

3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES PRELIMINARES

3.1. INTRODUCCIÓN

La configuración habitual del ensayo Off-Axis, como se ha descrito en el capítulo dos, consiste en una probeta rectangular con unos refuerzos laterales rectos, usándose mayoritariamente un ángulo de orientación de las fibras de 10° y ratios (relación entre la longitud libre de mordaza y el ancho de la probeta) máximos de 10.

Bajo esa configuración es conocido que los valores de G_{12} que se obtienen necesitan una corrección, ya que el estado tensional que aparece no se ajusta al estado uniforme correspondiente de la configuración ideal.

Con objeto de estudiar la posibilidad de emplear esta configuración para determinar la resistencia a cizalladura intralaminar S , se va a llevar a cabo una campaña de ensayos para diferentes ratios (3, 5, 6 y 8) y orientaciones (10° y 30°). Este estudio experimental servirá como un primer paso de aproximación al problema de la determinación de la resistencia a cizalladura.

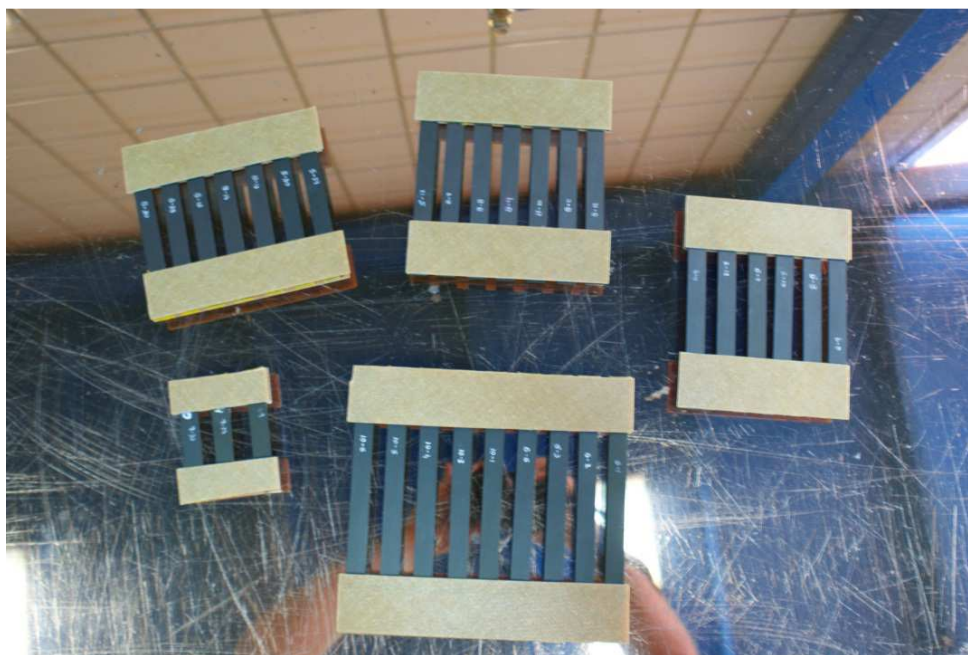


Figura 3. 1: Conjunto de probetas para el estudio previo

3.2. ENSAYOS CON ORIENTACIÓN 10°

Para realizar el estudio de laminados con orientación 10° , se emplearán laminados con ratio 5, 6 y 8 que se deberán caracterizar con los parámetros necesarios para el posterior análisis analítico. De este modo, la clasificación con la identificación de las mismas se muestra de la siguiente manera:

Tabla 3. 1: Caracterización dimensional de los especímenes con laminado de orientación de fibra 10°

Número identificativo	Longitud de probeta (mm)	Ancho medio (mm)	Espesor medio (mm)	Ratio (L/2h)	Longitud libre (mm)
6-1	174.00	12.61	2.05	8	100.88
6-2	174.00	12.57	2.05	8	100.56
6-3	174.00	12.58	2.05	8	100.64
6-6	173.50	12.59	2.07	8	100.72
10-1	173.50	12.64	2.01	8	101.12
10-2	173.00	12.64	2.01	8	101.12
10-4	173.00	12.60	2.04	8	100.80
10-5	173.00	12.62	2.05	8	100.96
10-6	173.50	12.62	2.05	8	100.96
6-7	149.90	12.61	2.05	6	75.66
6-8	150.09	12.60	2.05	6	75.60
6-9	150.14	12.60	2.05	6	75.60
6-10	149.86	12.59	2.07	6	75.54
6-11	149.74	12.61	2.06	6	75.66
6-12	149.72	12.61	2.04	6	75.66
5-12	151.23	12.60	1.08	6	75.60
8-7	151.24	12.61	1.06	6	75.66
8-8	151.23	12.62	1.07	6	75.72
8-9	151.22	12.61	1.06	6	75.66
8-10	151.24	12.62	1.07	6	75.72
8-11	151.24	12.61	1.07	6	75.66
8-12	151.25	12.61	1.07	6	75.66
5-29	126.31	12.65	1.04	5	63.25
5-30	126.29	12.61	1.05	5	63.05
8-13	126.22	12.62	1.06	5	63.10
8-14	126.33	12.62	1.07	5	63.10
8-15	126.33	12.60	1.06	5	63.00
8-28	126.29	12.64	1.07	5	63.20
8-30	126.27	12.62	1.08	5	63.10

Las medidas de ancho y espesor de la probeta, son la media determinada por tres puntos diferentes a modo estadístico, tomadas con un calibre y un micrómetro de caras planas respectivamente. La longitud libre de mordaza es aquella longitud que queda entre tacones, por donde la grieta se puede propagar. Por último, el ratio se calcula como la longitud libre que presenta el espécimen frente a dos veces la mitad del ancho ($L/2h$). De este modo, imponiendo a cada tipo de probeta, según su longitud, un ratio determinado, se pueden definir el tamaño de los tacones y la longitud libre necesaria para la realización del ensayo.

Se pueden observar claramente cuatro grupos distintos de especímenes. En primer lugar se destaca el grupo de probetas con ratio 8 con un espesor de 2mm. Luego, se pueden observar dos grupos de ratio 6, divididos entre sí debido al espesor de cada uno, que se denominaran a partir de ahora ratio 6 espesor 2mm y ratio 6 espesor 1mm respectivamente. Por último nos encontramos con especímenes de ratio 5 y espesor 1mm.



Figura 3. 2: Probetas de ratio 8 con designación 6-1, 6-2, 6-3 y 6-6



Figura 3. 3: Probetas de ratio 8 con designación 10-1, 10-2, 10-4, 10-5 y 10-6



Figura 3. 4: Probetas de ratio 6 y espesor 2mm, con designación 6-7, 6-8, 6-9, 6-10, 6-11 y 6-12



Figura 3. 5: Probeta de ratio 6 y espesor 1mm, con designación 5-12



Figura 3. 6: Probetas de ratio 6 y espesor 1mm, con designación 8-7, 8-8, 8-9, 8-10, 8-11 y 8-12



Figura 3. 7: Probetas de ratio 5 con designación 5-29 y 5-30



Figura 3. 8: Probetas de ratio 5 con designación 8-13, 8-14, 8-15, 8-28 y 8-30

Es imprescindible conocer la dimensión necesaria para que la rotura se produzca entre dos fibras y que ninguna de ellas se encuentre dentro de las mordazas, de aquí la importancia del uso de los ratios altos para minimizar errores de cálculo, para que el esfuerzo se produzca homogéneamente en todo el ancho de la probeta y no por concentrador de tensiones debido a una fibra en el borde del tacón.

Por geometría se define que es necesaria una longitud libre mínima de 71.46mm para que la rotura tenga probabilidad de romper fuera de mordazas.

