

## Caracterización de materiales por ensayos de impacto biaxial instrumentado

Valeria Pettarin y Patricia M. Frontini

INTEMA, Universidad Nacional de Mar del Plata-CONICET, Av. Juan B. Justo 4302

Mar del Plata, Buenos Aires, B7608FDQ, Argentina

Tel: (223)481-6600

Fax: (223)481-0046

[pettarin@fi.mdp.edu.ar](mailto:pettarin@fi.mdp.edu.ar) [pmfronti@fi.mdp.edu.ar](mailto:pmfronti@fi.mdp.edu.ar)

### Resumen

Un componente estructural se ve sometido a diferentes estados tensionales durante su vida útil. La demanda por ensayos que simulen con precisión las condiciones finales de uso se han incrementado notablemente en los últimos tiempos. Una pieza o artículo terminado puede sufrir golpes o choques de distinta naturaleza y de muy diferentes características, siendo el impacto el estado de sollicitación más severo al que se encuentran expuestas las piezas en servicio. Es por ello que el ensayo de impacto se ha vuelto especialmente importante y resulta de vital importancia la caracterización al impacto tanto de materiales como de partes en su forma final. El ensayo de impacto biaxial instrumentado resulta muy apropiado para este fin. En este trabajo se exponen ejemplos que involucran diferentes aspectos del estudio de propiedades mecánicas por medio de ensayos de impacto biaxial de materiales.

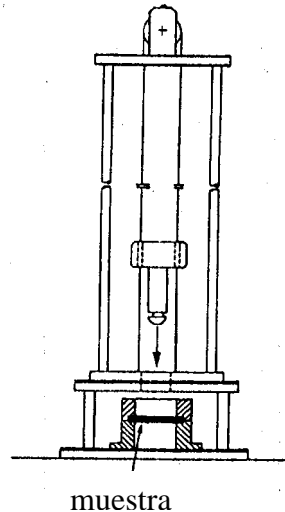
### 1. Introducción

Un componente estructural se ve sometido a diferentes estados tensionales durante su vida útil. La demanda por ensayos que simulen con precisión las condiciones finales de uso se han incrementado notablemente en los últimos tiempos. Una pieza o artículo terminado puede sufrir golpes o choques de distinta naturaleza y de muy diferentes características, siendo el impacto el estado de sollicitación más severo al que se encuentran expuestas las piezas en servicio. Es por ello que el ensayo de impacto se ha vuelto especialmente importante y resulta de vital importancia la caracterización al impacto tanto de materiales como de partes en su forma final.

Los ensayos de impacto se realizan por varias razones. En principio, resultan útiles para comparar la respuesta dinámica de varios materiales. Por ejemplo, los resultados de los ensayos de impacto se usan para comparar la *performance* de productos manufacturados por diferentes rutas de procesamiento. También se utilizan con propósitos de investigación y desarrollo en distintas aplicaciones y, como parámetro de control de calidad para un proceso de manufactura dado. Por otro lado, los ensayos de impacto se llevan a cabo para simular las condiciones de uso finales de un material o producto, de manera que éste sea fabricado para sobrevivir al impacto asociado con su uso final<sup>(1)</sup>. Debido a las distintas aplicaciones de los materiales, se han implementado ensayos de impacto que van desde los convencionales (tipo Izod o Charpy), hasta los de productos terminados como cascos, parachoques, cinturones de seguridad y materiales de

aplicaciones aeroespaciales<sup>(2)</sup>. Estos ensayos se utilizan en general para establecer un orden o “ranking” de materiales.

El sistema de dardo o peso que cae (*falling weight*) fue propuesto inicialmente por el U. S. Board en 1881 para ensayar hierro y acero (Figura 1). Este instrumento era menos atractivo que el sistema Charpy o Izod debido a las dificultades en la medición de la energía. Los adelantos en este sistema se originaron en las últimas décadas y se debieron al uso del análisis estadístico y a la utilización de transductores. Actualmente el ensayo de impacto biaxial instrumentado resulta muy apropiado para la caracterización al impacto tanto de materiales como de partes en su forma final.



