

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO CHARPY PARA DETERMINAR LA TENACIDAD A LA FRACTURA DE METALES

Walter B. Castelló¹, Juan C. Costa Aymar², Alejandro J. Giudici¹ y Julio C. Massa¹

¹ Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
Casilla de Correo 916, CP 5000 Córdoba, Argentina. wcastello@efn.uncor.edu - www.portal.efn.uncor.edu

² Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.
Tel.: 0593-32854381, Ambato-Ecuador. juan.costa@cidfae.gob.edu - www.fuerzaaereaecuatoriana.mil.ec

Resumen: El estudio del comportamiento de metales mediante simulaciones computacionales permite reducir la cantidad de ensayos experimentales. En este trabajo se simulan impactos sobre probetas de dimensiones reducidas obtenidas de tuberías de pared delgada, determinándose la tenacidad a la fractura en forma indirecta a partir de la energía absorbida en la rotura simulada de una probeta en un ensayo Charpy-V-Notch (CVN). El modelo numérico desarrollado se basa en el método de los elementos finitos, y se emplea un código comercial que integra de manera explícita las ecuaciones no lineales que gobiernan el problema. El contraste de los resultados numéricos obtenidos en este trabajo muestra concordancias importantes con valores experimentales reportados por otros autores. Se observa que es posible predecir correctamente la tenacidad a la fractura del material, empleando simulaciones numéricas de ensayos CVN sobre probetas de dimensiones no estándar.

Palabras claves: *elementos finitos, tenacidad a la fractura, ensayo Charpy-V-Notch*

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia muchos eventos adversos relacionados con fallas en tuberías y recipientes de presión interna, han tenido su origen en la existencia de grietas o fisuras en el material. La mecánica de fracturas es la base teórica para analizar formalmente esos procesos de rotura [1]. La propiedad que define el comportamiento de un material ante la presencia de grietas es la tenacidad a la fractura K_{Ic} . La determinación experimental de ese parámetro siguiendo los procedimientos habituales [2] es impracticable en la mayoría de las tuberías y recipientes puesto que tanto el pequeño espesor como la forma curva de los mismos condicionan el tamaño de las probetas.

Una alternativa es utilizar los resultados de ensayos de impacto Charpy-V-Notch (CVN) (ver Figura 1-a) para calcular la tenacidad en forma indirecta a través de expresiones empíricas. En el caso de cañerías y recipientes de presión, debido al pequeño espesor no es posible utilizar probetas de dimensiones estándar, pero se puede utilizar un factor de normalización para convertir la energía obtenida con probetas de dimensiones no estándar, a valores de energía de impacto CVN de probetas de dimensiones estándar.

En este trabajo se presenta un modelo numérico utilizando un código comercial de elementos finitos para obtener la energía de impacto CVN de probetas entalladas de dimensiones reducidas (ver Figura 1-b), y posteriormente determinar la tenacidad a la fractura en forma indirecta [3]. La validación del modelo numérico se hace contrastando con resultados experimentales. Algunos trabajos similares donde se han desarrollado simulaciones computacionales de eventos de impacto arrojan resultados interesantes, los cuales permiten presuponer que esta metodología es un excelente alternativa al estudio experimental.

