

miembros estáticamente controlados. Esto puede tener una influencia significativa sobre los costos de diseño y construcción.

F.7.7.1.2 - Mecanismo de falla - La falla por fatiga usualmente se inicia en un punto de alta concentración de esfuerzo, particularmente donde existen discontinuidades repentinas. Las grietas de fatiga se extienden incrementalmente bajo la acción del cambio cíclico de esfuerzos. Normalmente, permanecen estables bajo carga constante. La falla última ocurre cuando la sección transversal restante es insuficiente para soportar la carga pico de tensión aplicada en todas partes.

Las grietas de fatiga se propagan, aproximadamente en ángulos rectos, en la dirección del rango máximo de esfuerzo principal. La tasa de propagación es proporcional a, por lo menos, la tercera potencia del producto del rango de esfuerzo y la raíz cuadrada de la longitud total de la grieta. Por esta razón, el crecimiento de las grietas es lento en las fases tempranas y las grietas por fatiga tienden a ser poco llamativas durante la mayor parte de su vida. Esto puede generar problemas para su detección durante el servicio.

F.7.7.1.3 - Sitios potenciales para grietas de fatiga - Los sitios de inicio más comunes para grietas de fatiga son los siguientes:

- (a) bordes y raíces de soldaduras de fusión
- (b) esquinas acabadas a máquina y agujeros taladrados
- (c) superficies bajo alta presión de contacto (desgaste)
- (d) raíces de roscas de conectores

F.7.7.1.4 - Condiciones de susceptibilidad a la fatiga - Las principales condiciones que afectan el comportamiento ante fatiga son las siguientes:

(a) **Relación alta entre carga dinámica y carga estática.** Las estructuras móviles o de levante, tales como vehículos de transporte terrestre o marino, grúas, etc., son más propensas a problemas de fatiga que las estructuras fijas, a menos que estas últimas soporten predominantemente cargas móviles, como en el caso de puentes.

(b) **Frecuentes aplicaciones de carga.** Esto tiene como resultado un alto número de ciclos durante la vida de diseño. Las estructuras esbeltas y los miembros con bajas frecuencias naturales están particularmente predispuestos a resonancia y, por consiguiente, a magnificación del esfuerzo dinámico, aunque los esfuerzos estáticos de diseño son bajos. Las estructuras sometidas predominantemente a cargas de fluidos tales como el viento y las estructuras que soportan maquinaria, deben ser revisadas cuidadosamente para efectos de resonancia.

(c) **Uso de soldadura.** Algunos detalles soldados comúnmente usados tienen baja resistencia a la fatiga. Esto es aplicable no sólo a uniones entre miembros sino también a cualquier accesorio de un miembro cargado, sea o no considerada la conexión resultante como estructural.

(d) **Complejidad del detalle de la unión.** Las uniones complejas frecuentemente conllevan altas concentraciones de esfuerzos debidas a variaciones locales de rigidez en el camino de la carga. Mientras que esto puede tener poco efecto en la capacidad estática última de la unión, puede tener un efecto severo en la resistencia a la fatiga. Si la fatiga es dominante, la forma de la sección transversal del miembro debe ser seleccionada para asegurar la uniformidad y simplicidad del diseño de la unión de modo que los esfuerzos puedan ser calculados y se puedan asegurar las normas adecuadas de fabricación e inspección.

(e) **Ambiente.** En ciertos ambientes térmicos y químicos, puede haber reducción de la resistencia a la fatiga.

F.7.7.2 - CRITERIOS DE DISEÑO POR FATIGA - Se recomienda que, en lo posible, las estructuras de aluminio sean diseñadas sobre la base de brindar una vida segura. El método de evaluación dado en este numeral está diseñado para asegurar que la probabilidad de falla por fatiga durante la vida de la estructura sea comparable con la de otros modos de falla para estado límite último.

Pueden haber circunstancias en las que la severidad de la carga, el grado de redundancia y la facilidad de inspección y reparación sean tales que un acercamiento de seguridad en la falla o tolerancia de daño pueda justificarse en términos económicos. En este caso, los márgenes de seguridad pueden reducirse respecto a los requeridos para un diseño de vida segura. En F.7.3 se da una guía sobre esto.

F.7.7.2.1 - Criterio de falla por fatiga - La base del diseño por fatiga usada aquí es que la vida requerida será alcanzada siempre que

$$f_r^m N \leq K_2$$

(F.7-131)

donde

- N = número de ciclos de un rango de esfuerzo f_r , necesarios para la falla
- K_2 = constante que depende de la clase de detalle y busca asegurar una alta probabilidad de supervivencia (véase F.7.7.8.1)
- f_r = rango de esfuerzo principal del detalle, es constante para todos los ciclos
- m = pendiente inversa de las curvas f_r -N, es constante para la mayoría de las clases de detalle

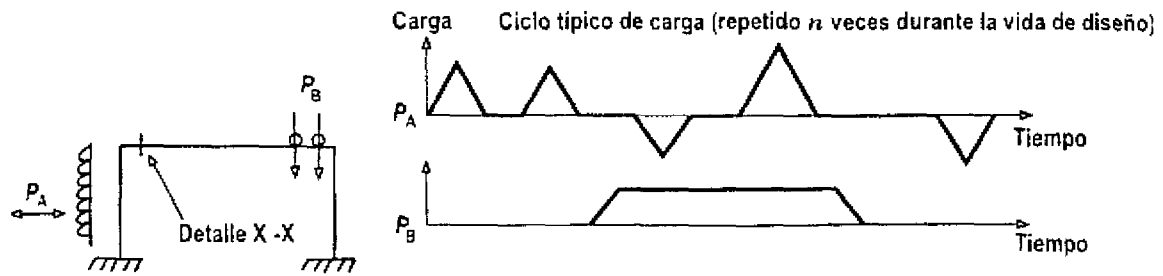
Tabla F.7.7.1
Clasificación tipo 1: detalles no soldados

Forma del producto	Secciones laminadas o extruidas						
Localización de la iniciación potencial del agrietamiento	Saliedo de cualquier soldadura						
	Saliedo de cualquier conexión o parte estructural			En una conexión traslapada o empalmada sujeta con:			
	Sobre un miembro de sección transversal constante o ligeramente variable	En cualquier borde interno o externo		En un agujero pequeño (puede contener un perno para un accesorio menor)	Pernos que trabajan por fricción	Remaches	Pernos que trabajan por aplastamiento
Requisitos dimensionales	Sin agujeros ni esquinas entrantes	Radio de cualquier apertura o esquina entrante mayor o igual a t		Diámetro del agujero menor o igual a 3t			
Requisitos de fabricación	Todas las superficies deben ser laminadas extruidas o maquinadas con un acabado suave en la dirección de f_r		maquinadas o pulidas con esmeril en la dirección de f_r	Agujeros taladrados o sacados			
					Apretados hasta la carga de prueba del tornillo	Colocados en frío	Fuerzas aseguradas mecánicamente o por medio de un setante
Requisitos especiales de inspección	Probar que la superficie esté libre de defectos usando un ensayo de colorante penetrante						
Area de esfuerzos de diseño		Area neta de la sección transversal					
Parámetro especial de esfuerzos de diseño		Use el coeficiente de concentración de esfuerzos en aperturas o esquinas entrantes					
Tipo número	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
Clase máxima permitida	60	60	50	35	29	29	17

