

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Cálculo a Fatiga de uniones soldadas.

En el contexto en el que vamos a hablar se debe entender el término fatiga como el proceso por el que una estructura o componente mecánico puede fallar bajo la acción de solicitaciones de tipo cíclico, siendo dichas solicitaciones de menor magnitud que las que provocan el fallo de dicha estructura o componente bajo la acción de cargas estáticas. El fallo por fatiga se produce por la aparición de una grieta en un determinado punto del sólido y su posterior crecimiento. Al ir creciendo la grieta, la capacidad portante del componente se va viendo reducida, hasta que se alcanza un tamaño crítico de grieta para el que la capacidad portante del componente no es suficiente para soportar las solicitaciones, produciéndose el fallo de éste.

El daño del material comienza en la estructura cristalina y se hace visible en una etapa posterior mediante deformación plástica, formación de microgrietas, coalescencia de las mismas y propagación de la grieta principal. Por tanto, la fatiga es un fenómeno de tipo local, pues la grieta se inicia en algún punto en el que el estado tensional es más elevado, y por tanto el fallo por fatiga dependerá del estado tensional que exista en cada punto concreto. Así, el diseño de un componente que va a estar sometido a solicitaciones variables es un problema de detalle ya que uno de los factores que más afectan a la resistencia a fatiga de un componente será la presencia de concentradores de tensión. Por esto, en el diseño, hay que evitar en la medida de lo posible, las esquinas entrantes, los cambios bruscos de geometría, etc., que pueden producir altas concentraciones de tensión.

El estudio de la resistencia a fatiga en componentes soldados es incluso más complicado. El proceso de soldadura afecta considerablemente al material debido al proceso de calentamiento, fusión y la consiguiente solidificación y enfriamiento, el proceso de fusión y el material de aporte, resultando un material heterogéneo. El cordón de soldadura representa en muchos casos un cambio local de geometría muy brusco, que produce una severa concentración de tensiones, siendo además una zona en la que existe un alto nivel de tensiones residuales originadas por el propio proceso de soldadura. Además la posible presencia de inclusiones, poros, cavidades, mordeduras, entallas y otros defectos en el cordón de soldadura también como consecuencia del proceso de soldeo, pueden acentuar la concentración de tensiones producida por este cambio brusco de geometría que supone el propio cordón.

Las tensiones residuales en la zona del cordón de soldadura y en la dirección paralela al mismo son en general de tracción y del orden del límite elástico del material en las cercanías del cordón, disminuyendo bruscamente a medida que nos alejamos de la soldadura. Eso tiene unas consecuencias muy importantes en lo referente a la resistencia a fatiga del componente soldado. Aunque la tensión media de la carga pueda ser de compresión, las tensiones residuales pueden originar que existan localmente tensiones de tracción, pudiéndose originar el fallo por fatiga en las proximidades del cordón de soldadura. Por tanto, debido a la presencia de tensiones residuales del orden del límite elástico, todas las solicitaciones que tienen el mismo rango de tensión, pero diferente tensión media, producen en las proximidades del cordón de soldadura básicamente el mismo estado tensional. De esta manera, en componentes soldados, el rango de

tensiones es el que controla el fallo por fatiga y la tensión media pasa a jugar un papel secundario.

La combinación de las tensiones residuales con las severas concentraciones de tensión que se producen en la zona del cordón de soldadura, hace que los componentes soldados sean elementos muy sensibles a la fatiga, y que haya que poner especial cuidado en el diseño de estos cuando van a ser sometidos a cargas variables.

## 1.2 Categorías de tensiones

En los análisis de fatiga de uniones soldadas se usan principalmente tres categorías de tensiones distintas. El uso de cada una dependerá del tipo de enfoque elegido para llevar a cabo la predicción de la vida a fatiga. Estas tres categorías de tensiones son:

- **Tensión nominal**,  $\sigma_n$ : Las tensiones nominales son aquellas que se calculan generalmente usando las fórmulas elementales de Resistencia de Materiales (Figura 1.2.1). Proceden directamente de las fuerzas y momentos externos o de las tensiones nominales en la sección crítica bajo la consideración de que es una distribución de tensiones constante o linealizada. Se calculan en la región que contiene el detalle soldado, pero excluyendo cualquier influencia de la unión en la distribución de tensiones ya que las tensiones calculadas mediante las fórmulas elementales de Resistencia de Materiales aplicadas a modelos de barras no tienen validez en el entorno de uniones, empotramientos, etc.