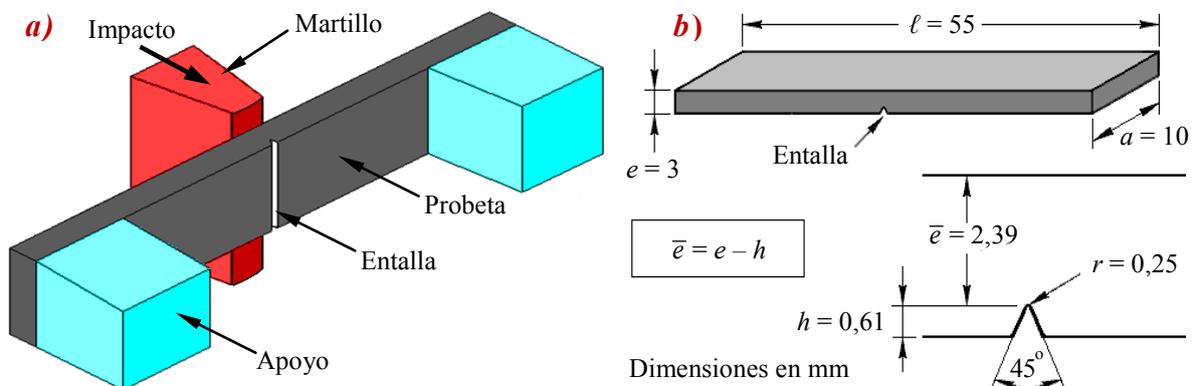


Figura 1: Ensayo de impacto: a) Esquema del ensayo Charpy-V-Notch, b) Dimensiones de la probeta reducida

2. RELACIÓN ENTRE EL ENSAYO DE IMPACTO CHARPY Y LA TENACIDAD A LA FRACTURA

El ensayo de Charpy se utiliza para determinar la tenacidad de un material. El péndulo (martillo) cae sobre el dorso de una probeta entallada produciendo su rotura. La diferencia entre la altura inicial del péndulo y la final después de romper la probeta, permite calcular la energía absorbida en el proceso de fractura.

El presente trabajo se validó en base a los resultados experimentales reportados en [4] donde se estudió una tubería de acero API 5L grado X42. En la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados sobre el material base (chapa conformada) y sobre el material del cordón de soldadura. Las propiedades comunes a ambos materiales son: módulo de Young $E = 207$ GPa, coeficiente de Poisson $\mu = 0,3$ y densidad $\rho = 7850$ kg/m³.

Tabla 1: Propiedades mecánicas en MPa de los dos materiales en análisis

Propiedad	Material base API 5L - X42	Cordón de Soldadura
R_m Resistencia a la tracción	484	520
$R_{p0,2}$ Límite de fluencia (deform. de 0,2 %)	340	424
$R_{t0,5}$ Tensión para una deformación de 0,5 %	347	429

Los ensayos en [4] se realizaron con probetas de dimensiones no estándar de acuerdo a [5]. El esquema de la Figura 1-b muestra las dimensiones en milímetros de la probeta y de la entalla. Para transformar los valores de energía del ensayo Charpy obtenidos con probetas de dimensiones reducidas, a valores CVN de probetas de dimensiones estándar, se emplea el factor de normalización, F , dado en la Ecuación (1) [6]:

$$F = (a \bar{e}^2) / (K_t^* \ell) \quad (1)$$

donde a , \bar{e} y ℓ son respectivamente el ancho, el espesor reducido debajo de la entalla y la longitud de la probeta (ver Figura 1-b), K_t^* es el factor de concentración de tensiones modificado. La energía de la probeta de dimensiones estándar (CVN_E) está relacionada con la energía de la probeta no-estándar (CVN_{NE}) según:

$$CVN_E / F_E = CVN_{NE} / F_{NE} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta la Ecuación (1), en la Ecuación (2) se observa que el único parámetro que varía entre las probetas es el espesor reducido debajo de la entalla \bar{e} , de manera que:

$$CVN_E = (\bar{e}_E / \bar{e}_{NE})^2 CVN_{NE} \quad (3)$$

Para suavizar e interpolar en la curva de energía CVN vs. temperatura se realiza el siguiente ajuste [8]:

$$CVN = a(0,5 - x) + d(0,5 + x) \quad \text{siendo: } x = 0,5 \tanh[(T - b)/c] \quad (4)$$

donde CVN es la energía en Joules y T es la temperatura en grados centígrados. a , b , c y d son parámetros de ajuste cuyo significado físico es el siguiente: ' a ' es el valor asintótico de energía en la región frágil; ' b ' es la temperatura del punto de inflexión de la curva de ajuste; ' c ' es la mitad del rango de temperaturas que abarca la transición dúctil-frágil; y ' d ' es el valor asintótico de la energía en la región dúctil.

