



ASOCIACION ARGENTINA
DE MATERIALES

Revista SAM

www.materiales-sam.org.ar

Registro N° ISSN 1668-4788 Volumen 1 2020





REVIEW

Comisión Directiva de la SAM

Presidente:

Raúl Bolmaro (Rosario)

Vice Presidente:

Roberto Arce (Santa Fe)

Secretaria:

María Cecilia Marinelli (Rosario)

Pro Secretaria:

Alicia Esther Ares (Misiones)

Tesorera:

Ana Velia Druker (Rosario)

Pro Tesorera:

Sonia Brühl (Concepción del Uruguay)

Vocales Titulares:

Roberto Lucci (Córdoba)

Silvana Sommadossi (Neuquén)

Paula Alonso (Buenos Aires)

Vocales Suplentes:

Analía Roatta (Rosario)

Graciela Bertolino (Bariloche)

Amadeo Daniel Sosa (Mar del Plata)

Revisor de Cuentas:

Hernán Svoboda (Buenos Aires)

Revisor de Cuentas Suplente:

Rubén González (Buenos Aires)

Revista SAM

Editora:

Elena Brandaleze (San Nicolás)

Comité Editorial:

Alicia Ares (Misiones)

Edgardo Benavidez (San Nicolás)

INDICE

● Editorial

Elena Brandaleze

● Sección: Trabajos Técnicos

Torcha de plasma de arco transferido: tiempo de vida de ánodo de cobre.	1
<i>R.E. Rivero, F.E. Benedetto.</i>	
Influencia de la nitruración iónica en la resistencia a la corrosión y al desgaste sobre dos tipos de acero AISI 316L.	6
<i>L. Scarbol, L.M. Pitter, S.P. Brühl.</i>	
Effects on the chemical and mechanical properties of an epoxy material due to exposure to anhydrous hydrogen fluoride.	13
<i>S. Barrera, M.E. Moreno, N. Daverio, A. Rodríguez, A.E. Hazarabedian.</i>	
Estudio de degradación de material compuesto de PLA con adición de partículas de hidroxiapatita.	18
<i>J.A. Halabí, C.R. Acosta.</i>	
Determinación de acidez en arcilla pilareada para su aplicación en catálisis.	24
<i>N. Castrillo, A. Mercado, L. Davies, D. Barrera, K. Sapag.</i>	
Estudio sobre resina poliéster con propiedades autoextinguibles para la producción de piezas de PRFV por RTM y/o VARI para la industria ferroviaria.	29
<i>S.L. Hernández Flechas, M.F. Ferreira, N.G. Bortolotto.</i>	
Microestructura de fusión y temperaturas de transformación en aleaciones del sistema Zr-Sn-Mo.	35
<i>Z.E. Celiz Oroza, P.R. Peitsch, S.F. Aricó.</i>	
Propiedades fisicoquímicas de membranas compuestas de PVA-PAA.	41
<i>B. Villagra Di Carlo, N. Hurtado.</i>	
Deposition of metals on carbon cloth: Design an electrode Membrane Electrode Assembly (MEA).	47
<i>D.F. Reartes, F.C.D. López, H.J. Fasoli, A.S. Fuentes.</i>	
Estudio de la microestructura de anillos espaciadores de Inconel X750.	54
<i>M. Miyagusuku, P. Bozzano, P. Areas, N. Mingolo, J. Ramos Nervi.</i>	
Molienda mecánica sobre cintas magnéticas blandas de Fe78Si9B13 con molino de bolas ortorrómbico de fabricación propia.	61
<i>F. Morales, M. Pagnola, J.J. Muriel, L. Socolovsky.</i>	
Evaluación de la tenacidad a la fractura de los materiales del recipiente de presión del reactor nuclear CAREM-25.	68
<i>M.A. Bergant, A.A. Yawny, J.E. Perez Ipiña.</i>	

Evaluación de la tenacidad a la fractura de los materiales del recipiente de presión del reactor nuclear CAREM-25

Fracture toughness evaluation of the CAREM-25 nuclear reactor pressure vessel materials

Marcos A. Bergant^{1,2}, Alejandro A. Yawny^{1,2,3}, Juan E. Perez Ipiña³

¹ División Física de Metales, Centro Atómico Bariloche, CNEA, Av. Bustillo 9500, Bariloche, Río Negro, Argentina

² Universidad Nacional de Cuyo, Instituto Balseiro, Av. Bustillo 9500, Bariloche, Río Negro, Argentina

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CCT Patagonia Norte, Bariloche, Río Negro, Argentina

e-mail: marcos.bergant@cab.cnea.gov.ar; yawny@cab.cnea.gov.ar; pipinajuan@gmail.com

