EVALUACIÓN DE DEFECTOS PRODUCIDOS AL SOLDAR ALEACIONES DE ALUMINIO PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD

EVALUACIÓN DE DEFECTOS SOLICITADOS A FATIGA

FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ: *Ayudas a la Investigación Científica y Técnica. 2002-2003*

Análogamente a lo expuesto para componentes con defectos solicitados estáticamente, la evaluación de los defectos en uniones soldadas solicitadas a fatiga trata de establecer criterios de aceptación de defectos en servicio en las zonas de soldadura, basados en la estimación de defectos tolerables con criterios de adecuación al servicio "fitness for purpose".

Para la evaluación de los defectos se establece una distinción entre defectos planares, cuyo estudio se realiza en base a conceptos de la mecánica de la fractura y defectos no planares (volumétricos y de forma) que son tratados según criterios basados en datos experimentales de curvas S-N.

Independientemente de los defectos encontrados en las soldaduras, debe mencionarse que, la presencia de una soldadura reduce la resistencia a la fatiga a niveles inferiores a la propia del material sin soldar, debido a la concentración de tensión geométrica que introduce. La reducción dependerá en gran medida del diseño de la unión considerado.

Evaluación de defectos planares (Análisis mediante mecánica de la fractura)

Dos métodos pueden ser utilizados para establecer la evaluación:

- Procedimiento general
- Procedimiento simplificado basado en curvas S-N

Ambos están basados en el análisis de la mecánica de la fractura de grietas bajo cargas de fatiga, y estimando la vida a fatiga mediante integración de la ley de crecimiento de grieta con el número de ciclos.

El procedimiento general permite el uso de expresiones del factor de intensidad de tensión y datos específicos del material sobre el crecimiento de grieta.

El procedimiento simplificado hace uso de resultados de cálculos de fractura de mecánica ya realizados y son presentados gráficamente mediante curvas que representan el intervalo de tensión S frente al número de ciclos (curvas S-N).

En ambos casos, el cálculo está basado en la relación entre el crecimiento de grieta "a" con el número de ciclos "N" y el incremento del factor de intensidad " ΔK " producido por las fluctuaciones de tensión y el crecimiento de grieta. Esta relación:

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N} = A \cdot (\Delta K)^{\mathrm{m}}$$

es considerada en su parte lineal (Ley de Paris) considerando uno o dos tramos de evolución y considera que para bajos valores de ΔK , la velocidad de crecimiento del defecto (asociado, como se expuso anteriormente, a un defecto de grieta equivalente) decae rápidamente (se supone que para $\Delta K < \Delta K_o$ la velocidad de crecimiento es cero), tal que para valores inferiores al valor umbral ΔK_o resulta insignificante; por el contrario, para altos valores de ΔK la velocidad de crecimiento de grieta se acelera rápidamente hasta rotura. Por esta razón y a efectos de evaluación de defectos, sólo se considera la zona intermedia de crecimiento, donde puede establecerse una relación entre el intervalo de tensión aplicado y el número de ciclos a que se somete el material.

Los valores A y m de la Ley de Crecimiento son constantes que dependen del tipo de material, de las condiciones de solicitación y de la frecuencia de los ciclos. Dado que :

$$\Delta K = Y \cdot (\Delta \sigma) \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

sustituyendo en la Ley de Crecimiento se obtendrá:

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N} = A \left[Y^{m} \cdot (\Delta \sigma)^{m} (\pi \cdot a)^{m/2} \right]$$

e integrando entre el tamaño inicial de defecto a_i y el tamaño máximo premitido a_f antes de producirse el colapso, la aplicación de la mecánica de la fractura o estimaciones propias de proyecto permitirá:

$$\int_{a_{i}}^{a_{f}} \frac{da}{Y^{m} \cdot (\pi \cdot a)^{m/2}} = A \cdot (\Delta \sigma)^{m} \cdot N$$

de donde puede obtenerse el número de ciclos a que puede estar sometido un componente que presenta un defecto inicial o viceversa o calcular la solicitación de tensión máxima a ser utilizada para alcanzar una determinada vida del componente.

Para aleaciones de aluminio se consideran valores adecuados a introducir en la ley de Paris y estudiar la evolución de los defectos:

$$A = 1.41 \cdot 10^{-11}$$

m = 3

[da/dN expresado en mm/ciclo e ΔK en N/mm^{3/2}.]

El valor umbral considerado para ΔK_o en la solicitación a fatiga con $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \ge 0.5$ será de $21 \ N / mm^{3/2} \left(0.7 \ MPa \sqrt{m} \right)$ y para $R \le 0$ de $56 \ N / mm^{3/2} \left(1.78 \ MPa \sqrt{m} \right)$.

Teniendo en cuenta que con el crecimiento de grieta Δa , el valor de ΔK se modifica, el cálculo a efectuar debe realizarse para intervalos de integración pequeños de a y por tanto, deben ser tenidos en cuenta que para un crecimiento Δa , debe estimarse un incremento Δc de la longitud del defecto a cada extremo del mismo, (la longitud inicial 2c se incrementará en $2\Delta c$), lo que dará lugar a un nuevo cálculo del factor de intensidad de tensión, procediéndose, por tanto, a realizar un cálculo iterativo hasta alcanzar el valor máximo del tamaño de defecto aceptable.

En el procedimiento simplificado de evaluación se utiliza el criterio de "categoría de calidad" y el defecto es evaluado sobre la base de comparación de la curva S-N que representa el actual defecto y la curva requerida como resistente a la fatiga. Una serie de curvas S-N, cada una representativa de una categoría de calidad son utilizadas para establecer la comparación, considerando que el defecto actual será considerado aceptable si su categoría de calidad representativa es la misma o superior a la categoría de calidad exigida para el componente en su utilización. Esta calidad requerida está basada en las propias condiciones de servicio o por experiencia en defectos producidos en soldaduras.

Cada categoría de calidad correspondiente a un requerimiento particular de diseño es definida en términos de la curva S-N clasificadas en diez tipos designados como Q1 a Q 10, que se corresponden a la ecuación $\Delta\sigma^3 \cdot N = {\rm cons} \, {\rm tan} \, {\rm te} \, y$ designadas generalmente por el intervalo de tensión aceptable para una vida a fatiga de $2 \cdot 10^6$ ciclos, según se observa en la figura 9.

Cada categoría de calidad Q puede ser asociada al intervalo de tensión $\Delta \sigma = S$, expresado en N/mm² (MPa) correspondiente a un número de ciclos de $2 \cdot 10^6$. Debe recordarse que cada tipo de diseño de unión soldada lleva asociada una categoría de calidad, Q. Estas curvas son paralelas y tienen una pendiente de -1/3 en la representación log S frente a log N.

Los valores del intervalo de tensión S para $2 \cdot 10^6$ ciclos en las aleaciones de aluminio son los siguientes:

Categoría de calidad	<u>S (N/mm²)</u>
Q1 (equivalente clase D)	30
Q2 (equivalente clase E)	27
Q3 (equivalente clase F)	23
Q4 (equivalente clase F2)	20
Q5 (equivalente clase G)	17
Q6 (equivalente clase W)	14
Q7	12
Q8	10
Q9	9
Q10	8

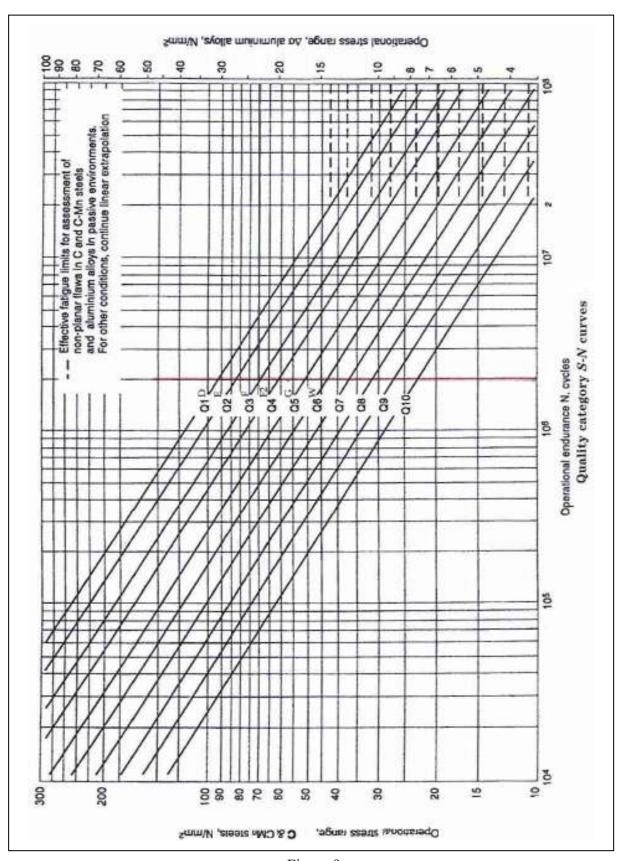


Figura 9

Las clases equivalentes D a W corresponden a las diferentes formas clásicas de realizar uniones soldadas y aparecen frecuentemente con esta designación en la bibliografía. En Anexo se incluyen los diseños de uniones soldadas más frecuentemente utilizados y su valor S asociado. A modo de ejemplo, las uniones cuya soldadura está solicitada transversalmente pertenecen a las clases 30 a 23 y las uniones en ángulo a las clases 23 a 14.

Prácticamente puede establecerse que los datos basado en curvas S-N del valor S para aleaciones de aluminio soldadas son análogos a los obtenidos bibliográficamente para soldaduras en acero, dividiendo el intervalo de tensión por el factor 3.

