

# 4 ENSAYOS

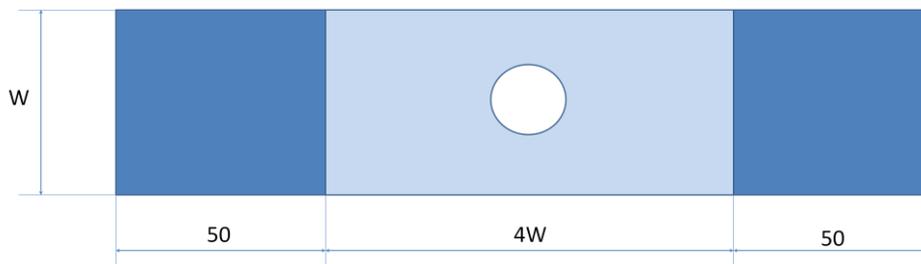
*Live as you were to die tomorrow. Learn as if you were to live forever.*

-Mahatma Gandhi-

Para validar la forma en la que se aborda el problema de la determinación de la carga de fallo de una placa con agujero se hace necesario tener valores con los que comparar. Siguiendo esta dinámica cada uno de los laminados con un tamaño de agujero particular y ratio agujero-ancho dado son sometidos a una situación de carga uniaxial, donde se elucidará el efecto del tamaño y el aspecto sobre la carga de fallo. El modo de fallo y la forma de la rotura serán también analizados, la forma en la que se produce la grieta, el camino que recorre, si se producen o no desviaciones. Es también objeto de estudio el proceso de preparación de las probetas para el ensayo. Como fin último se busca a una ecuación empírica para dichos fenómenos.

## 1.7. Campañas de ensayos

Para cada uno de los laminados propuestos, se realizará una campaña de ensayos distinta, en función del material disponible. Las probetas tendrán unas dimensiones normalizadas según las siguientes figuras:



**Figura 4-1.** Esquema del tamaño y zona de agarre de la probeta.

Se tiene en cuenta dejar una longitud libre del entorno de cuatro veces el ancho para garantizar la regularización de las tensiones a lo largo del eje del agujero. De aquí en adelante se diferenciarán dos campañas de ensayos, la campaña A para el laminado A y la campaña B para el B.

### 1.1.16. Campaña A

Se fijan tres valores de ratios ancho-agujero (también llamado relación de aspecto o factor geométrico) que serán  $W/2R=2, 5$  y  $10$ , es de esperar que un aumento de dicho valor lleve aparejado el aumento de tamaño de las probetas al aumentar el valor de los agujeros. Como diámetros de agujero se toma un abanico de cinco valores lo más equidistantes siendo  $2R=2\text{mm}, 4,15\text{mm}, 6\text{mm}, 8\text{mm}$  y  $10\text{mm}$ . Se tomarán tres probetas por cada combinación de tamaño de agujero y factor geométrico.

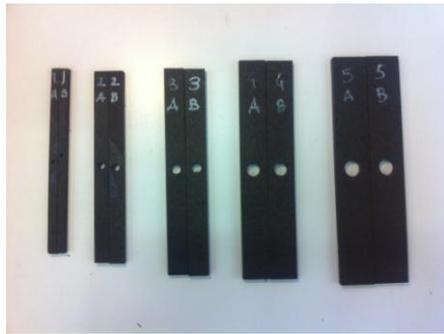


**Figura 4-2.** Campaña de ensayos A.

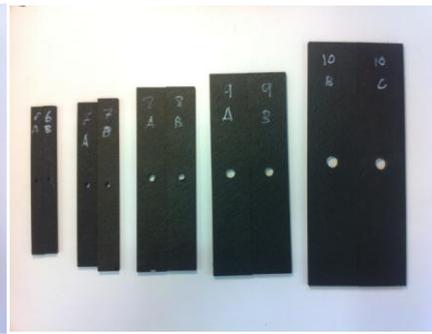
Como puede observarse para el ratio  $W/2R=10$  sólo se han ensayado dos probetas de cada tipo debido a las limitaciones por la falta de material.

### 1.1.17. Campaña B

Se fijan dos valores de ratios ancho-agujero (también llamado relación de aspecto o factor geométrico) que serán  $W/2R=2$  y  $4$ , es de esperar que un aumento de dicho valor lleve aparejado el aumento de tamaño de las probetas al aumentar el valor de los agujeros. Como diámetros de agujero se toma un abanico de cinco valores lo más equidistantes siendo  $2R=2\text{mm}$ ,  $4,15\text{mm}$ ,  $6\text{mm}$ ,  $8\text{mm}$  y  $10\text{mm}$ . Se tomarán dos probetas por cada combinación de tamaño de agujero y factor geométrico.



**Figura 4-3.** Campaña de ensayos B.



**Figura 4-4.** Campaña de ensayos B. (II)

## 1.8. Preparación de ensayos

Para llevar a cabo los ensayos se requiere en primera instancia conocer entorno a que fuerza última soportan las probetas para seleccionar la máquina apropiada. Dado el espesor de las mismas, en ambas campañas, como sus dimensiones, se decide utilizar la máquina dinámica de  $250\text{kN}$ . Para preparar la máquina para un ensayo debe realizarse:

- Colocación de las mordazas para espesores  $1\text{-}12\text{mm}$ .
- Encendido del grupo hidráulico y refrigerador.
- Conexión y calibración de caja de bandas.
- Conexión de la consola y ordenador.
- Activar ejecutable de LabView y controlador de la consola.

Una vez que se tiene todo listo se procede a centrar la probeta sobre las mordazas, es denotable que dichas probetas carecen de tabs ya que las mordazas tienen capacidad suficiente como para evitar que las probetas resbalen. Las probetas se colocan de tal manera que se evite introducir un flector por mala colocación, giro de la cabeza superior sobre la inferior, y se alinean en el centro de manera colineal con el eje de carga. Estas precauciones deben tomarse para conseguir que el ensayo sea del todo satisfactorio. Cerrada las mordazas y colocada la probeta de ensayo, se procede a someter la probeta a un ensayo de carga última, no se requiere una preparación especial de las probetas, siquiera el uso de extensómetros. Siendo las condiciones de ensayo de  $22^\circ\text{C}$ ,  $50\%$  de humedad y una velocidad de carga para el control en desplazamiento de  $0.5\text{mm}/\text{min}$ .

## 1.9. Resultados experimentales

Para el análisis de los resultados se opta por realizar una discriminación y eliminación de aquellos valores que se salgan de la tendencia del conjunto de especímenes. Una vez conocida la fuerza última que soporta cada probeta, se toma un valor promedio del ancho y del espesor del mismo para calcular la carga última nominal de fallo, dicha carga está referenciada a los extremos de la misma.

- **Determinación del modo de fallo:** Aplicación del criterio de máxima tensión en la sección neta.

$$\sigma_n \leq X_T \rightarrow \sigma_n / X_T \leq 1 \quad (1.56)$$

Si dicho criterio se cumple, se entenderá que el fallo en el laminado ha sido motivado por sección neta y por tanto no ha aparecido ninguna grieta por efecto del concentrador. En el caso de que dicho cociente sea menor a la unidad se asigna el fallo al efecto del concentrador, y por ello a la aparición de la grieta, de otra manera será fallo por sección neta.