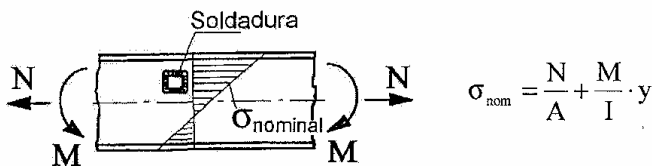


Fig 1.2.1

- **Tensión estructural**,  $\sigma_s$ : En términos generales, las tensiones estructurales, también llamadas tensiones geométricas, incluyen tanto los efectos de la tensión nominal, como los efectos de las discontinuidades estructurales (Figura 1.2.2).

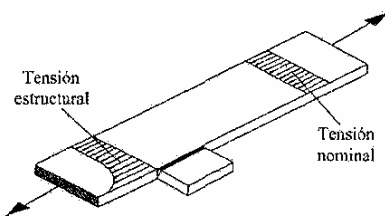


Fig 1.2.2

En la zona de la discontinuidad, la tensión estructural debe ser mayor que la tensión nominal, aunque con valores finitos (acotados). Sin embargo, en las zonas alejadas, la discontinuidad apenas tiene influencia en el campo tensional, por lo que las tensiones nominales y las estructurales son equivalentes.

Generalmente, no es factible la determinación de las tensiones estructurales por métodos simplificados, siendo necesario recurrir a medidas experimentales, o a la aplicación de modelos continuos y métodos numéricos (análisis de elementos finitos, AEF).

- **Tensión de entalla**,  $\sigma_{ln}$ : La tensión local o de entalla (en inglés ‘local notch’) es la tensión total que existe en el fondo de una entalla o una región de concentración de tensiones equivalente como puede ser el borde de la soldadura. En tales localizaciones se produce una distribución de tensiones no lineal a través del espesor de chapa, (Fig. 1.2.3).

La tensión de entalla,  $\sigma_{ln}$ , consta de tres partes: la tensión de membrana,  $\sigma_m$ , la tensión de flexión,  $\sigma_b$ , y el pico no lineal de tensión debido al efecto de entalla provocado por la soldadura,  $\sigma_{nlp}$ . Este efecto de entalla depende del tamaño y la forma de la soldadura y de la geometría del borde de la soldadura.

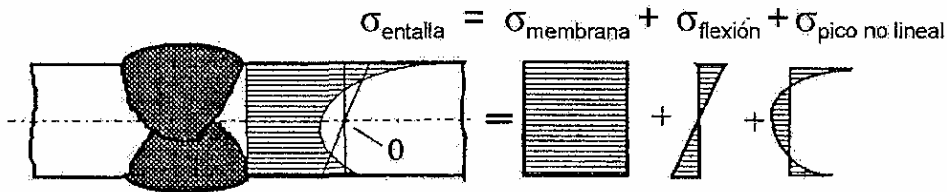


Fig 1.2.3

En la Figura 1.2.4 pueden observarse estas tensiones comparativamente si tomamos como ejemplo el borde de una soldadura en ángulo.

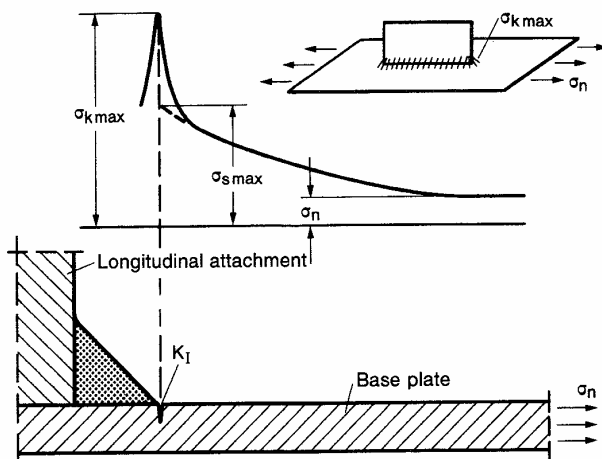


Fig. 1.2.4

Se observa cómo a una cierta distancia del borde de la soldadura, éste no tiene influencia en el estado tensional y se tiene únicamente tensión nominal,  $\sigma_n$ , que es uniforme en toda la chapa coincidiendo con la tensión estructural,  $\sigma_s$ , en las zonas alejadas del borde de la soldadura. A medida que nos vamos acercando, la tensión estructural, que es sensible a discontinuidades estructurales, sufre un incremento con respecto a la nominal. Finalmente se observa cómo en una región muy próxima se tiene la tensión de entalla,  $\sigma_{ln}$ , que produce el pico no lineal de tensión siendo ésta la distribución de tensiones real que se tiene en el borde de la soldadura. El factor de

intensificación de tensiones (FIT),  $K_I$ , depende inicialmente de la tensión de entalla máxima y en el rango elástico. Entre en FIT y los valores de tensión comentados, puede establecerse una relación de proporcionalidad:  $K_I \propto \sigma_{k \max} \propto \sigma_{s \max} \propto \sigma_n$ .

