

## 5. Determinación de la tensión estructural de punto caliente usando extrapolación.

### 5.1. Sobre el uso de análisis de elementos finitos en la determinación de la tensión estructural

En la fase de diseño, el análisis de elementos finitos (AEF) es una herramienta ideal para determinar la tensión estructural de punto caliente. Es también útil para establecer una formulación paramétrica de FCT en varios tipos de detalles estructurales, como se ha mencionado anteriormente.

Generalmente se asume comportamiento lineal elástico del material ya que sólo están permitidas plastificaciones localizadas por la mayoría de las normas de diseño (Hobbacher, 1996). Como se requiere el rango de tensiones estructurales,  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ , deben analizarse al menos dos casos de carga, obteniendo las tensiones máximas y mínimas en el detalle en cuestión.

Los análisis de grandes estructuras con varios PC potenciales pueden llevarse a cabo en dos etapas. Primero, se usa un modelo con malla gruesa para identificar las áreas que contienen un PC. Después, se crean submodelos para cada una de esas áreas usando los desplazamientos o las fuerzas nodales del modelo original como cargas en el contorno de los submodelos. Otra posibilidad es refinar la malla original en las regiones de PC obtenidas.

Se debe tener cuidado para evitar malas interpretaciones de los resultados de elementos finitos, por tanto, hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

- Generalmente los postprocesadores muestran la tensión nodal en el borde de la soldadura como una media de los dos elementos localizados a cada lado. Para el postprocesamiento es conveniente seleccionar sólo aquellos elementos de interés enfrente de la soldadura.
- Deben obtenerse resultados que excluyan el pico de tensiones no lineal incluso en zonas muy próximas al borde de la soldadura. Este será el caso si se usan elementos de lámina ya que excluyen automáticamente este tipo de tensiones.
- En algunos casos, no se modela la geometría de la soldadura. Se debe seleccionar un punto apropiado para representar el borde de la soldadura para realizar la extrapolación de tensiones. Frecuentemente se elige el punto estructural de intersección porque la tensión en la posición del borde de la soldadura sería no conservativa.

#### 5.1.1 Determinación directa en el borde de la soldadura.

Con un módulo de postproceso adecuado, los AEF avanzados deben ser capaces de resolver la distribución de tensiones lineal a través del espesor de chapa directamente en la sección del borde de la soldadura en el caso de puntos calientes tipo "a". Esto es particularmente adecuado para mallas con varios elementos colocados a lo

largo del espesor de la chapa. Algunos programas ofrecen una linealización de los resultados de tensiones de los cuales pueden ser aplicados a la fila seleccionada de elementos directamente enfrente del borde de la soldadura. Sirva como ejemplo para este caso el método desarrollado por Dong (2001) que se verá más adelante.

## 5.2 Metodología para el uso de la extrapolación.

En general, los módulos de postproceso no dan unos resultados de tensiones estructurales válidos directamente en el borde de la soldadura. Por tanto, como alternativa, pueden ser usadas técnicas de extrapolación similares a aquellas aplicadas a las medidas de deformaciones. En este contexto si el modelo de elementos finitos de la unión soldada considerado incluye la soldadura, los puntos de extrapolación se miden desde el borde de ésta. Sin embargo, si el modelo está formado por elementos de lámina y la soldadura entre las partes unidas no está incluida, se recomienda medirlos desde el punto de intersección de los elementos que representa esas partes, para evitar resultados no conservativos. Las tensiones se obtienen en los puntos de integración de los elementos adyacentes, o en los nodos a cierta distancia del borde de la soldadura. La malla debe ser refinada cerca del punto caliente de manera que la tensión y el gradiente de tensiones puedan ser determinados con precisión comparable a las medidas de deformaciones usadas para la determinación experimental de la tensión de punto caliente.

Estrictamente hablando, el método correcto sería extrapolar primero cada componente de tensión hasta el borde de la soldadura y después resolver las tensiones principales y sus direcciones en el punto caliente. Sin embargo, en la práctica, es suficiente extrapolar la tensión principal máxima o la componente de tensión normal al borde de la soldadura, según la que sea dominante de acuerdo con la sección 3.3.