RESUMEN

El recipiente de presión es el componente estructural principal de los reactores nucleares de agua presurizada. Éste contiene el núcleo del reactor y el agua utilizada como moderador y refrigerante, por lo cual cualquier falla estructural del recipiente puede tener consecuencias severas en la seguridad de la planta. Por esta razón, la industria nuclear suele requerir análisis de integridad estructural basados en la mecánica de fractura para la evaluación de defectos tipo fisuras, postulados o presentes, en los recipientes de presión. Para esto, resulta indispensable disponer de datos específicos de la tenacidad a la fractura del material del componente. En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos en la caracterización de la tenacidad a la fractura del acero forjado SA-508 Gr. 3 Cl. 1, empleado en la fabricación del recipiente de presión del reactor nuclear argentino CAREM-25. Se obtuvieron curvas de resistencia J-R a temperatura ambiente siguiendo la norma ASTM E1820. Se ensayaron probetas denominadas C-R, C-L y L-C de acuerdo al código de orientación de la normal al plano de la fisura (primera letra) y dirección de crecimiento del frente de fisura (segunda letra) para cilindros huecos establecidos en ASTM E1823, tomándose como referencia la geometría cilíndrica del forjado del cual se obtuvieron los cupones de ensayo (C: circunferencial, R: radial, L: longitudinal). Las curvas obtenidas resultaron similares entre sí, aunque se observó una leve menor resistencia a la propagación de fisuras en la dirección circunferencial (probetas L-C). Estos resultados también fueron comparados con curvas J-R obtenidas mediante un método indirecto basado en la energía absorbida en ensayos de impacto de Charpy. Se concluye que esta aproximación genera estimaciones aceptables y conservativas de las curvas experimentales.

Palabras clave: tenacidad a la fractura, curvas de resistencia J-R, SA-508, recipiente de presión, CAREM-25

ABSTRACT

The pressure vessel is the main structural component of nuclear pressurized water reactors. It contains the reactor core and the water used as coolant and moderator and, thus, any structural failure of the vessel may lead to severe consequences on the safety of the plant. For this reason, the nuclear industry usually requires structural integrity analyses based on fracture mechanics for the evaluation of postulated or present crack type defects in pressure vessels. For this, it is necessary to dispose of specific data on the fracture toughness of the component material. This work presents the first results obtained in the characterization of the fracture toughness of the forged steel SA-508 Gr. 3 Cl. 1 that is being used in the manufacturing of the pressure vessel of the Argentine nuclear reactor CAREM-25. J-R resistance curves were obtained at room temperature following ASTM E1820 standard. Testing was performed in specimens called C-R, C-L and L-C according to the orientation code of the normal to the crack plane (first letter) and crack propagation direction (second letter) for hollow cylinders defined in ASTM E1823, using the cylindrical geometry of the forgings from which the testing coupons were obtained as a reference (C: circumferential, R: radial, L: longitudinal). The curves obtained with different orientations were similar, although a slightly lower crack propagation resistance was observed in the circumferential direction (specimen L-C). These results were also compared with J-R curves obtained by an indirect method based on the absorbed energy in Charpy tests. It is concluded that this method generates acceptable and conservative estimates of the experimental curves.

Keywords: fracture toughness, J-resistance curves, SA-508, pressure vessel, CAREM-25

1. INTRODUCCIÓN

La integridad estructural de los recipientes de presión (RPR) de reactores nucleares de agua presurizada que contienen el núcleo del reactor es uno de los factores más importantes que limitan el tiempo de operación de un central nuclear bajo los estándares de seguridad requeridos [1]. En este marco, diferentes metodologías se utilizan para asegurar niveles adecuados de tenacidad a la fractura durante la operación del reactor, así como para evaluar la importancia de defectos tipo fisuras ubicados en diferentes zonas del RPR [1].

El CAREM-25 es el primer reactor nuclear de potencia diseñado completamente en la Argentina por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Se trata de un reactor integrado (generadores de vapor, GVs, incluidos en el recipiente de presión) con refrigeración por agua liviana en circulación natural. El RPR está actualmente en proceso de fabricación en la empresa Industrias Metalúrgicas Pescarmona (IMPESA) en Mendoza. Un esquema del mismo se muestra en la Figura 1a en la que se indican las dimensiones principales y se pueden apreciar las acometidas de entrada de agua y salida de vapor de los GVs (12 en total), distintas boquillas de servicios y control y la tapa superior. El cuerpo principal del RPR y su tapa se construyen mediante soldaduras circunferenciales de virolas cilíndricas y casquetes semiesféricos forjados provistos por la empresa Forge Monchieri (Italia) y cuyas imágenes se muestran en la Figura 1b. Estas piezas son fabricadas con un acero al C de baja aleación cuya especificación es SA-508 Gr. 3 Cl. 1. Este es un acero que se utiliza típicamente en la construcción de recipientes de presión nucleares más modernos [1]. Otros materiales estructurales que completan la fabricación del RPR del reactor CAREM-25 son las aleaciones austeníticas Nitronic 50 e Inconel 690.

