

Indentación por impacto de baja energía: modelo completo

O. JIMÉNEZ, M. SÁNCHEZ-SOTO, O. O. SANTANA, M. LL. MASPOCH, A. GORDILLO, J.I. VELASCO, A.B. MARTINEZ
Centre Català del Plàstic. Universitat Politècnica de Catalunya, 08222 Terrassa. (Barcelona) España

El objetivo de este trabajo es la evaluación de las propiedades mecánicas de polímeros y composites mediante el uso de técnicas de impacto de baja energía en configuración de flexión, de platos golpeados con cabezales semiesféricos, utilizando para ello un modelo no lineal y no conservativo que involucre el efecto de las deformaciones permanentes inherentes a la flexión y a la indentación presentes en el proceso de impacto. Este modelo está compuesto por dos sistemas en serie: resorte-amortiguador para la flexión y resorte hertziano-amortiguador para la indentación. Al carecer éste de soluciones analíticas, se resuelve usando el método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden, comparándose con resultados experimentales y evaluando, mediante el coeficiente de restitución, las pérdidas globales de energía ocasionadas durante el ensayo. Se realizaron ensayos en varias series de composites de matriz polimérica de Poliestireno (PS) con fases dispersas rígidas y elastoméricas. El modelo aproxima satisfactoriamente las curvas registradas experimentalmente y permite calcular el módulo elástico a elevadas velocidades de impacto así como la energía en que empieza a generarse el daño en las probetas.

Palabras clave: Impacto, indentación, modelización, polímeros, materiales compuestos.

Low energy impact indentation: a complete model

The present work propose is the polymer and composites mechanical proprieties evaluation, using low energy impact techniques in flexure plate configuration hitting by a semi spherical indenters and working with a non linear and non conservative model that involve the permanent deformations due to the impact flexure and indentation. Two systems arrayed in serial configuration, a flexion spring-dashpot and an indentation hertzian spring-dashpot, conform this model. Since this do not have analytical solutions, a 4th order Runge-Kutta numeric model is used in order to solve it and is compared with experimental results measuring the global energy lost with the restitution coefficient. Different polystyrene (PS) matrix composites series with elastomeric and rigid dispersed phases were tested. A satisfactory model approach to the registered experimental curves is showed, allowing the elastic modulus calculus at high impact velocities and also the determination of the energy at the beginning of the specimen damage.

Key words: Impact, indentation, modeling, polymer, composites.

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos de impacto instrumentados en materiales plásticos y compuestos se han generalizado como consecuencia de la disponibilidad de equipos instrumentados comerciales y por la necesidad de obtener información bajo condiciones de altas velocidades de sollicitación.

Se han llevado a cabo estudios previos a fin de obtener un mejor conocimiento de este fenómeno, y se han presentado algunos métodos para predecir la historia de la fuerza durante el ensayo de impacto. En general, los procedimientos aproximados para predecir el comportamiento de la fuerza en función del tiempo durante el impacto de baja energía, se han basado en modelos de muelles y en la teoría de pequeñas deformaciones de platos o en su caso de barras prismáticas. Estos modelos, que consideran al material como un sólido elástico ideal, son sistemas conservativos y en ellos no hay pérdidas de energía. Sin embargo, casi todos los sistemas reales son no conservativos en un mayor o menor grado, por lo que un modelo completo debe considerar simultáneamente, tanto la flexión de las probetas como la indentación producida por el cuerpo de impacto y tomar en consideración las pérdidas respectivas.

En este trabajo se persigue la búsqueda de un modelo no conservativo que permita aproximarse al fenómeno real del impacto, contemplando al mismo tiempo la indentación y la flexión. Se pretende

establecer hasta que punto el modelo propuesto puede ser adoptado con éxito para predecir la historia de la fuerza o las características mecánicas del material. Para ello se estudió el comportamiento a impacto del poliestireno (PS), del poliestireno de alto impacto (HIPS) y mezclas de ambos con y sin microesferas de vidrio.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los ensayos de impacto instrumentado se han realizado en un equipo comercial, DARTVIS (Ceast, Italia), consistente en un dardo de 0.744 kg de masa con una cabeza semiesférica de 12.7 mm de diámetro que puede caer desde altura variable impactando sobre una lámina de material. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente y se registra la fuerza en función del tiempo. Las señales registradas no se filtraron.

Los resultados experimentales se analizaron según la metodología descrita por Martínez y Jiménez, tanto para el coeficiente de restitución como para la evaluación de los parámetros del material. Para la evaluación de la velocidad de impacto se siguieron las técnicas descritas por Sullcahuaman.

