

Imperfecciones en juntas soldadas de cascos: evaluación crítica de ingeniería

Rodolfo Mussini (1), Ignacio Iturrioz (2)

- (1) **Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU)**, Montevideo, Uruguay, e-mail: rmussini@latu.org.uy
- (2) **Profesor de la Universidade Federal de Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, Brasil, e-mail: ignacio@mecanica.ufrgs.br

RESUMEN:

En nuestra región, tradicionalmente la evaluación de imperfecciones en juntas soldadas de cascos es llevada a cabo mediante criterios de control de calidad, tales como los incluidos en reglas y códigos de fabricación habitualmente utilizados en la industria naval. En muchos casos, la aplicación de estos criterios resulta excesivamente conservadora. Desde el punto de vista económico, es atractiva la idea de implementar otras alternativas de evaluación de imperfecciones. En muchos casos, la aplicación de métodos de evaluación alternativos permite evitar grandes costos asociados a reparaciones innecesarias de juntas soldadas. En aquellos casos donde, según el criterio de control de calidad de fabricación utilizado, la imperfección constituya un defecto (imperfección de tamaño crítico), el rechazo puede no ser necesariamente automático. La decisión acerca de si el rechazo o la reparación de una junta soldada es justificada puede estar basada en criterios de adecuación al uso los cuales, pueden fundamentarse en: a) experiencia previa documentada con similares combinaciones de material, tensiones actuantes y medios en contacto o b) sobre la base de una “evaluación crítica de ingeniería” (ECI). Debe enfatizarse, que la proliferación de imperfecciones, aunque se demuestre que son aceptables luego de realizar un análisis a través de una ECI, debe ser interpretada como una indicación de que la calidad de fabricación debe ser mejorada. El uso de la ECI, bajo ninguna circunstancia, puede ser visto como una alternativa a la utilización de mano de obra calificada. La filosofía de este método es complementaria a dicha mano de obra calificada y no debe interpretarse como un posible reemplazo de la misma la cual, es inherentemente asumida. En el presente trabajo se aplican conceptos de la ECI a las imperfecciones en juntas soldadas de cascos. En este sentido, se recurre a la utilización de la norma BS 7910 [1] que involucra la aplicación de conceptos de mecánica de la fractura. Adicionalmente, se comparan los resultados obtenidos utilizando esta última metodología, con

resultados que surgen de la aplicación de reglas comúnmente utilizadas en la industria naval.

Introducción:

En el marco de la ECI, la mecánica de la fractura es una herramienta extremadamente poderosa para el análisis de estructuras metálicas [2]. Ella evalúa la relación crítica entre la tensión, el tamaño de la imperfección y la tenacidad a la fractura, Fig. 1. La tensión es usualmente fijada en el diseño, mientras que la tenacidad a la fractura es una propiedad del material. Todos los materiales contienen imperfecciones a alguna escala, las técnicas de ensayos no destructivos determinan el tamaño y la posición de tales imperfecciones en las estructuras. La mecánica de la fractura provee la relación matemática entre las tres variables antes mencionadas al momento de la falla. El valor crítico de cualquiera de estas cantidades puede ser determinado si los otros dos valores son conocidos. Por ejemplo, si la tensión de diseño en la estructura y la tenacidad a la fractura del material son conocidas, se puede determinar el tamaño crítico de la imperfección por medio de un análisis de mecánica de la fractura.

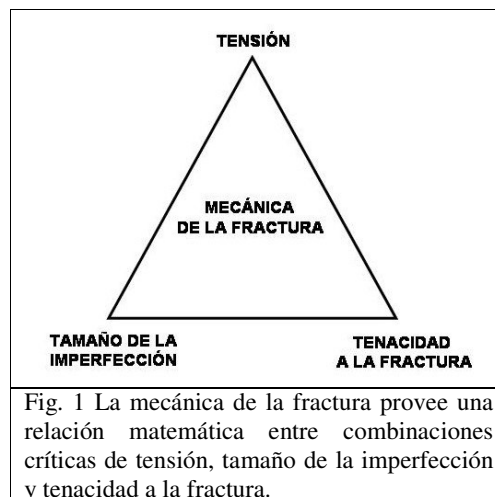


Fig. 1 La mecánica de la fractura provee una relación matemática entre combinaciones críticas de tensión, tamaño de la imperfección y tenacidad a la fractura.