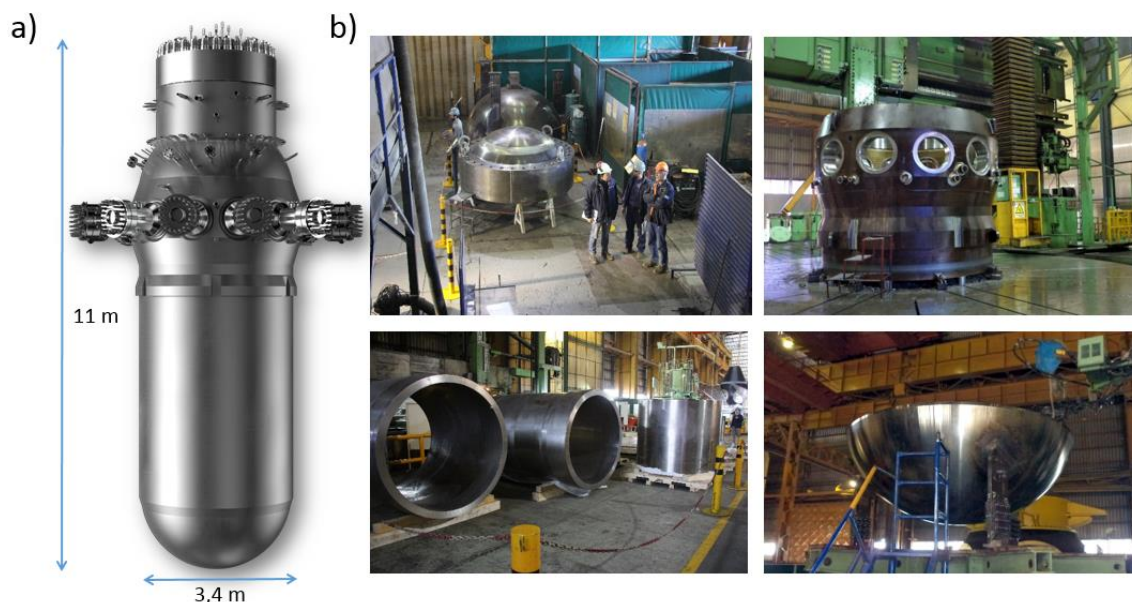


Figura 1: a) RPR del reactor CAREM-25 y b) piezas forjadas en las instalaciones del fabricante IMPESA.

Como parte del proceso de desarrollo del proyecto se ha planteado un plan de caracterización de la tenacidad a la fractura de los materiales que conformarán el RPR del CAREM-25, incluyendo sus soldaduras. Esta determinación es importante tanto para el estado inicial del componente como para el posterior seguimiento de la evolución de la tenacidad con el daño neutrónico a través de un plan de gestión de vida que incluye un programa de vigilancia de materiales de los componentes críticos.

En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos en el estudio de evaluación experimental de la tenacidad a la fractura del acero SA-508 Gr. 3 Cl. 1. Los objetivos de este estudio preliminar son:

- determinar la tenacidad a la fractura a temperatura ambiente del acero SA-508 Gr. 3 Cl. 1 mediante la obtención experimental de las denominadas curvas de resistencia J-R. Esto permitirá realizar una comparación con otros datos publicados para aceros de RPRs similares [2].

- estudiar el posible efecto de anisotropía en la tenacidad a la fractura en las piezas forjadas. De esta manera se espera definir la orientación más conservativa para la determinación de la tenacidad. Es importante destacar acá que, en la práctica habitual, la orientación de las probetas de ensayos mecánicos (tracción y ensayos de impacto de Charpy) se establece a partir de la definición de la dirección de trabajado principal de la pieza forjada. Además, no existen antecedentes en la literatura donde se estudie la anisotropía de las curvas J-

R de forjados SA-508, aunque sí hay estudios para chapas de grado equivalente SA-533, utilizadas anteriormente para la fabricación de RPRs [3].

