

## **CAPÍTULO N°6: ANÁLISIS NUMÉRICO**

- 6.1. ANÁLISIS NO LINEAL**
- 6.2. RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES**
- 6.3. CÁLCULO DE MODOS DE FALLO**

## 6.1. ANÁLISIS NO LINEAL

### 6.1.1. INTRODUCCIÓN

En el ensayo de flexión de paneles sándwich las deflexiones máximas alcanzadas son elevadas, del orden de 10 mm, como se ha visto en el capítulo anterior. Se trata de un problema de grandes desplazamientos por lo que es necesario realizar un análisis no lineal del mismo.

Es necesario que el problema se analice como no lineal, haciendo equilibrio en la deformada, para lo cual se empleará la SOL106 de Nastran.

### 6.1.2. SOLUCIÓN NO LINEAL (SOL 106)

Para obtener la solución no lineal del problema se han modificado ciertos parámetros para la SOL 106 de Nastran, los cuáles se indican a continuación:

NLPRM. Permite definir el número de incrementos en que divide la carga, el número de iteraciones máximas para alcanzar cada incremento de carga y una serie de tolerancias para los resultados, entre otras cosas.

LGDISP. Se elige LGDISP=2 para que en el análisis se consideren grandes desplazamientos y fuerzas no seguidoras.

K6ROT. Es la rigidez a la torsión fuera del plano de elementos tipo placa. Se ha aumentado a 10, porque para un valor de 1 la solución sólo convergía hasta el 60% de la carga. Este parámetro se puede aumentar hasta 100 sin que tenga influencias considerables en los resultados.

Conviene indicar que si el offset de los elementos CQUAD4 es distinto de 0 la SOL106 no daría resultados correctos. Por esta razón, se ha modificado el modelo original para que el offset de los CQUAD4 fuese 0. Para reproducir el modelo original pero con offset 0 en los CQUAD4 se ha modificado el offset de las tarjetas PCOMP, poniéndolo a 0.

### 6.1.3. RESULTADOS

A continuación se comparan los resultados del análisis lineal (SOL 101) con los del análisis no lineal (SOL 106). Las variables que se comparan son las que se obtienen del ensayo: desplazamiento máximo y deformaciones en la posición donde mediría la roseta en la probeta del ensayo.

Se representa en la siguiente figura el desplazamiento máximo de la pieza en función del valor de la carga. Como se puede comprobar, el valor del desplazamiento máximo que es obtenido para SOL 106 es casi el mismo que el obtenido para SOL 101, siendo los resultados del análisis no lineal un poco más pequeños. Por ello se consideran válidos los resultados del análisis lineal, y por tanto, los resultados que se obtendrán del modelo de aquí en adelante serán obtenidos mediante solución lineal.

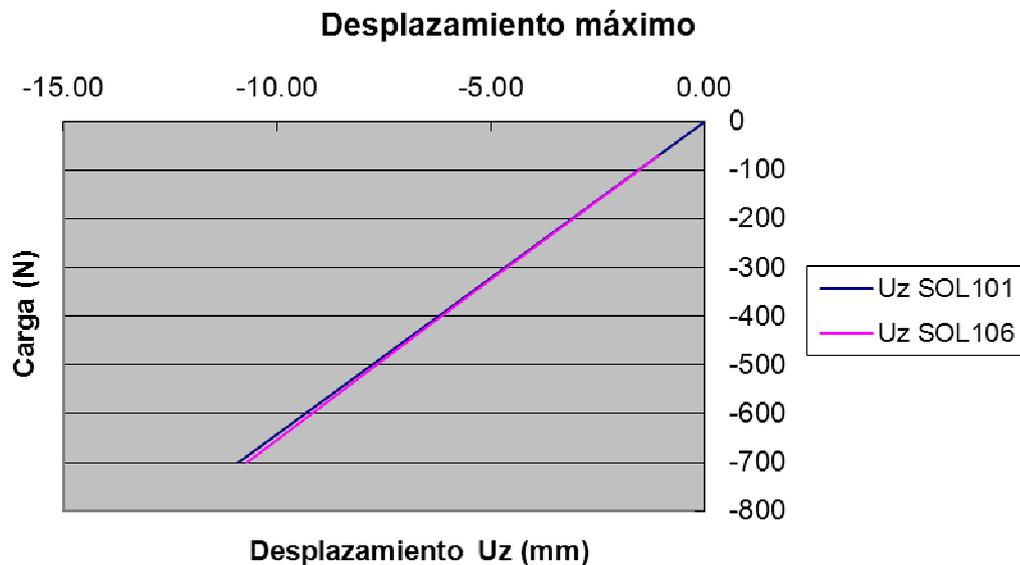


Figura 54. Desplazamiento máximo Sol 101 y Sol 106.

En la gráfica inferior se representan los valores de las deformaciones en dirección x (lo que mediría la galga en dirección 1) y en dirección y (lo que mediría la galga en dirección 2), en función del valor de la carga aplicada. Se hace una comparativa entre las deformaciones obtenidas del análisis lineal y las obtenidas del análisis no lineal.

Los valores de las deformaciones obtenidas del análisis no lineal siguen la misma tendencia que las obtenidas de la solución lineal, alejándose para valores mayores de la carga.

Como los resultados obtenidos del análisis no lineal no difieren mucho de los obtenidos del análisis lineal, se considera válido realizar un análisis lineal del problema. Por tanto, de aquí en adelante, todos los resultados obtenidos serán fruto de un análisis lineal.

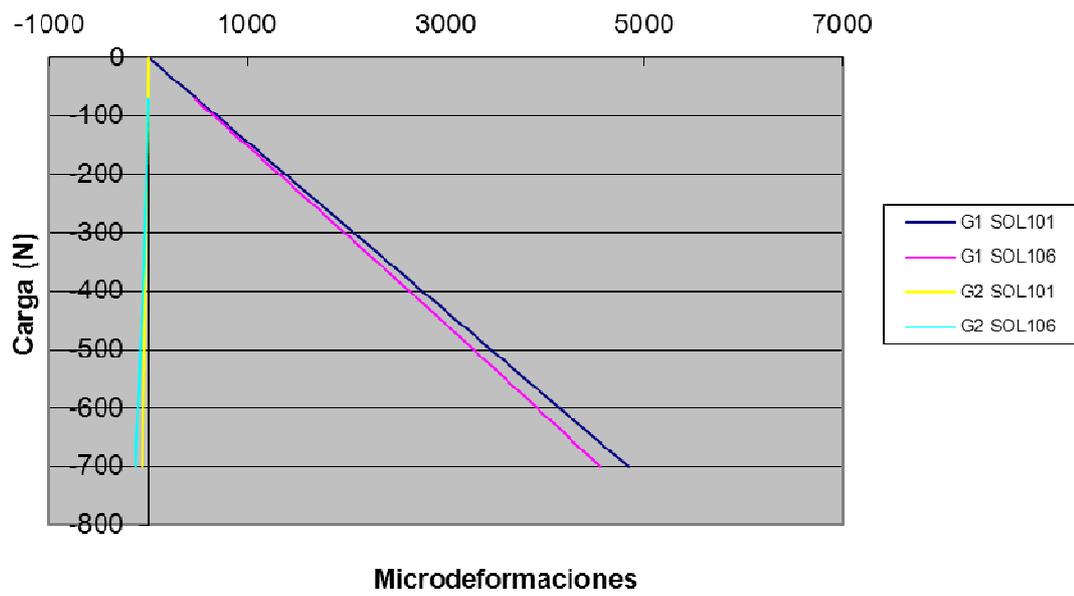


Figura 55. Deformaciones obtenidas mediante Sol 101 y Sol 106.

## 6.2. RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

En este apartado se comparan los resultados obtenidos del ensayo de las seis probetas consideradas, de características anteriormente mencionadas, con los obtenidos del modelo de elementos finitos.

El desplazamiento máximo para el modelo de elementos finitos es de 10.9 mm, como se puede observar en la Figura 56.

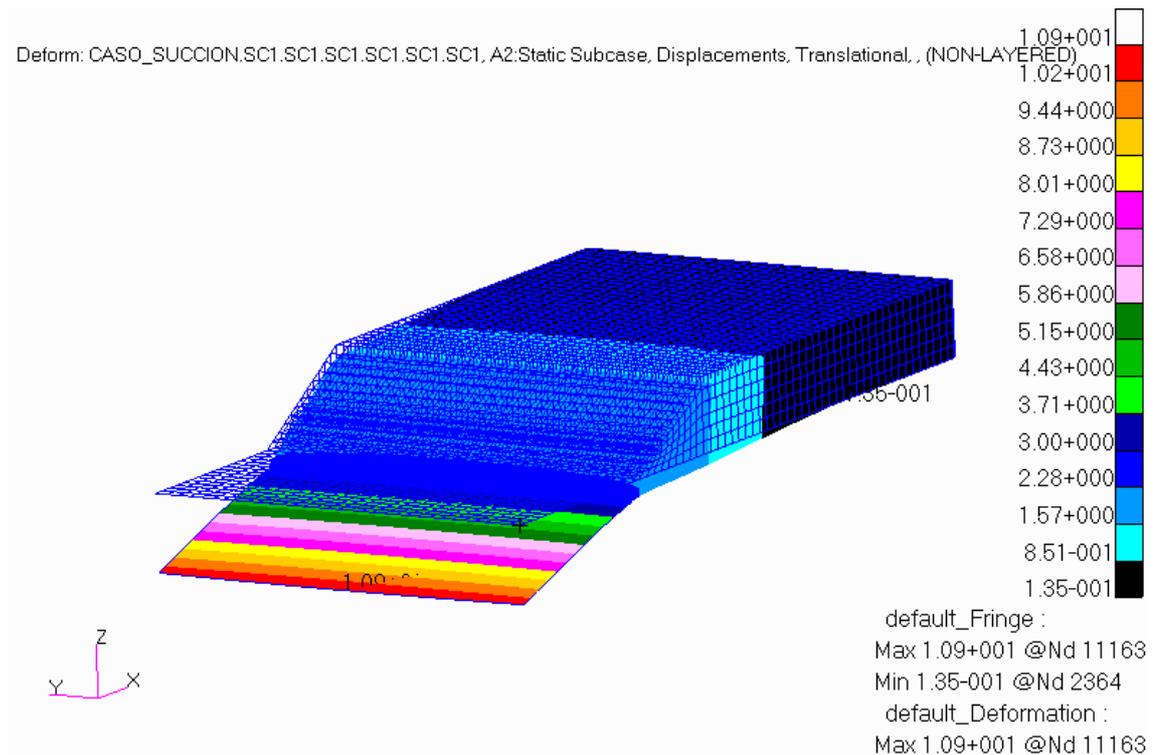


Figura 56. Desplazamiento máximo del MEF.

Los desplazamientos de la cruceta, en cada uno de los seis resultados tenidos en cuenta en este estudio, se parecen bastante a los que se obtienen del modelo de elementos finitos, dentro de la dispersión existente entre ellos.

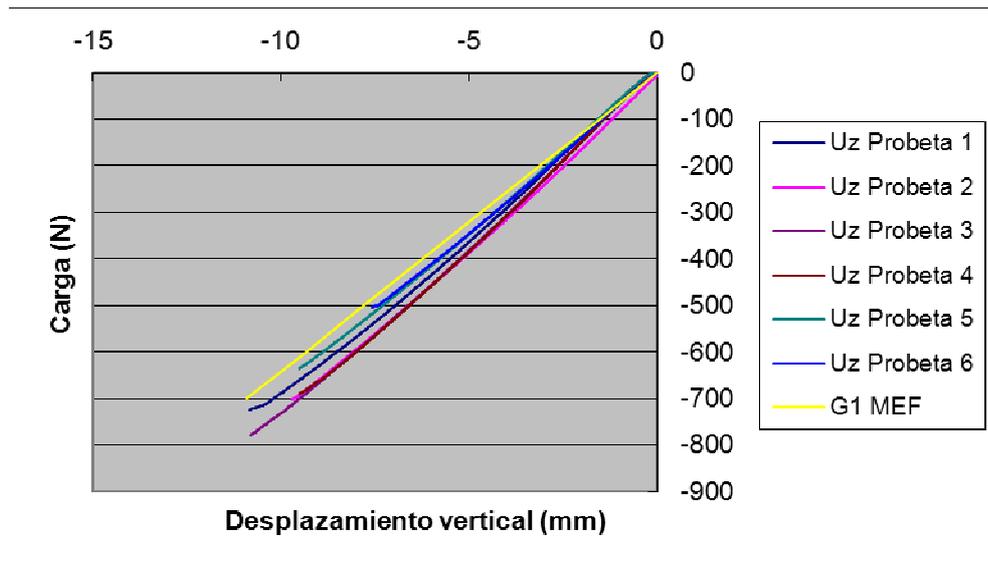


Figura 57. Desplazamiento vertical ensayo y MEF.

A continuación se comparan las deformaciones medidas por las rosetas, en direcciones 1 y 2, con las obtenidas del MEF. Las direcciones 1 y 2 de las galgas se corresponden con las direcciones X e Y globales del modelo. Los resultados de las deformaciones del MEF se han tomado en unos elementos correspondientes a la posición de las galgas, situadas en la cara bolsa de la pista cercanas al comienzo de la rampa.

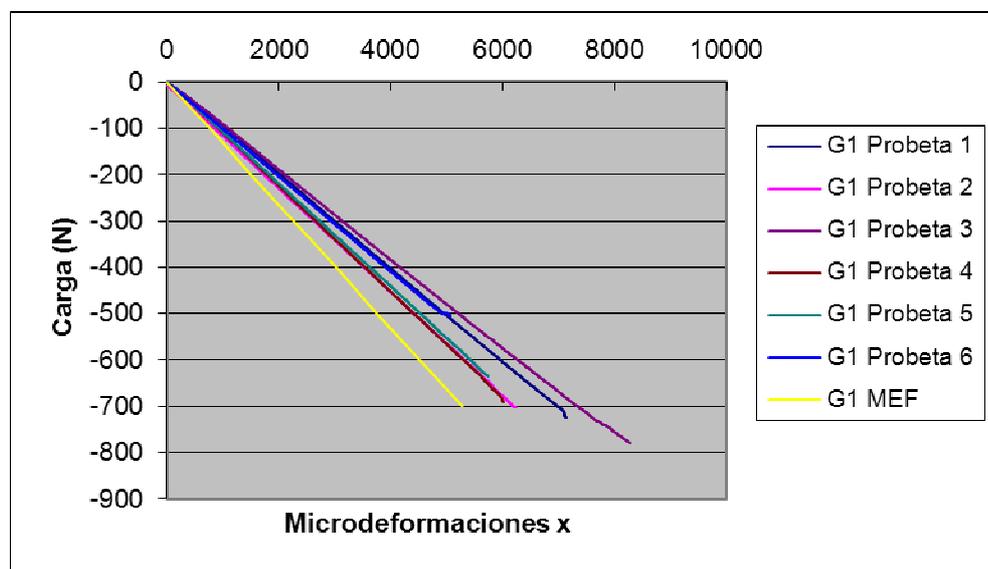


Figura 58. Microdeformaciones dirección x ensayo y MEF.

En la Figura 58 se observa que las deformaciones en dirección x obtenidas del MEF son siempre menores que las de los ensayos, en torno un 17%, considerando la media de los 6 ensayos.

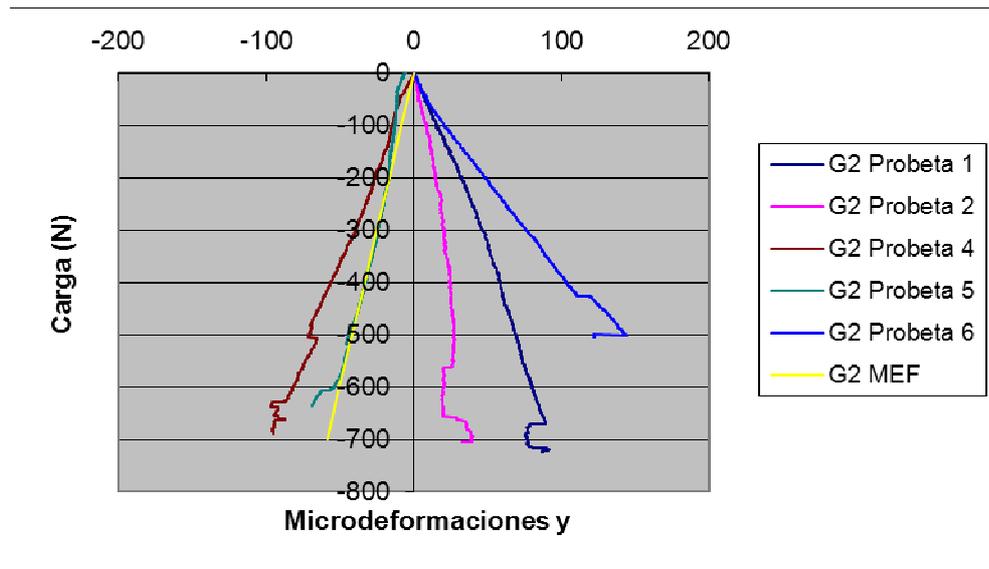


Figura 59. Microdeformaciones dirección y ensayo y MEF.

En la Figura 59 se comparan las deformaciones en dirección y obtenidas de los ensayos con los resultados del MEF. Comentar que no se obtuvieron valores válidos de la galga 2 de la probeta 3. Se puede observar que hay gran desviación entre las deformaciones de las probetas. Las deformaciones del modelo se parecen bastante a las de la probeta 5.

Hay discrepancias entre los resultados de las deformaciones reportadas del modelo y las medidas en las piezas reales mediante rosetas bidireccionales. Esto puede ser debido a varias razones:

- La posición de la roseta en las piezas no es siempre la misma.
- Las piezas reales tienen dimensiones distintas a las modeladas, la pista de las piezas es de mayor longitud que la indicada en la especificación, 40 mm. Por consiguiente, las rosetas están colocadas en una posición más alejada del borde de la pista que las deformaciones medidas en el modelo.
- Gran variabilidad en los resultados de las 6 probetas consideradas.

