

## Capítulo 5

# Diseño de la geometría para ensayos experimentales

En los capítulos anteriores se mencionó que el modelo NR en sus orígenes, y luego en sus extensiones (caso entallado, cargas biaxiales, etc.), está formulado para placas infinitas. Como es lógico pensar, a la hora de realizar un ensayo esta condición es imposible de lograr. Sin embargo, tomando ciertas precauciones, se puede conseguir un campo tensional, en una probeta real, que se asemeje lo suficiente al de una placa infinita, de modo que las soluciones para la placa infinita sean aplicables al caso real.

En el presente trabajo, se busca contrastar con datos experimentales los resultados predichos por el modelo NR para cargas biaxiales proporcionales para una placa infinita con una entalla circular. Debido a la dificultad experimental de generar estados biaxiales sobre una placa, se propone trabajar con probetas cilíndricas con entallas también cilíndricas no pasantes.

El objetivo de este capítulo es, entonces, analizar el campo tensional elástico que se produce sobre una probeta cilíndrica con una entalla circular, cuando ésta es sometida a un esfuerzo remoto biaxial. A su vez, se analiza la similitud de dicho campo en las inmediaciones de la entalla, con el que se produciría en las cercanías de un agujero circular pasante, en una placa infinita sometida a las mismas tensiones remotas. De esta manera, se obtendrán pautas para el diseño de la probeta cilíndrica que garanticen un campo tensional lo más parecido posible al de una placa infinita.

Si bien para comparar dos campos tensionales deberían analizarse las tensiones máximas, los gradientes y otras características, por simplicidad se analiza únicamente el factor de concentración de tensiones,  $k_t$ , y cómo se ve

afectado por distintos cambios en la geometría, como son el diámetro de la probeta en su sección mínima  $d_s$ , el diámetro de la entalla  $d_n$  y la profundidad de la misma  $h_n$ .

Al ensayarse probetas cilíndricas, se trata realmente de un problema en tres dimensiones (3D), por lo que en primer lugar es necesario conocer la influencia del espesor sobre el campo tensional de una placa infinita en las otras dos direcciones. Aunque este tema está ampliamente documentado en la literatura [27, 28, 29, 32], los resultados obtenidos ayudarán a dar el siguiente paso en el análisis, el cual es medir la influencia del radio de curvatura de una probeta cilíndrica en el  $k_t$  máximo provocado por la entalla. Esta última cuestión no se encuentra tan estudiada por la comunidad científica, siendo la mayoría de los casos disponibles en la literatura, tubos sometidos a presión [30, 31].

Para realizar los cálculos, se utilizó la técnica de los Elementos Finitos, mediante el *Software* comercial Ansys. Se trabajó con elementos *Solid 187* y distintos tamaños de malla, asegurando en cada estudio la convergencia hacia un valor. Por simplicidad, sólo se evaluaron cargas axiales de tracción, comparándose el valor del factor de concentración de tensiones,  $k_t$ , obtenido en distintos casos.

## 5.1 Análisis de tensiones elásticas en placas con agujero

Al estudiar placas entalladas donde el espesor deja de ser despreciable frente al radio del agujero, el primer efecto importante es que el máximo en la tensión deja de ocurrir sobre el plano medio para trasladarse hacia las inmediaciones de la superficie de la placa. Otro de los efectos es que el máximo en  $k_t$  pasa a ser función de la relación entre el diámetro de la entalla ( $d_n$ ) y el espesor de la probeta ( $t_s$ ) y es superior al factor de concentración de tensiones correspondiente a una placa en estado de tensión plana [27, 28, 29, 32]. Por último, cabe mencionar que para ciertas relaciones  $d_n/t_s$ , el máximo en tensión no ocurre en la misma ubicación que el máximo en deformación, cosa que si sucede para en un estado de tensión plana [29].

Con la finalidad de realizar los cálculos para comprobar la influencia del espesor en  $k_t$ , se tomaron placas con dimensiones de largo y ancho de más de dos órdenes de magnitud superiores al diámetro máximo de la entalla y distintos

espesores. La figura 5.1 muestra un esquema de una placa entallada con las variables analizadas.

