

**UTILIZACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS EN LA SIMULACIÓN  
NUMÉRICA DE ENSAYOS DE IMPACTO PARA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES  
COMPUESTOS POLIMÉRICOS**

**Ricardo Barrios D'Ambra\*** **Laura A. Fasce<sup>†</sup>**, **Ignacio Iturrioz<sup>†</sup>**, **Patricia M. Frontini<sup>†</sup>**, **Adrián P. Cisilino<sup>†</sup>**

\* Departamento de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional del Nordeste  
Av. Las Heras 727 - Resistencia (3500) – Chaco – Argentina  
e-mail: rbarrios@ing.unne.edu.ar

<sup>†</sup> Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales INTEMA  
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Mar del Plata -CONICET.  
e-mail: lfasce@fi.mdp.edu.ar

<sup>†</sup> PROMEC, Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería  
Universidad Federal de Rio Grande do Sul.  
Porto Alegre, RS, Brasil.  
e-mail: ignacio@mecanica.ufrgs.br

**Key words:** Mecánica de Fractura dinámica, Simulación numérica, Impacto, Método de los elementos discretos

**Resumen.**

El objetivo de este trabajo es presentar el método de los elementos discretos en la simulación numérica de ensayos de impacto sobre compuestos poliméricos. Son obtenidas las curvas carga - desplazamiento, el balance energético y las configuraciones de ruptura para distintas mezclas de materiales sometidas a cargas de impacto.

**Abstract.**

The aims of this work is to present the discrete elements method in the numeric simulation of impact test on compound polymers. They are obtained the load - displacement curves, the energy balance and the rupture configurations for different mixtures of materials subjected to impact loads.

## 1 INTRODUCCION

El estudio de diferentes mezclas de materiales poliméricos es un tema de singular importancia dentro del área de desarrollo de nuevos materiales. Las distintas posibilidades de combinación en las proporciones de los diversos compuestos cambian sensiblemente las propiedades mecánicas del material.

Debido a la complejidad de los fenómenos involucrados muchas veces la caracterización mecánica de los materiales es sólo realizada a través de ensayos, uno de ellos es realizado en una probeta en forma de disco circular plano sobre la cual impacta una barra de acero con extremo hemisférico a una velocidad controlada, detalles sobre este tipo de ensayos puede ser encontrado en la norma ASTM D 3763 – 00<sup>[1]</sup>.

Puede resultar de interés el realizar la simulación numérica del ensayo mencionado pues el mismo permitirá verificar diferentes mecanismos internos durante el proceso de colapso del disco, así como explorar la sensibilidad de diversos factores en la configuración de ruptura del disco.

Este tipo de simulaciones puede ser realizada con el método de los elementos finitos, siendo esta metodología incuestionable cuando se tratan estructuras con un comportamiento dúctil predominante, como una referencia sobre trabajos realizados en esta área puede citarse Zhong<sup>[2]</sup>, actualmente existen sistemas comerciales dedicados al análisis de problemas de impacto como el LSDYNA y el Abaqus/explicit, los mismos son conocidos y utilizados tanto en el ámbito académico como en problemas de ingeniería, como ejemplo de esto puede citarse el trabajo de Knight & et al<sup>[3]</sup>.

Pero cuando el material estudiado tiene un comportamiento frágil o cuasi frágil como el que ocurre con algunas de las mezclas poliméricas estudiadas, la utilización del método de los elementos discretos (MED) se presenta como una herramienta que puede dar una respuesta alternativa para el estudio de este tipo de problemas.

El MED consiste esencialmente en la discretización espacial del continuo en módulos de reticulado espacial regulares, dónde las rigideces de las barras son equivalentes a la del continuo que se quiere representar, la masa es discretizada concentrándola en los nodos del sistema discreto.

