

# Técnica de Ensayo Mecánico de Muestras Reducidas

## Mechanical Testing Technique of Reduced Samples

Presentación: 12/09/2023

### Luciano Attorresi

División de Daño por Radiación, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires, Argentina.

[lucianoattorresi@cnea.gov.ar](mailto:lucianoattorresi@cnea.gov.ar)

### Ricardo Sanabria

División de Daño por Radiación, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires, Argentina.

[ricardosanabria@cnea.gov.ar](mailto:ricardosanabria@cnea.gov.ar)

### Axel Fariñas

División de Daño por Radiación, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires, Argentina.

[axelfarinas@cnea.gov.ar](mailto:axelfarinas@cnea.gov.ar)

### Carlos Anello

División de Daño por Radiación, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires, Argentina.

[anello@cnea.gov.ar](mailto:anello@cnea.gov.ar)

### Resumen

El estudio del estado de fragilidad de los aceros estructurales utilizados en instalaciones nucleares es de vital importancia a la hora de gestionar la extensión de vida de la instalación. Al ser el recipiente a presión un elemento no redundante, el conocimiento de la fragilización por daño neutrónico, resulta fundamental para garantizar la integridad de la instalación. Para garantizar la integridad de los RPR se realizan los programas de vigilancia que incluyen muestras de ensayo de impacto “Charpy”. Producto de la activación de los materiales por el flujo neutrónico y la masa de cada muestra de Charpy es que dichos ensayos deben realizarse en instalaciones especiales, denominadas celdas calientes, con el fin de blindar la radiación  $\beta$  y  $\gamma$  emitida por las muestras y aminorar la tasa de dosis al que se expondrá el personal. Es por estas razones que en la división de Daño por Radiación se está trabajando en el estudio de ensayos de muestras reducidas mediante el ensayo de Small Punch Test y su relación con los resultados obtenidos mediante ensayos normalizados tipo Charpy.

**Palabras clave:** fragilización por daño neutrónico, ensayo de impacto Charpy, muestras reducidas en masa SPT.

### Abstract

The study of the state of fragility of structural steels used in nuclear installations is of vital importance when managing the life extension of the installation. Since the pressure vessel is a non-redundant element, knowledge of embrittlement due to neutron damage is essential to guarantee the integrity of the installation. To guarantee the integrity of the RPR, surveillance programs are carried out that include “Charpy” impact test samples. As a result of the activation of the materials by the neutron

flux and the mass of each Charpy sample, these tests must be carried out in special facilities, called hot cells, in order to shield the  $\beta$   $\gamma$  radiation emitted by the samples and reduce the rate. of doses to which personnel will be exposed. It is for these reasons that the Radiation Damage division is working on the study of reduced sample tests using the Small Punch Test and its relationship with the results obtained through standardized Charpy-type tests.

**Keywords:** embrittlement due to neutron damage, “Charpy” impact test, SPT reduced sample tests.

## Introducción

La realización de los programas de vigilancia es fundamental para garantizar la integridad estructural del recipiente a presión de las instalaciones nucleares, y así asegurar la seguridad de toda la instalación. En particular el programa de vigilancia de Atucha II consiste en insertar dentro del recipiente a presión en una ubicación cercana al núcleo una cápsula sellada con distintos tipos de muestras para su posterior ensayo mecánico. Una vez que se alcanza la fluencia total de irradiación neutrónica en la ubicación de las cápsulas equivalente a la fluencia neutrónica total estimada para toda la vida útil del recipiente a presión (en adelante RPR), se extrae la cápsula y se realizan los ensayos de caracterización del material. La ubicación de la cápsula en una posición cercana al núcleo permite que las mismas reciban un flujo neutrónico mayor al que recibe la pared del recipiente a presión y, de esta manera, alcanzar la fluencia total en servicio en menor tiempo.

Uno de los tipos de ensayos que se utilizan el programa de vigilancia es el ensayo de impacto Charpy. El ensayo consiste básicamente en un péndulo con una maza en su extremo, que es soltada desde una determinada altura e impacta sobre una probeta entallada apoyada en una base. La energía potencial de la maza en su parte superior se va convirtiendo en energía cinética a medida que baja. La energía necesaria para romper la probeta es el resultado del ensayo. Esta energía perdida por el péndulo es la que hace que no vuelva a su altura original. La energía de rotura se obtiene fácilmente midiendo la altura que alcanza la maza después de romper la probeta.