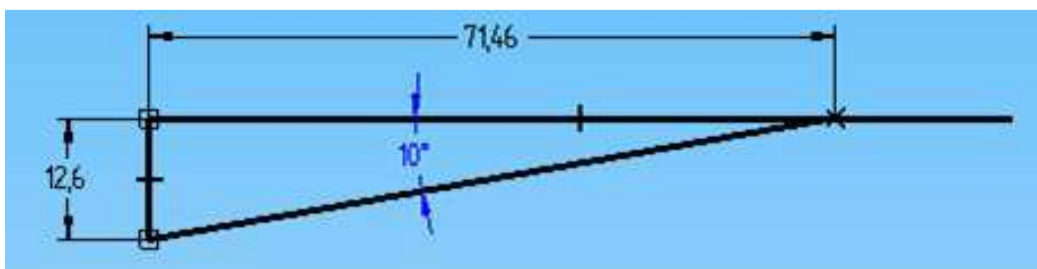


Figura 3. 9: Esquema para obtener la longitud libre mínima necesaria con fibras a 10° para que el fallo se produzca fuera de mordazas

Se comprueba que salvo en las probetas de ratio 5, el resto de especímenes presentan una longitud libre suficiente para que las posibilidades de que la rotura se produzca fuera de mordazas sean altas.

Tras pegar los tacones a las probetas por separado, se llevarán a cabo los ensayos estáticos regidos bajo la norma ASTM-D 3039.

Se realizan dichos ensayos en una máquina de tracción modelo INSTRON 4483, con desplazamiento vertical de la mordaza superior, denominada cruceta, seleccionando el módulo de "Tracción en sección rectangular con cruceta (Resistencia)" implementado en el programa LabVIEW. Las condiciones ambientales del ensayo son 23°C y una humedad del 46%.

En estos ensayos no se empleará extensómetro ni galgas extensométricas, pues se busca estudiar el comportamiento y no los valores exactos en los mismos, ya que se busca conocer grosso modo la deformación máxima de la probeta, la carga máxima que aguanta el espécimen antes de la rotura y fundamentalmente por dónde se propaga el fallo, es decir estudiar la zona de rotura. La deformación medida va a ser el desplazamiento de la cruceta, que será la suma infinitesimal de todos los desplazamientos individuales y no en una zona localizada.

Con todo ello, se llega a la siguiente tabla de resultados:

Tabla 3. 2: Tabla de los resultados del ensayo de las probetas con fibras orientadas 10º

Número identificativo	Ratio	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Zona de fallo
6-1	8	13194.45	2.70	Dentro de la zona libre
6-2	8	10997.01	2.24	Dentro de la zona libre
6-3	8	9137.03	1.76	Dentro de la zona libre
6-6	8	9390.13	2.13	En el borde de la mordaza
10-1	8	12458.70	2.84	En el borde de la mordaza
10-2	8	12831.48	2.91	Dentro de la zona libre
10-4	8	12301.74	2.98	Dentro de la zona libre
10-5	8	12321.36	2.83	Dentro de la zona libre
10-6	8	12193.83	2.81	Dentro de mordaza
6-7	6	11575.80	2.42	Dentro de mordaza
6-8	6	10496.70	1.86	En el borde de la mordaza
6-9	6	11693.52	1.98	Dentro de mordaza
6-10	6	9089.95	1.89	Dentro de mordaza
6-11	6	12056.49	2.75	En el borde de la mordaza
6-12	6	10261.26	1.91	Dentro de mordaza
5-12	6	5143.38	1.42	Dentro de mordaza
8-7	6	6371.60	1.69	Dentro de mordaza
8-8	6	5960.56	1.92	En el borde de la mordaza
8-9	6	5850.68	1.79	En el borde de la mordaza
8-10	6	5802.62	1.54	En el borde de la mordaza
8-11	6	5794.77	1.66	En el borde de la mordaza
8-12	6	6537.38	1.86	En el borde de la mordaza
5-29	5	5996.85	2.11	Dentro de mordaza
5-30	5	6585.45	1.63	Dentro de mordaza
8-13	5	6351.98	1.34	Dentro de mordaza
8-14	5	6435.36	1.38	Dentro de mordaza
8-15	5	6585.45	1.57	Dentro de mordaza
8-28	5	6873.87	1.57	Dentro de mordaza
8-30	5	5506.35	1.20	Dentro de mordaza

Se puede observar según los resultados y las fotografías que se presentan a continuación tres tipos diferentes de zonas de fallo.

La primera de ellas es la rotura válida dentro de la zona libre. Como se ha comentado anteriormente, la longitud mínima para que el fallo se produjera en esta zona, es decir, la zona de interés para el experimento, es de aproximadamente 72mm de largo, por lo que, los

especímenes de ratio 8 son los únicos que presentan alta probabilidad de que el fallo ocurra en esta zona. La segunda zona de fallo es en el borde de la mordaza, y se debe fundamentalmente a un posible concentrador de tensiones en la esquina del tacón con la probeta. La última zona es el fallo no válido que ocurre dentro de la mordaza. Presumiblemente, los especímenes de ratio 5 presentan una longitud inferior a la necesaria para que la rotura se produzca fuera de mordaza, como se ha comprobado.

Resultados de las probetas de ratio 8.



Figura 3. 10: Sistema de cogida mediante mordazas tipo cuña

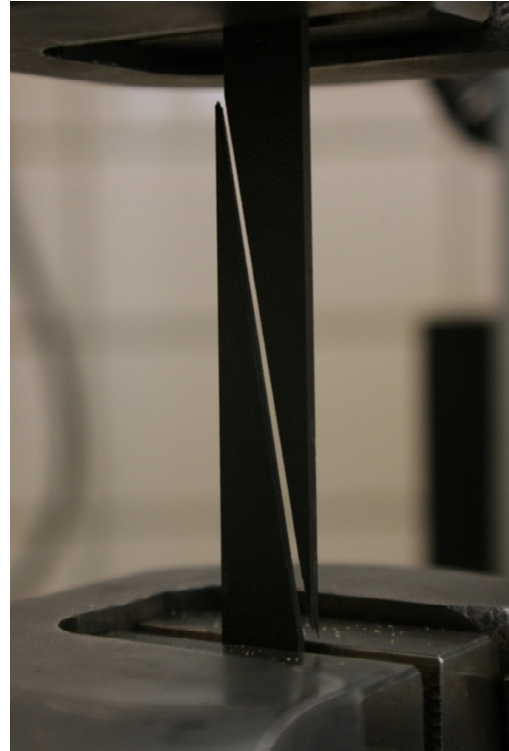


Figura 3. 11: Rotura de probeta de ratio 8



Figura 3. 12: Probetas 6-1, 6-2, 6-3 y 6-6 de ratio 8 ensayadas



Figura 3. 13: Probetas 10-1, 10-2, 10-4, 10-5 y 10-6 de ratio 8 ensayadas

Resultados de las probetas de ratio 6 y espesor 2mm.