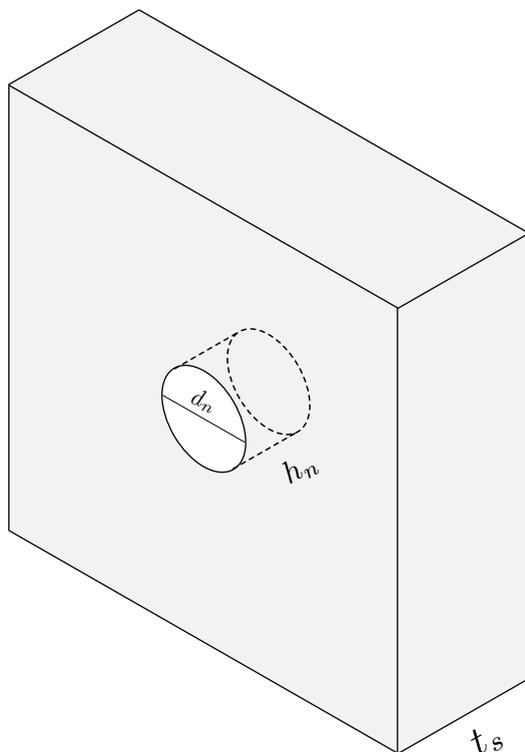
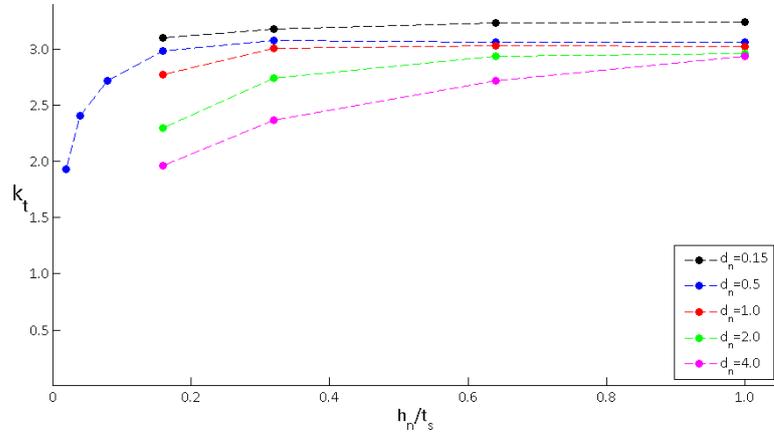


Figure 5.1: Esquema de la placa sobre la cual se analizan las tensiones elásticas mediante la técnica de elementos finitos.

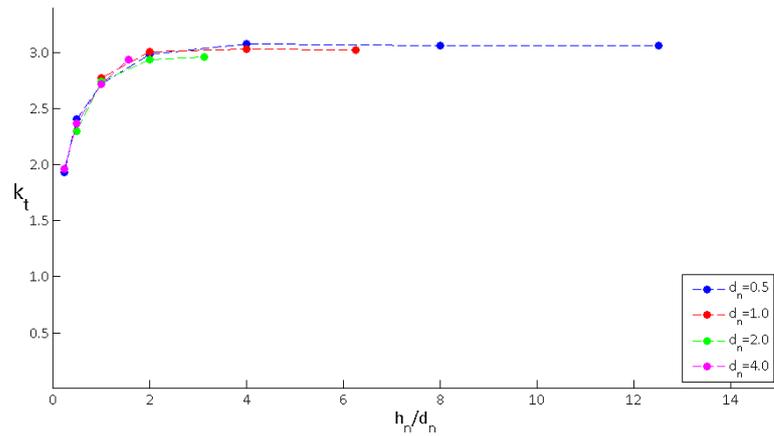
La figura 5.2a muestra un gráfico de  $k_{tmax}$  en función de la relación entre  $h_n/t_s$ , mientras que la figura 5.2b muestra la dependencia de  $k_{tmax}$  con la relación  $h_n/d_n$ . En ambos casos se trata de los mismos puntos, todos ellos calculados para una placa de espesor  $t_s = 6.25mm$ .