3.- MATERIALES.

Se ha utilizado PS de grado comercial Lacqrene 1541 de Elf-Atochem de alta fluidez que contiene un 5-5,5% de aceite mineral como lubricante y el HIPS de grado comercial Lacqrene 7240 (Elf-Atochem). A partir de estos se han realizado diferentes diluciones de HIPS en PS, con contenidos de 25, 50 y 75% en peso de HIPS, adicionándose a algunas mezclas un 12.3% de microesferas de vidrio Sovitec 050-20-010 (Sovitec-España) sin tratamiento superficial. De los materiales de origen y de sus mezclas se inyectaron discos de 80 mm de diámetro y 4 mm de espesor para las pruebas de impacto.

4. MODELO

4.1 Desarrollo del modelo

Basado en los modelos propuestos por Martínez para flexión y Jiménez para indentación, se ha construido un modelo (figura 1.a) que involucra ambos efectos. El conjunto está compuesto por 1 elemento másico m , dos amortiguadores lineales, uno de indentación C_i y otro de flexión C_f y dos elementos elásticos, uno lineal para la flexión K_f y otro hertziano para la indentación K_i , cuyos comportamientos se describen en las ecuaciones 1 a 5

$$F_m = m\alpha + mg \tag{1}$$

$$F_{ci} = C_i a_{ci} \tag{2}$$

$$F_{cf} = C_f \alpha_{cf} \tag{3}$$

$$F_{Kf} = K_f \alpha_{Kf} \tag{4}$$

$$F_{Ki} = K_i \alpha_{Ki}^{3/2} \tag{5}$$

Las constantes K_i y K_f para el caso de un material isotrópico, son las descritas en las ecuaciones 6 y 7.

$$K_f = \frac{4\pi E e^3}{3(1-\nu)(3+\nu) a^2} \tag{6}$$

$$K_i = \frac{4\sqrt{R}}{3} \left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu^2}{E_i} \right)^{-1} \tag{7}$$

Donde E , e y ν son el módulo elástico, el espesor y el coeficiente de poisson de la probeta, a el diámetro del soporte, y R , E_i y ν_i representan el radio, el módulo de elasticidad y el coeficiente de poisson del indentador. De esta forma C_i se describe como:

$$C_i = \frac{\sqrt{K_f m \left(1 + \left(\frac{\pi}{\ln \epsilon} \right)^2 \right)}}{2} \tag{8}$$

C_i se ajusta para que en conjunto la solución cumpla con la ecuación 9 del coeficiente de restitución ϵ .

$$\epsilon = \frac{\int_0^{t_c} F dt}{mv_0} - 1 \tag{9}$$

La configuración del modelo se muestra en la figura 1.a, en el se tienen cuatro desplazamientos. Dado que todos los elementos se encuentran en serie, la fuerza aplicada es igual en cada uno de ellos. Al ser los dos elementos amortiguadores lineales, el sistema se puede reducir (figura 1.b), con lo que la constante del amortiguador equivalente queda expresada como:

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_i}} \tag{10}$$

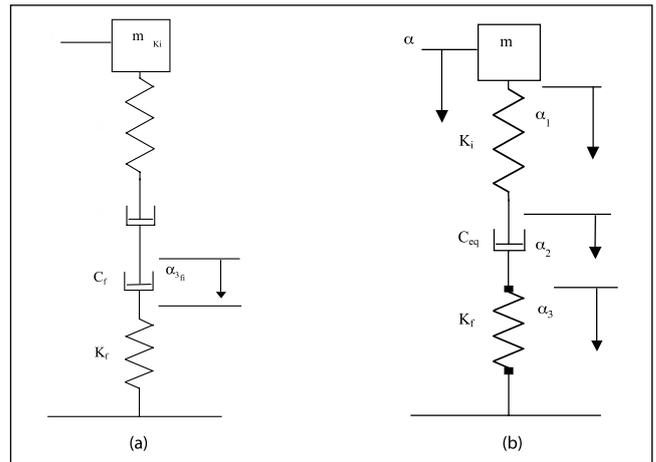


Figura 1. Modelo serie flexión+indentación a) completo; b) simplificado

De todo lo anterior el comportamiento del sistema se describe por las ecuaciones diferenciales:

$$m\alpha = K_f \alpha_1 \tag{11}$$

$$C_{eq} \alpha_2 = K_i \alpha_3^{3/2} \tag{12}$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \tag{13}$$

