

ANÁLISIS DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL EN CAMISAS DE ACERO UTILIZADAS EN PILOTES DEFENSA

Hector Sanzi⁽¹⁾, Eduardo Asta⁽²⁾, Francisco Cambiasso⁽³⁾, Mariano Imperiale⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Ingeniero Aeronáutico. Grupo de Investigación Ingeniería Estructural. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo.

⁽²⁾ Ingeniero Aeronáutico. Grupo de Investigación Mecánica de la Fractura. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo.

⁽³⁾ Ingeniero Mecánico. Grupo de Investigación Mecánica de la Fractura. U.T.N.

⁽⁴⁾ Ingeniero Mecánico. Grupo de Investigación Ingeniería Estructural. U.T.N.

La seguridad de puentes fluviales y marítimos suspendidos o colgantes, por debajo de los cuales pasarán buques y embarcaciones de gran calado y desplazamiento, requiere en muchos casos la implementación de líneas de defensa anticolidión de las pilas principales, que son realizadas con pilotes cuyas camisas de acero se constituyen en encofrados para la estructura de hormigón y cumplen una función estructural de blindaje a fin de otorgar mayor eficiencia al sistema.

Los tramos de camisas soldados entre sí pueden deteriorarse como consecuencia de las condiciones de servicio o de discontinuidades previas generadas en la fabricación y montaje que aparecerían como indicaciones de fisuras, particularmente en las zonas de soldadura, afectando las condiciones de integridad estructural de las mismas. Dichas camisas son tramos soldados de estructuras tubulares fabricadas en acero de alta resistencia. Se plantea un caso de aplicación, presentando un procedimiento de aplicación, donde se ha utilizado un análisis crítico de ingeniería o integridad estructural, bajo hipótesis de fisuras y sollicitaciones externas.

Para el análisis se han aplicado técnicas de Mecánica de la Fractura y un procedimiento de evaluación de tensiones y deformaciones, considerando un modelo utilizando el Método de Elementos Finitos.

The security of fluvial and maritime suspended or pendants bridges, for under the ships and boats of great displacement will pass, requires the implementation of lines of defense anti-collision of the principal sinks in many instances, that constitute shirts of steel were sold off with piles in formworks for the structure of concrete and they obey a structural show of shielding in order to bestow bigger efficiency upon the system.

The segments of shirts welded among themselves can deteriorate as a consequence of the conditions on duty or of previous discontinuities generated in manufacture and set-up that they would appear like indications of cracks, particularly at the zones of solder, affecting the conditions of structural integrity of the same. The aforementioned shirts are segments welded of tubular structures fabricated in steel of high resistance. This is a case, presenting a procedure of application, where a critical analysis of engineering or structural integrity have been utilized, under hypothesis of fissures and external sollicitations.

They have for analysis applying Fracture Mechanics techniques and a procedure of evaluation of tensions and deformations, considering a model utilizing the Finite-Element Method.

INTRODUCCION

La seguridad de puentes fluviales y marítimos suspendidos o colgantes, por debajo de los cuales pasarán buques y embarcaciones de gran calado y desplazamiento, requiere en muchos casos la implementación de líneas de defensa anticolidión de las pilas principales.

Tales defensas son realizadas con pilotes cuyas camisas de acero no solo se constituyen en encofrados para la estructura de hormigón sino que además cumple una función estructural de blindaje a fin de otorgar mayor eficiencia al sistema.

Los tramos de camisas soldados entre sí pueden deteriorarse como consecuencia de las condiciones de servicio o de discontinuidades previas generadas en la fabricación y montaje que aparecerían como indicaciones de fisuras, particularmente en las zonas de soldadura, afectando las condiciones de integridad estructural de las mismas.