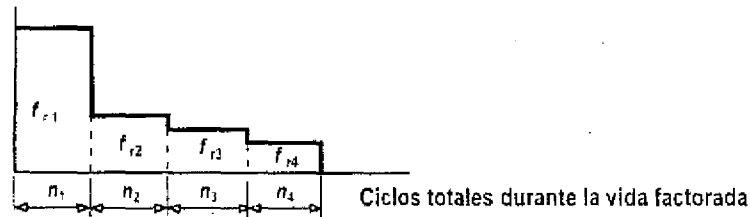
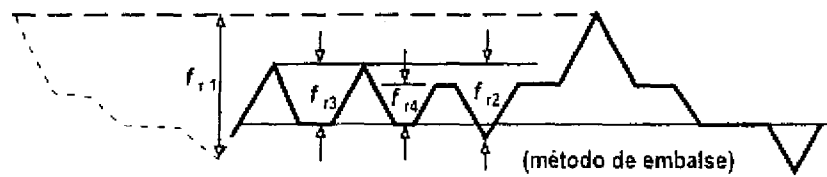
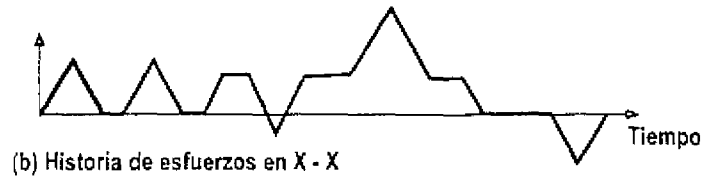
En la mayoría de los propósitos estructurales prácticos, los detalles no experimentan historias de esfuerzo de amplitud constante. El tratamiento para carga general se da en F.7.7.3.

El método para derivar el rango, o rangos, de esfuerzo apropiado f_r , se da en F.7.7.4 y F.7.7.6. En F.7.7.7 se dan las clasificaciones para los tipos de detalle más comúnmente usados. Los valores de K_2 y m están dados en F.7.7.8.

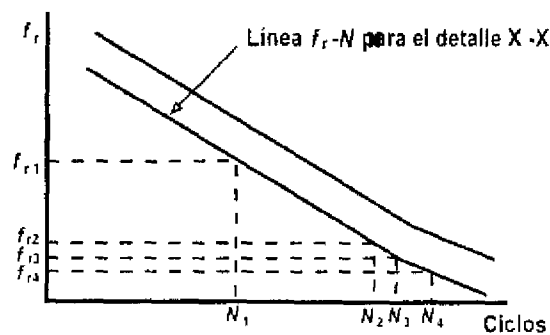
Si los datos de resistencia a la fatiga usados son los dados en F.7.7.8 y la carga cumple con F.7.7.4, entonces el valor del coeficiente general de carga γ_r debe ser tomado como uno.



(a) Secuencia de carga



(d) Espectro de esfuerzos



(e) Ciclos para la falla

$$\sum \frac{n}{N} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4}$$

(f) Sumatoria de daño (Regla de Palmagren - Miner)

Figura F.7.7.1
Procedimiento de evaluación de la fatiga

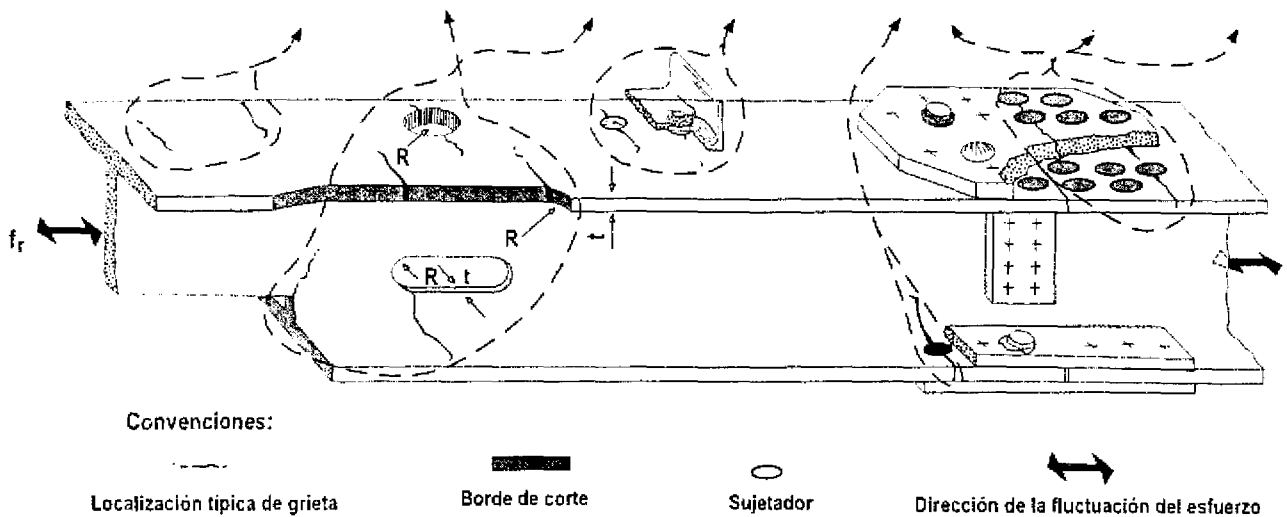


Figura Tabla F.7.7.1
Clasificación tipo 1: detalles no soldados

F.7.7.3 - PROCEDIMIENTO DE ESTIMACION DE LA FATIGA - Un miembro estructural puede contener varios sitios potenciales de iniciación de grietas por fatiga. Las regiones de la estructura que tienen las más altas fluctuaciones de esfuerzos y/o las más severas concentraciones de esfuerzos deben ser normalmente revisadas primero. El procedimiento básico es el siguiente (véase la figura F.7.7.1):

- Se obtiene un estimativo del límite superior de la secuencia de carga de servicio para la vida de diseño de la estructura (véase F.7.7.4 y apéndice F.7.B)
- Se estima la historia de esfuerzo resultante para el detalle (véase F.7.7.5)
- Se reduce la historia de esfuerzo a un número equivalente de ciclos (n) de diferentes rangos de esfuerzo f , usando una técnica de conteo de ciclos (véase F.7.7.6.1)
- Se ordenan los ciclos en orden descendente de amplitud, $f_{1,}, f_{2,}$, para formar un espectro de esfuerzo (véase F.7.7.6.2)
- Se clasifica el detalle de acuerdo con las tablas F.7.7.1 a F.7.7.3 y, F.7.7.7. Para la clasificación apropiada y el rango de esfuerzo de diseño (f_d , etc.), encontrar la resistencia a la fatiga permisible (N_f , etc.) usando F.7.7.8.1. Cuando se haya decidido usar un valor de γ_{mf} diferente de la unidad, éste debe ser tomado en cuenta para fijar los valores de los rangos de esfuerzo de diseño (véase F.7.3.6.2).
- Sumar el daño total para todos los ciclos usando el gran total de Miner:

$$\text{vida estimada} = \frac{\text{vida de diseñ o mayorada}}{\sum n/N} \quad (\text{F.7-132})$$

Si la $\sum n/N$ excede la unidad entonces se deben reducir los rangos de esfuerzo en ese punto o se debe cambiar el detalle por uno de clase más alta (véase F.7.7.7).