Al reducir variables, de 11, 12 y 13 se obtienen las expresiones:

$$\alpha = \frac{K_f}{m} \left(\alpha - \alpha_2 - \left[\frac{C_{eq}}{K_i} \alpha_2 \right]^{3/2} \right) \tag{14}$$

$$\alpha_2 = \frac{K_f}{C_{eq}} \left(\alpha - \alpha_2 - \left[\frac{C_{eq}}{K_i} \alpha_2 \right]^{3/2} \right) \tag{15}$$

4.2 Resolución numérica

Dado que de las ecuaciones 14 y 15 no se puede obtener una solución analítica, para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales se ha hecho uso del método numérico de Runge-Kutta de 4º orden, lo cual requiere 2 expresiones más para el cálculo de las variables. Se define que:

$$\alpha = \frac{d\alpha}{dt} \tag{16}$$

Al carecer de una expresión que permita establecer el comportamiento de α_2 y que sea válida en el método, suponemos que empieza en un valor cero, con lo que podemos utilizar la aproximación:

$$\alpha_2 = \frac{d\alpha_2}{dt} = \frac{\alpha_{2(i)} - \alpha_{2(i-1)}}{\Delta t} = \frac{\Delta \alpha_2}{\Delta t} \tag{17}$$

De esta forma podemos dejar el conjunto de funciones para programar el algoritmo como:

$$f_1 = \frac{K_f}{m} \left(\alpha - \alpha_2 - \left[\frac{C_{eq}}{K_i} \alpha_2 \right]^{3/2} \right) \tag{18}$$

$$f_2 = \frac{K_f}{C_{eq}} \left(\alpha - \alpha_2 - \left[\frac{C_{eq}}{K_i} \alpha_2 \right]^{3/2} \right) \tag{19}$$

$$f_3 = \alpha \tag{20}$$

La programación se realizó en una hoja de cálculo con un intervalo de 1.5 μ s, similar a la resolución de los aparatos en los experimentos, tomando como valores iniciales la velocidad del impacto ($\alpha_{t=0} = v_0$) y la posición inicial de todos los elementos ($\alpha_1 = a = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$), teniendo como parámetros del modelo a la masa del impactor (m) y las constantes K_f , K_i y C_{eq} que dependerá de C_f y C_i . Dado que el coeficiente de restitución aparece en la expresión 8, este será un dato inicial proveniente de la aplicación de la expresión 9 a las curvas experimentales. Por medio de una serie de iteraciones se ajusta el coeficiente de restitución de la curva teórica por medio del valor de C_i .

5. RESULTADOS

En la figura 2 se aprecia el excelente ajuste obtenido mediante este modelo con respecto a la curva experimental obtenida del ensayo de una mezcla de HIPS+PS+microesferas de vidrio con 40 mm de altura de caída. Igual de excelentes han resultado las aproximaciones para los otros materiales. No obstante, se presenta una cierta separación en la fase de recuperación en las curvas que corresponden a las mayores velocidades de impacto, en cuyas probetas se observan visualmente la aparición de microfisuras y grietas después del ensayo. La generación de estas grietas origina un cambio en la flexibilidad de la probeta K_f .

Al aplicar el ajuste de las curvas generadas por el modelo sobre aquellas obtenidas experimentalmente, se pueden obtener los parámetros del material. En la tabla 1 se puede ver la variación del módulo de elasticidad (promedio) respecto a la composición del material. Como era de esperarse, el módulo es menor conforme aumenta la fracción del HIPS. En el caso de los materiales con fase rígida se nota un ligero aumento. Se cumple, por lo tanto, la ley de las mezclas y los valores obtenidos son coherentes.

TABLA I. VALORES PROMEDIO DE LOS PARÁMETROS DE AJUSTE PARA EL MODELO PROPUESTO

Material	E (Mpa)	t_f (ms)	$V_{0\text{máx}}$ (m/s)
PS	3776.00	3.9t08	0.95
25% HIPS	3595.31	4.050	1.68
50% HIPS	3370.65	4.193	2.26
75% HIPS	3034.74	4.402	2.50
HIPS	2732.61	4.704	2.79
PS-mev	4098.46	3.660	1.17
PS-HIPS-mev	3500.00	3.953	1.48
HIPS-mev	2997.73	4.478	1.48

En la figura 3 se puede apreciar la evolución del módulo de elasticidad y del coeficiente de restitución para el HIPS en función de la velocidad de impacto. En general, para todos los materiales, al incrementar las velocidades de impacto, se obtienen ligeros incrementos del módulo de elasticidad acompañados por un decaimiento del coeficiente de restitución, lo que implica una disminución de las constantes C_f y C_i , siendo esta última considerablemente menor, lo que nos indica que las mayores pérdidas se deben a los efectos de flexión.

