



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

ANÁLISIS DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA DE METALES A PARTIR DE UN MODELO NUMÉRICO BASADO EN EL ENSAYO CHARPY

Juan C. Costa*¹ y Walter B. Castelló²

*1 Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana
Tel.: 0593-32854381 e-mail: juan.costa@cidfae.gob.edu Ambato-Ecuador

2 Departamento de Estructuras. Facultad de C. E. F y N. Universidad Nacional de Córdoba
Tel.: 0351-4334145, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina.
e-mail: wcastello@efn.uncor.edu

RESUMEN

La aplicación de simulaciones computacionales en el estudio del comportamiento de metales, supone una minimización de la cantidad de ensayos en laboratorio disminuyendo de este modo los costos de estudios experimentales. El análisis de la tenacidad de metales empleando modelos numéricos de ensayos de impacto, representa una aplicación importante en el estudio del grado de fiabilidad de tuberías de gas envejecidas. En este trabajo se simulan impactos sobre probetas de dimensiones reducidas aplicables a tuberías de pared delgada, determinándose la tenacidad a la fractura en forma indirecta a partir de la energía absorbida por la rotura de una probeta en ensayos Charpy-V-Notch. El modelo numérico desarrollado se basa en el método de los elementos finitos, y se emplea un código comercial el cual integra de manera explícita las ecuaciones no lineales que gobiernan el problema. Se considera la probeta construida con un material elasto-plástico con endurecimiento lineal e isótropo. Las propiedades mecánicas del material varían con la temperatura. La correlación de resultados muestra concordancias importantes entre los valores experimentales de otros autores y los numéricos obtenidos en este trabajo. Se observa que es posible predecir con un buen nivel de aproximación 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, Charpy-V-Notch.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia un sinnúmero de eventos adversos relacionados con fallas en tuberías o recipientes de presión interna, han tenido su origen en la existencia de grietas o defectos del material. La mecánica de fractura [1] ofrece la base teórica para analizar formalmente los procesos de rotura, la propiedad de un material que define su comportamiento ante la presencia de grietas es la tenacidad de fractura, la cual se define como la capacidad del material para resistir la fractura y depende de la geometría del espécimen, carga y propiedades mecánicas del material.

En la práctica la determinación experimental de la tenacidad a la fractura siguiendo los procedimientos habituales (ver referencia [2]), es improcedente en la mayoría de tuberías y recipientes metálicos puesto que el espesor y la forma curva de los mismos condiciona el tamaño de las probetas. Una práctica aceptada, según los trabajos [3]-[5], supone utilizar los resultados de ensayos de impacto Charpy para calcular la tenacidad en forma indirecta a través de expresiones empíricas [6]. Bajo esta perspectiva, debido al espesor de la cañería, no es posible realizar el cálculo indirecto de tenacidad a través de ensayos Charpy utilizando probetas de dimensiones estándar [7]. Una alternativa válida es utilizar un factor de normalización [8] 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 desarrolla un modelo numérico utilizando un código comercial de elementos finitos (LS-DYNA) para obtener la energía de impacto CVN de probetas de dimensiones reducidas, y posteriormente determinar la tenacidad a la fractura en forma indirecta. La validación del modelo numérico se hace con los resultados experimentales presentados en [4]. Algunos trabajos similares donde se han desarrollado simulaciones computacionales de eventos de impacto [9] y [10] arrojan resultados interesantes, los cuales permiten presuponer que esta metodología es un excelente alternativa al estudio experimental.

El contenido de este artículo es el siguiente, la Sección 2 presenta la descripción del problema y la metodología a utilizarse para obtener la tenacidad a la fractura en función de la energía CVN. La Sección 3 describe el modelo numérico utilizado. La Sección 4 presenta un compendio de los resultados obtenidos y la comparación con los resultados experimentales de otro autor. Finalmente en la Sección 5 se exponen las principales conclusiones obtenidas de este trabajo.

2. DESCRIPCION DEL PROBLEMA DE IMPACTO DE CHARPY

El ensayo de Charpy se utiliza para determinar la tenacidad de un material. En este ensayo el péndulo o martillo cae sobre el dorso de una probeta entallada, la cual es sometida a a flexión en tres puntos, y culmina habitualmente con la rotura de la probeta. La diferencia entre la altura



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

inicial del péndulo y la final después del impacto, permite medir la energía absorbida en el proceso de fractura de la probeta.