En la región dúctil de la curva CVN vs. temperatura existe una correlación entre los resultados de la energía CVN producto del ensayo Charpy convencional y los valores de la tenacidad a la fractura K_{Ic} :

$$K_{Ic} = \sqrt{0,646 \sigma_y (CVN - 0,0098 \sigma_y)} \quad [\text{MPa} \sqrt{\text{m}}] \quad (5)$$

donde: σ_y es la tensión de fluencia en MPa y CVN es la energía del ensayo Charpy -V-Notch en Joules.

Por otra parte, para la región frágil de la curva de CVN vs. temperatura existe una correlación entre los valores de la energía CVN del ensayo Charpy y los valores de la tenacidad a la fractura dinámica K_{Id} [7]:

$$K_{Id} = \sqrt{0,000646 CVN E} \quad [\text{MPa} \sqrt{\text{m}}] \quad (6)$$

donde CVN es el valor de la energía Charpy-V-Notch en Joules y E es el módulo de elasticidad en MPa. A continuación, el valor de K_{Ic} se puede determinar considerando el corrimiento de temperatura T_s dado por:

$$K_{Ic}(T) = K_{Id}(T + T_s) \quad \text{siendo: } T_s = [(215 - 1,5 R_{p0,2}) - 32] / 1,8 \quad [^\circ \text{C}] \quad \text{para } 250 < R_{p0,2} < 965 \text{ MPa} \quad (7)$$

3. MODELADO NUMÉRICO DEL IMPACTO

En esta sección se describe el modelo numérico desarrollado para reproducir el evento de impacto del ensayo Charpy. El material de las probetas se consideró como elasto-plástico con endurecimiento lineal e isotrópico con las propiedades dadas en la Tabla 2. El modelo de falla para la probeta está basado en la máxima deformación plástica alcanzada en la rotura.

Tabla 2: Propiedades mecánicas a temperatura ambiente de los dos materiales en análisis

	Material base			Cordón de soldadura		
	Tensión real	Defor. real	Defor. plástica	Tensión real	Defor. real	Defor. plástica
$R_{p0,2}$	341 MPa	0,004	0,000	426 MPa	0,004	0,000
$R_{t0,5}$	349 MPa	0,007	0,003	432 MPa	0,007	0,003
R_m	635 MPa	0,272	0,267	589 MPa	0,124	0,119

Los elementos involucrados en la simulación del impacto (probeta, martillo y apoyos) han sido modelados empleando elementos hexaédricos de ocho nodos con interpolación lineal e integración reducida para aliviar los efectos del bloqueo por corte y volumétrico. Como la calidad de los resultados obtenidos depende en gran medida de la discretización empleada, la probeta ha sido discretizada con 104874 elementos, el martillo con 20240 y los apoyos de la probeta con 5278. Además, se ha refinado la malla en la zona de la entalla y en el borde romo del martillo.

Para modelar la energía del impacto sobre la probeta, se aplicó al martillo al inicio del impacto una velocidad que corresponde a una energía cinética de 150 Joules. Para el contacto entre las piezas se utilizó un esquema de penalización, que es el más usado cuando se realiza la integración explícita de las ecuaciones de movimiento. Se ha adoptado un coeficiente de rozamiento estático $\mu_E = 0,78$ y un coeficiente de rozamiento dinámico $\mu_D = 0,42$.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

El proceso de impacto y rotura de la probeta, simulado computacionalmente, puede verse en la Figura 2 para distintos instantes de tiempo en milisegundos. El proceso comienza con el instante en que el martillo toca a la probeta ($t = 0$ ms). A partir de allí se tiene un esfuerzo de flexión, que asociado a la entalla, produce la aparición y posterior crecimiento de la grieta que culmina en la rotura del espécimen ensayado cuando $t = 4$ ms.