**Figura 1. Esquema del equipo de impacto tipo *falling weight*.**

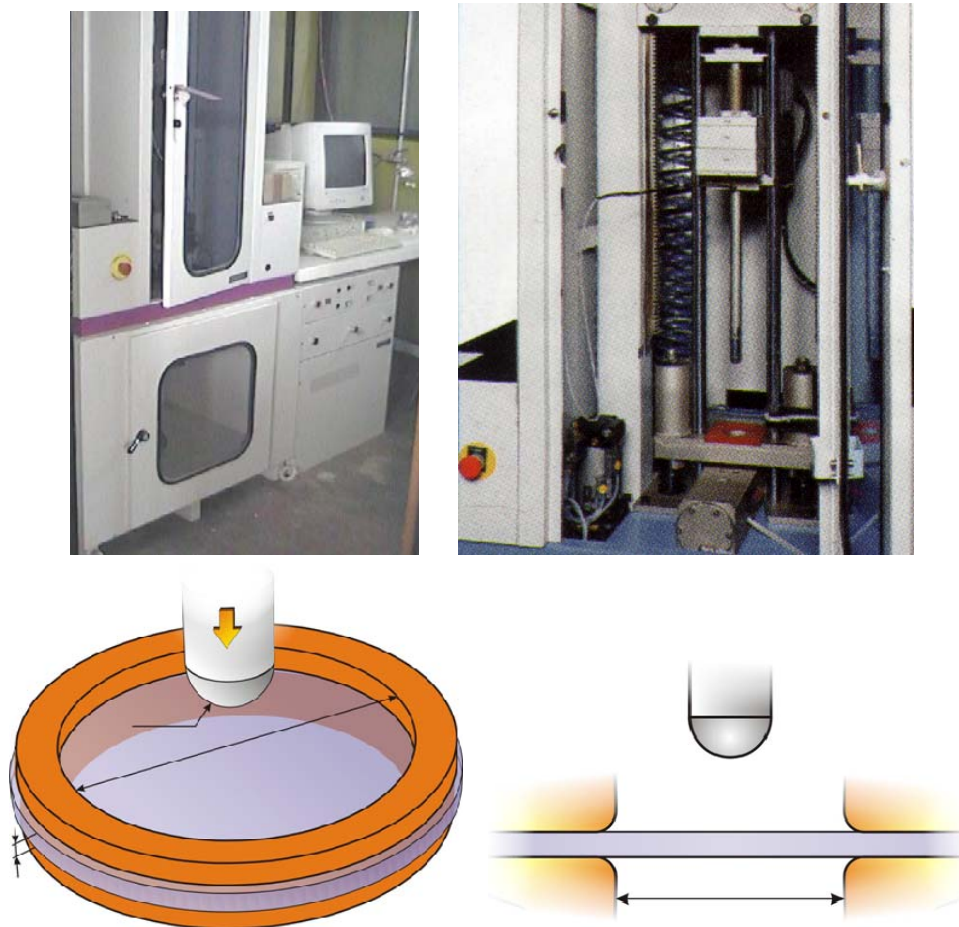
Los equipos de impacto instrumentados registran la fuerza soportada por el percusor durante el evento de impacto. A partir de la medición de la fuerza en función del tiempo se calculan la energía y el desplazamiento. De esta manera es posible separar las contribuciones de las distintas energías involucradas y es posible en principio diferenciar dos comportamientos mecánicos muy distintos que consumen la misma energía a fractura<sup>(3)</sup>. Además los ensayos de impacto biaxiales se caracterizan por su habilidad de detectar posibles problemas de fragilización o fractura en ausencia de un defecto de dimensiones significativas, y son una buena aproximación del comportamiento real de los materiales en servicio<sup>(4)</sup>.

En este trabajo se exponen ejemplos que involucran diferentes aspectos del estudio de propiedades mecánicas por medio de ensayos de impacto biaxial de materiales.

## **2. Equipamiento**

Los ensayos de impacto tipo *falling weight* se realizaron en una máquina Fractovis Gravity Drop CEAST 6789. El aparato está formado por dos cámaras, una superior en la cual está posicionado un dardo de acero que, cayendo libremente a lo largo de dos guías, golpea a la probeta colocada en la celda inferior donde están puestos los soportes regulables que la sostienen. La cámara inferior funciona además como cámara termostática, permitiendo realizar ensayos en un rango de temperatura entre  $-70^{\circ}\text{C}$  y  $250^{\circ}\text{C}$ . La figura 2 muestra el dardo y el sistema de masas ligadas a él. Conocida la altura de caída  $h$ , la velocidad teórica de impacto se obtiene de la relación  $v = \sqrt{2gh}$ ,

mientras que la energía disponible en el impacto depende la masa  $m$  en caída y, despreciando la energía perdida por fricción, vale  $E = mgh$ .



**Figura 2. Dardo instrumentado utilizado. (a) Fotografía del equipo. (b) Detalle del percusor y los pesos ligados a él. (c) Esquema de la prueba.**

En la parte superior del dardo se pueden colocar distintos pesos de acero que permiten variar la masa en caída libre desde 2.97 kg hasta 25.97 kg. Asimismo, la velocidad de caída libre puede variarse continuamente desde 0.5 m/seg hasta 4.42 m/seg. Como consecuencia la energía disponible para el impacto varía desde 0.74 J a 507 J.

Para lograr la velocidad de impacto deseada, el dardo se posiciona automáticamente a la altura necesaria a través de un motor ligado al aparato. La base sobre la que se ubica la probeta es regulable de modo de corregir con precisión la altura del disparo y por ende, la velocidad de impacto. Para determinar la velocidad de impacto exacta de la prueba, una fotocélula fija, ubicada paralela al recorrido del percusor, mide la velocidad del dardo un instante antes del impacto.

El equipo cuenta con percutores de 12,7 mm y 20 mm de diámetro y aros de soporte de la muestra de 40mm y 78mm de diámetro, abarcando de esta manera varias normas de ensayo (por ejemplo, para polímeros <sup>(5-7)</sup>). Las distintas combinaciones de percutores y soportes permiten cambiar el estado de sollicitación desde un estado predominante de corte hasta un estado predominante de flexión.

La punta del dardo está equipada con extensómetros capaces de medir la fuerza actuante sobre el percusor. La fuerza ejercida sobre el percusor se mide indirectamente: una

carga aplicada provoca una deformación, y por lo tanto una variación de la resistencia eléctrica proporcional a la longitud del conductor. Los extensómetros están colocados dentro de un puente de Wheatstone para aumentar la sensibilidad de la diferencia de potencial medida a la variación de la resistencia del extensómetro. El puente de Wheatstone está conectado a un equipo de control y adquisición veloz (Ceast DAS 4000). A través de la curva de calibración provista por el fabricante, el DAS 4000 convierte la diferencia de potencial en carga aplicada al percusor, obteniendo así una curva de puntos fuerza-tiempo. En realidad el DAS 4000 cumple varias funciones:

- permite variar la sensibilidad y el fondo de escala del instrumento. La sensibilidad de los extensómetros varía según el intervalo de trabajo elegido: la mínima sensibilidad, elegida sobre un rango de trabajo de 310 N, es inferior a 3 N.
- adquiere la secuencia de medición de la diferencia de potencial en los extensómetros, con un máximo de 4000 puntos y un intervalo de lectura mínimo de 1  $\mu$ s.
- actúa de interfaz entre el instrumento de medición y una PC, permitiendo elaborar y guardar los resultados de las pruebas.