Como las tensiones en los AEF dependen de la densidad de la malla y las propiedades de los elementos, es necesario seguir algunas pautas para la elección del tipo de elementos y su tamaño así como en la evaluación de las tensiones en los puntos de extrapolación. En los AEF de grandes estructuras no es práctico usar mallas finas en las proximidades del borde de la soldadura. Puede ser usada una malla relativamente gruesa sólo si ciertas condiciones se satisfacen, si no deberá ser más fina. Estas dos estrategias de mallado están recogidas en la tabla 5.1 y en la figura 5.2.1

Tabla 5.1. Guía para el mallado y la evaluación de la TPC usando extrapolación de las tensiones en la superficie (Njemi, 2006)

Types of model and hot spot:	Relatively Coarse Models		Relatively Fine Models	
	Type a	Type b	Type a	Type b
Element Size	Shell $t \times t$ , max $t \times L/2^*$	10mm×10mm	$\leq 0.4t \times t$ or $0.4t \times L/2^*$	$\leq 4\text{mm} \times 4\text{mm}$
	Solid $t \times t$ , max $t \times L^*$	10mm×10mm	$\leq 0.4t \times t$ or $0.4t \times L/2^*$	$\leq 4\text{mm} \times 4\text{mm}$
Extrapolation Points	Shell 0.5t / 1.5t (mid-side points)+	5mm / 15mm (mid-side points)	0.4t / 1.0t (nodal points)	4mm / 8mm / 12mm (nodal points)
	Solid 0.5t / 1.5t (surface centre)	5mm / 15mm (surface centre)	0.4t / 1.0t (nodal points)	4mm / 8mm / 12mm (nodal points)

\*) L = attachment length (attachment thickness + 2 weld leg lengths), see Fig. 6.2; also section 4.4(a)

+) surface centre at transverse welds, if the weld below the plate is not modelled (see Fig.4.3c and d)

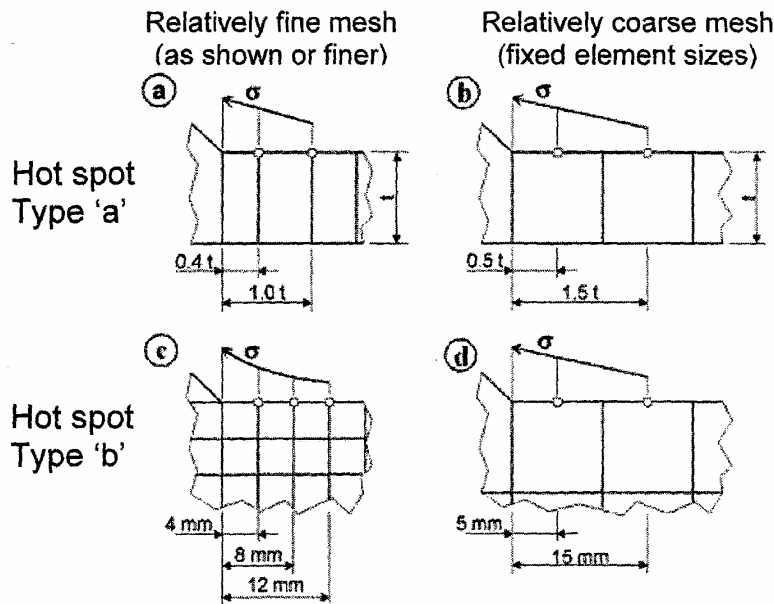


Fig 5.2.1 Pautas para el mallado y la evaluación de las tensiones usando extrapolación superficial.(Niemi, 2006)

A veces dos soldaduras se encuentran muy próximas y ninguna de las extrapolaciones mencionadas anteriormente son posibles. Entonces debe diseñarse una malla lo suficiente fina, de manera que la tensión estructural de punto caliente pueda ser determinada por ajuste de una curva usando las tensiones de al menos tres puntos.

La malla para puntos calientes tipo 'a' debe diseñarse de manera que permita la determinación de la tensión estructural mediante extrapolación. Por ejemplo, la malla mostrada más adelante en la figura 5.3.2 es apropiada sobre todo para cargas longitudinales de membrana. Si algunas cargas estuviesen actuando de manera que provocasen una flexión en la chapa base, debe diseñarse una malla con una estructura parecida a un sistema de coordenadas polar alrededor del borde de la soldadura, como se muestra en la figura 5.2.2.

