Capítulo 8

Conclusiones y trabajos futuros

A continuación se describirán brevemente los objetivos alcanzados durante el desarrollo del presente trabajo.

8.1 Resolución numérica del modelo NR

Se evaluaron distintos métodos de resolución numérica de ecuaciones integrales, con base en técnicas de integración numérica.

- La implementación de un algoritmo muy sencillo, basado en un método de integración numérica de Newton-Cotes, comprobó lo propuesto por Ioakimidis et al [17, 18] acerca de la influencia de una singularidad logarítmica en la función incógnita.
- Se eligió e implementó de manera correcta un nuevo método de resolución numérica del modelo de Navarro y De los Ríos, utilizando un único intervalo de integración. El mismo se basa en los trabajo de Erdogan et al [25]. Como principal ventaja respecto del método anterior, propuesto por Chaves [13], no se requiere imponer una condición de continuidad de la pendiente del desplazamiento plástico, la cual no está estrictamente relacionada con el modelo NR y en algunos casos provocan un mal condicionamiento del sistema.
- Se analizó el error relativo de cada uno de los métodos propuestos y se estudió de manera numérica la relación entre la posición de la singularidad y los puntos de integración, encontrándose un procedimiento sencillo para optimizar la cantidad de ecuaciones utilizadas.

8.2 Diseño de la probeta

Se evaluaron las tensiones, mediante la técnica de elementos finitos, en una placa con un agujero cilíndrico pasante. El objetivo fue diseñar una probeta cilíndrica con un campo tensional similar al de una placa para luego ser ensayada a tracción y torsión. El análisis se basó en el valor y la posición del máximo en el factor de concentración de tensiones k_t .

- Se comprobó la influencia de la relación entre el diámetro de la entalla d_n y el espesor de una placa t_s en el factor de concentración de tensiones máximo k_t para placas con agujeros pasantes. Para grandes diámetros de entalla el máximo en k_t se encuentra en el centro y el estado tensional se puede considerar como tensión plana generalizada. En el caso contrario, el máximo se encuentra cerca de la superficie, asemejándose más a un estado de deformación plana.
- Para entallas no pasantes se encontró que el máximo en k_t se alcanza a partir de profundidades superiores al doble del diámetro de la entalla, $h_n/d_n > 2 \rightarrow k_t \approx 3$. A su vez, este se encuentra cerca de la superficie.
- Para probetas cilíndricas con entallas iguales a las diseñadas para placas, se encontró que el k_t disminuye con un aumento en la profundidad de la entalla luego de superar el radio de la probeta. Este efecto se ve más marcado a mayor relación d_n/d_s .
- El radio de curvatura de una probeta de diámetro d_s incrementa el valor máximo de k_t respecto del obtenido para una placa con espesor $t_s = d_s$. Para evitar que este incremento supere el 10%, la relación entre el diámetro de la entalla y el diámetro de la probeta no debe superar el 15% ($d_s/t_s < 15\%$).

8.3 Resultados numéricos

Se obtuvieron las predicciones del modelo NR para cargas biaxiales proporcionales sólo para los casos de tracción y torsión. Esto se realizó así ya que los ensayos experimentales se llevaron a cabo bajo esos dos tipos de cargas.

- Tanto para cargas de tracción como para cargas de torsión, el límite a fatiga en función de la relación d_n/D varía suavemente, describiendo

una curva con forma similar a la de otros modelos de predicción de fallo a fatiga.

- Para ambos tipos de cargas, entallas un orden de magnitud menores al tamaño de grano, prácticamente no afectan al límite a fatiga, coincidiendo con lo esperado a priori. En el otro extremo, para agujeros con diámetro mayor a dos órdenes de magnitud el tamaño de grano, el límite a fatiga se estabiliza en un valor $\lambda_{FL} \approx \sigma_{FL}/3$ para tracción y $\lambda_{FL} \approx \tau_{FL}/4$ para torsión.
- El valor del límite a fatiga para probetas con entallas mucho mayores que el tamaño de grano depende de la relación entre los límites de fatiga a torsión τ_{FL} y tracción σ_{FL} , encontrándose que para relaciones τ_{FL}/σ_{FL} menores, éste crece.
- Los puntos de iniciación y direcciones de grietas predichos, tanto para entallas pequeñas como para grandes en comparación con el tamaño de grano, son muy estables, variando poco en función del diámetro de la entalla. Sin embargo, en la zona de transición entre ambos grupos, la variación es muy pronunciada, dando lugar a valores tal vez inesperados.
- Dado que se desconoce el diagrama de Kitagawa-Takahashi del material analizado, en su lugar se utilizó una aproximación propuesta por Vallellano et. al.[20]. La misma se basa en dos parámetros, a_0 y f , los cuales tampoco se conocen con exactitud para este material. Esto último llevó a analizar la sensibilidad del modelo NR a cambios en ambos parámetros, demostrando no ser muy sensible a ellos.

8.4 Resultados experimentales

Se realizaron curvas SN para ensayos a tracción y torsión. Sobre estos datos se calculó el límite a fatiga en cada uno de los casos, así como también los puntos de inicio alrededor de la entalla y las direcciones.

- La predicción del modelo NR sobre el límite a fatiga para ambos tipos de carga es por demás conservativa, estando muy por debajo de los valores obtenidos experimentalmente.

- En ambos casos, el punto de iniciación fue predicho correctamente estando este dentro del error experimental. Sin embargo, no fue así con las direcciones de propagación.
- Se comprobó la predicción del modelo NR únicamente para los puntos de iniciación y direcciones de grietas obtenidos experimentalmente, encontrándose valores del límite a fatiga mucho más cercanos a los experimentales.
- El punto de inicio de grieta para los ensayos a tracción se da en la zona media de la profundidad de la entalla, cercano a la zona de máxima tensión elástica predicha mediante la técnica de elementos finitos.

8.5 Trabajos futuros

Las distintas propuestas de continuación del presente trabajo se pueden dividir claramente en dos campos: *Teórico* y *Experimental*.

Dentro de las opciones de trabajos a futuros enmarcadas en el campo teórico, también se puede distinguir aquellas inherentes a mejorar el desempeño del modelo de las relacionadas con alguna modificación al mismo. En el primer grupo se encuentran:

- Estudio de las tensiones elásticas en la línea de grieta para diversos ángulos de iniciación y propagación θ y θ_1 , para distintas combinaciones de cargas de tracción y torsión, σ_y^∞ y τ^∞ .
- Estudio de posibles errores numéricos, reflejados en predicciones erróneas de las direcciones de iniciación y propagación.
- Demostrar teóricamente la relación entre el error del método de resolución de ecuaciones integrales propuesto y la posición de la singularidad logarítmica.

Algunas de las posibles modificaciones al modelo podrían ser:

- Introducir en el modelo NR la influencia de la anisotropía a escala micrométrica de los materiales.
- Introducir en el modelo NR la influencia de los planos de deslizamiento preferentes de cada uno de los granos afectados por la grieta.

Dentro de los trabajos a futuro relacionados con la parte experimental, se encuentran:

- Realizar ensayos con agujeros con una relación d_n/D alta, de manera de comprobar si la tendencia final de la predicción del modelo NR es correcta.
- Realizar ensayos con otro material, con distinta relación τ_{FL}/σ_{FL} , lo más baja posible, de manera de comprobar si cambian la tendencia final y la dirección de propagación predichas por el modelo NR.
- Realizar el diagrama de Kitagawa-Takahashi del material estudiado.
- Comparar las predicciones del modelo NR para cargas biaxiales proporcionales con ensayos experimentales.