La tensión estructural incluye los efectos de concentración de tensiones del detalle en si mismo pero no el pico no lineal de tensión debido al efecto de entalla que supone el borde de la soldadura. La tensión estructural resultante evaluada en el borde de la soldadura, lugar de iniciación de la grieta (punto caliente (PC) o del inglés hot spot), es la llamada tensión estructural de punto caliente (hot spot stress, HSS), denotada en la Fig. 1.2.4 como  $\sigma_{s \max}$  (también se denota en la bibliografía y más adelante en este documento como  $\sigma_{PC}$  o  $\sigma_{HS}$ ) y es un valor ficticio que dependerá del método de cálculo utilizado.

### 1.3 Introducción a los diferentes enfoques y al uso de Análisis de Elementos Finitos

Para el diseño a fatiga de una unión soldada, el Eurocódigo 3 contempla dos procedimientos de análisis, uno basado en las tensiones nominales, y otro en la tensión geométrica de punto caliente. El primero de estos enfoques resulta conceptualmente claro, pero su aplicabilidad a una construcción soldada compleja es dudosa ya que, como se menciona en el apartado anterior (1.2), las tensiones nominales no resultan fáciles de calcular en estos casos con un modelo continuo, incluso a veces carecen de sentido, siendo su fiabilidad cuestionable si se utilizan las fórmulas clásicas de Resistencia de Materiales. El segundo enfoque es más apropiado para el análisis de estructuras soldadas complejas empleando procedimientos numéricos (elementos de contorno o elementos finitos). Sin embargo, tiene la dificultad asociada a la propia definición de punto caliente y a la existencia de numerosos métodos para su determinación.

Tradicionalmente, el análisis de la vida a fatiga de uniones soldadas estaba basado en el uso de tensiones nominales y categorías de uniones soldadas. Un tipo de detalle en particular se asigna a una categoría de fatiga con una curva S-N dada que generalmente se derivan de publicaciones de datos de ensayos de fatiga sobre especímenes soldados representativos de una categoría de unión soldada y están expresadas en términos de las tensiones nominales. Este enfoque de la tensión nominal se usa en las recomendaciones de diseño a fatiga del Instituto Internacional de la soldadura (IIS) pero ignora las variaciones dimensionales de un detalle estructural en particular, lo cual es un inconveniente obvio. Además la forma de un componente soldado es frecuentemente muy compleja y, por tanto, también lo es la determinación de la tensión nominal incluso usando análisis de elementos finitos (AEF).

En el contexto de la predicción del fallo a fatiga por el crecimiento de grieta desde el borde de la soldadura, el enfoque de la tensión estructural va un paso más allá. Aquí, como se describe en 1.2, la tensión calculada tiene en cuenta las dimensiones del detalle y está basado en las tensiones adyacentes al cordón de soldadura. La tensión estructural resultante evaluada en el borde de la soldadura, lugar de iniciación de la grieta o punto caliente, es la llamada tensión estructural de punto caliente.

Los efectos de concentración de tensiones del pico no lineal de tensión debido al efecto de entalla provocado por el borde de la soldadura, excluidos de la tensión

estructural, están incluidos en curvas S-N de punto caliente que están determinadas experimentalmente. Excluir el efecto de este pico no lineal de tensiones es razonable, ya que la geometría exacta de la soldadura no se conoce en la etapa de diseño y además tiene una gran dependencia con la malla si se usa un AEF para calcularlo. La variación en la geometría local del borde de la soldadura es una de las principales razones de la dispersión en los resultados de los ensayos a fatiga. Una única curva S-N debe ser suficiente para la mayoría de las formas de discontinuidades estructurales, suponiendo que la geometría del borde de la soldadura es siempre la misma y esta es una de las grandes ventajas de este enfoque.