Esto constituye un apartamiento del modo tradicional de diseño el cual relaciona las tensiones aplicadas con la tensión de fluencia del material. Uno de los principales esfuerzos orientados a sistematizar la aplicación de la mecánica de fractura a nivel industrial en el Reino Unido ha sido plasmado en el documento PD 6493 [3]. En el año 1991 este documento fue revisado por primera vez y en su segunda revisión del año 1999 adquiere el carácter de norma bajo la designación BS 7910 [1]. La metodología descrita en esta norma no sólo contempla la falla de estructuras cuando ésta es controlada por parámetros de mecánica de la fractura, sino que también contempla la falla controlada por colapso plástico. Desafortunadamente en Uruguay este tipo de análisis todavía no alcanza su implementación a nivel industrial. Debido a esto, la criticidad de las imperfecciones tanto en las etapas de fabricación como de servicio de estructuras metálicas es juzgada en términos de criterios de control de calidad, tales como los incluidos en las reglas y códigos de fabricación. El presente trabajo describe la evaluación de imperfecciones en juntas soldadas del casco de una barcaza diseñada para el transporte de celulosa en aguas del Río Uruguay, siguiendo los criterios indicados en la norma BS 7910 [1]. Adicionalmente, se comparan los resultados obtenidos utilizando esta metodología con los resultados que surgen de la aplicación de la Guía ABS [4] para la inspección no destructiva en juntas soldadas de cascos.

Materiales:

Las características nominales de los materiales utilizados en la construcción de la cubierta exterior del casco de la barcaza se indican en la Tabla 1 del Anexo I. Los valores de tenacidad a la fractura fueron estimados para una temperatura extrema de 0° C, a partir de valores nominales de la energía de impacto Charpy (CVN).

Geometría de la junta y tipo de imperfección:

La imperfección evaluada se encuentra situada en una junta soldada a tope con preparación de bisel en V simple, de dos placas pertenecientes a la cubierta exterior del casco. Para la ejecución de la soldadura se utilizó respaldo cerámico. Se consideró una imperfección del tipo falta de fusión lateral (fusión incompleta) con salida superficial. En la Fig. 2 se observa un detalle de la geometría de la junta, la posición y la orientación de la imperfección estudiada.

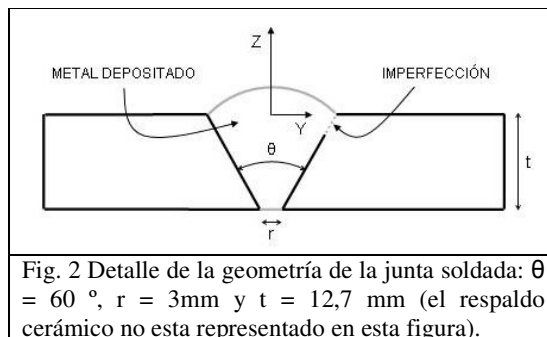


Fig. 2 Detalle de la geometría de la junta soldada: $\theta = 60^\circ$, $r = 3\text{mm}$ y $t = 12,7\text{mm}$ (el respaldo cerámico no está representado en esta figura).

Nivel de evaluación:

Se aplicó el Nivel 2A de evaluación de fallas (evaluación normal) de la norma BS 7910 [1] el cual, no incluye análisis de fatiga. Esta metodología contempla simultáneamente la falla por colapso plástico y la falla por fractura.