### 1.1.18. Laminado A

En la siguiente tabla-resumen se detalla el número identificativo del espécimen a analizar, su relación de aspecto y tamaño de agujero, tanto la tensión nominal crítica como la tensión neta, además se incluye el valor crítico adimensionalizado con la resistencia del laminado. Las dos últimas columnas hacen referencia al modo de fallo siendo la primera la aplicación del criterio de máxima tensión para la sección neta, en caso de no cumplirse, el fallo será por el concentrador y viceversa. Se desarrolla para ambas campañas de ensayo.

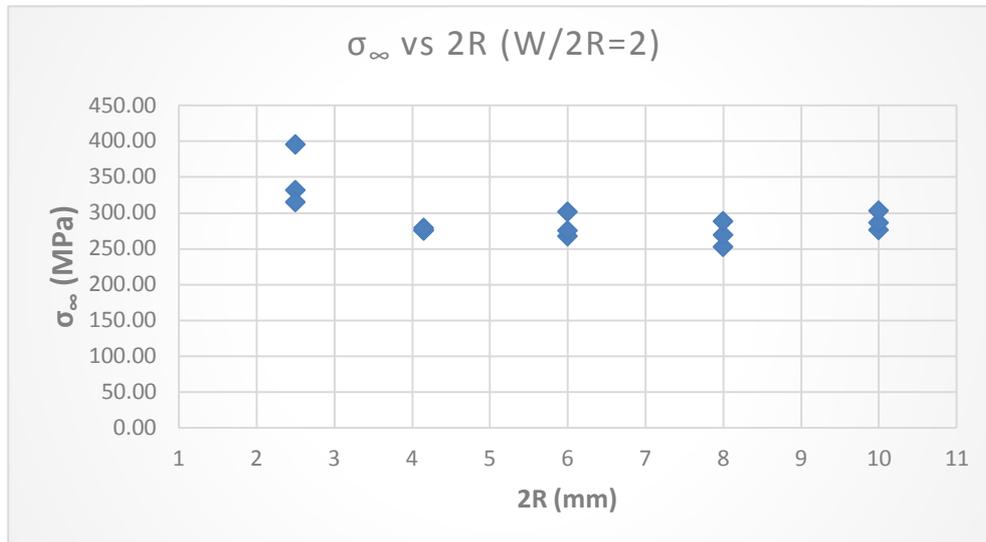
Tabla 4-1. Ensayos laminado A

| Especímen | W/2R | 2R(mm) | $\sigma_{\infty}$ (MPa) | $\sigma_n$ (MPa) | $\sigma_{\infty}/X_t$ | $\sigma_n/X_t$ | Modo de fallo |
|-----------|------|--------|-------------------------|------------------|-----------------------|----------------|---------------|
| 1         | 2    | 2.5    | 346.89                  | 673.98           | 0.43                  | 0.84           | Concentrador  |
| 2         | 2    | 4.15   | 276.35                  | 549.96           | 0.34                  | 0.68           | Concentrador  |
| 3         | 2    | 6      | 280.71                  | 555.76           | 0.35                  | 0.69           | Concentrador  |
| 4         | 2    | 8      | 269.52                  | 533.17           | 0.33                  | 0.66           | Concentrador  |
| 5         | 2    | 10     | 287.99                  | 574.05           | 0.36                  | 0.71           | Concentrador  |
| 6         | 5    | 2.5    | 483.74                  | 603.37           | 0.60                  | 0.75           | Concentrador  |
| 7         | 5    | 4.15   | 483.18                  | 603.67           | 0.60                  | 0.75           | Concentrador  |
| 8         | 5    | 6      | 446.78                  | 557.91           | 0.56                  | 0.69           | Concentrador  |
| 9         | 5    | 8      | 504.02                  | 629.83           | 0.63                  | 0.78           | Concentrador  |
| 10        | 5    | 10     | 442.32                  | 552.64           | 0.55                  | 0.69           | Concentrador  |
| 11        | 10   | 2.5    | 577.82                  | 641.59           | 0.72                  | 0.80           | Concentrador  |
| 12        | 10   | 4.15   | 558.72                  | 620.66           | 0.69                  | 0.77           | Concentrador  |
| 13        | 10   | 6      | 510.31                  | 566.97           | 0.63                  | 0.70           | Concentrador  |
| 14        | 10   | 8      | 495.90                  | 550.86           | 0.62                  | 0.68           | Concentrador  |

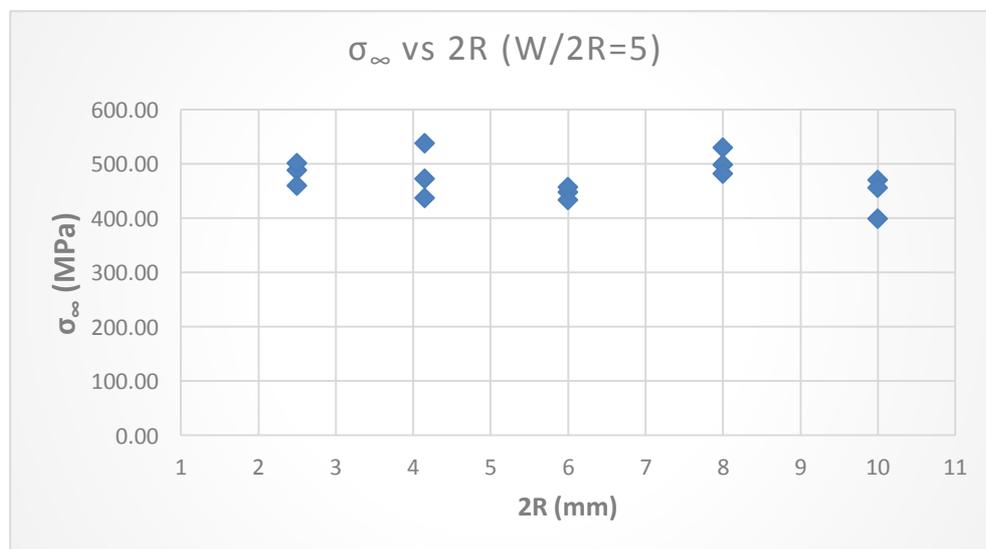
Una vez obtenido los valores experimentales, se procede a identificar los efectos de tamaño y relación de aspecto o geométrico así como trasladar una breve explicación sobre su origen. Para una mejor visualización de los datos se exponen los siguientes gráficos, en los mismos aparecen cada uno de los ensayos realizados, es decir, todos los valores obtenidos en la campaña, por lo que los que aparecen en la tabla anterior son la media de los mismos para cada uno de los especímenes.

En primer lugar, es denotable observar que para un valor fijado del ratio ancho-agujero, un aumento del tamaño del agujero produce una disminución de la resistencia última, a lo que se denominará efecto de tamaño. Este efecto puede explicarse a través del criterio acoplado, se desarrollará una explicación exhaustiva en los siguientes apartados relativos al cálculo numérico.