Sin dejar de tener en cuenta lo mencionado anteriormente, la principal razón para el uso del enfoque de la tensión estructural de punto caliente es la disponibilidad de ordenadores y software con la capacidad para realizar un AEF lo suficientemente detallado. Este enfoque es también una herramienta útil para validar el diseño de estructuras prototipo permitiendo elegir la localización más conveniente de las bandas extensométricas. Además, los AEF hacen posible producir formulaciones paramétricas para una estimación más sencilla de tensiones estructurales en varios puntos calientes.

La primera norma general de diseño en incluir la tensión estructural además de la nominal fue la “European pre-standard ENV 1993-1-1” (Eurocódigo 3) pero sólo se dieron recomendaciones muy limitadas. Más tarde, el Instituto Internacional de la Soldadura (IIS) publicó nuevas recomendaciones que comprendían cuatro enfoques de diseño a fatiga distintos, basados cada uno de ellos en :

- Tensiones nominales
- Tensiones o deformaciones estructurales de punto caliente
- Tensiones o deformaciones locales de entalla
- Mecánica de la fractura

Varias organizaciones, como el IIS, con representaciones de las Sociedades de Soldadura Nacionales de todo el mundo, o el Eurocódigo 3, han realizado un gran esfuerzo con el objetivo de hacer un seguimiento de los procesos en este campo, condensar información y proporcionar recomendaciones y normas

Un inconveniente que se encuentra frecuentemente en las normas de componentes y estructuras soldadas es que no están en consonancia con los desarrollos actuales en el uso de métodos numéricos para el diseño y cálculo de tensiones, como por ejemplo el análisis de elementos finitos (AEF) que se usa en un amplio rango de industrias. Muchas de estas normas fueron desarrolladas hace 30 años y el análisis estructural se basaba principalmente en el uso de formulación estándar y la experiencia. Por tanto, era razonable basar el diseño a fatiga en las tensiones nominales. Sin embargo, actualmente, los métodos numéricos de cálculo de tensiones tales como el AEF se usan frecuentemente y por tanto se necesita una guía general para su uso en cálculos de fatiga en conjunción con las normas de diseño basadas en las tensiones nominales. El IIS ha dedicado mucho esfuerzo en desarrollar estas guías. Sin embargo, esto representa una solución provisional ya que también se tiene como objetivo desarrollar métodos que cada vez saquen un mayor partido al potencial de los AEF.

Los AEF permiten modelar adecuadamente la geometría y las dimensiones de los detalles soldados obteniendo así una estimación más precisa de la concentración de tensiones que provocan, además pueden proporcionar datos que ayuden a complementar los obtenidos de ensayos de fatiga para la obtención de curvas S-N de diseño. En este contexto se desarrolla el enfoque de tensiones estructurales (o enfoque de la tensión de punto caliente) ya que la distribución de tensiones obtenida mediante AEF en la zona próxima al cordón de soldadura, donde tiene influencia el efecto de entalla local, depende mucho del refinado de la malla en esta zona.

La distinción entre las tensiones nominales y locales no es siempre clara, pero el enfoque de diseño alternativo basado en las tensiones estructurales permite una mejor utilización de los métodos de análisis de tensiones modernos. Otras limitaciones apuntan a la necesidad de maneras de modelar el proceso de fatiga, más que simplemente relacionar las tensiones aplicadas y la vida a fatiga como las curvas S-N. En particular, no se tiene lo suficientemente en cuenta las diferencias (geometría, proceso de soldeo, material, defectos) entre el detalle soldado bajo consideración y los usados en los ensayos para generar las curvas S-N. Además, las curvas S-N no proporcionan ninguna información sobre el proceso de daño por fatiga, sólo se representa la vida a fatiga total. Los enfoques locales basados en la tensión o deformación de entalla o en la mecánica de la fractura intentan modelar el proceso de fatiga completo considerando la influencia de cualquier detalle significativo.

Como ya se ha dicho, el fallo a fatiga de elementos estructurales comprendiendo la iniciación de la grieta, su propagación y la fractura final es un proceso muy localizado. Por tanto, los parámetros geométricos locales, la carga y el material tienen una influencia mayor en la resistencia y la vida a fatiga de los elementos estructurales. Deben tenerse en cuenta de la manera más próxima a la realidad posible cuando se lleva a cabo los cálculos de resistencia a fatiga y especialmente cuando se optimiza el diseño con respecto a la misma.

