

## **5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**



## 5.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se han expuesto los resultados de los ensayos llevados a cabo, los cuales comprenden dos tipos de refuerzos laterales, como son los tacones rectos y oblicuos, para una configuración de ratio 10 y orientación de las fibras de  $15^\circ$  respecto de la dirección de carga.

En el presente capítulo, se va a realizar un estudio numérico de los ensayos presentados en el capítulo anterior mediante modelos de elementos finitos. El objetivo de este estudio es analizar los estados tensionales que se generan en las dos configuraciones consideradas (tacones rectos y tacones oblicuos), con especial atención sobre las zonas donde se han producido los fallos. En base a los estados tensionales probables en la zona de fallo, se intentará evaluar la resistencia a cizalladura  $S$ , de forma indirecta, empleando diversas teorías de fallo.

## 5.2. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Para el estudio numérico se han confeccionado modelos de elementos finitos de los especímenes considerados, usando el programa ANSYS. Los modelos empleados presentan elementos de cuatro nodos (denominados SHELL 63 en ANSYS), regularmente distribuidos a lo largo del espécimen, con once filas y cien columnas de elementos, formando de este modo una malla lo suficientemente pequeña para que no aumente el cálculo computacional y que los resultados obtenidos sean considerablemente buenos. En ambos modelos, se imponen empotramientos en uno de los laterales, y solamente desplazamiento prescrito en el eje X en el otro lateral.

Es interesante observar las reacciones impuestas según cada modelo. Si se analiza el modelo de tacones rectos, se puede observar perfectamente cómo los esfuerzos resultantes presentan una tendencia paraboloidal, por lo que se acentúa la influencia del concentrador de tensiones en los puntos claves donde acaban o empiezan las fibras.

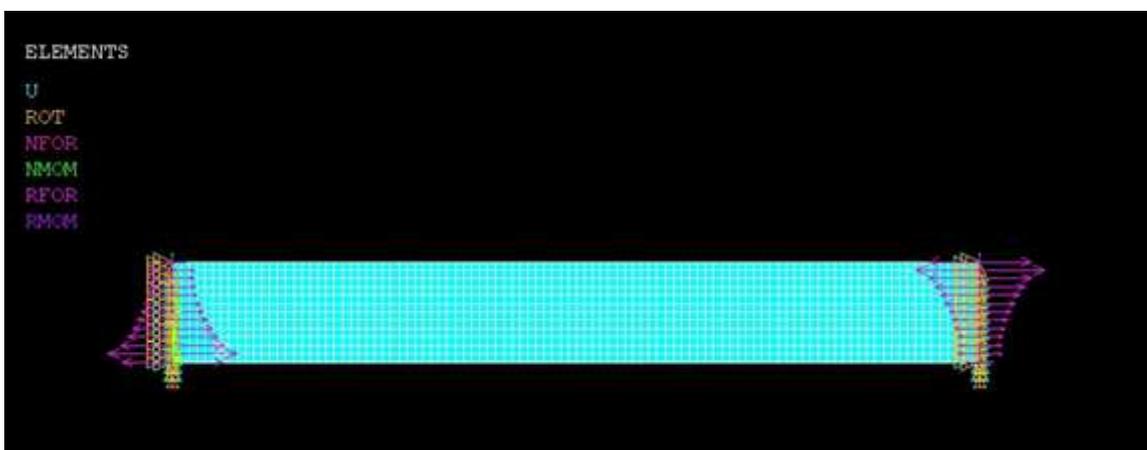
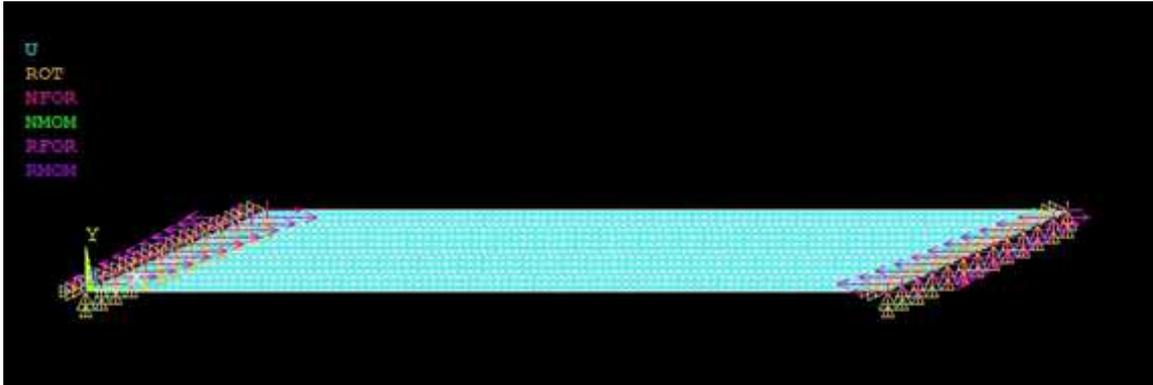


Figura 5. 1: Resultantes de esfuerzos en probetas con tacones rectos

Por otro lado, si se estudia las resultantes de los especímenes con tacones oblicuos, se observa que la tendencia es lineal, tomando el valor más pequeño donde antes estaba el concentrador de tensiones, y el valor máximo en el punto opuesto, invirtiendo la tónica respecto al caso anterior.



**Figura 5. 2: Resultantes de esfuerzos en probetas con tacones oblicuos**

Se comprobará en el siguiente apartado si los máximos y mínimos de tensiones de cada probeta se sitúan en zonas similares tanto en probetas de tacones rectos como oblicuos o si por el contrario cambian de posición.

Una vez se ha definido por completo el modelo usado, se procede a implementar los valores para cada espécimen. Los parámetros necesarios van a ser el ancho de la probeta, la longitud libre, el ángulo de orientación de la fibra y el desplazamiento que lleva asociado la carga última. En el caso de tacones oblicuos, es necesario incluir también el ángulo de estos tacones.

