

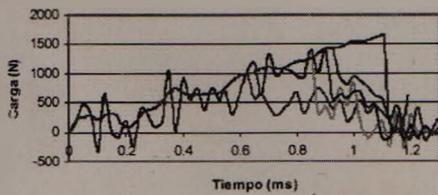
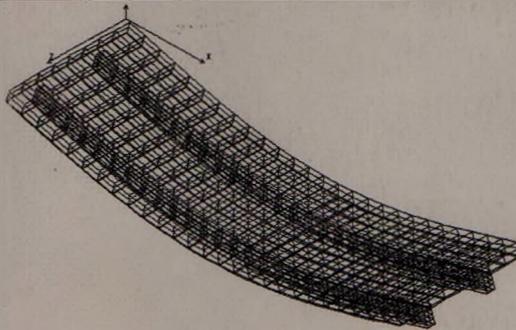


Universidad Nacional del Nordeste
Facultad de Ingeniería
U.N.N.E. – Resistencia - Chaco
10 al 12 de Noviembre de 2004

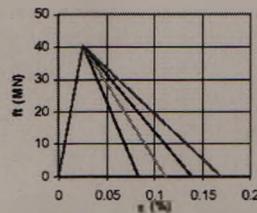


Contour Plot of NODAL V. MISES
Deformation (MID): DISPLACEMENT of LOAD ANALYSIS, step 1.

**2^{DA} JORNADA
DE
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA
PARA
INGENIERÍA
2004**



— Cf = 2160 N/m — Cf = 3240 N/m — Cf = 5400 N/m
— Cf = 4250 N/m (DF) — Ens. Laboratorio



— Cf = 2160 — Cf = 3240
— Cf = 5400 — Cf = 4250

“Estudio Paramétrico y Calibración del Método de los Elementos Discretos sobre un Material Polimérico Utilizando un Ensayo de Tracción Estático”

- *Autores:* Kostaschi Luis E., Barrios D’Ambra Ricardo, Iturrioz Ignacio.

- *Lugar de trabajo donde se desarrolla la actividad:*

Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNNE.

Av. Las Heras 727 - (3500) Resistencia - Chaco - Argentina.

Tel./Fax: +54 (03722) 425064 int. 124

E-mail: luiskosteski@hotmail.com, rbarrios@ing.unne.edu.ar

- *Antecedentes:*

La simulación numérica del comportamiento mecánico de materiales poliméricos es hoy en día una herramienta que puede ser utilizada para comprender mejor los mecanismos por los cuales este tipo de materiales llega al colapso, y de esta forma aprovechar mejor la información obtenida a través de ensayos experimentales. El comportamiento mecánico de polímeros es muy sensible a factores como temperatura, velocidad de deformación y composición química entre otras, siendo alterados fácilmente con la metodología de fabricación. Esta característica introduce considerables complicaciones en su estudio. Grandes esfuerzos se están realizando actualmente para mejorar las propiedades de plásticos combinando varios materiales, siendo este un campo vastísimo para nuevas investigaciones, donde la simulación numérica tiene un papel protagónico.

- *Materiales y Métodos:*

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

El arreglo cúbico de la Fig. 1 muestra un módulo con ocho nodos en sus vértices más un nodo central. Cada nodo posee tres grados de libertad. Las masas son unidas 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 ortótropo con los ejes principales del material orientados en la dirección de los elementos longitudinales fue verificada por Hayashi [1].

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

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

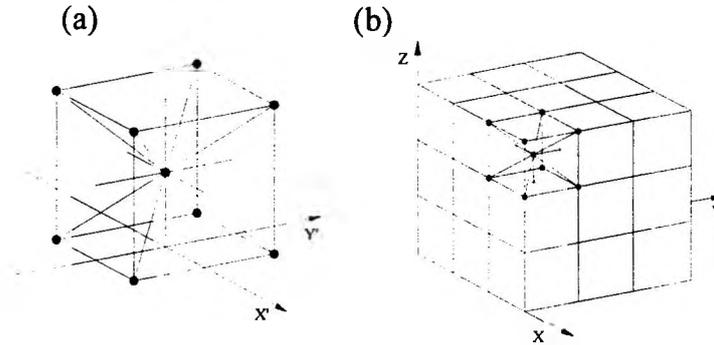


Figura 1. a) Módulo cúbico utilizado. b) Prisma compuesto por varios módulos cúbicos

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 $C = Df \times M$ 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 [2].