Modelo de cálculo de la relación de colapso plástico:

La relación de colapso plástico, L_r está definida como [1]:

$$L_r = \sigma_{ref} / \sigma_Y \quad (1)$$

donde σ_{ref} es la tensión de referencia y σ_Y es la tensión de fluencia del material, Tabla 1 del Anexo I. Se asume que la tensión es del tipo membranal, P_m con una distribución uniforme en el plano XZ, Fig. 3. Dicha tensión se encuentra orientada en la dirección Y. Se considera que la restricción a la flexión de las placas es del tipo normal, es decir que las mismas no se encuentran articuladas en sus extremos. En virtud de lo anterior puede definirse σ_{ref} [1].

Modelo de cálculo de la relación de fractura en la estructura:

La relación de fractura en la estructura, K_r está definida como [1]:

$$K_r = K_I / K_{IC} + \rho \quad (2)$$

donde K_I es el factor de intensidad de tensiones aplicado, K_{IC} es la tenacidad a la fractura del material, ver Tabla 1 del Anexo I y ρ es el factor de corrección por plasticidad. Se asume que por debajo de su línea neutra las placas de la cubierta exterior del casco de la barcaza se encuentran sometidas a tracción. Despreciando el esfuerzo cortante, esto conducirá al Modo I de fractura en aquellas juntas soldadas verticales que contengan imperfecciones. Esto es, en las juntas orientadas en la dirección X, Figs. 3 y 4. Para el cálculo de K_I se consideró el modelo de imperfección superficial en

placas planas, Fig. 3. En virtud de lo anterior, quedan definidas las variables para el cálculo de KI [1].

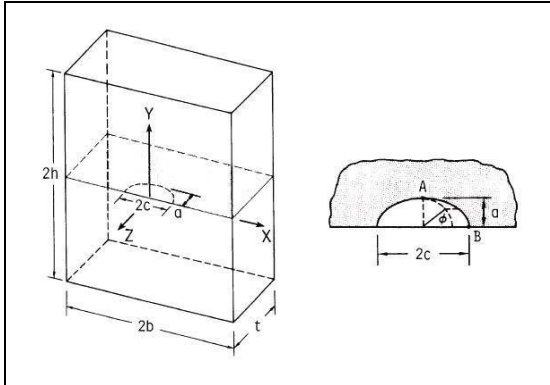


Fig. 3 Fisura superficial en placas planas soldadas a tope: X - orientación de la junta soldada (el detalle de la geometría de la junta está indicado en esta Fig. 2); Y orientación de la tensión membranar, Pm; 2c - largo de la imperfección; a - profundidad de la imperfección proyectada en la dirección perpendicular a la tensión membranar, Pm; t = 12,7 mm, 2b = 2000 mm, 2h = 12000 mm.

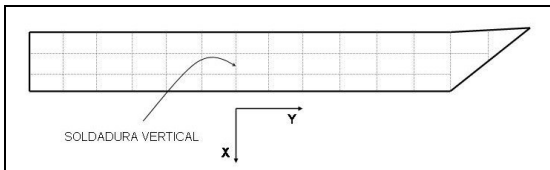


Fig. 4 Esquema del casco de la barcaza donde se muestran las placas y la disposición de las juntas soldadas.

Metodología:

Para una dada combinación de tensión aplicada, geometría de la imperfección y tenacidad a la fractura del material, el diagrama FAD permite predecir si va a ocurrir la falla en la estructura. Es decir, permite saber si la imperfección tiene o no un tamaño crítico. Los puntos del diagrama situados entre los ejes Lr-Kr y la línea de evaluación (puntos de evaluación), constituyen la condición de seguridad. Por el contrario, cualquier punto situado por fuera de la línea de evaluación indica la falla en la estructura. El diagrama FAD también permite conocer cual va a ser el régimen de falla en el caso de que ésta ocurra. Esto es, mecánica de la fractura lineal elástica (LEFM), mecánica de la fractura elasto-plástica (EPFM) o el colapso plástico.