La ecuación de movimiento resultante de la discretización espacial antes descripta es integrada en el tiempo utilizando un esquema explícito de integración. Las barras tienen una ley constitutiva uniaxial, en general simple, que permite representar el comportamiento del conjunto.

Este método ha sido utilizado con suceso en el estudio de materiales frágiles como hormigón y hormigón armado como se presenta en Riera & Iturrioz<sup>[4]</sup>. La simulación del comportamiento de suelos frente a cargas explosivas pueden encontrarse en Iturrioz & Riera<sup>[8]</sup>, así como el estudio de propagación dinámica de fisuras en Spellmeyer et. al.<sup>[9]</sup>.

En este trabajo se realiza la calibración del modelo numérico creado utilizando el método de los elementos discretos empleando los resultados experimentales obtenidos en términos de curvas carga desplazamiento en el centro del disco. Y a partir del modelo calibrado es posible obtener importantes conclusiones sobre el efecto de las propiedades del compuesto en la configuración de ruptura formada.

## 2 EL METODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS: PROPIEDADES Y APLICACIONES

Este método computacional se basa en la representación del continuo mediante un arreglo de masas nodales interconectadas por elementos unidimensionales sin masa.

El arreglo cúbico de la figura 1 muestra un módulo con ocho nodos en sus vértices más un nodo central. Cada nodo posee tres grados de libertad. Las masas son unidad por elementos longitudinales y diagonales de longitud  $L_c$  y  $\sqrt{3}/2 L_c$  respectivamente. La equivalencia entre el arreglo cúbico y un sólido elástico ortotrópico con los ejes principales del material orientados en la dirección de los elementos longitudinales fue verificada por Riera & Iturrioz<sup>[4], [5]</sup>, dentro del campo de la elasticidad lineal. Sólo debe ser impuesta la restricción  $\nu = 0.25$  al valor del módulo de Poisson para que la equivalencia sea perfecta.

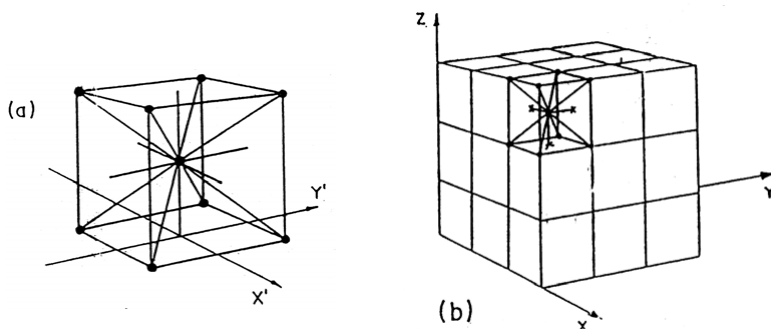


Figura 1: a) Módulo cúbico utilizado. b) Prisma compuesto por varios módulos cúbicos

Para otros valores de  $\nu$  aparecen pequeñas diferencias en los términos de corte, estas diferencias pueden despreciarse sobre todo cuando se está interesado en la respuesta no lineal del modelo estudiado.

La ecuación de movimiento del sistema de  $N$  grados de libertad resultante de la discretización espacial puede ser expresada en la forma:

$$M\ddot{u} + \vec{f}(t) = \vec{Q}(t) \quad (1)$$

En la cual  $M$  denota la matriz de masa (diagonal),  $\vec{u}$  es el vector de coordenadas generalizadas (desplazamientos nodales),  $f(t)$  es el vector de fuerzas nodales internas, las cuales dependen de los desplazamientos presentes y de pasos anteriores, y  $Q(t)$  el vector de fuerzas externas aplicadas. Así, en sistemas lineales elásticos,  $f(t) = Ku$ , siendo  $K$  la matriz de rigidez. En sistemas con fuerzas viscosas,  $f(t) = Ku + C\dot{u}$ , considerando  $C$  proporcional a la matriz de masa, el sistema (1) puede ser integrado numéricamente en el dominio del tiempo utilizando un esquema de integración explícita (método de las diferencias finitas centrales).