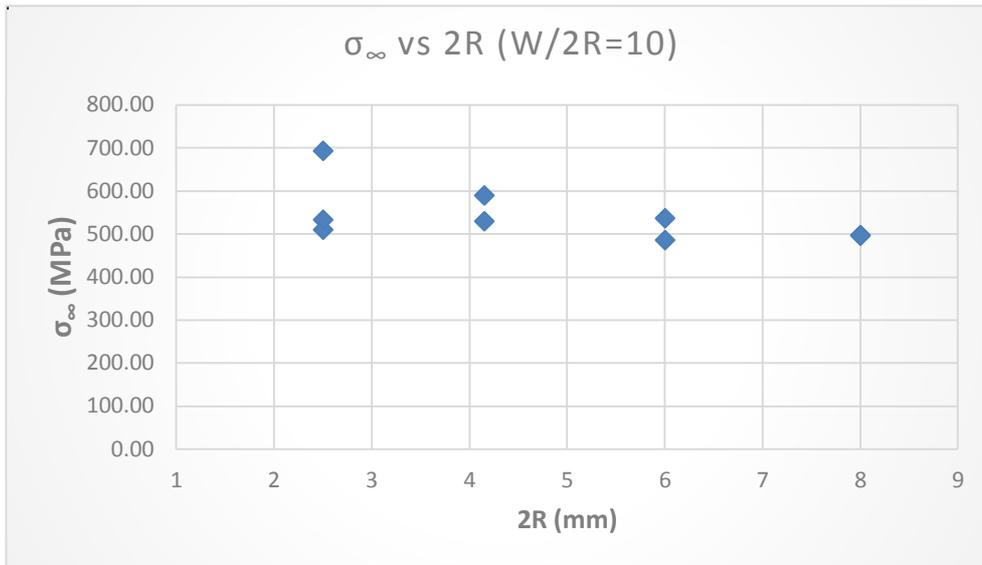
Mientras el ratio sea menor los efectos de tamaño son más difíciles de observar pues entrar en juego microdaños dentro del material que pueden ser la causa de la elevada dispersión en los valores.



**Figura 4-5.** Ensayos de la evolución de la resistencia a tracción con agujero frente al tamaño del agujero para un ratio  $W/2R=2$  para el laminado anisótropo A.

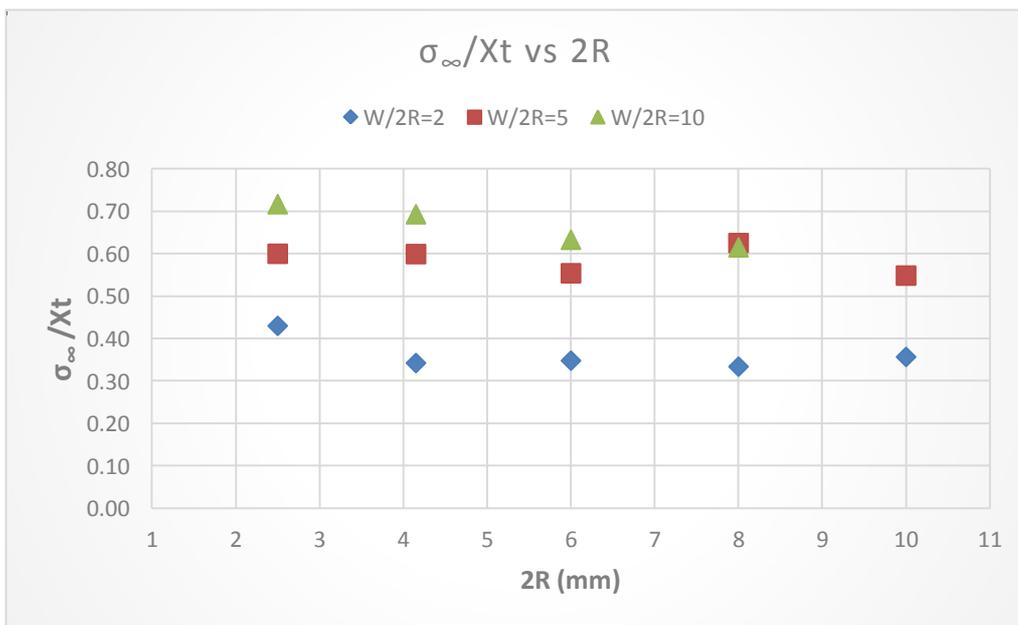


**Figura 4-6.** Ensayos de la evolución de la resistencia a tracción con agujero frente al tamaño del agujero para un ratio  $W/2R=5$  para el laminado anisótropo A.



**Figura 4-7.** Ensayos de la evolución de la resistencia a tracción con agujero frente al tamaño del agujero para un ratio  $W/2R=10$  para el laminado anisótropo A.

En segundo lugar, el efecto de la geometría, retomando los valores medios de rotura para cada tipo de espécimen y resumiendo la campaña en la siguiente gráfica:



**Figura 4-8.** Valores medios de las evoluciones de la resistencia a tracción con agujero frente al tamaño del agujero para ratios  $W/2R=2, 5$  y  $10$  en el laminado anisótropo A.

Dicho efecto se explica con que una disminución del ratio reduce la distancia libre media que tienen las tensiones para regularizarse al estar el ancho total de la probeta fijado, por tanto el perfil a lo largo del mismo resulta suave, estando sometidas a elevadas tensiones toda la zona. Esto encamina a pensar que para un tamaño dado la rotura de la probeta deja de producirse por efecto del concentrador y se produce por sección neta.

Para tener una mejor apreciación del efecto de la sensibilidad al concentrador que tiene el laminado o mejor dicho su tendencia a romper por efecto del concentrador en contraposición con el de tensión neta, es de interés retomar la idea de la región de tensiones admisibles de fallo, y superponer los ensayos en la misma. Siguiendo la definición de las curvas de sensibilidad se obtiene:

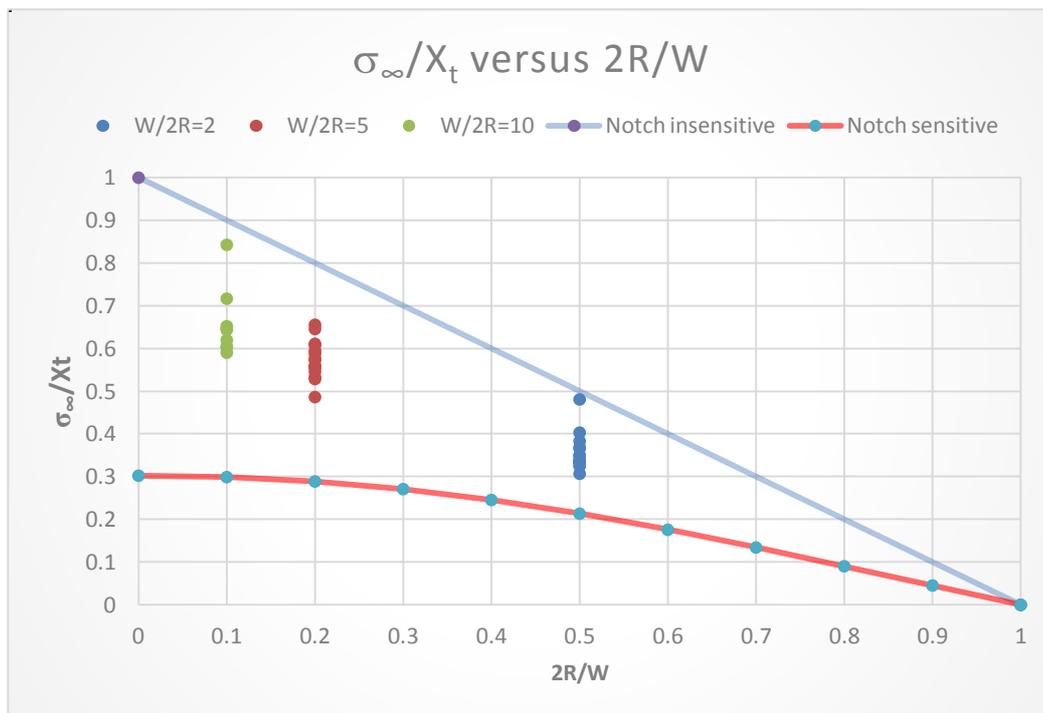


Figura 4-9. Región de tensiones últimas para el laminado anisótropo A.