- evaluar la aplicabilidad de métodos indirectos para la estimación de las curvas de resistencia J-R a partir de los valores de energía en el *upper-shelf* obtenidos con ensayos de impacto de Charpy [4]. Teniendo en cuenta que para todas las piezas forjadas se disponen ensayos de impacto como parte de los requerimientos de calificación, los métodos indirectos permitirán inferir la tenacidad a la fractura reduciendo los esfuerzos experimentales, o bien generando datos cuando no se dispone de material suficiente para la fabricación de probetas para ensayos de fractura, mucho más demandantes en ese sentido que las probetas para ensayos de impacto. Esto podría representar además una ventaja adicional en la definición de los programas de vigilancia de materiales antes mencionados, que requieren la introducción de cupones cuyas propiedades se evalúan retirándolos en forma progresiva durante la vida del reactor.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material utilizado

En el marco del plan de caracterización de la tenacidad, se realizaron ensayos de fractura utilizando materiales sobrantes del forjado principal SA-508 del RPR y cuya composición química se presenta en la Tabla 1. La pieza fue forjada en caliente por el fabricante Forge Monchieri, hasta alcanzar una geometría de virola cilíndrica de 190 mm de espesor y 3500 mm de diámetro externo. Luego fue templada y revenida a 660 °C. Del fabricante del RPR (IMPESA) se recibieron cupones de 160 x 160 x 20 mm de espesor, obtenidos de ¼ t (cuarto del espesor) externo de la virola cilíndrica. La dirección del espesor de los cupones coincide con el de la virola cilíndrica.

Tabla 1: Composición química del SA-508 Gr. 3 Cl 1.

ELEMENTO	% WT.
C	0,178
Mn	1,428
Ni	0,828
Mo	0,519
Cr	0,143
V	0,006

En la Figura 2 se presenta una imagen de microscopía óptica de la microestructura del material que corresponde a una bainita fina revenida. En la figura también se puede observar una inclusión que fue fragmentada durante el proceso de forjado.



Figura 2: Microestructura de bainita revenida.

El tamaño de grano resultante es de 20 micrómetros aproximadamente (tamaño de grano ASTM 8-9). Según la información provista por el fabricante Forge Monchieri, la dirección principal de trabajado mecánico o PWD (*principal working direction*), es la circunferencial, siendo la tensión de fluencia y la resistencia del material a temperatura ambiente 536 y 649 MPa, respectivamente (no se realizaron ensayos de tracción en dirección axial). La temperatura de referencia para ductilidad nula RT_{NDT} (*nil-ductility reference temperature*) resultó inferior a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.2 Ensayos de fractura: curvas J-R

La tenacidad a la fractura se evaluó mediante la determinación de las curvas de resistencia J-R siguiendo la norma ASTM E1820 [5]. Para estudiar un posible efecto de anisotropía en la tenacidad a la fractura, se utilizaron probetas con distintas orientaciones respecto al forjado original, tal como se ilustra en la Figura 3. Se utilizaron probetas compactas C(T) de dimensiones $W = 24\text{ mm}$ y espesor $B = 12\text{ mm}$ para las orientaciones L-C (plano de la fisura normal a la dirección longitudinal y frente de fisura en dirección circunferencial) y C-L (plano de la fisura normal a la dirección circunferencial y frente de fisura en dirección longitudinal). Para la determinación de la curva J-R en situación C-R (plano de la fisura normal a la dirección circunferencial y frente de fisura en dirección radial) se fabricaron probetas de flexión tipo SE(B) con $W = 20\text{ mm}$ y $B = 10\text{ mm}$. Estas geometrías se seleccionaron a partir de las limitaciones para extraer probetas de los cupones recibidos. Todas las probetas ensayadas en este trabajo se obtuvieron del mismo cupón de $160 \times 160 \times 20\text{ mm}$.

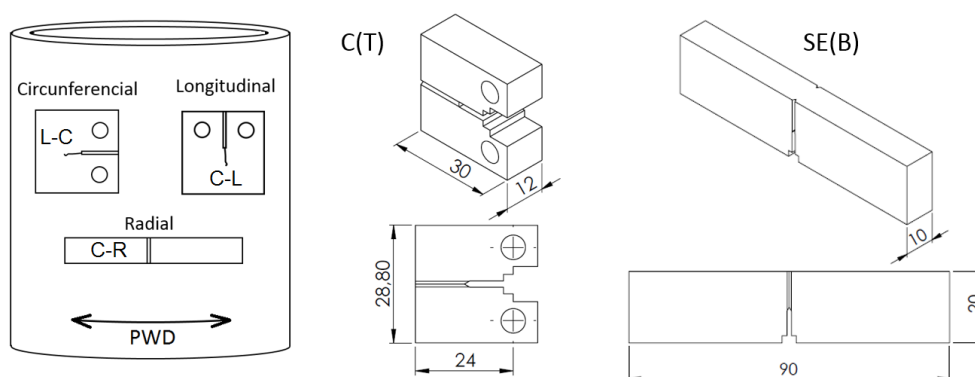


Figura 3: Probetas de fractura C(T) y SE(B) y orientaciones utilizadas.