El desplazamiento que se debe introducir en el modelo es el desplazamiento total que realiza el extremo no empotrado, que no se corresponde con el del extensómetro ni con el de la cruceta. La medida que da el extensómetro se debe a que se realiza en una zona localizada, obviando la deformación que sufre el resto del espécimen que se encuentra fuera de la boca del dispositivo, de este modo, la medida es inferior al valor numérico necesario. Por el contrario, la medida de la cruceta incluye tanto la deformación de la probeta completa, como deformaciones del propio sistema de cogida, por lo que su valor suele ser algo superior al verdadero de la probeta, aunque sí representaría un valor más aproximado al real.

Por esto, para calcular el desplazamiento real, se establece una regla de tres. Para un desplazamiento dado, que suponemos 0.00758mm, se obtiene una tensión asociada en cada caso. Como se conoce la carga última y los datos anteriores, se puede calcular el desplazamiento de la probeta completa.

Para poder ajustar los modelos a los ensayos reales, se van a distinguir, para cada tipo de probeta con tacón diferente, los tres tipos de rotura presentados. De este modo para las probetas de tacones rectos, se implementará la media entre todos los ensayos con rotura central, con rotura centro-lateral y con rotura lateral, obteniendo un modelo, media de cada caso individual y que represente a cada tipo. Del mismo modo se procederá con las probetas con tacones oblicuos y rotura central, rotura centro-lateral y rotura lateral-central. Para poder

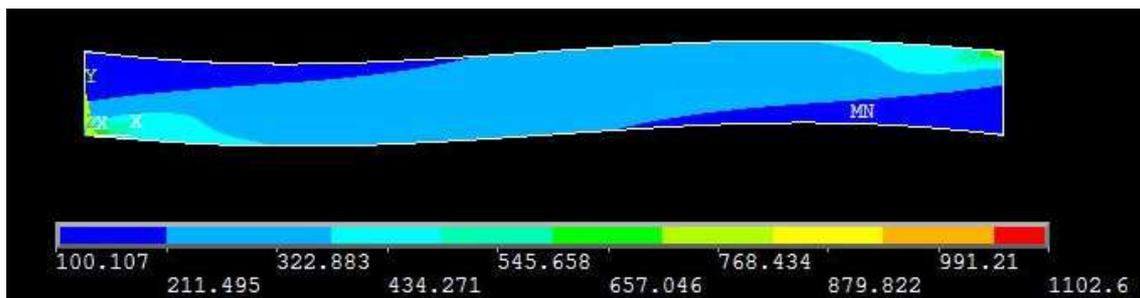
analizar ambos grupos a la vez y comparar entre ellos, se redefine la rotura de probetas lateral-central como rotura lateral.

En la siguiente tabla se definen todos los parámetros necesarios.

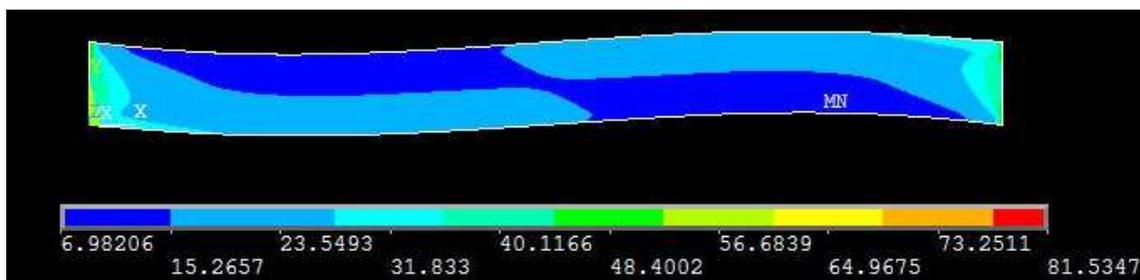
**Tabla 5. 1: Parámetros necesarios para el modelo ANSYS**

Probeta		Ancho (mm)	Longitud libre (mm)	Carga última (N)	Desplazamiento (mm)
Rectos	Central	12.15	125.34	5585.81	0.9273
	Centro-lateral	12.67	125.34	5623.10	0.92472
	Lateral	12.68	125.34	5704.03	0.93715
Oblicuos	Central	12.70	130.81	5210.09	1.08603
	Centro-lateral	12.68	131.43	5056.57	1.05965
	Lateral	12.73	130.19	5190.47	1.09611

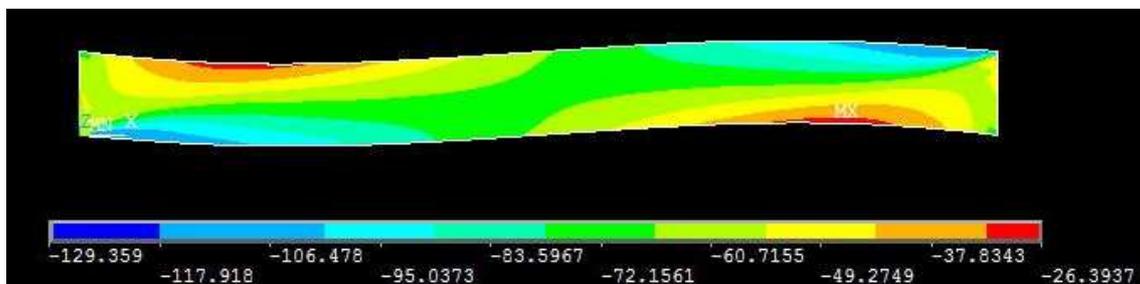
Una vez implementados en el programa, se tienen los siguientes resultados de campos de tensiones. Para tacones rectos, se obtienen las siguientes figuras, donde los valores de las tensiones corresponden al análisis con la carga de fallo media asociada a un fallo central.