Las deformaciones en el modelo se han tomado en un par de elementos situados en la capa exterior de la pista (modelada como lámina 12), situada en el eje de simetría de la pieza, y a unos 35 mm del comienzo de la pista, que tiene una longitud de 40 mm. La pista de las probetas reales es de unos 55 mm, el punto donde está pegada la roseta se encuentra a unos 40-45 mm del borde de la pista, y la carga se aplica a una distancia de 40-45 mm del comienzo de rampa. Esto justifica las mayores deformaciones medidas en el laboratorio, al aplicarse la fuerza en una zona más alejada del comienzo de rampa.

Por otro lado, la zona bulk se ha modelado con una longitud de 90 mm con una zona macizada de un 40 mm, mientras que la zona bulk de las piezas es de unos 80 mm, con una zona macizada de unos 45 mm.

### 6.3. MODOS DE FALLO CONSIDERADOS

Se van a considerar los distintos modos de fallo que se pueden dar en la estructura sándwich objeto del presente proyecto, cuando se le aplica una carga 700 N repartida en una franja de la pista. Se aplica una carga de 700 N porque es la carga media de rotura de las piezas ensayadas que se han analizado.

Para detectar si el fallo se ha producido se calcularán los factores de reserva (RF en adelante) asociados a cada modo de fallo. Si algún componente presenta un RF menor que la unidad significará que ha fallado según el modo de fallo asociado al correspondiente RF. En este trabajo, los componentes a comprobar la resistencia son los modelados, el núcleo y la piel del panel sándwich.

#### 6.3.1. PROPIEDADES MATERIALES

Las propiedades de resistencia empleadas para el núcleo y para las láminas se indican en la siguiente tabla. Conviene indicar que los valores tomados de las AIMS son requerimientos mínimos.

	PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	CONDICIONES	REFERENCIA
PIELES	$X_T$	470	MPa	RT DRY	AIMS 05-01-008
	$Y_T$	460	MPa	RT DRY	AIMS 05-01-008
	$X_C$	625	MPa	RT DRY	AIMS 05-01-008
	$Y_C$	580	MPa	RT DRY	AIMS 05-01-008
	$S_{12}$	95	MPa	RT DRY	AIMS 05-01-008
	$S_{ILSS}$	60	MPa	RT DRY	AIMS 05-01-008
	$F_{flatwise}$	4	MPa	RT DRY	AIMS 05-01-008
NÚCLEO	$S_L$	0.8	MPa	RT DRY	AIMS 11-01-004
	$S_W$	0.48	MPa	RT DRY	AIMS 11-01-004
	$F_{CC}$	1.46	MPa	RT DRY	Ensayo de compresión
	$F_{CT}$	3	MPa	RT DRY	Ensayo de tracción plana

Tabla 5. Propiedades de resistencia para las pieles y el núcleo.

#### 6.3.2. FALLO DEL CORE

Los distintos modos de fallo que se pueden dar en el núcleo, para el modelo del ensayo de flexión usado se indican a continuación:

- Fallo a cortadura (CORE-SHEAR)

- Fallo a tracción o compresión del núcleo en las zonas de cambio de dirección de las telas en la cara bolsa (FLATWISE tensión/compresión)
- Fallo a compresión (CORE-CRUSHING)
- Fallo a tracción

Por tanto, éstos serán los que se analizarán en este apartado del proyecto. El resto de modos de fallo que se pueden dar en un panel sándwich no se han analizado por varias razones, algunos porque son típicos de un panel sándwich completo, y no se darán en una parte como la que hemos modelado. Otros que se podrían dar, incluso en ambos, no se han analizado por no ser condicionantes en el dimensionado de la pieza.

Conviene destacar que el análisis se realizará en la parte del núcleo no macizada, ya que en la parte macizada, al estar las celdillas rellenas de potting no se comporta como núcleo sino como un material isótropo mucho más rígido.

#### 6.3.2.1. CORE SHEAR

En las siguientes figuras se muestra el factor de reserva del fallo a cortadura para el núcleo no macizado.

Como se puede observar en ellas se dan valores del RF muy bajos en la zona de rampa, del orden de 0.3, por lo que según el modelo de elementos finitos el núcleo fallaría por cortadura en la rampa. Los valores mínimos obtenidos del RF son excesivamente bajos comparados con los experimentales. Para una carga aproximada de 700 N, en el ensayo se producía el primer fallo, y para que eso se reflejara en los resultados numéricos, el RF tendría que ser ligeramente inferior a 1.

De estos resultados se intuye que el cálculo del fallo a cortadura del núcleo combinando la expresión indicada en el capítulo 3.2.3 con las tensiones del MEF es conservativo. No obstante, puede ser que los valores de admisibles del núcleo a cortadura empleados sean demasiado bajos, ya que son requerimientos mínimos.

Conviene indicar que no se ha modelado la resina que se acumula en el comienzo de rampa, por lo que a estos efectos, en zonas donde existe acumulación de resina, normalmente en la esquina, no se producirá fallo del núcleo. Tampoco se ha modelado el adhesivo entre piel y núcleo, y esto puede que sea la razón por la cual el RF sale tan pequeño.

El fallo a cortadura del núcleo es función de la altura del mismo y del cortante que soporta. Según la zona del núcleo estos dos factores varían.

En la zona rampa la altura del núcleo disminuye bruscamente, por lo que, aunque el cortante que tiene que soportar no es excesivo, como la altura del núcleo es muy pequeña, sobre todo en el comienzo de rampa, el fallo por cortante es crítico. En la

zona del final de rampa el núcleo tiene casi la misma altura que en la zona bulk, pero tiene que soportar un cortante menor que en dicha zona. Además en la rampa el número de telas de ambas pieles es mayor que en la zona bulk, donde se reducen a 2 telas por cada cara. Por todo esto es lógico que el fallo no se dé en esa zona.

En la zona bulk la altura del núcleo es mayor, pero el cortante que tiene que soportar va aumentando conforme aumenta la distancia a la zona de aplicación de la carga. En el modelo se aprecia que, en la zona del núcleo cerca de donde se han impuesto las condiciones de contorno que simulan las cogidas de la pieza al útil de ensayo, se dan valores altos del RF. Esto es debido precisamente a la imposición de desplazamientos, y a la rigidez que le aporta la zona macizada adyacente.

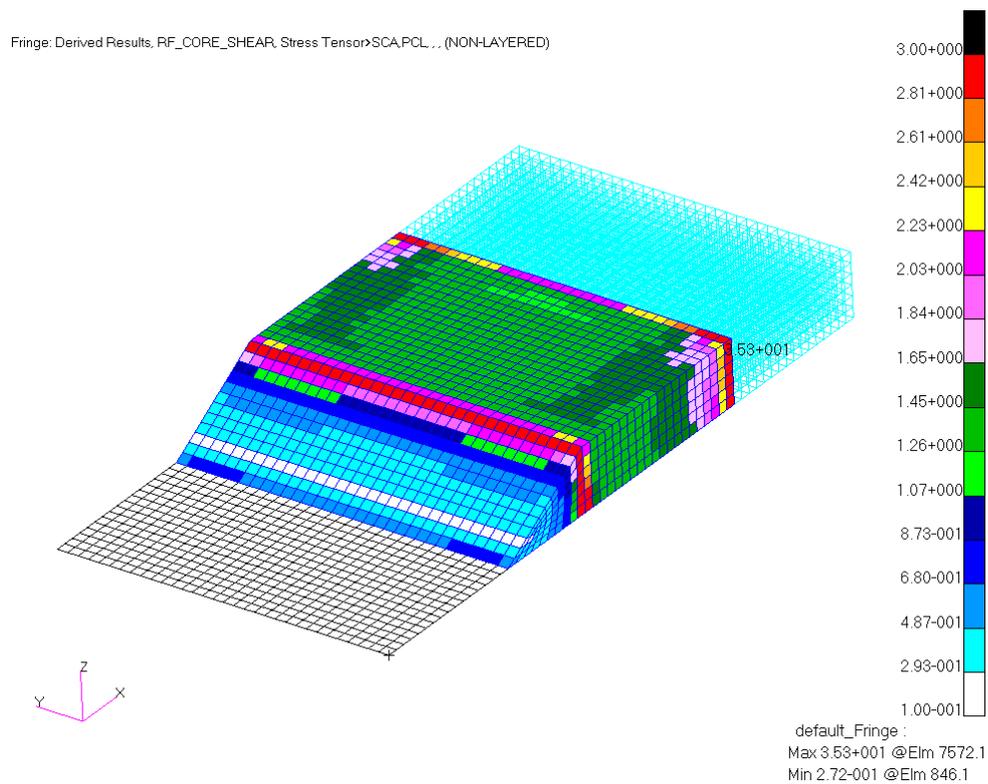


Figura 60. RF cortadura núcleo vista cara bolsa.

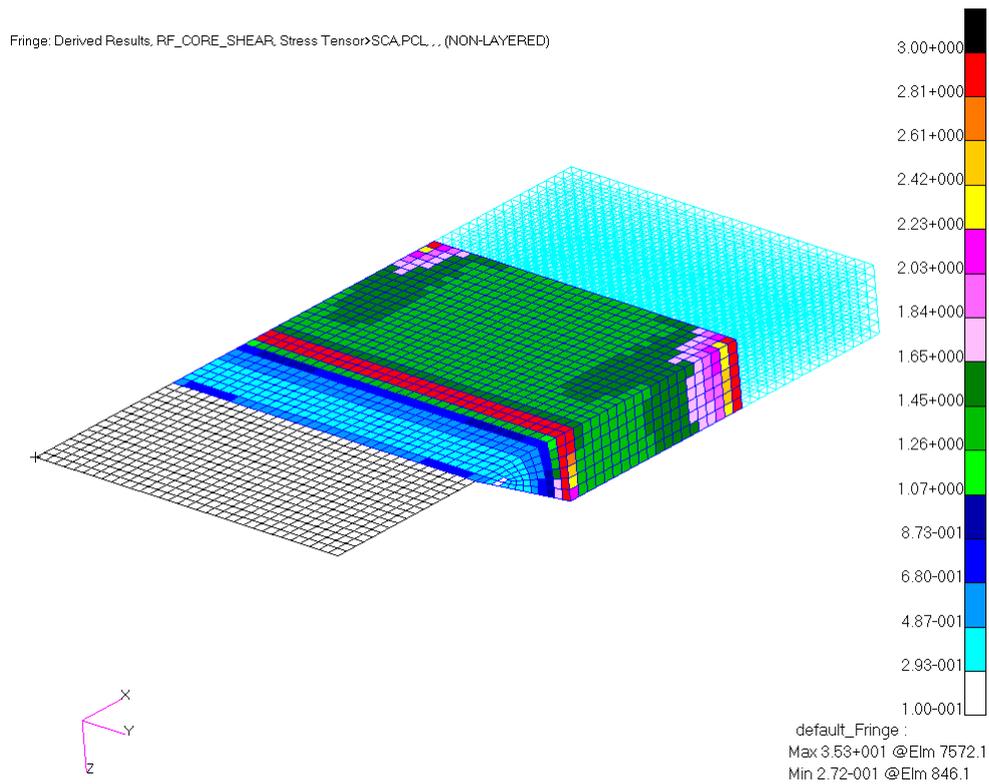


Figura 61. RF cortadura núcleo vista cara útil.

### 6.3.2.2. FLATWISE TRACCIÓN/COMPRESIÓN

Se han calculado las cargas en dirección x en las zonas de cambio de dirección de las telas de la cara bolsa, es decir, al comienzo y al final de la rampa. Ver Figura 62 y Figura 63.

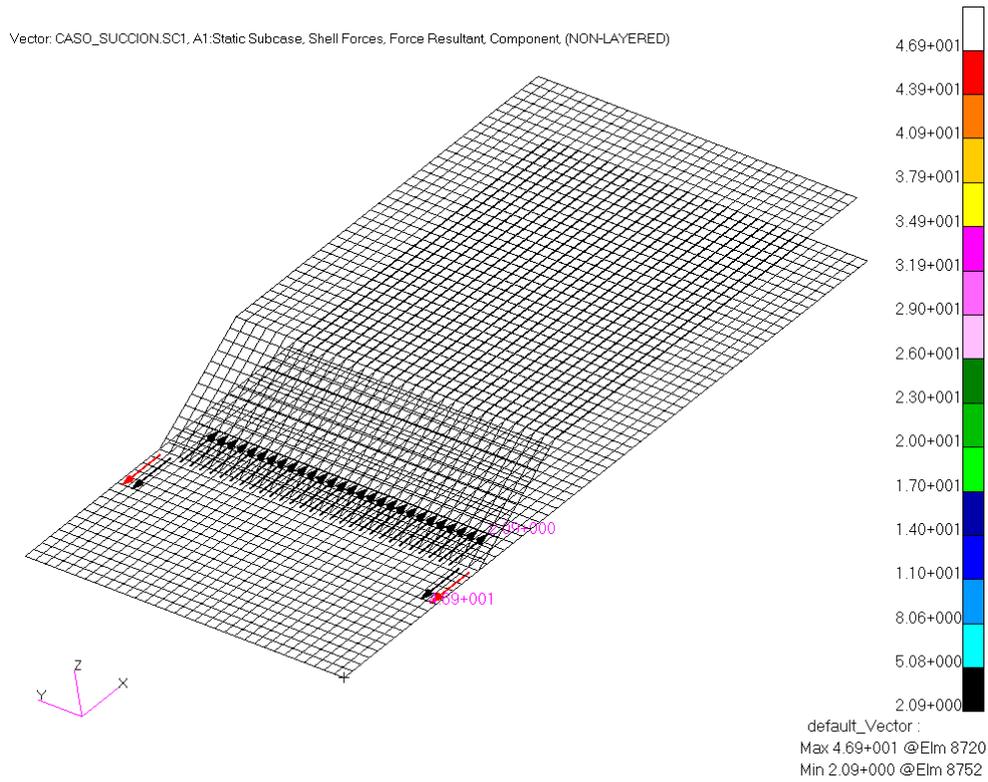


Figura 62. Flujos en dirección x en telas al comienzo de rampa.

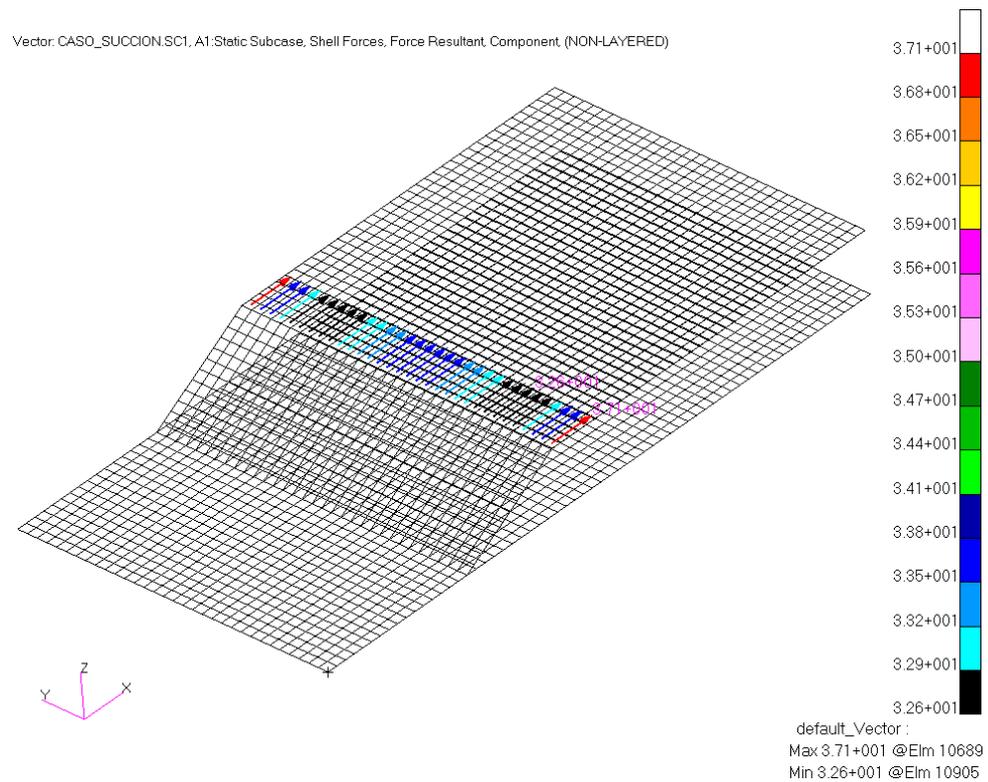


Figura 63. Flujos en dirección x en telas al final de rampa.

Al final de la rampa se obtiene que las fuerzas en dirección x son positivas, por lo que se dará “flatwise compression”, es decir, comprimirán el núcleo.

En la zona del comienzo de la rampa las fuerzas que se dan en dirección  $x$  producirán “flatwise compression” en el centro de la pieza y “flatwise tension” en los extremos de la misma.

Cuando las fuerzas  $N_{xb}$  son tales que provocan compresión del núcleo, el admisible que se toma es la resistencia última del núcleo a compresión. Cuando las fuerzas  $N_{xb}$  son tales que provocan tracción del núcleo, el admisible que se toma es la resistencia de las telas a que se produzca este fallo.

Se ha considerado que el radio de acuerdo pueda variar de 20 a 30 mm. En el siguiente gráfico se presenta la evolución de los factores de reserva mínimos para “flatwise tension” y “flatwise compression”.