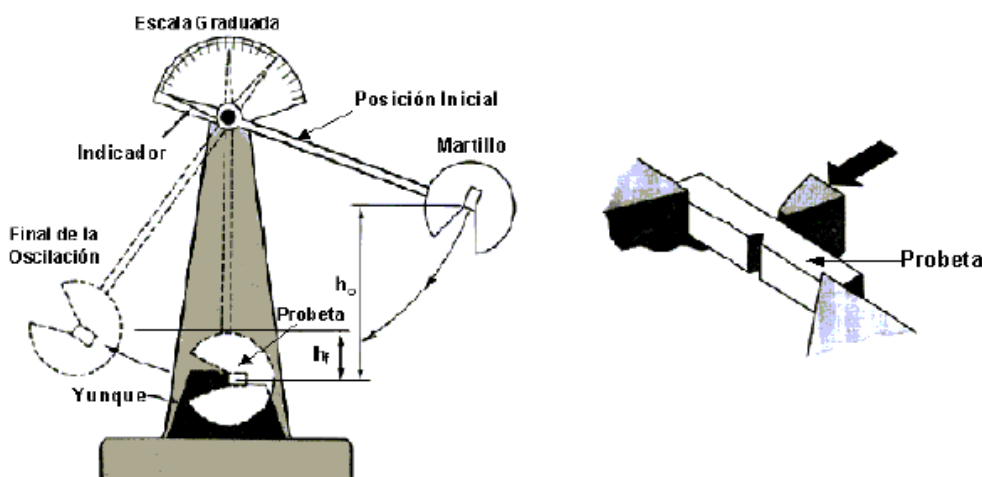


Figura 1: Esquema del ensayo Charpy.

Este ensayo se realiza según la norma ASTM E 23 a distintas temperaturas. Mediante la gráfica de la energía absorbida vs temperatura se puede conseguir la temperatura de transición dúctil – frágil del material si la hubiera. En nuestro caso, para el material del recipiente a presión de Atucha II, el cual es un acero ferrítico de baja aleación denominación ASME A/SA-508 Gr. 3 Cl. 1, cuenta con una temperatura de transición dúctil frágil fijada a los 41J de energía absorbida de -21°C.

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ta
0.25	1.40	0.012	0.015	0.15	0.74	0.20	0.53	0.03	0.10	0.05	0.03

Tabla 1: Composición del acero en estudio (% en peso)

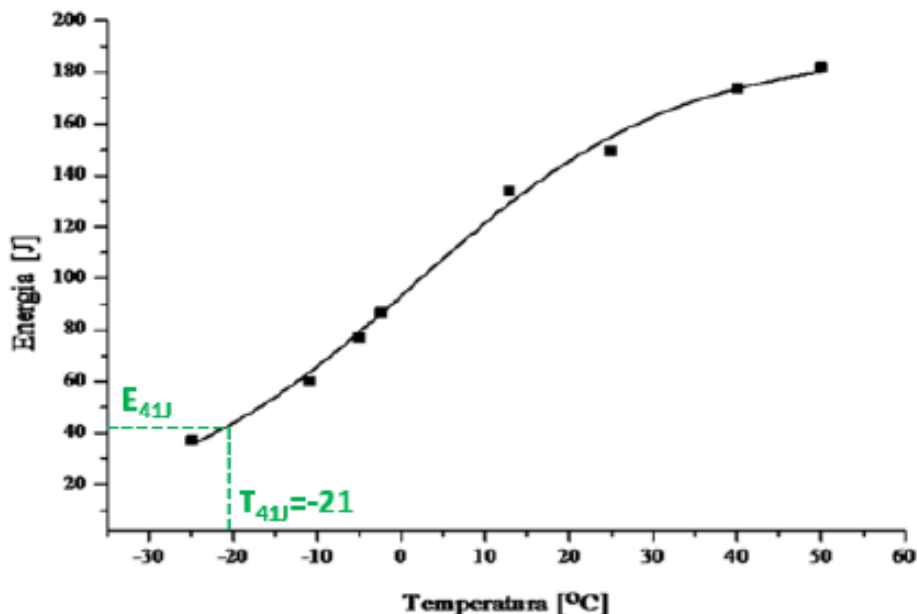


Gráfico 1: Curva de ensayos Charpy para el acero en estudio sin irradiar.