Utilizando los modelos descriptos anteriormente para evaluar la relación de colapso plástico, Lr y relación de fractura en la estructura, Kr, se realizaron dos diferentes estudios.

Estudio 1: Se asumió el largo de la imperfección, 2c en 2 mm y la profundidad, a en 0,635 mm

(0,005t). Se estudió el efecto de la magnitud de la tensión membranar aplicada, Pm. El largo asumido de la imperfección se corresponde con el máximo largo permitido en la Guía ABS [4] para una indicación simple de fusión incompleta en placas de 12,7 mm de espesor, Fig. 5, punto (a).

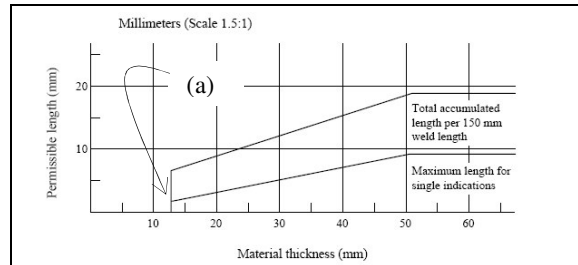


Fig. 5 Largo máximo permitido en análisis radiográfico para indicación simple y acumulada en 150 mm de fusión incompleta según la Guía ABS [4].

Estudio 2: Se fijó el valor la tensión membranar, Pm en diferentes niveles y para cada uno de estos niveles de tensión se hallaron combinaciones críticas 2c-a/t para las que tiene lugar la falla.

Resultados:

Estudio 1: En la Fig. 6 se muestra la dependencia lineal de la relación de colapso plástico, Lr con la magnitud de la tensión membranar, Pm en el rango de 15 a 235 MPa.

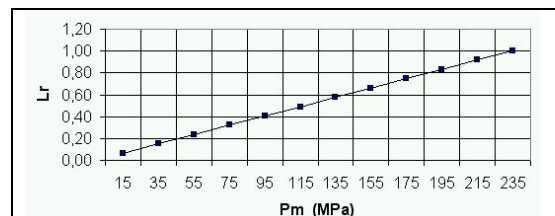


Fig. 6 Variación de la relación de colapso plástico, Lr con la tensión membranar, Pm.

La Fig. 7 muestra el diagrama conocido habitualmente como diagrama FAD (failure assessment diagram) [1]. En él, se representa la línea de evaluación que separa los campos de seguridad e inseguridad (falla) en coordenadas Lr-Kr. La componente no lineal de la línea de evaluación es obtenida a partir de la siguiente expresión [1]:

$$Kr = (1-0,14Lr^2) [0,3+0,7\exp(-0,65Lr^6)] \quad (3)$$

donde Lr es la relación de colapso plástico. La componente lineal de la línea de evaluación (cut off) está dada por Lr = 1,00, donde la tensión de referencia, σ_{ref} alcanza el valor de la tensión de fluencia del material, σ_y , ver ec. (1). La intersección de ambas componentes se encuentra

ubicada en el punto de coordenadas $L_r = 1,00$ y $K_r = 0,57$, Fig. 7, punto (a). En la Fig. 7 también se muestran los puntos de evaluación calculados a partir de las ecs. (1) y (2) para los diferentes niveles de tensión membranar, P_m indicados en abscisas en la gráfica de la Fig. 6. Debe notarse que el punto de evaluación correspondiente a P_m igual a 235 MPa, está situado sobre la componente recta de línea de evaluación y tiene coordenadas $L_r = 1,00$ y $K_r = 0,18$, Fig. 7, punto (b).

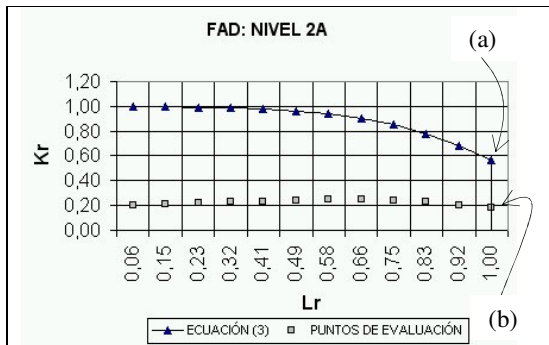


Fig. 7 Diagrama FAD para el nivel de evaluación 2A de la norma BS 7910 [1].