En razón de que la validación del presente trabajo fue realizada en base a los resultados experimentales obtenidos en [4], el material en estudio corresponden a una tubería de acero grado X42 según la norma API 5L [11]. En la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados sobre el material base (tubería) y sobre el material del cordón de soldadura.

Tabla 1 Propiedades mecánicas de los materiales en análisis

Parámetro	API5L (grado X42) [MPa]	Cordón de Sold. [MPa]
Módulo de Young E	207000	207000
Resistencia a la tracción R_m	484	520
Límite de Fluencia $R_{p0.2}$	340	424
Tensión para un deformación de 0.5% $R_{t0.5}$	347	429
Alargamiento porcentual de rotura A	31	13

Los ensayos en [4] han sido realizados considerando probetas de dimensiones no estándar de acuerdo a [12]. El esquema de la Figura 1 muestra las dimensiones en milímetros de la probeta y de la entalla realizada en la misma.

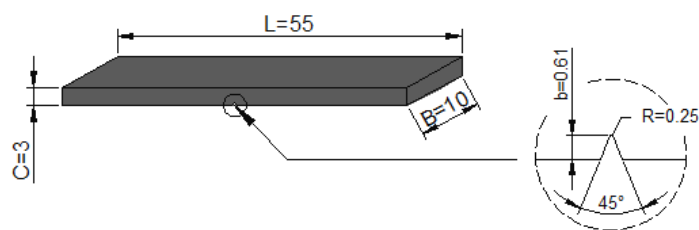


Figura 1 Dimensiones y características de la probeta estudiada

Para transformar los valores de energía en el ensayo Charpy-V-Notch (CVN) obtenidos con probetas de dimensiones reducidas, a valores CVN de probetas de dimensiones estándar, se emplea el factor de normalización de acuerdo a lo expuesto en [8].

$$NF = (Bb^2 / K_t' L) \quad (1)$$

En la Ecuación (1) NF es el factor de normalización, B es el espesor de la probeta, b es el espesor debajo de la entalla, K_t' es el factor de concentración de tensiones modificado y L es la



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

longitud de la probeta.

La energía de la probeta de dimensiones estándar (E_e) está relacionada con la energía de la probeta no-estándar (E_{ne}) según:

$$\frac{E_e}{NF_e} = \frac{E_{ne}}{NF_{ne}} \quad (2)$$

A partir de la Ecuación (1) se puede observar que en la Ecuación (2) el único parámetro que varía (respecto de ambas probetas) es la longitud b del espesor debajo de la entalla, de manera que se puede obtener:

$$E_e = \frac{(b^2)_e E_{ne}}{(b^2)_{ne}} \quad (3)$$

Por otra parte, existen correlaciones entre los resultados de la energía CVN producto de ensayos Charpy convencionales con los valores de la tenacidad a la fractura, aplicables a la mitad inferior de la curva de temperatura de transición en función de la energía CVN. En particular, en la referencia [2] se propone:

$$K_{Id} = \sqrt{0.64 \times CVN \times E} \quad [\text{KPa}\sqrt{\text{m}}] \quad (4)$$

en donde K_{Id} es la tenacidad a la fractura dinámica, CVN es el valor de la energía Charpy-V-Notch y E es el módulo de elasticidad del material de la probeta. Posteriormente el valor de K_{Ic} se puede establecer empleando la variación de temperatura T_s según las Ecuaciones (5) y (6).

$$K_{Ic}(T_o) = K_{Id}(T_o - T_s) \quad (5)$$

$$T_s = \frac{[215 - 1.5 * (R_{p0.2})] - 32}{1.8} [^{\circ}\text{C}] \quad \text{para } 250 \text{ MPa} < \sigma_y < 965 \text{ MPa} \quad (6)$$

3. MODELADO NUMERICO DEL IMPACTO

En este apartado se describe el modelo numérico (ver Figura 2) desarrollado para reproducir el evento de impacto del ensayo Charpy. Las hipótesis simplificativas para este modelo son: 1) se considera únicamente la punta del martillo para lo cual se utilizó un volumen ficticio con una densidad equivalente de tal manera que la energía cinética entregada por el martillo corresponda exactamente a los valores detallados en el evento real, y 2) se desprecian las pérdidas de energía por rozamiento entre componentes y por rozamiento con el aire.