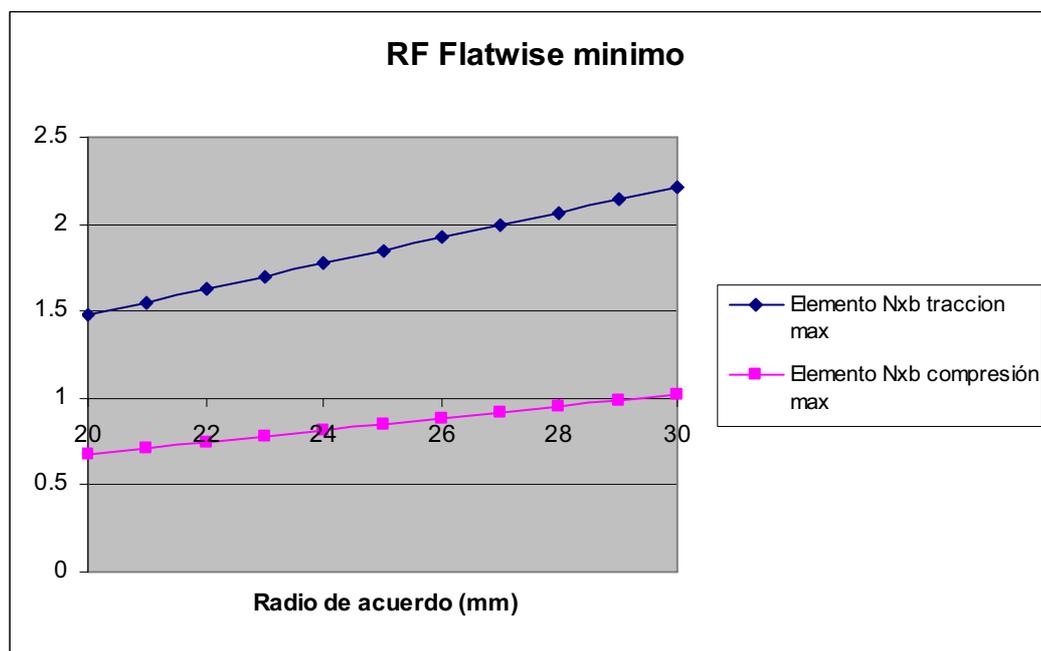


Figura 64. RF mínimo fallo “flatwise” tracción y compresión.

Como se puede observar en el gráfico anterior, el RF aumenta proporcionalmente con el radio de acuerdo. Para un radio de 25 mm no se produciría fallo del núcleo a tracción, sin embargo, seguiría fallando el núcleo a compresión en la zona del final de la rampa, siendo el RF mínimo de 0.852.

Para un radio de 30 mm no se produciría fallo del núcleo producido por la compresión localizada en la zona del final de rampa.

Conviene destacar que en el modelo no se ha representado el radio de acuerdo al comienzo y al final de la rampa, sino que se ha modelado una esquina, por lo que estos resultados podrían ser demasiado conservativos, ya que dichas esquinas actúan como concentradores de tensiones. Si se modelase el radio de acuerdo seguramente las fuerzas encontradas serían menores, y puede ser que no se diese el fallo del núcleo a compresión al final de la rampa. De todas formas, según los resultados

obtenidos de este análisis sí se debería tener en cuenta el fallo a compresión del núcleo al final de la rampa como un posible fallo crítico.

### 6.3.2.3. COMPRESIÓN

En las siguientes imágenes se presenta el factor de reserva para el fallo a compresión del núcleo. El fallo a compresión se da sólo cuando la tensión  $\sigma_z$  es negativa, por lo que se representa el RF de tracción para aquellos elementos del núcleo donde  $\sigma_z$  es negativa.

El valor del RF mínimo es de 0.646, y se da justo en la esquina donde finaliza la rampa, como se puede observar en la Figura 65.

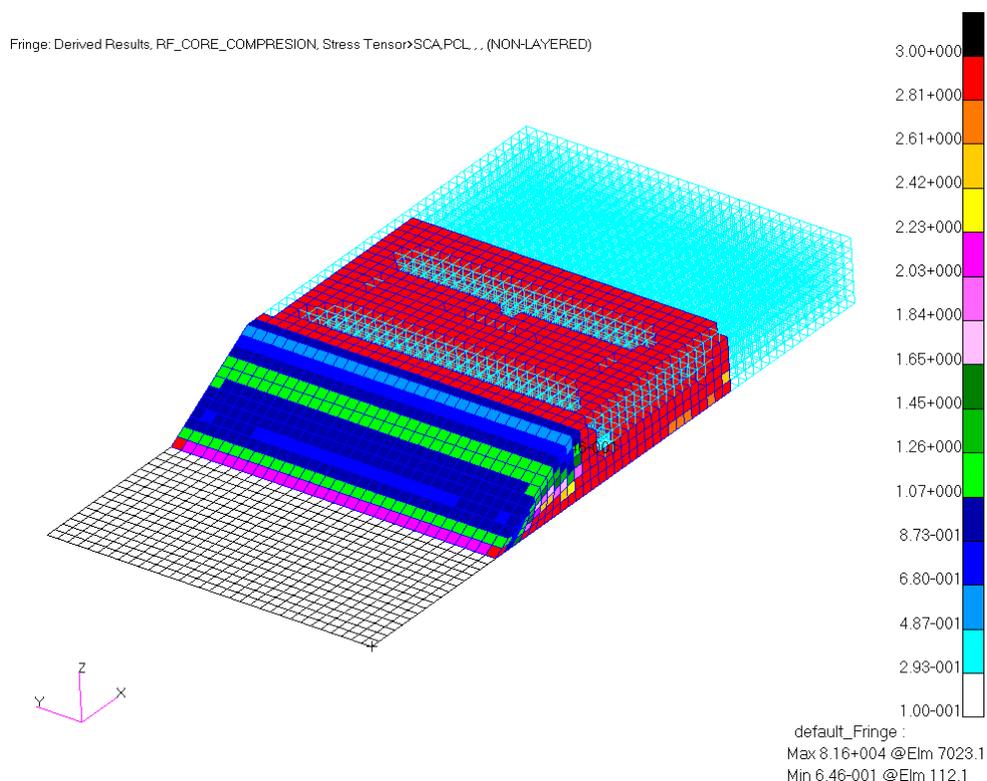


Figura 65. RF compresión núcleo vista cara bolsa.

Obsérvese en la imagen anterior que en la zona del núcleo donde acaba la rampa el RF a compresión del núcleo es del orden de 0.6, mientras que el RF de “flatwise compression” es de 0.8, por lo que no sería necesario calcular RF de “flatwise compression”, ya que el RF del núcleo a compresión es más restrictivo. Sin embargo, el RF de “flatwise tension” no queda englobado en ningún otro modo de fallo, aunque en este caso también se podría obviar su cálculo, ya que se da en la zona del comienzo de rampa, donde por haber una acumulación de resina no se producirá fallo del núcleo.

En la Figura 66 se observa que en la zona pegada a la cara útil adyacente a la cogida de las mordazas, se dan RFs menores que en el resto de la zona bulk, esto es debido a que al flectar la pieza se clava la mordaza inferior en el núcleo (ver Figura

67).

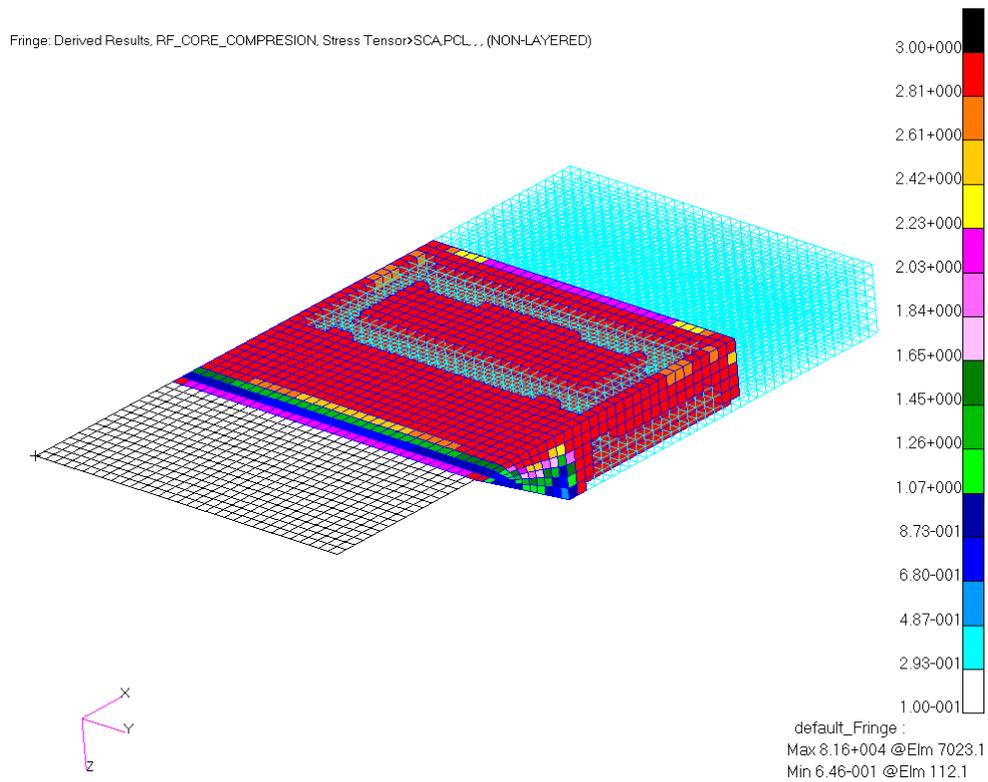


Figura 66. RF compresión núcleo vista cara útil.

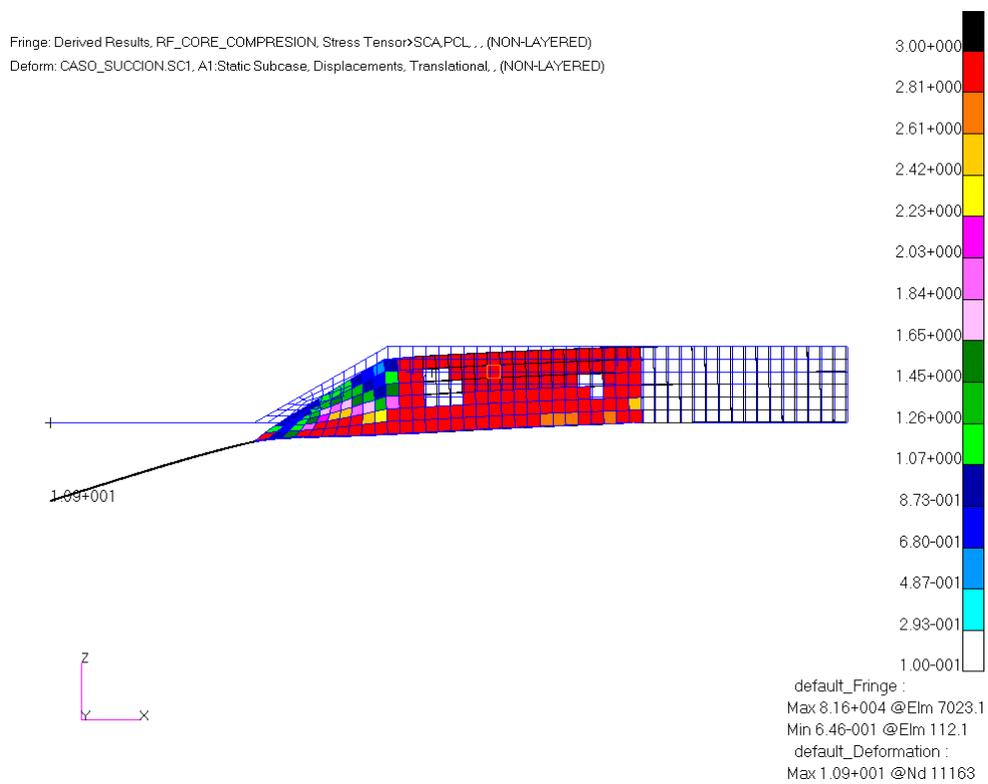


Figura 67. RF compresión núcleo geometría deformada.

### 6.3.2.4. TRACCIÓN PLANA

En las siguientes imágenes se presenta el factor de reserva para el fallo a tracción del núcleo. El fallo a tracción se da sólo cuando la tensión  $\sigma_z$  es positiva, por lo que se representa el RF de tracción para aquellos elementos del núcleo donde  $\sigma_z$  es positiva, que, lógicamente, son los complementarios a los representados para el fallo a compresión.

Los RFs a tracción del núcleo son muy superiores a 1 en la totalidad del mismo, siendo el mínimo 4.96.

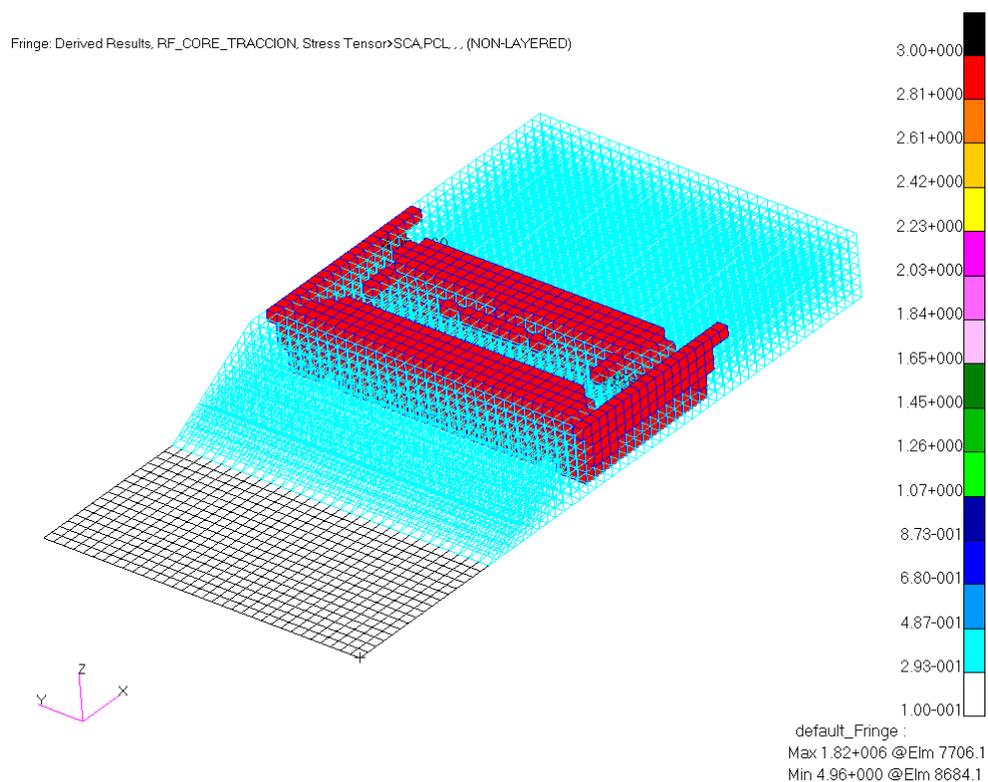


Figura 68. RF tracción plana núcleo vista cara bolsa.

En las siguientes figuras se muestra el RF de tracción del núcleo para un rango más amplio, ya que al tener valores mayores que 3, no se puede visualizar donde se da el mínimo, para el rango empleado en el resto de modos de fallo, el cual va de 0 a 3. Los valores más pequeños se dan en la zona bulk pegada a la cara bolsa, que es la que se encuentra más traccionada.

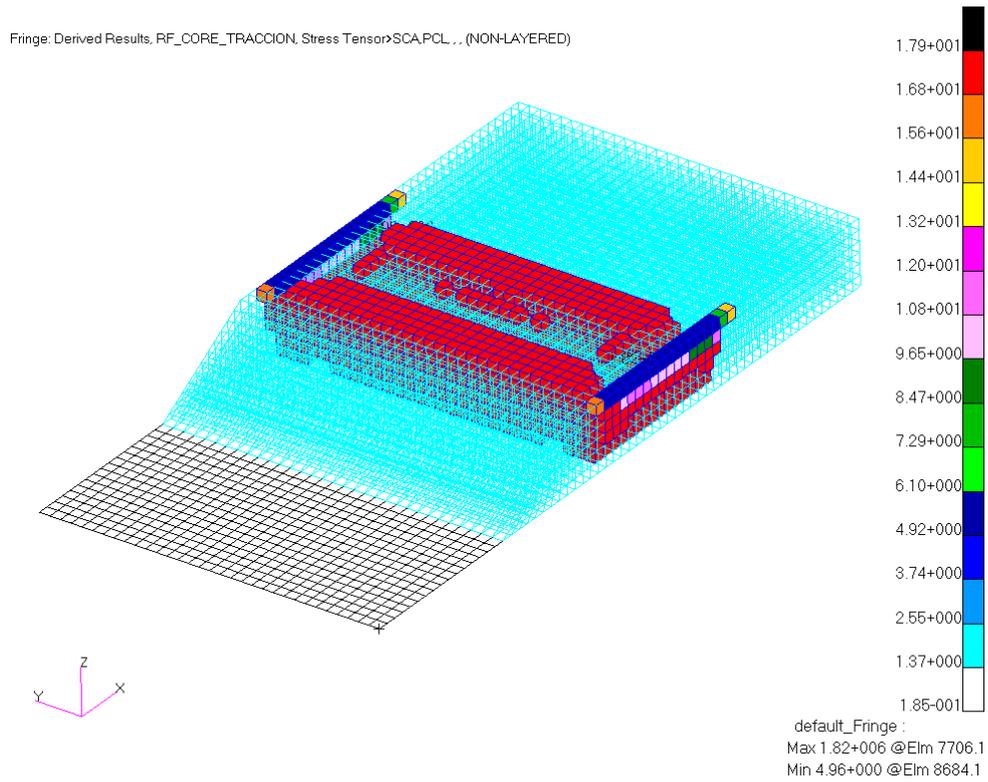


Figura 69. RF tracción plana núcleo vista cara bolsa.