Mediante la actualización de las coordenadas nodales en cada paso del tiempo este método permite la consideración de grandes desplazamientos en forma natural (no linealidad

geométrica).

La convergencia de las soluciones en elasticidad lineal, así como en los problemas de inestabilidad elástica fue verificada por Riera & Iturrioz<sup>[5]</sup>. También Rocha & Riera<sup>[7]</sup>, extendieron el método para análisis de fractura en materiales frágiles, tales como hormigón y suelos cohesivos.

La relación tensión - deformación o fuerza - desplazamiento del material es supuesta bilineal como se muestra en la figura 2.

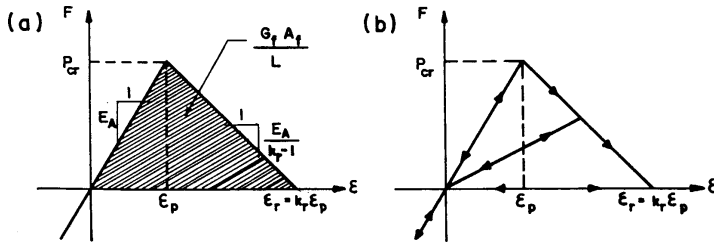


Figura 2: Relación Constitutiva Elemental de las barras del reticulado: a) Diagrama constitutivo adoptado con sus parámetros de control; b) Esquema para la carga y descarga. Rocha<sup>[6]</sup>.

La deformación límite  $\epsilon_r$  es elegida para satisfacer la condición de que cuando un elemento falla y la fisura se abre, se disipa una cierta cantidad de energía. Esta energía es igual al producto del área de la superficie fracturada,  $A_f$ , la cual está relacionada con  $L_c$ , por el valor de la tasa de energía superficial  $G_f$ , que es una propiedad del material.

Las propiedades del material pueden ser modeladas como campos aleatorios, lo que implica que las mismas pueden variar de elemento a elemento siguiendo una ley estadística establecida.

El método de los elementos discretos ha sido aplicado con suceso en el estudio de materiales susceptibles de fracturar, dónde la hipótesis de medio continuo, base de los métodos numéricos tradicionales (elementos finitos y de contorno) es violada.

### 3 DESCRIPCION DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Los trabajos experimentales realizados por Fascè<sup>[10]</sup> consisten en ensayos de impacto efectuados sobre probetas circulares planas construidas en polipropileno modificado con una poliolefina elastomérica, sobre la cual impacta una barra de acero con extremo hemisférico a una velocidad controlada. La altura de caída de la barra de acero varía en función del tipo del material estudiado. Para los materiales de los ensayos identificados en tabla 1 como ensayo II, III y IV, la altura de caída fue de  $h=0.225$  m (velocidad de impacto de 2.1 m/seg) y el peso del impactador de 5.49 Kg, para el ensayo I, la altura de caída fue de 0.644m (velocidad de impacto de 3.55 m/seg) y el peso del impactador de 28.49 kg. Detalles sobre este tipo de ensayos puede ser encontrado en la norma ASTM D 3763 – 00<sup>[11]</sup>.

En la tabla 1 se presentan las propiedades mecánicas de las mezclas estudiadas.

Tabla n° 1: Propiedades mecánicas correspondientes a los distintas mezclas de polipropileno y poliolefina elastomérica. Según Fasce<sup>[10]</sup>.

Ensayo Nro	Material	%vol POEs	Módulo en impacto	Módulo en flexión	Tensión de fluencia	Tenacidad en impacto(Jc)
			E (GPa)	E (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	N/mm
I	PPH	0.000	2.10	1.61	37.14	1.08
II	PP+10%wtPOEs	10.391	1.76	1.55	33.16	3.37
III	PP+20%wtPOEs	20.693	1.42	1.30	29.28	3.30
IV	PP+30%wtPOEs	30.905	1.08	1.06	25.26	2.73
	POEs	100.000	-	0.01	-	-

Siendo:

POE = poliolefina elastomérica ENGAE POEs 8100

PP = polipropileno.