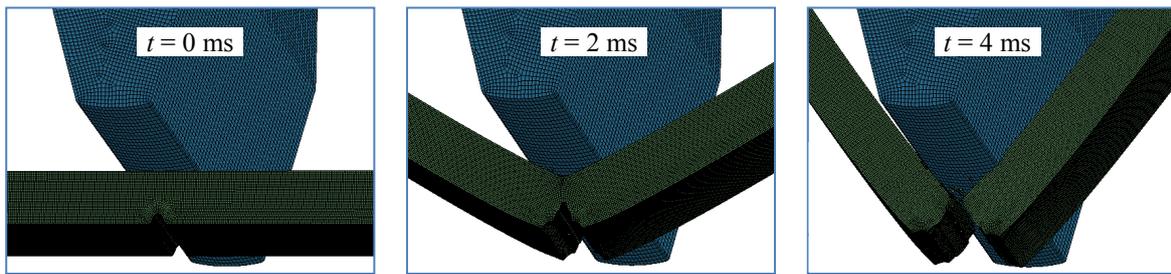


Figura 2: Secuencia temporal del proceso de impacto del martillo sobre la probeta

La Figura 3 muestra la energía de impacto CVN, para el material base de la tubería y para el cordón de soldadura. Los resultados numéricos se denotaron con cuadrados y los experimentales con círculos. También se graficó (en línea continua) la curva de ajuste para los resultados experimentales definida en la ecuación de interpolación (4). Se observa una buena concordancia de los valores numéricos de energía de impacto obtenidos.

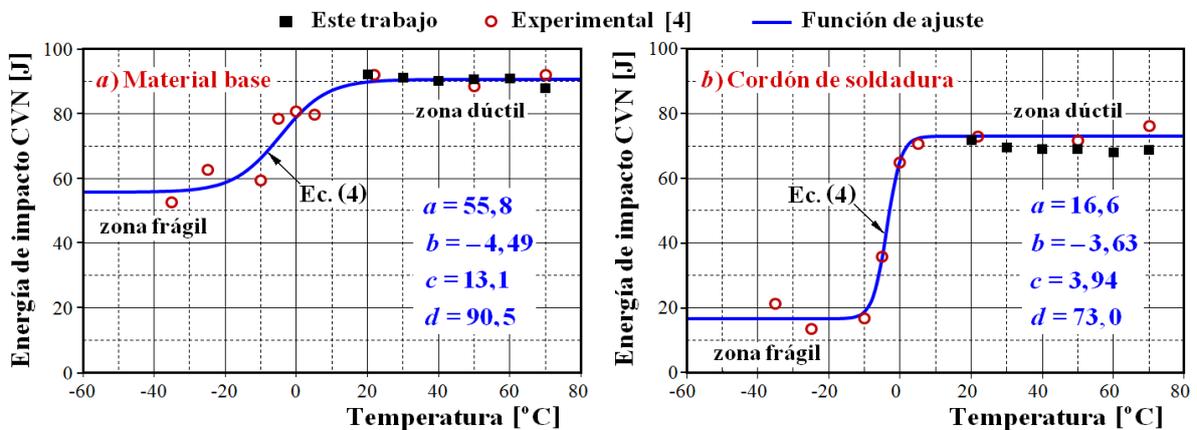


Figura 3: Energía de impacto CVN a diferentes temperaturas

Tabla 3: Tenacidad a la fractura K_{Ic} en la zona dúctil en $\text{KPa}\sqrt{\text{m}}$

Temperatura [°C]	Material base			Cordón de soldadura		
	Numérico	Experimental	Diferencia %	Numérico	Experimental	Diferencia %
20	139,72	137,75	1,4	136,03	137,30	0,9
30	138,33	138,24	0,1	133,42	137,30	2,8
40	137,34	138,35	0,7	132,55	137,30	3,5
50	137,50	138,38	0,6	132,14	137,30	3,8
60	137,28	138,38	0,8	131,08	137,30	4,5
70	137,48	138,38	0,7	131,58	137,30	4,2

En la Tabla 3 se comparan los valores de K_{Ic} en función de la temperatura para la zona dúctil obtenidos numéricamente en este trabajo con los datos experimentales [4] ajustados usando (4). En el material base la diferencia promedio es del 0,7% y en el cordón de soldadura del 3,3%.