En los casos donde la amplitud de la carga sea constante, la categoría de calidad está fijada directamente por la correspondiente curva S-N para el intervalo de tensión requerido y número de ciclos de vida. Si el espectro de fatiga está compuesto por diferentes bloques de solicitación n_i a intervalos de tensión $\Delta \sigma_i$, puede establecerse un intervalo de tensión equivalente para $2 \cdot 10^6$ ciclos de vida basado en la Ley de Miner expresado según:

$$S = \left[\frac{\sum \Delta \sigma_i^3 \cdot n_i}{2 \cdot 10^6} \right]^{1/3}$$

Tomando como categoría de calidad la curva S-N correspondiente al intervalo de tensión superior más próximo al valor S calculado.

La aceptación de defectos, para comportamiento a fatiga, está basada en que la categoría de calidad del defecto sea igual o superior a la exigida para el componente.

Para establecer la categoría de calidad correspondiente a un defecto planar, superficial o interno, influenciada por su localización y la geometría de la unión soldada, puede hacerse uso de gráficos de valoración. El procedimiento gráfico a seguir se basa en las siguientes etapas:

- 1) Convertir las dimensiones actuales del defecto (a, 2c) en un parámetro de defecto efectivo inicial $\overline{a_i}$, correspondiente a un defecto tipo pasante (a/2c = 0). Se asocia el defecto a una grieta pasante.
- 2) Con las dimensiones máximas del defecto aceptable, o bien estableciendo el tamaño máximo de defecto grieta, pasante tolerable, puede establecerse en forma análoga al anterior el parámetro máximo de defecto tolerable amax. En esta estimación pueden utilizarse criterios de evaluación de fractura, utilizando, por ejemplo, el Nivel 1 de aceptación.

- 3) Determinar la correspondiente categoría de <u>calidad</u> del defecto máximo permitido S_m en base al valor máximo $\overline{a_{max}}$ y al espesor del componente B.
- 4) Determinar la correspondiente categoría de calidad del defecto a evaluar S_i, en base al valor a_i y al espesor del componente B.
- 5) Determinar el valor del intervalo de tensión correspondiente al defecto mediante:

$$S = \left[S_i^3 - S_m^3\right]^{1/3}$$

En el caso en que $\overline{a_{max}}$ sea muy superior a $\overline{a_i}$ puede tomarse $S = S_i$

- 6) Realizar la valoración de aceptación, considerando que la curva de categoría de calidad del defecto será la curva inferior más próxima correspondiente al valor S calculado, para el número de ciclos de vida previsto.
- 7) Como conclusión si la curva obtenida es la misma o superior a la correspondiente a la categoría establecida para el componente, el defecto será considerado aceptable.

Este procedimiento gráfico está basado en la integración de las leyes de propagación de grieta para un intervalo constante de tensión a partir de un tamaño de defecto inicial, finalizando cuando el frente de grieta penetra hasta alcanzar el espesor del componente o se produzca su fallo. El número de ciclos considerado en cada integración es inferior al 0.5% de la vida total, con objeto de que las condiciones de cálculo del factor de intensidad de tensión pueden considerarse constantes y la morfología del defecto pueda ajustarse automáticamente después de cada incremento en su crecimiento.

En el caso de defectos en la raíz de las soldaduras se considera que las formulaciones de cálculo se mantienen constantes hasta que el crecimiento de la superficie de grieta, penetrando en el material, alcance una profundidad de a = 0.15 mm.

El cálculo del valor del intervalo de tensión S correspondiente al defecto, puede considerarse análogo al cálculo de la integral de crecimiento de grieta (Ley de Paris) considerada como la diferencia entre las integrales con intervalo de integración entre el espesor equivalente inicial $\overline{a_i}$ y el espesor del componente B y el espesor equivalente máximo aceptable $\overline{a_{max}}$ y el espesor B, considerando la posibilidad de rotura del componente si se produce un modo alternativo de fallo, anterior al propio crecimiento a fatiga.

Este procedimiento gráfico será empleado en el apartado dedicado a la evaluación práctica de defectos solicitados a fatiga.

Las curvas obtenidas en la representación gráfica para la determinación de la vida a fatiga han sido deducidas para las constantes de la Ley de Paris , m=3 y A=5.21·10⁻¹³ que se corresponden a materiales férricos estructurales. Para su aplicación a las aleaciones de aluminio es necesario corregir el valor obtenido para el intervalo de tensión, dado que en estas aleaciones A=1.41·10⁻¹¹, por lo tanto, el factor de correción será:

$$S_{\text{alumimio}} / S_{\text{acero}} = \left(\frac{5.21 \cdot 10^{-13}}{1.41 \cdot 10^{-11}}\right)^{1/3} = 0.333$$

valor concordante con lo expuesto anteriormente al considerar las categorías de calidad Q para aleaciones de aluminio, análogas a las utilizadas para acero, dividiendo el intervalo de tensión S por el factor 3.

Evaluación de defectos no planares (Análisis mediante curvas S-N experimentales)

Para la evaluación de defectos internos no planares, en el cálculo del valor del intervalo de tensión S correspondiente al defecto, pueden ser eliminados dentro del espectro de fatiga, los intervalos de tensión inferiores a los siguientes, por su escasa contribución al proceso de crecimiento del defecto solicitado a fatiga.

Categoría de calidad	<u>Mínimo valor de Δσi</u> <u>considerado en el cálculo de S</u> <u>(N/mm²)</u>
Q1	14
Q2	12
Q3	11
Q4	9
Q5	8
Q6	7
Q7	6
Q8	5
Q9	4
Q10	4

Independientemente de los cálculos analíticos o gráficos realizados para la evaluación de un determinado defecto interno solicitado a fatiga, se considera que son aceptables los defectos de las dimensiones siguientes, tomando como referencia la categoría de calidad del diseño.

Categoría de calidad	Máxima longitud de inclusión de escoria (mm)	Límite de porosidad % área en radiografía (Independiente del tratamiento térmico en la soldadura)
Q1	2.5	3
Q2	4	3
Q3	10	5
Q4	35	5
Q5 e inferiores	No máximo	5

Comparando la bibliografía de datos existentes sobre el comportamiento a fatiga de uniones soldadas con defectos internos puede considerarse:

- a) Las inclusiones de Tungsteno procedentes de la soldadura TIG en las aleaciones de aluminio no son consideradas, al estar demostrado su nulo efecto sobre la resistencia a fatiga.
- b) Como porosidad individual no será aceptado, si su diámetro es superior al más pequeño valor entre la cuarta parte del espesor del componente (B/4) o 6 mm.
- c) La aceptación de grandes longitudes de escoria cuando la unión se somete a tratamiento térmico post-soldadura, tiene en cuenta la eliminación del hidrógeno en la soldadura y por esta razón no se considera defecto crítico. En el caso de la soldadura MIG o TIG la aparición de escoria puede considerarse inexistente y, por tanto, no es considerada como defecto a ser evaluado, excepto para grandes concentraciones de alúmina y en las clases Q solicitadas a elevadas tensiones. Esta posibilidad no es considerada en el caso del empleo de métodos de eliminación de tensiones residuales por medios mecánicos.

Con respecto a los defectos considerados como imperfecciones de la forma (mordeduras y desalineaciones de bordes) pueden establecerse los criterios siguientes:

a) Se aceptan las profundidades de mordeduras localizadas en la raiz de las soldaduras a tope y en ángulo solicitadas a tracción en dirección transversal a la soldadura, en base a las categorías de calidad siguientes:

Categoría de calidad	Profundidad de mordedura/Espesor material			
	Soldadura a tope	Soldadura en ángulo		
Q1	0.025	-		
Q2	0.05	-		
Q3	0.075	0.05		
Q4	0.10	0.075		
Q5 a Q10	0.10	0.10		

- b) La máxima profundidad de mordedura para cualquier espesor queda establecida en 1 mm. Profundidades superiores serán evaluadas como defectos planares superficiales.
- c) Las mordeduras presentes en uniones soldadas solicitadas a tracción en la dirección longitudinal a la soldadura, no afectan a la resistencia a fatiga del componente y, por tanto, no son consideradas desde el punto de vista de este defecto.
- d) La presencia de desalineaciones en una unión soldada puede reducir la vida a fatiga de la unión a causa del incremento de tensión producido en la junta por efecto de la tensión de flexión originada por la propia desalineación. No se considera el efecto de la desalineación en uniones soldadas solicitadas longitudinalmente o en uniones solicitadas únicamente a flexión.
- e) La desalineación será aceptable si el total de intervalo de tensión resultante de la suma de la tensión aplicada Δσ y la tensión de flexión por desalineación Δσ_s no excede al valor de la tensión establecido como referencia para la categoría de calidad del diseño de la unión. El efecto de la desalineación puede ser evaluado como un factor de amplificación de la tensión aplicada inicial, en la forma:

$$K_{\rm m} = 1 + \frac{\Delta \sigma_{\rm s}}{\Delta \sigma}$$

Este factor K_m puede suponer una disminución sobre la categoría de la unión prevista inicialmente en el diseño sin existencia de desalineación.

EVALUACIÓN DE DEFECTOS PRODUCIDOS AL SOLDAR ALEACIONES DE ALUMINIO PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD

APLICACIÓN PRÁCTICA A LA EVALUACIÓN DE DEFECTOS

FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ: *Ayudas a la Investigación Científica y Técnica. 2002-2003*

En este capítulo se han recopilado, a modo de ejemplo, algunas aplicaciones prácticas desarrolladas en base a lo expuesto en los capítulos anteriores. Se estudia, por tanto, la forma de evaluar un determinado tipo de defecto y obtener consecuencias prácticas sobre el modo de actuación aceptación/rechazo.