En los materiales de las probetas se ha considerado un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento lineal e isótropo, las propiedades son las que se muestran en la Tabla 2. El modelo de falla para la probeta está basado sobre la máxima deformación plástica alcanzada



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

en la rotura. Por otra parte, el comportamiento del martillo y de los muelles no son de interés en este trabajo, por lo que consideran sólidos elásticos con características similares a un acero estructural AISI1025 rolando en frío ($\rho = 7.85E^{-6}$ [kg/mm³], $E = 210$ [GPa] y $\mu = 0.30$).

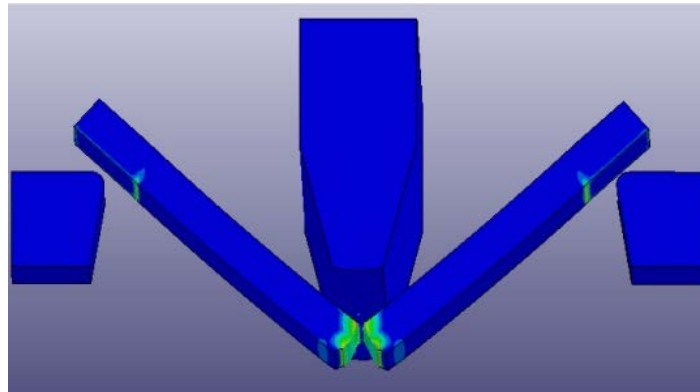


Figura 2 Simulación de la rotura de la probeta de sección reducida mediante ensayo Charpy

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

	Material Base			Cordón de Soldadura		
	Esf. Real [GPa]	Def. Real [mm]	Def. Plast. [mm]	Esf. Real [GPa]	Def. Real [mm]	Def. Plast. [mm]
$R_{p0.2}$	0.341	0.004	0.0000	0.426	0.004	0.0000
$R_{10.5}$	0.349	0.007	0.0030	0.432	0.007	0.0030
R_m	0.635	0.272	0.2665	0.589	0.124	0.1192
ρ	7.85 E-3 [kg/mm ³]			7.85 E-3 [kg/mm ³]		
E	207.00 [GPa]			207 [GPa]		
μ	0.30			0.30		

3.1. Propiedades mecánicas de la probeta a diferente temperatura

Si bien no se cuenta con información respecto del comportamiento del material para distintas temperaturas, se han usado relaciones empíricas que definen las propiedades mecánicas del acero en función de la temperatura siguiendo lo propuesto en [13]. Estas relaciones tienen sustento en las investigaciones realizadas en [14] y [15].

3.2. Discretización y condiciones de borde

Los elementos involucrados en la simulación del impacto (probeta, martillo y muelles) han sido discretizados empleando elementos hexaédricos de ocho nodos con interpolación lineal e



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

integración reducida para aliviar los efectos del bloqueo por corte y volumétrico. Como es ampliamente conocido, la calidad de los resultados obtenidos depende en gran medida de la discretización empleada. La probeta ha sido discretizada con 104874 elementos hexaédricos, mientras que en el caso del martillo se han empleado 20240 elementos hexaédricos. Los muelles de apoyo de la probeta se discretizaron con 5278 elementos hexaédricos. En este esquema de discretización se ha refinado la malla en la zona de la entalla y en el borde romo del martillo.

A los efectos de modelar el impacto sobre la probeta, se ha aplicado una velocidad inicial al martillo que se corresponde con una energía cinética de 150 [J]. Esta energía inicial es la que posee el martillo en el preciso instante en que alcanza la probeta. En lo que respecta a los muelles de apoyo, fueron modelados de acuerdo con la geometría normalizada [12] y restringidos de movimiento en sus tres grados de libertad.

3.3. DEFINICIÓN DEL CONTACTO ENTRE ELEMENTOS

El contacto entre las piezas responde al esquema de penalización, el cual es típicamente el más usado cuando se realiza la integración explícita de las ecuaciones de movimiento. Las características del contacto están definidas a partir de la interacción entre las superficies, y esto inherentemente queda establecido por el rozamiento. En este modelo se ha adoptado un coeficiente de rozamiento estático $\mu_E = 0.78$ y un coeficiente de rozamiento dinámico $\mu_D = 0.42$.