Como era de esperar todos los puntos caen dentro de la región definida por las curvas, produciéndose una mayor concentración de los mismos conforme el ratio  $W/2R$  disminuye. Un aumento del tamaño del agujero para un ratio dado va reduciendo de manera progresiva el valor de carga crítica del material, ahora bien, puede verse que este efecto aumenta o reduce en función del ratio de dicho agujero, siendo más intenso para ratios altos ( $W/2R=10$ ).

#### 1.1.18.1. Examen de las superficies de rotura

Para abarcar una mayor comprensión física del problema es necesario un estudio del modo real de fallo del laminado, del que se puede afirmar que está gobernado principalmente por su secuencia de apilado. La aparición de la grieta y su posterior propagación por el material son sumo interés para elucidar los efectos que pueden no haberse tenido en cuenta en el modelado del problema.

Dicho análisis se realiza de manera pormenorizada en cada espécimen, habiéndose seleccionado aquellos que resultan representativos del daño practicado para cada ratio ancho-agujero. Para un laminado es difícil definir lo que supone una grieta que atraviesa al conjunto, al ser éste un material heterogéneo.

Conforme a la realización del ensayo, todas las roturas fueron explosivas, saltando partes de laminado por todos lados. Lo que delata una gran liberación de energía por parte del espécimen que es liberada en forma de ondas sonoras, además no se apreciaron efectos de calentamiento.

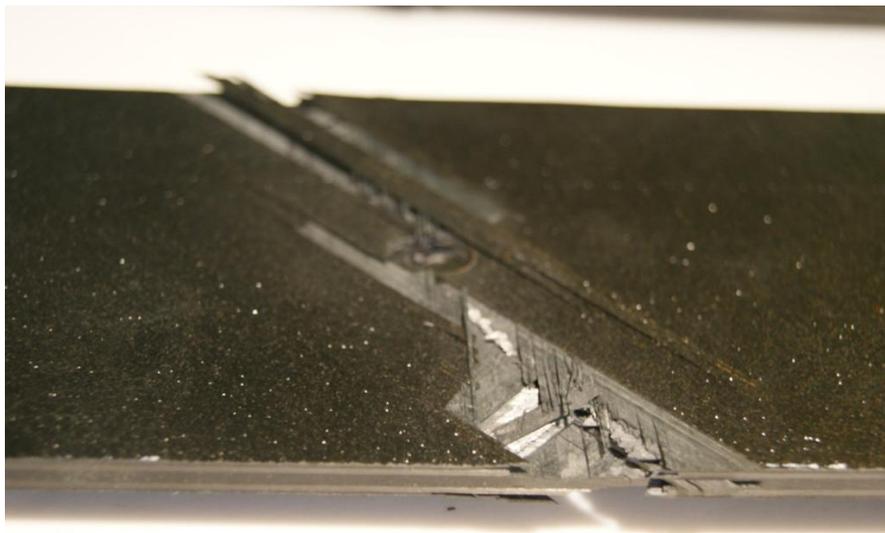
**Ratio 10**

Como probeta de examen, se ha escogido la número 14, con  $2R=8\text{mm}$  y  $W=80\text{mm}$  (Figura 4-10). Estudiando el camino realizado por la grieta, se observa que hay una propagación del entorno de  $4-5\text{mm}$  a lo largo del eje de estudio, distancia a partir de la cual la misma sufre una desviación de  $45^\circ$  hasta alcanzar los extremos. Este hecho hace pensar en la existencia de un modo mixto de fallo de acuerdo a las características elásticas del propio laminado que contaba con un elevado número de láminas en dicha orientación.



**Figura 4-10.** Superficie de rotura para ratio 10 del laminado A.

En la resolución por elementos finitos, se observa como existía una cierta desviación en los máximos puntos de tensión normal en la periferia del agujero, del entorno de los  $5-10^\circ$  por lo que no es descabellado pensar que conforme la grieta se propagara este efecto de la anisotropía aparejado con el camino que opone menor resistencia para modo I llevara a la desviación de la grieta.



**Figura 4-11.** Superficie de rotura para ratio 10 del laminado A. (II).

En la figura 4-11 se elucida de manera clara cómo la grieta ha progresado a lo largo de la matriz de láminas de  $45^\circ$ , y mediante otro tipos de rotura por el resto de las láminas, al ser predominantes éstas han controlado el fallo final del laminado.

**Ratio 5**

Como espécimen de análisis representativo se escoge el número 9 con  $2R=8\text{mm}$  y  $W=40\text{mm}$ . De manera análoga al ratio estudiado anteriormente la rotura parece no haber cambiado, eso sí, el camino libre que tienen la grieta para propagarse es menor y por tanto los efectos del desvío de la misma a primera vista parecen ser menos. Sin embargo éstos existen y están ahí como muestra la figura 4-12.



**Figura 4-12.** Superficie de rotura para ratio 5 del laminado A.

La forma en la que se origina la grieta, en qué lámina aparece como tal y la dirección que adopta resulta ser la esencia del problema. En este caso la gran concentración de láminas a  $45^\circ$  en el seno del material parecen llevar a que la grieta aperece en las mismas a través de la matriz separando las fibras, es de esperar ya que será el camino que menos resistencia aporte a la aparición y propagación de la misma.