Como se expuso anteriormente la solicitación mecánica a que está solicitado el componente donde se ubica el defecto constituye un parámetro importante en la toma de decisiones. La tensión de solicitación puede ser muy variable y los valores tomados en los ejemplos, deben considerarse indicativos. Se pretende desarrollar el método y resultará fácilmente utilizable para diferentes valores de la tensión aplicada.

En el mismo sentido, la modificación en las características mecánicas y de fractura de las aleaciones de aluminio base y de aportación utilizadas en las uniones soldadas, hacen variar el tamaño de defecto considerado aceptable. Como podrá deducirse de la lectura de las páginas siguientes, el establecimiento por las ingenierías de hojas de cálculo, que contemplen varias alternativas es fácil de desarrollar, obteniendo resultados sobre tamaños de defectos aceptables bajo diferentes hipótesis iniciales.

Como se expuso en el capítulo dedicado al estudio de la morfología de defectos, algunos tipos de defectos con mayor severidad deberán ser evaluados mecánicamente y este capítulo trata de establecer la forma de realizar esta evaluación, tanto en solicitaciones estáticas como a fatiga.

Se consideran para evaluación de defectos las uniones soldadas siguientes:

- ❖ Uniones en aleación Al-Mg-Si de 12 mm de espesor soldadas a tope con proceso MIG.
- ❖ Uniones en aleación Al-Mg-Si de 10 mm de espesor soldadas en ángulo con proceso MIG.
- ❖ Uniones cruciformes en aleación Al-Mg-Si y Al-Mg de 6 mm de espesor soldadas con proceso MIG.
- ♦ Uniones desalineadas.

Unión soldada Al-Mg-Si (12 mm de espesor)

Como unión soldada representativa de uniones a tope de gran espesor podemos considerar la correspondiente a la aleación 6005 (Al-Mg-Si) de 12 mm de espesor, soldada a tope con proceso MIG, protección gaseosa de argón con caudal de 15 litros/minuto y material de aportación ER 4043 (Al-Si) de 1.2 mm de diámetro.

Esta unión fue ya estudiada en este trabajo y se recopilaron la morfología de los defectos más significativos, consistentes principalmente en falta de penetración en la raíz y presencia de porosidad.

El cálculo mecánico de estas uniones puede estar basado, tomando en consideración el límite elástico de la aleación base o las características mecánicas propias de la unión soldada.

Como datos medios obtenidos en nuestros ensayos para la aleación base, puede considerarse:

• Resistencia a la tracción : σ_u = 296 MPa (294-298 MPa) • Límite elástico 0.2%: σ_y = 270 MPa (270-272 MPa)

Alargamiento: A = 8.6 % (8-9.2%)
 Módulo de Young: E = 70 000 MPa

Para la unión soldada se obtiene:

• Resistencia a la tracción : $\sigma_u = 140 \text{ MPa}$

• Límite elástico aparente de la unión: $\sigma_y = 84 \text{ MPa}$

La tenacidad a la fractura para el material de soldadura se estima en:

• $K_{Imaterial} = 27 \text{ MPa } \sqrt{m} \text{ (850 N/mm}^{3/2}).$

Para el cálculo de la evaluación de defectos pueden considerarse tensiones transversales a la soldadura equivalentes a 2/3 del límite elástico del aluminio base (180 N/mm²), que en zonas embridadas pueden llegar a alcanzar el límite elástico (270 N/mm²) o bien considerar 2 veces el límite elástico de la unión soldada, teniendo en cuenta que las tensiones residuales en la soldadura pueden alcanzar el valor de su límite elástico (168 N/mm²).

Las tensiones a ser consideradas para estudio de defectos en la unión soldada serán 168, 180 y 270 N/mm², como valores representativos de la unión y que pueden ser interpolados.

Considerando en primer lugar la validez de la aplicación de la teoría lineal elástica de la mecánica de la fractura, para la evaluación de defectos, sería necesario que el espesor de material superase el valor:

B
$$\geq 2.5 \left(\frac{K_{Imaterial}}{\sigma_y} \right)^2 = 2.5 \left(\frac{850}{270} \right)^2 = 24.78 \text{ mm} \quad (25 \text{ mm})$$

En este caso al ser 12 mm el espesor utilizado la aplicación única de la teoría lineal elástica no sería muy ortodoxa, por lo que se recurrirá a utilizar, en la evaluación de defectos, los mecanismos mixtos de colapso y fractura.

El defecto más característico encontrado de falta de fusión en la ráiz puede esquematizarse en la figura 10 incluyendo el esquema básico del defecto, designando con "a" su profundidad y con "2c" su extensión o longitud.

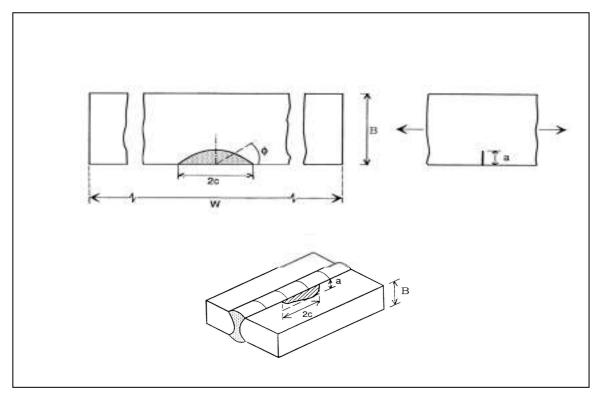


Figura 10

Para la evaluación de este defecto superficial consideremos tres morfologías siguientes:

$$\frac{a}{2c} = 0.1$$
 \Longrightarrow Longitud del defecto 10 veces su profundidad máxima $\frac{a}{2c} = 0.2$ \Longrightarrow Longitud del defecto 5 veces su profundidad máxima $\frac{a}{2c} = 0.4$ \Longrightarrow Longitud del defecto 2.5 veces su profundidad máxima

Por otra parte la evaluación de defectos puede realizarse bajo dos criterios diferentes: tipificando el defecto para reducirlo a un defecto pasante de igual severidad y calcular el factor de intensidad de tensiones aplicado, aplicando el denominado método gráfico ó calcular analíticamente el factor de severidad de defecto, aplicando las ecuaciones de cálculo establecidas para este modelo, por ejemplo, por Newman –Raju. Obtenidos los valores de S_r ó L_r (representativos de la tendencia al colapso plástico) y de K_r (representativo de la tendencia a la fragilidad o colapso plástico) se emplearán los sistemas de valoración de defectos expuestos anteriormente.

Para este caso y considerando una profundidad máxima del defecto hasta el 50 % del espeso (6 mm) se obtendría aplicando el método gráfico recopilado en la figura 11, para defectos superficiales, donde se designa como a el defecto pasante de igual severidad al defecto estudiado.

a	a/2c	2c	a/B	_ a / B	– a	Κι(σ=180)	Κι(σ=270)	Κι(σ=168)
(mm)		(mm)						
1	0.1	10	0.083	0.09	1.08	332	497	310
2	0.1	20	0.167	0.20	2.40	494	741	462
3	0.1	30	0.250	0.33	3.96	635	952	594
4	0.1	40	0.333	0.50	6.00	781	1172	731
5	0.1	50	0.417	0.74	8.88	951	1426	889
6	0.1	60	0.500	1.00	12.00	1105	1658	1033
1	0.2	5	0.083	0.08	0.96	313	469	292
2	0.2	10	0.167	0.16	1.92	442	663	413
3	0.2	15	0.250	0.25	3.00	553	829	517
4	0.2	20	0.333	0.36	4.32	663	995	620
5	0.2	25	0.417	0.47	5.64	758	1137	708
6	0.2	30	0.500	0.56	6.72	827	1241	773
1	0.4	2.5	0.083	0.04	0.48	221	332	207
2	0.4	5.0	0.167	0.10	1.20	349	524	327
3	0.4	7.5	0.250	0.15	1.80	428	642	400
4	0.4	10.0	0.333	0.22	2.64	518	778	485
5	0.4	12.5	0.417	0.29	3.48	595	893	556
6	0.4	15.0	0.500	0.37	4.44	672	1008	628

Los valores de K_{Iaplicada} han sido obtenidos mediante:

$$K_{I} = \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$$

Puede observarse en la figura 12 que representa los valores del defecto equivalente crítico pasante \bar{a} , en función de $K_{\text{Iaplicado}}$, para los tres estados tensionales considerados, que se obtienen defectos críticos para defectos de grietas pasantes aproximadas de:

Tensión aplicada σ (N/mm²)	- a (mm)	Longitud máxima defecto pasante 2 a (mm)
270	3	6
180	7	14
168	8	16

Y por tanto:

σ	a a	_ a / B	a/2c	a/B	a (mm)	2c (mm)
270	3	0.25	0.1	0.19	2.28	22.8
270	3	0.25	0.2	0.25	3.00	15
270	3	0.25	0.4	0.37	4.44	11.1
180	7	0.58	0.1	0.37	4.44	44.4
180	7	0.58	0.2	0.47	5.64	28.2
180	7	0.58	0.4	0.71	8.52	21.3
168	8	0.67	0.1	0.43	5.16	51.6
168	8	0.67	0.2	0.56	6.72	33.6
168	8	0.67	0.4	0.80	9.60	24

En la figura 13 se han representado los valores máximos del defecto aceptable. Seleccionada la tensión de trabajo, todo defecto cuyas coordenadas : profundidad (a) y logitud (2c) esté situado por debajo de la curva correspondiente de tensión será considerado aceptable.