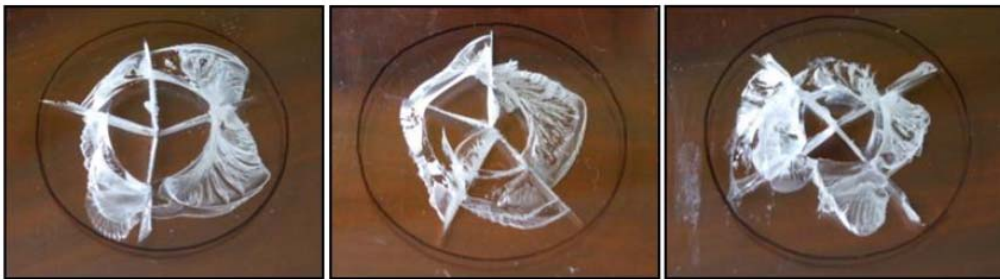
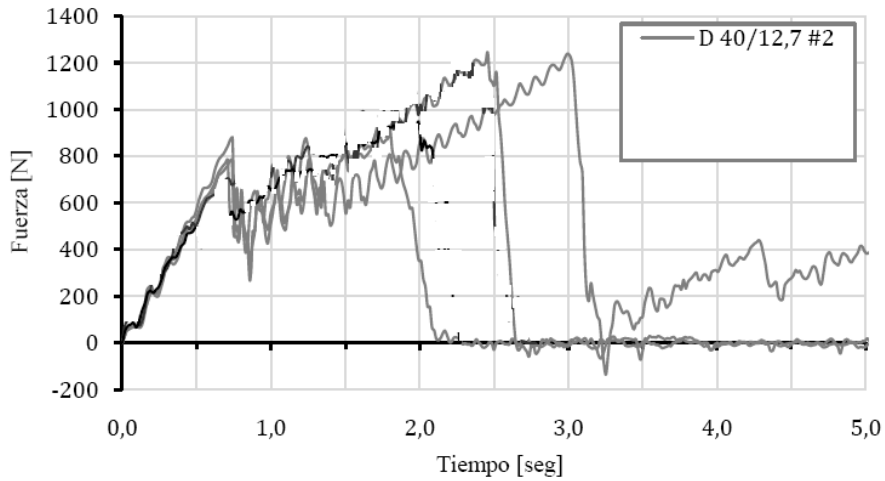
### 3. Aplicaciones

En esta sección se enumerarán distintos casos de materiales estudiados por las autoras con los que se desea ejemplificar el alcance del ensayo de impacto biaxial instrumentado.

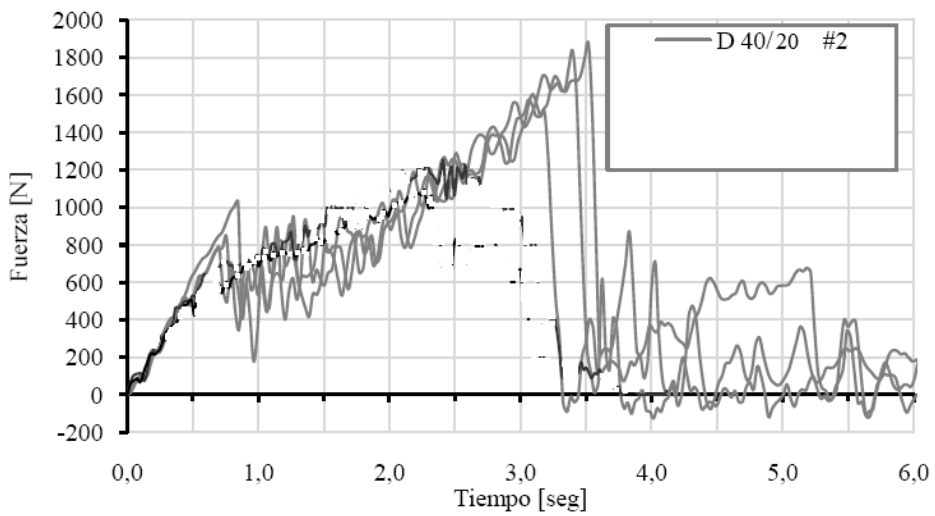
#### 3.1 Caracterización de placas

A modo de ejemplo se presentan aquí ensayos biaxiales realizados sobre placas de polimetilmetacrilato (PMMA) de 3 mm de espesor (Ineos Acrylics). Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente a 1 m/s, con soporte de 40 mm de diámetro y diámetros de percusor de 12.7 mm y 20 mm, de acuerdo a los lineamientos de la norma ISO 6603-2<sup>(8)</sup>.

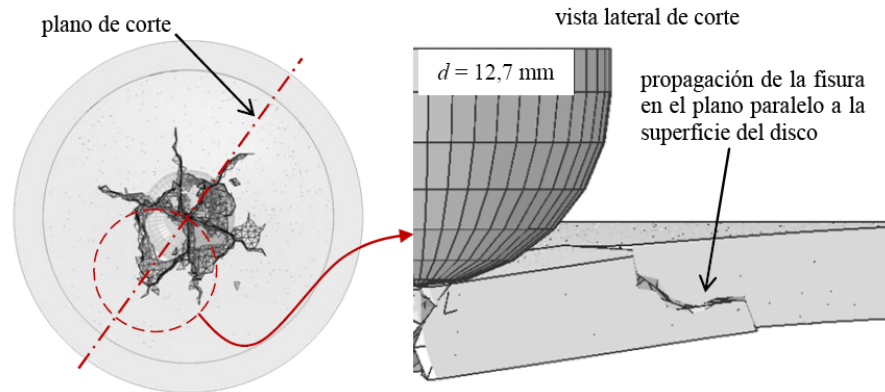
En las Figuras 3 y 4 se presentan los gráficos carga-desplazamiento junto con los patrones de rotura obtenidos durante los ensayos experimentales para dardos de 12.7 y 20mm respectivamente. Todas las curvas muestran claramente los “efectos inerciales” característicos de la prueba de impacto, con un primer pico inercial bien marcado. Los registros también muestran las oscilaciones típicas de los ensayos de impacto, debidas a la naturaleza dinámica del evento. Para el dardo de 12.7 mm (Figura 3) el patrón de rotura del disco corresponde al de un orificio en la zona central (rotura por punzonado) y existe propagación de la fisura en el plano paralelo a las superficies del disco (ver esquema de modelado en figura 5). El patrón de rotura para el ensayo realizado con el dardo de 20 mm (Figura 4) se compone de fisuras radiales y circunferenciales. La fisura circunferencial tiene un diámetro próximo al diámetro del disco y no atraviesan el espesor. En algunos casos esta fisura circunferencial se combina con un patrón de rotura del tipo punzonado en la zona central del disco. La diferencia de patrones de rotura al utilizar distintas relaciones (diámetro del dardo)/(diámetro del soporte) se debe a los diferentes estados tensionales que se generan con las distintas configuraciones.