En la figura 5.2b se observa que para entallas muy poco profundas, es decir, con baja relación entre  $h_n/d_n$ , el factor de concentración de tensiones  $k_{tmax}$  es cercano a 2. Por otra parte, para valores de  $h_n/d_n$  superiores a  $\approx 2.5$ , el valor alcanzado es prácticamente el mismo que para agujeros pasantes. En la figura 5.2a se muestra que los valores de  $k_{tmax}$  son monótonos crecientes y que para una misma profundidad de entalla, a menor diámetro, mayor  $k_{tmax}$ , lo que concuerda con [28, 32].

Por último, los resultados reflejan que para agujeros pasantes, el menor diámetro produce un efecto de placa gruesa, mientras que para diámetros



(a)  $k_{tmax}$  en función de la relación  $h_n/t_s$ . Espesor de la placa  $t_s = 6.25mm$ .

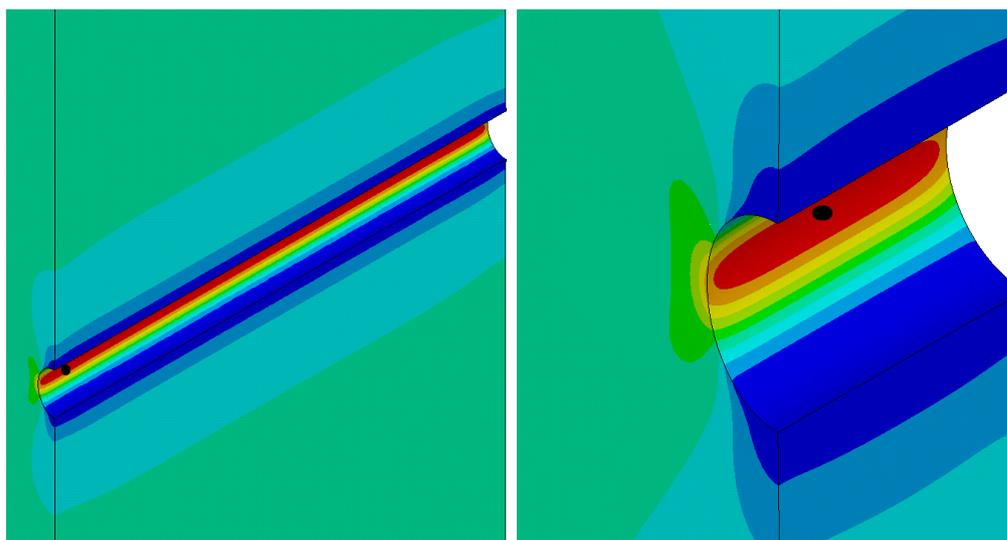


(b)  $k_{tmax}$  en función de la relación  $h_n/d_n$ . Espesor de la placa  $t_s = 6.25mm$ .

Figure 5.2:  $k_t$  máximo para una placa en función de los parámetros geométricos de la entalla ( $h_n$  y  $t_s$ ). Espesor de la placa  $t_s = 6.25mm$

del orden del espesor se produce un efecto de placa fina. Esto se ve reflejado en la posición del máximo en  $k_t$  y coincide con lo reportado por distintos autores [27, 28, 29, 32]. Para placas finas se puede considerar al estado generado como un estado de tensión plana generalizada, por lo que el máximo se encuentra en el plano medio y es muy cercano a 3, el  $k_t$  teórico para estos casos. Para placas gruesas se encuentra cerca de la superficie y es levemente superior. La figura 5.3 muestra una misma placa con dos agujeros de distinto

diámetro. En ambas se observa la posición del máximo en tensiones marcada con un punto negro. En la figura 5.3a, para un diámetro pequeño se ve el efecto de placa gruesa, con la posición del máximo en tensiones cercana a la superficie, mientras que el caso contrario se muestra en la figura 5.3b y se observa al máximo de  $k_t$  en el centro de la placa.