Este trabajo plantea un caso de aplicación de análisis de la integridad estructural tomando como caso de estudio un sistema, construido, de protección de las pilas principales de un puente suspendido cuyos pilotes defensa están constituidos por 4 tramos de camisas de acero de alta resistencia, de aproximadamente 9000 a 10000 mm de largo cada una y diámetro 2000 mm, unidas entre si por soldaduras circunferenciales a tope. Para el análisis se presenta un procedimiento, en donde se ha utilizado un análisis crítico de ingeniería o integridad estructural considerando hipótesis de fisuras y solicitaciones externas en las camisas de los pilotes. Para ello se han aplicado técnicas de mecánica de la fractura y un procedimiento de evaluación de tensiones y deformaciones, considerando un modelo utilizando el método de elementos finitos.

MATERIAL Y METODO

Metal Base y Aporte de Soldadura

El metal base empleado es un acero microaleado templado y revenido para uso estructural ASTM A514GrB con un espesor de 25 mm. En la Tabla 1 se indica la composición química, las propiedades mecánicas y los valores de carbono equivalente (CEIIW) y PCM que son índices utilizados para evaluar la soldabilidad.

El proceso de soldadura utilizado fue por arco eléctrico con electrodo tubular bajo protección gaseosa (FCAW) mientras que el metal de aporte seleccionado ha sido un alambre tubular básico el cuál se ajusta a la norma AWS A5.29 como E110T5-K4, de diámetro 1,6mm y CO₂ como protección gaseosa. La posición de soldadura fue horizontal con diseño de junta simple "V" y respaldo metálico. La raíz se realizó en forma semiautomática y el relleno fue automatizado.

Tabla 1. Composición Química y Propiedades Mecánicas del Acero A514 GrB

Composición química (% peso)				Prop. Mecánicas	
C%:	0,17	CE _{IIW} :	0,471	Sr (MPa)	837
Mn%	0,86	PCM:	0,2762	Sy (MPa)	773
P%:	0,022			Elong %	20
S%:	0,004			CVN -18°C (J)	143
Si%:	0,28				
Ni%:	0,02				
Cr%	0,53				
Mo%	0,21				
Al%:	0,035				
V%	0,041				
Nb%	3E-04				
B%:	0,002				
Ti%:	0,022				
N%:	0,007				

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \left(\frac{Ni + Cu}{15} \right) + \left(\frac{Cr + Mo + V}{5} \right)$$

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \left(\frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} \right) + \left(\frac{Ni}{60} \right) + \left(\frac{Mo}{15} \right) + \left(\frac{V}{10} \right) + 5B$$

Caracterización de la Tenacidad a la Fractura

Se realizaron ensayos Charpy-V a -20 °C y 20 °C de temperatura de acuerdo con la norma ASTM E23. Las probetas han sido extraídas de los cupones soldados con $T_o = 20\text{ °C}$ y 150 °C , tanto para material base (MB) como para la zona afectada por el calor (ZAC) y metal de soldadura (MS). La tenacidad a la fractura K_{IC} del material en esta etapa ha sido obtenida por métodos indirectos en términos de K_C por medio de la siguiente expresión de correlación de Barsom^[1], ecuación (1).

$$K_C = 45.1 (C_v)^{1.5} \quad [MPa\sqrt{m}] \quad (1)$$

Siendo C_v Energía de impacto (J).

Análisis de Integridad Estructural del Pilote

La integridad estructural es evaluada desde el punto de vista de la mecánica de fractura mediante un programa computacional de cálculo especialmente desarrollado, que utiliza el documento CEEB R6 (Opción 1 Categoría 1) y el análisis ECA del PD 6493(BS 7910)^{2,3,4}.

Aplicando dicha herramienta se analiza la integridad estructural de un pilote en la zona más crítica, es decir en la sección donde comienza a enterrarse o fondo del lecho, bajo una carga de impacto de un buque que se traslada con una determinada masa y velocidad, en este último elemento, suponiendo que en dicha sección se encuentra con una fisura circunferencial, del tipo pasante, con diferentes longitudes. Se adopta como hipótesis que solo un pilote absorbe el 100 % del impacto.

En la Figura 1 se presenta un esquema representativo de la situación dimensional del pilote, y la ubicación de la carga de impacto del buque, que se supone a 12 metros de la base enterrada.