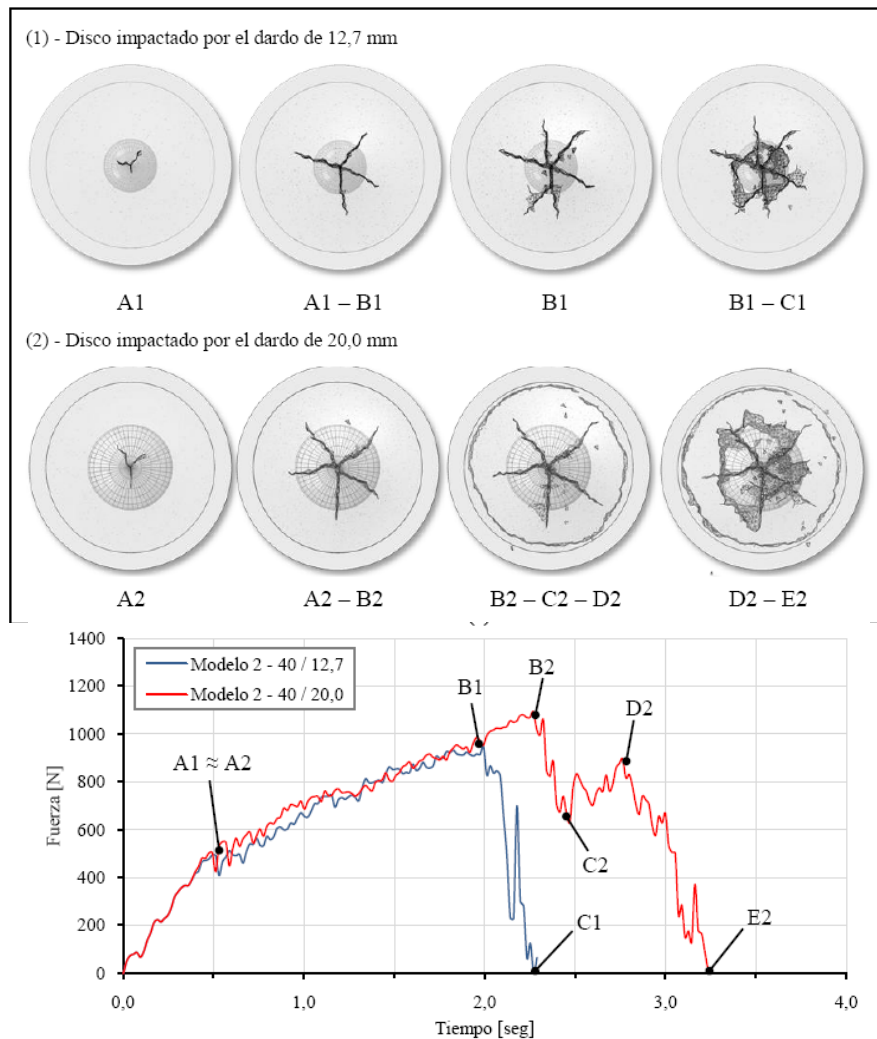
**Figura 3. Curvas fuerza vs desplazamiento y patrones de rotura de PMMA ensayado con un dardo 12.7 mm y un soporte de 40 mm.**



**Figura 4. Curvas fuerza vs desplazamiento y patrones de rotura de PMMA ensayado con un dardo 20 mm y un soporte de 40 mm.**



**Figura 5. Modelado por elementos finitos del crecimiento de la fisura en un plano paralelo a la superficie del disco de PMMA ensayado con un dardo 12.7 mm y un soporte de 40 mm.**



**Figura 6. Secuencia de ruptura de los discos obtenidas con un modelo de elementos finitos para los dardos de 12.7 mm y 20 mm, y comparación de curvas carga vs desplazamiento para las dos configuraciones.**

Mediante modelado por elementos finitos se puede identificar la secuencia de falla con los puntos característicos del registro carga-desplazamiento. En la Figura 6 se ilustra la secuencia de ruptura del disco para las dos configuraciones  $d/D$  (a) y su representación en las curvas carga vs desplazamiento (b). Estas curvas muestran un primer tramo de comportamiento lineal elástico hasta el punto A1 y A2, coincidente con la aparición de las primeras fisuras. Este valor puede ser considerado como la máxima resistencia a la penetración del disco y es independiente del tamaño del dardo. En este punto se produce un cambio de pendiente bien marcado (tramo A1-B1 y A2-B2) debido al crecimiento de las fisuras y disminución de la rigidez del disco. En el caso del dardo de 12,7 mm las fisuras radiales se detienen en el punto B1 y con la aparición de las fisuras circunferenciales de diámetro próximo a 12,7 mm, se produce la falla total del disco (tramo B1-C1). Para el dardo de 20 mm, el comportamiento a la falla es diferente. Las fisuras radiales se detienen en el punto B2 y se producen fisuras circunferenciales en el borde del disco (tramo B2-C2), pero estas no son pasantes por lo que el disco vuelve a soportar carga, tramo C2-D2. Finalmente, la falla total se produce con la aparición de las fisuras circunferenciales en un diámetro menor, de aproximadamente 20 mm (tramo D2-E2).