Desde el año 1980 se viene estudiando el ensayo de Small Punch Test (SPT) para la caracterización del comportamiento mecánico de los materiales, ya que, de esta manera, se permite conocer sus características fundamentales utilizando volúmenes de material muy pequeños. Particularmente en el estudio del daño por radiación, todo ensayo que incluya muestras de baja masa es de particular interés, dado que la dosis de radiación que presentan las muestras es directamente proporcional a la masa de las mismas. Conocer las características mecánicas como la temperatura de transición dúctil frágil de un material utilizando muestras de masa reducida tiene una serie de ventajas a mencionar, mayor cantidad de muestras por volumen de capsula de irradiación, menores tasas de dosis por muestra individual que permitiría trabajar en condiciones más seguras con menores blindajes y acelerar los tiempos de ensayos, ya que no haría falta esperar tiempos de decaimiento.



Figura 2: Comparativa de tamaño de muestras.

Las probetas utilizadas en el ensayo de punzonado, SPT pueden tener diferentes tamaños y formas, por ejemplo, una sección cuadrada de 10x10 mm<sup>2</sup> o discos que oscilan entre los 3 mm a 10 mm de diámetro y tan sólo 0,25 mm a 0,50 mm de espesor. Para realizar el ensayo se debe fijar la probeta en un dispositivo constituido por dos matrices unidas por medio de tornillos de sujeción. Para el caso de las muestras de 10mm, utilizadas en el presente trabajo, la matriz inferior posee un agujero de

descarga de 4 mm, mientras que la matriz superior cuenta con un canal guía de 2,5 mm de diámetro. Por este canal se desplaza un punzón de empuje para deformar la probeta hasta su rotura mediante una bolilla de acero inoxidable de 2,5 mm de diámetro.

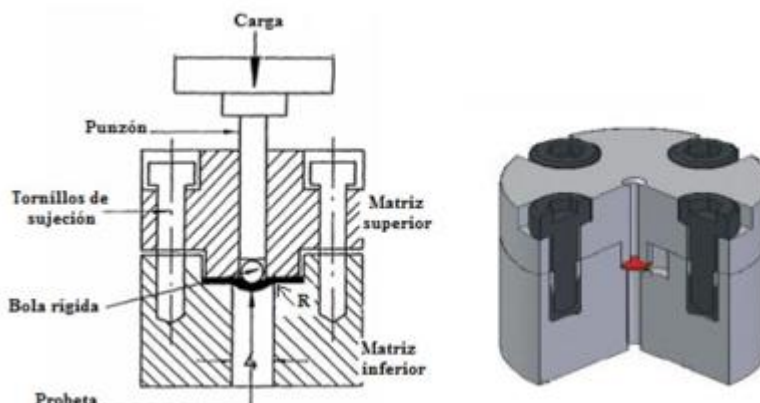


Figura 3: Esquema de matriz de ensayo SPT.

Luego se realiza el ensayo a velocidad de desplazamiento constante registrando los valores de carga y desplazamiento hasta la rotura. Finalizado el ensayo se obtiene la curva de carga-desplazamiento, de la cual se puede obtener las características mecánicas del material en estudio.