Puede observarse como conclusión que profundidades de defectos en la raíz de la soldadura de hasta 3mm de profundidad podrán ser aceptados en una longitud de 50 mm con garantía suficiente de no producir colapso en el componente, cuando la tensión de trabajo no supere los 2/3 del límite elástico del material base. Por el contrario, un incremento de la tensión de tracción transversal al cordón de soldadura de valor igual al límite elástico del material base limitará la profundidad del defecto a 2 mm y con longitud aceptable de 20 mm.

Al considerar el defecto crítico en la soldadura como defecto crítico equivalente con $\bar{a} = 8 \text{ mm y solicitada transversalmente la soldadura a una tensión de 168 N/mm², se obtendrá un valor :$

$$S_r = \frac{Tensi\'{o}n \ apicada}{Tensi\'{o}n \ de flujo} = \frac{168}{283} = 0.594$$

(valor inferior a 0.8 aceptado por el Nivel 1 de evaluación); el valor máximo admisible de K_r será de 0.707 y para este defecto:

$$K_{\rm \, Iaplicada} = \sigma \sqrt{\pi a} = 168 \sqrt{\pi \cdot 8} = 842.2 \, \text{N} \, / \, \text{mm}^{3/2}$$

.

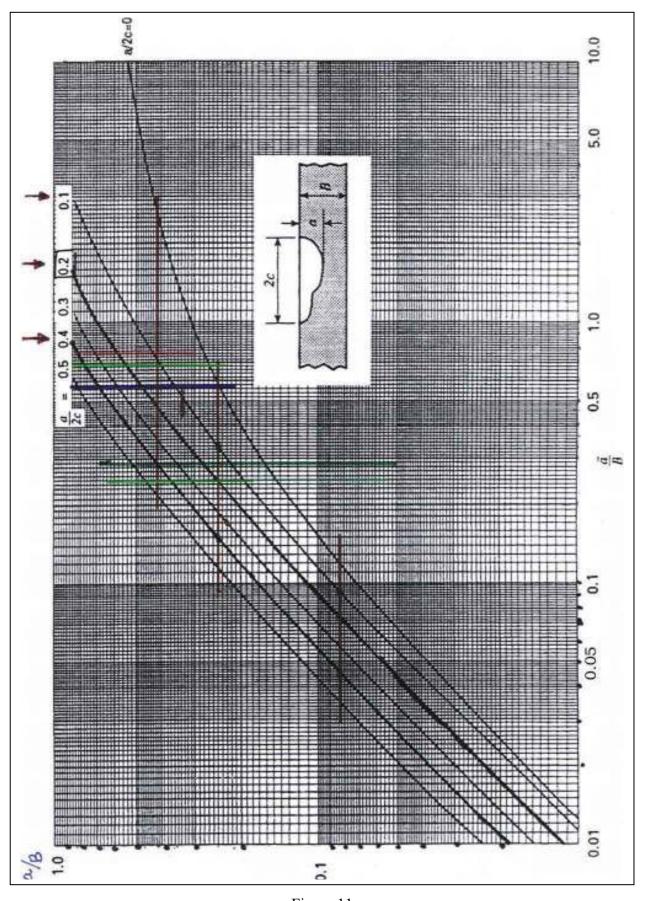


Figura 11

Aún suponiendo que la tenacidad del material de aportación se incrementa hasta $29\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (913.5 N/mm^{3/2}), se obtendría:

$$K_r = \frac{K_{Iaplicada}}{K_{material}} = \frac{842.2}{913.5} = 0.92 > 0.707$$

valor inaceptable para la evaluación según Nivel 1. Lógicamente, por tanto, el tamaño del defecto aceptable debe ser inferior al considerado

Teniendo en cuenta que la experiencia demuestra que el Criterio de Evaluación Nivel 1 trabaja con un factor de seguridad sobre el tamaño de defecto de 2, el tamaño de defecto equivalente pasante sería ahora 2a = 8 mm y a = 4 mm. En este caso:

$$K_{Iaplicada} = \sigma \sqrt{\pi a} = 168 \sqrt{\pi \cdot 4} = 595,5 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$K_r = \frac{K_{Iaplicada}}{K_{material}} = \frac{595.5}{913.5} = 0.65 < 0.707$$

y por tanto, aceptable.

Es decir, en una rápida valoración realizada según Nivel 1, podría aceptarse un defecto de severidad equivalente a un defecto pasante de longitud 2a = 8 mm.

Considerando el Nivel 2 de evaluación, mucho más ajustado a la real estimación de la severidad de defectos, se tendría según lo expuesto anteriormente:

$$L_r = \frac{\text{tensi\'on aplicada}}{\text{l\'imite elástico material}} = \frac{168}{270} = 0.623$$

Con un valor máximo de:

$$L_{rmax} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y} = \frac{270 + 296}{2 \cdot 270} = 1.048, \text{ por tanto, aceptable.}$$

El valor máximo permitido para K_r y, por tanto, para considerar el defecto seguro será:

$$K_r = (1 - 0.14 \cdot L_r^2) \cdot [0.3 + 0.7 \cdot exp(-0.65L_r^6)] = 0.92$$

que es alcanzado por las condiciones de solicitación:

$$K_{\text{raplicado}} = \frac{842.2}{913.5} = 0.92$$

Por tanto, el defecto equivalente pasante de 2a = 16 mm se considera como defecto crítico, para el Nivel 2 de evaluación, teniendo en cuenta el valor de solicitación de la unión soldada de 168 N/mm^2 establecido.

Correcciones adicionales más específicas que permiten una valoración más severa del defecto pueden ser aplicadas a este tipo de defectos localizados en la raíz de las uniones soldadas. En este sentido, un defecto equivalente de valor $\bar{a}=8$ mm resulta equivalente, como se ha expuesto a un defecto superficial de a=6.72 mm y 2c=33.6 mm (a / 2c=0.2).

En efecto, aplicando la formulación de Newman-Raju para establecer el coeficiente multiplicador correspondiente al defecto a ser aplicado en la formulación teórica $K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ se obtendrá para (a/c) = 0.4 y (a/B) = 0.56

$$\Phi = \sqrt{1.0 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}} = 1.150$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) = 1.094$$

$$M_2 = \frac{0.89}{0.2 + \left(\frac{a}{c}\right)} = 1.483$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \left(\frac{a}{c}\right)} = -0.452$$

$$M = M_1 + M_2 \cdot \left(\frac{a}{B}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{B}\right)^4 = 1.540$$

$$Y = \frac{M}{\Phi} = \frac{1.540}{1.150} = 1.34$$

Lógicamente en este caso el K_{Iaplicado} sería:

$$K_I = 1.34 \cdot 168 \cdot \sqrt{\pi \cdot 6.72} = 1.034 \text{ N/mm}^{3/2}$$

Por tanto, se considera que el defecto tiene un 23% mayor de severidad que la estimación anterior, lo que supondría la no aceptación de este defecto al superar el valor de $0.92 \cdot K_{material} = 842.2 \text{ N/mm}^{3/2} \text{ y la necesidad de disminuir el tamaño crítico aceptable.}$

Si consideramos un defecto de mucha menor profundidad 2.5mm y longitud 2c = 12.5 mm , se tendría: (a / c) = 0.4 y (a / B) = 0.208 , lo que supondría rehaciendo los cálculos:

$$M=1.157$$

$$Y = 1.00$$

Por tanto, K_{Iaplicada} será:

$$K_1 = 1.00 \cdot 168 \cdot \sqrt{\pi \cdot 2.5} = 471 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$K_r = \frac{471}{913.5} = 0.52$$
 valor aceptable.

Una profundidad de defecto intermedia sería considerada como defecto aceptable. Un defecto de 5 mm de profundidad supondría $\frac{a}{B} = \frac{5}{12} = 0.417$ y, por tanto M= 1.338 e Y=1.16, resultando:

$$K_I=1,16\cdot 168\cdot \sqrt{\pi\cdot 5}=772 \text{ N/mm}^{3/2}$$

valor aceptabe al resultar:

$$K_r = \frac{772}{913.5} = 0.85 < 0.92.$$

Por tanto, para este estado tensional elevado de 168 N/mm² sería aceptable un defecto de falta de penetración en la raíz de 5 mm. Debe pensarse que en la actualidad este defecto no es aceptable o como máximo se limita a 1mm de profundidad, lo que supone reparaciones innecesarias en las uniones soldadas.

Consideremos la influencia que puede tener la interacción entre las tensiones primarias, establecidas mediante cálculo mecánico y las secundarias procedentes fundamentalmente de las tensiones residuales de las soldaduras. La existencia de ambas tensiones tiene su influencia en el valor resultante K_r y supone una disminución en el valor del factor de intensificación de tensión aplicado $K_{laplicado}$ y, en definitiva, en un menor tamaño de defecto aceptable.