- **Ley constitutiva elemental para representar el comportamiento no lineal del material**

En 1989 Rocha propuso una ley constitutiva bilineal para los elementos, que permite capturar el comportamiento de materiales hasta la ruptura, la misma se presenta en Fig. 2.

La relación constitutiva de cada barra tiene la siguiente forma:

$$\text{Fuerza} = \text{función (deformación de la barra)} \quad (2)$$

En la figura, P_{cr} representa la fuerza máxima de tracción transmitida por la barra, ϵ_p es la deformación asociada a P_{cr} , E_A es la rigidez de las barras del modelo de reticulado y

k_r es la ductilidad, parámetro que permite calcular la deformación para la cual la barra no transmite más esfuerzos de tracción, ϵ_r

La deformación límite ϵ_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.

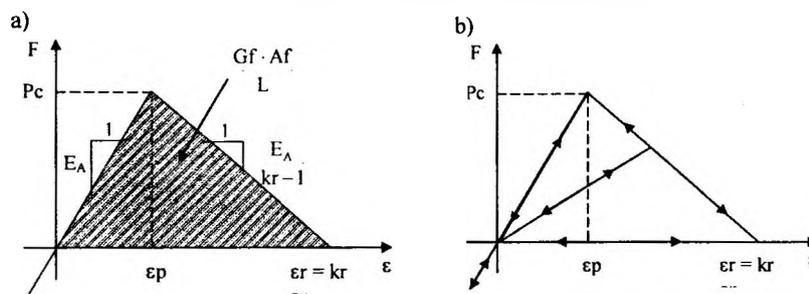


Figura 2. Relación Constitutiva Elemental de las barras del reticulado – a) Diagrama constitutivo adoptado con sus parámetros de control; b) Esquema para la carga y descarga. Rocha[3].

Es importante destacar que P_c , ϵ_p , ϵ_r , G_f , y R_f son propiedades exclusivas del material, A_f y L_c son propiedades exclusivas del modelo, los parámetros E_A y k_r dependen tanto del modelo como del material.

Considerando que el material en estudio tiene comportamiento frágil, puede ser aplicada la mecánica lineal de fractura. El método de los elementos discretos ha sido aplicado con suceso en el estudio de materiales susceptibles de fracturar, donde la hipótesis de medio continuo, base de los métodos numéricos tradicionales (elementos finitos y de contorno) es violada.

Con el fin de calibrar el modelo numérico en función de los resultados obtenidos por Barrios D'Ambra et. al. [4], se realiza con el MED un estudio paramétrico del ensayo de tracción, en el cual se variaron los valores de ϵ_p y G_c , las respuestas analizadas para realizar el estudio paramétrico fueron a) la forma del diagrama tensión deformación, b) la tensión y deformación de fluencia del material (σ_f y ϵ_f) y c) la tensión y deformación de ruptura (σ_R y ϵ_R). Las dimensiones y forma del cuerpo de prueba se encuentran en la figura 3. Para la velocidad de aplicación de la carga se estableció un valor de 1 m/seg, velocidad suficientemente baja para no producir efectos inerciales considerables durante la simulación.

- *Discusión de Resultados:*

Para evitar efectos de borde en la zona de aplicación de la carga, se aumentó la sección transversal en los extremos de la placa (sección de las mordazas en el ensayo experimental). La forma del cuerpo de prueba está indicada por las barras celestes de la figura 3.

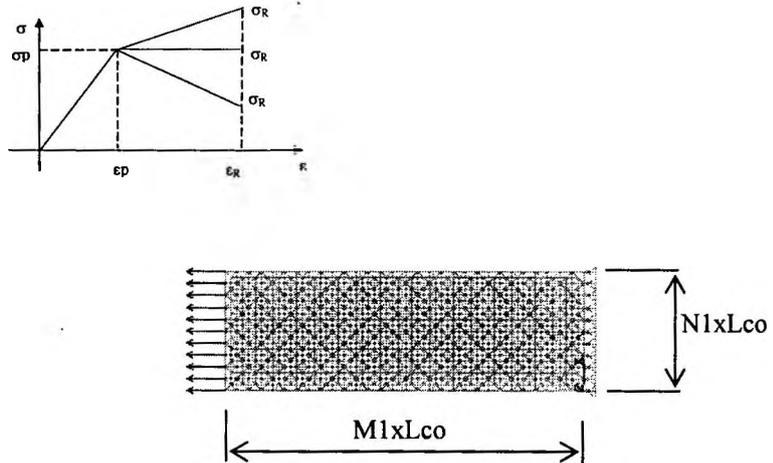


Figura 3 – Parámetros de estudio y Discretización de barra sometida a tracción para $Lc = 6.4E-04m$; $N1= 8$, $M1= 24$, $L1=3$.