Este tipo de ensayo puede utilizarse además de cualitativamente para identificar el tipo de falla, en forma cuantitativa. Por ejemplo, se realizaron ensayos en placas de polietileno de alta densidad (HDPE) modificadas con nano-arcilla a temperatura ambiente a 3 m/s con una punta de 12.7 mm de diámetro y un soporte de 76 mm de diámetro, de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM D 3763-02 (ver ejemplos en la Figura 7) <sup>(9)</sup>. La energía de perforación relativa al espesor de los materiales evaluados se obtuvo como la energía absorbida durante el evento de impacto  $U$ , dada por la integración numérica de las curvas carga-desplazamiento, dividida por el espesor  $B$ , como  $U/B$ . la resistencia máxima del disco  $\sigma_d$  se evaluó como:

$$\sigma_d = 2.5 \frac{P_{\max}}{B^2} \quad (1)$$

siendo  $P_{\max}$  la carga máxima alcanzada por el disco. El módulo del disco se evaluó como:

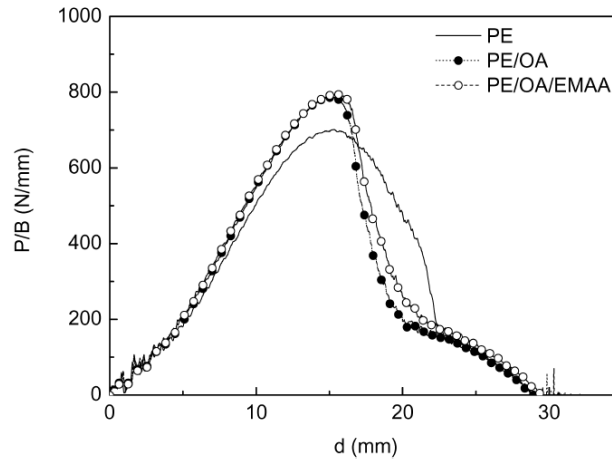
$$E_d = 0.145(1-\nu^2) \left( \frac{\Delta P}{\Delta x} \right) \frac{D^2}{B^3} \quad (2)$$

con  $\nu$  el coeficiente de Poisson,  $\Delta P/\Delta x$  la pendiente inicial de las curvas carga-desplazamiento y  $D$  el diámetro del disco. Para caracterizar la plasticidad también se evaluó la relación de ductilidad:

$$DR = \frac{(U_t - U_m)}{U_t} \quad (3)$$

donde  $(U_t - U_m)$  es la energía de deformación plástica después de la fluencia, siendo  $U_m$  la energía consumida hasta fuerza máxima y  $U_t$  la energía total. De esta manera se

pudo evaluar el efecto del agregado de refuerzos y compatibilizantes en el HDPE (ver tabla 1).



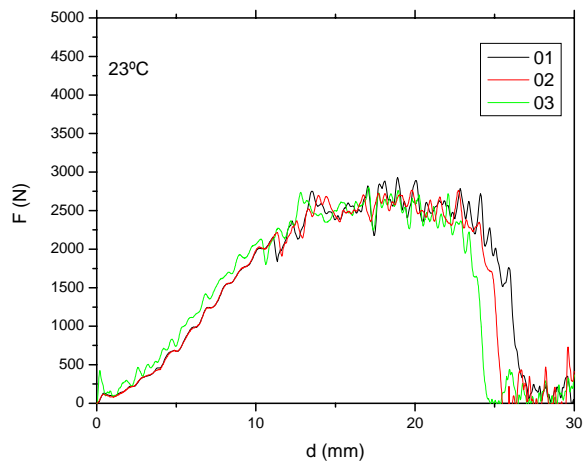
**Figura 7. Fuerza/espesor vs desplazamiento obtenidos en ensayos de impacto biaxial de placas de HDPE modificadas con nano-arcilla (OA) y compatibilizantes (EMAA).**

**Tabla 1. Propiedades al impacto biaxial de placas de compuestos de polietileno nano-arcilla**

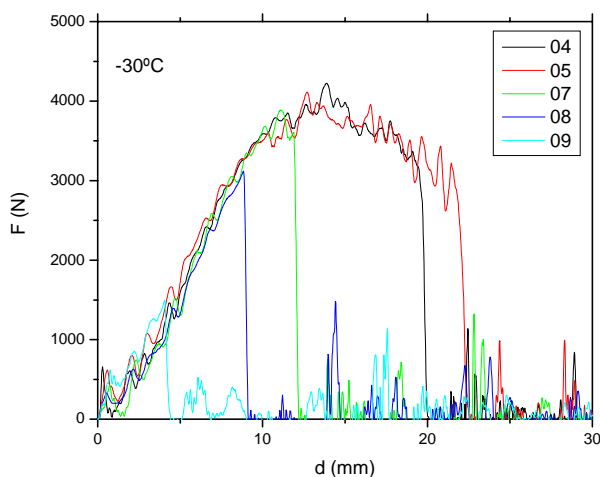
Material	U/B (J/mm)	$\sigma_d$ (MPa)	$E_d$ (GPa)	DR
PE	10.05	627	7.55	0.44
PE/OA	9.32	849	12.51	0.37
PE/OA/EMAA	9.55	895	13.44	0.37