PPH = Homopolímero de polipropileno (Cuyolem NX1100)

#### 4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO TEORICO UTILIZADO

En figura n° 3 se muestra la vista superior y el corte a lo largo del diámetro del disco plano analizado de diámetro D y espesor t. La zona rayada esquematiza el aro metálico de sujeción de diámetro exterior D y diámetro interior S.

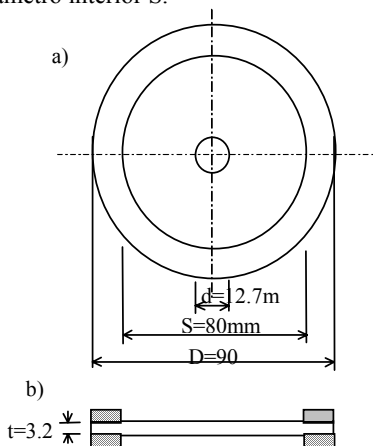


Figura n° 3: Esquema del disco analizado. a) Planta, b) corte

La zona de impacto corresponde al círculo de diámetro d.

Debido a la simetría se realizó la discretización espacial de un cuarto de círculo, con una

dimensión del elemento cúbico  $L_{co}=1.0666$  mm., con 38 módulos en el radio y 3 módulos en el espesor.

Se simularon numéricamente los ensayos identificados en tabla n°1 como II, III y IV

## 5 COMPARACION DE RESULTADOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los distintos casos analizados y se los compara con los datos experimentales publicados por Fasce [2002].

En la tabla n° 2 se presentan los valores de las propiedades mecánicas utilizadas en el proceso de calibración de los distintos modelos, así como el intervalo de tiempo utilizado en el análisis.

Tabla n° 2: Propiedades mecánicas correspondientes a los distintos materiales estudiados.

Material	Módulo de elasticidad E (Gpa)	Energía específica de Fractura Gc (N/mm)	Factor de falla Rfc	Tensión Fluencia $\sigma_F$ (Mpa)	Intervalo de tiempo $\Delta t$ (seg)
PP+10%wtPOES	1.55	33.70	4.440	33.16	4e-7
PP+20%wtPOES	1.30	198.00	1.086	18.00	4e-7
PP+30%wtPOES	1.06	163.80	1.100	15.00	4e-7

En la figura n° 4 se muestra la curva fuerza [N] versus tiempo [mseg] para el ensayo n° 2 correspondiente al material PP + 10%wtPOEs.

Las figuras n° 5, y n° 6 muestran las curvas fuerza [N] versus tiempo [mseg] para los ensayos n° 3 y 4 que corresponden respectivamente a las mezclas PP+20%wtPOEs y PP+30%wtPOEs.

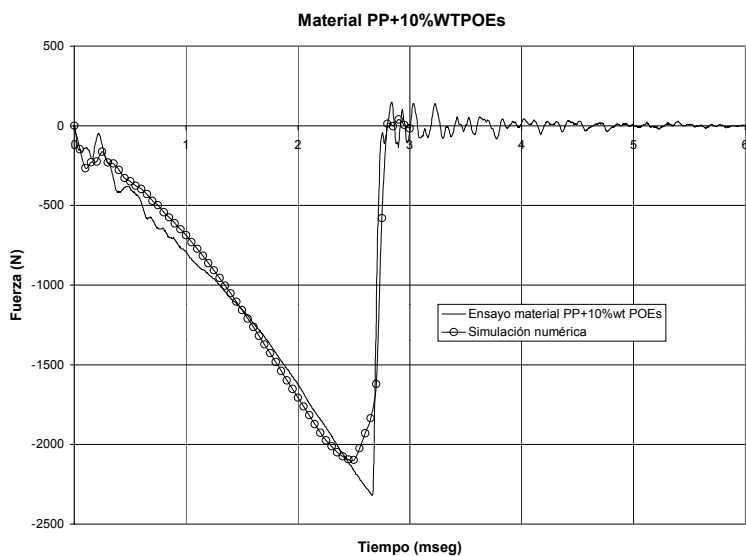


Figura nº 4: Comparación de resultados numéricos y experimentales para el ensayo nº 2