**Figura 5. 3: Tensión  $\sigma_{11}$  (MPa) de probeta de ratio 10, tacones rectos y rotura central**



**Figura 5. 4: Tensión  $\sigma_{22}$  (MPa) de probeta de ratio 10, tacones rectos y rotura central**



**Figura 5. 5: Tensión  $\sigma_{12}$  (MPa) de probeta de ratio 10, tacones rectos y rotura central**

Para tacones oblicuos, se obtienen las siguientes figuras, donde los valores de las tensiones corresponden al análisis con la carga de fallo media asociada a un fallo central.

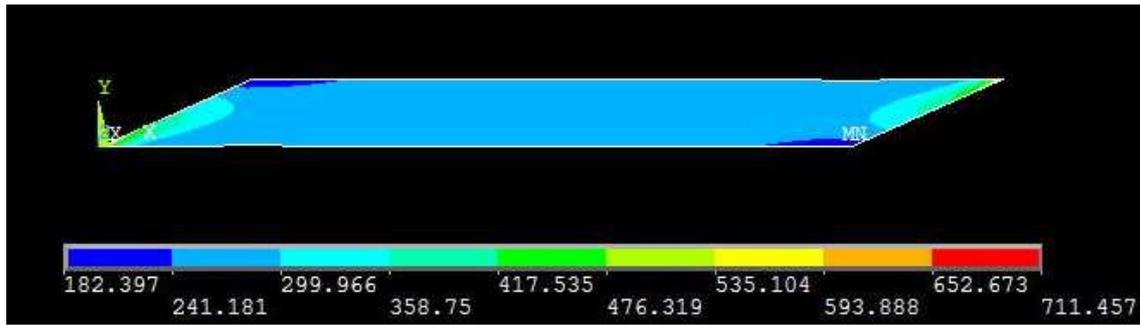


Figura 5. 6: Tensión  $\sigma_{11}$  (MPa) de probeta de ratio 10, tacones oblicuos y rotura central

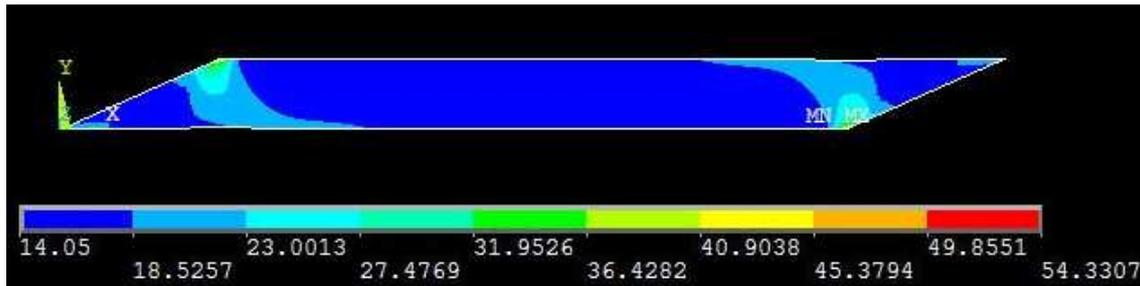


Figura 5. 7: Tensión  $\sigma_{22}$  (MPa) de probeta de ratio 10, tacones oblicuos y rotura central

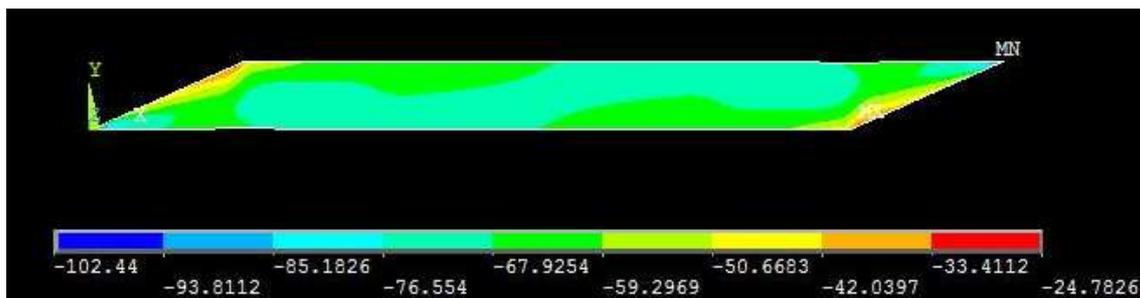


Figura 5. 8: Tensión  $\sigma_{12}$  (MPa) de probeta de ratio 10, tacones oblicuos y rotura central

### 5.3. VALORACIÓN RESULTADOS NUMÉRICOS

Tras representar los estados tensionales de las probetas representativas de tacones rectos y oblicuos, se procede a analizar una por una las tensiones, buscando similitudes y diferencias entre cada tipo de modelo.

Si se comienza el análisis por los especímenes de tacones rectos, se puede observar que solamente la distribución de la tensión en dirección de las fibras  $\sigma_{11}$ , presenta una zona amplia y con cierta uniformidad en el centro de la probeta, como se puede observar en la figura 5.3. Por otro lado, los campos tensionales que representan las tensiones  $\sigma_{22}$  y  $\sigma_{12}$  se muestran muy variables en todos los puntos del espécimen.

Estudiando ahora los especímenes con tacones oblicuos, se observa que en este caso, las tres componentes de tensiones ( $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  y  $\sigma_{12}$ ) presentan una amplia zona central con un cierto grado de uniformidad, consiguiendo de este modo, un campo homogéneo con tensiones similares en todos los puntos.

Gracias a este análisis inicial, se puede obtener como conclusión que en tacones rectos, la zona de rotura es más imprevisible, mientras que en el caso de tacones oblicuos, se consigue una zona de rotura previsible, la central.