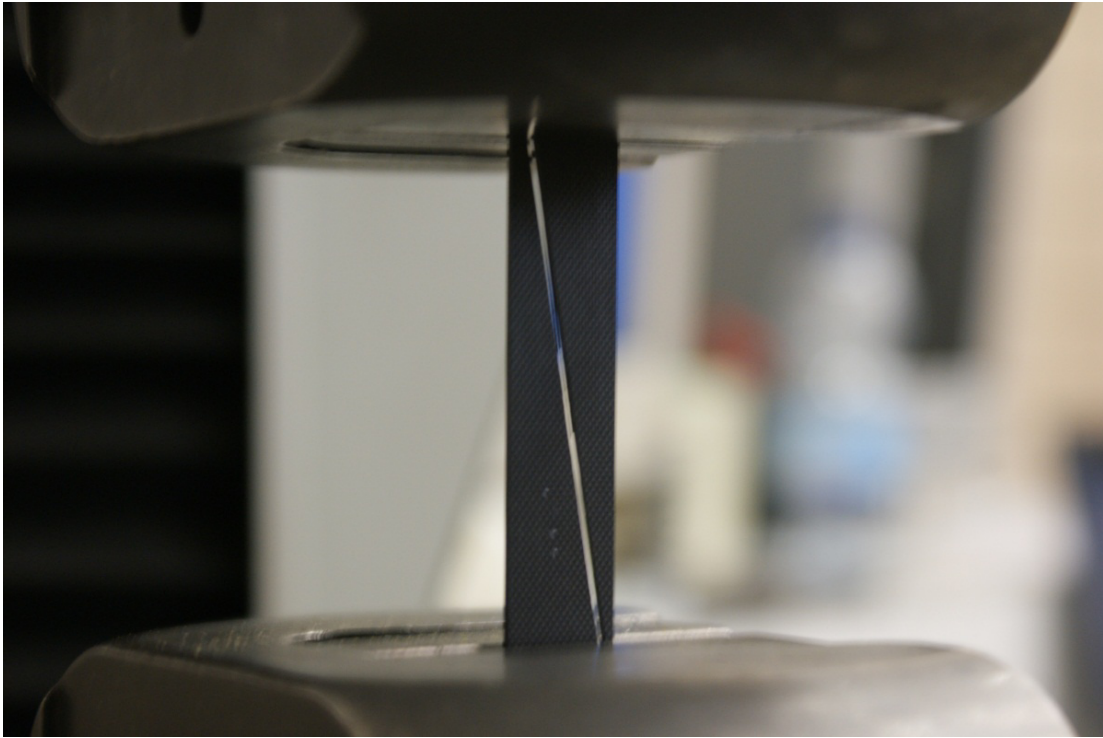


Figura 3. 14: Rotura de probeta de ratio 6



Figura 3. 15: Probetas 6-7, 6-8, 6-9, 6-10, 6-11 y 6-12 de ratio 6 y espesor 2 mm ensayadas

Resultados de las probetas de ratio 6 y espesor 1mm.



Figura 3. 16: Probeta 5-12 de ratio 6 y espesor 1mm ensayada



Figura 3. 17: Probetas 8-7, 8-8, 8-9, 8-10, 8-11 y 8-12 de ratio 6 y espesor 1mm ensayadas

Resultados de las probetas de ratio 5.

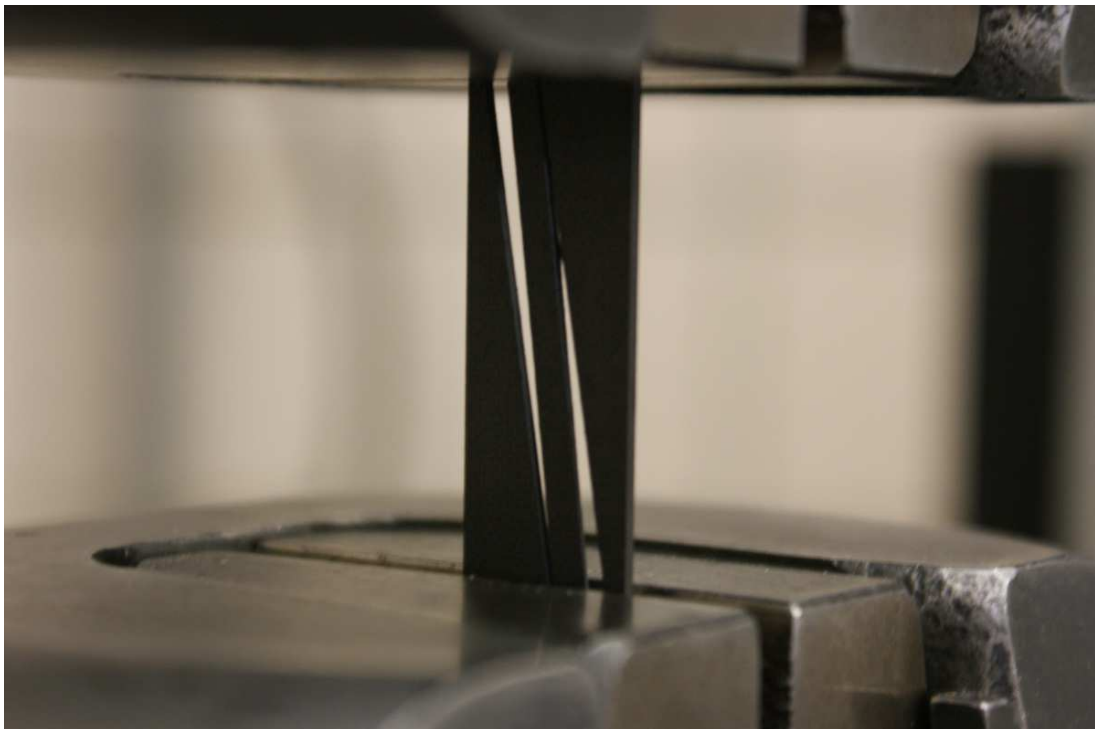


Figura 3. 18: Rotura de probeta de ratio 5



Figura 3. 19: Probetas 5-29 y 5-30 de ratio 5 ensayadas

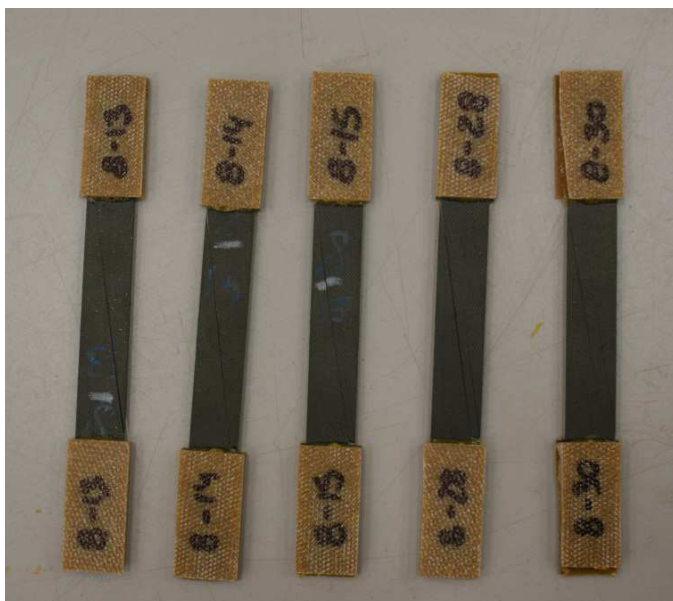


Figura 3. 20: Probetas 8-13, 8-14, 8-15, 8-28 y 8-30 de ratio 5 ensayadas

Para poder trabajar los datos obtenidos, es necesario calcular la tensión de los especímenes. Para ello, se divide la carga máxima entre el área de la probeta, obteniendo así la solución analítica en tensiones del problema:

$$\sigma_x = \frac{F}{2ht} \quad \sigma_y = 0 \quad \sigma_{xy} = 0$$

La anterior solución está expresada en ejes del laminado, sin embargo, es necesario conocer dichas tensiones en ejes de ortotropía del material, es decir, en los ejes de la orientación de las fibras, resultando, en un estado ideal de tensiones, las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{11} = \sigma_x \cos^2 \theta \quad \sigma_{22} = \sigma_x \sin^2 \theta \quad \sigma_{12} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta$$

Cabe destacar que estas relaciones se corresponden al problema ideal, donde el estado tensional en el laminado completo es homogéneo, y no existen variaciones entre los distintos puntos del espécimen.