En la Tabla 1 se indican las propiedades mecánicas del material analizado. Las que fueron obtenidas a partir de un ensayo de tracción estático.

Tabla 1 – Propiedades mecánicas del material PPH según Fasce [5].

Material	E(estático) N/m ²	E(dinámico) N/m ²	Gf N/m	Densidad Kg/m ³	σ_F MN/m ²	σ_R
PPH	1.61E+09	2.10E+09	1080	908	37.14	10%

PPH = Homopolímero de polipropileno (Cuyolem NX1100)

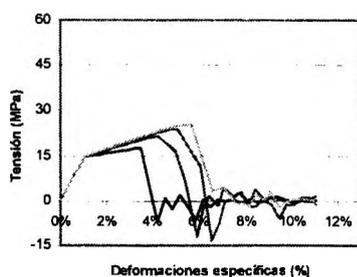
En la Tabla 2 se indican los distintos valores adoptados para la tenacidad, G_f , para valores de ϵ_p constantes en cada serie de simulaciones, así como los demás parámetros utilizados en la relación constitutiva elemental (RCE), considerando para todos los casos $Lco = 6,4 E-04 m$, $E = 1,61 E+09 N/m^2$, $\Delta t = 2,50 E-07 seg$. Se presentan también en la misma tabla los valores globales obtenidos en las simulaciones realizadas.

Tabla 2 – Modelos adoptados para el ensayo de tracción con el MED.

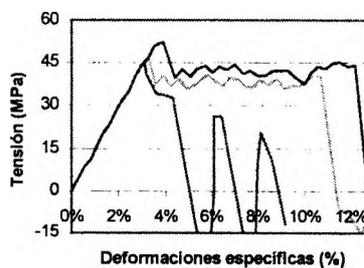
Modelo	Gf (N/m)	Rfc	Lcr	Kr	ϵ_p	Valores Globales			
						ϵ_f	ϵ_R	σ_f (MPa)	σ_R (MPa)
A1	1080	11.8	0.005	7.26	0.01	0.011	0.035	15,0	17,5
A2	2160	8.36	0.009	14.52	0.01	0.011	0.043	15,0	21,6
A3	3240	6.83	0.014	21.78	0.01	0.011	0.051	15,0	24,0
A4	4320	5.91	0.019	29.03	0.01	0.011	0.057	15,0	25,5
B1	1080	29.6	0.001	1.16	0.025	0.019	0.032	28,0	22,6
B2	2160	20.9	0.001	2.32	0.025	0.024	0.078	32,3	28,1
B3	3240	17.1	0.002	3.48	0.025	0.027	0.096	36,1	33,7
B4	4320	14.8	0.003	4.65	0.025	0.027	0.104	37,2	38,8
C2	2160	25.1	0.001	1.61	0.03	0.024	0.042	34,9	26,4
C3	3240	20.5	0.002	2.42	0.03	0.029	0.094	39,6	34,1
C4	4320	17.7	0.002	3.23	0.03	0.029	0.111	42,0	39,8
C5	5400	15.9	0.003	4.03	0.03	0.032	0.120	44,5	44,4
D3	3240	27.3	0.001	1.36	0.04	0.030	0.043	44,2	32,7
D4	4320	23.6	0.001	1.81	0.04	0.033	0.107	46,7	40,2
D5	5400	21.1	0.001	2.27	0.04	0.039	0.122	52,2	44,0

La figura 4 presenta la influencia de la tenacidad, Gf, en la forma de la relación tensión deformación global y elemental para valores de ϵ_p constantes en cada serie.

En la figura 5 se presenta la forma en que varía la relación tensión deformación del modelo global y de la RCE con ϵ_p , para un valor de Gf constante.