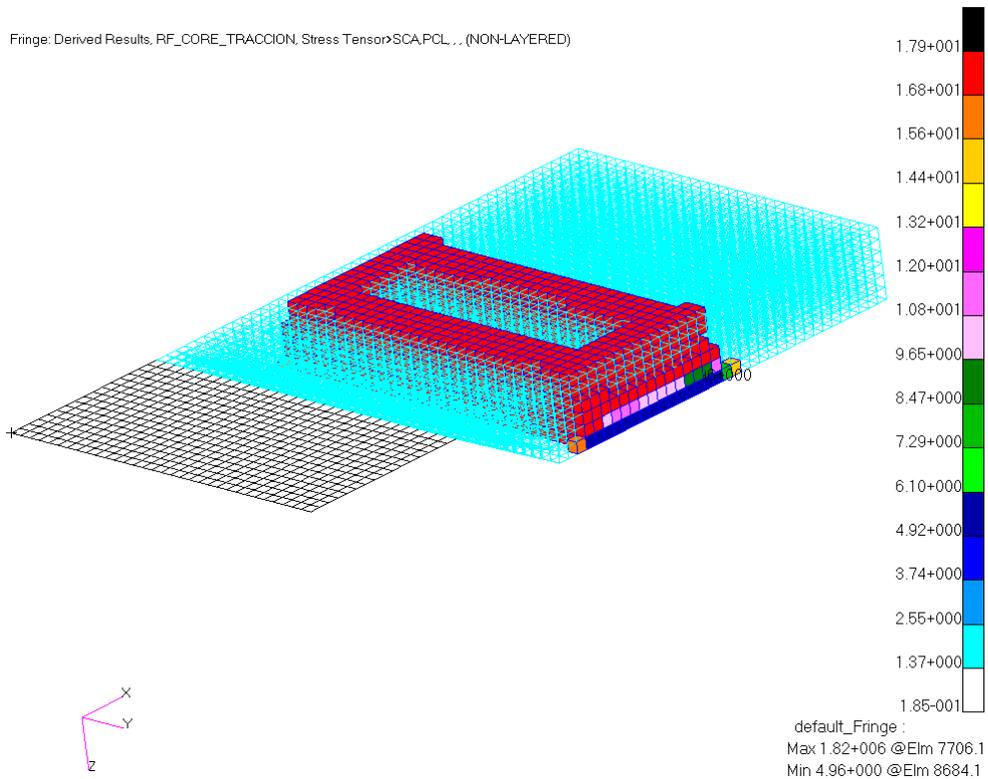


Figura 70. RF tracción plana núcleo vista cara útil.

En la siguiente tabla se resume el valor del RF mínimo para los distintos modos de fallo analizados en el núcleo. Se indica la zona de la pieza donde se dan, y la carga a

la que se produciría el primer fallo. Se ha hecho uso del factor  $\lambda$ , que se define como el factor por el que habría que dividir la carga aplicada para que de la carga de fallo, suponiendo un comportamiento lineal.

MODO FALLO	RF	ZONA FALLO	$\lambda$	CARGA FALLO (N)
CORTADURA	0.272	Rampa	3.676	190
"FLATWISE" TRACCIÓN	1.848	Final rampa, esquina cara bolsa	0.541	1294
"FLATWISE" COMPRESIÓN	0.852	Comienzo rampa	1.174	596
COMPRESIÓN	0.646	Bulk adyacente cc mordazas, cara bolsa	1.548	452
TRACCIÓN PLANA	4.960	Bulk adyacente final rampa, cara útil	0.202	3472
			<b>Carga primer fallo</b>	190

Tabla 6. Resumen modos de fallo núcleo.

Para el fallo debido a tracción y compresión del núcleo en la zona donde cambian de dirección las telas de la cara bolsa, los valores indicados en la Tabla 6, se corresponden con un radio de curvatura típico de 25 mm.

El fallo crítico predicho por el modelo de elementos finitos resulta ser el fallo del núcleo por cortadura en la rampa, produciéndose dicho fallo para una carga aproximada de 200 N.

### 6.3.3. FALLO DE LA PIEL

Los criterios de resistencia de una lámina de material compuesto se definen en el sistema de referencia principal del material. Para una lámina unidireccional, la dirección 1 sería la dirección de la fibra y la dirección 2 la perpendicular. Para un tejido, reforzado en las dos direcciones, la dirección 1 se considera la dirección donde la fibra permanece recta en el plano, y 2 la dirección de la fibra que se curva para entrelazarse con la que va en dirección 1. Por tanto, se analizan las tensiones en los ejes del material para aplicar los distintos criterios de fallo en las láminas.

### 6.3.3.1. ROTURA PIELES DEBIDO A CARGAS EN PLANO

El fallo de las telas que constituyen los revestimientos del panel sándwich debido a cargas en su plano se va a analizar a partir de varios criterios.

#### 6.3.3.1.1. CRITERIO DE MÁXIMA TENSIÓN

Para aplicarlo en Patran se ha simplificado tomando una media de las resistencias a tracción y compresión, con lo que el criterio se reduce a 3 ecuaciones:

$$\begin{aligned}\frac{|\sigma_{11}|}{X} &\leq 1 & \forall \sigma_{11} \\ \frac{|\sigma_{22}|}{Y} &\leq 1 & \forall \sigma_{22} \\ \frac{|\sigma_{12}|}{S} &\leq 1 & \forall \sigma_{12}\end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned}X &= \frac{X_T + X_C}{2} \\ Y &= \frac{Y_T + Y_C}{2}\end{aligned}$$

Para ser coherentes con los criterios de fallo aplicados en el núcleo, se va a implementar en vez del criterio de máxima tensión presentado en su forma habitual (indicada en el capítulo ), el factor de reserva asociado al fallo de los revestimientos cuando incumplen el criterio de máxima tensión.

$$\begin{aligned}RF_{MAX\_TENSION\_11} &= \frac{X}{|\sigma_{11}|} \geq 1 & \forall \sigma_{11} \\ RF_{MAX\_TENSION\_22} &= \frac{Y}{|\sigma_{22}|} \geq 1 & \forall \sigma_{22} \\ RF_{MAX\_TENSION\_12} &= \frac{S}{|\sigma_{12}|} \geq 1 & \forall \sigma_{12}\end{aligned}$$

Se van a representar los factores de reserva mínimos para todas las láminas, por tanto, el mínimo de las 12 telas que constituyen el laminado de la pista, en la rampa el mínimo de las 4 telas que constituyen el laminado de la cara bolsa y el de la cara útil, y el mínimo de las 2 telas que constituyen los laminados en la zona bulk.

- **MÁXIMA TENSIÓN EN DIRECCIÓN 1**

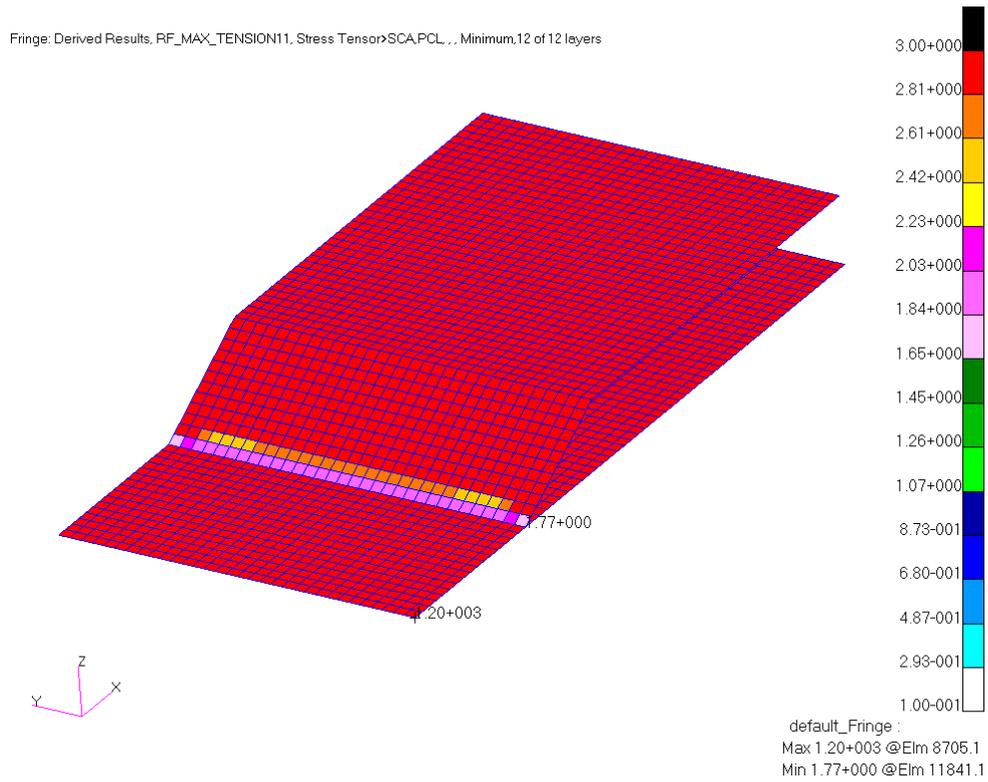


Figura 71. RF máxima tensión dirección 1 vista cara bolsa.

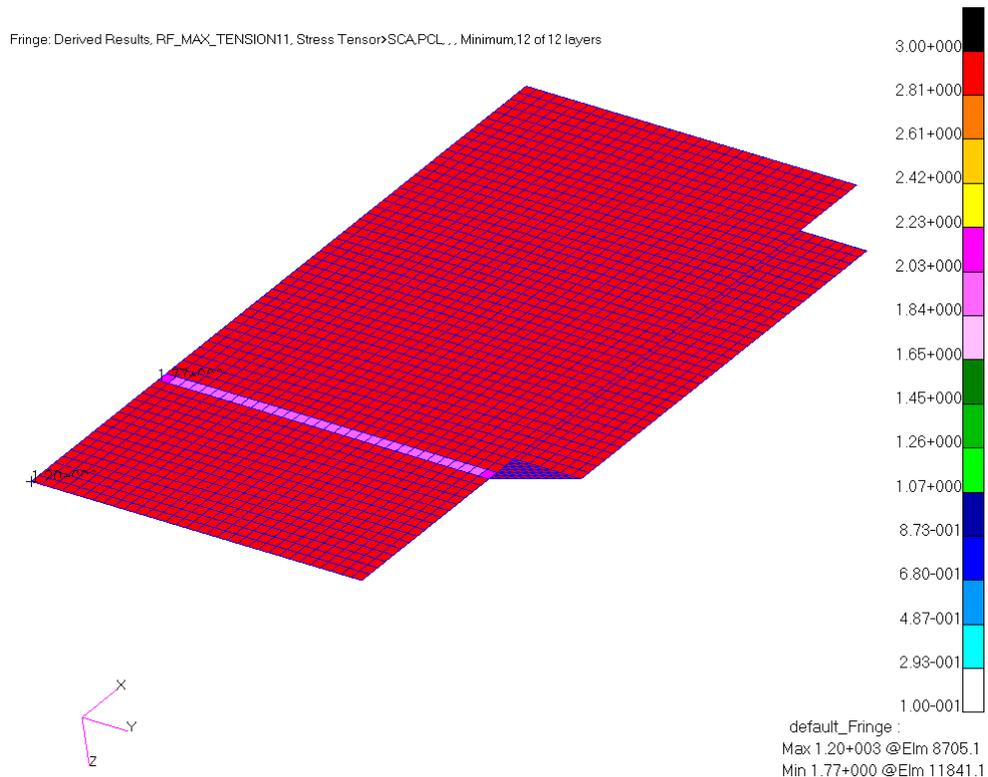


Figura 72. RF máxima tensión dirección 1 vista cara útil.

El RF mínimo es de 1.77 y se da en la rampa, justo en el comienzo de la misma, para ambos revestimientos. Los valores mínimos del RF se presentan en las láminas que están pegadas al núcleo (lámina 1 en el modelo de elementos finitos de los

laminados de cada una de las pieles).

En la zona pista y zona bulk el RF es muy superior a 1, por lo que no se producirá fallo en las telas.

En el comienzo de la rampa las cargas que se llevaban las 12 telas en la pista pasan a ser soportadas por 8 telas, 4 en cada uno de los revestimientos, y algo de núcleo, pero, en esa zona tiene una altura tan pequeña, que apenas aguantará cargas. Además, se suma que al ser una esquina, actúa como una zona de concentración de tensiones.

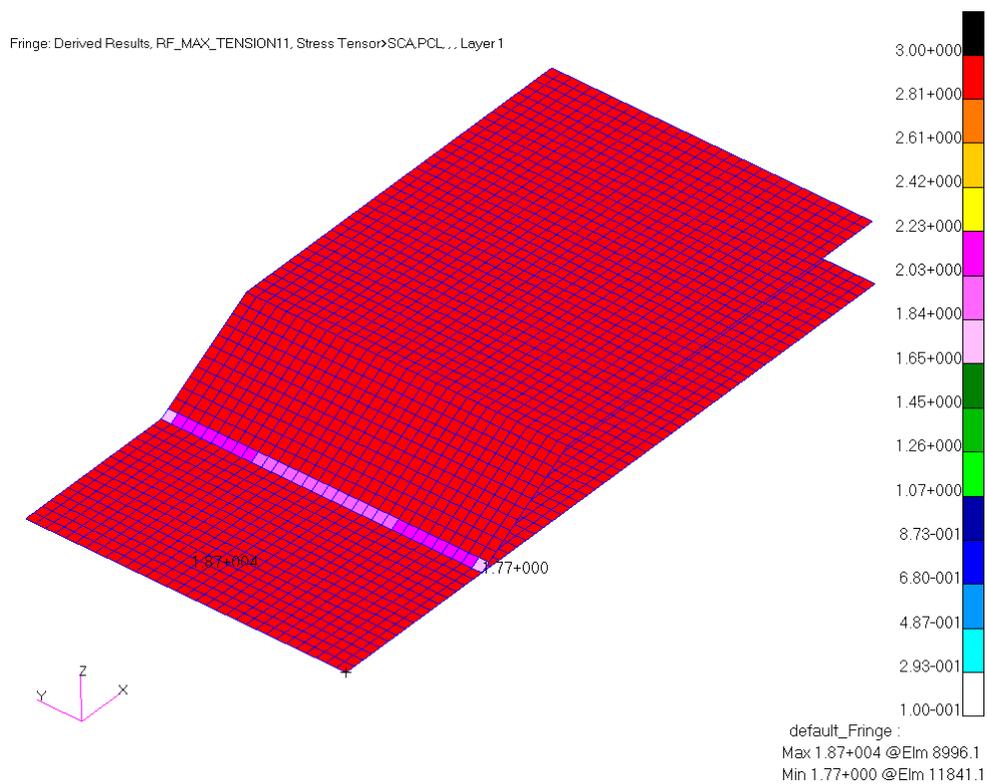


Figura 73. RF máxima tensión dirección 1 lámina 1 vista cara bolsa.

▪ **MÁXIMA TENSIÓN EN DIRECCIÓN 2**

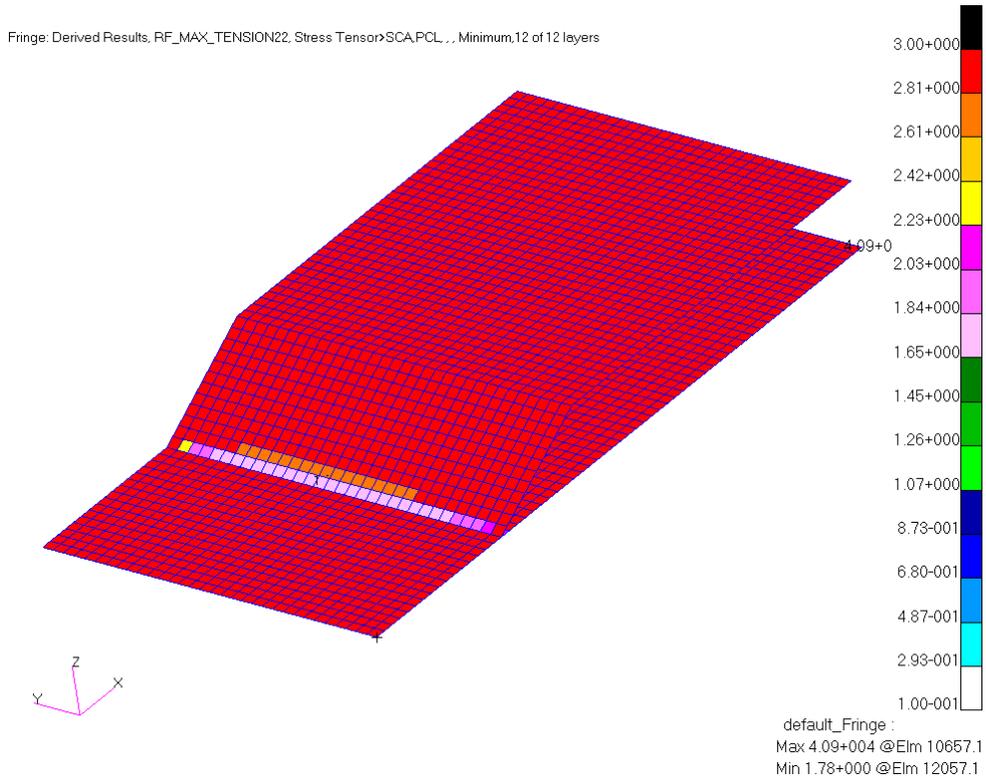


Figura 74. RF máxima tensión dirección 2 vista cara bolsa.

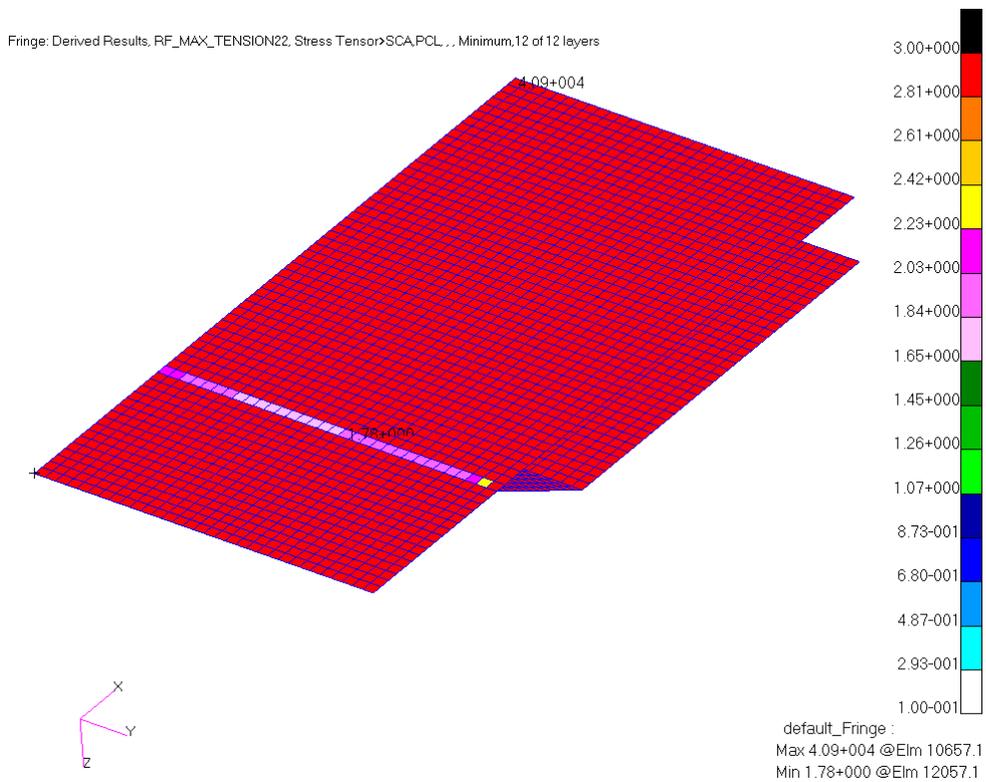


Figura 75. RF máxima tensión dirección 2 vista cara útil.