En efecto, cuando las estructuras soldadas son solicitadas mediante tensiones primarias y secundarias (tensiones residuales), los efectos de la plasticidad no pueden ser evaluados por una simple adición de ambas tensiones. Por esta razón, un término "ρ" de corrección de plasticidad es introducido en la definición de K_r para cubrir los efectos de interacción entre las tensiones primaria y residual. En este sentido, se considera que los cálculos:

$$K_r = \frac{K_{Iaplicada}}{K_{material}} + \rho$$

El valor de ρ depende de L_r y de la relación $\frac{K_I^S}{(K_I^P/L_r)}$ y el procedimiento para su determinación se resume en las siguientes fases:

- Determinar K_I^S, factor de intensidad de tensión lineal elástico, para el tamaño de defecto a estudiar, utilizando únicamente la tensión secundaria. Lógicamente si K_I^S es positiva se tenderá a que el defecto se abra y en caso negativo o nulo, que cesaria el defecto, el valor de ρ será cero.
- $\label{eq:considerando} \begin{tabular}{l} $\stackrel{}{$\leftarrow$}$ Determinar el valor de la relación $\frac{K_I^P}{L_r}$ considerando para el cálculo de K_I^P la tensión primaria aplicada. Dado que ambos K_I^P y L_r son directamente proporcionales a la carga aplicada, el nivel de tensión primaria aplicada es irrelevante \end{tabular}$
- \Rightarrow Determinar el valor de $\chi = \frac{K_I^S}{(K_I^P/L_r)}$. Este valor resultará, en uniones soldadas, generalmente inferior a 4, porque puede determinarse un factor ρ_1 mediante la ecuación:

$$\rho_1 = 0.1 \cdot \chi^{0.714} - 0.007 \cdot \chi^2 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot \chi^5$$

♦ Obtener el factor de corrección por plasticidad según:

$$\begin{array}{lll} \mbox{Para } L_r \leq 0.8 & \Longrightarrow & \rho = \rho_1 \\ \\ \mbox{Para } 0.8 < L_r < 1.05 & \Longrightarrow & \rho = 4\rho_1 \cdot (1.05 - L_r) \\ \\ \mbox{Para } L_r \geq 1.05 & \Longrightarrow & \rho = 0 \end{array}$$

Considerando que la tensión de 168 N/mm², considerada en el caso anterior, sea la suma de la tensión residual (valor igual al límite elástico de la soldadura 84 N/mm²) y de la tensión aplicada 84 N/mm² y que la máxima profundidad de defecto aceptable se ha considerado de 5 mm, el cálculo del factor de corrección por plasticidad, permitirá determinar:

$$K_{\rm L}^{\rm S} = Y \cdot \sigma^{\rm s} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = 1.16 \cdot 84 \cdot \sqrt{\pi \cdot 5} = 386 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$K_{L}^{P} = Y \cdot \sigma^{P} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = 1.16 \cdot 84 \cdot \sqrt{\pi \cdot 5} = 386 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$L_r = \frac{\text{tensi\'on aplicada primaria}}{\text{l\'imite elástico del material}} = \frac{84}{270} = 0.31$$

$$\frac{K_{\rm I}^{\rm P}}{L_{\rm r}} = \frac{386}{0.31} = 1245$$

$$\chi = \frac{K_{\rm I}^{\rm S}}{(K_{\rm I}^{\rm P}/L_{\rm r})} = \frac{386}{1245} = 0.31$$

$$\rho_1 = 0.043 < 0.8$$
 $\rho = 0.043$

$$K_{\rm r} = \frac{K_{\rm Iaplicada}}{K_{\rm material}} + \rho = 0.85 + 0.043 = 0.89 < 0.92$$

y, por tanto, el defecto de 5 mm de profundidad se considera aceptable, también considerando la corrección de plasticidad, aunque más cercano al límite crítico de aceptación.

Si la tensión de solicitación se incrementa hasta 270 N/mm², manteniendo el mismo valor de la tensión secundaria en 84 N/mm², el resultado obtenido para la corrección por plasticidad sería análogo, ya que los valores , K_1^P y L_r vendrán afectados por la nueva tensión, pero su cociente se mantendrá constante y, por tanto, el valor χ será también 0.31.Unicamente modificando el valor de la tensión residual se alterará el valor del parámetro χ y, por tanto, el factor de corrección plástica ρ .

No obstante, debe ahora considerarse que:

$$K_r = \frac{855}{913.5} + 0.043 = 0.98 > 0.92$$

y, por tanto, el defecto de 5 mm de profundidad no será aceptable para una tensión de solicitación de 270 N/mm² en la unión.

La teoría elastoplástica de valoración de defectos se basa en el conocimiento del valor del CTOD crítico y la curva experimental de diseño. Se acepta que el coeficiente de seguridad en la determinación del tamaño crítico de defecto es aproximadamente 2, análogo al Nivel 1 de evaluación. En nuestros ensayos con uniones soldadas este valor puede estimarse en 0.04 mm. Para un valor de la relación:

$$\frac{\text{Tensión aplicada}}{\text{Límite elástico del material}} = \frac{168}{271} = 0.62$$

se obtiene de la figura 14, que reproduce la denominada "Curva de Diseño CTOD", el valor c=0.4 y como parámetro admisible de defecto:

$$\overline{a_{m}} = C \left(\frac{\delta_{critico}}{\varepsilon_{y}} \right) = 0.4 \cdot \frac{0.04}{271/7 \cdot 10^{4}} = 4,13 \text{ mm}$$

$$\overline{a_{\rm m}} = C \left(\frac{K_{\rm IC}}{\sigma_{\rm y}}\right)^2 = 0.4 \cdot \left(\frac{913.5}{271}\right)^2 = 4.54 \text{ mm}$$

valores concordantes con los obtenidos para el Nivel 1 de valoración. Por tanto, la aplicación del Nivel 1 de valoración, como la utilización de la curva de Diseño establecen que el defecto máximo aceptable en la raíz de la soldadura será equivalente a un defecto pasante de longitud 2a = 8 mm para una solicitación en la unión de 168 N/mm² y considerando un factor de seguridad en el tamaño del defecto de 2.

<u>Para el estudio a fatiga</u> de este tipo de defectos, detectados en uniones de placas a tope con soldadura transversal al defecto, que se encuadran dentro de la categoría Q₃ ó F de uniones, debemos considerar la tensión máxima de solicitación de la unión soldada, es decir, el valor del intervalo de tensión. Según se observa en la figura 15 este valor para 2·10⁶ ciclos de vida puede estimarse en 23N/mm².

Para defectos superficiales en la raíz de 0.5 mm de profundidad, manteniendo la relación a / 2c = 0.2 puede observarse en la figura 16 que el parámetro de defecto efectivo correspondiente a un defecto pasante, tendrá por valor:

$$\frac{a}{B} = \frac{0.5}{12} = 0.04$$

$$\frac{a}{B} = 0.0065 \implies \overline{a_i} = 0.078$$

$$\frac{a}{2c} = 0.2$$

El defecto máximo tolerable $\overline{a_{max}}$ considerado anteriormente para a = 2.5 mm (con la relación a / 2c = 0.2)

$$\frac{a}{B} = \frac{2.5}{12} = 0.208$$

$$\frac{\overline{a}}{B} = 0.05 \qquad \Longrightarrow \quad \overline{a_{\text{max}}} = 0.6$$

En la figura 17 se comprueba que el defecto $\overline{a_{max}}$ correspondería a la categoría Q_5 con tensión:

$$S_{\rm m} = \frac{50}{3} = 16.7 \text{ N/mm}^2$$

Considerando el factor 1/3 para aleaciones de aluminio. El defecto inicial $\overline{a_i}$ corresponde a la categoría Q2 con tensión de :

$$S_i = \frac{80}{3} = 26.7 \text{ N/mm}^2$$

La categoría del defecto será:

$$S = \left(S_i^3 - S_m^3\right)^{1/3} = \left(26.7^3 - 16.7^3\right)^{1/3} = 24.3 \text{ N/mm}^2 > 23 \text{N/mm}^2$$

Por tanto, será aceptable para diseño de la unión soldada a fatiga en clase F (Q3) un defecto inicial de falta de penetración en la raíz de 0.5 mm, que propagará en $2 \cdot 10^6$ ciclos hasta una profundidad de 2.5 mm en que el defecto será inestable.

Puede comprobarse que la consideración de un defecto inicial en la raíz de la unión soldada de 1mm (manteniendo a / 2c = 0.2) supondría:

$$\frac{a}{B} = 0.083$$

$$\frac{a}{2c} = 0.2$$

$$\frac{a}{B} = 0.016 \implies \overline{a_{\text{max}}} = 0.192$$

que corresponde a $\overline{S_i} = \frac{68}{3} = 22.7 \text{ N/mm}^2 \text{ y por tanto:}$

$$S = (22.7^3 - 16.7^3)^{1/3} = 19.2 \text{ N/mm}^2 > 23 \text{N/mm}^2$$

valor inferior al aceptable y, por tanto, no válido como defecto inicial tolerable para el diseño de uniones a fatiga en clase F(Q3) con vida estimada de $2 \cdot 10^6$ ciclos.