Si se analiza ahora los valores cuantitativos obtenidos en los modelos de tacones rectos y oblicuos, sólo es posible realizar una comparativa en el caso de los valores obtenidos en el campo tensional de la  $\sigma_{11}$ , donde se observan valores más elevados para la configuración de tacones rectos. En cuanto a las otras dos componentes de tensión, sólo en la configuración de tacones oblicuos se puede observar cómo domina la  $\sigma_{12}$  sobre la  $\sigma_{22}$ .

Por último, cabe destacar el cambio de los concentradores de tensiones en los especímenes de  $\sigma_{22}$ , donde en ambos casos para tacones rectos se sitúan en las esquinas del cuadrilátero que representa la probeta (que son origen y final de las fibras en ella), mientras que en tacones oblicuos ocurre lo contrario. Por su parte  $\sigma_{12}$ , permanecen en la misma zona, cambiando de posición el mínimo en valor absoluto.

## 5.4. CRITERIOS DE FALLO EMPLEADOS

Dado que el estado tensional en ambas configuraciones estudiadas es un estado de tensiones completo ( $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  y  $\sigma_{12}$ ), para estimar el fallo habría que hacer uso de un criterio de fallo. Por lo tanto, la evaluación de la S a partir de la información resistente del ensayo, tendría que ser de modo indirecto.

En este estudio, se emplearán criterios como el de Hashin-Rotem, el de Tsai-Wu o el de Puck, que se caracterizan por la interacción entre las distintas componentes de tensión en mayor o menor medida según el criterio elegido, o el criterio de Máxima Tensión que no presenta interacción entre las distintas componentes.

### Teoría de la Máxima Tensión

Este criterio es una extensión al criterio de Rankine. Siguiendo este modelo, se tiene que en ejes principales (ortotropía) del material, el fallo no se producirá siempre y cuando se cumplan las desigualdades:

$$\begin{array}{ccccc} \sigma_{11} < X_T & \sigma_{22} < Y_T & |\sigma_{12}| < S & |\sigma_{11}| < X_C & |\sigma_{22}| < Y_C \\ \text{Para } \sigma_{11} \geq 0 & \text{Para } \sigma_{22} \geq 0 & & \text{Para } \sigma_{11} < 0 & \text{Para } \sigma_{22} < 0 \end{array}$$

Como se puede deducir, el material se dice que ha fallado si alguno de las desigualdades no se cumple, y falla debido únicamente a la tensión de esa ecuación, no existiendo ningún tipo de interacción en el criterio.

Como el material no tiene por qué encontrarse en ejes principales del mismo, como es nuestro caso, se pueden representar dichos criterios en función del ángulo de orientación de las fibras respecto de la vertical para un ensayo Off-Axis ideal:

$$\sigma_x < \frac{X_T}{(\cos \theta)^2} \quad \sigma_x < \frac{Y_T}{(\sin \theta)^2} \quad |\sigma_x| < \frac{X_C}{(\cos \theta)^2} \quad |\sigma_x| < \frac{Y_C}{(\sin \theta)^2}$$

$$|\sigma_x| < \frac{S}{(\cos \theta)(\sin \theta)}$$

En la siguiente figura [20] se muestra un gráfico en el que se representan las curvas de cada desigualdad en función del ángulo de orientación de las fibras del laminado. Según la evolución de éste, se ven los distintos modos de fallo. Así, para una orientación de  $0^\circ$ , la responsable de la rotura va a ser la tracción en dirección de la fibra, mientras que para el rango de valores en los que maneja este proyecto  $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ , el responsable del fallo pasa a ser la resistencia a cizalladura. Si se aumenta el ángulo, el fallo tendrá como responsable la resistencia transversal a tracción.

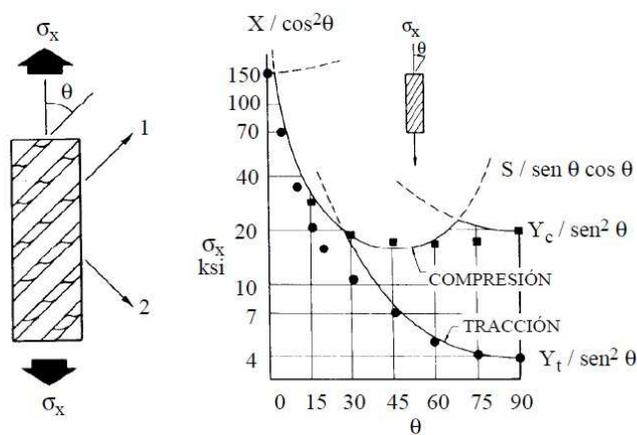


Figura 5. 9: Representación del criterio de Máxima Tensión teórico frente a datos experimentales para un laminado Off-Axis.

### Criterio de Tsai-Wu

El criterio de Tsai-Wu, trata de generalizar el de Tsai-Hill, englobando en una sola expresión los fallos a tracción y compresión. En la figura 5.10 [21] se muestra una comparación de las predicciones del criterio con valores experimentales para ensayos Off-Axis.

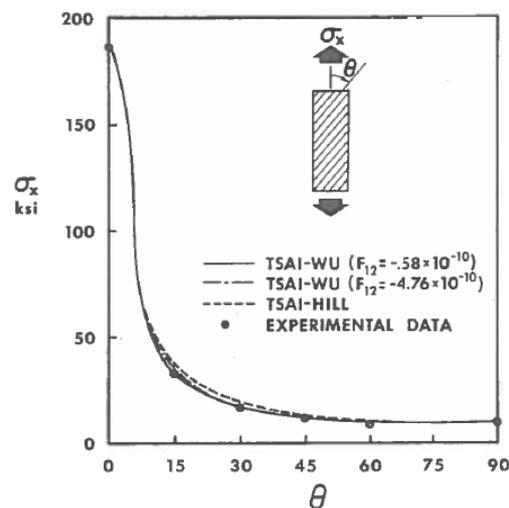


Figura 5. 10: Representación del criterio de Tsai-Wu teórico frente a datos experimentales para un laminado Off-Axis.