4. RESULTADOS NUMERICOS

Se han desarrollado dos tipos de análisis, donde la diferencia entre ellos es el efecto dinámico de la carga que imprime el martillo sobre las propiedades mecánicas de los materiales en análisis. Para el caso estacionario se mantienen invariables las propiedades mecánicas iniciales, despreciándose el efecto dinámico de las cargas sobre el material. En cambio en el caso inestacionario se modifican las propiedades mecánicas elevando el límite de fluencia del material en función de las velocidades de carga y modelando la parte plástica de la curva tensión-deformación mediante un módulo tangencial.

4.1. MODELO BAJO CONDICIONES ESTACIONARIAS

El proceso de impacto y rotura de la probeta, que ha sido simulado computacionalmente, puede verse en la Figura 3 para distintos instantes de tiempo medidos en milisegundos. El proceso comienza con el instante en que el martillo se encuentra pegado a la probeta, ver Figura 3-a. Posteriormente el martillo produce un estado de flexión el cual, a instancias de la entalla, produce la aparición y posterior crecimiento de la grieta que culmina en la rotura del



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

especimen ensayado (ver Figura 3-e).

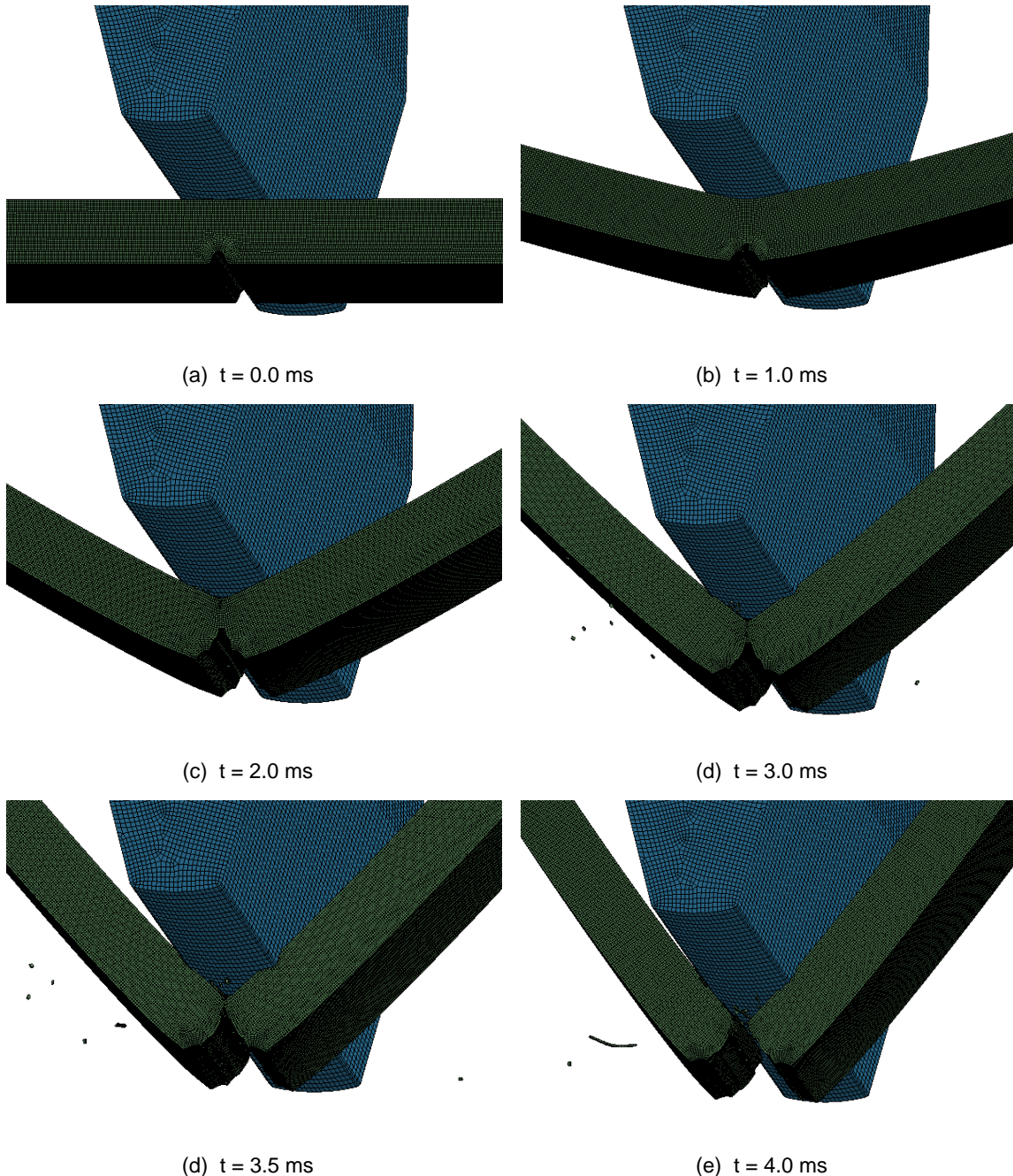


Figura 3 Secuencia del proceso de impacto del martillo sobre la probeta

La Figura 4 muestra la energía de impacto CVN obtenida en condiciones estacionarias (sin cambios en las propiedades iniciales del material), tanto para el material base de la tubería como para el cordón de soldadura. Se puede observar que los resultados obtenidos son muy cercanos a la función de ajuste (definida en pag. 5 de la Ref. [4]). Así también, en la misma