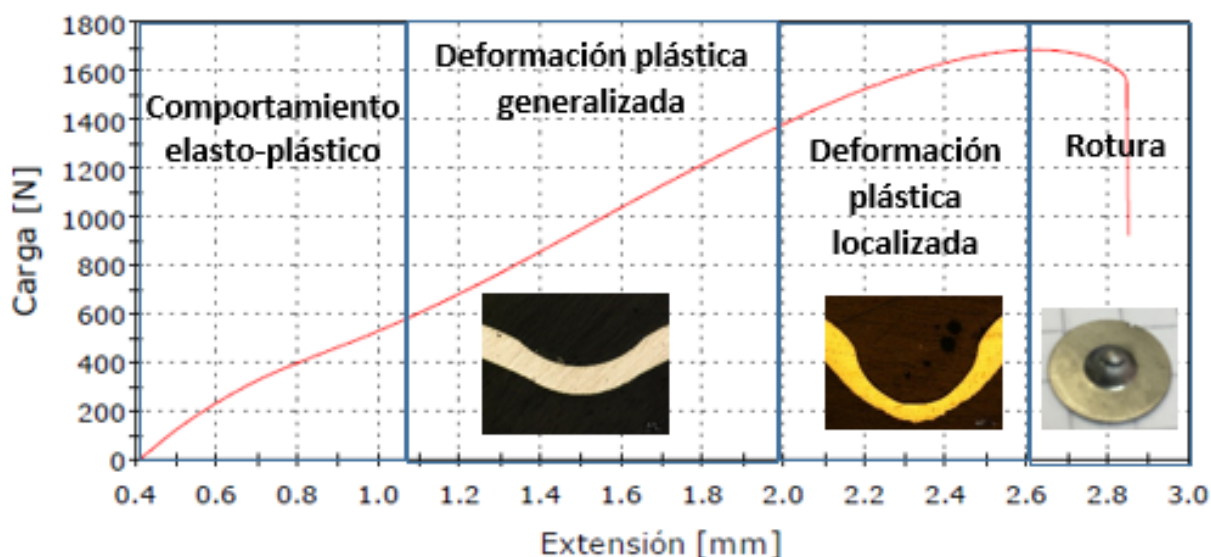


Figura 3: Curva de ensayo SPT con las distintas zonas y estados de deformación de la muestra.

Dado que el contacto entre la muestra y el punzón redondeado se da en un punto desde el comienzo, no hay una zona perfectamente elástica. Se verificó aun en ensayos frenados poca carga, que al retirar la muestra se puede observar una marca que indica una deformación plástica. Por lo que la primera zona del ensayo podemos caracterizarla como una zona elastoplástica. En esta zona, sin embargo, se puede obtener una analogía del límite elástico definida como la carga para la cual cambia la pendiente de la curva. Luego de esta zona, corresponde una deformación plástica generalizada donde el espesor de la muestra se mantiene constante y la relación entre carga-desplazamiento mantiene cierta linealidad. A partir de un cambio en esta tendencia podemos observar una deformación plástica localizada con un angostamiento de la pared de la muestra hasta la carga máxima. A partir de la carga máxima en angostamiento de la pared se vuelve inestable propagando la fisura hasta la rotura. La tenacidad del material se obtiene integrando el área bajo la curva de ensayo, este valor de energía absorbida a la rotura será el valor a comparar con la energía obtenida mediante el ensayo de Charpy.

## Desarrollo

Con el objetivo de obtener la tenacidad y la temperatura de transición dúctil frágil mediante SPT del acero ASME A/SA-508 Gr. 3 Cl. 1, se desarrolló dentro del grupo de Daño por Radiación un dispositivo de ensayo basado en un “punzador” adaptado a una máquina tracción INSTRON 4465. Además, se construyó una cámara ambiental con un sistema controlador de temperatura y entrada de nitrógeno líquido para la realización de ensayos a temperaturas controladas desde  $-196^{\circ}\text{C}$  ( $\text{N}_2$  Liq.) hasta  $300^{\circ}\text{C}$ . El nitrógeno ingresa a la cámara ambiental a través de un flexible proveniente de un termo presurizado, enfriando una masa de cobre de alta inercia térmica la cual se encuentra en íntimo contacto con el dispositivo de SPT, de esta manera se logra una óptima regulación de la temperatura de la muestra. Para el control de temperatura de la cámara ambiental se mecanizó una ranura en espiral sobre un núcleo de cobre, que alberga una espira calefactora de Ni-Cr y aislación mineral. La resistencia calefactora de ni-Cr es alimentada mediante un controlador PID Honeywell UCD 2000 el cual censa la temperatura de la cámara ambiental mediante un termocupla tipo K.



Figura 4: Máquina de ensayo SPT con cámara ambiental.



Figura 5: Detalle de cámara ambiental, matriz y masa homogeneizadora.