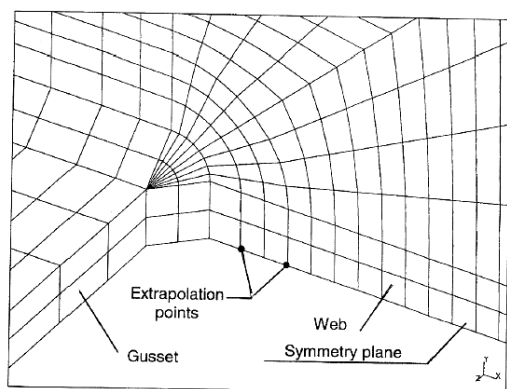


Fig 5.2.2 Región de PC en un modelo de EF

### 5.3 Uso de una malla gruesa para el análisis de puntos calientes tipo 'a'

Varias sociedades de clasificación (Fricke (2002), 12, 13, 17) han desarrollado técnicas de extrapolación que permiten el uso de mallas relativamente gruesas (Fig.5.3.1 y Tabla 5.1) .Éstas serán suficientes cuando se satisfagan las siguientes condiciones:

- No habrá otras discontinuidades importantes cercanas.
- El gradiente de tensiones cerca del punto caliente no será extremadamente alto.
- Se usen elementos de lámina de 8 nodos o elementos sólidos de 20 nodos (también pueden usarse elementos de lámina de 4 nodos con grados de libertad adicionales).
- Las tensiones están resueltas en los puntos medios o los nodos centrales de los elementos.

En este método, la tensión obtenida en los puntos medios o los nodos centrales de los primeros elementos es ligeramente exagerada debido a la singularidad en el borde de la soldadura. Esto compensa por el error causado por la extrapolación lineal a partir de puntos relativamente distantes.

#### a) Modelado con elementos de lámina o placa.

La forma más simple de modelar chapas de pequeño espesor es mediante estos elementos, los cuales deben ser colocados en los planos medios de las partes estructurales (Fig.5.3.1c). Se recomiendan elementos de 8 nodos, particularmente en casos de acusados gradientes de tensiones. Las soldaduras no se suelen modelar. Sin embargo, en casos de una alta influencia entre dos discontinuidades locales, las soldaduras pueden modelarse mediante franjas de refuerzo (ver Fig.5.3.1d) o elementos inclinados.