(a) Baja relación  $d_n/t_s$ .  $k_{tmax}$  cerca de la superficie. (b) Alta relación  $d_n/t_s$ .  $k_{tmax}$  en el centro de la placa.

Figure 5.3: Posición de  $k_t$  máximo para una placa con dos entallas de distinto diámetro.

En los casos de los agujeros no pasantes, se observa un efecto similar al de una placa gruesa, con el máximo cercano a la superficie del agujero. Esto se desprende de lo mencionado anteriormente, ya que para agujeros no pasantes no se puede considerar un estado de tensión plana generalizada, debido, entre otras cosas, a la falta de simetría.

De este primer análisis, se puede concluir por un lado, que para estar cerca del valor  $k_{tmax} \approx 3$ , la profundidad de una entalla no pasante ( $h_n$ ) debe ser al menos 2.5 veces mayor que el diámetro ( $d_n$ ). Por otro lado, cuando el agujero es muy pequeño, el máximo en tensiones se eleva, cerca de un 10% por encima de  $k_t = 3$ , factor que se deberá tener en cuenta cuando se analicen los resultados de probetas con esta clase de agujeros.

## 5.2 Análisis de tensiones elásticas sobre probetas cilíndricas entalladas

Siguiendo con el análisis, se simularon los casos de probetas cilíndricas tipo reloj de arena, de distintos diámetros en su sección mínima ( $d_s$ ), y con agujeros cilíndricos transversales en el centro de distintas geometrías ( $d_n, h_n$ ). La figura 5.4 muestra la probeta estudiada, mientras que en la figura 5.5 se observan los  $k_t$  obtenidos para una probeta de diámetro en su sección mínima  $d_s = 17mm$ .

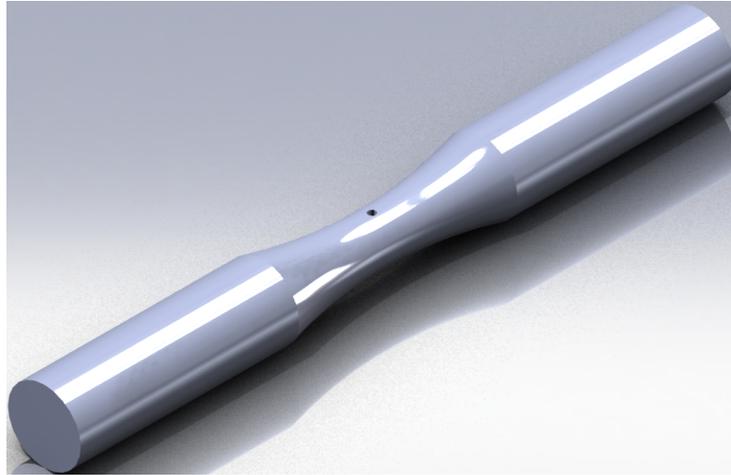


Figure 5.4: Esquema de la probeta sobre la cual se analizan las tensiones elásticas mediante la técnica de elementos finitos.

En la figura 5.5 se ve, para pequeñas profundidades, el efecto de la relación entre la profundidad de la entalla y su diámetro, lo que concuerda con lo visto para placas (figura 5.2a). Por otra parte, para una profundidad  $h_n/d_s = 0.4$ , se observa que los agujeros de mayores diámetros provocan un aumento en la concentración de tensiones mayor. Por último, para agujeros pasantes, se nota una caída en  $k_t$  mayor, a mayor  $d_n$ . Estos últimos dos efectos no se observaron en placas, por lo que no es deseable que ocurran en las probetas cilíndricas a ensayar. El diseño de las mismas debe considerar los factores necesarios para evitar su aparición.