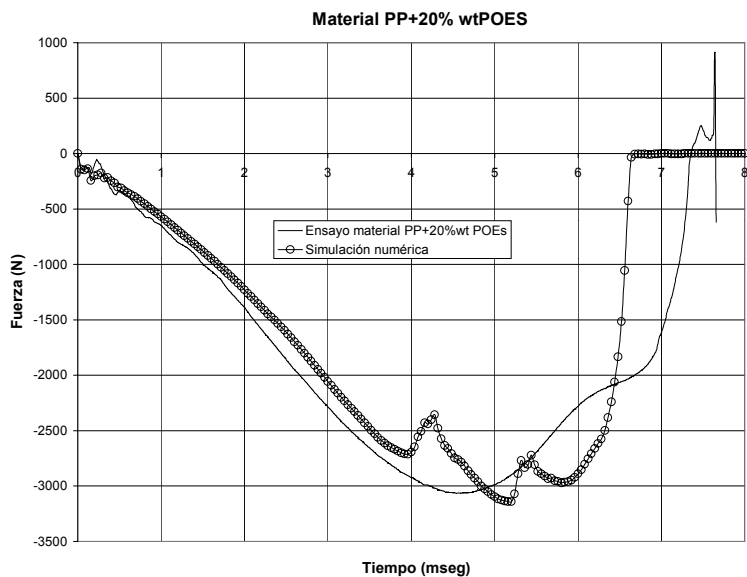


Figura nº5: Comparación de resultados numéricos y experimentales para el ensayo nº 3

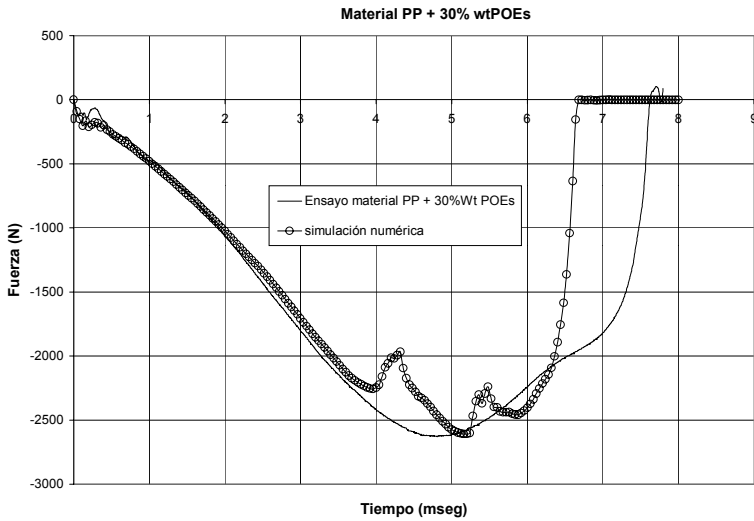


Figura n°6: Comparación de resultados numéricos y experimentales para el ensayo n° 4

Las figuras números 7,8, y 9 muestran el balance energético correspondiente a los distintos casos analizados.