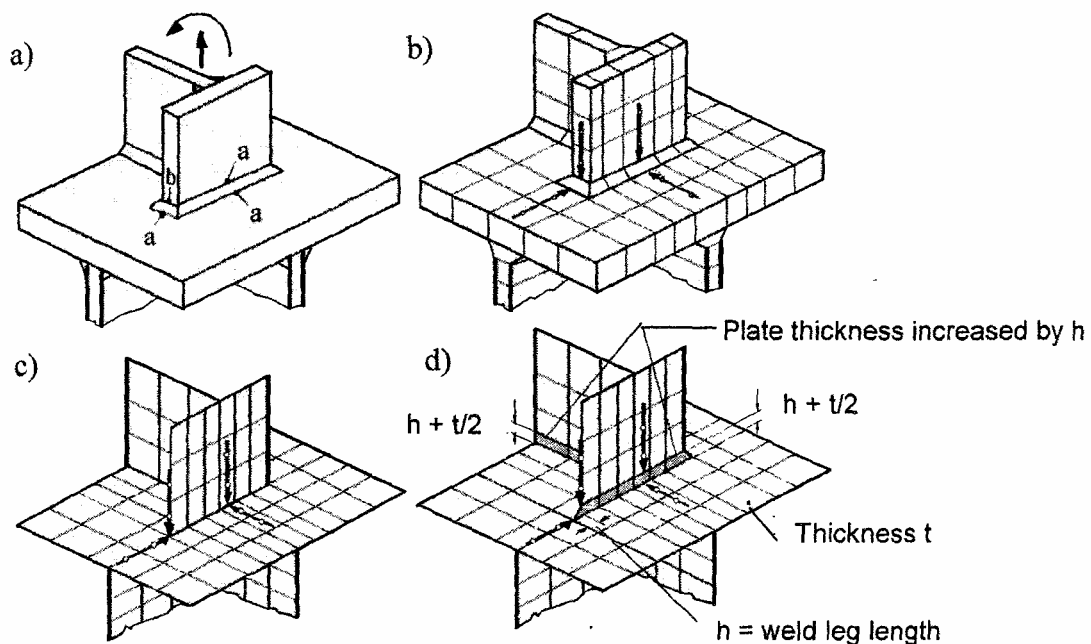


Fig 5.3.1 Ejemplos de mallas relativamente gruesas, incluyendo los puntos y caminos para la evaluación de tensiones: a) puntos calientes tipo 'a' y 'b'; b) modelo de elementos sólidos con puntos de extrapolación en sus centros; c) modelo de elementos de lámina con los puntos de extrapolación en el medio de una cara de los elementos o en el punto central según la localización de la soldadura y el punto caliente dentro de la malla; d) soldaduras modeladas con franja de refuerzo con borde inclinado. (Niemi, 2006)

Considerando una chapa con un punto caliente en la soldadura transversal, la extrapolación a lo largo de la línea nodal tiende a exagerar el resultado, comparado con el de un modelo de elementos sólidos. En estos casos, la extrapolación debe hacerse a partir de los puntos medios de los elementos, como se muestra en las figuras 5.3.1 c) y

d). El tamaño de los elementos de lámina en la dirección de la tensión normalmente debe ser  $1t$ , como se ve en la Fig.5.3.2. Al final de los refuerzos longitudinales y detalles similares, los resultados serán bastante sensibles al ancho del elemento adyacente a la unión. Elementos demasiado anchos pueden dar resultados no conservativos. Generalmente, el ancho debe ser igual al espesor de chapa pero no mayor a la mitad del ancho del acople, definido como el espesor del acople más dos veces la longitud del pie de la soldadura (ver tabla 5.1).

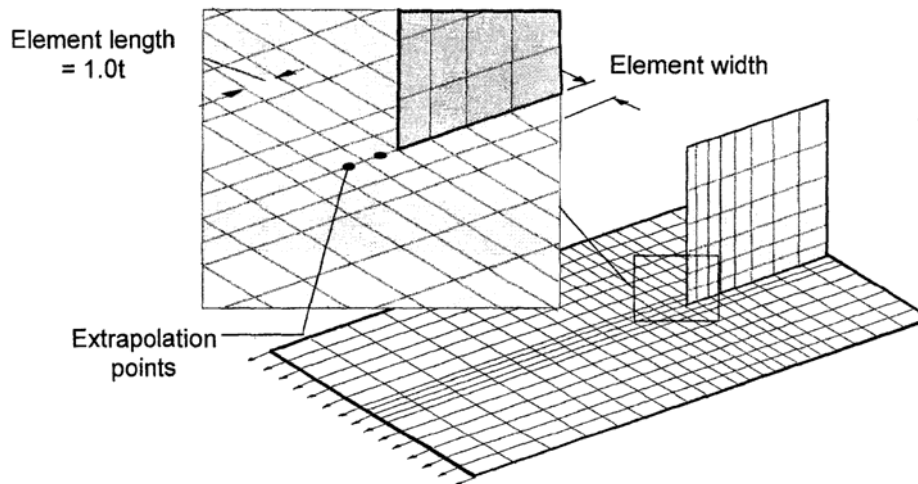


Fig 5.3.2 Ejemplo de un modelo de elementos de placa.(Niemi, 2006)

### b) Modelado con elementos sólidos.

Con elementos sólidos se obtienen resultados más fiables, especialmente en detalles complejos. Deben usarse elementos sólidos isoparamétricos de 20 nodos. Sólo se requiere una capa de elementos para el espesor. En la figura 5.3.1 b) se muestran los puntos y caminos de extrapolación y cómo puede modelarse la soldadura.

La longitud de los elementos sólidos en la dirección de la tensión no debe ser mayor a  $1t$ . El ancho de los elementos usualmente se toma como el ancho del acoplamiento, con las soldaduras incluidas de la manera descrita en 5.3 a). A veces, acoplamientos muy anchos requerirán elementos menores que su propio ancho.