Los ensayos se realizaron en una máquina servohidráulica MTS 810 de 100 kN de carga máxima disponible en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la División Física de Metales del Centro Atómico Bariloche. Se utilizó un *clip-gage* para la medición de la apertura de la boca de la fisura. En el primer ensayo con probeta C-L se observó la formación de labios de corte y crecimiento no uniforme de la fisura (Fig.4a), dando lugar a resultados inválidos según la norma ASTM E1820 [5]. Siguiendo las recomendaciones de la norma, los siguientes ensayos se realizaron introduciendo entallas laterales de 20 % de profundidad (ver Fig. 3).

El cálculo de J se realizó integrando numéricamente el registro carga vs. apertura de la boca de fisura siguiendo lo recomendado en la norma ASTM E1820 [5]. La longitud de fisura asociada a crecimiento estable fue determinada mediante la técnica de descargas parciales. La longitud de fisura inicial y final fueron medidas sobre las superficies de fractura luego de colorearlas por oxidación (*heat-tinting*) y de introducir un ciclado final para generar la rotura a partir de la longitud de fisura obtenida por crecimiento estable en el propio ensayo (Figura 4b).

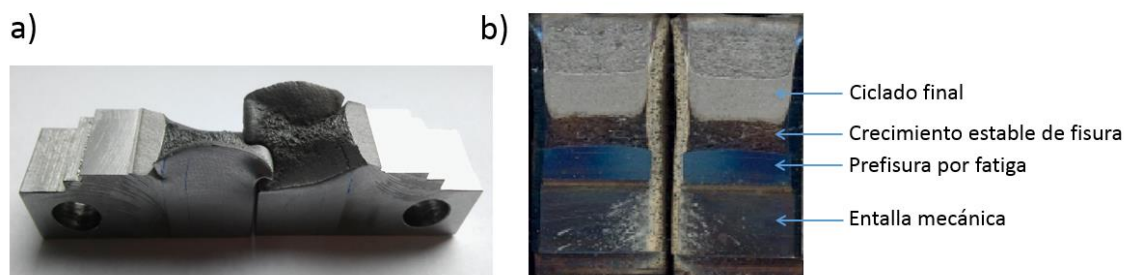


Figura 4: a) Labios de corte en probeta sin entalla lateral y b) superficie de fractura en probeta con entalla lateral.

2.3 Métodos indirectos para la estimación de curvas J-R

La determinación de curvas de resistencia J-R tiene una complejidad experimental importante que implica un costo relativamente alto en comparación con otros ensayos mecánicos [6]. El método de probetas múltiples insume mucho material, mientras que el procedimiento utilizado con probeta única requiere de equipamiento sofisticado. En ambos casos, pero principalmente en el de probeta única, resulta bastante probable la ocurrencia de errores sistemáticos no detectados que afectan los resultados obtenidos [6]. Esto ha generado que los ensayos para la obtención de curvas J-R se limiten casi exclusivamente a aplicaciones demandantes, como las referidas a la industria nuclear. Por otro lado, en muchas ocasiones no se dispone de material suficiente para completar una caracterización adecuada de la tenacidad a la fractura, teniendo en cuenta los tamaños de probeta generalmente grandes que se suelen requerir.

En este contexto, se han realizado numerosos intentos para correlacionar la tenacidad a la fractura dúctil con parámetros obtenidos de ensayos más sencillos [4]. El más utilizado ha sido el ensayo de impacto de Charpy. La elección se basa en que se trata de un ensayo donde se obtiene como resultado la energía necesaria para fracturar la probeta [6]. Si bien existen varias metodologías en la literatura, la más extendida fue propuesta por Wallin [4,6]. El método permite obtener curvas J-R conservativas a partir de la energía de impacto en el *upper-shelf*, asumiendo que parte de ésta se consume en el proceso de fractura de la probeta. Las otras hipótesis que requiere el modelo teórico son la de considerar fisuras profundas, carga cuasi-estática y crecimiento de fisura controlado por el parámetro J. Como estas condiciones no son las que ocurren en realidad en un ensayo de impacto, el método finalmente requiere de parámetros de ajuste empíricos que se obtienen comparando el modelo teórico con curvas J-R experimentales. El modelo propuesto por Wallin [6] fue validado con 162 curvas J-R correspondientes principalmente a aceros estructurales y de recipientes de presión y sus soldaduras, aunque también se utilizaron datos de aceros dúplex, aceros inoxidable y aleaciones de aluminio [4].