Tabla F.7.7.2
Clasificación tipo 2: detalles soldados sobre la superficie del miembro

Forma del producto	Secciones laminadas o extruidas y miembros ensamblados											
Localización de la iniciación potencial del agrietamiento	En un accesorio largo soldado (en dirección de f_x)						En un accesorio corto		En cualquier accesorio			
	Saliedo del extremo de la soldadura			En un bache intermedio en una soldadura longitudinal	En el agujero de una copa	En el extremo de la soldadura						
Requisitos dimensionales	Soldadura a tope de penetración total			Soldadura de filete	Soldadura no sobre el borde de un miembro	Accesorio angosto		Accesorio ancho			En el borde de un miembro	
						Sobre un lado únicamente	Sobre ambos lados simétricamente	l mayor de 25 mm y menor o igual a 50 mm	l menor o igual a 25 mm			
Requisitos de fabricación	Pulir para suavizar cualquier socavadura en los bordes del miembro						Longitud de soldadura l (paralela a f_x) mayor de 50 mm		Ancho de accesorio w menor o igual a 50 mm		Soldadura sobre el borde de un miembro	
	Cepillar a ras cualquier sobrellenado	No parar-arrancar automático	Parar-arrancar libre de pérdida de fusión								Pulir cualquier socavadura	
Requisitos especiales de inspección	Probar que las superficies soldadas estén libres de grietas y pérdida de fusión mediante ensayo con colorante penetrante											
	Radiografía											
Área de esfuerzos de diseño	Sección transversal mínima del miembro en el punto de localización de la iniciación potencial del agrietamiento											
Parámetro especial de esfuerzos de diseño							Angulo de dispersión de esfuerzos 1 en 2 en ambos lados					
Tipo número	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11	
Clase máxima permitida	50	42	35	29	24	20	17	20	24	29	17	

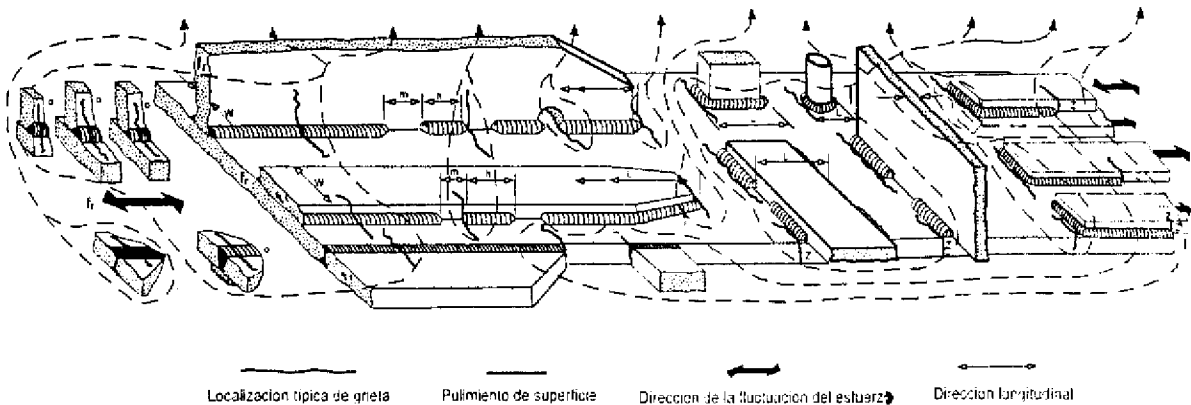


Figura Tabla F.7.7.2
Clasificación tipo 2: detalles soldados sobre la superficie del miembro

Tabla F.7.7.3
Clasificación tipo 3: detalles soldados en las conexiones extremas de un miembro

Forma del producto	Planchas y extrusiones planas		Formas laminadas, formadas o extrudadas (incluyendo secciones planas)										
Localización de la iniciación potencial del agrietamiento	En una unión soldada transversal										En la garganta de la soldadura		
	Dos láminas simples unidas extremo a extremo				Dos miembros unidos extremo a extremo				Extremo de un miembro unido al lado de otro		En cualquier unión parcialmente fundida		
Requisitos dimensionales	Áreas longitudinales en línea										Soldadura a tope de penetración total	Soldadura a tope de penetración parcial o soldadura de filete	
	Soldadura a tope de penetración total												
	Igual ancho	Cualquier cambio de ancho menor o igual a una pendiente 1 en 4				Perfil similar				Soldadura a tope de penetración parcial o soldadura de filete			
Igual espesor	Cualquier cambio de espesor menor o igual a una pendiente 1 en 4				Perfil similar				También se aplica si el tercer miembro es angosto y pasa a través del primero)				
	Soldado en ambos lados										Soldado en un solo lado únicamente	Desalineamiento con pendiente menor o igual a 1 en 4	Soldado continuamente alrededor de la unión si el ancho lo permite, si no pulir a ras los extremos de la soldadura (ver X)
Requisitos de fabricación	Desalineamiento con pendiente menor o igual a 1 en 4		Con el incremento de la clase se incrementan las restricciones sobre el perfil y otras discontinuidades de la soldadura				No se permite puentado permanente en los 10 mm a parte del borde		Desalineamiento máximo de miembros principales menor o igual a 0.5t ₁				
	Cepillar a ras el sobrellenado		Usar planchas de continuidad y escurrimiento para suavizarlos				Sobre plancha de permanente		Sin raspado		Cepillar a ras el refuerzo		
	Usar planchas de continuidad y escurrimiento para suavizarlos												
	Limar o pulir cualquier socavadura, particularmente en las esquinas externas												
Requisitos especiales de inspección	Incrementar, con la clase, el uso de colorantes permanentes, radiografías y métodos de ultrasonido para verificar la ausencia de discontinuidades de importancia										Todas las regiones esforzadas a través de la dirección del espesor deben estar libres de rolado laminar o discontinuidades de extrusión		
	Sección transversal mínima del miembro en el punto de localización potencial del agrietamiento										Área de garganta efectiva		
Área de esfuerzos de diseño											Use el coeficiente de concentración de esfuerzos a menos que el tercer miembro sea una plancha o tenga planchas de continuidad		Se debe usar el coeficiente de concentración de esfuerzos
Parámetro especial de esfuerzos de diseño													
Tipo número	3 1	3 2	3 3	3 4	3 5	3 6	3 7	3 8	3 9	3 1	3 1		
Clase máxima permitida	42	35	29	24	17	24	24	20	24	20	14		

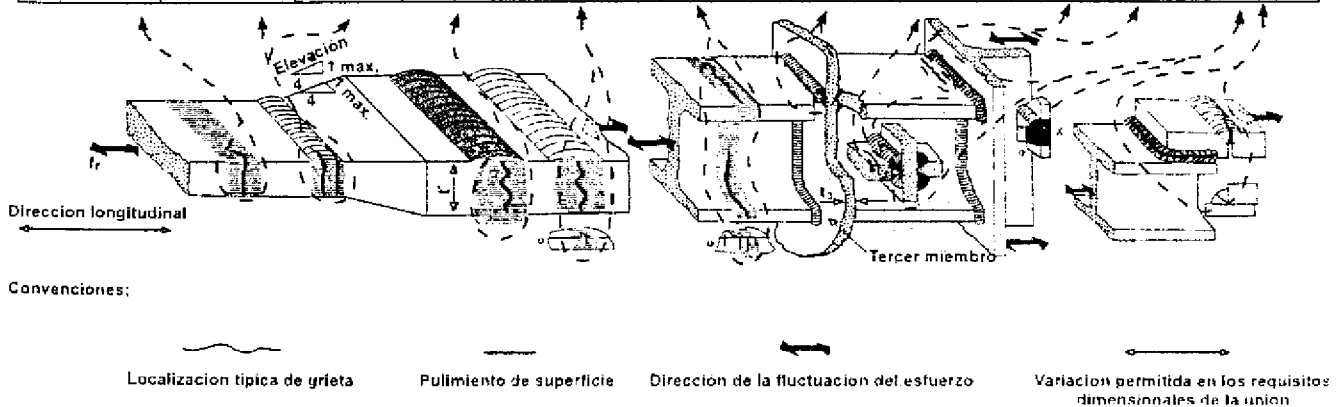


Figura Tabla F.7.7.3
Clasificación Tipo 3: detalles soldados en las conexiones extremas de un miembro