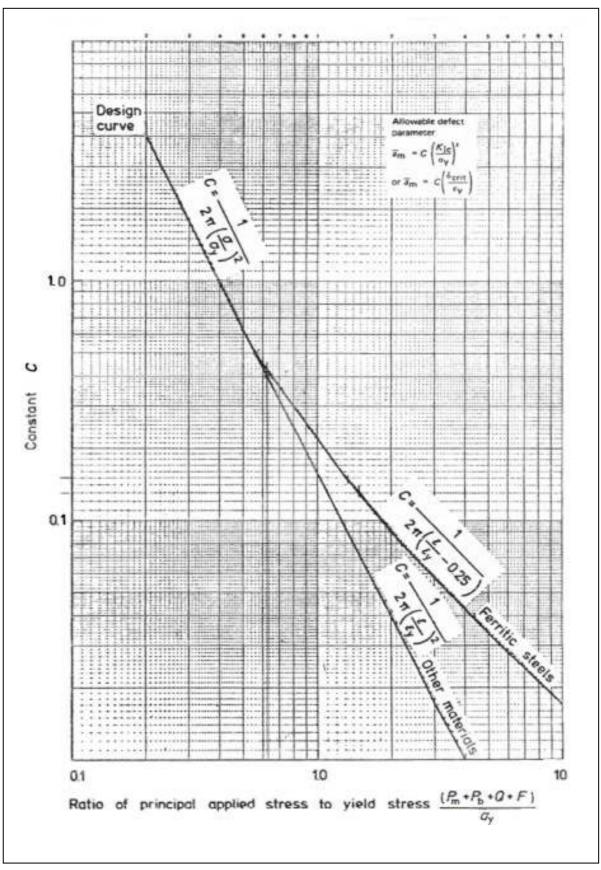


Figura 14

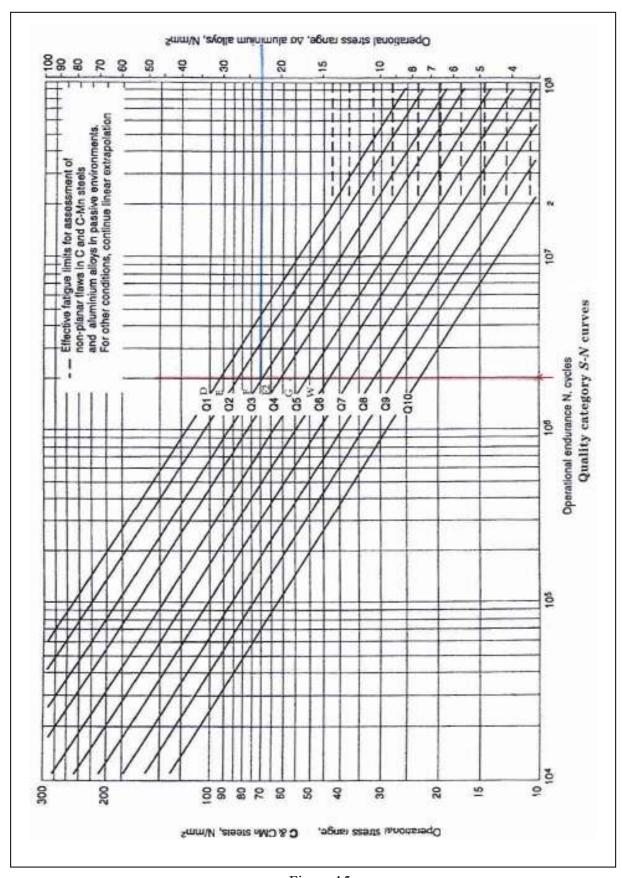


Figura 15

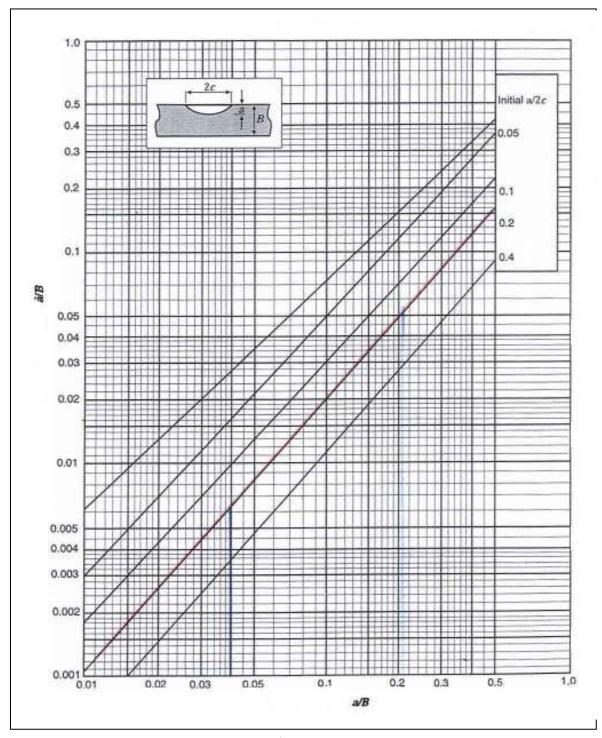


Figura 16

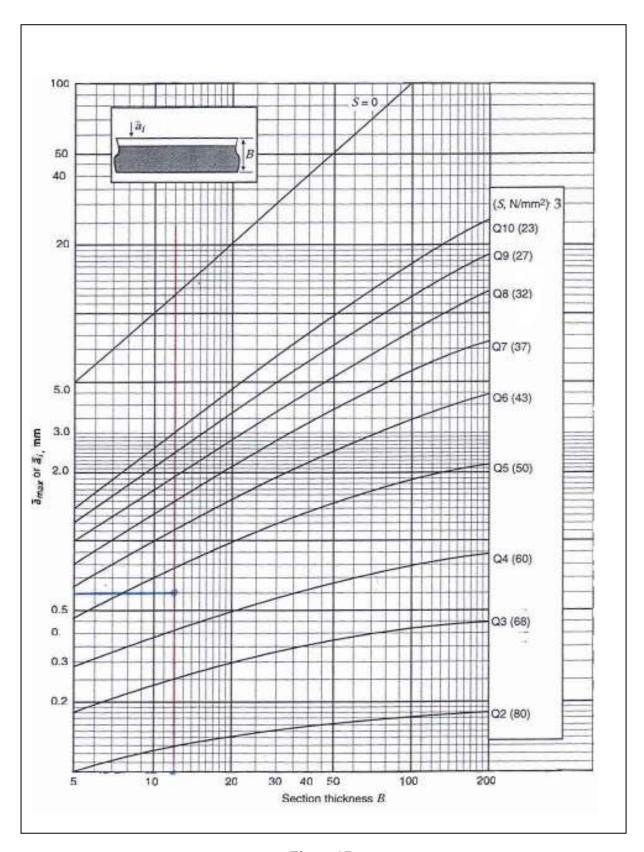


Figura 17

Evidentemente este defecto sería aceptable para diseño a fatiga en clase de soldadura tipo G (Q5), como puede fácilmente comprobarse.

Las figuras que han servido para la evaluación por el método simplificado de categoría de calidad están basadas para parámetros de la Ley de crecimiento de grieta de Paris m=3 y $A=5.21\cdot 10^{-13}$ correspondientes al acero, no obstante, su aplicación es general, ya que la vida a fatiga es directamente proporcional al parámetro A. Expresados en términos de tensión S, el intervalo de tensión S_1 correspondiente a esta misma categoría de calidad para un parámetro A, diferente será:

$$S_1 = S \left(\frac{5.21 \cdot 10^{-13}}{A_1} \right)^{1/3}$$

Para el caso de las aleaciones de aluminio consideradas con A_1 =1.41·10⁻¹¹, manteniendo m = 3, resultaría:

$$\frac{S}{S_1} = \left(\frac{5.21 \cdot 10^{-13}}{1.41 \cdot 10^{-11}}\right)^{1/3} = 0.33$$

razón por la cual los valores de las tensiones obtenidas en los gráficos son divididas por el factor 3 para el caso de aleaciones de Aluminio, como también se expuso en las consideraciones teóricas anteriormente expuestas.

La bondad del método gráfico simplificado de las categorías de calidad, puede ser verificada realizando el cálculo mediante integración de la ley de Paris:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = \mathbf{A} \cdot (\Delta \mathbf{K})^{\mathrm{m}}$$

 $Con \ \frac{da}{dN}: mm/ciclo \ y \quad \Delta K: N/mm^{3/2} \ considerando \ que \ para \ las \ aleaciones \ de \ aluminio \ m=3 \ y \ A=1.41\cdot 10^{-11}.$

En el caso considerado de defecto inicial en la raíz de la soldadura de a = 0.5 mm de profundidad que propaga hasta a = 2.5 mm, podemos considerar en forma sencilla dos intervalos de integración entre 0.5 y 1.5 mm y entre 1.5 mm y 2.5 mm con objeto de mantener el valor de K constante dentro de cada intervalo.

Para el primer intervalo: 0.5-1.5 mm, tomando a = 1mm (valor medio) resultará:

$$\frac{a}{2c} = 0.2$$
 ; $\frac{a}{B} = 0.0833$

y según la formulación de Newman-Raju:

M=1.104 ;
$$Y = \frac{M}{\Phi} = \frac{1.104}{1.150} = 0.96$$

Para el segundo intervalo: 1.5-2.5 mm, tomando a = 2 mm (valor medio) resultará:

$$\frac{a}{2c} = 0.2$$
 ; $\frac{a}{B} = 0.1666$
M=1.1348 ; $Y = \frac{M}{\Phi} = \frac{1.1348}{1.150} = 0.99$

Integrando para ambos intervalos la expresión general:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = \mathbf{A} \cdot \left(\Delta \mathbf{K}\right)^{\mathrm{m}}$$

$$con \Delta K = Y \cdot (\Delta \sigma) \sqrt{\pi \cdot a}$$

resultará:

$$\int\limits_{a_{i}}^{a_{f}}a^{-\frac{m}{2}}da=A\cdot\left(\Delta\sigma\right)^{m}\cdot Y^{m}\cdot\pi^{\frac{m}{2}}\cdot N$$

$$\int\limits_{a_{i}}^{a_{f}}a^{-1.5}da = 1.41\cdot 10^{-11}\cdot 23^{3}\cdot Y^{3}\cdot \pi^{1.5}\cdot N$$

resultando para el primer intervalo N_1 = 1 170 237 ciclos y para el segundo N_2 = 1 521 724 ciclos, por tanto, N_{total} = 2 691 961 ciclos, valor ligeramente superior a $2 \cdot 10^6$ ciclos admitidos como vida y, por tanto, aceptable.