Las curvas J-R con una confiabilidad de 95 % o 5 % de incerteza (5 % *lower-bound*) estimadas indirectamente se obtienen a partir de las ecuaciones (1) a (3):

$$J = J(\Delta a = 1 \text{ mm}) \cdot \Delta a^m \quad (1)$$

$$J(\Delta a = 1 \text{ mm}) = 0,53 \cdot C_{Vus}^{1,28} \cdot \exp \left[-\frac{T - 20^\circ \text{C}}{400^\circ \text{C}} \right] \quad (2)$$

$$m = 0,133 \cdot C_{Vus}^{0,256} \cdot \exp \left[-\frac{T - 20^\circ \text{C}}{2000^\circ \text{C}} \right] - \frac{\sigma_Y}{4664 \text{ MPa}} + 0,003 \quad (3)$$

Aquí, Δa es la extensión estable de fisura en mm, $J(\Delta a = 1 \text{ mm})$ el valor de la integral J en kJ/m² correspondiente a 1 mm de extensión estable, m es el coeficiente de la ley potencial, C_{Vus} es la energía de Charpy en el *upper-shelf* en J, T la temperatura en °C y σ_Y la tensión de fluencia en MPa. Estas expresiones son válidas para aceros ferríticos con σ_Y entre 171 y 985 MPa, C_{Vus} entre 20 y 300 J y T entre -100 y 300 °C. Por otro lado, para obtener curvas J-R medianas con confiabilidad de 50 %, la ecuación (2) debe afectarse por un coeficiente de 1,394 [4].

3. RESULTADOS

En la Figura 5 se observan las curvas de resistencia J-R experimentales obtenidas a temperatura ambiente, correspondientes al rango dúctil o *upper-shelf* ya que la temperatura de transición RT_{NDT} es menor a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se presentan dos ensayos para cada tipo de orientación de fisuras. En el gráfico también se presentan los límites máximos de validez de J para cada tipo de probeta, según define la norma ASTM E1820 [5]. La extensión estable máxima es de 2,5 y 3 mm para las probetas SE(B) y C(T), respectivamente. Se observa entonces que las curvas son limitadas principalmente en términos del valor de J máximo válido para las geometrías utilizadas.

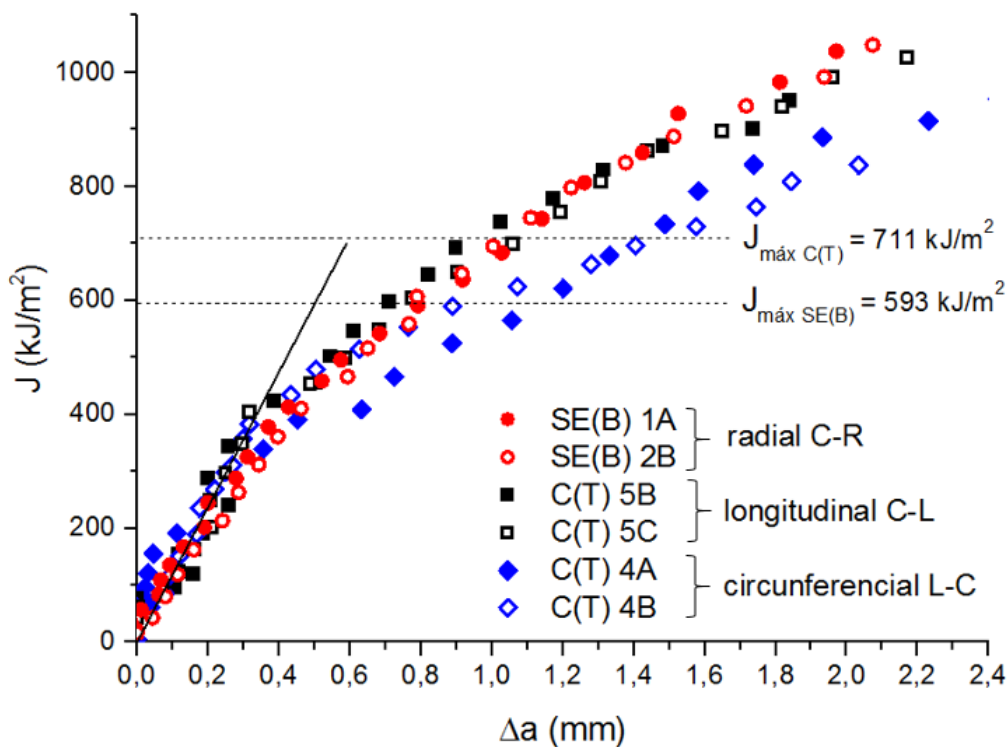


Figura 5: Curvas J-R a temperatura ambiente para las tres orientaciones de probetas.