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

figura se presentan los resultados obtenidos experimentalmente, y se observa una buena concordancia en los valores de energía de impacto obtenidos.

Por otra parte, la Tabla 3, presenta los valores obtenidos en este trabajo y los compara con los expuestos en [4]. Se observa que la diferencia porcentual entre los resultados es como máximo del orden del 2% para el material base, y no mayor al 3.1% en el caso del cordón de soldadura. A partir de esta comparación, se puede decir que el modelo numérico desarrollado en este trabajo resulta válido cuando se lo compara con el estudio experimental llevado a cabo en [4].

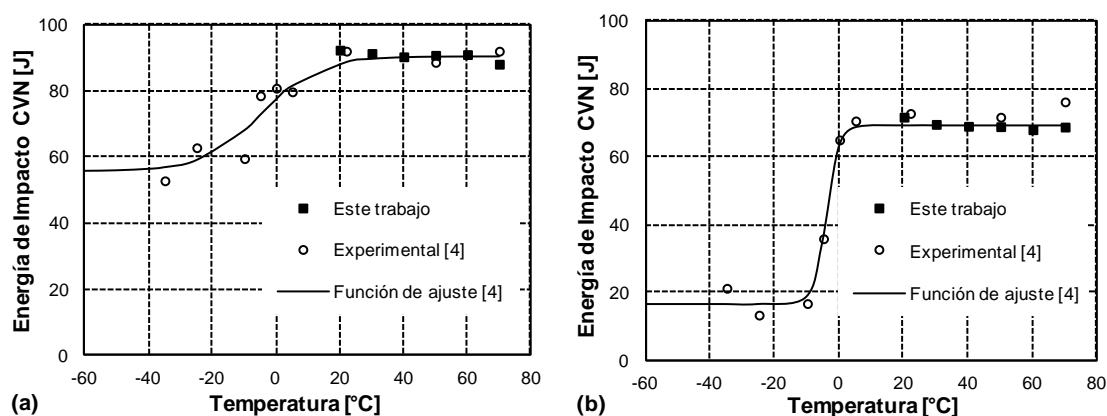


Figura 4 Energía de impacto a diferente temperatura en condiciones estacionarias. a) Material base. b) Cordón de soldadura

Tabla 3 Tenacidad a la fractura bajo condiciones estacionarias

Temp. [°C]	Zona	K_{Ic} Numérico		K_{Ic} Experimental		Diferencia [%]	
		Base	Sold.	Base	Sold	Base	Sold.
20	Dúctil	139.72	136.03	136.98	137.30	2.00%	0.93%
30	Dúctil	138.33	133.42	137.20	136.84	0.83%	2.50%
40	Dúctil	137.34	132.55	137.40	136.54	0.04%	2.92%
50	Dúctil	137.50	132.14	137.33	136.23	0.12%	3.00%
60	Dúctil	137.28	131.08	136.98	136.08	0.21%	3.67%
70	Dúctil	134.78	131.58	136.80	135.77	1.48%	3.08%

La Figura 5 en tanto muestra la tenacidad a la fractura dinámica (K_{I_d}) en función de la temperatura para el caso estacionario. Se puede observar que tanto para el material base y para el cordón de soldadura, los valores obtenidos en este trabajo son muy cercanos a los experimentales [4]. Estos valores graficados en la Figura 5 son los expuestos en la Tabla 3.