La expresión del criterio de Tsai-Wu es la siguiente:

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_6\sigma_{12} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} = 1$$

Despreciando la interacción entre tensiones normales y tangenciales, cada uno de los coeficientes se calcula imponiendo estados simples, de este modo se puede reescribir la ecuación como sigue.

$$\left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 + \frac{\sigma_{11}^2}{X_T X_C} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y_T Y_C} + \sigma_{11} \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}\right) + \sigma_{22} \left(\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}\right) - \sigma_{11}\sigma_{22} \sqrt{\frac{1}{X_T X_C Y_T Y_C}} = 1$$

### Criterio de Hashin-Rotem

Al contrario que ocurría con los criterios precedentes, que constituyen adaptaciones a materiales compuestos de criterios establecidos sobre otro tipo de materiales, este criterio se basa en los mecanismos de fallo específicos de los materiales compuestos.

En él, se hace distinción entre los diferentes mecanismos que producen el fallo, bien sea debido a la fibra o a la matriz, bien por un esfuerzo de tracción o uno de compresión. De este modo, se obtienen las igualdades que deben cumplirse para que el fallo se produzca.

**Tabla 5. 2: Ecuaciones del criterio de Hashin-Rotem en ejes principales y para el estado tensional ideal del ensayo Off-Axis.**

Modo de fallo	Ejes Principales	Estado Tensional Ideal
Fallo de fibra en tracción (FFT)	$\sigma_{11} = X_T$	$\sigma_x = \frac{X_T}{(\cos \theta)^2}$
Fallo de fibra en compresión (FFC)	$ \sigma_{11}  = X_C$	$ \sigma_x  = \frac{X_C}{(\cos \theta)^2}$
Fallo de matriz en tracción (FMT)	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$	$\sigma_x = \frac{1}{\sqrt{\frac{(\sin \theta)^4}{Y_T^2} + \frac{(\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2}{S^2}}}$
Fallo de matriz en compresión (FMC)	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$	$ \sigma_x  = \frac{1}{\sqrt{\frac{(\sin \theta)^4}{Y_C^2} + \frac{(\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2}{S^2}}}$

En la figura 5.11 [2] se representan las predicciones del criterio de Hashin-Rotem frente a datos experimentales para ensayos Off-Axis.

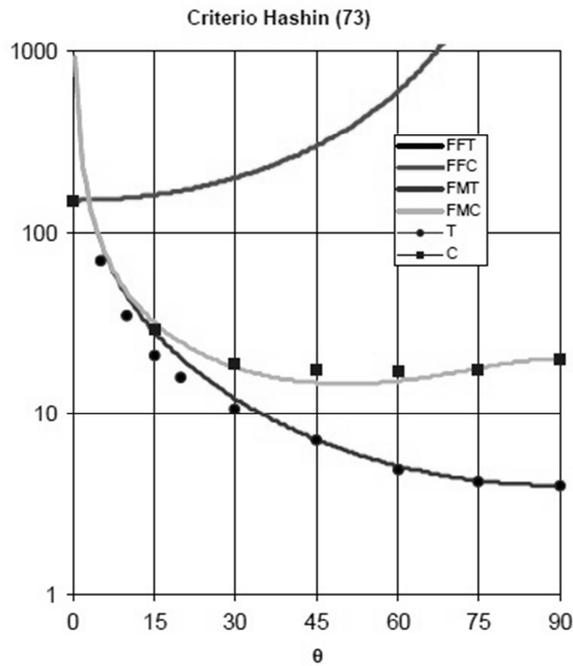


Figura 5. 11: Representación del criterio de Hashin-Rotem teórico frente a datos experimentales para un laminado Off-Axis.

### Criterio de Puck

Siguiendo la línea iniciada por Hashin, el criterio de Puck se basa también en los modos de fallo específicos de los materiales compuestos. De este modo, Puck hace una distinción entre dos modos de fallo, fallo de la fibra (FF) y fallo de la interfibra (IFF), también denominado como fallo de la matriz.

Fallo de la fibra: el fallo en la fibra se producirá cuando se alcance en ellas una tensión normal longitudinal tal que iguale a la que provocaría el fallo en un estado de tensión uniaxial, lo que se puede representar, teniendo en cuenta que todas las componentes hacen referencia a las fibras, como:

$$\sigma_{f1} = X_{fT}$$

$$\sigma_{f1} = -X_{fC}$$

Al tratarse de un comportamiento elástico lineal, las resistencias se evalúan como sigue.

$$X_{fT} = \frac{X_T}{E_1} E_{f1} = \varepsilon_{1T} E_{f1}$$

$$X_{fC} = \frac{X_C}{E_1} E_{f1} = \varepsilon_{1C} E_{f1}$$

Donde se distingue entre módulo elástico del conjunto en dirección de la fibra y módulo elástico de la fibra, y las deformaciones hacen referencia a las deformadas del conjunto en dirección de la fibra a tracción y a compresión.

Si se tiene en cuenta que se está analizando un estado tensional completo, donde existen las tres componentes, la deformación longitudinal de la fibra puede expresarse como:

$$\sigma_{f1} = \varepsilon_1 E_{f1} + \vartheta_{f12} m_{\sigma f} \sigma_2$$

Donde el coeficiente de la tensión en dirección perpendicular a la fibra toma los valores 1.1 para compuestos de grafito y 1.3 para compuestos de vidrio.

Finalmente, descomponiendo los criterios iniciales, resulta:

$$\frac{1}{\varepsilon_{1T}} \left( \varepsilon_1 + \frac{\vartheta_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 \right) = 1 \quad \text{para tracciones}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{1C}} \left| \varepsilon_1 + \frac{\vartheta_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 \right| + (10\gamma_{12})^2 = 1 \quad \text{para compresiones}$$

Fallo de la matriz (fallo de la interfibra): como la matriz presenta una rotura tipo frágil, Puck impone un criterio de rotura en materiales frágiles. Para este proyecto, interesa este tipo de fallo, ya que será el que determine la resistencia a cizalladura debido a planos de fallos en la matriz.