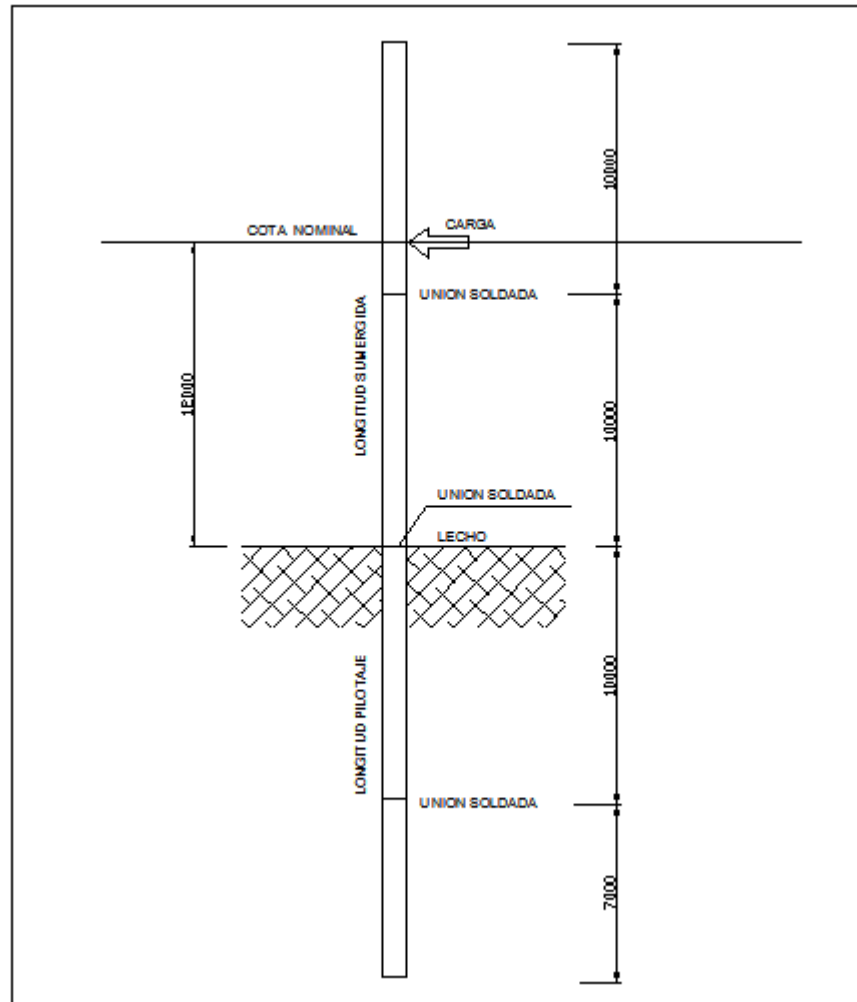


Figura 1: Esquema Representativo de la Situación Dimensional del pilote y de la Ubicación de la Carga de Impacto de Acuerdo a la Hipótesis Adoptada.

La fisura se considera presente en donde se entierra el pilote, sobre el cordón de soldadura, y se determinará el ángulo máximo de apertura o la longitud circunferencial máxima que puede desarrollar la fisura antes de producirse el colapso o inestabilidad estructural.

Para evaluar un componente fisurado, el criterio de análisis más detallado y completo esta referido al diagrama de aptitud ante la falla o FAD, según el documento CEGB R6. Este procedimiento presenta dos criterios de aceptación relacionado con la inestabilidad por fractura y carga límite o colapso plástico. En este se combinan los resultados del estado tensional del componente fisurado, obtenidos de un detallado análisis de tensiones, y los del factor de intensidad de tensiones, utilizando la metodología y los parámetros de mecánica de la fractura.

Modelo de Cálculo Empleado

En este camino, utilizando el método de elementos finitos (MEF o FEM), se ha modelado tridimensionalmente el pilote junto a la estructura de hormigón interna, incluyendo su armadura, de tal manera de verificar adecuadamente la integridad del caño-camisa del pilote, especialmente en la zona de la soldadura, ante la carga de impacto del buque, suponiendo distintos tamaños de fisuras circunferenciales pasantes.