El valor del RF mínimo es 1.78, es un poco mayor que en el caso del fallo debido a la tensión en dirección 1, y se da también en la zona del comienzo de rampa en ambos revestimientos. En el resto de la pieza, se obtienen valores del RF muy superiores a 1, por lo que no se producirá fallo.

El valor del RF mínimo se da en la lámina exterior de la rampa, que se corresponde con la lámina 4 del modelo. Esa lámina está a 45°, por lo que la tensión en la dirección 2 es mayor que la de las láminas que están a 0°. Por tratarse de un tejido las tensiones en las direcciones 1 y 2 de las láminas a 45° son iguales. En las láminas a 0° las tensiones en dirección 1 son del mismo orden que las tensiones de las láminas a 45°, aunque mayores que éstas, por eso el RF mínimo del fallo de máxima tensión en dirección 1 se ha visto que se da en la lámina 1, que está a 0°. Las tensiones en dirección 2 de las láminas a 0° son de un orden de magnitud menor que las tensiones en dirección 1, y que las tensiones en direcciones 1 y 2 de las láminas a 45°.

En las siguientes figuras se muestran los valores del RF en la lámina 4 de la rampa.

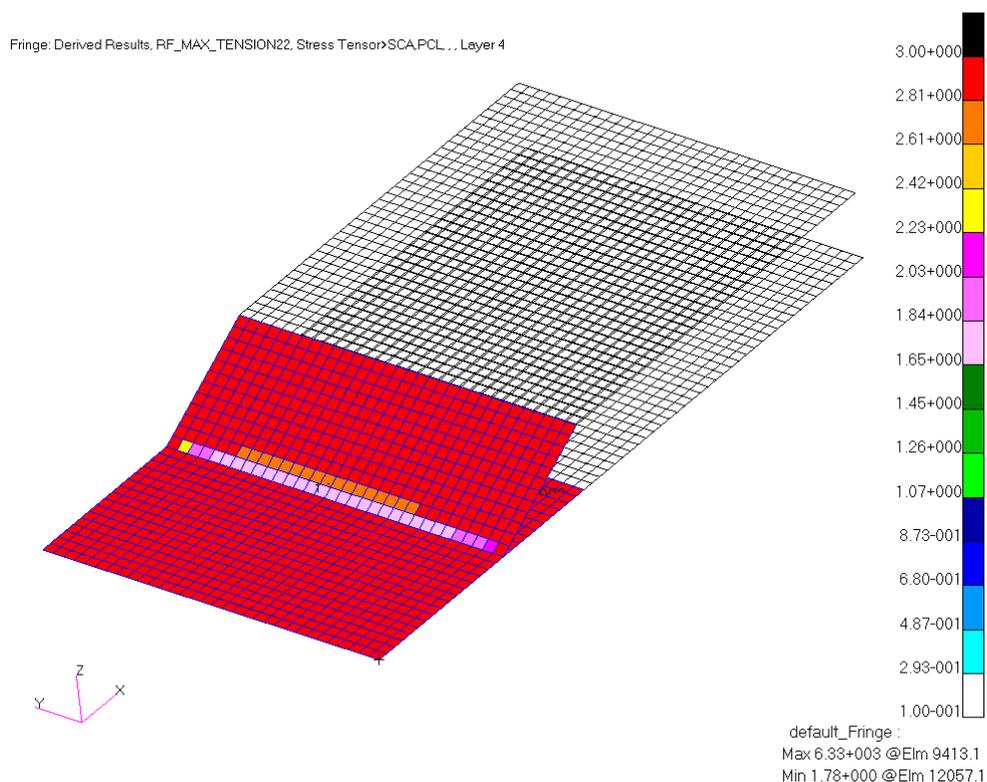


Figura 76. RF máxima tensión dirección 1 lámina 4 vista cara bolsa.

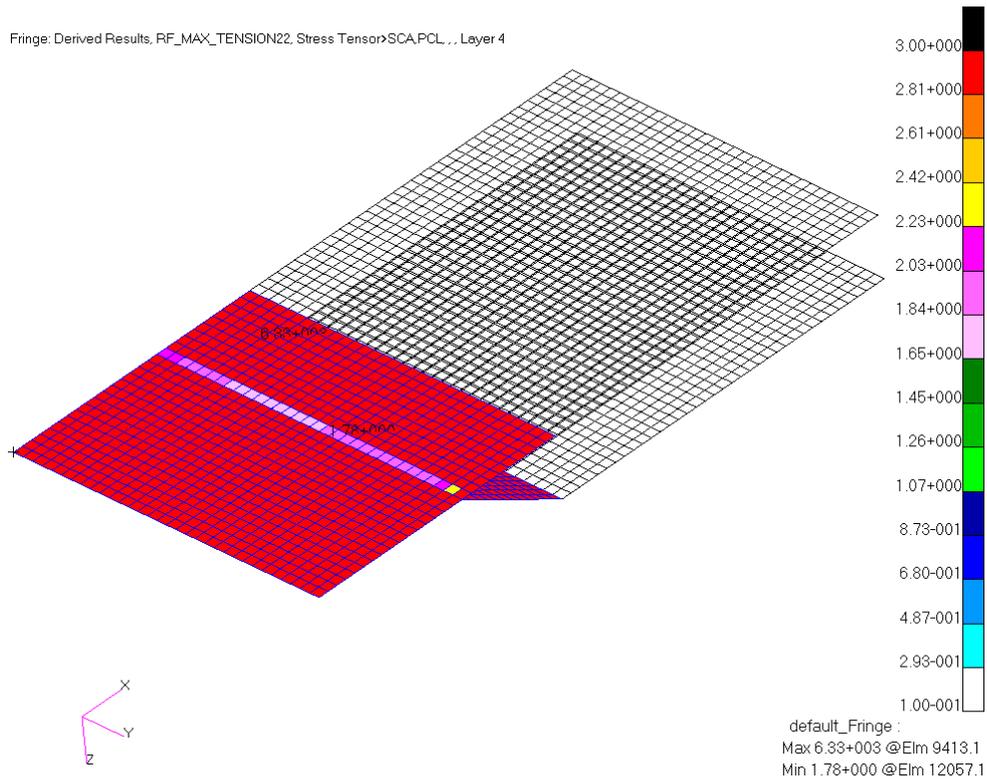


Figura 77. RF máxima tensión dirección 1 lámina 4 vista cara útil.

#### ▪ MÁXIMA TENSIÓN EN DIRECCIÓN 12

Como se puede observar en las siguientes figuras el RF mínimo para la máxima tensión de cortadura en el plano es 2.13, luego no provocará ningún fallo en las láminas de los revestimientos. Al igual que para el fallo debido a la máxima tensión en direcciones 1 y 2, la zona crítica es el comienzo de rampa. En el resto de la pieza se obtienen valores del RF bastante altos.

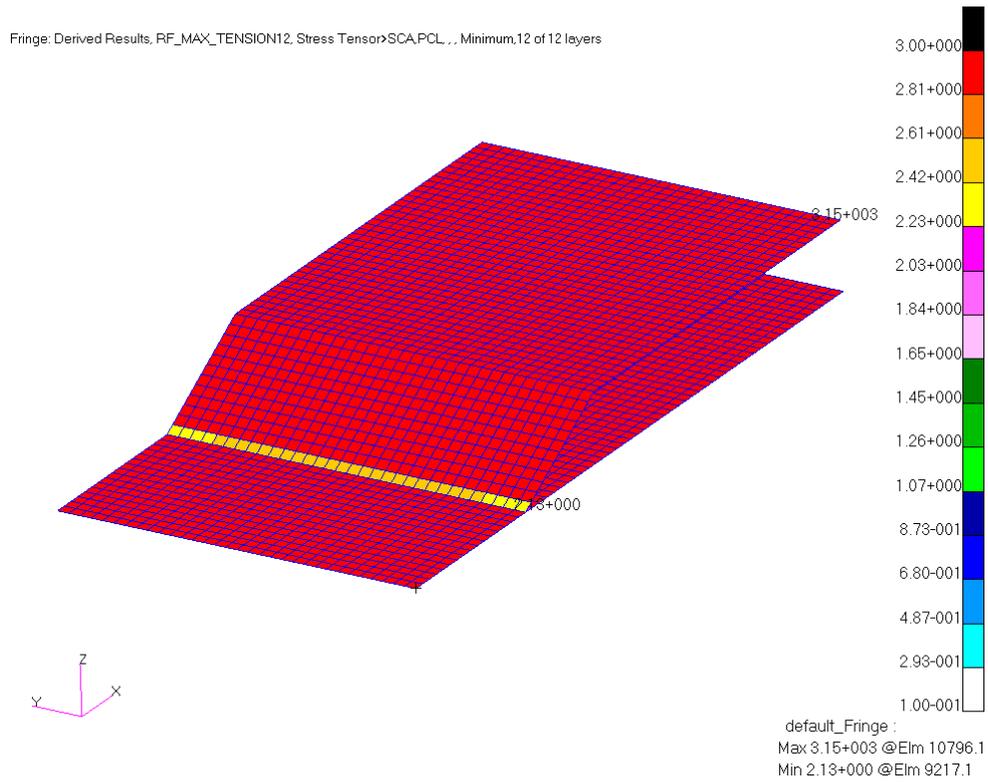


Figura 78. RF máxima tensión dirección 12 vista cara bolsa.

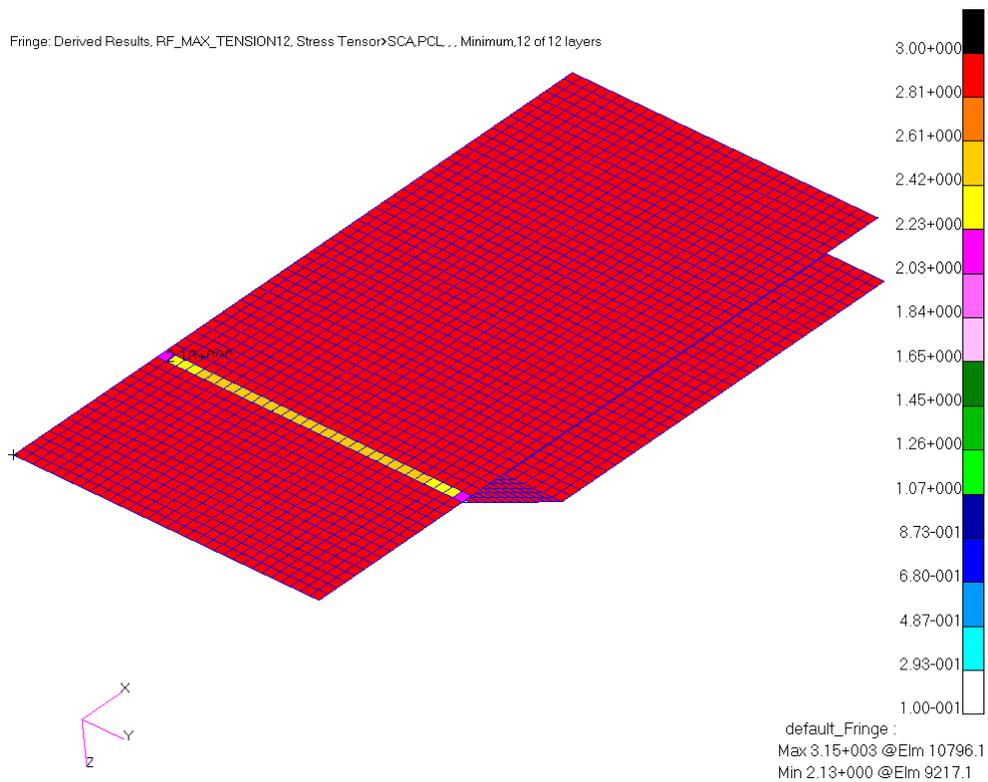


Figura 79 RF máxima tensión dirección 12 vista cara útil.

La predicción del criterio de máxima tensión es que la zona de las telas de ambos revestimientos susceptible de sufrir fallo es el comienzo de la rampa. Para el modelo analizado no se producirá fallo de las láminas debido a cargas en el plano.

### 6.3.3.1.2. CRITERIO DE TSAI-HILL

Como en el caso del criterio de máxima tensión, se define el RF asociado al criterio de Tsai-Hill. Se ha tomado una media de las resistencias a tracción y compresión, por lo que no se distingue si las tensiones son de tracción o compresión. Se aplica pues el criterio para todo el campo de tensiones empleando las resistencias medias.

$$RF_{TSAI-HILL} = \frac{1}{\frac{\sigma_{11}^2}{X^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2}} \geq 1$$

Se representa el RF de Tsai-Hill mínimo en la Figura 80 y Figura 81. Como se puede observar el RF mínimo es igual a 2.12, y se da en la zona del comienzo de rampa en las dos pieles, en la lámina externa.

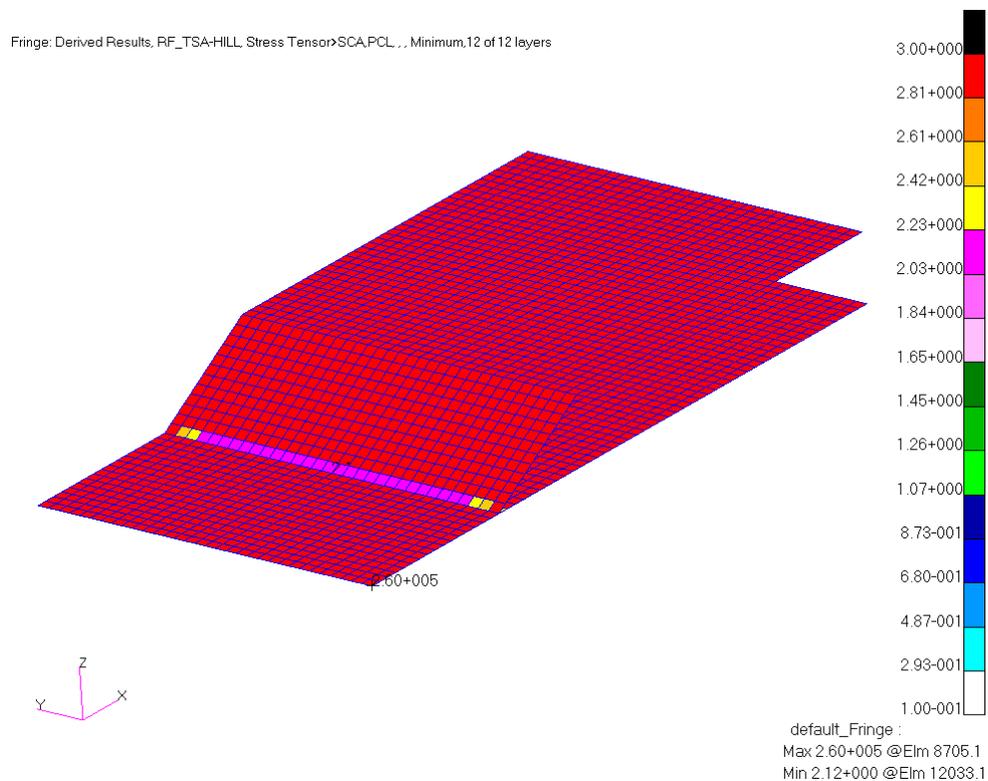


Figura 80. RF Tsai-Hill vista cara bolsa.

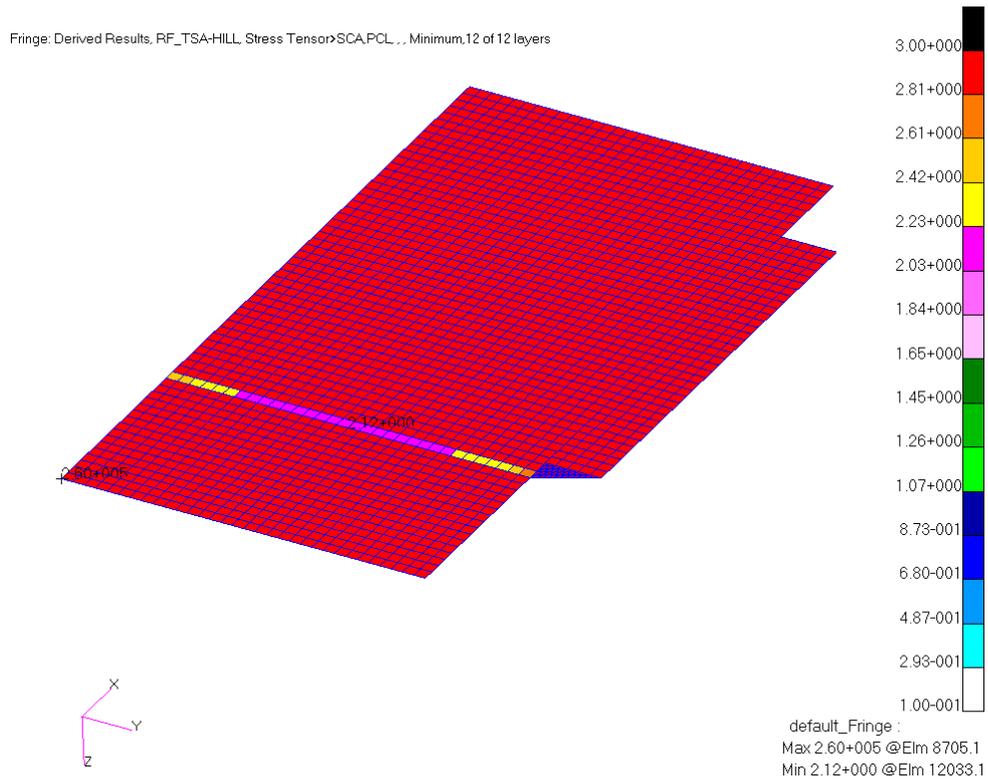


Figura 81. RF Tsai-Hill vista cara útil.