El fallo de la matriz tiene tres modos distintos de fallo, uno de ellos (modo A) asociado a un esfuerzo de tracción en la matriz, es decir, con  $\sigma_2$  mayor que cero. Los otros dos modos (modos B y C) se asocian a un esfuerzo de compresión. En el modo B, la tensión transversal es pequeña relativamente frente a la tensión tangencial, mientras que en el modo C, la tensión transversal es la dominante. Como el ensayo Off-Axis consiste en un ensayo de tracción con fibras orientadas un cierto ángulo respecto de la dirección de carga, sólo será necesario estudiar el modo A.

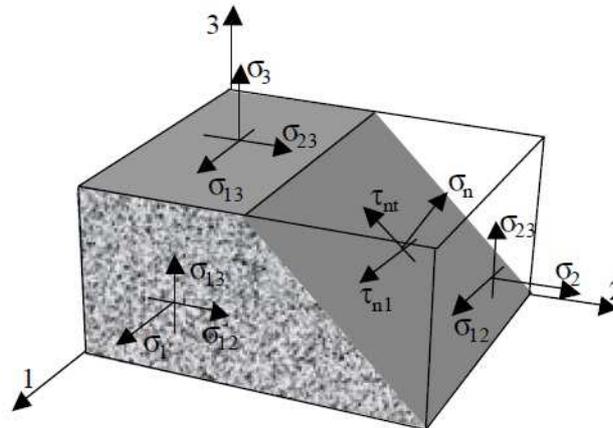


Figura 5. 12: Esquema del estado tensional y componentes de tensión en el plano del fallo

Para un problema típico de tensión plana, la ecuación del criterio según el modo empleado (A), resulta:

$$\left( \frac{\sigma_{12}}{S} \right)^2 + \left( 1 - 0.7 \frac{Y_T}{S} \right) \left( \frac{\sigma_{22}}{Y_T} \right)^2 + 0.7 \frac{\sigma_{22}}{S} + \left[ 2 - 0.7 \frac{\sigma_{22}}{S} - \left( \frac{\sigma_{11}}{1.1X_T} \right)^6 \right] \left( \frac{\sigma_{11}}{1.1X_T} \right)^6 = 1$$

## 5.5. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A CIZALLADURA

Una vez definidos los criterios de fallo, se van a emplear para estudiar la evaluación de la resistencia a cizalladura intralaminar de un compuesto grafito-epoxi mediante los ensayos Off-Axis realizados.

Para ello, se actuará de dos maneras.

Por un lado, con los datos obtenidos experimentalmente mediante los ensayos a los especímenes de tacones rectos y oblicuos y las ecuaciones analíticas de resolución, se calculará el valor que el problema tomaría en cada criterio, si se tratase como un problema ideal, es decir, con las ecuaciones mostradas en el capítulo tercero.

Por otro lado, gracias a los modelos de ANSYS desarrollados en este capítulo, se emplearán las tensiones obtenidas en cada modelo y se sustituirán sobre los criterios explicados, obteniendo unos valores según el tipo de rotura se produzca en una zona central, centro-lateral o lateral.

### 5.5.1. Tratamiento de resultados experimentales

Se comienza analizando los resultados experimentales de carga última obtenidos para cada una de las probetas. Transformando dicha carga a tensión, y calculando sus componentes en ejes principales, suponiendo que se trata de un problema ideal de tracción, se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 5. 3: Descomposición de la tensión longitudinal en tacones rectos y oblicuos en las distintas componentes en direcciones principales del material**

Rectos (MPa)		Oblicuos (MPa)	
$\sigma_x = 298.0795$		$\sigma_x = 272.2255$	
$\sigma_{11}$	278.11	$\sigma_{11}$	253.99
$\sigma_{22}$	19.97	$\sigma_{22}$	18.24
$\sigma_{12}$	-74.52	$\sigma_{12}$	-68.06

Para obtener de cada criterio la resistencia  $S$ , se puede despejar su valor de manera sencilla sin más que igualar el criterio a la unidad. Así pues, para los criterios de Máxima Tensión, Tsai-Wu y Hashin-Rotem, se consigue una relación lineal, mientras que para el criterio de Puck, la relación es cuadrática, conllevando una mayor complejidad.

**Tabla 5. 4: Propiedades finales del material AS4/8552 tras la recertificación de propiedades.**

AS4 / 8552 Recertificado				
Propiedades de rigidez	$E_{11}$ (GPa)		$E_{22}$ (GPa)	
	135		8.75	
Propiedades de resistencia	$\nu_{12}$			
	0.3			
Propiedades de resistencia	$X_T$ (MPa)	$X_C$ (MPa)	$Y_T$ (MPa)	$Y_C$ (MPa)
	1928	1300	50.8	245

Tabla 5. 5: Tabla resumen con los resultados experimentales de la resistencia a cizalladura intralaminar S para cada uno de los tipos de probetas, tacones rectos y tacones oblicuos.

	Máxima Tensión	Tsai-Wu	Hashin-Rotem	Puck
Rectos	74.52	87.42	81.04	86.22
Oblicuos	68.06	78.44	72.92	77.77

### 5.5.2. Tratamiento de resultados numéricos

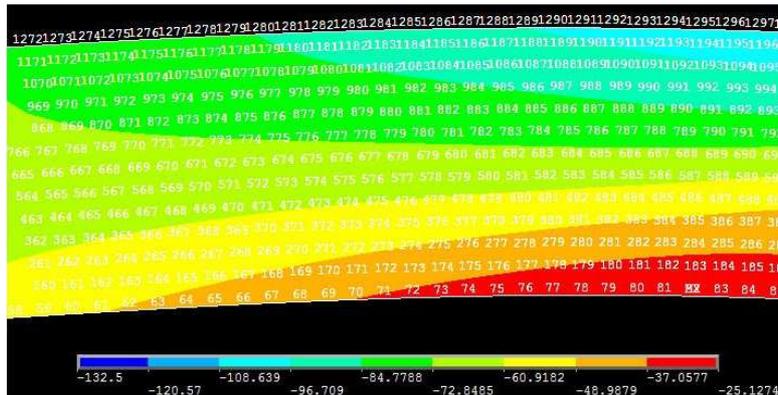
Una vez concluido el análisis analítico-experimental anterior, procedemos a efectuar el análisis numérico mediante el programa ANSYS. Se han definido tres grupos distintos para cada tipo de tacón. De cada modelo distinto, se procede a evaluar la zona donde se producirá el fallo según el tipo de éste (central, centro-lateral o lateral).