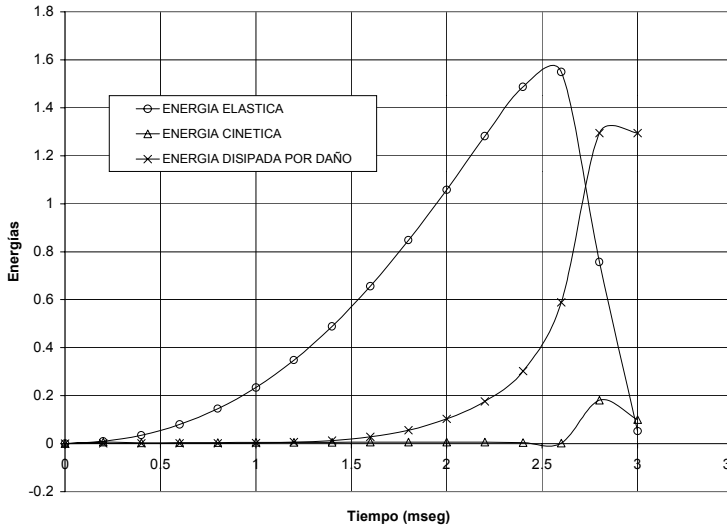


Figura n° 7: Balance energético para el material PP+10% wtPOEs



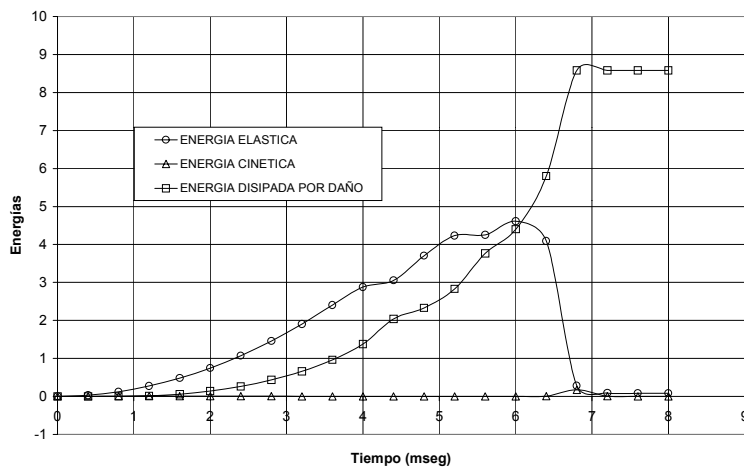


Figura n° 8: Balance energético para el material PP+20% wtPOEs

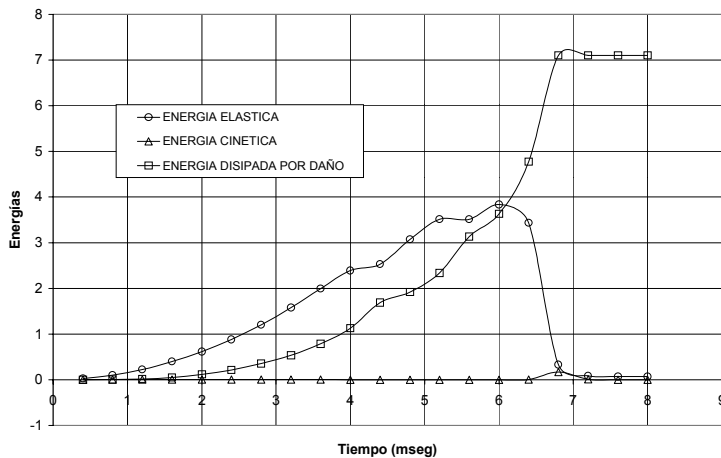


Figura n° 9: Balance energético para el material PP+30% wtPOEs

En la figura n° 10 se presentan fotografías de las configuraciones de ruptura obtenidas en ensayos.