6. CONCLUSIONES

Se concluye que la aplicación del modelo no lineal y no conservativo propuesto, da resultados satisfactorios y coherentes, que representan adecuadamente el comportamiento del material dentro del rango de velocidades estudiado.

La aproximación que da el modelo permite determinar en que momento empieza a generarse daño en las probetas así como los valores del coeficiente de restitución y del módulo de elasticidad.

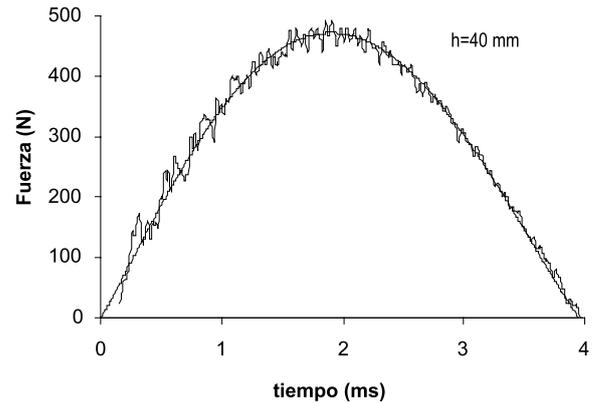


Figura 2. Ajuste de una curva generada por el modelo sobre una curva obtenida experimentalmente en un ensayo sobre HIPS+PS+mev con altura de caída de 40mm.

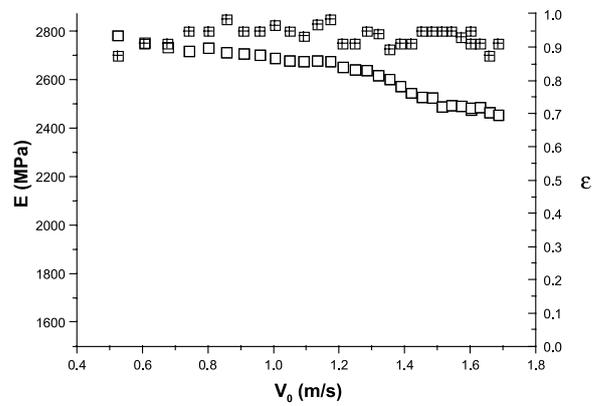


Figura 3. Valores obtenidos de los ajustes del modelo a las curvas experimentales de los ensayos realizados sobre HIPS: □ módulo de elasticidad, □ coeficiente de restitución.

7. AGRADECIMIENTOS

O. Jiménez agradece a la Agencia Española de Cooperación Internacional la concesión de la beca MAE de estudios predoctorales. Los autores agradecen el soporte del MCYT a través del proyecto MAT2000-1112-P3

8. BIBLIOGRAFIA

- 1 A.B. Martínez, et al., «Impacto de plásticos: Impacto de baja energía», en Información tecnológica. 1994. p. 19-24.
- 2 T. Casiraghi, et al., «Fracture mechanics of polymers. Critical evaluation of linear elastic behaviour at high speed testing.» J. Mater. Sci., 23, 459-466(1988).
- 3 S.S. Pang, «Impact response of composite laminates whit hemispherical indenter.» Polym. Eng. Sci., 31, 1461-1466(1991).
- 4 A.B. Martínez, et al. «Impacto de baja energía en composites de poliestireno», en IV Congreso Nacional de Materiales Compuestos, Gijón (España), 2001, A.E.d.M. Compuestos, Asociación Española de Materiales Compuestos
- 5 O. Jimenez, et al. «Indentación por impacto de baja energía», en X Reunión del grupo español de Fractura, Girona (España), 2002, G.E.d. Fractura, Grupo Español de Fractura
- 6 A. Sullcahuaman, «Fractura de materiales poliméricos a altas velocidades de sollicitación», Tesis doctoral. 2001, Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona, España.
- 7 L. Rayleigh, «On the production of vibration by forces of relatively long duration with the applications to the theory of collisions» Philos. Mag., 11[3], 283 (1906).
- 8 L.B. Greszczuk, «Damage in composite materials due to low velocity impact» pp.55-94 en Impact Dynamics, John Wiley & Sons, New York.
- 9 G. Curtis, «Análisis Numérico» 2 ed. 1987, México: Representaciones y servicios de ingeniería. 631.

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03