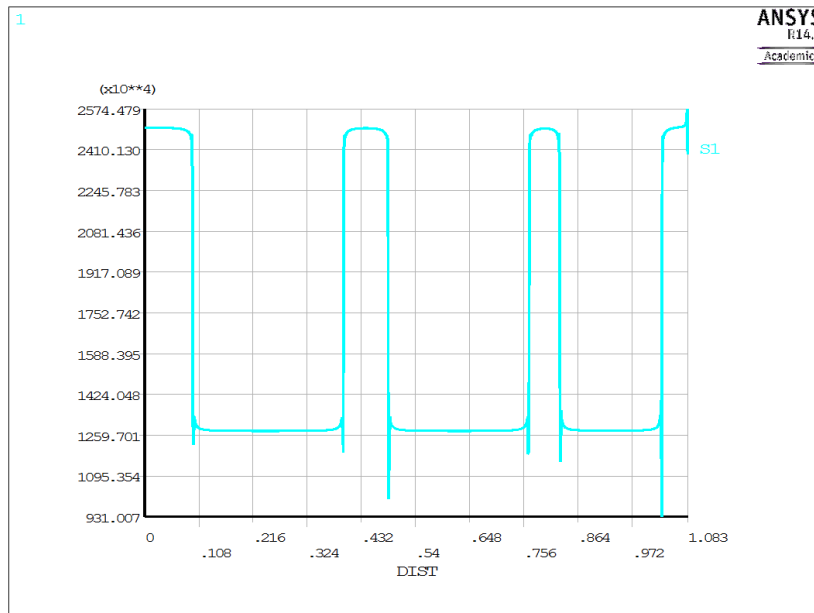


Imagen 91. Tensión principal en X unión Fibra C- Fibra C unidireccional.

- Tensión principal en la dirección Z.

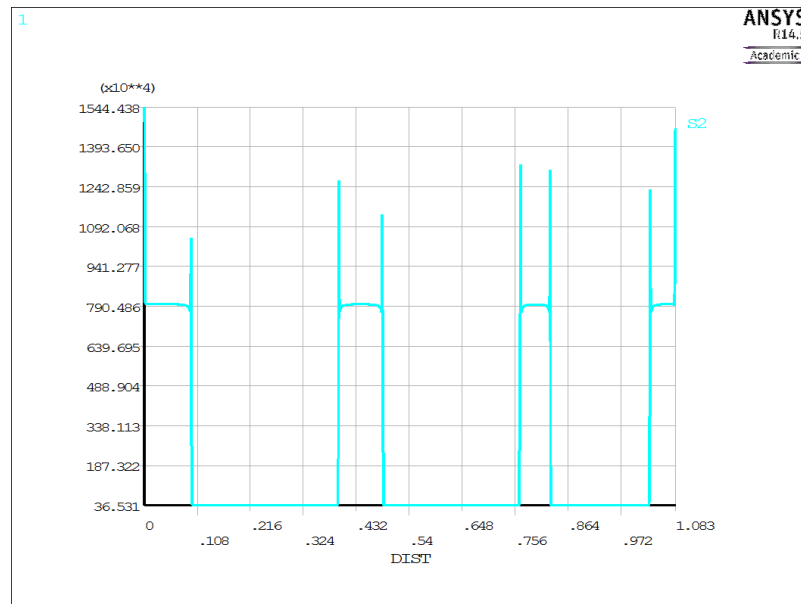


Imagen 92. Tensión principal en Z unión Fibra C- Fibra C unidireccional.

- Tensión principal en la dirección Y.