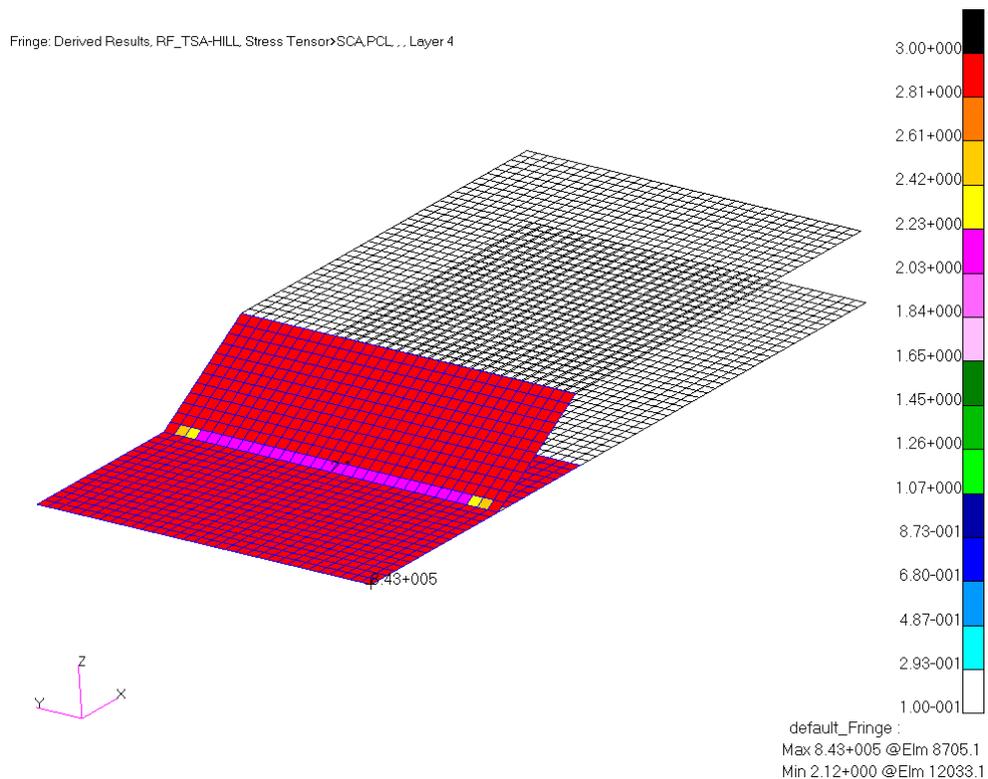


Figura 82. RF Tsai-Hill lámina 4 vista cara bolsa

Aunque el criterio no predice rotura de las láminas, se va a determinar cuál es el término dominante del criterio. Para el elemento que se obtiene el RF mínimo se calculan los distintos términos del criterio. El estado tensional para el elemento 12033,

en la lámina 4, es el siguiente:

$$\sigma_{11} = 292 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{22} = 292 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{12} = -37.6 \text{ MPa}$$

Por lo que los términos del criterio quedan como sigue:

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X^2} = 0.28$$

$$\frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} = 0.28$$

$$\frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} = 0.31$$

$$\frac{\sigma_{12}^2}{S^2} = 0.15$$

Como todos los términos son del mismo orden, se podría decir que no hay ningún término dominante, y que la rotura podría ser debida tanto a  $\sigma_{11}$  como a  $\sigma_{22}$ , aunque un poco más por  $\sigma_{22}$ . También a  $\sigma_{12}$ , aunque en menor medida, ya que el término asociado a  $\sigma_{12}$  es menor.

### 6.3.3.1.3. CRITERIO MÁXIMA DEFORMACIÓN

Como los valores de los admisibles de tensiones empleados en el análisis son valores medios entre las resistencias últimas de tracción y compresión, en direcciones 1 y 2, los admisibles de deformación resultantes también serán valores medios:

$$X_\epsilon = 12000 \text{ } \mu\epsilon$$

$$Y_\epsilon = 10000 \text{ } \mu\epsilon$$

$$S_\epsilon = 31000 \text{ } \mu\epsilon$$

Se van a considerar estos admisibles para ser coherentes con los aplicados en el criterio de máxima tensión, pero resulta interesante conocer que es una buena práctica, en aplicaciones aeronáuticas, considerar un admisible de deformaciones de un 5 por mil.

Para aplicar el criterio de máxima deformación se va a calcular el factor de reserva asociado al mismo, al igual que se ha hecho con el de máxima deformación.

$$RF_{MAX\_DEF\_11} = \frac{X_\epsilon}{|\epsilon_{11}|} \geq 1 \quad \forall \epsilon_{11}$$

$$RF_{MAX\_DEF\_22} = \frac{Y_\epsilon}{|\epsilon_{22}|} \geq 1 \quad \forall \epsilon_{22}$$

$$RF_{MAX\_DEF\_12} = \frac{S_\epsilon}{|\gamma_{12}|} \geq 1 \quad \forall \gamma_{12}$$

▪ **MÁXIMA DEFORMACIÓN EN DIRECCIÓN 1**

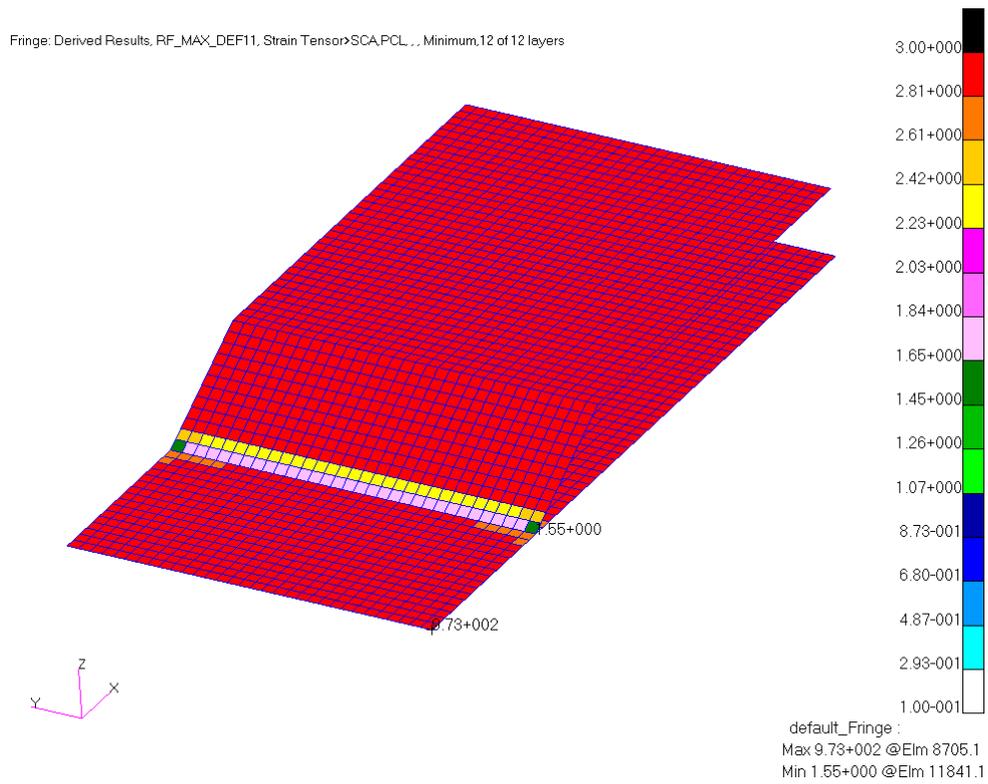


Figura 83. RF máxima deformación dirección 1 vista cara bolsa.

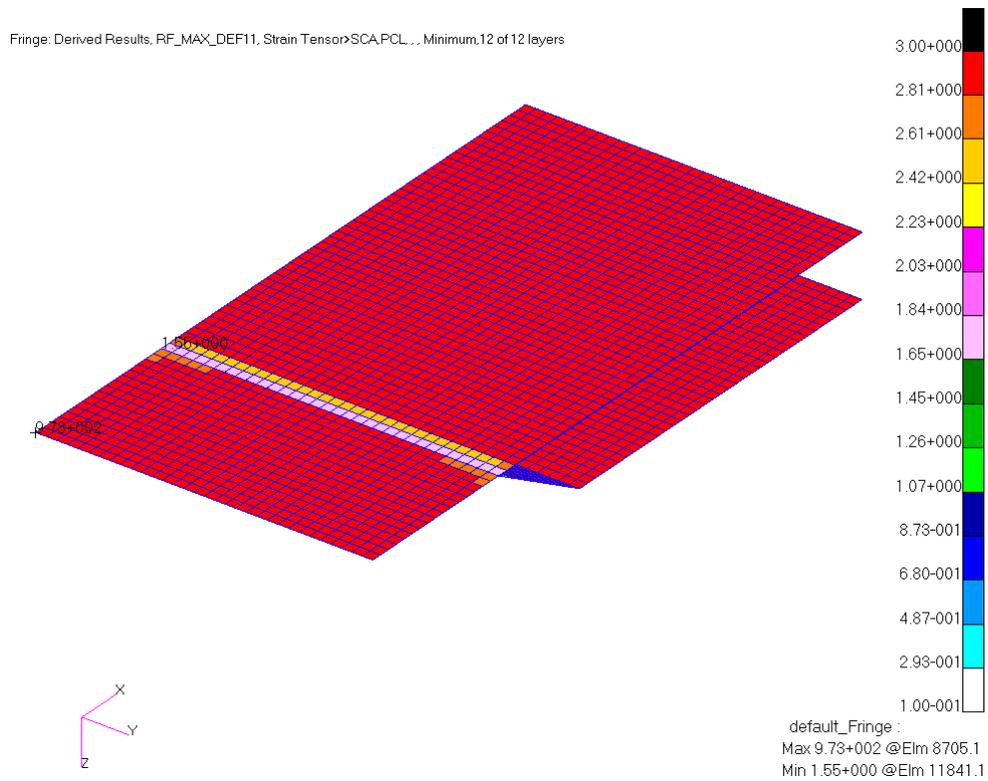


Figura 84. RF máxima deformación dirección 1 vista cara útil.

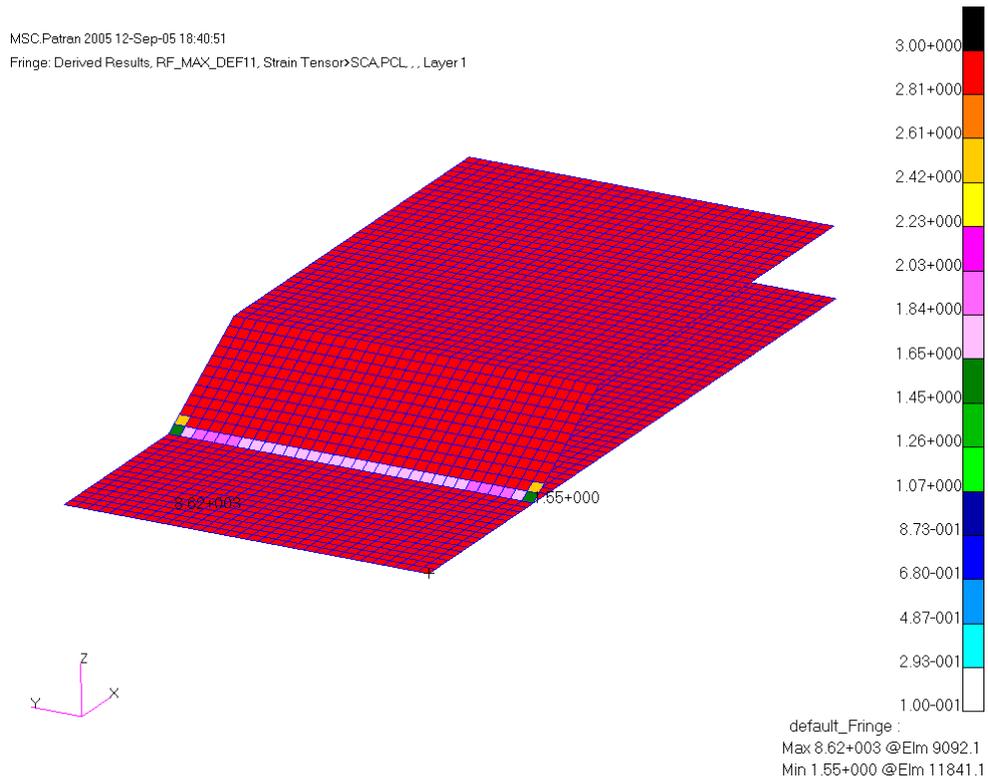


Figura 85. RF máxima deformación dirección 1 lámina 1 vista cara bolsa.

El valor del RF mínimo es 1.55, se da en las láminas de ambos revestimientos pegadas al núcleo, cuya orientación es  $0^\circ$ . El criterio de máxima deformación predice un RF menor que el de máxima tensión para la carga en dirección 1.

▪ **MÁXIMA DEFORMACIÓN EN DIRECCIÓN 2**

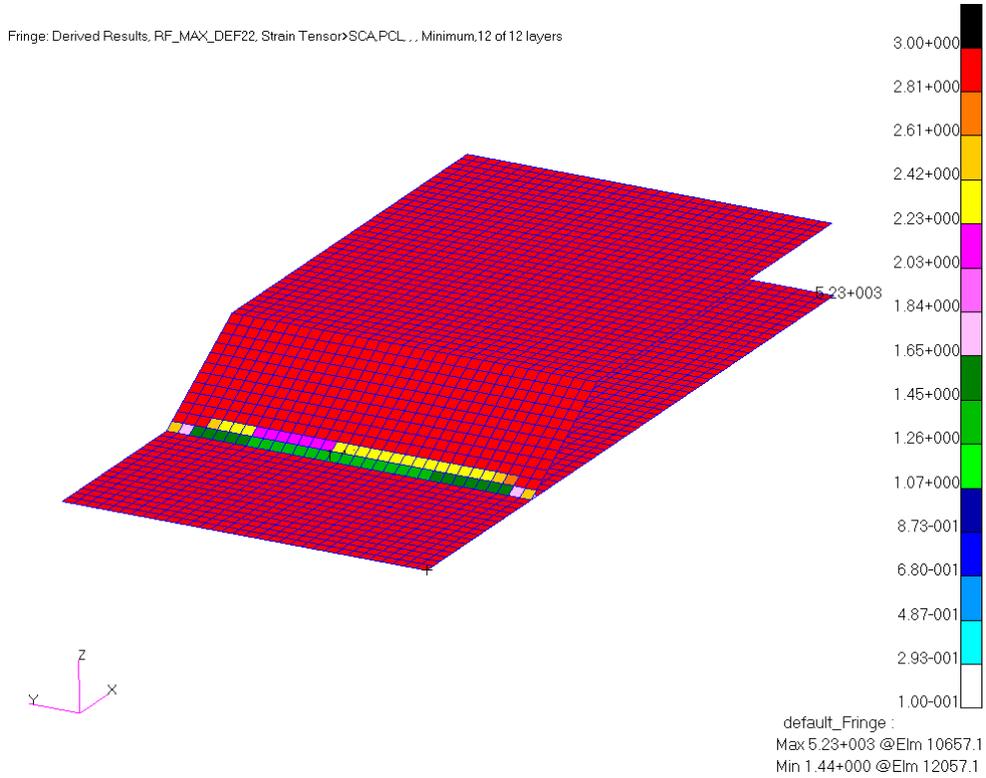


Figura 86. RF máxima deformación dirección 2 vista cara bolsa.

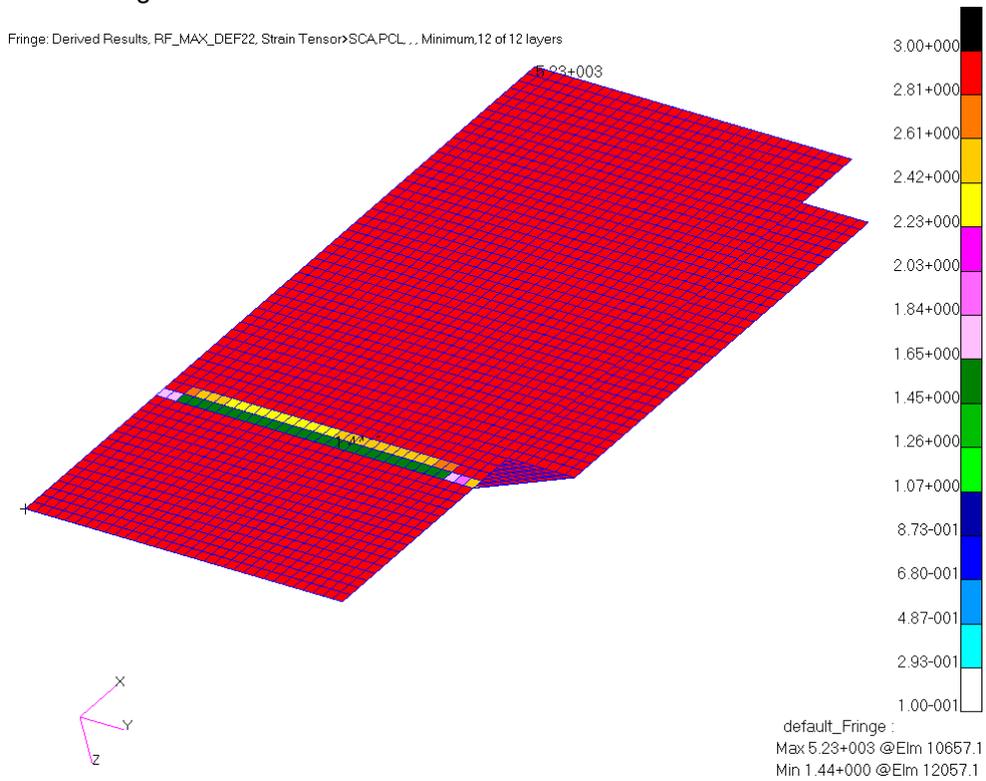


Figura 87. RF máxima deformación dirección 2 vista cara útil.