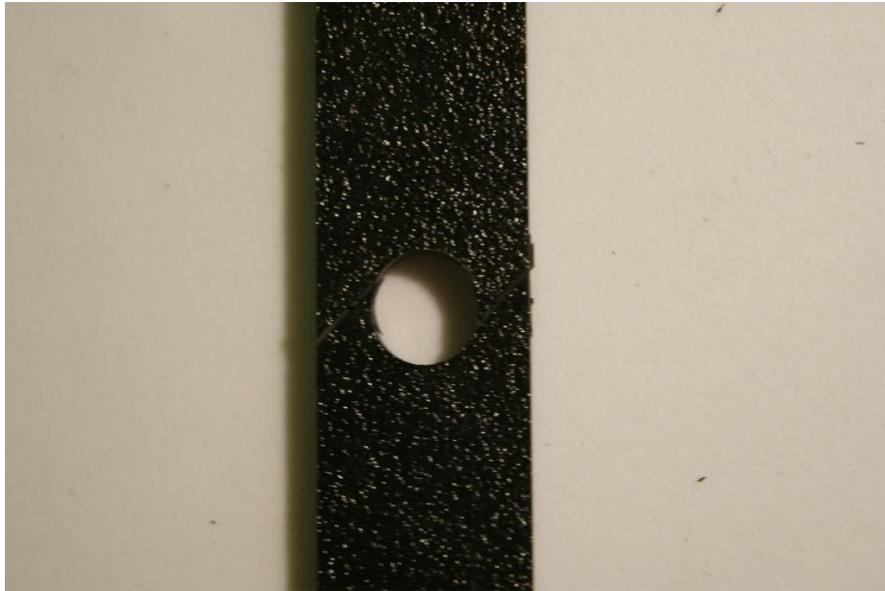


**Figura 4-13.** Superficie de rotura para ratio 5 del laminado A. (II)

Dicho quede también que una vez que la grieta tiene su aparición el resto de láminas en distintas orientaciones pueden tener un efecto en contra de la propagación de la misma al impedirle que se propagara por dichas láminas de  $45^\circ$  al estar unas unidas a las otras aumentando la tenacidad base que tuvieren las mismas. Así también sería muy útil conocer cuál es la tenacidad a fractura en modo I y II de una lámina en su dirección transversal, ya que parece clara la existencia de un modo mixto de fallo. Y que estuviera más controlado por el modo II que por el I como la forma del daño y la tipología de carga hacen pensar la complejidad que alcanza el problema.

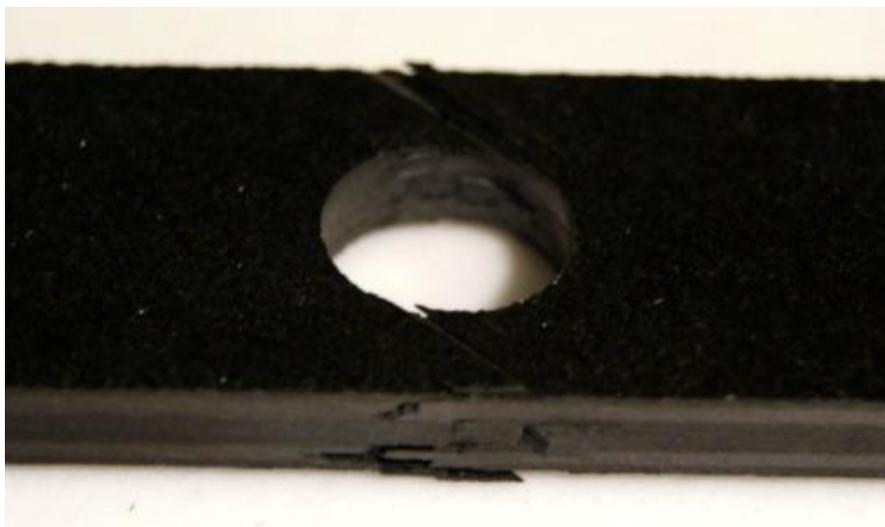
**Ratio 2**

Como espécimen de análisis representativo se escoge el número 5, con  $2R=10\text{mm}$  y  $W=20\text{mm}$ . Hay que hacer notar que la rotura de estas probetas no fue tan explosiva como las otras, de acuerdo a su reducido tamaño y a la escasa sección de fallo que tienen. Éstas no sufrieron una separación apreciable como para observar que el espécimen se encontrase dañado por efecto de un ensayo de carga, así se ve en la figura 4-14.



**Figura 4-14.** Superficie de rotura para ratio 2 del laminado A.

La desviación sufrida por la grieta no resulta apreciable a simple vista, sin embargo para la figura 4-15 se puede ver cómo se ha producido una rotura por varias zonas siendo la más llamativa la de la sección central con láminas de  $45^\circ$  en las que el fallo se ha producido directamente por la matriz sin esperar a los efectos del concentrador.



**Figura 4-15.** Superficie de rotura para ratio 2 del laminado A. (II)

Esto lleva a pensar que el daño del material pudiera estar promovido por efecto de las tensiones tangenciales en dicha láminas produciendo una rotura de la matriz por el crecimiento de una grieta en modo II. Habiendo aparecido la grieta de manera espontánea en el seno de dichas láminas a  $45^\circ$  y con un modo de apertura distinto al esperado.

### 1.1.19. Laminado B

Retomando la campaña del laminado cuasisótropo se procede de manera idéntica en la presentación de los resultados experimentales obtenidos. Estando en primer lugar la tabla con la determinación de los modos de fallo en cada espécimen.

Tabla 4-2. Ensayos laminado B

| Espécimen | W/2R | 2R(mm) | $\sigma_{\infty}$ (MPa) | $\sigma_n$ (MPa) | $\sigma_{\infty}/X_t$ | $\sigma_n/X_t$ | Modo de fallo |
|-----------|------|--------|-------------------------|------------------|-----------------------|----------------|---------------|
| 1         | 2    | 2.5    | 443.92                  | 890.48           | 0.55                  | 1.10           | Sección neta  |
| 2         | 2    | 4.15   | 423.51                  | 829.00           | 0.52                  | 1.02           | Sección neta  |
| 3         | 2    | 6      | 447.68                  | 893.11           | 0.55                  | 1.10           | Sección neta  |
| 4         | 2    | 8      | 397.47                  | 791.36           | 0.49                  | 0.98           | Sección neta* |
| 5         | 2    | 10     | 420.54                  | 831.61           | 0.52                  | 1.02           | Sección neta  |
| 6         | 4    | 2.5    | 728.82                  | 968.69           | 0.90                  | 1.19           | Sección neta  |
| 7         | 4    | 4.15   | 558.35                  | 739.83           | 0.69                  | 0.91           | Concentrador  |
| 8         | 4    | 6      | 490.70                  | 649.39           | 0.60                  | 0.80           | Concentrador  |
| 9         | 4    | 8      | 466.71                  | 617.26           | 0.58                  | 0.76           | Concentrador  |
| 10        | 4    | 10     | 464.69                  | 617.37           | 0.57                  | 0.76           | Concentrador  |

Visualizando los valores adimensionales de la tensión neta, se observa que hay ciertos valores que superan la unidad, esto puede achacarse a la dispersión del valor de la resistencia a tracción del laminado. Es más, para el espécimen 4<sup>o</sup> se observa que casi alcanza el valor unidad y se asigna sección neta puesto que resulta coherente por los fallos vistos dentro de su laminados semejantes en ratio. Con esto podría definirse un rango de incertidumbre en la determinación del modo de fallo que pudiera alcanzarse por valores muy cercanos a la unidad, motivado por la variabilidad de la resistencia a tracción.