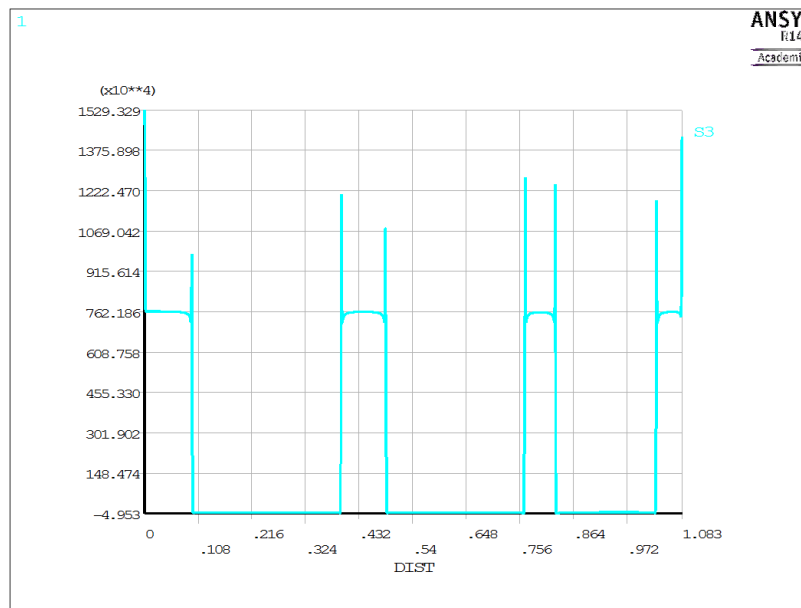


Imagen 93. Tensión principal en Y unión Fibra C- Fibra C unidireccional.

- Criterio máxima tensión.

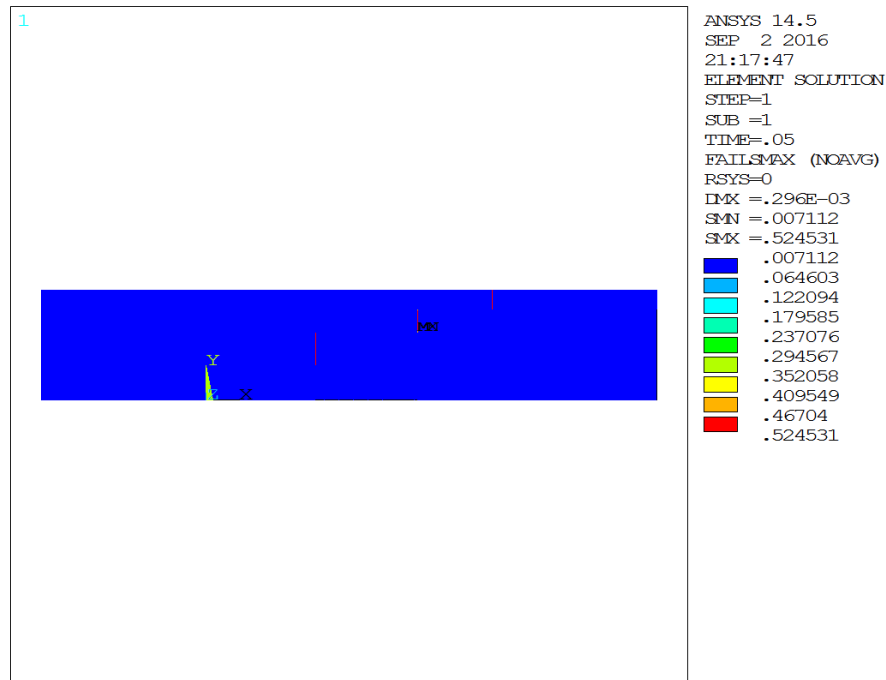


Imagen 94. Criterio de máxima tensión unión Fibra C- Fibra C unidireccional.

Al igual que en los casos anteriores, se puede ver como solamente los tramos verticales han fallado, por lo que la unión aun es capaz de aguantar una carga mayor. Además como se trata de una unión de materiales compuestos cuyas fibras se encuentran orientadas en el sentido de la carga, se puede apreciar como esta unión es la que mayor carga puede soportar de entre los casos estudiados.

Capítulo 5. Conclusiones.