Para la fabricación de las muestras se partió de una barra de 10mm de diámetro, mediante un disco de corte de diamante se cortaron las muestras con un espesor promedio de  $800\ \mu\text{m}$  y, posteriormente, mediante pulido a sucesivas granulometrías, se llevaron a un espesor de  $500\ \mu\text{m}$  controlando el espesor mediante un micrómetro digital.

Conseguida la fabricación de las muestras se procedió al ensayo de las mismas a distintas temperaturas.



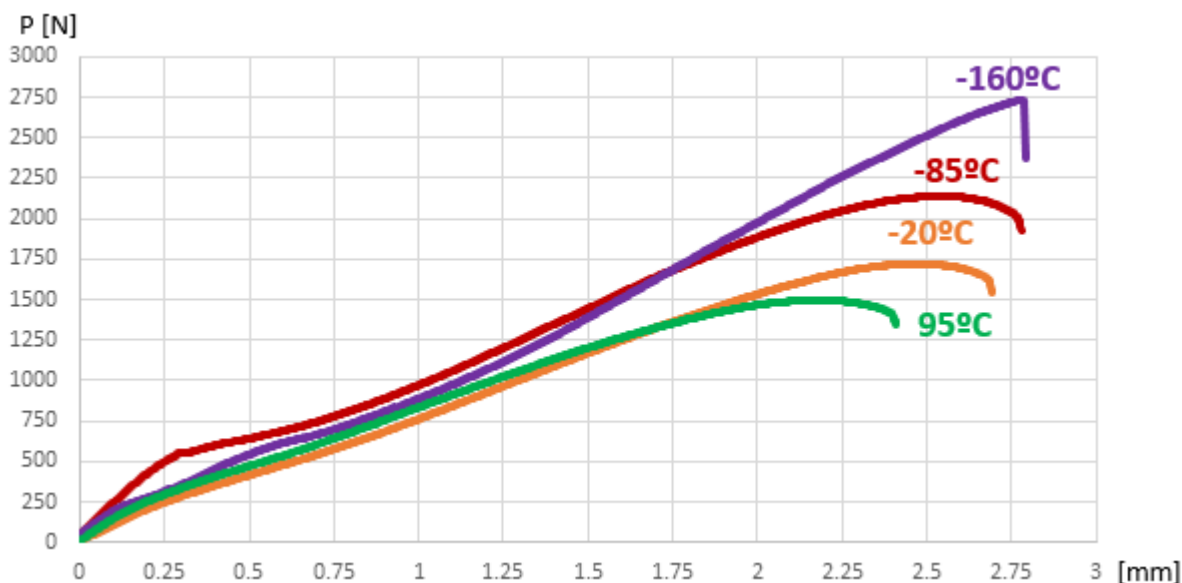


Gráfico 2: Curvas de ensayos a distintas temperaturas (se eliminaron curvas para facilitar la apreciación)

Mediante el análisis de los ensayos con el programa OriginPro8 se obtuvieron los parámetros expresados en la tabla 2:

Temp [°C]	Energía [J]	Fmax [N]
-196	1.5	1124
-175	2.7	1965
-160	3.81	2730
-150	4.03	2643
-145	4.1	2737
-125	3.26	2098
-120	3.104	1993
-95	3.641	2229
-85	3.65	2140
-72	3.327	1875
-20	2.72	1721
20	2.52	1609
20	2.36	1628
95	2.25	1496
165	2.07	1524

Tabla 2: Valores de ensayo de SPT a distintas temperaturas.

Con los datos expuestos se puede obtener la energía absorbida en función de la temperatura de ensayo, de la misma se pueden obtener 2 líneas de tendencia evidenciando un cambio de comportamiento del material según la temperatura de ensayo. Para calcular la temperatura de transición en Small Punch [ $T_{SPT}$ ] se toma la temperatura correspondiente a la energía media en la zona de transición como se observa en el siguiente gráfico:

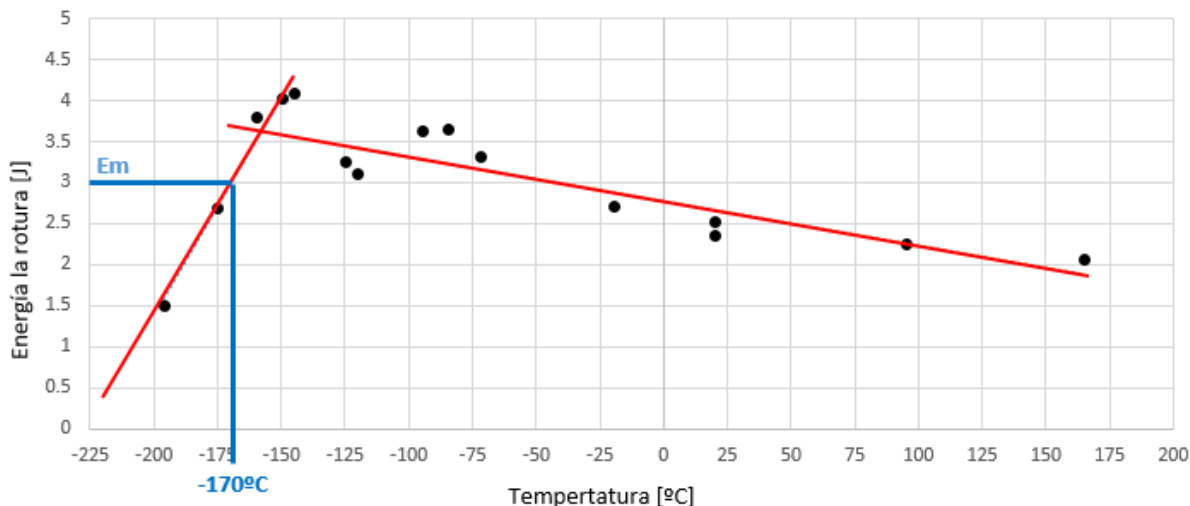


Gráfico 3: Determinación de la temperatura de transición mediante SPT.

En el gráfico 3 obtenemos una temperatura de transición para el acero en estudio mediante el ensayo de Small Punch [ $T_{SPT}$ ] es de  $-170^{\circ}\text{C} = 103^{\circ}\text{K}$ .

En el gráfico 1 obtenemos que la temperatura de transición para el acero en estudio mediante el ensayo de Charpy [ $T_{CVN}$ ] es de  $-21^{\circ}\text{C} = 252^{\circ}\text{K}$ .

Existiendo un coeficiente  $\alpha$  que relacione ambas temperaturas de manera tal que  $T_{CVN} = \alpha T_{SPT}$ . Obtenemos para nuestro caso de estudio un  $\alpha = \frac{T_{CVN}}{T_{SPT}} = \frac{252^{\circ}\text{K}}{103^{\circ}\text{K}} = 2,44$ .

## Conclusiones

El valor del coeficiente de correlación  $\alpha$  obtenido en este trabajo está en concordancia con los valores presentes en la bibliografía consultada para este tipo de acero. En trabajos de tesis realizados dentro del grupo con este mismo material se obtuvieron coeficientes ligeramente diferentes +/-5% con respecto al valor de 2,44 obtenido en este trabajo.

Por lo expuesto resulta prometedor el ensayo de Small Punch Test para obtener la energía de transición de los materiales estructurales de las centrales nucleares. Se continuará trabajando con muestras irradiadas a fin de obtener el corrimiento de la temperatura de transición mediante el ensayo de Charpy y Small Punch Test a fin de comparar resultados y obtener una relación entre ambos para los materiales fragilizados por irradiación neutrónica.

Se deberá continuar además con ensayos de Small Punch Test para muestras de 8 y 3mm de diámetro a fin de caracterizar el ensayo con distintos tamaños de muestras y su relación de proporcionalidad con ensayos normalizados tipo Charpy.

## Referencias

- [1] Aníbal Carlos Di Luch, Estudio de la naturaleza de los defectos creados por irradiación neutrónica que provocan la fragilización de aceros de recipientes a presión de centrales nucleares
- [2] Min-Chul Kima, Yong Jun Oh, Bong Sang Lee, Evaluation of ductile–brittle transition temperature before and after neutron irradiation for RPV steels using small punch tests.
- [3] M. Bruchhausen, E. Altstadt, K. Matocha, European standard on small punch testing of metallic materials.