En el caso de tacones rectos, se detalla en las siguientes imágenes las zonas de fallo representativas en torno a la tipología de fallo, bien sea central, centro-lateral o lateral.



Se obtienen los puntos de corte:  
- 34  
- 1279

Figura 5. 13: Detalle del campo de tensiones de  $\sigma_{12}$  para el fallo central en probetas de tacones rectos



Se obtienen los puntos de corte:  
- 56  
- 1302

Figura 5. 14: Detalle del campo de tensiones de  $\sigma_{12}$  para el fallo centro-lateral en probeta de tacones rectos

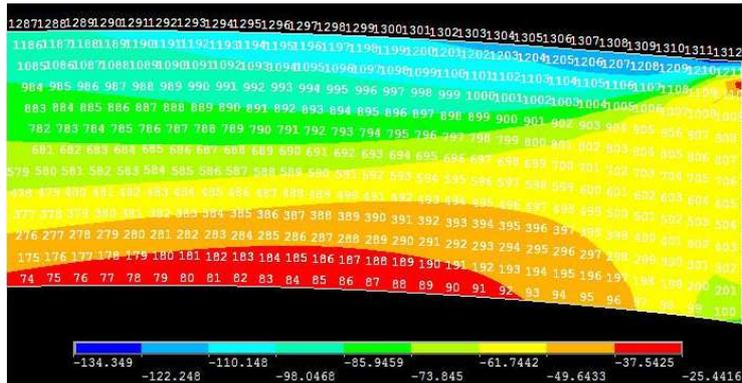


Figura 5. 15: Detalle del campo de tensiones de  $\sigma_{12}$  para el fallo lateral en probeta de tacones rectos

Se obtienen los puntos de corte:  
- 63  
- 1310

Para el caso de tacones oblicuos, se detalla en las siguientes imágenes las zonas de fallo representativas en torno a la tipología de fallo, bien sea central, centro-lateral o lateral.

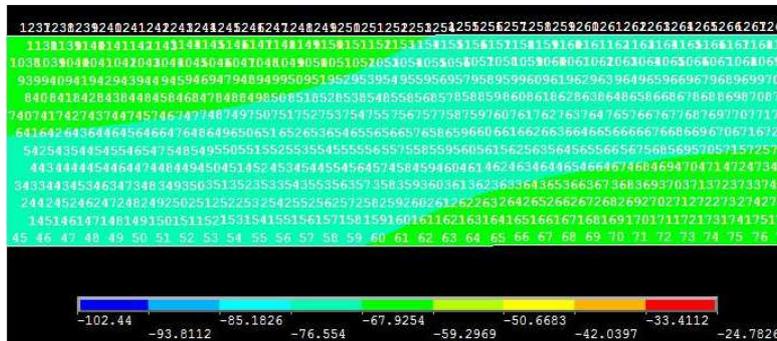


Figura 5. 16: Detalle del campo de tensiones de  $\sigma_{12}$  para el fallo central en probeta de tacones oblicuos

Se obtienen los puntos de corte:  
- 44  
- 1269



Figura 5. 17: Detalle del campo de tensiones de  $\sigma_{12}$  para el fallo centro-lateral en probeta de tacones oblicuos

Se obtienen los puntos de corte:  
- 57  
- 1282



Figura 5. 18: Detalle del campo de tensiones de  $\sigma_{12}$  para el fallo lateral en probeta de tacones oblicuos

Se obtienen los puntos de corte:  
- 72  
- 1297

En la zona cercana al punto de corte aparecen los máximos del estado tensional en el plano de fallo, por lo que es de gran interés analizar los puntos que rodean a los puntos de corte. Según cada tipo de probeta, se puede observar según las figuras anteriores que los modelos de tacones rectos presentan más dispersión en la zona cercana al punto considerado de rotura, mientras que en tacones oblicuos existe mayor uniformidad de valores. La siguiente tabla representa las tensiones tomadas en los puntos de fallo.

**Tabla 5. 6: Valores de las tensiones obtenidas según el tipo de fallo y de tacones para los puntos definidos en las tablas 5.7 y 5.8.**

		Fallo central		Fallo centro-lateral		Fallo lateral	
Rectos	Puntos	34	1279	56	1302	63	1310
	$\sigma_{11}$	320.63	315.97	216.33	412.46	184.84	544.16
	$\sigma_{22}$	22.00	21.67	14.44	28.84	12.13	30.47
	$\sigma_{12}$	-84.01	-82.76	-55.92	-108.97	-47.41	-117.17
Oblicuos	Puntos	44	1269	57	1282	72	1297
	$\sigma_{11}$	257.80	257.50	249.00	258.22	254.53	247.60
	$\sigma_{22}$	18.45	18.43	17.80	18.42	18.24	17.69
	$\sigma_{12}$	-68.96	-68.88	-66.62	-68.97	-68.14	-65.70

Una vez se tienen los valores de las tensiones en cada par de puntos según el tipo de rotura y los tacones, se procede a calcular los valores de la resistencia como se hizo con los valores experimentales.