Como conclusión al estudio realizado para defectos producidos en la raíz de las uniones soldadas a tope de aleación Al-Mg-Si (A6005) de 12 mm de espesor, soldadas con aportación ER 4043 y solicitadas a una tensión transversal a la soldadura de 168 N/mm², puede establecerse:

♦ Aplicando el Nivel 1 de evaluación o la curva de Diseño serían aceptables defectos con severidad equivalente a un defecto pasante centrado sobre una placa de gran anchura de longitud 2a = 8 mm. Estos métodos de evaluación mantienen un nivel de seguridad en el tamaño de defecto aproximado a 2.

- \Leftrightarrow Por esta razón, aplicando el cálculo con Nivel 2, más ajustado a la realidad, el tamaño de defecto crítico equivalente resulta de 2a = 16 mm.
 - Defectos equivalentes al considerado podrían ser de profundidad real 5 mm y longitud 50 mm ó profundidad 6 mm y longitud 33 mm.
- ❖ Realizando un cálculo más preciso del factor de intensidad de tensión en la junta de la grieta, se determina qué profundidad máxima de 2.5 mm y longitud de 12.5 mm proporciona una gran seguridad en la aceptación del defecto, para la mencionada tensión de solicitación.
- ♦ Mediante el cálculo de la severidad de defecto en solicitación a fatiga para uniones incluidas en la clase F (Q3) se determina qué defectos en raíz de soldadura con profundidad 0.5 mm, necesitarían más de 2·10⁶ ciclos para alcanzar el tamaño considerado crítico en solicitación estática (2.5 mm de profundidad)
- ❖ Se establece la sistemática para la evaluación de este tipo de defectos bajo diferentes condiciones de solicitación, tanto estática como dinámica, y diferentes propiedades mecánicas de tracción y fractura asociadas a la aleación de aluminio a estudiar.

Uniones en ángulo

Consideremos las uniones en ángulo entre chapas de 10 mm de espesor de aleación Al-Mg-Si 6005 soldada mediante proceso semiautomático MIG con aportación ER 4043 y en posición horizontal plana por ambos lados. El tipo de defecto objeto de estudio más importante se encuentra localizado en los bordes de las soldaduras y puede esquematizarse en la figura 18 donde "a" representa la profundidad del defecto, "2c" su extensión y "B" el espesor de la chapa que sirve de propagación del defecto.

Este tipo de defectos superficiales, denominados "weld toe crack" se caracterizan por presentar una morfología muy extendida, por lo que podemos considerar una relación entre su profundidad y longitud de valores:

$$\frac{a}{2c} = 0.2$$
 y $\frac{a}{2c} = 0.1$

Bajo consideraciones de cálculo este tipo de uniones se proyectan estáticamente al 80% del límite elástico del material de aportación o al 30% del límite elástico de la aleación base. Según nuestros ensayos el límite elástico del material base es 271 MPa, lo que supondría 81.3 MPa para cálculo o bien para el material de aportación con 84 MPa de límite elástico, un valor de cálculo de 67.2 MPa. Se he tomado para nuestro estudio como base tensional para la evaluación de defectos el valor medio entre ambos valores 74.25 MPa (75 MPa).

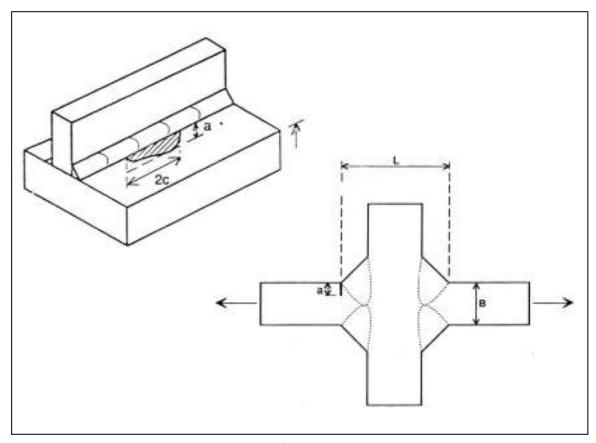


Figura 18

Consideremos defectos de profundidades a=1, 3 y 5 mm con relaciones morfológicas a / 2c=0.1 y 0.2. Según la figura 19 los defectos equivalentes serían:

a (mm)	2c (mm)	a/2c	a/B	a/B	a (mm)	$K_{\text{Iaplicada}} $ $(N/mm^{3/2})$	K _{Iapliacada} (Newman-Raju)
1	10	0.1	0.1	0.12	1.2	146	$1.08\sqrt{\pi \cdot a} \cdot \sigma = 144$
3	30	0.1	0.3	0.45	4.5	282	$1.24\sqrt{\pi \cdot a} \cdot \sigma = 286$
5	50	0.1	0.5	0.95	9.5	410	$1.55\sqrt{\pi \cdot a} \cdot \sigma = 461$
1	5	0.2	0.1	0.09	0.9	126	$0.96\sqrt{\pi \cdot a} \cdot \sigma = 128$
3	15	0.2	0.3	0.32	3.2	238	$1.06\sqrt{\pi \cdot a} \cdot \sigma = 244$
5	25	0.2	0.5	0.6	6.0	326	$1.25\sqrt{\pi \cdot a} \cdot \sigma = 371$

La diferencia entre calcular con defecto equivalente o mediante aplicación de la formulación de Newman-Raju para obtener la K_{aplicada} al defecto, no supera el 15% en los valores más elevados de profundidad de defecto. Ambos métodos pueden, por tanto, considerarse equivalentes.

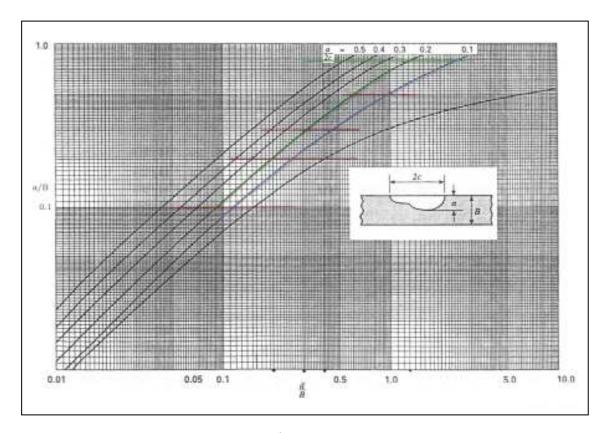


Figura 19

Considerando el Nivel 2 de evaluación

$$L_{r} = \frac{\sigma_{aplicado}}{\sigma_{y}(limite\ elástico\ material)} = \frac{75}{271} = 0.277$$

y el valor de K_r máximo permitido será de:

$$K_r = (1 - 0.14L_r^2) [0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)] = 0.99$$

resultando para el defecto con $\stackrel{-}{a}=9.5\,\text{mm}$ un valor K_r , para tenacidad del material de $850\,\text{N/mm}^{3/2}$:

$$K_r = \frac{461}{850} = 0.54$$
.

Por tanto, el defecto será considerado aceptable.

En la figura 20 se representan los valores obtenidos sobre el gráfico FAD correspondiente al Nivel 2, considerando un valor para $K_{material} = 850 \text{ N/mm}^{3/2}$ sería necesario para la tensión de solicitación de 75 MPa, alcanzar el valor de $K_{laplicada}$ de:

$$K_I = 0.99 \cdot 850 = 841 \text{ N/mm}^{3/2}$$

lo que supondría una profundidad de defecto equivalente de $\overline{a} = 40 \text{ mm}$ y en la figura 19 para $\overline{\frac{a}{B}} = 4$ y $\overline{\frac{a}{2c}} = 0.1$, se obtendría un valor $\overline{\frac{a}{B}} = 1$ lo que significa que la profundidad de grieta debería alcanzar todo el espesor del material. Evidentemente el material rompería previamente al no poder soportar el esfuerzo en el ligamento no fisurado.

Según los resultados, debe pensarse que con la solicitación de 75 MPa en la unión soldada, el cálculo a rotura debe ser establecido, no por avance de grieta estática, sino por rotura plástica en el ligamento remanente y que la severidad del defecto no contribuirá a ser la causa principal de la rotura. El cálculo de la unión deberá ser realizado estáticamente considerando el espesor remanente del material.

Si consideramos que la tensión en la soldadura puede incrementarse, debido a las tensiones residuales, en el límite elástico del material de aportación, estimado en 84 N/mm², la tensión resultante para cálculo será de 160 N/mm².

Para estudiar la propagación del defecto inicial a través de la aleación base se consideraría:

$$L_{\rm r} = \frac{160}{271} = 0.59$$

siendo aceptable un valor K_r máximo de 0.93. Por tanto, $K_{laplicada} = 0.93 \cdot 850 = 790.5$ N/mm^{3/2}.