En la zona de contacto entre caño y hormigón se han utilizado elementos de contacto, mientras que para el caño y el hormigón interno se han utilizado elementos sólidos. Se densifica la cantidad de elementos en la zona cercana a dicha fisura y se plantea la solución que presenta el programa COSMOS/V2006)⁵, con formulación de 2do. Orden. Se entiende que el modelo adoptado, considerando los alcances del mismo, son suficientes para representar el comportamiento de los elementos estructurales.

En la Figura 2, se muestra el modelo de cálculo empleado, el cual quedo conformado por 86500 elementos.

Solo se ha modelado la mitad de la estructura, considerando la simetría geométrica y de cargas de la estructura analizada, colocando las condiciones de borde correspondiente.

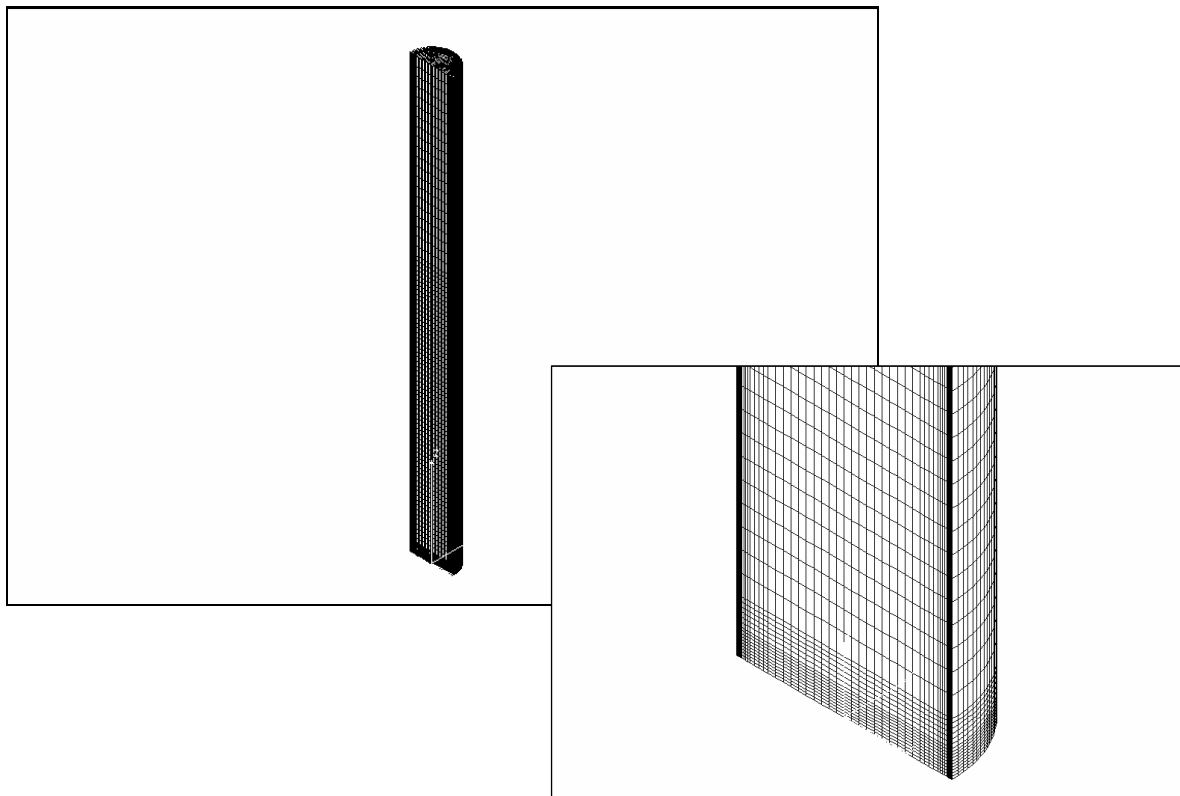


Figura 2: Modelo de Elementos Finitos

Evaluación de la Integridad Estructural – Curva FAD

El procedimiento consiste en cumplir con los siguientes pasos:

Paso 1: Identificación de la falla

Progresivamente se incrementa la apertura de la fisura, hasta llegar al límite en donde comienza a degradarse estructuralmente la estructura interna de hormigón.