Con todo esto, se calculan los resultados de los valores medios para cada uno de los grupos establecidos.

Tabla 3. 3: Tabla resumen de resultados de especímenes con fibras orientadas 10°

	Ratio 8	Ratio 6 espesor 2mm	Ratio 6 espesor 1mm	Ratio 5
Media Carga máxima (N)	11647.30	10862.29	5923.00	6333.62
Ancho medio (mm)	12.60	12.60	12.61	12.62
Espesor medio (mm)	2.04	2.05	1.07	1.06
Longitud libre media (mm)	100.86	75.62	75.67	63.11
Media deformación máxima (mm)	2.58	2.14	1.70	1.54
Media tensión máxima (MPa)	452.60	419.78	439.64	472.85
Desviación estándar de tensiones	59.11	43.57	35.11	34.91
Tensión en la dirección longitudinal de fibras σ_{11} (MPa)	438.95	407.13	426.38	458.59
Tensión en la dirección transversal a fibras σ_{22} (MPa)	13.65	12.66	13.26	14.26
Tensión tangencial de fibras σ_{12} (MPa)	-77.40	-71.79	-75.18	-80.86

3.3. ENSAYOS CON ORIENTACIÓN 30°

A continuación, se procede a estudiar las probetas con fibras orientadas a 30°. En este caso sólo se dispone de tres probetas para clasificar todas de ratio 3.

Tabla 3. 4: Caracterización dimensional de los especímenes con laminado de orientación de fibra 30°

Número identificativo	Longitud de probeta (mm)	Ancho medio (mm)	Espesor medio (mm)	Ratio (L/2h)	Longitud libre (mm)
7-9	76.52	12.67	1.07	3	38.01
7-24	76.71	12.65	1.04	3	37.95
7-30	76.28	12.57	1.02	3	37.71



Figura 3. 21: Probetas de ratio 3 con designación 7-7, 7-24 y 7-30

Las tres probetas presentan una geometría muy similar entre ellas. A tal efecto sólo falta calcular la longitud libre necesaria mínima que deben tener para que la fractura se produzca dentro de la zona libre y no en el borde la mordaza o dentro de ella.

Para ello, se realiza un cálculo geométrico similar, resultando que para un ancho de 12.6mm de la probeta, se necesite una longitud libre mínima de 21.82mm. Por ello, se establece como ratio para las probetas, una relación longitud libre frente al ancho del espécimen de 3.

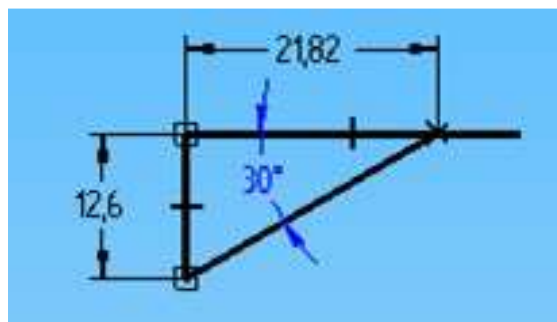


Figura 3. 22: Esquema para obtener la longitud libre mínima necesaria con fibras orientadas 30° para que el fallo se produzca fuera de mordazas

En este caso, como se puede apreciar, la longitud libre es superior a la mínima necesaria para que rompa por el centro, por lo tanto se espera que la zona de rotura esté siempre dentro de la zona libre, y que no se vea muy afectada por el concentrador de tensiones en la borde del tacón.

Tras el pegado de tacones a las probetas con fibras orientadas a 30°, se ejecuta el mismo tipo de ensayo que para las probetas orientadas a 10°, con las mismas condiciones ambientales y en la misma máquina, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. 5: Tabla de los resultados del ensayo de las probetas con fibras orientadas 10°

Número identificativo	Ratio	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Zona de fallo
7-9	3	2149.37	0.70	Dentro de la zona libre (centro)
7-24	3	1686.34	0.42	En el borde de la mordaza
7-30	3	1808.96	0.57	Dentro de la zona libre

En este caso, se puede observar tanto en la tabla como en las fotografías, que la rotura se produce siempre en zona apta para el estudio. Sólo una de las probetas rompe debido al concentrador de tensiones en una esquina del laminado, las otras dos rompen en la zona libre. Aún más interesante es, que una de ellas rompe justo en el centro de la zona libre, donde se supone que el campo de tensiones será uniforme.

Resultados de las probetas de ratio 3.



Figura 3. 23: Sistema de cogida mediante mordazas tipo cuña en espécimen de ratio 3



Figura 3. 24: Rotura de probeta de ratio 3

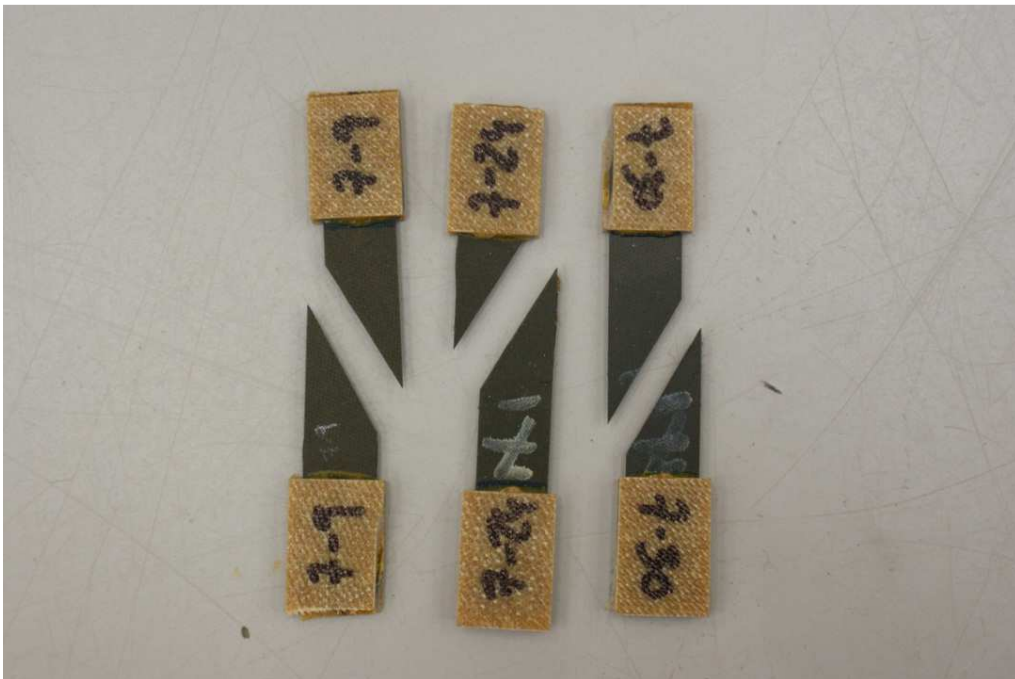


Figura 3. 25: Probetas 7-7, 7-24 y 7-30 de ratio 3 ensayadas

A continuación, se definen los valores medios, sobre los que se trabajarán en el próximo punto.

Tabla 3. 6: Tabla resumen de resultados de especímenes con fibras orientadas 30°

	Ratio 3
Media Carga máxima (N)	1881.56
Ancho medio (mm)	12.63
Espesor medio (mm)	1.04
Longitud libre media (mm)	37.89
Media deformación máxima (mm)	0.56
Media tensión máxima (MPa)	142.61
Desviación estándar de tensiones	15.24
Tensión en la dirección longitudinal de fibras σ_{11} (MPa)	106.95
Tensión en la dirección transversal a fibras σ_{22} (MPa)	35.65
Tensión tangencial de fibras σ_{12} (MPa)	-61.75

3.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado, se van a analizar todos los resultados obtenidos en los ensayos realizados en especímenes de orientaciones 10° y 30°. Dichos resultados servirán de guía para futuros estudios.