A continuación, se exponen los resultados de los ensayos en gráficas para cada ratio:

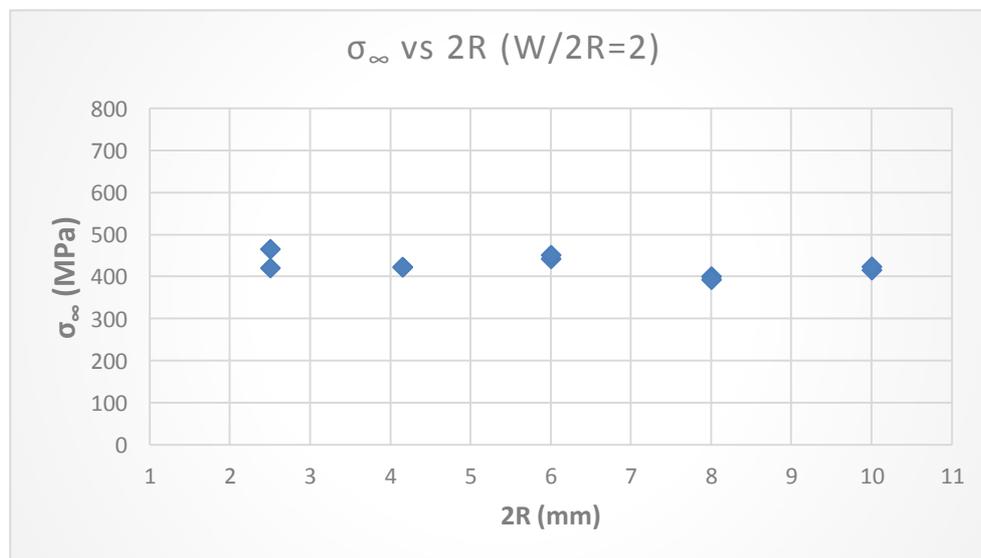
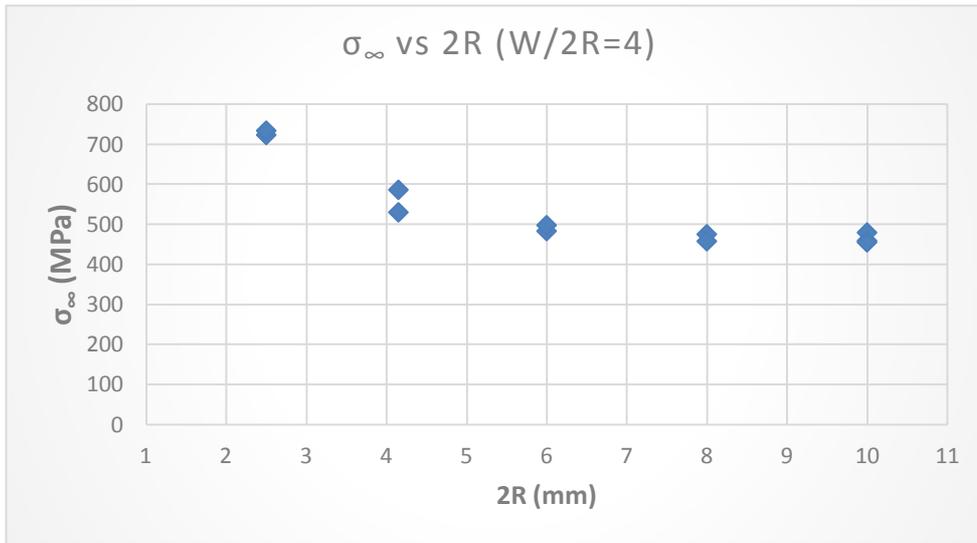
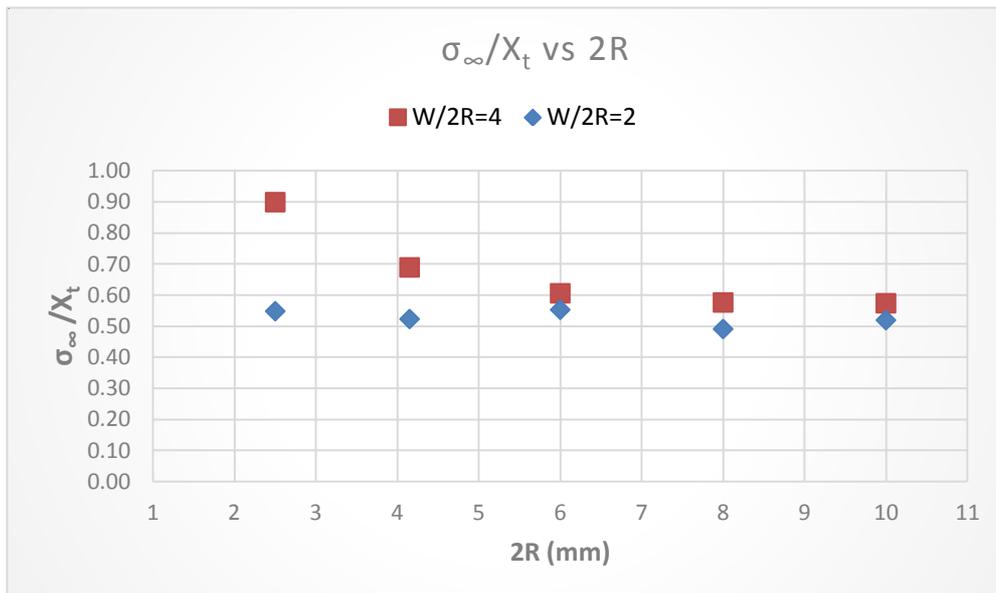


Figura 4-16. Ensayos de la evolución de la resistencia a tracción con agujero frente al tamaño del agujero para un ratio W/2R=2 para el laminado cuasisótropo B.



**Figura 4-17.** Ensayos de la evolución de la resistencia a tracción con agujero frente al tamaño del agujero para un ratio  $W/2R=4$  para el laminado cuasisótropo B..

Se ve claramente la existencia de una escasa dispersión en los resultados para este laminado. Superponiendo ambas gráficas en términos de valores medios se tiene:

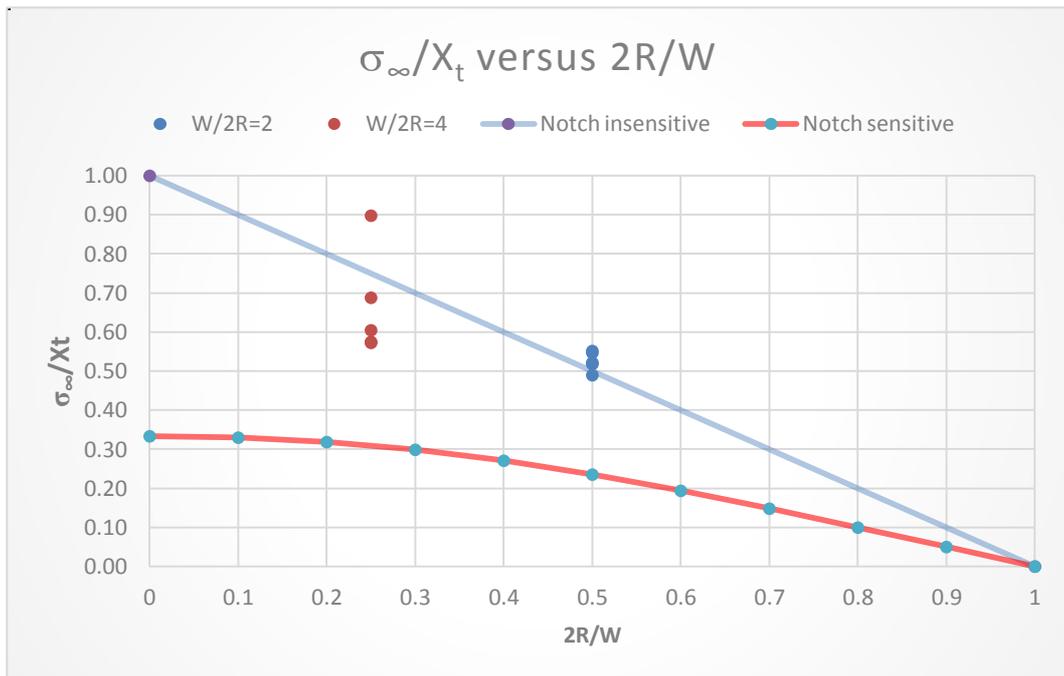


**Figura 4-18.** Valores medios de las evoluciones de la resistencia a tracción con agujero frente al tamaño del agujero para ratios  $W/2R=2$  y  $4$  en el laminado cuasisótropo B.