### 3.2 Efecto de la temperatura

El equipo de ensayos permite también realizar ensayos a diferentes temperaturas, y evaluar el efecto de la misma tanto en el comportamiento como en los valores cuantitativos que caracterizan al material. A modo de ejemplo se presentan aquí resultados de ensayos sobre copolímeros de polipropileno, realizados a 4.43 m/s, con un diámetro de soporte de 40 mm y un diámetro de dardo de 20 mm, de acuerdo a los lineamientos de la norma ISO 6603-2, a temperaturas de 23 y -30°C. En las figuras 8 y 9 se muestran ejemplos de curvas carga-desplazamiento y patrones típicos de rotura a 23°C y -30°C respectivamente. En la tabla 2 se presentan los valores cualitativos obtenidos de estos ensayos. A 23°C (figura 8) todas las muestras presentaron un comportamiento dúctil, con deformación plástica alrededor del golpe del dardo, y una repetitividad de las curvas muy alta. La dispersión de los valores de energía y fuerza es baja. A -30°C (figura 9) los ensayos revelan una gran dispersión en los valores de fuerza máxima, desplazamiento a rotura y energía total. Este comportamiento es típico de los materiales que se encuentran en la región de transición dúctil-frágil (DBT). Por lo tanto, los valores promedio para los materiales que presentan características DBT no son significativos.



**Figura 8. Fuerza vs desplazamiento y patrón típico de rotura obtenidos en ensayos de impacto biaxial de placas de PP copolímero a 23°C.**



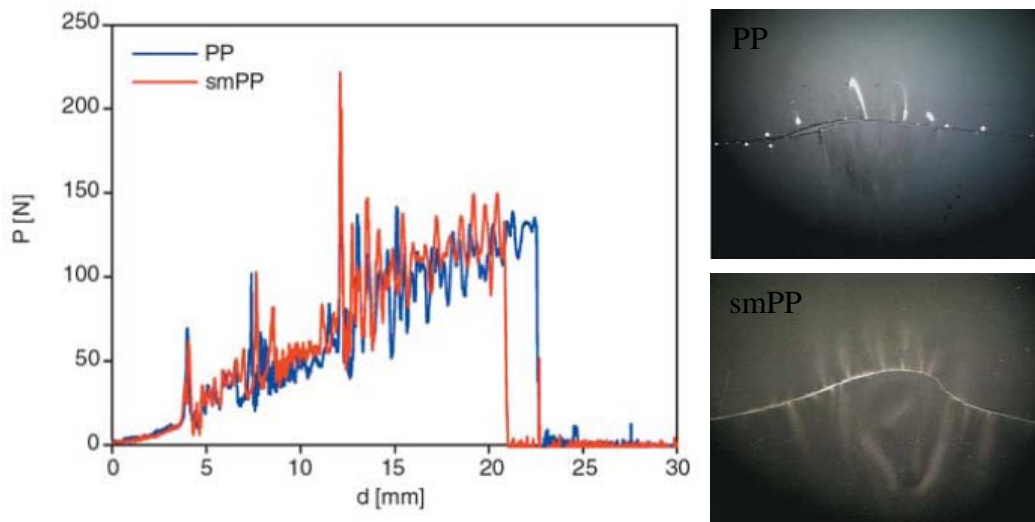
**Figura 9. Fuerza vs desplazamiento y patrón típico de rotura obtenidos en ensayos de impacto biaxial de placas de PP copolímero a -30°C.**

**Tabla 2. Propiedades al impacto biaxial de placas de polipropileno copolímero**

T (°C)	Pendiente de elevación lineal (N/mm)	A la fuerza máxima			Al final del ensayo	
		desplaz (mm)	Fuerza (N)	Energía (J)	desplaz (mm)	Energía (J)
23	237.8±12.2	13.5±0.8	2721±37	16.4±1.4	25.9±1.1	44.9±2.1
-30	445.1±42.3	9.6±3.4	3286±1067	17.8±9.8	13.5±7.7	30.6±25.4

### 3.3 Caracterización de películas

Además de placas de espesor del orden del mm, es posible evaluar películas muy delgadas, de espesor del orden del  $\mu\text{m}$ . Por ejemplo, se evaluaron películas de polipropileno de  $34\ \mu\text{m}$  de espesor modificadas superficialmente con una capa de poliácido acrílico <sup>(10)</sup>. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente a 3 m/s con un dardo de 12.7 mm de diámetro y un soporte de 76 mm de diámetro. Se eligió este tipo de ensayo ya que se ha demostrado muy sensible a cambios superficiales. En este caso el objetivo era cambiar las propiedades superficiales de la película sin alterar el comportamiento mecánico. Los resultados demostraron que a pesar de haber cambiado totalmente la superficie de la película, el comportamiento mecánico global era el mismo (ver figura 10 y tabla 3).



**Figura 10. Curvas carga-desplazamiento y patrones de rotura de ensayos biaxiales para películas de PP y PP modificado superficialmente (smPP).**

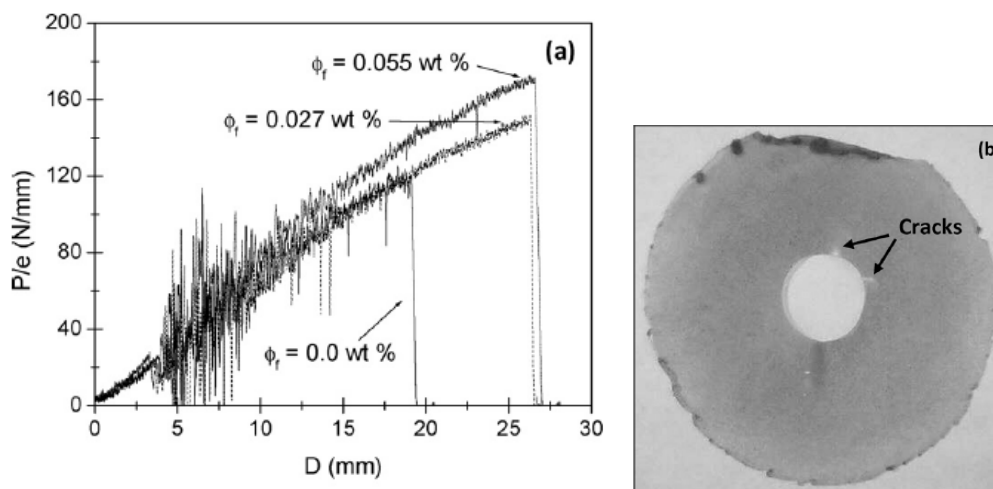
**Tabla 3. Propiedades al impacto biaxial de películas de PP y smPP**