F.7.7.4 - CARGA DE FATIGA - Todas las fuentes de esfuerzo fluctuante en la estructura deben ser identificadas:

- (a) cargas móviles superpuestas, incluyendo vibraciones de maquinaria en estructuras estacionarias
- (b) cargas ambientales tales como viento, olas, etc.
- (c) fuerzas de aceleración en estructuras móviles
- (d) cambios de temperatura

La carga para fatiga normalmente se describe en términos de un espectro de carga de diseño que define un rango de intensidades de un evento de carga viva específico y el número de veces que cada nivel de intensidad es aplicado durante la vida de diseño de la estructura. Si dos o más eventos de carga viva independientes son de probable ocurrencia entonces será necesario especificar el desfase entre ellos.

Una guía sobre la carga específica para el estimativo de la fatiga se puede obtener en normas expedidas por entidades de reconocida autoridad.

Un estimativo realista de la carga de fatiga es crucial para el cálculo de la vida de la estructura. Cuando no hayan datos publicados sobre la carga viva, hay que recurrir a obtener datos de estructuras existentes sujetas a efectos similares. Registrando la deformación continua o midiendo la deflexión durante un período apropiado de tiempo, se pueden inferir los datos de carga mediante el análisis subsecuente de la respuesta. Se debe dar especial atención a determinar los efectos de magnificación dinámica cuando las frecuencias de carga son cercanas a una de las frecuencias naturales de la estructura (véase F.7.8.4.2).

El espectro de carga de diseño debe seleccionarse teniendo en cuenta que es un estimativo del límite superior de las condiciones de servicio acumuladas sobre la vida de diseño completa de la estructura. Se deben considerar todos los efectos ambientales y operacionales generados por el uso previsto de la estructura durante ese período. El límite de confianza del espectro de carga de diseño debe basarse en la media menos 2 límites de desviación estándar tanto para amplitud como para frecuencia.

F.7.7.5 - ESFUERZOS

F.7.7.5.1 - Derivación de esfuerzos - Se debe usar la teoría elástica para modelar la estructura cuando se desea calcular la respuesta de esfuerzo a partir de eventos de carga específicos. Las propiedades de la sección no se deben reducir por efectos de la zona afectada por el calor o de pandeo local (pero véase F.7.7.5.2 (a) (4)). La modelación de la rigidez elástica de miembros y uniones debe ser exacta e incluir los efectos de cualquier material no estructural permanente que pueda modificarla. No se debe permitir la redistribución plástica de esfuerzos.

Cuando los datos de respuesta de esfuerzo van a ser obtenidos por medidas de deformación de una estructura similar, se debe poner cuidado especial para situar los transductores de deformación para asegurar que el parámetro de esfuerzo correcto está siendo medido (véase F.7.7.5.2). En F.7.8.4 se amplía la información sobre medida de datos de deformación.

F.7.7.5.2 - Parámetros de esfuerzo - El esfuerzo a usar en los procedimientos de estimar la fatiga en F.7.7.3 depende del sitio de iniciación de la grieta y del camino de propagación, así:

(a) Material base y soldaduras a tope de penetración total - Las grietas se inician en la intersección de la soldadura con el metal de base, en los agujeros para los sujetadores, en las superficies de empalme o traslape, etc. y se propagan a través del material base o del metal completamente penetrado de la soldadura y deben ser evaluadas usando el rango nominal de esfuerzo principal en el miembro en ese punto.

Los efectos de concentración local de esfuerzos del perfil de soldadura, de los agujeros de remaches y tornillos, etc. deben ignorarse ya que ellos son tomados en cuenta en los datos de resistencia $f_u - N$ para la clase de detalle apropiada y por lo tanto no necesitan ser calculados (véanse las tablas F.7.7.1 a F.7.7.3). Si se utilizan modelos detallados con elementos finitos de las uniones, la malla no debe ser más fina que los esfuerzos locales usados (véase también el literal (a) de F.7.8.4.4).

Se deben tomar en cuenta otros efectos geométricos mayores que pueden generar distribuciones no lineales de esfuerzos en ciertas circunstancias (véase la figura F.7.7.2). Esta situación se presenta en:

- (1) cambios bruscos en la forma de la sección transversal, por ejemplo en destijeres
- (2) cambios bruscos en la rigidez de la sección transversal, por ejemplo en uniones en ángulo entre miembros de pared delgada
- (3) cambios en dirección o alineamiento más allá de lo permitido en las tablas F.7.7.1 a F.7.7.3
- (4) esfuerzos de flexión secundarios generados por la rigidez de uniones en estructuras en celosía
- (5) ineficiencia de transmisión de esfuerzos por cortante, distorsión y alabeo en miembros anchos formados con láminas y miembros huecos
- (6) efectos de flexión no lineal fuera del plano en componentes esbeltos tales como láminas planas donde el esfuerzo estático es cercano al esfuerzo crítico elástico, por ejemplo el campo tensionado en almas

La presencia de esfuerzos residuales en uniones soldadas puede ignorarse ya que éstos están ya incluidos en los datos $f_u - N$. En uniones mecánicas, siempre que cualquier esfuerzo residual de tensión sea tenido en cuenta, esa parte del rango de esfuerzos que está en compresión general puede reducirse un 40%.

(b) Soldaduras de filete y a tope de penetración parcial - Las grietas se inician en la raíz de la soldadura y se propagan a través de la garganta. Deben ser estimadas usando la suma vectorial de los esfuerzos de corte en el metal de aporte de la soldadura basándose en las dimensión de garganta efectiva (véase la figura F.7.7.3).

En uniones traslapadas en un plano, el esfuerzo por unidad de longitud de soldadura puede calcularse con base en el área promedio para fuerzas axiales y un módulo elástico polar del grupo de soldaduras para momentos en el plano (véase la figura F.7.7.4).

En uniones en T, cualquier efecto de rigidez axial diferente a lo largo de la unión debe ser considerado.

Cuando filetes simples o soldaduras a tope de penetración incompleta están sujetos a momentos de flexión fuera de su plano, los esfuerzos en la raíz deben calcularse usando una distribución lineal de esfuerzos a través de la garganta (véase la figura F.7.7.5).

No se puede permitir el contacto de apoyo sobre la cara de la raíz en uniones soldadas con penetración parcial.

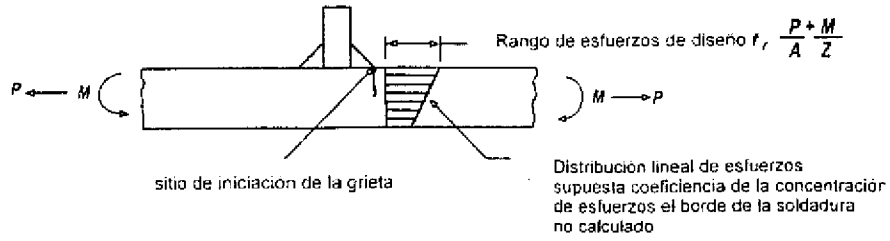
(c) Sujetadores roscados bajo carga axial - Las grietas se inician en las raíces de las roscas y deben ser evaluadas usando el esfuerzo medio axial en el área del núcleo de la rosca. Cuando hay también presencia de flexión, se debe usar el esfuerzo pico calculado sobre el módulo elástico del núcleo.