**Tabla 5. 7: Valores de la resistencia a cizalladura intralaminar calculados para cada punto y según los cuatro criterios de fallo definidos en el punto 5.4.**

		Fallo central		Fallo centro-lateral		Fallo lateral	
Rectos	Puntos	34	1279	56	1302	63	1310
	Máxima Tensión	84.01	82.76	55.92	108.97	47.41	117.17
	Tsai-Wu	100.62	98.75	62.09	142.35	51.59	156.28
	Hashin-Rotem	93.20	91.50	58.33	132.37	48.82	146.43
	Puck	98.73	96.97	62.40	138.97	52.37	153.31
Oblicuos	Puntos	44	1269	57	1282	72	1297
	Máxima Tensión	68.96	68.88	66.62	68.97	68.14	65.70
	Tsai-Wu	79.64	79.54	76.44	79.62	78.53	75.30
	Hashin-Rotem	74.01	73.92	71.13	74.01	73.01	70.09
	Puck	78.90	78.80	75.89	78.89	77.86	74.83

Analizando estos resultados, se observa que tanto en tacones rectos como oblicuos, los puntos de fallo de la línea central de fallo presentan valores prácticamente iguales en cada uno de los extremos de la línea de rotura, debido a la antisimetría que presenta la probeta. Sin embargo, conforme se avanza hacia fallos centro-lateral y lateral, en tacones rectos las diferencias entre los valores en cada punto se vuelven muy grandes, mientras que en tacones oblicuos esa diferencia, aún existiendo, sigue siendo pequeña y muy próxima, por lo que se consigue una estabilidad en cuanto a la resistencia a cizalladura en toda la línea de fallo.

Así mismo, como se ha podido observar con los resultados experimentales, el criterio de máxima tensión proporciona el resultado de menor valor debido a que únicamente tiene en cuenta la tensión tangencial. Los criterios en los que existe interacción entre tensiones, proporcionan mayores valores. De este modo, Tsai-Wu devuelve el valor más elevado en cuanto a resistencia a cizalladura se refiere, seguido de Puck, ya que sus ecuaciones presentan mayor interacción entre las distintas componentes. Por último, el criterio de Hashin-Rotem presenta un valor intermedio entre los más altos antes mencionados y el criterio de la máxima tensión, el más bajo.

Con los valores de la resistencia calculada, se procede a elegir entre los dos puntos posibles para cada tipo de fallo, el que presente un valor mayor de resistencia, obteniendo de este modo que para el tipo de fallo central y tacones rectos, es necesario emplear el punto 34, para el fallo centro-lateral, el 1302, y para el lateral, se escoge el punto 1310. Si ahora se procede del mismo modo con tacones oblicuos, se escoge el punto 44 para el tipo de fallo central, para el centro-lateral, el punto 1282, y para el lateral, se usa el punto 72.

Si se agrupan todos estos valores obtenidos en una tabla comparativa entre los resultados experimentales (suponiendo un comportamiento ideal), y numéricos para cada tipo de fallo, se obtiene:

**Tabla 5. 8: Valores de la resistencia a cizalladura de cada criterio entre los especímenes numéricos y analíticos.**

	Máxima Tensión	Tsai-Wu	Hashin-Rotem	Puck
<b>Comparativa tacones rectos</b>				
Analítico	74.52	87.42	81.04	86.22
Numérico central	84.01	100.62	93.20	98.73
Numérico centro-lateral	108.97	142.35	132.37	138.97
Numérico lateral	117.17	156.28	146.43	153.31
<b>Comparativa tacones oblicuos</b>				
Analítico	68.06	78.44	72.92	77.77
Numérico central	68.96	79.64	74.01	78.90
Numérico centro-lateral	68.97	79.62	74.01	78.89
Numérico lateral	68.14	78.53	73.01	77.86

Primero se evalúan los resultados de la comparativa de tacones rectos. Se observa como los valores obtenidos analíticamente presentan el valor más pequeño, mientras que los valores numéricos alcanzan valores muy superiores, no existiendo proximidad entre ellos salvo para el caso central, donde la diferencia existente ronda el 15%.

Por el contrario, los resultados obtenidos en la comparativa de tacones oblicuos son más homogéneos. No hay apenas diferencia entre los resultados analíticos y los numéricos, existiendo como máximo una diferencia del 1.5% respecto al valor de referencia analítico, por lo que se puede garantizar que los valores de resistencia a cizalladura obtenidos presentan uniformidad de resultados, y su media puede considerarse un valor fiable, sin embargo esto no se constata de igual manera en el caso de tacones rectos.

Al evaluar qué criterio resulta más fiable o genera un valor de  $S$  aproximado al real, se debe observar si existe alguna similitud entre los valores obtenidos para un mismo criterio y cada uno de los especímenes a estudio (tacones rectos y tacones oblicuos).

Se observa que los resultados analíticos difieren entre los tacones oblicuos y tacones rectos en 9MPa, mientras que si se analizan los resultados numéricos en rotura tipo central en ambos casos, la diferencia asciende a 19MPa, lo que supone en torno al 20% de diferencia en todos los criterios, tanto si existe interacción entre las tensiones como si no. Debido a esto, no se puede garantizar ninguno de los valores obtenidos para  $S$  como aproximación del valor real. Sin embargo, es fácilmente destacable que gracias a los tacones oblicuos se consigue una uniformidad de valores, existiendo una diferencia máxima entre el mayor valor obtenido por un criterio (Tsai-Wu) y el menor (Máxima Tensión) del 15%.

Cabe destacar en tacones oblicuos, que la rotura lateral produce el valor más bajo de los otros tres tipos de rotura, hecho que se debe al cambio de ubicación del concentrador de tensiones. Mientras que en tacones rectos se encontraban en las esquinas de comienzo o final de fibra, en oblicuos se encuentra en la esquina opuesta, por lo se consigue un campo más homogéneo para inducir que la rotura se produzca en el centro de la probeta.