De estos análisis se puede extraer una conclusión muy importante acerca de la profundidad  $h_n$  de la entalla. Esta no debe superar la mitad del diámetro de la probeta, para evitar la reducción en la concentración de tensiones vista

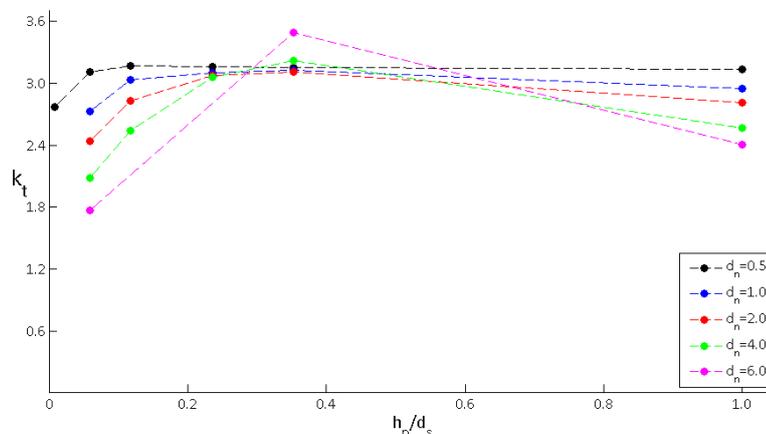


Figure 5.5:  $k_{tmax}$  para una probeta de diámetro  $d_s = 17mm$  con agujeros de distinto diámetro  $d_n$  en función de la relación  $h_n/d_s$ .

en la figura 5.5.

Por otra parte, al tratarse de probetas macizas, al variar el diámetro de la misma, para analizar el efecto de la curvatura, también se modifica el espesor y, como se vio anteriormente,  $k_t$  es sensible a dichos cambios. Para cuantificar el efecto de la curvatura de manera aislada, se dividió al factor de concentración de tensiones de una probeta con distintos agujeros ( $k_{ts}$ ) por aquel encontrado para una placa infinita con los mismos agujeros y con un espesor igual al diámetro de la probeta ( $k_{tp}$ ). La figura 5.6 muestra dicha relación en función del diámetro de la entalla. En la gráfica se presentan tres curvas, correspondientes a tres diámetros (y espesores) de probetas distintas (17, 12.5 y 6.25mm). Cabe destacar que en todos los casos, la profundidad de las entallas  $h_n$  simuladas fueron menores al radio de la probeta, de manera de evitar el efecto del descenso abrupto de  $k_{tmax}$  visto en la figura 5.5.

La figura 5.6 muestra cómo para diámetros de agujeros pequeños respecto al diámetro de la probeta, el comportamiento entre una placa y una probeta cilíndrica es prácticamente igual, mientras que a medida que el diámetro del agujero  $d_n$  crece, las curvas se alejan de 1. Dicho efecto es, lógicamente, más marcado cuanto menor es el diámetro de la probeta, o lo que es lo mismo, mayor relación  $d_n/d_s$ .

En cuanto a la posición del máximo en  $k_t$ , para probetas cilíndricas con entallas no pasantes, se observa siempre un efecto similar al de una placa gruesa. Esto implica que el máximo se encuentra cercano a la superficie y