Existen diferentes puntos de vista entre los expertos sobre el grado de detalle a tener en cuenta con respecto al enfoque a adoptar para el cálculo de la resistencia a fatiga basado únicamente en las tensiones estructurales o adicionalmente en las tensiones o deformaciones de entalla o incluso teniendo en cuenta la propagación de grieta. No es posible dar una respuesta general ya que la elección del enfoque a adoptar depende de las circunstancias de cada caso concreto. Generalmente se requiere un análisis de tensiones estructurales porque la mayoría de parámetros locales tales como las tensiones de entalla o los factores de intensificación de tensiones están basados en las tensiones estructurales. Dar el paso del enfoque de tensiones estructurales a enfoques locales está justificado cuando los parámetros geométricos locales de entalla están bien definidos o si la dispersión de estos parámetros puede obviarse considerando el caso más desfavorable.

## **1.4 Objetivos**

En primer lugar, se pretende repasar la historia y bibliografía de los métodos de cálculo de vida a fatiga para uniones soldadas desarrollados bajo cada uno de los tres enfoques posibles para ello hasta la actualidad, realizando una descripción general de cada enfoque.

## Capítulo 1: Introducción

Nos centraremos en el enfoque de tensiones estructurales, describiendo los principales métodos existentes para el cálculo de la tensión de punto caliente a partir del cálculo numérico de tensiones mediante un AEF, estos son:

- Extrapolación lineal de tensiones superficiales
- Método de Dong
- Método de Xiao y Yamada

Se pretende recoger en un mismo documento los desarrollos teóricos y metodológicos de los tres principales métodos de cálculo de la tensión de punto caliente en el borde de una soldadura desarrollados hasta ahora.

Posteriormente, se aplicarán estos tres métodos a una unión a tope de pequeño espesor de la que se realizará un modelo de elementos finitos. Se estudiará, para esta unión soldada en concreto, la aplicabilidad y conveniencia de los diferentes métodos de cálculo de la tensión de punto caliente en el borde de la soldadura. Adicionalmente, se calculará el efecto que tiene sobre la vida a fatiga de dicha unión, un posible desalineamiento angular entre las partes soldadas.

La utilidad final de este proyecto se plasmará en las simulaciones de las soldaduras a tope para la fabricación de componentes aeronáuticos que se desarrollarán en el Proyecto del 6º Programa Marco VERDI. En este proyecto se realizan diversas simulaciones de los distintos procesos que sufren algunos componentes aeronáuticos que se fabrican con Inconel en la turbina de baja de los turbopropulsores. Estos componentes, sometidos a altas cargas mecánicas y temperaturas considerablemente altas (~650°C) se fabrican íntegramente mediante soldaduras a tope y se deben calcular a fatiga.

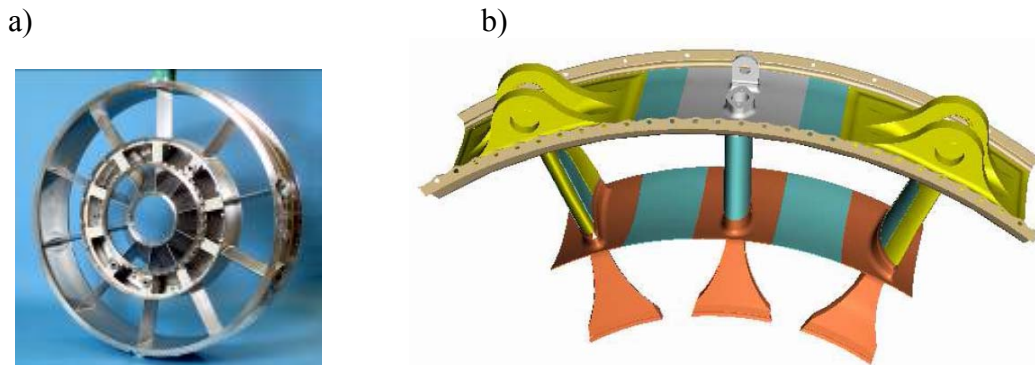


Fig. 1.4.1. Turbina de baja de turbopropulsor: a) fotografía real B) representación esquemática donde puede observarse la soldadura a tope de los alabes.

Para conseguir un ensamblamiento con soldaduras exclusivamente a tope, sobre algunas piezas se realizan deposiciones de metal (procedimiento completamente equivalente a una soldadura) que finalmente generan una protuberancia sobre la cual se puede soldar a tope. Sin dicha protuberancia, la soldadura de una chapa en el plano perpendicular a la primera sería una soldadura en ángulo.