Material	U/t (J/mm)	$\sigma_d$ (GPa)
PP	$32.1 \pm 6.4$	$115.6 \pm 17.9$
smPP	$30.6 \pm 4.8$	$113.9 \pm 23.9$

Otro ejemplo de caracterización de este tipo son ensayos realizados sobre películas de almidón de  $260\ \mu\text{m}$  de espesor modificadas con pequeñas cantidades de nanotubos de carbono, con el fin de mejorar su comportamiento mecánico <sup>(11)</sup>. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente a 3 m/s. Se encontró una mejora notable en el comportamiento mecánico con el agregado de muy bajos porcentajes de nanotubos de carbono (Figura 11 y tabla 4).

**Tabla 4. Propiedades al impacto biaxial de películas de almidón modificadas**

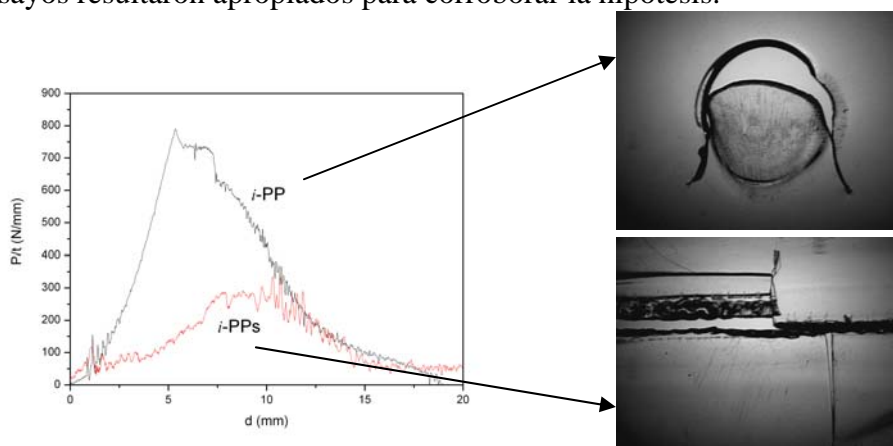
$\phi_f$ (wt%)	U/e (N)	$\sigma_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	$d_{\text{max}}$ (mm)
0	$1212 \pm 2$	$3225 \pm 25$	$19 \pm 0.5$
0.027	$2174 \pm 3$	$6040 \pm 33$	$26 \pm 1$
0.055	$2578 \pm 4$	$6324 \pm 67$	$27 \pm 1$



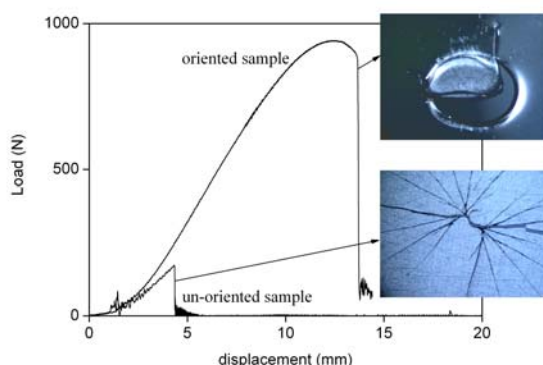
**Figura 11. Curvas carga-desplazamiento y patrones de rotura de ensayos biaxiales para películas de almidón modificadas con nanotubos de carbono.**

### 3.4 Caracterización de piezas terminadas

Este tipo de ensayo resulta muy útil para evaluar la influencia del procesamiento en el comportamiento final de una pieza terminada. A modo de ejemplo se muestran los resultados de ensayos realizados sobre botellas de PP copolímero de 400  $\mu\text{m}$  de espesor que contaban con una zona soldada por vibración <sup>(12)</sup>. Los ensayos de impacto biaxial realizados sobre la zona soldada y la sin soldar mostraron que las zonas sin soldadura (i-PP) exhibieron un comportamiento semi-dúctil con deformación plástica previa a la fractura (Figura 12). Se encontró fluencia y estirado dúctil tanto en la zona central del disco como en el anillo circundante. En las zonas soldadas (i-PPs) no se encontraron evidencias de deformación plástica. Debido a la pérdida de simetría inducida por la presencia de la soldadura se desarrolla un estado tensional aun más complejo en las muestras. Las uniones en T actúan como restricción impidiendo la deformación plástica e induciendo a las fisuras a propagar a lo largo de la soldadura. Con el fin de evaluar la corroborar la hipótesis de la influencia de la orientación en la respuesta mecánica se realizaron ensayos sobre muestras sin soldar biorientadas y sin orientar (figura 13). Los ensayos resultaron apropiados para corroborar la hipótesis.