$\epsilon_p = 0.01$. Modelos A



$\epsilon_p = 0.04$. Modelos D

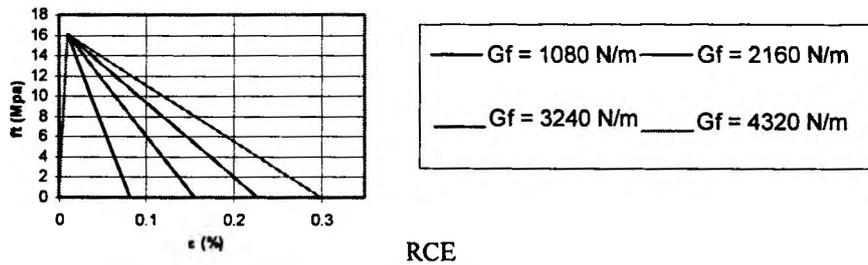
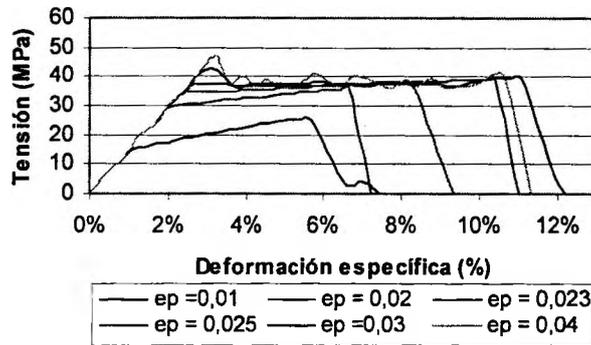
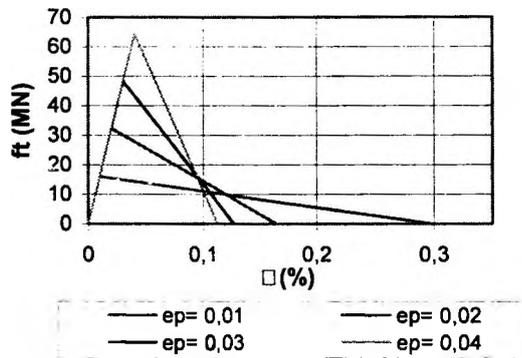


Figura 4 – Influencia de la tenacidad en los ensayos a tracción

En la tabla 3 se resumen los parámetros adoptados, para el modelo considerado como patrón. La figura 6 a) muestra la configuración final (vista de frente y lateral) de la placa correspondiente al modelo Patrón, en la misma se muestra las barras sanas en celeste y las dañadas en rojo, las barras rotas se han eliminado para facilitar la visualización. En los ítems b), c) y d) se muestra la configuración final de otros modelos realizados.



a) Relación constitutiva global



b) RCE Modelos con $G_f = 4320 \text{ N/m}$ y ϵ_p variable
Figura 5 – Influencia de la tenacidad en la simulación del ensayo a tracción.

Tabla 3 – Modelo adoptado con $L_{co} = 6,40E-04 \text{ m}$ y $E = 1,61 \text{ E}+09 \text{ N/m}^2$.

Modelo	G_f N/m	Rfc	K_r	DeltaT crit. seg.	Delta T seg.
P	4250	14.90	4.57	2.88E-07	2.50E-07

ϵ_p	ϵ_f	ϵ_R	σ_f MPa	σ_R MPa
0.025	2.69E-02	1.04E-01	37.22	38.77

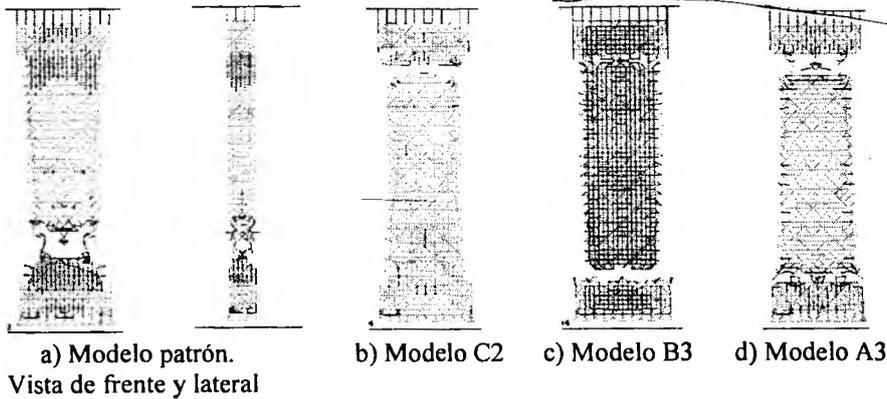


Figura 6 – Configuración final de placa sometida a tracción para $L_c = 6.4E-04\text{m}$, (los elementos fracturados fueron extraídos para facilitar la visualización).