En primer lugar, se procede a comparar los resultados medios obtenidos, representados en la siguiente tabla.

Tabla 3. 7: Tabla comparativa de los resultados obtenidos tanto en fibras orientadas a 10° como a 30°

	Ratio 8	Ratio 6 e= 2mm	Ratio 6 e= 1mm	Ratio 5	Ratio 3
Media Carga máxima (N)	11647.30	10862.29	5923.00	6333.62	1881.56
Ancho medio (mm)	12.60	12.60	12.61	12.62	12.63
Espesor medio (mm)	2.04	2.05	1.07	1.06	1.04
Longitud libre media (mm)	100.86	75.62	75.67	63.11	37.89
Media deformación máxima (mm)	2.58	2.14	1.70	1.54	0.56
Media tensión máxima (MPa)	452.60	419.78	439.64	472.85	142.61
Desviación estándar de tensiones	59.11	43.57	35.11	34.91	15.24
Tensión en la dirección longitudinal de fibras σ_{11} (MPa)	438.95	407.13	426.38	458.59	106.95
Tensión en la dirección transversal a fibras σ_{22} (MPa)	13.65	12.66	13.26	14.26	35.65
Tensión tangencial de fibras σ_{12} (MPa)	-77.40	-71.79	-75.18	-80.86	-61.75

Se observa que las tensiones dependen en gran medida del espesor de los especímenes, en este caso, las probetas de ratio 8 y las de ratio 6 con espesor 2mm presentan valores de carga máxima del orden del doble de las probetas de espesor la unidad. Por otro lado, puede destacarse que las diferencias de cargas varíen con el ángulo de orientación, permaneciendo prácticamente inalterables, si las probetas presentan el mismo espesor, y decreciendo, conforme el ángulo de inclinación de las fibras respecto a la vertical o dirección de carga aumenta. En este caso, la orientación de 30° presenta un valor mucho más bajo que el que presentaría la misma probeta de ratio 3 pero con orientación de fibras de 10°, debido a que la matriz debe soportar un mayor esfuerzo. Además, como el módulo elástico del material en esta dirección E_{22} es muy bajo en comparación con el del material en la dirección de la fibra E_{11} , soporta menos carga y el fallo se produce antes.

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_{11}} \cos^4 \theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{E_{22}} \sin^4 \theta$$

Como se puede examinar en la ecuación, conforme crece el ángulo de orientación de la fibra respecto a la dirección de carga, el valor E_{22} se va imponiendo frente a E_{11} , lo que significa que el valor elástico del material en la dirección de carga se reduce, y por lo tanto, el fallo se origina antes.

Otra cuestión interesante a considerar con respecto a los resultados es el del valor de la tensión media máxima.

En relación a este punto, se plantea la hipótesis de que las tensiones medias deberían decrecer conforme el ratio disminuye, ya que las fibras en ratios grandes serán las encargadas de soportar la carga y romperá el espécimen por fallo entre fibras, mientras que en ratios pequeños, la presencia de concentradores de tensión cercanos a la zona de rotura, puede provocar el fallo prematuro y por lo tanto, un resultado de resistencia no válido.

Se advierte la existencia de una gran dispersión de resultados, donde se observa que los valores mayores corresponden a la probeta de ratio 5, quedando patente que el concentrador de tensiones y la posibilidad de romper dentro de las mordazas falsee los resultados, proporcionando una mayor resistencia de la que realmente posee la probeta.

Las probetas que tienen suficiente longitud libre para que la rotura se produzca en esta zona y no dentro de mordazas, son las de ratio 8 y 6. En este caso, es de esperar que la carga mayor se produzca en la probeta de mayor ratio, pero en probetas del mismo ratio, como en la de ratio 6, existe una gran dispersión de resultados, ambos por debajo del valor de ratio 8.

Es interesante observar que la media de la tensión para las probetas de ratio 6 y espesor 2mm es inferior a las de espesor 1mm, ello es debido a que la carga se ha de dividir entre el área de la sección transversal. En este caso, el área es la mitad exacta de los especímenes de 1mm frente a los de 2mm, sin embargo, se puede observar que la carga no es la mitad, es algo superior, por lo que puede entenderse que a mayor espesor, mayor resistencia a cizalladura intralaminar por la menor influencia de las cargas en dirección de profundidad. No obstante, este tema no está claro con el escaso número de probetas analizadas y podría ser fruto de un posterior estudio.

Sí es de esperar, en cambio, que en el caso de las probetas de ratio 3, la tensión tenga un valor muy inferior debido a lo comentado anteriormente.

También se debe tener en cuenta, antes de sacar cualquier conclusión, la dispersión de resultados para cada ensayo. De este modo, se observa como para los ensayos de orientación 10° se tiene un error muy alto, rozando el 60% en dispersión de las probetas de ratio 8, y bajando hasta un no aceptable 34% para las de ratio 5, lo que significa que la media no es un valor aceptable respecto a los resultados experimentales, y que el valor posible de la resistencia a cizalladura intralaminar puede sufrir grandes oscilaciones.

Si la dispersión es de más de un 10% en la carga no se deben tener en cuenta para analizar la resistencia.

Tabla 3. 8: Comparativa entre los distintos tipos de rotura, mostrando para cada ratio diferente, y según dónde se produzca la rotura, la media de estos valores y su desviación típica

	Ratio 8	Ratio 6 e= 2mm	Ratio 6 e= 1mm	Ratio 5	Ratio 3
Media tensión máxima (MPa)	452.60	419.78	439.64	472.85	142.61
Desviación estándar de tensiones	59.11	43.57	35.11	34.91	15.24
Media tensión máxima (MPa) ROTURA ZONA LIBRE	458.56	----	----	----	149.82
Desviación estándar ROTURA ZONA LIBRE	59.07	----	----	----	12.34
Media tensión máxima (MPa) ROTURA BORDE MORD.	425.34	435.25	444.57	----	128.18
Desviación estándar ROTURA BORDE MORD.	91.97	40.84	22.92	----	----
Media tensión máxima (MPa) ROTURA DENTRO MORD.	471.33	412.05	427.32	472.85	----
Desviación estándar ROTURA DENTRO MORD.	----	48.67	69.80	34.91	----

En el caso de laminados de orientación 30° , la desviación de resultados ronda el 15%. Sin embargo, si se analizan las probetas que han roto por la zona central, donde se supone que el campo de tensiones es homogéneo, se observa que la dispersión desciende, en torno al 12%, lo que incurriría en resultados que sí pueden ser aceptables para el cálculo de la resistencia.

En las siguientes imágenes, se puede observar el campo de tensiones para los laminados estudiados de orientación 10° y 30° .

Campo de tensiones de los especímenes de ratio 8.