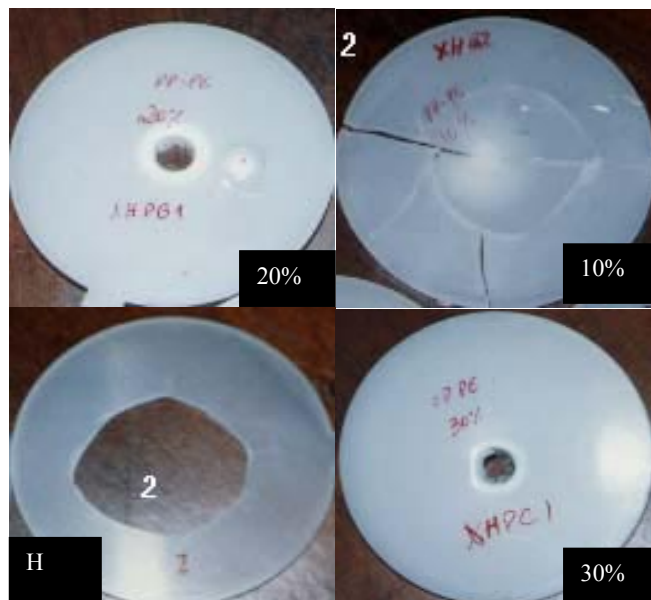


Figura nº 10: Configuraciones de ruptura obtenidas en los ensayos realizados por Fasce (2002)

Las figuras 11 a 17 muestran los patrones de ruptura obtenidos numéricamente con el método de los elementos discretos. En las mismas, por cuestiones de claridad, se han eliminado las barras diagonales. Las barras rotas se muestran en color naranja, las dañadas en color rojo.

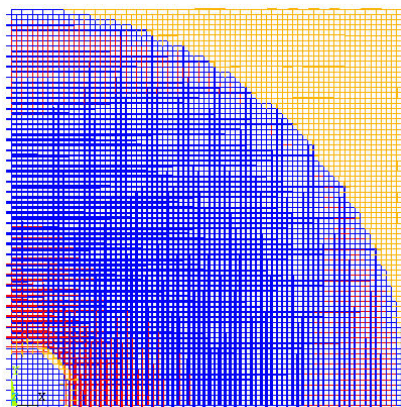


Figura n° 11: Configuración de ruptura para el material PP+10%wtPOEs (t= 3 mseg)

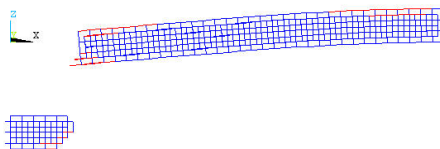


Figura n° 12: Vista lateral deformada para el material PP+10%wtPOEs. (t=3 mseg)

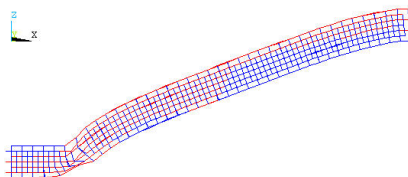


Figura n° 13: Vista lateral deformada para el material PP+20%wtPOEs. para t=4 mseg

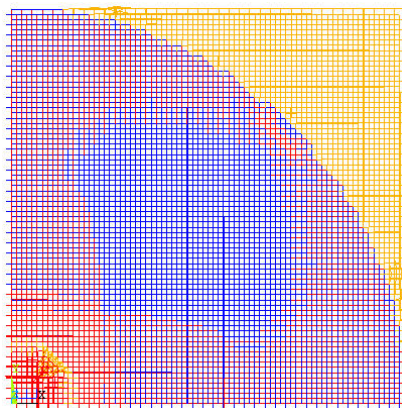


Figura n° 14: Configuración de ruptura para el material PP+20%wtPOEs. (t=8 mseg)



Figura nº 15: Vista lateral deformada para el material PP+20%wtPOEs. ( $t=8$  mseg)

En la figura anterior, se observa que para un tiempo de 8 mseg, la placa ha vuelto a su posición original, y la zona arrancada por el impactador continúa desplazándose hacia abajo.