Las características de la fisura son:

Defecto	Tipo Circunferencial Pasante					
Identificación	A	B	C	D	E	F
Angulo de apertura (grados)	0	5	10	15	20	25
Largo de la fisura 2c (mm)	0	176	350	524	700	872

Paso 2: Aplicación del análisis de integridad

Se encara el proceso de evaluación de acuerdo a los lineamientos dados por el Nivel 2 del CEBG R6 ^{2,3}, teniendo en cuenta el procedimiento empleado para detectar la fisura y documentación existente relacionada con el diseño y fabricación del elemento estructural.

Paso 3: Datos requeridos para el análisis.

Ver los resultados ya presentados.

Paso 4: Técnicas de evaluación

A partir del Modelo de Elementos Finitos incluyendo la fisura, y con una densificación importante en el extremo de la misma, dado que allí se producen grandes gradientes de tensión por los efectos de flexión y concentración de tensiones. Posteriormente se determina la máxima tensión aplicada en el extremo de la fisura.

Paso 5: Criterios de aceptación.

En base a los lineamientos indicados en se determina el estado de integridad de la misma frente a esta situación de falla, combinando criterios de mecánica de la fractura y analizando la zona del cordón de soldadura.

En la Figura siguiente se presenta la curva FAD, donde se consideran los siguientes parámetros:

K_I = Factor de Intensidad de Tensiones, para cada tipo de fisura, Tabla 2.

K_{IC} = Tenacidad a la fractura del material = 3412 MPa $\sqrt{m}$.

σ_{Ref} = Tensión de referencia, obtenido mediante la aplicación del método de elementos finitos, para cada dimensiones de la fisura, Figura 3 y Tabla 2.

σ_{Flow} = Tensión Límite, donde se utiliza la tensión de fluencia del material del cordón de soldadura, 680 MPa.

Tabla 2. Resultados para una Fisura Circunferencial Pasante

Modelo	Largo c mm	K_I aplic MPa $\sqrt{\text{mm}}$	σ_{actuante} MPa	K_{IC} MPa $\sqrt{\text{mm}}$	σ_{Flow} MPa	Kr	Lr
A	0	0,0	612,00	3412	680,00	0,00	0,90
B	176	109,30	175,00	3412	680,00	0,98	0,257
C	350	53,00	115,00	3412	680,00	0,98	0,169
D	524	75,00	87,00	3412	680,00	0,98	0,128
E	700	53,00	68,00	3412	680,00	0,98	0,100
F	872	75,00	52,00	3412	680,00	0,98	0,076