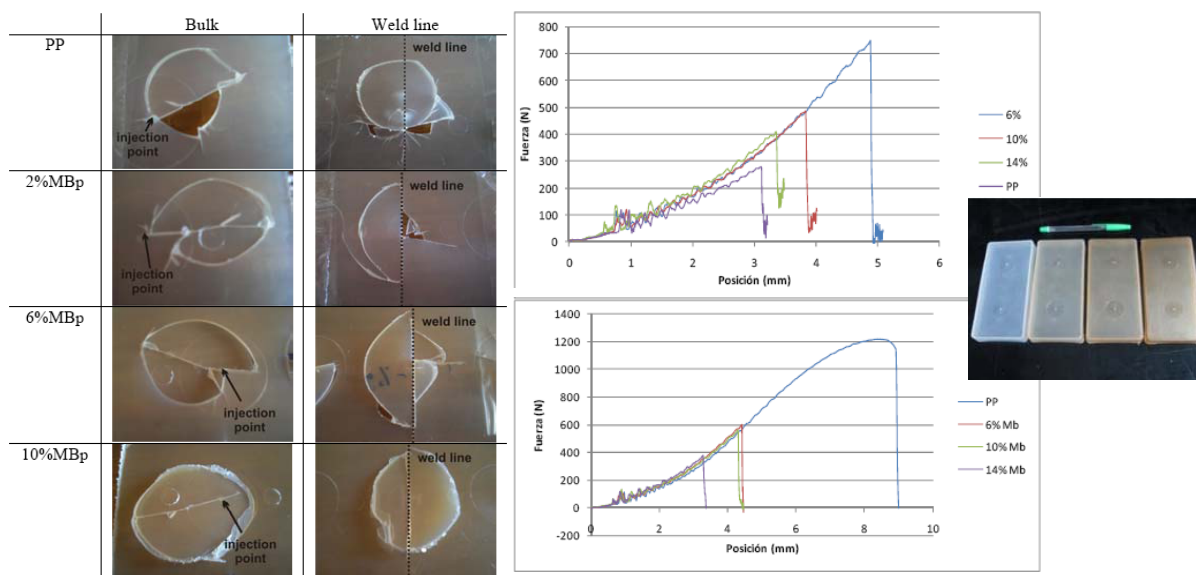


**Figura 12. Curvas carga-desplazamiento y patrones de rotura de ensayos biaxiales para piezas de copolímero de PP con zonas soldadas por vibración.**



**Figura 13. Curvas carga-desplazamiento y patrones de rotura de ensayos biaxiales para piezas de copolímero de PP orientadas y sin orientar.**

Otro ejemplo de evaluación de piezas terminadas, son ensayos realizados sobre cajas de polipropileno inyectadas en un molde con dos puntos de inyección <sup>(13)</sup>. Estos ensayos a 1 m/s sirvieron para demostrar como el patrón de flujo complejo dentro del molde condiciona el comportamiento final de las piezas (Figura 14).



**Figura 14. Curvas carga-desplazamiento y patrones de rotura de ensayos biaxiales para cajas de PP inyectadas.**

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se muestran ejemplos de caracterización de materiales por ensayos de impacto biaxial. Este equipo, único disponible en una institución pública del país, ha demostrado poseer una amplia capacidad de ensayo, y una alta sensibilidad a diferentes modificaciones en los materiales.

#### Agradecimientos

Los autores desean agradecer al CONICET, Universidad nacional de Mar del Plata y Agencia Nacional de Promoción Científica por el financiamiento recibido.

## Referencias

1. Macking, T. J., "A Comparison of Instrumented Impact Testing and Gardner Impact Testing", The Dynatup Impacter (1992)
2. Roche, J. L. and Kakarala, S.N., "Methodology for Selecting Impact Tests on Composite Materials in Automotive Applications", Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials, ASTM STP 936, S.L. Kessler, G.C. Adams, S.B Driscoll and D.R. Ireland (Eds) American Society for Testing and Materials, 24-43 (1987)
3. Martinez, A. B., Arnau, J., MasPOCH, M. Ll., Pagès, P., "Las técnicas de Impacto Instrumentado", Fetraplast, 4-11 (1992)
4. Bucknall, C.B., "Characterizing toughness using Standard Empirical Tests", in Polymer Blends, Volume 2: Performance, Paul, D.R., Bucknall, C.B. (Eds.), Wiley, New York, p. 25–27 (2000)
5. UNE-EN ISO 6603-2: Determinación del comportamiento de los plásticos rígidos a la perforación por efecto de un impacto, Parte 2: Ensayo de impacto instrumentado, 2001
6. ASTM D3763–02: Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors, 2002
7. PSA PEUGEOT-CITROEN Métodos de Ensayo de materiales D42 5352: Plásticos. Choque multiaxial instrumentado (a velocidad constante)
8. "Modelado de ensayos de impacto instrumentados en discos de PMMA utilizando elementos cohesivos", M. San Martín, V. Pettarin, A. Cisilino, XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF 2011, (1-4)/11/2011, Rosario, Argentina
9. Thermal degradation behavior, permeation properties and impact response of polyethylene/organo-montmorillonite/(ethylene methacrylic acid) ternary nanocomposites, V. Pettarin, L. Fasce, V. Rodriguez Pita, M. Lopes Dias, P. Frontini, Composite Interfaces, Vol. 16, 201-218 (2009)
10. Poly(acrylic acid) surface grafted polypropylene films: Near surface and bulk mechanical response, L. Fasce, V. Costamagna, V. Pettarin, M. Strumia, P. Frontini, eXPRESS Polymer Letters, Vol.2, No.11, 779–790 (2008)
11. Starch based nanocomposites with improved mechanical properties, L. Famá, V. Pettarin, S.N. Goyanes, C.R. Bernal, Carbohydrate Polymers, Vol. 83, issue 3, 1226–1231 (2011)
12. "Failure characterization of vibration welded polypropylene joints", V. Pettarin, L.A. Fasce, P.M. Frontini, Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers ANTEC 2008, (4-8)/05/2008, Milwaukee, Wisconsin, USA
13. "Impact behavior of injected PP/nanoclay parts", V. Pettarin, A. Pontes, J. C. Viana, P. M. Frontini, A. S. Pouzada, Polymer Processing Society 26th Annual Meeting PPS-26, (4-8)/07/2010, Banff, Canada