También se ha graficado la tenacidad a la fractura (K_{Ic}) en función de la temperatura en la Figura 5, donde se observa el corrimiento térmico producto de emplear las ecuaciones (5) y (6). La Figura 5 presenta además curvas de interpolación, que muestran una tendencia similar a las funciones de ajuste empleadas en la Figura 4.

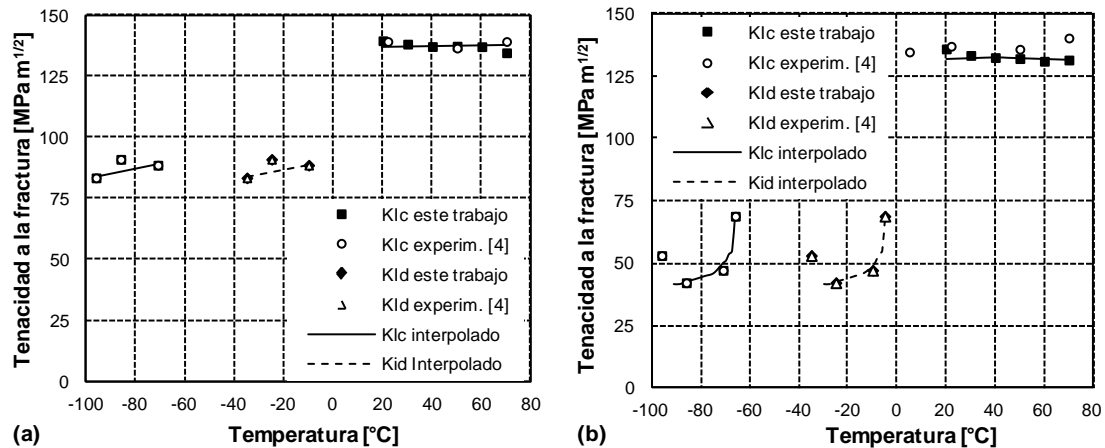


Figura 5 Tenacidad a la fractura en función de la temperatura en condiciones estacionarias. a) Material base. b) Cordón de soldadura

4.2. MODELO BAJO CONDICIONES INESTACIONARIAS

El comportamiento de las propiedades mecánicas de los materiales en el caso estacionario difiere del comportamiento inestacionario donde las propiedades cambian en función de la velocidad de carga. La referencia [16] sugiere emplear una relación empírica para la tensión de fluencia según la ley expuesta en la Ecuación (7).

$$\frac{\sigma_y^d}{\sigma_y^s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

en donde $\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación, σ_y^d es el límite de fluencia inestacionario, σ_y^s es el límite de fluencia estacionario. Mientras que D y n son constantes del material, y para aceros de mediana resistencia toman valores $D = 40.4 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ y $n = 5$.

Los resultados para este caso se presentan en la Tabla 4, no se incluyen gráficos dado que resultan muy similares a los obtenidos en el caso estacionario. Se han incluido también los resultados experimentales obtenidos en [4]. Las diferencias en este caso se encuentran en el orden del 3% para todas las temperaturas. Estas discrepancias son esperables en razón de que el estudio experimental no considera los efectos de cambio en las propiedades del material debido a la velocidad de carga.

Los resultados mostrados en la Tabla 4 sugieren que los efectos inestacionarios, debido a la velocidad de carga sobre las propiedades del material, no son influyentes al menos para el



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

ensayo de tenacidad efectuado sobre los materiales estudiados en este trabajo.

Tabla 4 Tenacidad a la fractura bajo condiciones inestacionarias

Temp. [°C]	Zona	K _{IC} Numérico		K _{IC} Experimental		Diferencia [%]	
		[KPa√m]		[KPa√m]			
		Base	Sold.	Base	Sold.	Base	Sold.
20	Dúctil	134.13	131.80	137.30	137.30	0.93%	0.93%
30	Dúctil	136.20	135.27	136.84	136.84	2.50%	2.50%
40	Dúctil	134.39	134.10	136.54	136.54	2.92%	2.92%
50	Dúctil	136.42	131.29	136.23	136.23	3.00%	3.00%
60	Dúctil	132.82	134.29	136.08	136.08	3.67%	3.67%
70	Dúctil	135.12	133.99	135.77	135.77	3.08%	3.08%