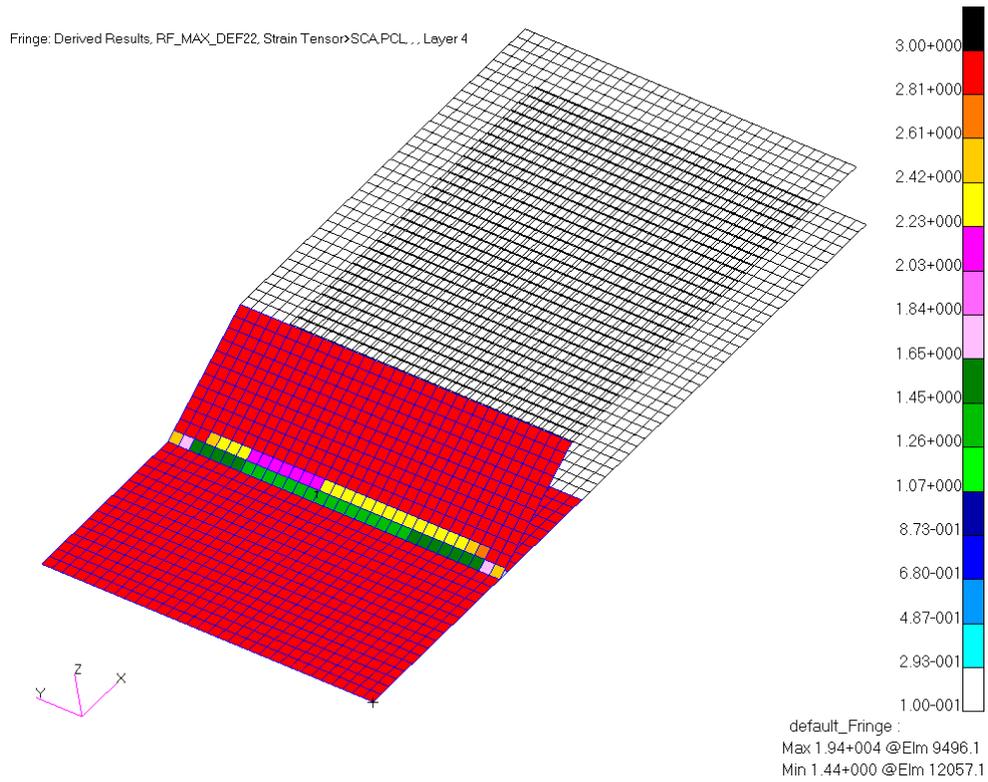


Figura 88. RF máxima deformación dirección 2 lámina 4 vista cara bolsa.

El RF mínimo es de 1.44, produciéndose en las láminas exteriores de ambos revestimientos, las cuales tienen una orientación de 45°.

▪ **MÁXIMA DEFORMACIÓN EN DIRECCIÓN 12**

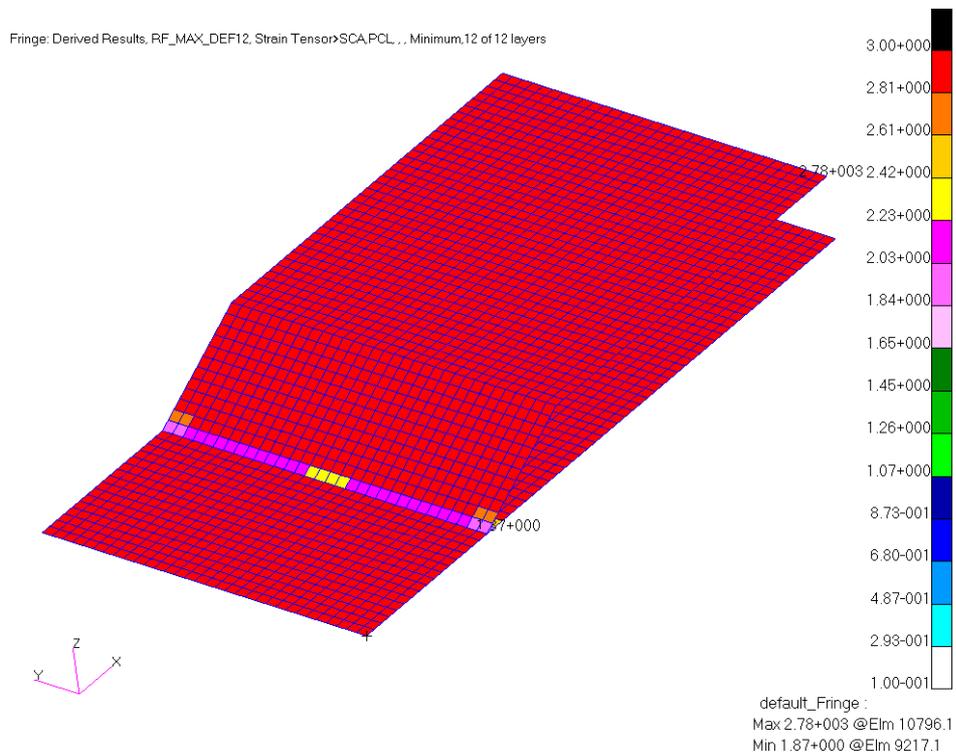


Figura 89. RF máxima deformación dirección 12 vista cara bolsa.

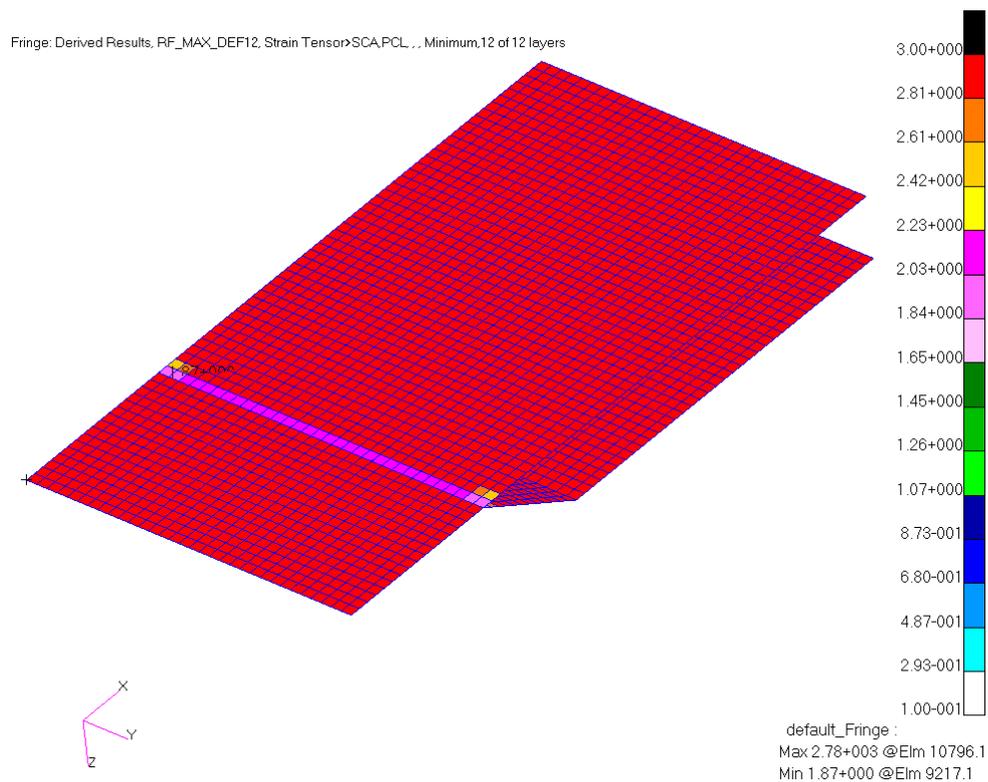


Figura 90. RF máxima deformación dirección 12 vista cara útil.

Las deformaciones de cortadura en el plano son máximas en la zona del comienzo de rampa, siendo el RF mínimo de 1.87.

El RF mínimo para el criterio de máxima deformación es debido a las tensiones en la dirección 2 de la lámina exterior, en el comienzo de la rampa de la cara útil y de la cara bolsa.

Se confirman las conclusiones obtenidas del criterio de máxima tensión y el de Tsai-Hill: la zona del comienzo de rampa es la zona crítica para el fallo de las láminas provocado por cargas en el plano. Por lo que quedan validados estos criterios, originalmente definidos para láminas unidireccionales, para predecir la rotura en láminas con refuerzos en las dos direcciones, como es el caso del tejido analizado. El criterio de máxima deformación y el de Tsai-Hill predicen que el fallo más crítico se producirá en la lámina exterior por cargas en dirección 2, éstas láminas están a 45°, por lo que se cargan lo mismo en las dos direcciones, pero la resistencia Y es algo menor que la X para una lámina de tejido, por eso se alcanza antes el valor de la resistencia en la dirección 2. El criterio de Tsai-Hill predice un RF mayor que los otros dos criterios.

#### 6.3.3.1.4. TELEGRAPHING

Este tipo de rotura se analiza de forma equivalente al criterio de máxima deformación, pero presenta admisibles inferiores a los ensayados en apilados

monolíticos. De los ensayos realizados en los revestimientos de paneles sándwich se obtienen los admisibles de telegraphing a nivel de lámina, que resultan ser un 40% inferiores que los admisibles de la lámina en laminados monolíticos. Por tanto los admisibles para las deformaciones de las láminas en la zona rampa y bulk son:

$$\varepsilon_{TLG} = 60\% X_{\varepsilon} = 7200 \mu\varepsilon$$

$$\varepsilon_{TLG} = 60\% Y_{\varepsilon} = 6000 \mu\varepsilon$$

Como los admisibles de telegraphing se han calculado a partir de los de deformaciones, y éstos a su vez a partir de los de tensiones, los cuáles se han tomado valores medios de tracción y compresión, los de telegraphing también son valores medios, por lo que el criterio queda:

$$|\varepsilon_{11}| \leq \varepsilon_{TLG} \quad \forall \varepsilon_{11}$$

$$|\varepsilon_{22}| \leq \varepsilon_{TLG} \quad \forall \varepsilon_{22}$$

Se definen los factores de reserva para telegraphing como sigue:

$$RF_{TLG\_11} = \frac{\varepsilon_{TLG}}{|\varepsilon_{11}|} \geq 1 \quad \forall \varepsilon_{11}$$

$$RF_{TLG\_22} = \frac{\varepsilon_{TLG}}{|\varepsilon_{22}|} \geq 1 \quad \forall \varepsilon_{22}$$

#### ▪ TELEGRAPHING EN DIRECCIÓN 1

Los valores del RF para el fallo por telegraphing en dirección 1 se presentan en las siguientes imágenes:

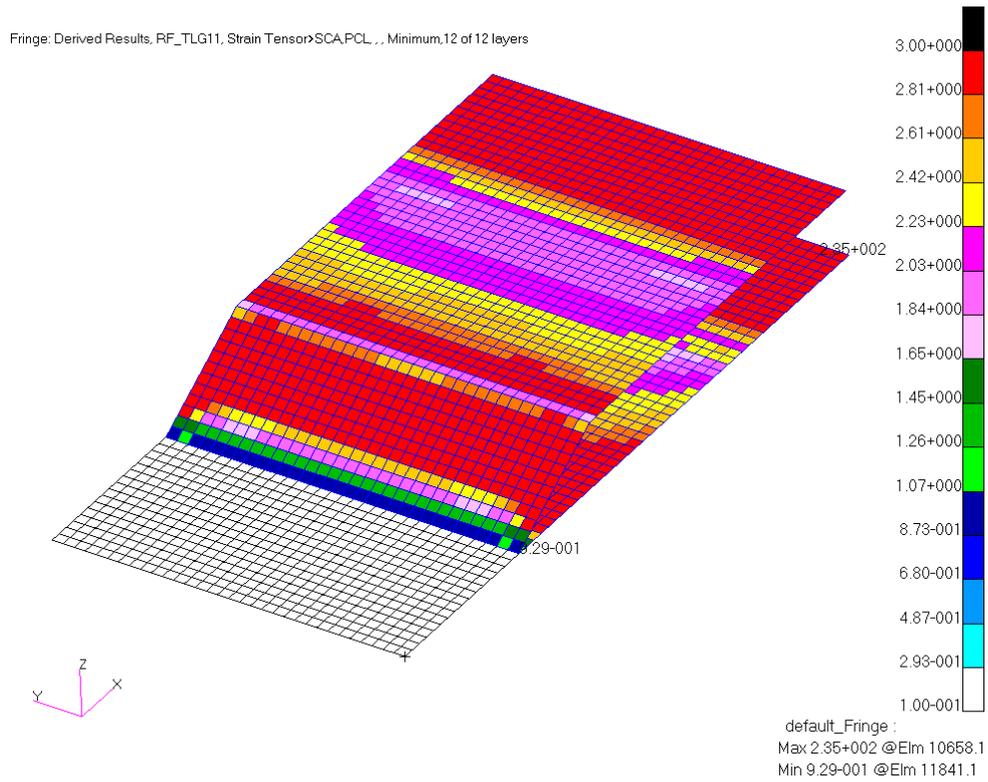


Figura 91. RF telegraphing dirección 1 vista cara bolsa.

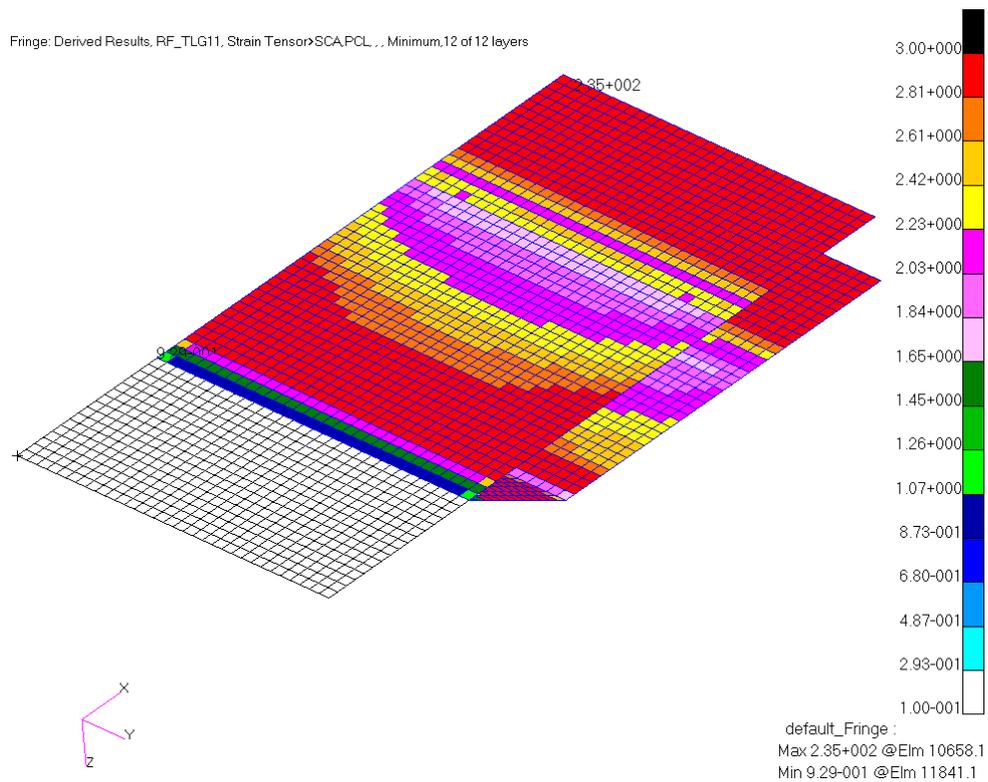


Figura 92. RF telegraphing dirección 1 vista cara útil.

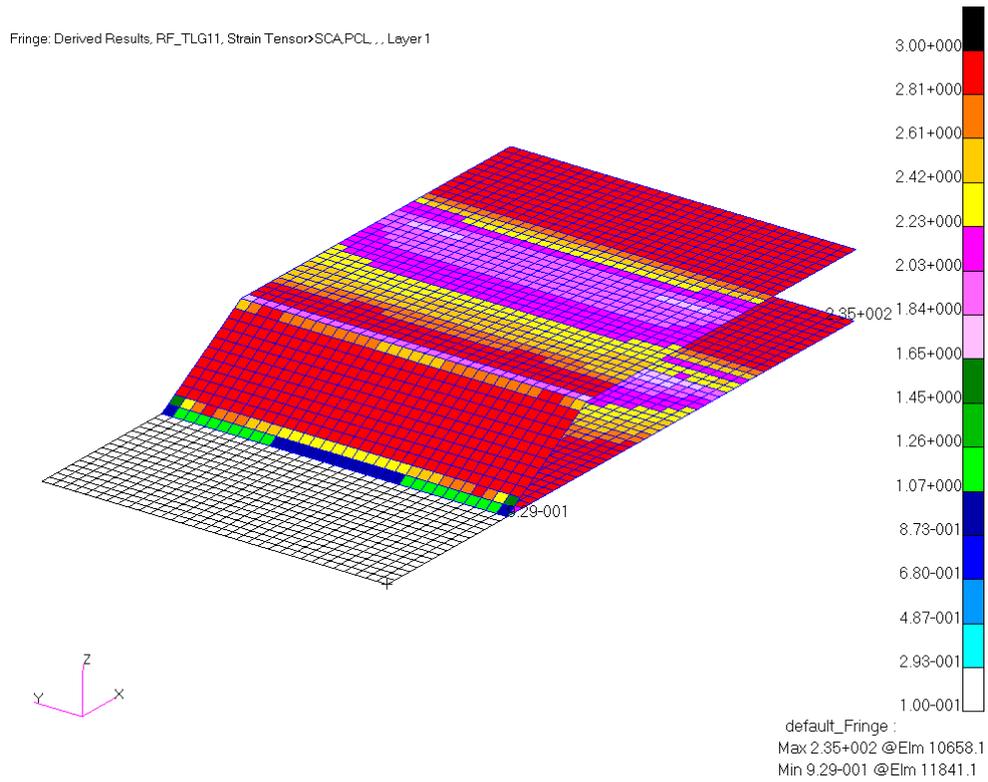


Figura 93. RF telegraphing dirección 1 lámina 1 vista cara bolsa.