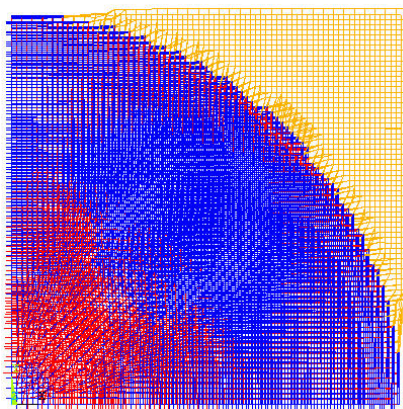


Figura nº 16: Configuración de ruptura para el material PP+30%wtPOEs. ( $t=5.6$  mseg)

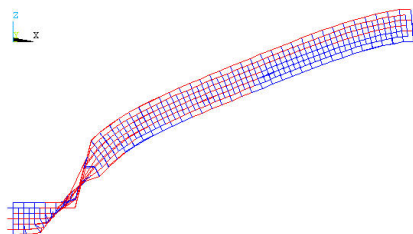


Figura nº 17: Vista lateral deformada para el material PP+30%wtPOEs. para  $t=5.6$  mseg

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el modelado numérico de ensayos experimentales efectuados por Fasce(2002) sobre discos de plástico sometidos a cargas de impacto para diferentes porcentajes de mezclas. Para realizar el modelo teórico se utilizó el método de los elementos discretos, y este estudio permitió obtener las siguientes conclusiones:

En algunos casos fueron encontradas algunas distorsiones en las propiedades mecánicas que fue necesario adoptar en el modelo numérico. Este tema debe ser estudiado con mas detalle.

En todos los casos analizados fue posible observar una muy buena correlación entre el patrón de ruptura real y el obtenido numéricamente.

La información obtenida a través del balance energético permite ver como el impulso externo entregado al sistema en análisis es distribuido y disipado durante todo el proceso permitiendo una cuantificación de ventajas o desventajas de las diferentes mezclas ensayadas.

Un estudio paramétrico está siendo realizado para tener un mayor dominio de la relación entre las propiedades disponibles del material y las necesarias para alimentar el programa numérico.

## 7 REFERENCIAS

- [1] ASTM D 3763 – 00 (2000) “Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors”.
- [2] Zhong Z, H. “Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems, Oxford University Press (1993) (pp333).
- [3] Knight N., F., et. al., “Penetration simulation for uncotained engine debris impacton fuselage-like panels using LS-DYNA,Finite element in analyses and design 36(2000)pp99-133.
- [4] Riera, J.D. and Iturrioz, I.,1998, "Discrete element model for evaluating impact and impulsive response of reinforced concrete plates and shells subjected to impulsive loading", *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 179, 135-144.
- [5] Riera, J.D. and Iturrioz, I. (1995): "Discrete element dynamic response of elastoplastic shells subjected to impulsive loading", *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 11, 417-426.
- [6] Rocha, M.M., 1989, “Ruptura e efeito de escala em materiais não homogêneos de comportamento frágil”. Porto Alegre, 123 p. Dissertação (Mestrado), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [7] Rocha, M.M & Riera, J.D.: (1990) “On size effects and rupture in non-homogeneous materials”, *Proceedings, Congress on Fracture Processes in Concrete, Rock and*

- Ceramics*, J.M. Van Mier; J.G. Rots & A. Baker (Eds), Chapman & Hall/ Ed. Fn Spon, London, 451-460.
- [8] Iturrioz, I. Riera, J.D. Numerical study of the effect of explosive sources near the ground surface: crater formation. Smirt 16. (2001).
- [9] Spellmeyer, T., Barrios D'Ambra, R., Iturrioz, I. "Simulación numérica de la propagación de fisuras en sólidos utilizando el método dde los elementos discretos". ENIEF 01 (Duodécimo Congreso de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones) Córdoba, Argentina, Noviembre 2001.
- [10] Fasce, Laura A. 2002. "Comportamiento mecánico de polipropileno modificado con una poliolefina elastomérica". Tesis doctoral, INTEMA, UNMdP, Agosto 2002.