F.7.7.6 - DERIVACION DE LOS ESPECTROS DE ESFUERZOS

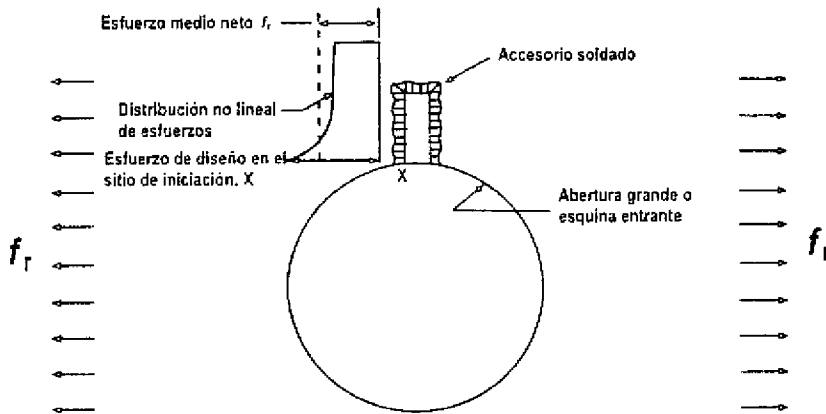
F.7.7.6.1 Conteo de ciclos - El conteo de ciclos es un procedimiento para convertir una historia de esfuerzo compleja en un espectro de ciclos conveniente en términos de amplitud f_r y frecuencia n (véase la figura F.7.7.1). Hay varios métodos en uso, para historias de esfuerzo cortas en las que eventos simples de carga se repiten varias veces se recomienda el método del embalse que es simple de visualizar y simple de usar (véase la figura F.7.7.6). Cuando se tienen que usar historias de esfuerzo largas, tales como las obtenidas con las deformaciones medidas en estructuras reales (véase F.7.8.4), se recomienda el método de la escorrentía. Ambos métodos son apropiados para el análisis con computador.

F.7.7.6.2 - Derivación del espectro de esfuerzos - El listado de los ciclos en orden descendente de amplitud f_r da como resultado el espectro de esfuerzos. Por facilidad de cálculo puede ser necesario simplificar el espectro con una menor cantidad de bandas; un método conservador consiste en agrupar las bandas en grupos mayores que contienen el mismo número total de ciclos pero cuya amplitud es igual a la de la mayor banda en el grupo. Con mayor exactitud, puede calcularse el promedio ponderado de todas las bandas en un

grupo usando la potencia m , donde m es la pendiente inversa de la curva $f_r - N$ más apropiada (véase la figura F.7.7.7). El uso del valor de la media aritmética siempre da resultados no conservadores.



(a) concentrador de esfuerzo local



(b) concentrador de gran esfuerzo (abertura grande)

Figura F.7.7.2

Parámetro de esfuerzos para el material parenteral

P_w Y H_w son esfuerzos por unidad de longitud

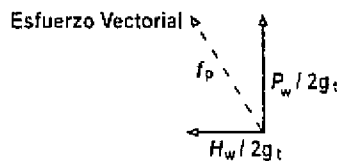
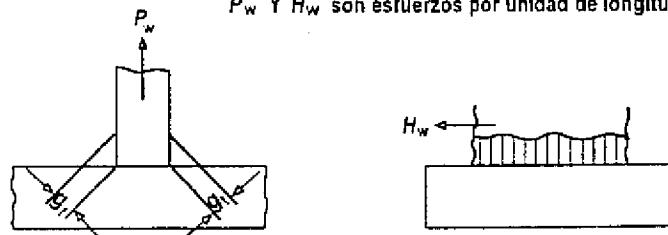
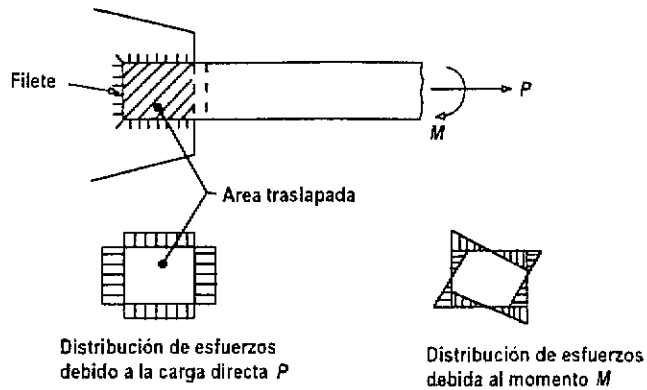


Figura F.7.7.3

Esfuerzos en gargantas de soldadura



NOTA: Flujo máximo de cortante a lo largo de las soldaduras = Md/I_0
 donde:

- I_0 Segundo momento polar del área respecto al centroide del grupo de soldaduras
- d Distancia máxima al centroide de un punto dentro del grupo de soldaduras

Figura F.7.7.4
Esfuerzos en uniones traslapadas

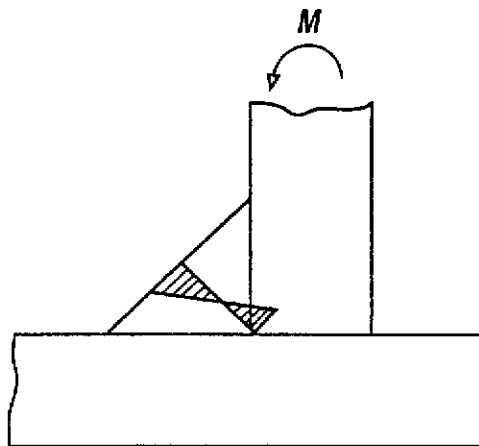


Figura F.7.7.5
Esfuerzos en la raíz de un filete

F.7.7.7 - CLASIFICACION DE DETALLES - La resistencia a la fatiga de un detalle siempre depende de los siguientes factores:

- (a) la dirección del esfuerzo fluctuante con relación al detalle
- (b) la localización del agrietamiento inicial en el detalle
- (c) la distribución geométrica y la proporción relativa del detalle

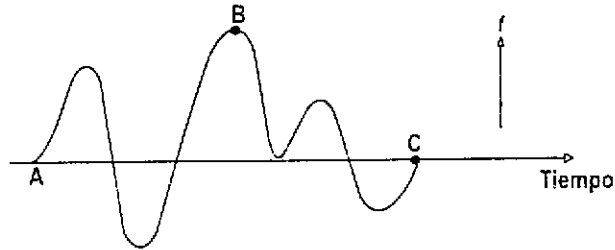
Puede depender también de:

- (a) la forma del producto
- (b) el material (a menos que sea soldado)
- (c) el método de fabricación
- (d) el grado de inspección después de la fabricación

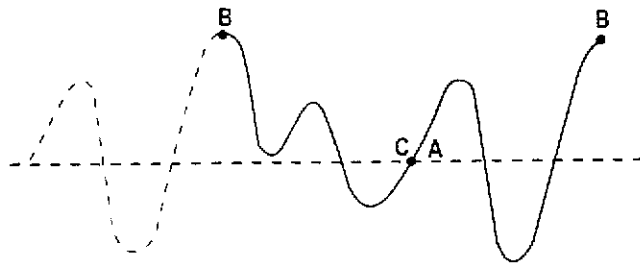
Las tablas F.7.7.1 a F.7.7.3 muestran la clasificación de los detalles más frecuentemente usados. Por conveniencia han sido divididos en tres grupos básicos, a saber:

- (i) tipo 1, detalles no soldados, véase la tabla F.7.7.1
- (ii) tipo 2, detalles soldados sobre la superficie de un miembro cargado, véase la tabla F.7.7.2
- (iii) tipo 3, detalles soldados en conexiones de extremo, véase la tabla F.7.7.3

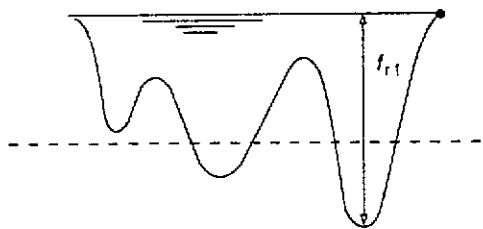
Las tablas se usan para identificar el detalle en la figura más cercano al de la estructura que se está evaluando. Luego, las clases de sitios particulares de iniciación de agrietamiento asociadas con ellos, se revisan en la tabla apropiada. En algunos casos, se pueden necesitar operaciones particulares de inspección y fabricación.



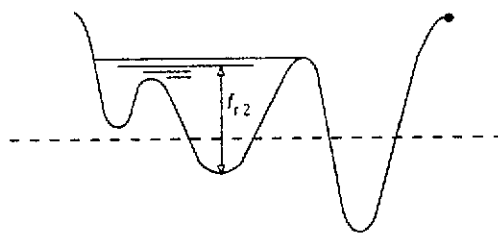
Paso 1. Determine la historia de esfuerzos para el evento de carga. Identifique el pico (B)



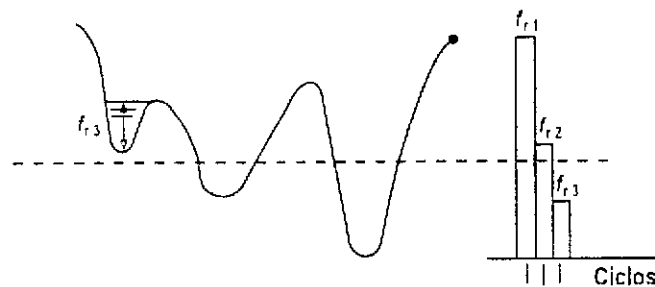
Paso 2. Mueva la historia de esfuerzos a la izquierda del pico, hacia su derecha



Paso 3. Llene el "embalse" resultante con "agua". La mayor profundidad es el mayor ciclo

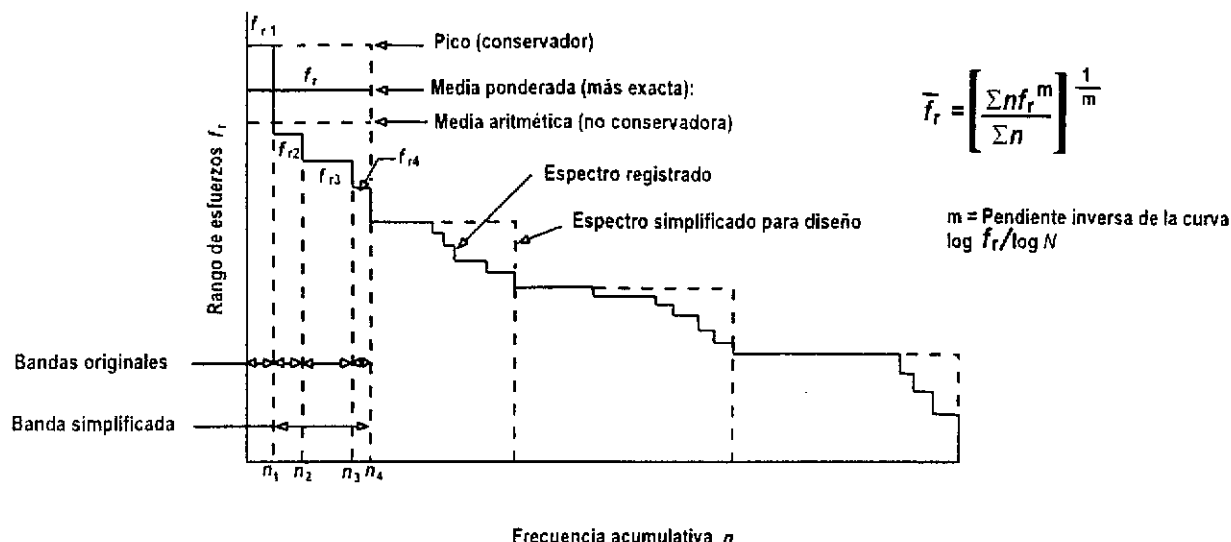


Paso 4. Drene la mayor profundidad. Encuentre la nueva máxima profundidad. Esta es el segundo mayor ciclo



Paso 5 en adelante. Repita hasta drenar toda el "agua". La suma de todos los ciclos es el espectro de esfuerzos de la historia anterior

Figura F.7.7.6
Método del embalse para el conteo de ciclos



NOTA: véase F.7.4.2 y la figura F.7.7.8 ó F.7.7.9

Figura F.7.7.7
Espectro de esfuerzos simplificado

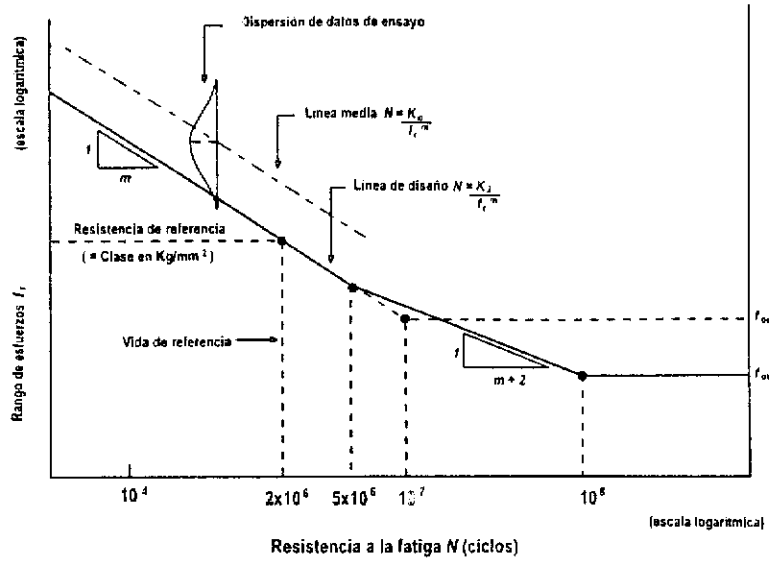
F.7.7.8 - DATOS DE RESISTENCIA A LA FATIGA

F.7.7.8.1 - Detalles clasificados - La forma generalizada de la relación $f_r - N$ se muestra en la figura F.7.7.8, graficada en escala logarítmica. La curva de diseño representa la media menos 2 desviaciones estándar, ubicada por debajo de la línea media obtenida con datos experimentales.