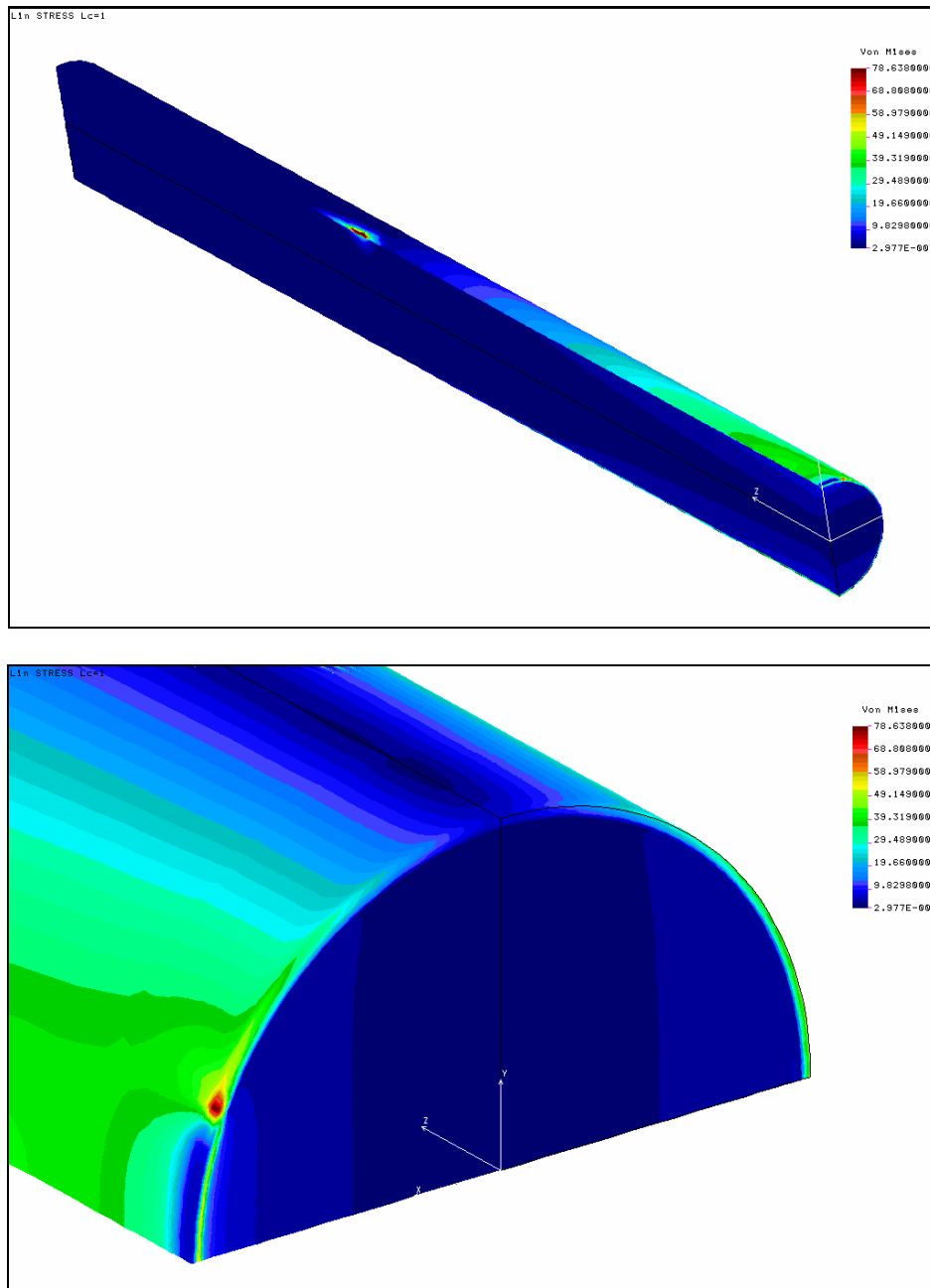


Figura 3: Tensiones de Von Mises en el Extremo de la Fisura para un Caso de la Tabla 2, Expresado en MPa.

En la Figura 4, se presenta la curva K_r en función de L_r , para un $L_{r\text{-max}} = 1$ (aceros al carbono), incorporando los resultados obtenidos para cada tipo de fisura, de acuerdo a la Tabla 2,