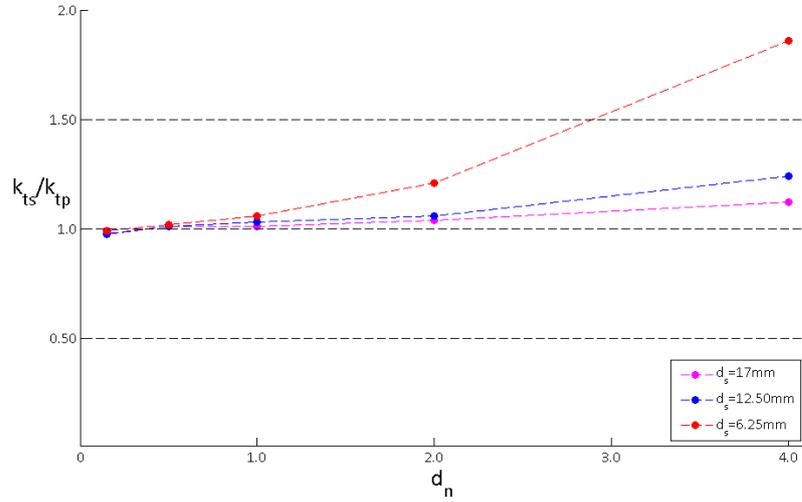
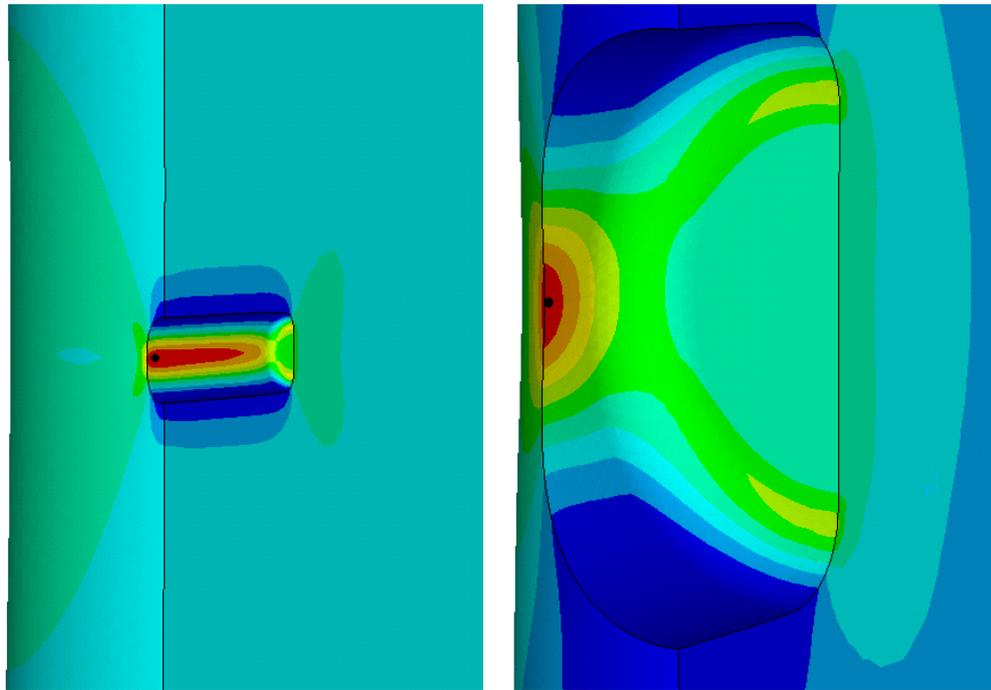


Figure 5.6: Relación  $k_{ts}/k_{tp}$  en función de  $d_n$  para probetas de distintos diámetros.



(a) Diámetro de entalla  $d_n = 0.5\text{mm}$ . (b) Diámetro de entalla  $d_n = 4\text{mm}$ .

Figure 5.7: Posición de  $k_t$  máximo para una probeta de diámetro  $d_s = 6.25\text{mm}$  con dos entallas de distinto diámetro e igual profundidad  $h_n = 2\text{mm}$ .

no sobre la mitad de la profundidad. Las figuras 5.7 muestran una probeta de  $d_s = 6.25mm$  con una entalla de diámetro  $d_n = 0.5mm$  (figura 5.7a) y una entalla de diámetro  $d_n = 4mm$  (figura 5.7b). Ambas entallas tienen la misma profundidad  $h_n = 2mm$ . En ellas la posición del máximo  $k_t$  se encuentra señalada con un punto negro. En ambos casos se halla cerca de la superficie. Luego de este breve análisis sobre la influencia de la geometría de la entalla en el factor de concentración de tensiones, se pueden obtener algunas pautas sobre el diseño de la probeta para que el campo de tensiones sobre ésta se asemeje lo más posible al de una placa infinita:

- Para una entalla no pasante, la profundidad debe ser mayor a  $\approx 2.5$  veces el diámetro de la misma.  $h_n/d_n > 2.5$ .
- Para una entalla en una probeta cilíndrica, la profundidad no debe superar el radio de la probeta.  $h_n < d_s/2$
- El diámetro de la entalla no debe superar el 15% del diámetro de la probeta.  $d_n/d_s < 0.15$ .