Tras ver los resultados obtenidos en los ejemplos estudiados, las conclusiones que se pueden sacar son:

- Las uniones obtenidas mediante el programa son capaces de aguantar la carga impuesta por el usuario y además son capaces de aguantar una carga mayor, produciéndose en la mayoría de los casos, la rotura de los adherentes.
- El punto crítico de la unión por donde suele comenzar el fallo en el adhesivo es en los tramos verticales, concretamente en aquellos situados más cercanos al punto de aplicación de la carga.
- El fallo de los tramos verticales de la unión, no implica el fallo total de la unión.
- Las tensiones se suelen distribuir, bajo el criterio de optimización empleado, de manera que los valores más elevados se alcanzan en los escalones medios de la unión si los materiales a unir son distintos.
- Las tensiones se suelen distribuir, bajo el criterio de optimización empleado, de forma homogénea si los materiales a unir son iguales.
- La longitud de los escalones iniciales suele ser mayor que la longitud del resto de los escalones.
- Debido a la introducción del comportamiento plástico del adhesivo, es posible tener unos valores acotados de las tensiones y desplazamientos que se producen en los tramos verticales, siendo estos valores mucho mayores que los obtenidos a lo largo del tramo horizontal del escalón.
- A mayor número de escalones la unión es capaz de aguantar una carga mayor.
- Existe una cierta longitud máxima de escalón a partir de la cual la variación del valor obtenido de la función objetivo es despreciable.
- Con un mallado más fino se obtienen valores más precisos, pero el coste computacional se dispara, al igual que si se permite al programa que el número de escalones sea elevado. Por lo que conviene plantearse antes de iniciar una optimización cuánto es el número de escalones máximo que se le va a permitir al programa y el tamaño de la malla, y adecuar estos parámetros a nuestras necesidades.
- Finalmente, si la carga aplicada a nuestra unión se trata de una carga de tracción o de compresión, conviene emplear el uso de fibras unidireccionales puestas en la dirección de la carga, puesto que el esfuerzo que aguantaran y que serán capaces de transmitir será mucho mayor.

Bibliografía.

- [1] E. Giner y J. Albelda. Análisis y diseño con materiales compuestos. Valencia: Servicio de publicaciones de la universidad politécnica de valencia.2005.
- [2] F. Mortensen y O. T. Thomsen. Simplified linear and non-linear analysis of stepped and scarfed adhesive-bonded lap-joints between composite laminates. Elsevier. 1997. Vol. 38:281-294.
- [3] I. Lapczyk y J. A. Hurtado. Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials. Elsevier. 2007. Vol. 38 parte A: 2333-2341.
- [4] K. Ichikawa, Y. Shin y T. Sawa. A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings. Elsevier. 2008. Vol.28:464-740.
- [5] F. A. Leone Jr, D. Girolamo y C. G. Dávila. Progressive Damage Analysis of Bonded Composite Joints. Virginia: NASA. 2012.
- [6] Cytec.com [Internet]. 2013 [Actualizado en 9 de Oct de 2013; citado 12 Feb 2016]. Disponible en: <https://www.cytec.com/products/fm-300>
- [7] Ansys.stuba.sk [Internet]. [Citado 27 Jul 2016]. Disponible en: <http://www.ansys.stuba.sk/html/g-index.htm>
- [8] ANSYS, Inc. Ansys Mechanical APDL Command Reference. Canonsburg. 2013.
- [9] ANSYS, Inc. Command Reference. Canonsburg. 2009.
- [10] R. D. Adams, J. Comyn y W. C. Wake. Estructural Adhesive Joints in Engineering. [Internet]. Ed. 2. Chapman & Hall (UK); 1997. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=M7sRAwNHdsC&pg=PA42&lpg=PA42&dq=bilinear+model+for+adhesive&source=bl&ots=rITCbqisCp&sig=b2izpcQHq4o1dyZklxo-VDUdPvE&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiFyKXgyK7MAhUEvBQKHeeED4AQ6AEIITAA#v=onepage&q=bilinear%20model%20for%20adhesive&f=false>
- [11] Aerospace Specifications Metals Inc. (ASM). [Internet]. [Citado el 24 Feb 2016]. Disponible en: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6>
- [12] H. Miralles. Desarrollo de un programa de optimización de uniones adhesivas escalonadas mediante modelos analíticos y numéricos. TFG. Universidad Politécnica de Valencia.
- [13] D. Roylance. Introduction to fracture mechanics. Cambridge: MIT. 2001.
- [14] Ansys, Inc. ANSYS Theory Reference. Ed. 11. Canonsburg. 1994.