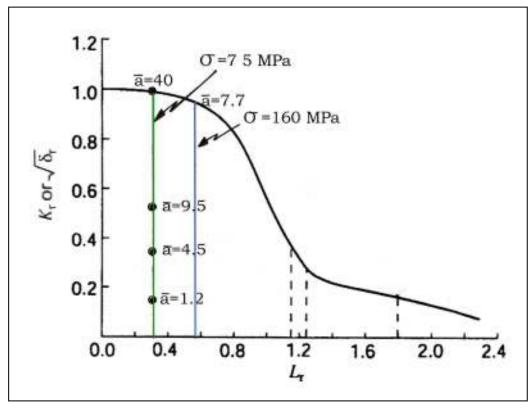


Figura 20

En este caso sería necesario para producir la rotura un defecto equivalente de $\frac{1}{a} = 7.7 \text{ mm}$, $\frac{1}{a} = 0.77 \text{ y para}$ $\frac{a}{2c} = 0.1$, resultará $\frac{a}{B} = 0.45 \text{ y a} = 4.5 \text{ mm}$. Por tanto, una profundidad de defecto de 4.5 mm provocaría la rotura del componente, ver figura 20.

El sistema de cálculo puede ser empleado con diferentes valores de la tensión de solicitación para obtener el tamaño de defecto máximo aceptable y análogamente al caso anterior puede realizarse el cálculo de corrección plástica para un mejor ajuste en las dimensiones del defecto aceptable.

En el estudio a Fatiga consideremos que este tipo de unión sea considerada como perteneciente al tipo W (Q6) con un intervalo de amplitud de tensión aceptable de 14 MPa para el cálculo de la unión, figura 21.

Para un defecto inicial de 0.5 mm. ($\frac{a}{B} = 0.05$) y ($\frac{a}{2c} = 0.2$), el parámetro efectivo de defecto, ver figura 22, resultará $\frac{a}{B} = 0.019$ correspondiente a a = 0.19 mm. El defecto máximo tolerable podemos estimarlo en 4 mm ($\frac{a}{B} = 0.4$), a lo que corresponderá un defecto efectivo de $\frac{a}{B} = 0.22$, por tanto a = 2.2 mm.

Para el espesor de material de 10 mm, el defecto inicial se corresponde con la categoría Q6 correspondiente a un valor:

$$S_i = 43 / 3 = 14.33$$
 MPa. (Factor 3 para las aleaciones de aluminio)

El defecto final de 4 mm (\bar{a} = 2.2 mm) es asociado a la categoría Q10 con tensión de $\frac{23}{3}$ = 7.66 MPa . Por tanto:

$$S = \left[S_i^3 - S_m^3\right]^{1/3} = \left(14.33^3 - 7.66^3\right)^{1/3} = 13.56 MPa$$

valor inferior a los 14 MPa previstos para la clase Q6 de soldadura y, por tanto, el defecto inicial de 0.5 mm de profundidad será considerado inaceptable para una vida de $2 \cdot 10^6$ ciclos. El límite podría establecerse para obtener en el defecto inicial la clase Q5, que corresponde a un defecto inicial de 0.4 mm ($\frac{a}{B} = 0.02$) con morfología ($\frac{a}{2c} = 0.2$) que supondría:

$$\frac{a}{B} = 0.04$$
 \Longrightarrow $\frac{a}{B} = 0.015$ \Longrightarrow $a = 0.15$ mm \Longrightarrow Categoria Q5 (16.66 Mpa)

resultando:

$$S = (16.66^{3} - 7.66^{3})^{1/3} = 16.1 \text{ MPa} > 14 \text{ MPa}$$

y, por tanto, el defecto inicial de 0.4 mm de profundidad se consideraría aceptable, en el diseño de la unión como clase Q6 (W).

Para el cálculo puede observarse que la distancia L entre extremos de los cordones de soldadura no tiene prácticamente influencia desde pequeñas gargantas de cordón asociadas a L/B= 1.8 hasta valores muy superiores con L/B \geq 5.3 (figuras 23 y 24).

En el mismo sentido puede verificarse que el diseño de la unión como categoría Q5 (G) con tensión de solicitación a fatiga de 17 MPa resultará muy problemática al no aceptar prácticamente defectos iniciales en la unión soldada.

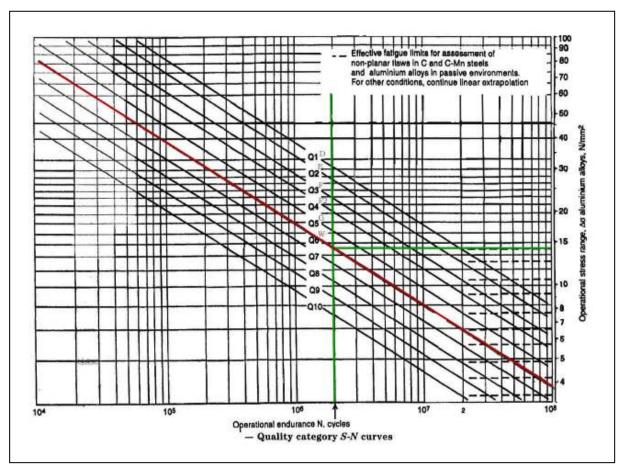


Figura 21

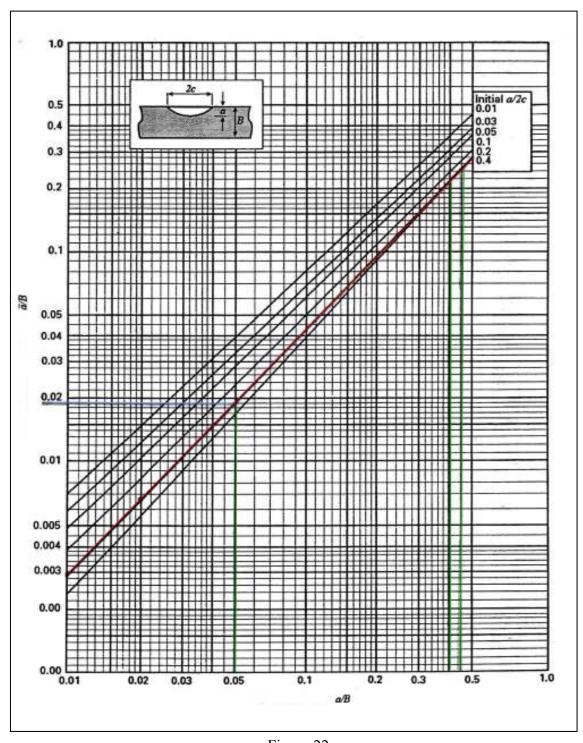


Figura 22

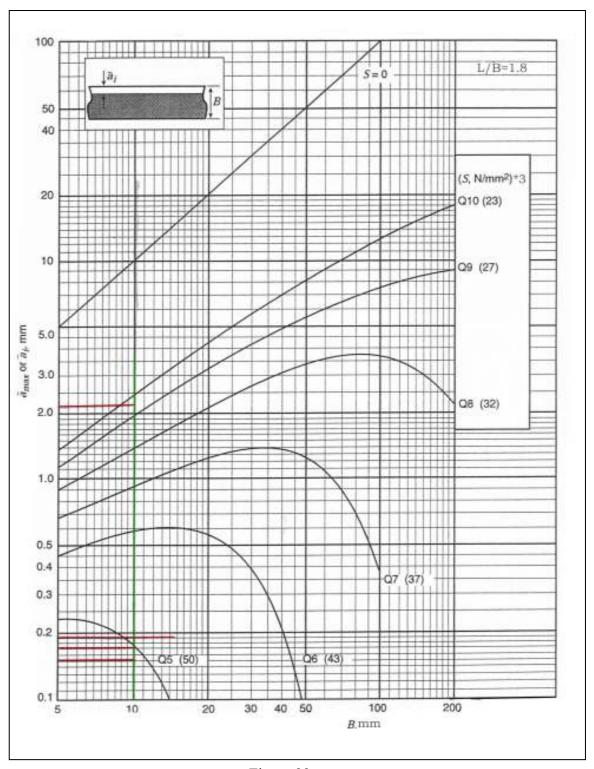


Figura 23

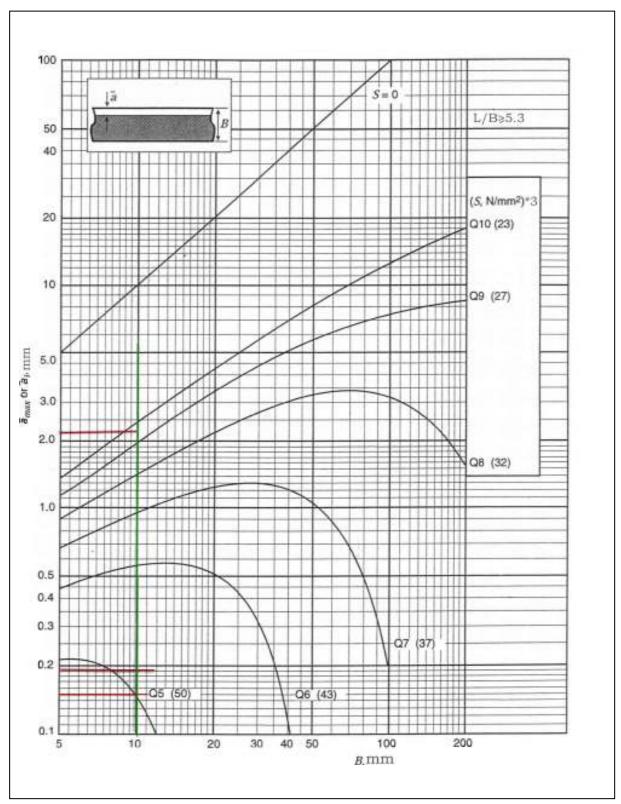


Figura 24