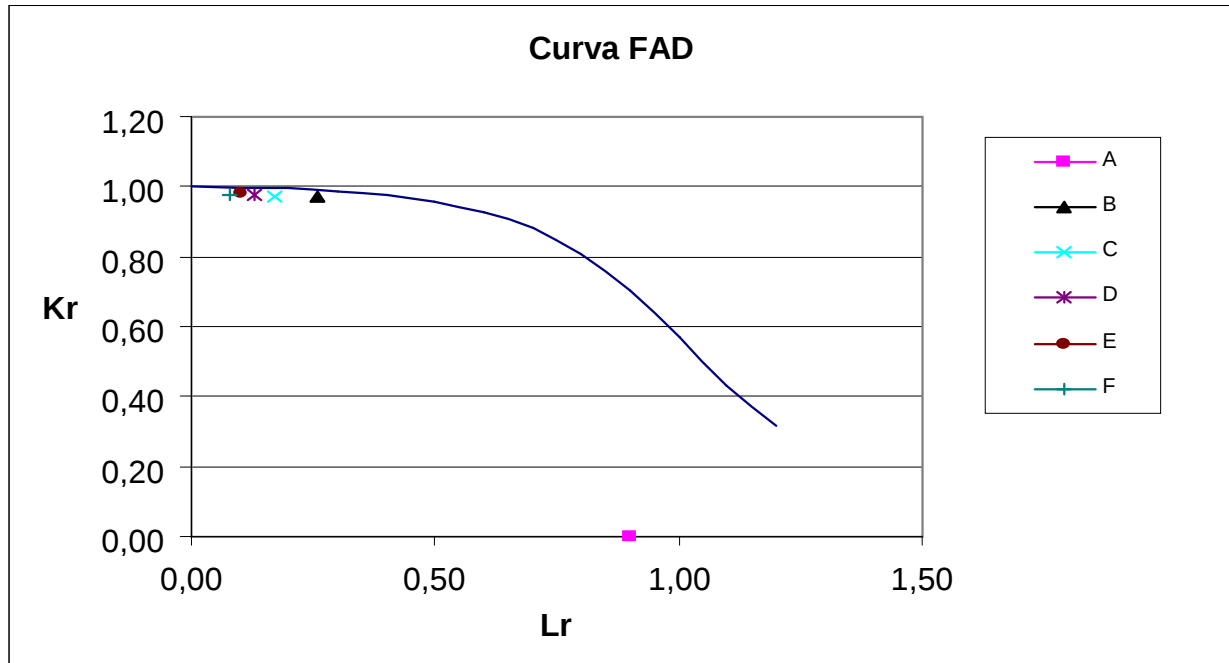


Figura 4: Curva FAD para las Dimensiones de Fisuras Indicadas en la Tabla 2

Se observa que para los datos correspondientes de la Tabla, se ubica dentro de la curva FAD, por lo que asegura que la fisura analizada y bajo las condiciones planteadas, no se propagará y es considerada aceptable. El punto "A" se corresponde para el caño sin fisura, es decir $K_r = 0,0$ y $L_r = 0,90$.

Para estos valores límites, se grafica en Figura 5, la carga máxima de impacto sobre el pilote de protección, considerada aplicada en forma cuasiestática, es decir:

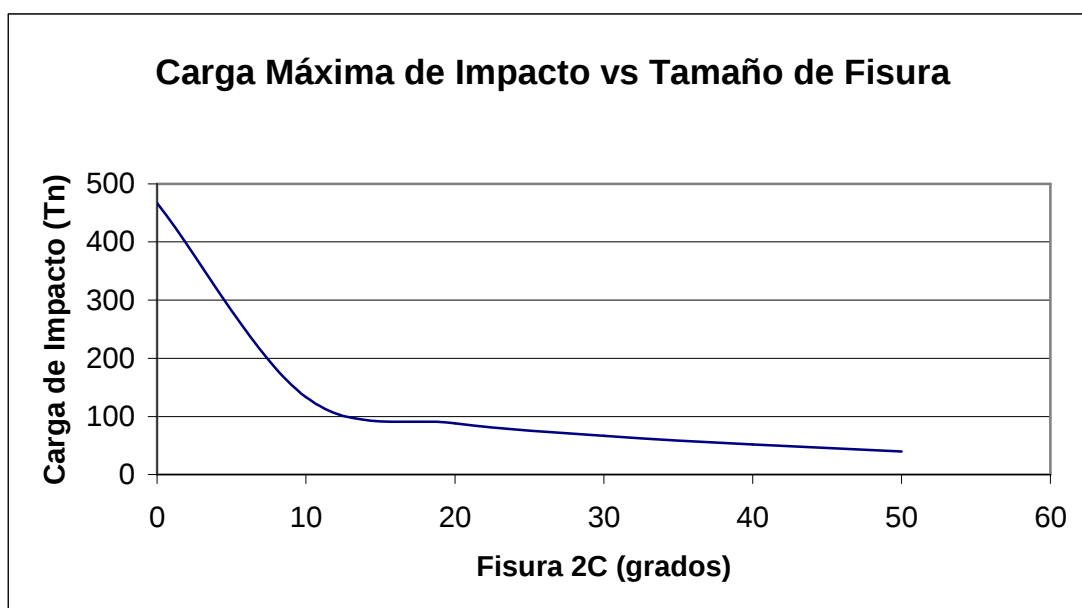


Figura 5: Carga Máxima de Impacto vs. Tamaño de Fisura

En esta última gráfica se observa como se hace más restrictiva la carga de impacto del buque admisible a medida que se incrementa el tamaño de la fisura si se pretende evitar el desgarramiento del hormigón.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado, desde el punto de vista de la mecánica de fractura, mediante un programa computacional de cálculo de Elementos Finitos, la integridad estructural de un pilote de protección que presenta una fisura pasante, ubicada sobre la costura circunferencial del caño-camisa, sobre el fondo del lecho, bajo la carga de impacto de un buque que se traslada con una determinada masa y velocidad.

Se adoptó, como hipótesis de cálculo, que solo un pilote absorbe el 100 % del impacto. Asimismo se supone que una de las uniones soldadas coincide con el lecho del río, donde el momento flector y las tensiones resultantes por el supuesto impacto alcanzan su máxima magnitud, a efectos de colocar el cálculo en el caso más desfavorable, si bien en la construcción se evitó precisamente esta configuración geométrica, con una diferente secuencia de colocación de los tramos.

Para diversas magnitudes de fisura, se incrementa la longitud de la misma, hasta que se torna inestable, considerando en cada caso, el estado tensional resultante y su máxima carga de impacto.

Para evaluar el componente fisurado, se ha utilizado el método que describe el documento CEBG R6 (Opción 1, Categoría 1) y el análisis ECA del PD 6493(BS 7910)^{2,3,4}.

Este procedimiento presenta dos criterios de aceptación relacionado con la inestabilidad por fractura y carga límite o colapso plástico. En este se combinan los resultados del estado tensional del componente fisurado, obtenidos de un detallado análisis de tensiones a partir del modelo computacional, y los del factor de intensidad de tensiones, utilizando la metodología y los parámetros de mecánica de la fractura.

De los resultados surge que para las dimensiones de fisuras indicadas en la Tabla 1, los puntos de aceptación se ubican dentro de la curva FAD, por lo que asegura que la fisura analizada y bajo las condiciones de carga planteadas, según consta en la Figura 1, no se propagará y es considerada aceptable. El punto "A" se corresponde para el caño sin fisura, es decir $K_r = 0,0$, y $L_r = 0,90$.

Como estudio adicional al que se realiza habitualmente en la ingeniería, para el diseño de un caño camisa de un pilote de protección, se presenta como resultado de este procedimiento que evalúa un estado posible de ocurrencia dada por una situación crítica o límite, una curva de cargas críticas puestas en función de la magnitud de las posibles fisuras pasantes que puedan aparecer en el cordón de soldadura circunferencial.

Mediante dicho estudio es posible determinar en forma completa y detallada, el grado de integridad, ante las condiciones de diseño y aquellos límites que puedan producir el colapso del elemento estructural.

Se concluye asimismo, que para que el pilote carezca de la funcionalidad para la cual fue previsto, la discontinuidad estructural crítica es de dimensiones que resultan improbables como defecto de fabricación o como consecuencia del servicio.

REFERENCIAS

¹ K. Phaal, *Correlations between fracture toughness and Charpy impact energy*, TWI Report 504/1994, Cambridge, Great Britain.

² PD 6493:1991, Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures, BSI, London, Great Britain, 1991

³ R.A. Milne, W. Ainsworth, A.R. Dowling Y A.T. Stewart, Assessment of Integrity of Structures Containing Defects, Rep. CEGB R/H/R6, Rev. 3, 1986.

⁴ BS 7910:1999, Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, BSI, Londres, Great Britain, 2000.

⁵ Programa de Elementos Finitos COSMOS Versión 2006