El esfuerzo límite de amplitud constante f_{or} ocurre a 10^7 ciclos, por debajo de este valor, los ciclos de esfuerzo de amplitud constante se supone que no son dañinos. Sin embargo, aunque los ciclos por encima de este nivel sean ocasionales, causarán propagación y, al extenderse la grieta, ciclos de menor amplitud se vuelven nocivos. Por esta razón, la pendiente de las curvas $f_r - N$ (véase la figura F.7.7.8) se cambia por $1/(m + 2)$ entre 5×10^6 y 5×10^8 ciclos para condiciones de carga de espectro general. Cualquier ciclo de esfuerzo por debajo del esfuerzo límite de amplitud variable f_{ov} , que ocurre a 10^8 ciclos, se supone que no es dañino. Debe notarse que el uso de la pendiente $1/(m + 2)$ puede ser conservador para algunos espectros. Cuando un diseño es críticamente dependiente de esta región y se busca la máxima economía puede ser apropiado considerar el uso de ensayos de los componentes (véase el literal (a) de F.7.8.4.4) o aplicar análisis de mecánica de fracturas. Los valores de K_2 y m están dados en la tabla F.7.7.4 para cada clase de detalle. Las curvas de diseño $f_r - N$ se dan en la figura F.7.7.9.

Tabla F.7.7.4
Valores de K_2 y m en la figura F.7.9

Clase de detalle	m	K_2	f_{or}	f_{ov}
			kgf/mm ²	kgf/mm ²
60	4.5	2.01×10^{14}	4.20	3.09
50	4	1.25×10^{13}	3.34	2.41
42	3.5	9.60×10^{11}	2.65	1.87
35	3.25	2.09×10^{11}	2.13	1.49
29	3	4.88×10^{10}	1.70	1.17
24	3	2.76×10^{10}	1.40	0.97
20	3	1.60×10^{10}	1.17	0.81
17	3	9.83×10^9	0.99	0.69
14	3	5.49×10^9	0.82	0.57



NOTA:
 f_{oc} esfuerzo de corte de amplitud constante
 f_{ov} esfuerzo de corte de amplitud variable

Figura F.7.7.8
 Relación f_r - N típica

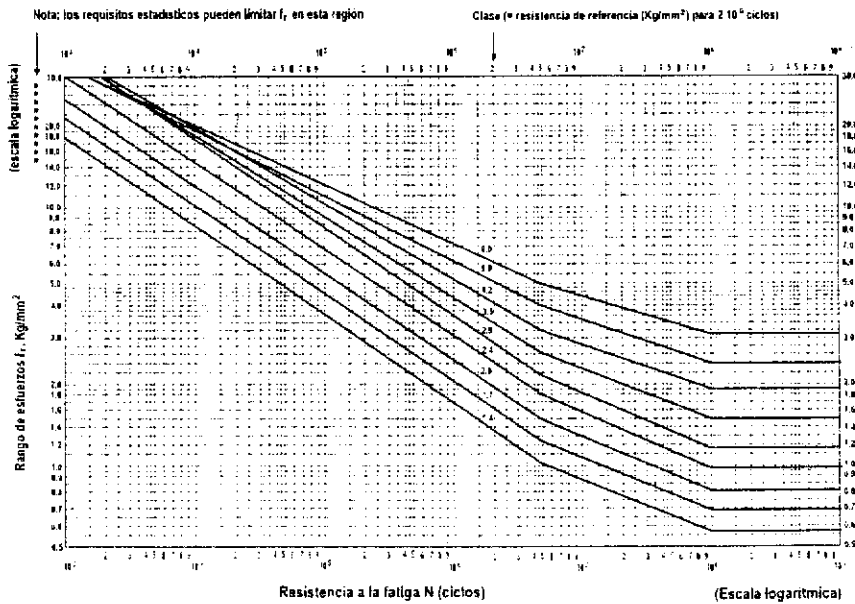


Figura F.7.7.9
 Curvas f_r - N de diseño (para historias de esfuerzos de amplitud variable)

F.7.7.8.2 - Detalles no clasificados - Los detalles no totalmente cubiertos por las tablas F.7.7.1 a F.7.7.3, deben evaluarse consultando los datos publicados por entidades de reconocida trayectoria. Como alternativa, se pueden hacer ensayos de aceptación por fatiga de acuerdo con el literal (a) de F.7.8.4.4.

En el apéndice F.7.J se da una guía para la derivación de los datos f_r - N y sobre las condiciones en las que se pueden esperar resistencias mayores.

F.7.7.8.3 - Rango de baja resistencia a la fatiga - En el rango de resistencia a la fatiga entre 10^3 y 10^6 , debe hacerse una revisión para ver que el rango de esfuerzos de diseño de la figura F.7.7.9 no conlleve un esfuerzo a tensión máximo que exceda el esfuerzo estático de diseño del detalle. Esta posibilidad está indicada por una nota en la figura F.7.7.9.

F.7.7.8.4 - Técnicas de mejoramiento - La resistencia a la fatiga de ciertos tipos de detalle mostrados en las tablas F.7.7.1 a F.7.7.3, puede ser mejorada mediante la aplicación de técnicas especiales de fabricación que son generalmente costosas y presentan dificultades para el control de calidad. No deben ser utilizadas para propósitos generales de diseño a menos que la fatiga sea particularmente crítica para la economía global de la estructura en cuyo caso debe buscarse ayuda especializada. Estas técnicas son más comúnmente usadas para superar deficiencias existentes en el diseño.

Las siguientes técnicas han sido usadas con aleaciones de aluminio y son más efectivas para aplicaciones con alto número de ciclos.

(a) **Introducción de esfuerzos compresivos residuales en el punto de iniciación del agrietamiento.** Esto puede hacerse en el borde de las soldaduras transversales mediante repujado o martillado. En los agujeros de los tornillos se puede utilizar el método de expansión en frío.

(b) **Reducción del efecto de concentración de esfuerzos en el punto de iniciación de la grieta.** Se puede lograr puliendo el borde de las soldaduras transversales hasta lograr un perfil uniforme.

F.7.7.8.5 - Mano de obra - La clase máxima permitida para los detalles clasificados en las tablas F.7.7.1 a F.7.7.3 representa la resistencia máxima a la fatiga permitida por estas normas para el detalle en cuestión, sin sustentación adicional mediante ensayos (véase F.7.8). Cuando el esfuerzo por fatiga en un detalle clasificado es significativamente menor al permitido, la clase requerida será menor que la clase máxima permitida. Esto siempre ocurre cuando detalles de alta clase están localizados cerca de detalles de baja clase y ambos experimentan fluctuaciones similares de esfuerzo.

Los detalles de más alta clase a menudo requieren inspección adicional y demandan estándares de mano de obra más altos. Es importante para la economía de la fabricación que los estándares de inspección y mano de obra no estén gobernados por la clase máxima permitida de cada detalle sino por la clase requerida. La clase requerida en un detalle se obtiene determinando las curvas $f_s - N$ más bajas en la figura F.7.7.9 en las que el gran total de Miner es menor que la unidad (véase F.7.7.3 (f)). Cuando las fluctuaciones de esfuerzos en un detalle ocurren en más de una dirección, se pueden tener diferentes clases de requisitos para cada dirección.

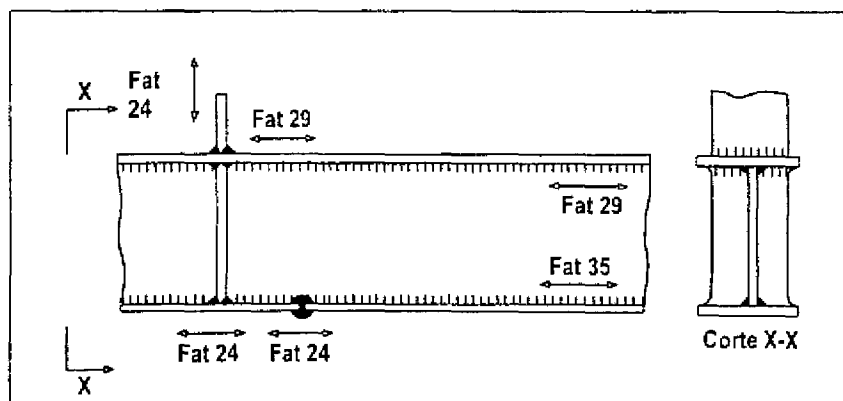


Figura F.7.7.10
Método de identificación en los planos de la clase requerida por fatiga

Para que la inspección pueda concentrarse en aquellas partes de la estructura que son críticas por fatiga, se deben tomar las siguientes acciones.