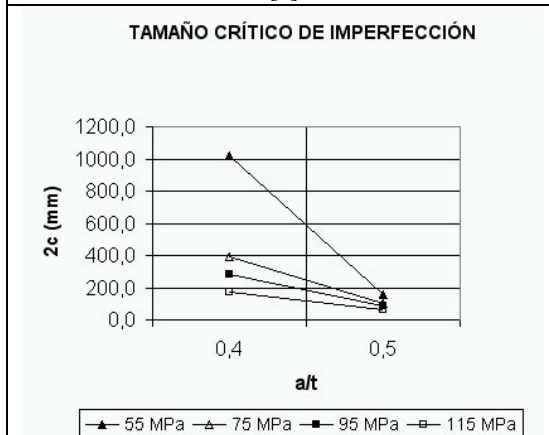


Fig. 8 Tamaño crítico de la imperfección para diferentes niveles de tensión membranar, P_m .

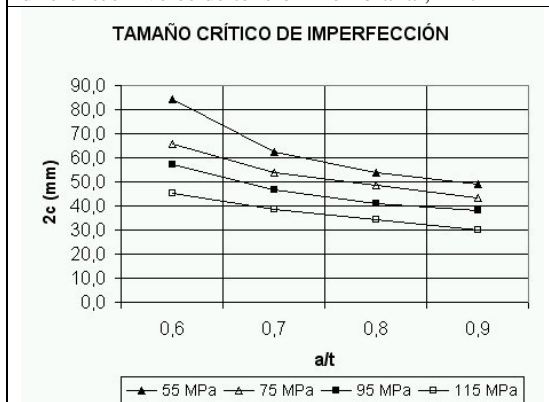


Fig. 9 Tamaño crítico de la imperfección para diferentes niveles de tensión membranar, P_m .

Estudio 2: En las Figs. 8 y 9 se muestran diferentes combinaciones geométricas de la imperfección que producen la falla en cuatro diferentes niveles de tensión membranar, P_m . Cada combinación $a, 2c, P_m$, dará lugar a un punto que estará situado sobre la línea de evaluación en el diagrama FAD de la Fig. 7.

Conclusiones:

En el presente trabajo se realizó un estudio paramétrico de una imperfección de falta de fusión lateral con salida superficial. Este tipo de imperfección típicamente puede ser encontrada en juntas soldadas de placas de cascos en la industria naval. Para evaluar la criticidad de la imperfección, fue utilizada la norma BS7910 [1], la cual se basa en la filosofía de “evaluación crítica de ingeniería” (ECI), también conocida como “adecuación al uso”. Fueron realizados dos estudios paramétricos, los cuales son citados en el texto como “Estudio 1” y “Estudio 2”. Las conclusiones obtenidas en cada uno de ellos se indican a continuación:

Estudio 1

i) Para una condición de geometría de imperfección constante, caracterizada por un largo, $2c = 2$ mm y una profundidad, $a = 0,635$ mm ($0,005t$), el punto de evaluación de coordenadas $L_r = 1,00$ y $K_r = 0,18$, punto (b) de la Fig. 7, predice la ocurrencia de la falla. Esto es debido a que dicho punto se encuentra sobre la línea de evaluación del diagrama FAD de la Fig. 7. Adicionalmente, al estar el punto $L_r = 1,00$ y $K_r = 0,18$ situado sobre la parte recta de la línea de evaluación, puede inferirse que la falla ocurrirá régimen de colapso plástico. La situación anterior tendrá lugar, cuando la magnitud de la tensión membranar, P_m alcance el valor de la tensión de fluencia del material base, es decir 235 MPa, Figs. 6, 7 y Tabla 1 del Anexo I. Esto último, resulta consistente con el concepto de que fisuras pequeñas en materiales con baja resistencia a la fluencia y alta tenacidad a la fractura presentan pequeña o ninguna influencia en la resistencia de los mismos [5].