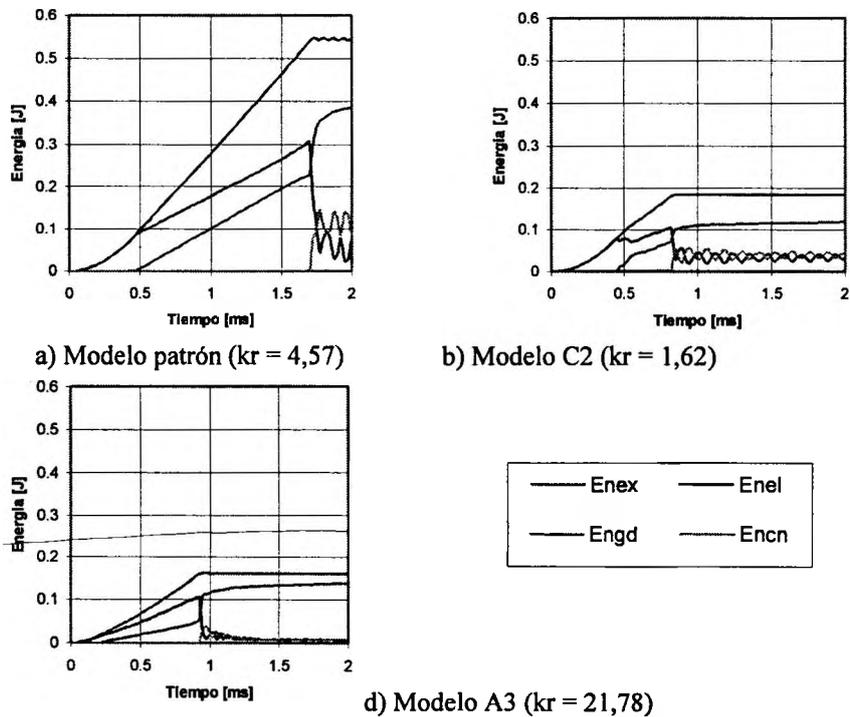


Figura 8 – Balance energético del modelo patrón. Dónde ENEL, ENCN, ENGD y ENEX representan respectivamente las energías elástica, cinética, disipada por daño y energía externa.

- *Conclusiones:*

- Como el módulo de elasticidad permaneció constante la tensión de fluencia estará definida por el valor de ϵ_p , esto quedó claramente visualizado en la figura 4.
- Al ir variando los valores de G_f manteniendo el ϵ_p constante se modifica el valor de kr (recordar que $\epsilon_r = kr \times \epsilon_p$ como se ilustra en figura 2), en la figura 5, es posible notar que cambios en el G_f , para ϵ_p constante, producen modificaciones significativas en la forma de la curva global de tensión deformación.
- El comportamiento esperado para el cuerpo de prueba de tracción se obtiene para valores de K_r entre 4.2 y 4.9.
- Cambios en las formas de las curvas (ver figura 4 y 5), están asociados a cambios en la forma en que el cuerpo de prueba rompe lo cual se visualiza claramente

observando las configuraciones de ruptura (figura 6) y en la composición del balance energético, que se ilustra en la figura 7.

- La forma del cuerpo de prueba si bien produjo que la ruptura no se produzca en los extremos de la probeta, en algunas de las configuraciones finales obtenidas fue posible observar que la ruptura se producía en la región de transición lo cual no es deseable porque implicaría que tenemos allí una concentración de tensiones.

- *Bibliografía.*

[1] Hayashi, Y., "Sobre um modelo de discretização de estruturas tridimensionais aplicado em dinâmica não linear". Porto Alegre. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (1982).

[2] Riera, J.D. and Iturrioz, I., "Discrete element dynamic response of elastoplastic shells subjected to impulsive loading". Communications in Numerical Methods in Engineering. Vol. 11. pp 417-426. (1995).

[3] Rocha, M.M., "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. (1989).

[4] Barrios D'Ambra, Ricardo., Iturrioz, Ignacio., Fasce, Laura A., Frontini, Patricia M., Cisilino, Adrián P., "Simulación numérica del ensayo de impacto en probetas de polímeros utilizando el método de los elementos discretos", Cilamce 2003. (2003).

[5] Fasce, Laura A. 2002. "Comportamiento mecánico de polipropileno modificado con una poliolefina elastomérica". Tesis doctoral. INTEMA. UNMdP. (2002).