Donde el efecto del tamaño es muy claro para el ratio 4, el aumento del tamaño del agujero disminuye la resistencia del propio laminado.

Ahora bien, para el ratio 2 no se observa este efecto, esto se debe a que el modo de fallo predominante es por sección neta y por tanto, para cualquier tamaño semejante del espécimen la carga de rotura no varía. Es de especial importancia la ausencia de este efecto. El criterio de fallo basado sólo en la tensión máxima resulta válido para su aplicación.

Lo anteriormente descrito se observa en la gráfica de modos de fallo. Los puntos que se encuentran sobre la línea o por encima de la curva azul, ha fallado por sección neta, el resto de puntos por efecto del concentrador.



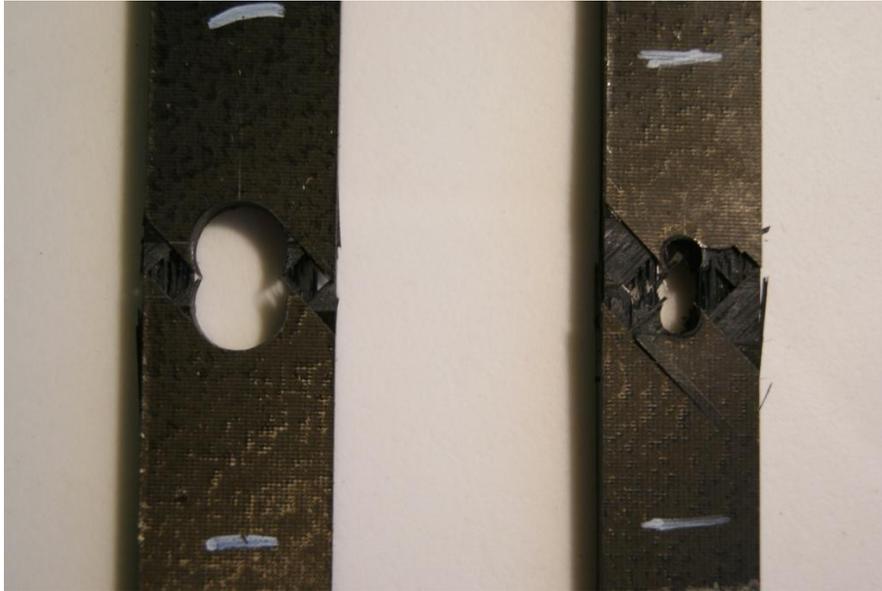
**Figura 4-19.** Región de tensiones últimas para el laminado cuasisótropo B.

Los efectos anteriormente descritos también se observan en este nuevo laminado, siendo de especial importancia el de ratio igual a 4, donde de manera muy clara aparece el de tamaño. A su vez debe denotarse que para valores pequeños del ratio la dispersión de los resultados hace difícil vislumbrar el efecto, pues entran en juego los microdaños del propio material.

### 1.1.19.1. Examen de las superficies de rotura

En cuanto a la superficie de rotura es de vital importancia estudiarla, así se muestra en la Figura 4-10 la forma típica del fallo. En todos los casos se ha producido a la altura del agujero, siendo motivadas por el concentrador de tensiones. Considerando que la secuencia de apilado  $[45/0/-45/90]_{3s}$ , realizando un barrido general por todas las láminas se observa que:

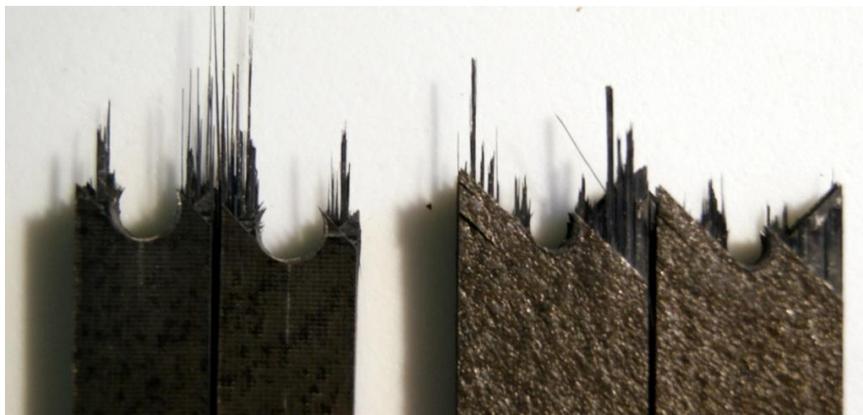
- Para las láminas a  $\pm 45^\circ$  se produce una rotura por la matriz, como consecuencia de los efectos de tensiones tangenciales ejercidas sobre las mismas.
- Para las láminas de  $0^\circ$  el fallo fue puramente por rotura de fibra sometidas a tracción.
- Para la lámina de  $90^\circ$  fallan a tracción por la matriz a la altura del agujero.



**Figura 4-20.** Superficie de rotura para ratio 2 y 4 del laminado B.

A simple vista parece que ambos fallos son idénticos, sin embargo realizando un análisis más exhaustivo se puede aportar ciertas diferencias. Una pieza clave será la forma en la que se encuentran las láminas de  $45^\circ$  en el exterior de laminado.

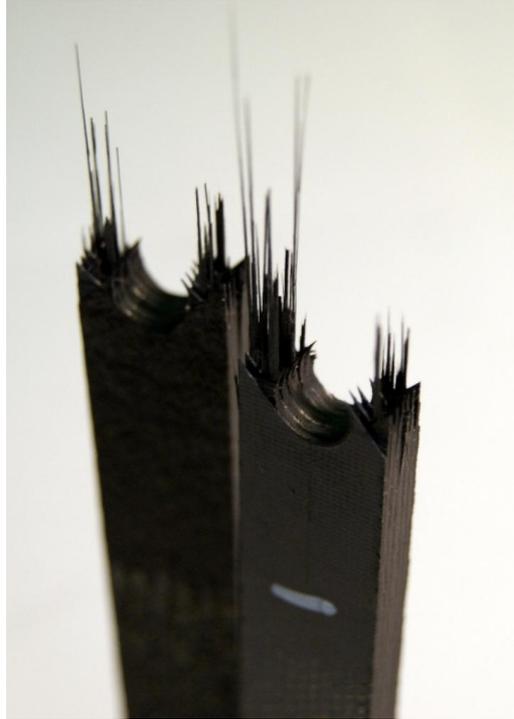
Retomando la idea de la forma en “v” definida por las laminas de  $45^\circ$ , esta vez mucho más próxima al agujero (mirar figura 4-25), por tanto esto hace pensar en cómo ha de ser la forma del perfil de tensiones en y, y a su vez traslado a tangenciales. Así pues afirmando que dicha V da una idea próxima de cuan acentuado es el perfil de tensiones en este caso es mucho mayor tal y como era de esperar que para el otro ratio. (reforzar esta idea, pienso que la tensión acimutal tiene un ángulo fijo y eso determina la forma en V)