[15] P.P. Camanho y C.G. Dávila. Mixed-Mode Dechoesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Material. Virginia: NASA. 2002

PRESUPUESTO

		Implementación de un modelo de fallo progresivo para el análisis de uniones escalonadas.			
		Cuadro de precios.			
Nº actividad.	Ud.	Descripción Ud. De obra.	Cantidad.	Precio.	Importe.
1	CAP 1	Programación.			
1,01		Programación de las macros.			
	h	Ingeniero industrial	400,00	70,00	28.000,00
	%	Costes complementarios	2,00	28.000,00	560,00
		Coste total			28.560,00
1,02		Corrección de errores y depuración.			
	h	Ingeniero industrial	125,00	70,00	8.750,00
	%	Costes complementarios	2,00	8.750,00	175,00
		Coste total			8.925,00
2	CAP 2	Simulación.			
2,01		Simulación de la unión.			
	h	Ingeniero industrial	50,00	70,00	3.500,00
	h	Coste asociado a tener la licencia bloqueada durante simulación	300,00	3,50	1.050,00
	%	Costes complementarios	2,00	4.550,00	91,00
		Coste total			1.141,00

		Implementación de un modelo de fallo progresivo para el análisis de uniones escalonadas.			
		Cuadro de precios.			
Nº actividad.	Ud.	Descripción Ud. De obra.	Cantidad.	Precio.	Importe.
3	CAP 3	Redacción documentos.			
3,01		Redacción de los distintos documentos.			
	h	Ingeniero industrial	40,00	70,00	2.800,00
	%	Costes complementarios	2,00	2.800,00	56,00
		Coste total			2.856,00
4	CAP 4	Amortización de equipos.			
4,01		Amortización software			
	%	Ansys	25,00	17.000,00	4.250,00
	%	Microsoft Office	2,78	100,00	2,78
	%	Costes complementarios	2,00	2,78	0,06
		Coste total			4.252,84
4,02		Amortización equipos			
	%	Ordenador	1,60	1.250,00	20,00
	%	Costes complementarios	2,00	20,00	0,40
		Coste total			20,40

		Implementación de un modelo de fallo progresivo para el análisis de uniones escalonadas.			
		Cuadro de precios.			
Nº Orden	Ud.	Descripción Ud. De obra.	Cantidad.	Precio.	Importe.
1		Programación.			
1,01	Ud	Programación de las macros.	1	28.560,00	28.560,00
1,02	Ud	Corrección de errores y depuración.	1	8.925,00	8.925,00
		Total Capítulo 1			37.485,00
2		Simulación.			
2,01	Ud	Simulación de la unión.	1	1.141,00	1.141,00
		Total Capítulo 2			1.141,00
3		Redacción documentos.			
3,01		Redacción de los distintos documentos.	1	2.856,00	2.856,00
		Total Capítulo 3			2.856,00
4		Amortización de equipos.			
4,01		Amortización software	1	4.252,84	4.252,84
4,02		Amortización equipos	1	20,40	20,40
		Total Capítulo 4			4.273,24

		Implementación de un modelo de fallo progresivo para el análisis de uniones escalonadas.	
		Resumen de capítulos.	
Nº orden	Código	Descripción Ud. De obra.	Importe.
1	CAP1	Programación.	37.485,00
2	CAP2	Simulación.	1.141,00
3	CAP3	Redacción documentos.	2.856,00
4	CAP4	Amortización de equipos.	4.273,24
TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL			45.755,24
13% Gastos Generales			5.948,18
6 % beneficio Industrial			2.745,31
TOTAL EJECUCIÓN CONTRATA			54.448,73
21 % IVA			11.434,23
TOTAL PRESUPUESTO C/IVA			65.882,96
<p>Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:</p> <p>SESENTA Y CINCO MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y DOS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS.</p>			