Fig. 1.4.2. Protuberancia creada mediante deposición de metal.

Tanto la deposición del metal fundido, como (y sobre todo) la propia soldadura en sí, dejan sobre el metal base un estado residual de tensiones y distorsiones. Las distintas soldaduras, que secuencialmente se van realizando, hacen que progresivamente aparezcan (inevitablemente, en la mayoría de los casos) desajustes geométricos, tanto lineales como angulares que hacen que estas uniones a tope tengan finalmente una concentración extra de tensiones y una menor vida a fatiga. Estos pequeños defectos geométricos, en particular el desalineamiento angular, se estudiarán en este proyecto, mediante distintos enfoques.

### 1.5 Descripción de los puntos a tratar

El presente documento consta de 8 capítulos cuyo contenido se describe brevemente a continuación:

Capítulo 1: Introducción. Tras hacer algunos comentarios generales sobre el cálculo a fatiga y, más concretamente, el cálculo a fatiga en uniones soldadas, se describen las categorías de tensiones sobre las que se va a hablar en todos los temas tratados a continuación. A continuación se introducen los diferentes enfoques existentes mencionando la posibilidad de usar análisis de elementos finitos. Para finalizar, se exponen los objetivos y aplicaciones a desarrollar.

Capítulo 2: Diferentes enfoques para la predicción de la vida a fatiga en uniones soldadas. Se describen los enfoques existentes para el cálculo a fatiga de uniones soldadas, repasando su historia y bibliografía. Los diferentes enfoques están subdivididos en enfoques globales, estructurales y locales según se incremente el grado de detalle que se tiene en cuenta en el cálculo de las tensiones.

Capítulo 3: Análisis de fatiga mediante el enfoque de la tensión estructural de punto caliente. A partir de este capítulo nos centraremos en el enfoque de la tensión estructural de punto caliente. En éste se hacen algunos comentarios sobre su campo de aplicación y se describen los tipos de punto caliente y los factores de concentración de tensiones con los que vamos a trabajar.

Capítulo 4: Determinación experimental de la tensión estructural de punto caliente. Se detalla la metodología a seguir para la determinación experimental de la tensión estructural de punto caliente, generalmente basada en el uso de bandas extensométricas, según el tipo de punto caliente que se tenga bajo estudio.



## *Capítulo 1: Introducción*

Capítulo 5: Determinación de la tensión estructural en el borde la soldadura usando extrapolación. La extrapolación de los valores de tensión a cierta distancia del cordón de soldadura fue el primer método desarrollado para la determinación de la tensión de punto caliente. Generalmente estos valores de tensión necesarios para la extrapolación se conocen a partir de un análisis de elementos finitos. En este capítulo se describe como se deben llevar a cabo el modelado y mallado para estos análisis dependiendo del tipo de punto caliente.

Capitulo 6: Cálculo de la tensión estructural de punto caliente según Dong. Se describe detalladamente otro de los métodos de mayor uso para el cálculo de la tensión estructural de punto caliente. Para ello, Dong considera que la distribución de tensiones estructural debe satisfacer las condiciones de equilibrio en el plano hipotético de crecimiento de grieta y en un plano de referencia cercano, donde la distribución de tensiones local es conocida a priori mediante elementos finitos.

Capitulo 7: Cálculo de la tensión estructural de punto caliente según Xiao y Yamada. Este método desarrollado por Xiao y Yamada está basado en el cálculo del valor de la tensión estructural a 1mm por debajo de la superficie en la dirección correspondiente al camino esperado de crecimiento de grieta. Esta dirección se supone que será, partiendo del borde de la soldadura, perpendicular a la superficie a través del espesor de chapa. En este enfoque se obtiene una relación entre esta tensión estructural calculada 1 mm bajo la superficie sobre el camino esperado de grieta y la vida a fatiga.

Capitulo 8: Resultados. En este capítulo se aplicarán los tres principales métodos de cálculo de tensión de punto caliente (Extrapolación superficial, Dong y Xiao-Yamada) a una pieza soldada mediante soldadura a tope. Se realizarán modelos en 3D y 2D con diferentes desalineamientos angulares y se analizarán los resultados obtenidos en cada caso.

Capitulo 9: Conclusiones y desarrollos futuros. Breve descripción del trabajo realizado y posibles vías de desarrollo para trabajos posteriores.