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo numérico, capaz de predecir con una muy buena aproximación los valores de la energía de impacto en ensayos Charpy-V-Notch (CVN) sobre probetas de dimensiones no estándar. Se han estudiado la tenacidad a la fractura para diferentes temperaturas por encima de la temperatura ambiente, para un material caracterizado como grado X42 API-5L. Se han empleado relaciones empíricas para obtener un modelo matemático que describe el comportamiento de las propiedades mecánicas del acero, en función de valores de temperaturas superiores a la temperatura ambiente. Se ha estudiado además la influencia de la variabilidad de las propiedades mecánicas en función de la velocidad de carga.

Los resultados obtenidos para la energía de impacto son muy aproximados a los obtenidos a nivel experimental. Más aun en el caso de no considerar los efectos de la velocidad de carga sobre las propiedades del material, lo cual resulta lógico dado que es similar al procedimiento empleado en los estudios experimentales. Por otra parte los valores de tenacidad a la fractura resultan muy adecuados cuando se los compara con los experimentales. Se observa también que el efecto de la velocidad de carga sobre las propiedades materiales, no es condicionante en los resultados de este problema.

Para futuros trabajos se pretende considerar el comportamiento del material en función de la variabilidad de los mecanismos de falla y para las diferentes zonas (frágil, transición y dúctil) de la curva de energía de impacto CVN en función de la temperatura.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

6. REFERENCIAS

- [1] T.L. Anderson. "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications", 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, EE.UU., 1995.
- [2] ASTM E 399-09_2, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials, Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2009.
- [3] F. Ramos Morales, A. Duffus Scott y N. Palomo Nápoles. Determinación de la tenacidad a la fractura de muestras de Acero 45, empleando las correlaciones entre el K_{Ic} y la energía de impacto medida en el ensayo de Charpy, Universidad Central "Marta Abreu". Cuba, 2005.
- [4] A. Matusевич, R. Mancini y A. Giudici. Determinación de la tenacidad a la fractura del material de un gasoducto. Rev. LatinAm. Metal. 2012, 32, 2, pp. 253-260. ISSN 0255-6952.
- [5] L. Sáenz P., J. De Leca Dos Santos y N. León. Estudio del comportamiento mecánico del acero inoxidable ASTM-410 al ser sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento, Revista INGENIERÍA UC, 16, 1, pp. 45-50, Universidad de Carabobo Venezuela, 2009.
- [6] J. Barsom y S. Rolfe. Fracture and fatigue control in structures. Applications of fracture mechanics, 3ra Ed, American Society for Testing and Materials, Filadelfia, EE.UU., 1999.
- [7] ASTM E23-07ae1, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2007.
- [8] L. Schubert, A. Kumar, S. Rosinski y M. Hamilton. "Effect of specimen size on the impact properties of neutron irradiated A533B steel", Journal of Nuclear Materials, 225, pp.231-237, 1995.
- [9] Sánchez Gálvez, V., "Analytical and numerical simulations of ballistic impact on composite light weight armours" in Computational Ballistics II, Sánchez Gálvez et al (Eds.) Wit Press, Southampton, EE.UU., 2005.
- [10] N. Adamec, V. Bella, M. Štiavnický y M. Pálušová. Modeling of Charpy test on ArmoX 500T material, The Academy of the Armed Forces of General M. R. Štefánik Liptovský Mikuláš Department of Mechanical Engineering, 2011.
- [11] Norma ANSI/API Specification 5L, Specification for Line Pipe, Washington (EE.UU.): American Petroleum Institute, 2007.
- [12] Norma ASTM E23-07, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, Filadelfia (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2007.
- [13] D. Ancas y D. Gorbanescu. Theoretical Models in the Study of Temperature Effect on Steel Mechanical Properties, Buletinul Institutului Politehnic DIN IASI, 2006.
- [14] Méthode de prevision pour le calcul du compartement an fen des structures en acier. D.T.U. Rev. Constr. Methal., 1982.
- [15] Structural Fire Design. Draft Modified Clauses. EUROCODE 3, part 1.2, CENT/TC 250/SC3/N11, 1993.
- [16] N. Perrone. "On a Simplified Méthod for Solving Impulsively Loaded Structures of Rate-Sensitive Materials", Journal of Applied Mechanics (ASME), 32(3), 489-492, 1965.