ii) Cuando se evalúan imperfecciones de fusión incompleta, entre las que se encuentra la falta de fusión lateral, siguiendo la metodología indicada en la Guía ABS [4], las variables tensión aplicada y profundidad de la imperfección no son tenidas en cuenta. Esto es, ninguna de estas dos variables aparece indicada en la Fig. 5. El máximo largo permitido de la imperfección, según la Guía ABS [4], es únicamente función del espesor del material de la junta. Para el caso del presente trabajo, el cual considera una imperfección que dará origen a una indicación simple en el análisis radiográfico y donde el espesor del material, t es de 12,7 mm, el

máximo largo permitido es de 2 mm, Fig. 5, punto (a). Adoptando este mismo largo como 2c al evaluar la criticidad de la imperfección utilizando la metodología de norma BS7910 [1], en lugar de la Guía ABS [4] y asumiendo una profundidad de la imperfección a, igual 0,635 mm (0,005t), puede verse que con el incremento de la magnitud de la tensión membranar, Pm la falla sólo podría tener lugar en régimen de colapso plástico cuando la magnitud de Pm alcance el valor de la tensión de fluencia del material de las placas de la cubierta exterior del casco, Figs. 6, 7 y Tabla 1 del Anexo I.

Estudio 2

Al realizar la evaluación de la imperfección estudiada con valores de tensión membranar, Pm comprendidos en el rango de 55 a 115 MPa, utilizando la metodología de norma BS7910 [1], puede observarse que para cualquier relación profundidad de la imperfección/espesor, a/t, las longitudes críticas, 2c, resultan ser extremadamente mayores al máximo largo permitido por la Guía ABS [4], Figs. 8, 9 y Fig. 5, punto (a). Aún para el caso de una elevada profundidad de la imperfección, donde a/t = 0,9, los valores de longitud crítica, 2c oscilan entre 30,1 y 49,1mm, para 115 y 55 MPa respectivamente. Esto implica que la Guía ABS [4] resulta ser extremadamente conservadora en comparación con a la norma BS7910 [1] cuando se considera la falla por colapso plástico o la falla por fractura.

Agradecimientos:

Los autores agradecen al Ing. Nav. Pablo Etcheverría y al Ing. Nav. Germán Aguirrezabala de la empresa Tsakos-Industrias Navales S.A. por su incondicional colaboración durante todo el proceso de elaboración del presente trabajo.

Referencias:

- 1) BS 7910:1999 “Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures”, British Standards Institution, 1999.
- 2) Anderson, T.L., “Elasto-Plastic Fracture Mechanics: A Critical Review”, SSC-345 (Part I), Ship Structure Committee, 1990.
- 3) PD 6493:1980, “Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints”, British Standards Institution, 1980.
- 4) American Bureau of Shipping (ABS), “Guide for nondestructive inspection of hull welds”, 2002.
- 5) Dowling, N. E., “Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture and fatigue”, Prentice-Hall, 1999.

Anexo I

MATERIAL	CLASE	σ_Y , mín. MPa	σ_u , mín. MPa	σ_u , máx. MPa	E, mín. %	K _{IC} N/m ^{3/2}
BASE	ASTM A 131 Grado A	235	400	520	22	2723
APORTE	AWS E 7018	399	482	----	22	3077

Tabla 1 Características nominales de los materiales utilizados en la construcción de la cubierta exterior del casco de la barcaza.

σ_Y - Tensión de fluencia

σ_u - Resistencia a la tracción

E - Alargamiento a la rotura (ductilidad) en 50 mm

K_{IC} - Tenacidad a la fractura a 0 °C