En la Tabla 2 se listan los valores de tenacidad a la fractura al inicio de crecimiento estable J_{IC} determinados según el Anexo 9 de la norma ASTM E1820 [5]. También se presentan los valores J_{1mm} que se definen como los valores de J para crecimientos estables de 1 mm. Esta definición suele considerarse más representativa para caracterizar la tenacidad a la fractura de materiales dúctiles mediante un solo parámetro [7].

Tabla 2: Valores de tenacidad J_{IC} y J_{1mm} en kJ/m^2 .

PROBETA	J_{IC}	J_{1mm}
SE(B) 1A radial C-R	522	676
SE(B) 2B radial C-R	488	688
C(T) 5B longitudinal C-L	615	712
C(T) 5C longitudinal C-L	546	686
C(T) 4A circunferencial L-C	360	565
C(T) 4B circunferencial L-C	503	613

En la Figura 6 se vuelven a presentar las curvas determinadas experimentalmente junto con curvas J-R estimadas con el método indirecto presentado en la sección anterior. Para la pieza forjada en estudio, la energía de impacto en el *upper-shelf* se determinó solamente en la dirección circunferencial L-C resultando ser de 211 J. Las energías de impacto a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en direcciones circunferencial L-C y longitudinal C-L resultaron muy similares ($\sim 200\text{ J}$), por lo que se considera que no hay diferencias significativas en el *upper-shelf* para ambas direcciones. En la figura se muestran las curvas estimadas con este valor de energía para incertezas de 5% y 50%. También se incluye una curva experimental para el mismo material (SA-508 Gr. 3 Cl. 1) obtenida con una geometría de probeta similar (C(T) con $W = 30\text{ mm}$ y entalla lateral SG de 25%) disponible en [2].

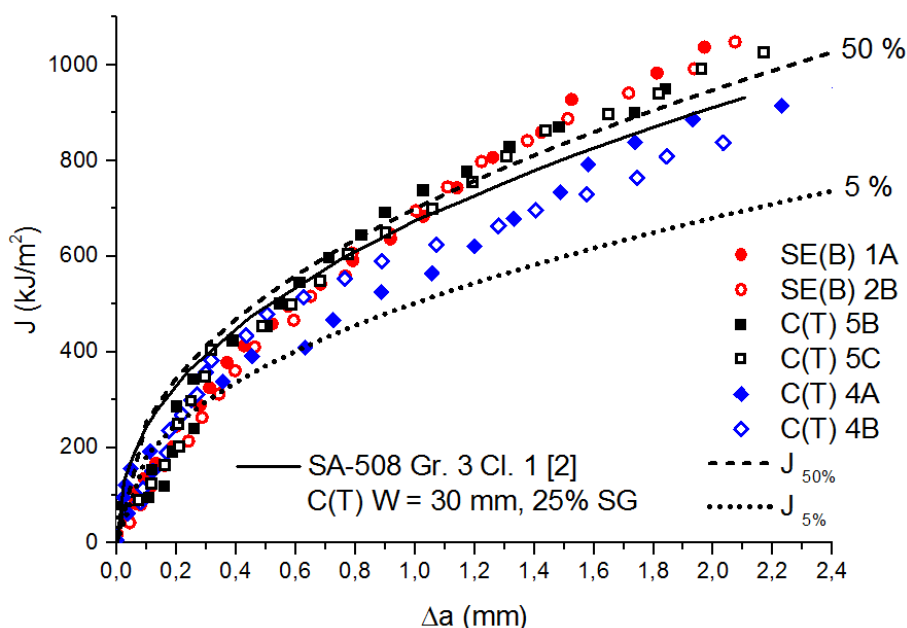


Figura 6: Comparación de curvas J-R experimentales y obtenidas por el método indirecto.

4. DISCUSIÓN

Los pares de curvas J-R experimentales presentadas en la Figura 5 para cada una de las tres direcciones de propagación de fisuras resultan similares. Además, las curvas para propagación en las direcciones radial C-R y longitudinal C-L resultan también muy próximas, mientras que las correspondientes a la dirección circunferencial L-C son levemente inferiores. Los valores de J_{Ic} y J_{1mm} en la Tabla 2 también muestran que la tenacidad a la fractura obtenida en la dirección circunferencial L-C es más reducida.

Es importante destacar que todas las probetas ensayadas en este trabajo fueron obtenidas del mismo cupón de 160 x 160 x 20 mm. De esta manera se evitó la dispersión de resultados debido a la posible variación de propiedades en distintos puntos de la pieza forjada, lo cual permite estudiar solamente el efecto de la anisotropía del material. Otro aspecto destacable es que las diferencias en las curvas no están relacionadas con el tipo de probeta utilizado, ya que tanto para la dirección longitudinal C-L como para la circunferencial L-C se emplearon probetas C(T) de idéntica geometría.