**Figura 4-21.** Superficie de rotura para ratio 2 y 4 del laminado B.(II)

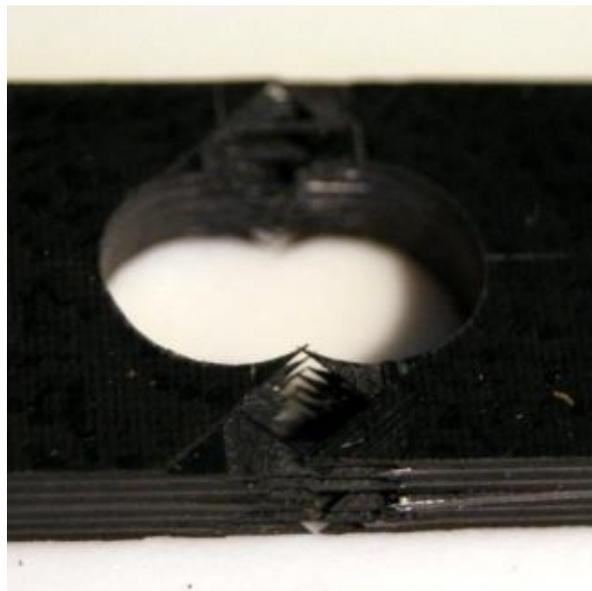
**Ratio 2**

Para ratio 2 se realizan las siguiente magnificación en las imágenes, la Figura 4-22 muestra una probeta separa por la mitad donde se muestra de manera clara un fallo generalizado en la sección neta del material, como se ha definido el fallo de cada lámina anteriormente.



**Figura 4-22.** Superficie de rotura para ratio 2 del laminado B.

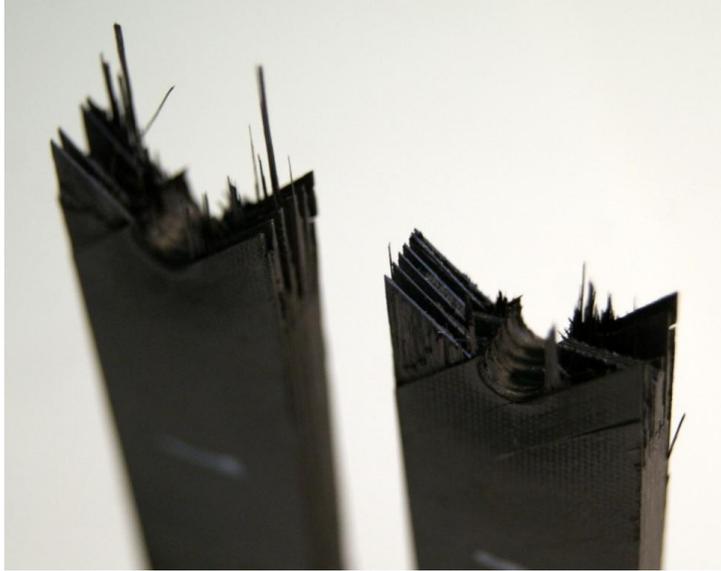
Para fundamentar este fallo se amplia la imagen para una probeta de este ratio, en la figura 4-23 se observa como a lo largo de la línea media de la probeta las láminas han ido fallando consecutivamente y no se advierte la presencia de grieta alguna. Si se observa las láminas de 45° externas en la zona del concentrador dichas láminas parecen haberse separado por el punto medio que hay definido entre el borde de la probeta y el extremo del agujero o cerca del mismo, esto hace pensar que no existe una continuidad en el fallo entre un lado y otro del agujero, siendo independiente el uno del otro, comportándose como dos laminados independientes.



**Figura 4-23.** Superficie de rotura para ratio 2 del laminado B. (II)

**Ratio 4**

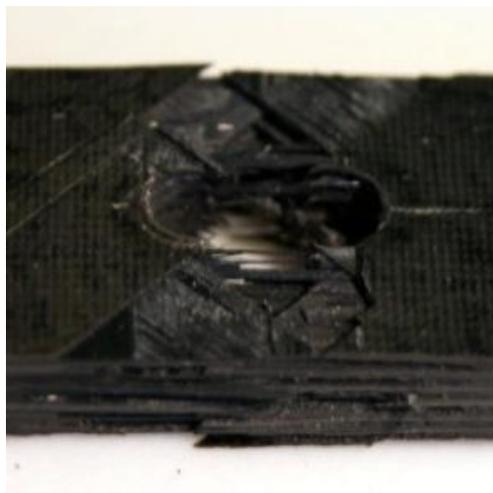
Ahora bien, tomando un detalle de la superficie para ratio 4 mostrado en la figura 4-24 se observa cómo en la parte central del mismo, se concentraban dos láminas de  $90^\circ$  rodeadas por un grupo de  $45^\circ$ , al parecer para este espécimen se ha producido una rotura plana de estas láminas, por ello esto hace pensar que en seno del material y para las láminas más interiores ha debido de aparecer una grieta de tamaño finito que se ha propagado en la dirección perpendicular a la carga.



**Figura 4-24.** Superficie de rotura para ratio 4.

Sin embargo esta grieta parece no haber abarcado el espesor total del laminado, tal y como se definió en el modelado del problema. Una manera razonable de explicar el proceso de rotura puede ser asumiendo que nace una grieta en las láminas interiores, con independencia de su orientación, y ésta tiende a propagarse a lo largo del camino libre, estando el resto de láminas exteriores ejerciendo un efecto de refuerzo en el material para impedir la propagación de la misma grieta. Una vez ésta ha alcanzado el final del material, sólo quedan unas pocas láminas dañadas que tienen que soportar la carga total y fallan por sus mecanismos más débiles, por los efectos anteriormente descritos.

Esto sólo se ha visto en un espécimen, el razonamiento a seguir sería que aparecieron tantas grietas como láminas de  $90^\circ$  tiene el laminado con un tamaño finito dado e iguales. Tras esto éstas al intentar propagarse han sido forzadas a aumentar su tenacidad a fractura por el resto de laminas en otras orientaciones, hasta que el nivel de esfuerzos ha sido tan alto que las láminas a  $45^\circ$  han fallado por la matriz por efecto de tensiones tangenciales y finalmente las láminas de  $0^\circ$ .



**Figura 4-25.** Superficie de rotura para ratio 4.(II)

En la figura 4-25, la forma de la rotura parece más amplia en el espesor, esto es debido a que las láminas de  $45^\circ$  se tienen un mayor recorrido y por tanto tienden a ocupar mayor espacio en el borde libre.