▪ **TELEGRAPHING EN DIRECCIÓN 2**

Los valores del RF para el fallo por telegraphing en dirección 2 se presentan en las siguientes imágenes:

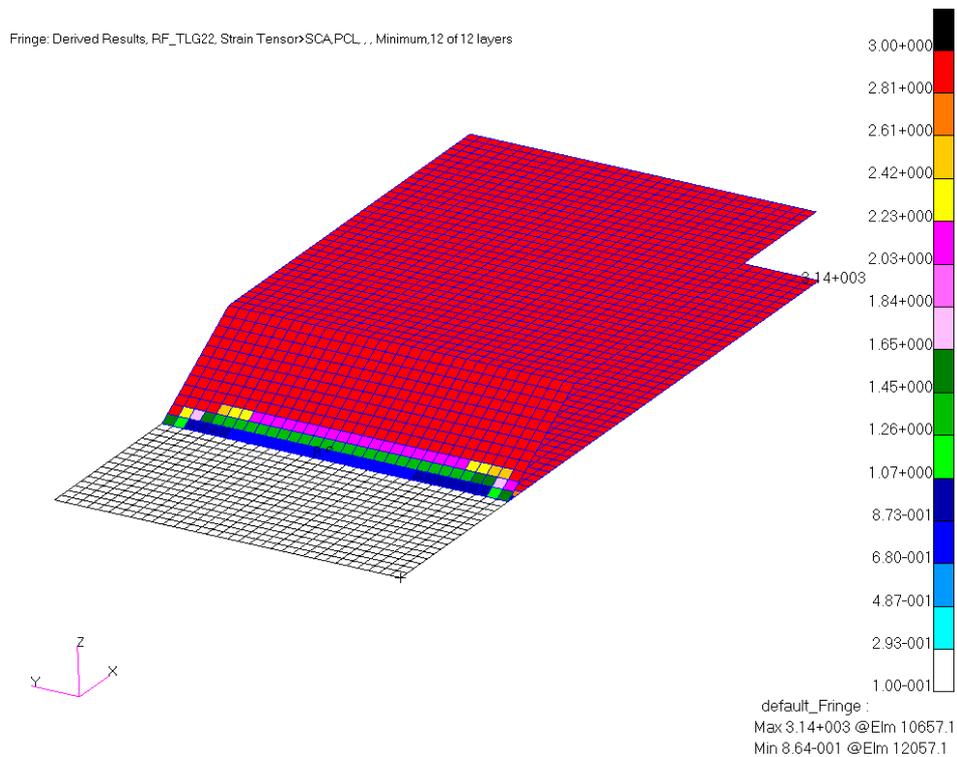


Figura 94. RF telegraphing dirección 2 vista cara bolsa.

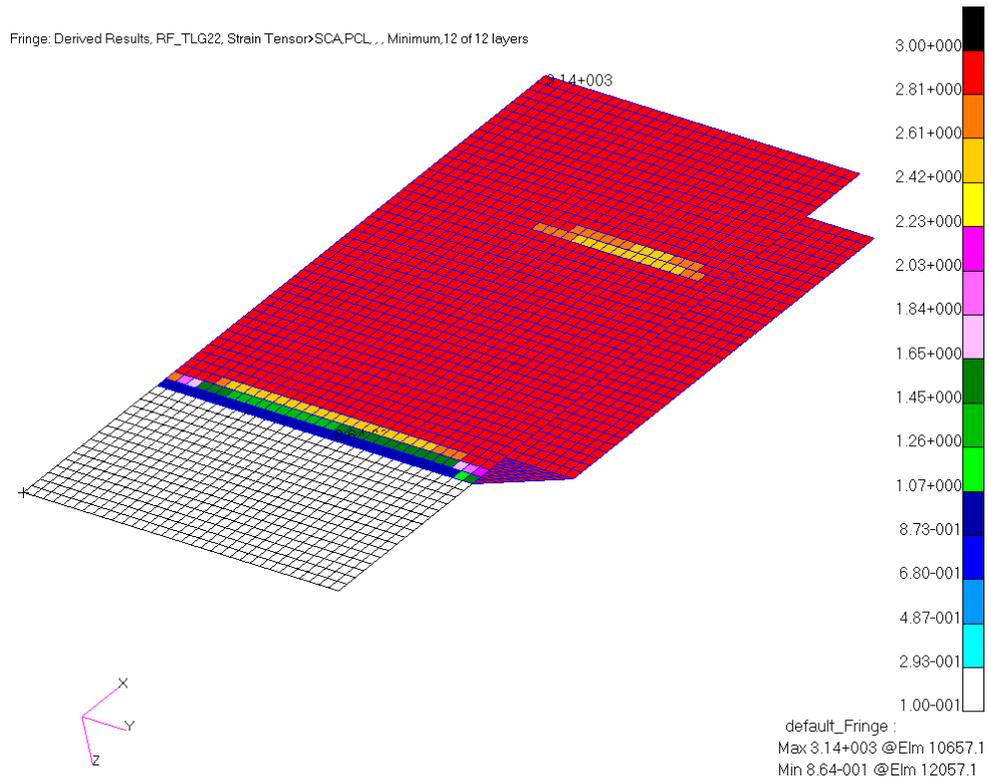


Figura 95. RF telegraphing dirección 2 vista cara útil.

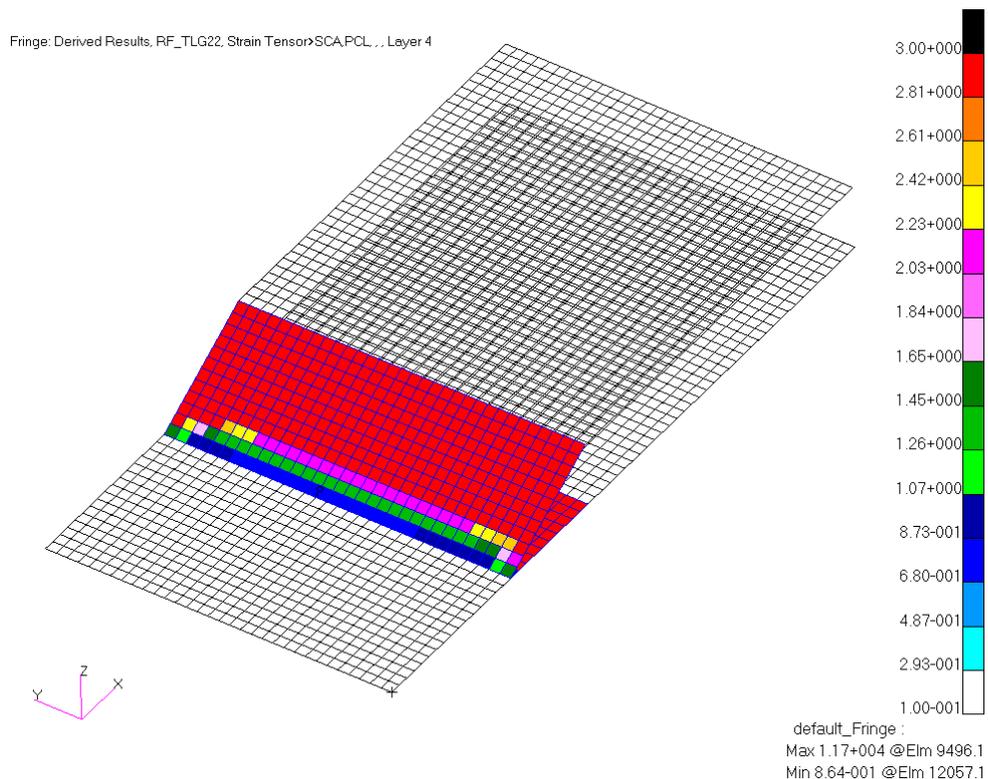


Figura 96. RF telegraphing dirección 2 lámina 4 vista cara bolsa.

Los resultados son iguales que los del criterio de máxima deformación, pero con valores mayores de las deformaciones, o lo que es lo mismo, valores inferiores de los factores de reserva. Esto es obvio, ya que el criterio es el mismo y los valores de las

resistencias considerados son los mismos reducidos un 40%, por lo que los resultados salen un 40% inferiores a los del criterio de máxima deformación.

Para las pieles en la zona rampa y bulk el telegraphing es el modo de fallo crítico, y para la pista se puede aplicar máxima tensión, máxima deformación o Tsai-Hill.

### 6.3.3.2. ROTURA PIELES DEBIDO A CARGAS A CORTADURA FUERA DEL PLANO

#### 6.3.3.2.1. CRITERIO DE CORTADURA INTERLAMINAR

El fallo por cortadura interlaminar aparece crítico en la zona del comienzo de rampa, al igual que el fallo por cargas en el plano, como se puede observar en las siguientes imágenes.

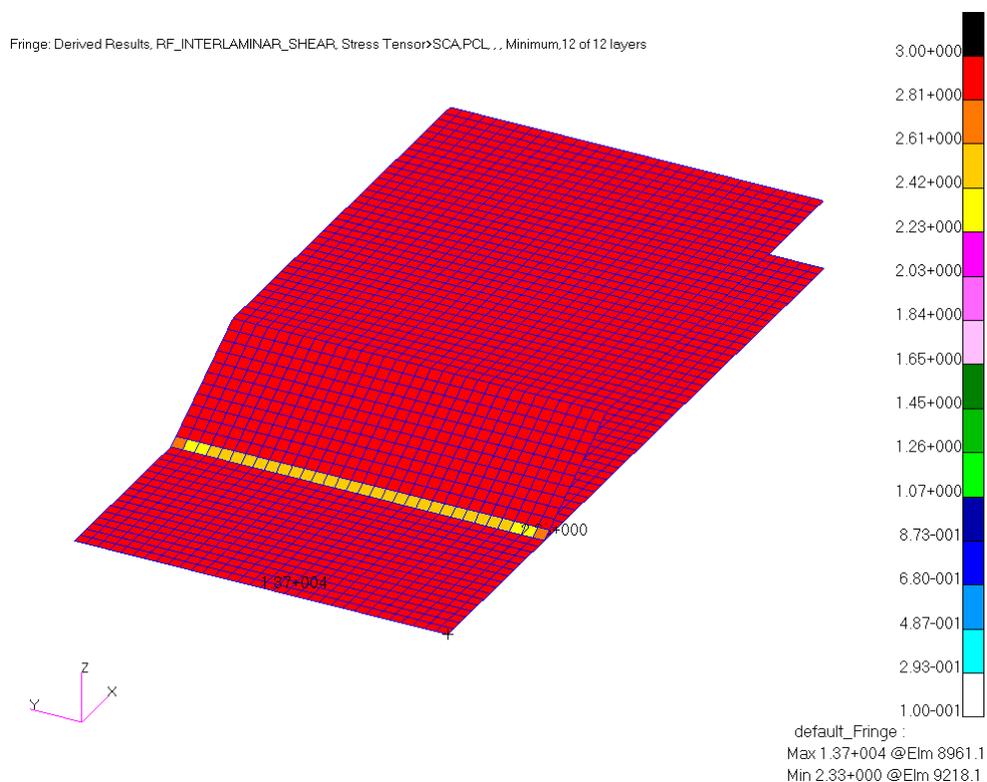


Figura 97. RF cortadura interlaminar vista cara bolsa.

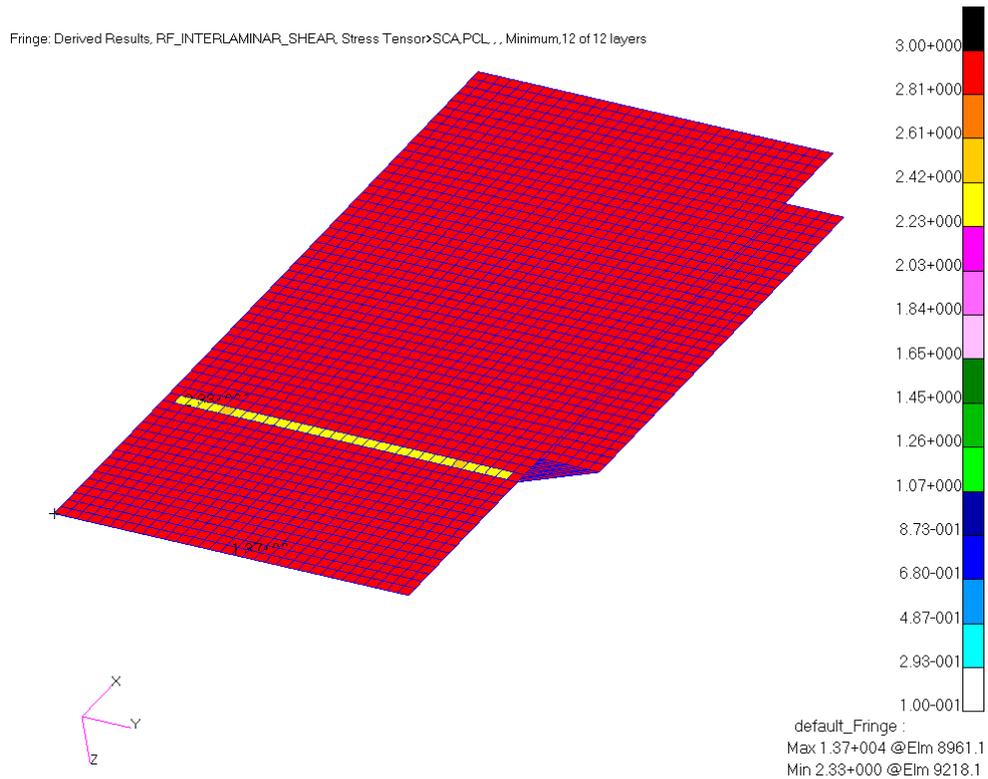


Figura 98. RF cortadura interlaminar vista cara útil

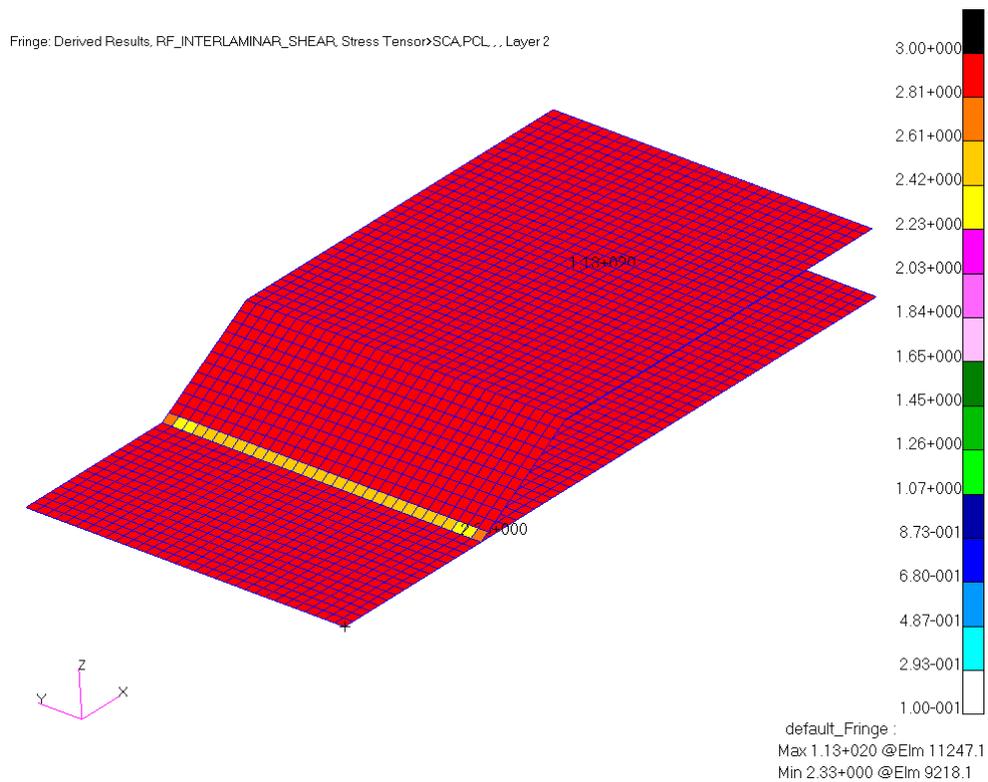


Figura 99. RF cortadura interlaminar lámina 2 vista cara bolsa

No se produce delaminación, ya que el mínimo factor de reserva para la cortadura interlaminar es de 2.33.

En la zona bulk la mayor parte de la cortadura se la lleva el núcleo, por lo que este fallo no suele ser crítico. En la esquina de la rampa el núcleo tiene tan poca altura que casi no está aguantando cortante, así que éste tiene que ser soportado por las láminas. En la pista hay un mayor número de láminas para aguantar el cortante, y además éste va disminuyendo conforme se acerca al área de aplicación de la carga.

En la siguiente tabla se encuentran resumidos los modos de fallo analizados en el presente documento para la rotura de las telas de los laminados de los revestimientos del panel sándwich analizado. Se indica la zona de la pieza donde se dan los RF mínimos, y la carga a la que se produciría el primer fallo. Se ha hecho uso del factor  $\lambda$ , que se define como el factor por el que habría que dividir la carga aplicada para que de la carga de fallo, suponiendo un comportamiento lineal.

Para todos los criterios aplicados el menor valor del factor de reserva se da en la zona del comienzo de rampa. El modo de fallo más crítico es el telegraphing, y el menos crítico es el que se produce por cortadura interlaminar.

Fallo	Criterio	RF	$\lambda$	Carga fallo (N)
Rotura de fibras	MÁXIMA TENSIÓN 11	1.770	0.565	1239
	MÁXIMA TENSIÓN 22	1.780	0.562	1246
	MÁXIMA TENSIÓN 12	2.130	0.469	1491
	TSAI-HILL	2.120	0.472	1484
	MÁXIMA DEFORMACIÓN 11	1.550	0.645	1085
	MÁXIMA DEFORMACIÓN 22	1.440	0.694	1008
	MÁXIMA DEFORMACIÓN 12	1.870	0.535	1309
	TELEGRAPHING 11	0.929	1.076	650
	TELEGRAPHING 22	0.864	1.157	605
Delaminación	CORTADURA INTERLAMINAR	2.330	0.429	1631

Tabla 7. Resumen modos fallo pieles.