(a) Determinar analíticamente aquellas regiones de la estructura donde la clase de requisitos excede la clase 20.

(b) Indicar sobre los planos detallados, en todos los detalles en estas regiones, la clase requerida y la dirección de la fluctuación de esfuerzo como se muestra en la figura F.7.7.10.

(c) Cualquier plano que contenga un detalle con una clase de fatiga requerida mayor de 20 debe contener la siguiente nota general:

Los detalles que requieren calidad por encima de la normal se indican con un número "Fat" y una flecha.

F.7.8 - ENSAYOS

F.7.8.1 - GENERALIDADES - Una estructura o componente estructural diseñado de acuerdo con F.7.2 a F.7.7 de estas normas no necesita ser verificado mediante ensayo pero puede ser verificado a discreción del fabricante, calculista o interventor. Tales pruebas pueden hacerse bajo carga estática (véase F.7.8.3), carga de fatiga (véase F.7.8.4) o ambas.

La verificación mediante ensayo es apropiada cuando ocurre lo siguiente:

(a) La estructura o componente no es susceptible de verificación mediante análisis o tal procedimiento es juzgado impracticable

(b) Los materiales o los procedimientos de diseño usados fueron distintos a los presentados en F.7.2 a F.7.7

(c) Hay duda o desacuerdo sobre la validez del método de diseño, la calidad del material o la calidad de la mano de obra.

El método y el alcance de los ensayos debe ser acordado por el calculista, el fabricante y el interventor responsable de la aceptación. El método de ensayo debe ser consistente con las condiciones de servicio de la estructura o componente y puede comprender una prueba de resistencia con carga estática o dinámica y/o una prueba de resistencia a la fatiga. Los ensayos deben hacerse en instalaciones competentes aceptables para todas las partes interesadas.

El número de muestras a ensayar debe ser acordado entre las partes teniendo en cuenta el número de componentes a fabricar. Cuando el número de muestras es grande, debe ensayarse un número suficiente de muestras para permitir el análisis estadístico de la resistencia media y la desviación estándar para cada condición de carga.

Cuando la aceptación del diseño depende de la verificación mediante ensayos, el comprador o su agente debe tener la posibilidad de presenciar cada ensayo.

Cuando la verificación del diseño depende de ensayos, se debe realizar un informe describiendo en detalle (haciendo referencia a la norma utilizada) el método de prueba y dando todas las resistencias medidas, en la forma de un certificado de ensayo típico que contenga al menos la información enumerada en F.7.8.5.

F.7.8.2 - PREPARACION PARA ENSAYO - La muestra a ensayar, si no es la estructura o el componente real que se destinará al servicio, debe representar tan precisamente como sea posible el diseño en términos de propiedades del material, dimensiones, métodos de unión y acabados (cuando sean susceptibles a los efectos de la deformación).

La muestra de prueba debe colocarse en su posición normal de modo que las cargas muertas debidas al peso propio actúen normalmente. Cuando esto no sea posible, los efectos de la carga muerta pueden representarse mediante cargas impuestas equivalentes.

Cuando los ensayos se realicen sobre una simulación de la estructura o sobre un componente, la muestra se debe montar en forma tal que experimente las restricciones normales ante los efectos de la combinación de cargas aplicadas.

En circunstancias en las que la combinación de cargas aplicadas, sus direcciones y la orientación de la muestra puedan producir cambios en la resistencia de la muestra, se debe usar la combinación que se espera que dé la menor resistencia.

F.7.8.3 - ENSAYOS ESTATICOS - Los ensayos estáticos estarán dirigidos a demostrar si una estructura o componente puede soportar las cargas no mayoradas (conocidas como cargas nominales) sin exceder el estado límite de servicio y, también, si puede soportar las cargas mayoradas sin exceder el estado límite último. A veces es apropiado realizar una prueba de resistencia última (véase F.7.8.3.4).

F.7.8.3.1 - Aplicación de cargas - La aplicación de carga debe hacerse por medio de pesos muertos, dispositivos generadores de fuerza o dispositivos generadores de desplazamiento. El método debe incluir dispositivos de medida de fuerza de precisión conocida.

Antes de aplicar cada combinación de cargas nominales, la muestra puede ser cargada y descargada una vez. La carga a aplicar para este ciclo de ajuste opcional, no debe exceder las cargas nominales ni cualquier otro nivel inferior de carga relacionado con un criterio de deformación límite por aceptar. La carga debe ser mantenida por lo menos durante 15 min. Se recomienda medir los desplazamientos durante el ciclo de ajuste. No se debe hacer una recarga antes de 15 min después de suspender la carga de ajuste. Debe revisarse la fijación de los anclajes antes de adelantar la prueba principal.

El procedimiento de aplicación de carga debe constar de cinco incrementos aproximadamente iguales hasta alcanzar las cargas nominales. Cada incremento debe ser mantenido mientras que se obtienen las lecturas de deflexión y/o deformación y se examina la muestra para observar signos de alteración. En el quinto incremento (límite de servicio), las deflexiones y/o deformaciones deben ser registradas inmediatamente después de la aplicación de la carga o cargas y otra vez cuando este nivel de carga se haya mantenido por 15 min.

Las cargas nominales deben retirarse y debe inspeccionarse la estructura antes de aplicar las cargas mayoradas. El proceso de carga debe ser, nuevamente, incremental hasta llegar a la carga mayorada (algunas veces llamada carga de "prueba"), registrando las deflexiones y el comportamiento como se hizo antes. El incremento desde carga nominal hasta carga mayorada debe hacerse, al menos, en cinco etapas. La carga mayorada debe ser mantenida durante 15 min, tiempo durante el cual la deflexión o deflexiones deben ser monitoreadas y la muestra debe ser examinada buscando signos de alteración.

En esta condición, las consecuencias para el personal de una falla súbita deben considerarse y se deben tomar las precauciones adecuadas.

La carga mayorada debe removerse después de 15 min y la deflexión residual debe ser registrada después de otros 15 min.

La deflexión puede ser medida con instrumentos o registrada automáticamente mediante sistemas de conocida precisión. Se deben graficar las curvas de deflexión por carga.

F.7.8.3.2 - Criterios de aceptación - Puede considerarse que la estructura cumple con las recomendaciones de estado límite de servicio y último, si todas las siguientes condiciones se cumplen:

- (a) Las deflexiones registradas bajo la influencia de las cargas nominales no deben exceder aquellas permitidas para el límite de servicio
- (b) No debe haber evidencia visible de deformación no elástica, inestabilidad u otra alteración bajo la influencia de cargas nominales
- (c) La muestra no debe mostrar excesiva deformación, inestabilidad o signos de colapso inminente bajo las cargas mayoradas
- (d) La deflexión, o deflexiones, residual medida 15 min después de quitar todas las cargas no debe exceder el 5% de la deflexión, o deflexiones, bajo carga