### c) Extrapolación de la tensión de punto caliente

La extrapolación lineal se lleva a cabo usando las tensiones  $\sigma_{0.5t}$  y  $\sigma_{1.5t}$ , localizadas a las distancias  $0.5t$  y  $1.5t$  del borde de la soldadura respectivamente (ver Fig.5.2.1 b y 5.3.1b,c,d):

$$\sigma_{hs} = 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t} \quad (5.1)$$

Este método presupone que las tensiones están obtenidas en los puntos medios de la superficie de elementos sólidos o en el nodo intermedio de elementos de placas de 8 nodos como se ha visto en la Fig.5.3.1, teniendo en cuenta las recomendaciones que se han hecho para el ancho y largo de los elementos. La ecuación 5.1 de extrapolación no

debe usarse con mallas más finas o medidas de bandas extensométricas porque puede infravalorar la TPC.

#### 5.4. Uso de malla fina para el análisis de puntos calientes tipo ‘a’.

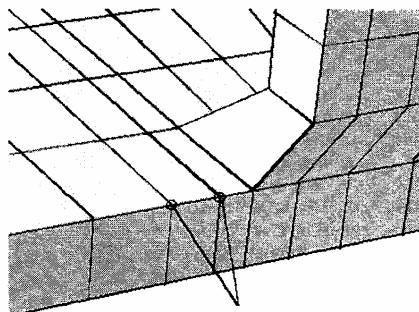
El uso de mallas más finas que las que se han comentado en el apartado anterior se recomienda en los siguientes casos:

- Detalles con un alto gradiente de tensiones muy próximo al PC.
- Entre discontinuidades adyacentes
- Para comparar los resultados de AEF y las tensiones medidas

Se recomienda una extrapolación basada en la que se usó anteriormente para las medidas de deformaciones de las bandas extensométricas. Así se tiene:

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad (5.2)$$

Este método de extrapolación está recomendado especialmente cuando las tensiones se obtienen en los nodos. Así la longitud del primer elemento en la dirección de la carga no debe ser mayor de  $0.4t$  y la del segundo de  $0.6t$ , como se muestra en la Fig.5.4.1. Se recomienda un refinado de la malla de acuerdo a la Fig.5.2.1 a) en la dirección de extrapolación y el espesor.



Extrapolation points at nodes

Fig 5.4.1 Ejemplo de modelado con elementos sólidos.(Niemi, 2006)

#### 5.5 Análisis de puntos calientes tipo ‘b’.

En el caso de puntos calientes tipo ‘b’, las distribuciones de tensiones estructurales debidas a la geometría del refuerzo y al cordón de soldadura son no lineales y se producen en el mismo plano. Como consecuencia, en estos detalles no es fácil distinguir entre el efecto local de la geometría del borde de la soldadura y el efecto de la discontinuidad estructural.

En el futuro, se dispondrá de métodos teóricamente más correctos. La linealización de la distribución de tensiones sobre un cierto ancho y el uso de la tensión linealizada en el borde como tensión estructural parece ser una alternativa prometedora. Mientras tanto, a continuación se muestran dos posibles métodos.

**a) Uso de malla gruesa para el análisis de puntos calientes tipo ‘b’.**

En este método, basado en (Fricke y Bogdan(2001), Wagner (1998)), la singularidad en el borde de la soldadura exagera la tensión del punto medio en el primer elemento tanto que la extrapolación lineal proporciona resultados comparables a los obtenidos con un análisis más refinado mediante la extrapolación dada por la ecuación 4.5.

Usando elementos de lámina o sólidos y siguiendo las recomendaciones dadas para tamaño de los elementos y localización de los nodos, se proporciona la siguiente ecuación para realizar la extrapolación lineal:

$$\sigma_{hs} = 1.5\sigma_{5mm} - 0.5\sigma_{15mm} \quad (5.3)$$

**b) Uso de malla fina para el análisis de puntos calientes tipo ‘b’**

Esta técnica de modelado es equivalente al análisis mediante galgas extensométricas de acuerdo con la ecuación 4.5. La malla debe ser lo suficientemente fina como para que la singularidad en el borde de la soldadura no exagere los resultados en los puntos de extrapolación, los cuales están colocados a 4, 8 y 12 mm del borde de la soldadura. Es preferible que las tensiones se determinen en los nodos y que la longitud máxima de los primeros 3 elementos sea de 4mm (Fig 5.2.1 c).