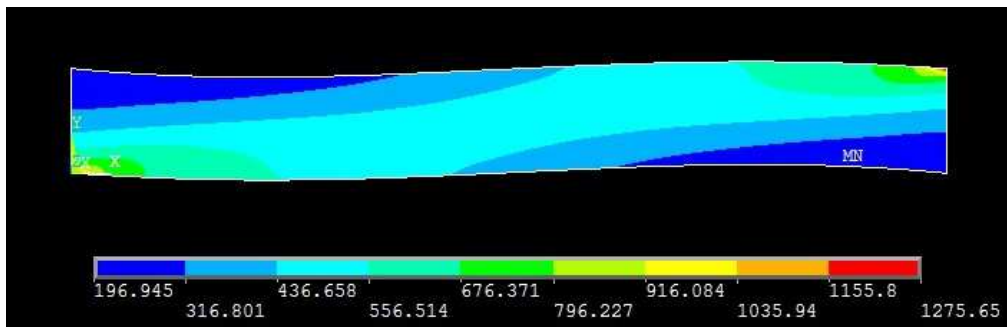


Figura 3. 26: Tensión σ_{11} de probeta de ratio 8

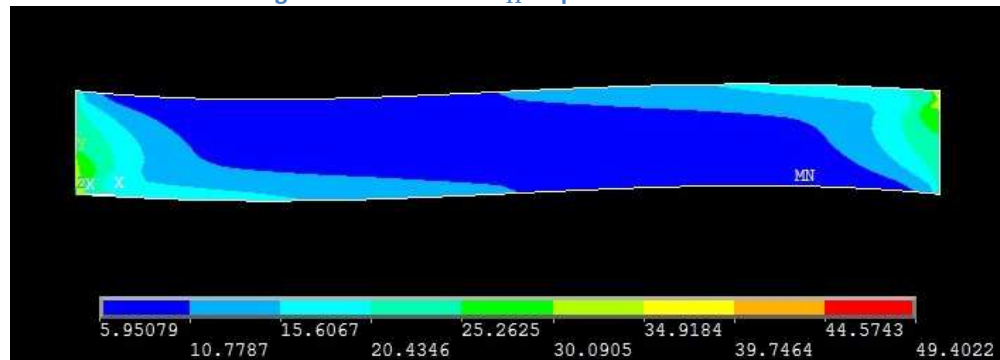


Figura 3. 27: Tensión σ_{22} de probeta de ratio 8

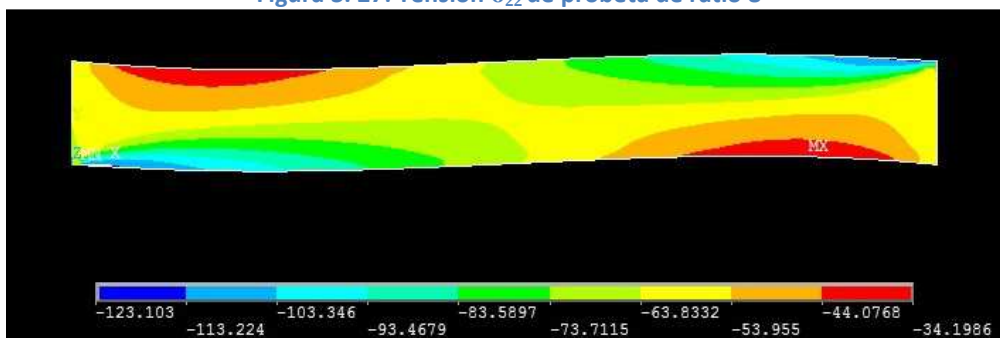


Figura 3. 28: Tensión σ_{12} de probeta de ratio 8

Campo de tensiones de los especímenes de ratio 6 y espesor de 2mm.

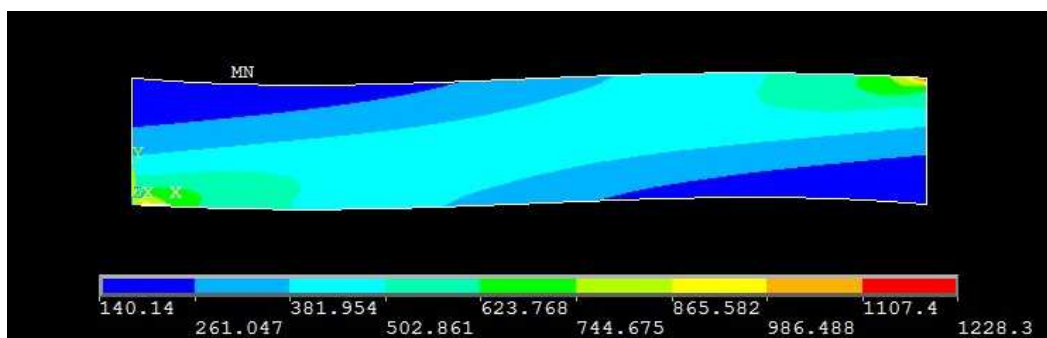


Figura 3. 29: Tensión σ_{11} de probeta de ratio 6 y espesor 2mm

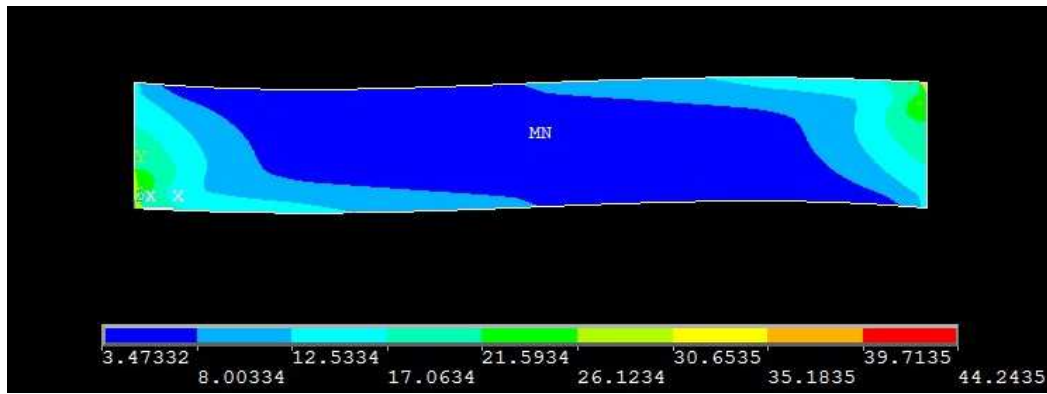


Figura 3. 30: Tensión σ_{22} de probeta de ratio 6 y espesor 2mm

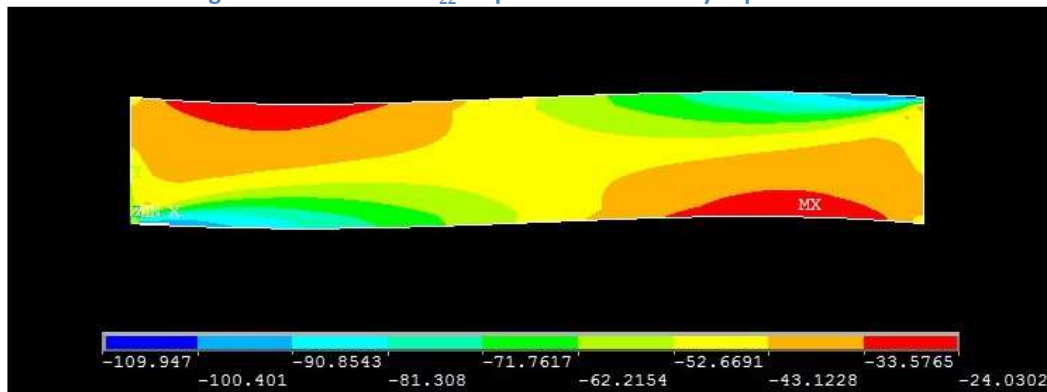


Figura 3. 31: Tensión σ_{12} de probeta de ratio 6 y espesor 2mm

Campo de tensiones de los especímenes de ratio 6 y espesor de 1mm.