Todo lo anterior sugiere que la diferencia entre las curvas J-R se debe a la existencia de anisotropía en la tenacidad a la fractura en el material forjado SA-508 estudiado en este trabajo. Teniendo en cuenta que la dirección principal de trabajado mecánico PWD es la circunferencial, resulta razonable que las curvas J-R obtenidas con fisuras creciendo en esta dirección (probetas L-C) resulten menores. Este resultado además coincide con los obtenidos por GARWOOD [3] en material SA-533, que es un acero equivalente al forjado SA-508 pero en formato de chapa utilizado también en RPRs nucleares más antiguos.

La Figura 6 presenta la comparación de diferentes curvas J-R. Por un lado, se observa que los resultados experimentales obtenidos en este trabajo coinciden con las curvas presentadas en WALLIN [2] para el mismo grado de material y probeta con geometría similar. Por otro lado, la curva J-R mediana (incerteza del 50 %) obtenida por el método indirecto presentado previamente muestra también un buen acuerdo con los datos experimentales. A su vez, la curva indirecta para una incerteza del 5 % resulta conservativa y envolvente de todas las curvas J-R experimentales.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta los primeros resultados del plan de caracterización de tenacidad a la fractura del acero forjado SA-508 Gr. 3 Cl. 1 que se está empleando en la fabricación del RPR del reactor CAREM-25. Se realizaron ensayos a temperatura ambiente para obtener las curvas de resistencia J-R según la norma ASTM E1820 con fisuras propagando en direcciones radial C-R, longitudinal C-L y circunferencial L-C.

Las curvas J-R obtenidas en las tres direcciones son similares, aunque resultaron levemente menores las correspondientes a la dirección circunferencial L-C, que coincide a su vez con la dirección principal de trabajado PWD de la pieza forjada de la cual se obtuvieron las probetas. Los resultados obtenidos resultan, además,

coincidentes con datos informados en otros estudios para materiales forjados SA-508 similares.

Las curvas J-R obtenidas con el método indirecto a partir de la energía de impacto en ensayos de Charpy en el *upper-shelf* mostraron una muy buena coincidencia en el caso de la mediana (incerteza del 50 %), siendo conservativa y envolvente de los datos experimentales para la estimación con incerteza del 5 %. Este resultado presenta un gran interés práctico. Por un lado, permitiría estimar curvas J-R conservativas para piezas forjadas de las que no se disponga material para los ensayos de fractura, o incluso en distintas partes de una pieza forjada de grandes dimensiones y geometría compleja donde pueda esperarse variación de las propiedades mecánicas. Además, este método indirecto podría emplearse como control de calidad de curvas experimentales, reduciendo de esta manera las posibilidades de errores sistemáticos no detectados en los procedimientos experimentales.

6. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto de Investigación C029 (2019/2020) de la Secretaría de Investigación, Internacionales y Posgrado de la Universidad Nacional de Cuyo. Los tres autores son integrantes del grupo de investigación del mencionado proyecto.

Los autores desean agradecer a la Gerencia de Área CAREM de la CNEA y a Industrias Metalúrgicas Pescarmona (IMPESA) por el aporte de material para la realización de este trabajo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IAEA-TECDOC-1556, *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: PWR Pressure Vessels*, 2007 Update, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2007.
- [2] WALLIN, K., “Ductile fracture toughness”, In: Wallin, K. (ed), *Fracture Toughness of Engineering Materials – Estimation and Application*, 1 ed., chapter 5, Warrington, UK, EMAS Publishing, 2011.
- [3] GARWOOD, S.J., “The effect of Temperature, Orientation and Constraint on the Toughness of A533B Class I Steel”, In: *Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures*, pp. 939-950, Dordrecht, 1984.
- [4] WALLIN, K., “Indirect fracture toughness estimation”, In: Wallin, K. (ed), *Fracture Toughness of Engineering Materials – Estimation and Application*, 1 ed., chapter 8, Warrington, UK, EMAS Publishing, 2011.
- [5] ASTM Standard E1820-18, “*Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [6] WALLIN, K., “Low-cost J-R curve estimation based on CVN upper shelf energy”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 24, pp. 537-549, Feb. 2001.
- [7] WALLIN, K., “Fracture Mechanical Parameters”, In: Wallin, K. (ed), *Fracture Toughness of Engineering Materials – Estimation and Application*, 1 ed., chapter 2, Warrington, UK, EMAS Publishing, 2011.