Los valores de K_{Ic} de la Tabla 3 para la zona dúctil se graficaron en la parte superior derecha de las Figuras 4-a y 4-b. En la parte izquierda de esas figuras se observa el corrimiento térmico (T_s) producto de emplear la ecuación (7) para transformar K_{Ia} en K_{Ic} en la zona frágil. La Figura 4 muestra además las curvas de interpolación obtenidas con las correlaciones (5) y (6) usando el ajuste de las curvas CVN experimentales dado en (4).

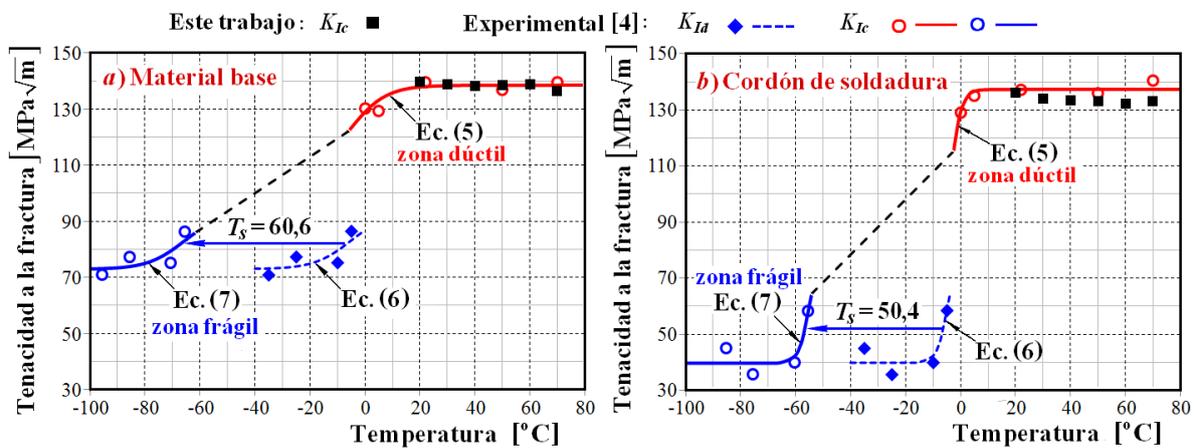


Figura 4: Tenacidad a la fractura K_{Ic} en función de la temperatura

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo numérico, que predice con buena precisión el valor de la energía de impacto en ensayos Charpy-V-Notch sobre probetas de dimensiones no estándar. Se estudió la tenacidad a la fractura en la zona dúctil para diferentes temperaturas por encima de la temperatura ambiente, para un material caracterizado como API 5L grado X42. Los resultados obtenidos concuerdan con los valores experimentales.

REFERENCIAS

- [1] T.L. ANDERSON, *Fracture mechanics: Fundamentals and applications*, 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [2] ASTM E 399-09_2, *Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness K_{Ic} of metallic materials*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2009.
- [3] J.C. COSTA AYMAR, *Análisis de la tenacidad a la fractura de metales a partir de la simulación numérica de ensayos de impacto*, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Córdoba, 2015.
- [4] A.E. MATUSEVICH, R.A. MANCINI Y A.J. GIUDICI, *Determinación de la tenacidad a la fractura del material de un gasoducto*. Rev. LatinAm. Metal. 32, 2 (2012), pp. 253-260.
- [5] Norma ASTM E23-07, *Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2007.
- [6] L.E. SCHUBERT, A.S. KUMAR, S.T. ROSINSKI AND M.L. HAMILTON, *Effect of specimen size on the impact properties of neutron irradiated A533B steel*, Journal of Nuclear Materials, 225 (1995), pp. 231-237.
- [7] J.M. BARSOM AND S.T. ROLFE. *Fracture and fatigue control in structures. Applications of fracture mechanics*, 3rd Ed, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1999.