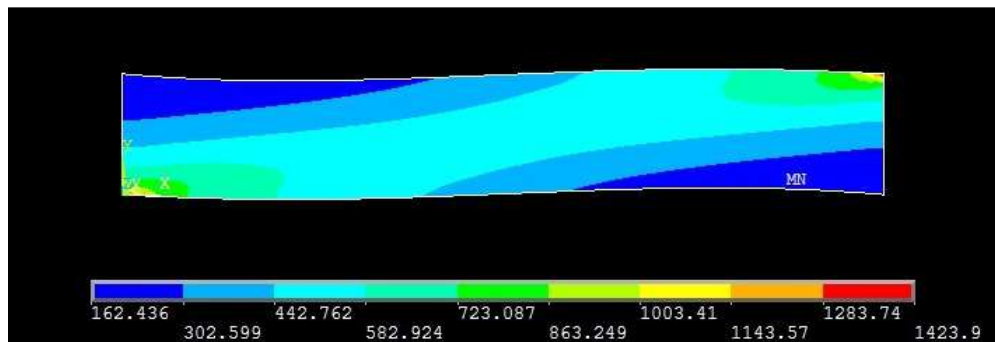


Figura 3. 32: Tensión σ_{11} de probeta de ratio 6 y espesor 1mm

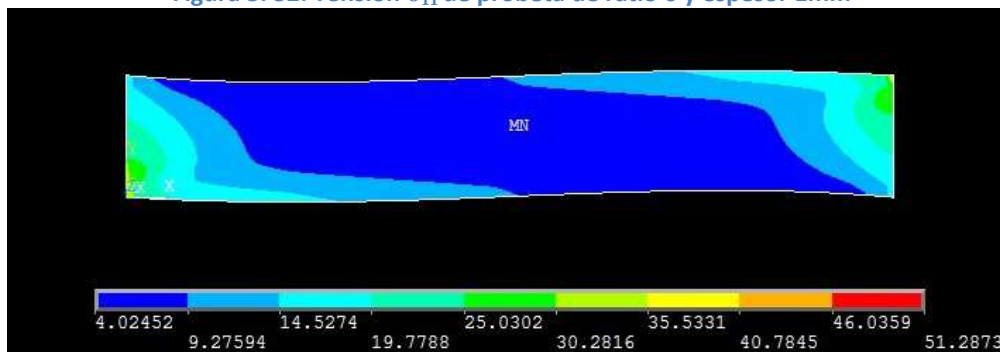


Figura 3. 33: Tensión σ_{22} de probeta de ratio 6 y espesor 1mm

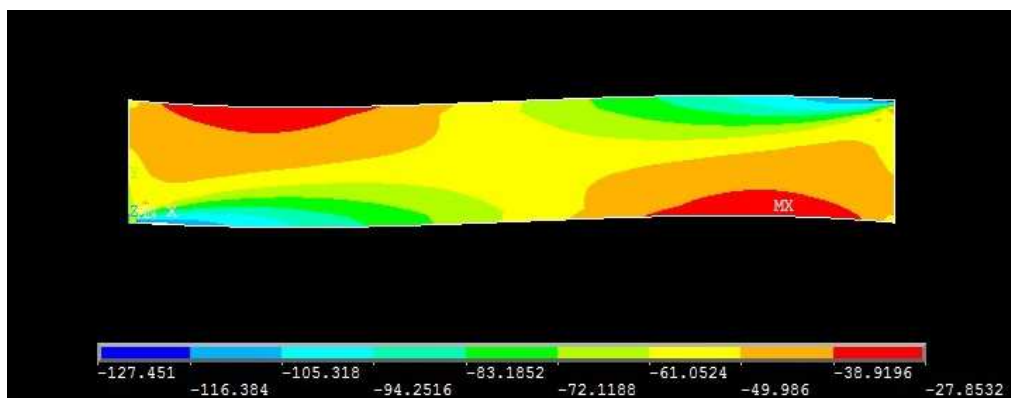


Figura 3. 34: Tensión σ_{12} de probeta de ratio 6 y espesor 1mm

Campo de tensiones de los especímenes de ratio 5.

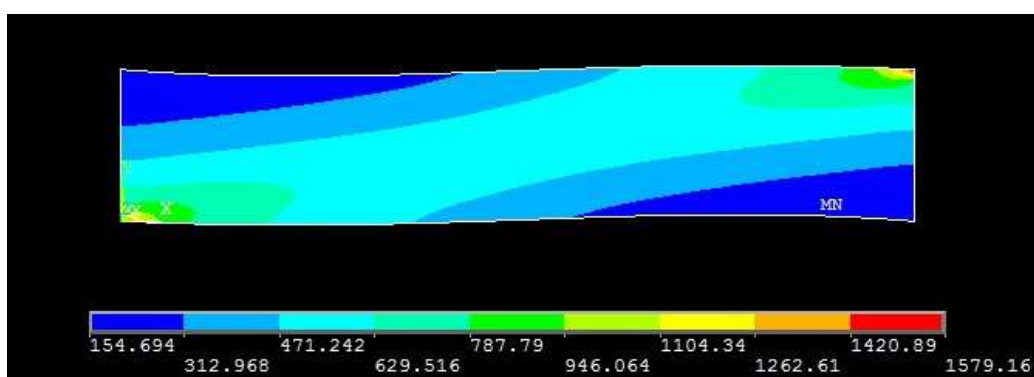


Figura 3. 35: Tensión σ_{11} de probeta de ratio 5

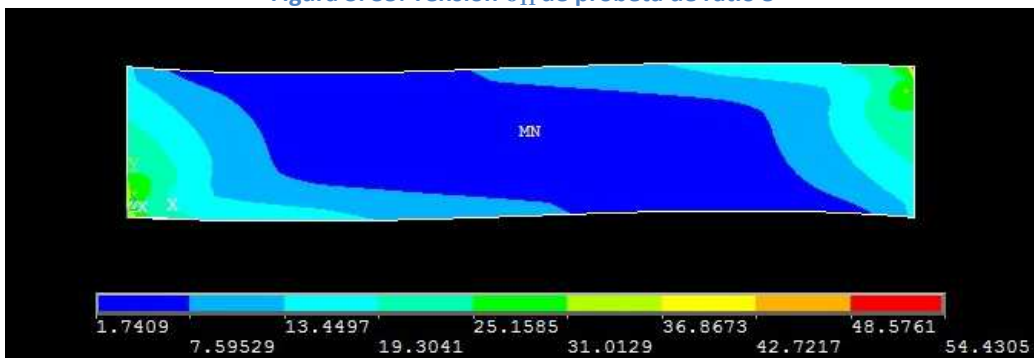


Figura 3. 36: Tensión σ_{22} de probeta de ratio 5

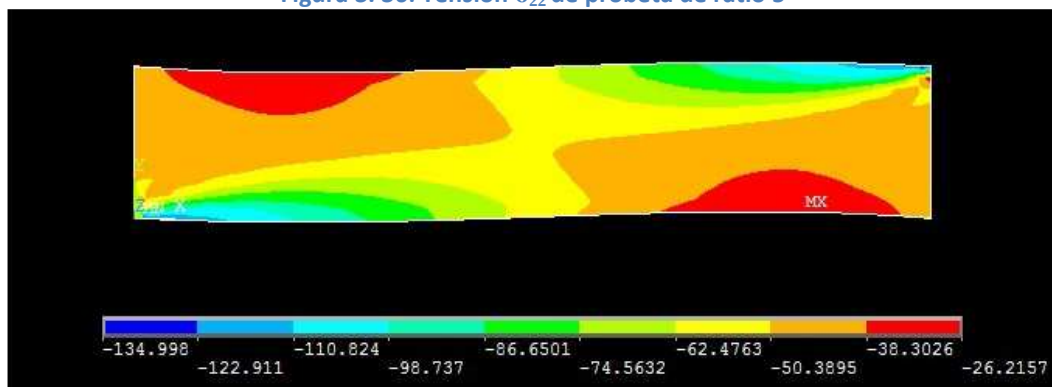


Figura 3. 37: Tensión σ_{12} de probeta de ratio 5

Campo de tensiones de los especímenes de ratio 3.

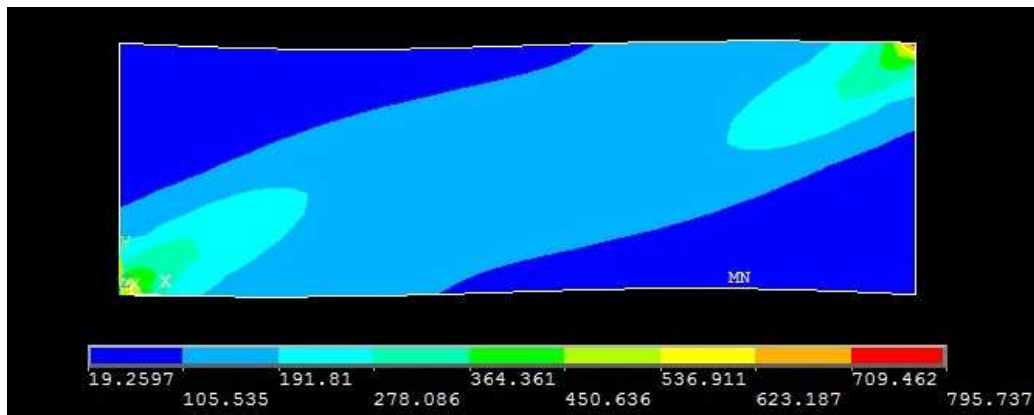


Figura 3. 38: Tensión σ_{11} de probeta de ratio 3

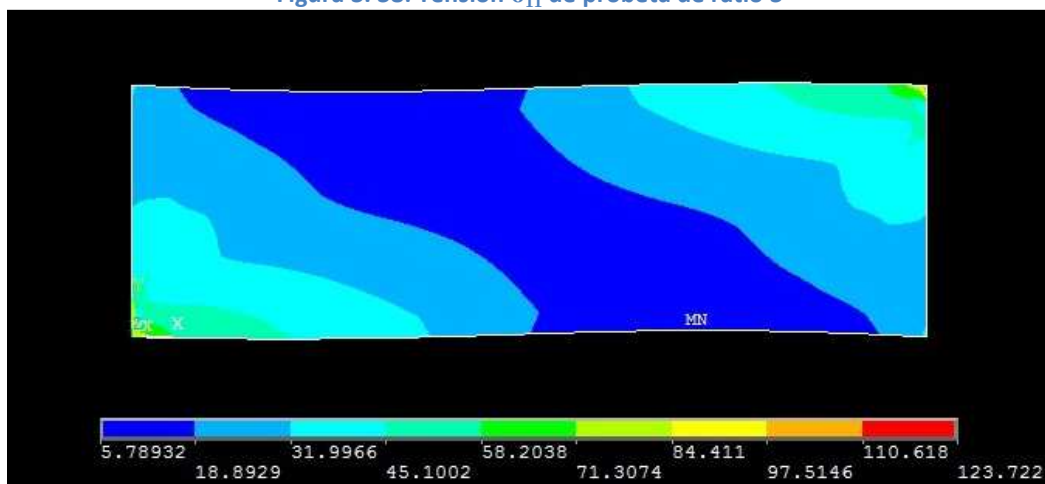


Figura 3. 39: Tensión σ_{22} de probeta de ratio 3

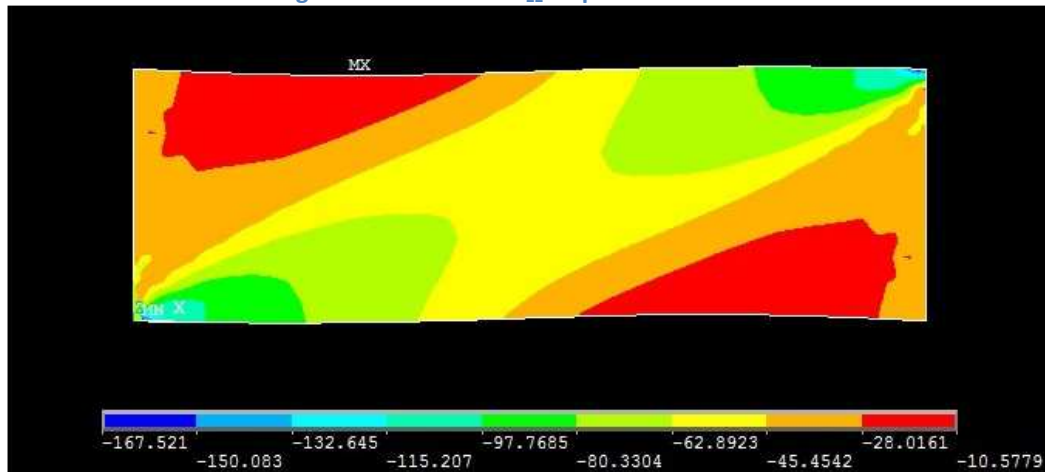


Figura 3. 40: Tensión σ_{12} de probeta de ratio 3

Se puede apreciar cómo el campo de tensiones de los laminados de 10° , presentan uniformidad de tensiones en el centro de la probeta para las tensiones σ_{11} y σ_{22} , mientras que σ_{12} para todos los ratios, presenta un campo de tensiones no uniforme. Como se busca obtener un estado tensional donde la σ_{12} sea la tensión dominante, lo que se intenta conseguir

es una orientación de fibra que alcance la homogeneidad en el campo de tensiones tangencial en todos los casos.

Así mismo, analizando el espécimen de orientación 30° , se puede anotar que para cada tensión, normal y tangencial, se aprecia un campo de tensiones casi homogéneo en todos los casos, y más concretamente en la zona central del espécimen, donde se espera que se produzca el fallo del laminado.

Si se observa el valor medio de tensión para cada componente, se comprueba que los valores mayores son la tensión en dirección de la fibra y la tensión tangencial. De este modo, se descarta que la influencia de la tensión perpendicular a la fibra sea la responsable del fallo. Se debe pues, comparar los valores de rigidez relacionados con las dos componentes principales del fallo, lo que significa que se debe obtener el módulo de cizalladura para así conseguir la resistencia al mismo esfuerzo. Esto se estudiará en los siguientes capítulos.

Se estima que el ángulo óptimo de orientación de fibras para el laminado a estudiar debe estar comprendido entre 10° y 30° como se detalló en la configuración del ensayo Off-Axis en el capítulo anterior, pero además se añade que, debido a que una orientación de 30° presenta un campo más homogéneo que el de 10° , la orientación elegida debe tener un valor medio. De igual modo se ha observado que, la desviación de los resultados es inferior para laminados de 30° de orientación, por lo que se descarta la utilización de laminados con orientación 10° respecto la dirección de carga.

Se deben elegir probetas de ratio elevado, a ser posible mayor que ratio 8, ya que como se ha comprobado en el análisis previo, se tiene una mayor zona libre donde la fractura puede comenzar sin tener que acabar dentro de la mordaza. Además, si aumenta el ángulo de orientación del laminado, la distancia libre de mordaza mínima necesaria disminuye, lo que conlleva a: en primer lugar, que las probetas dispongan de un mayor espacio para originar un campo homogéneo de tensiones, y en segundo lugar, que la rotura que se produzca en esta zona, quede siempre alejada de la zona de mordaza o borde de la misma.