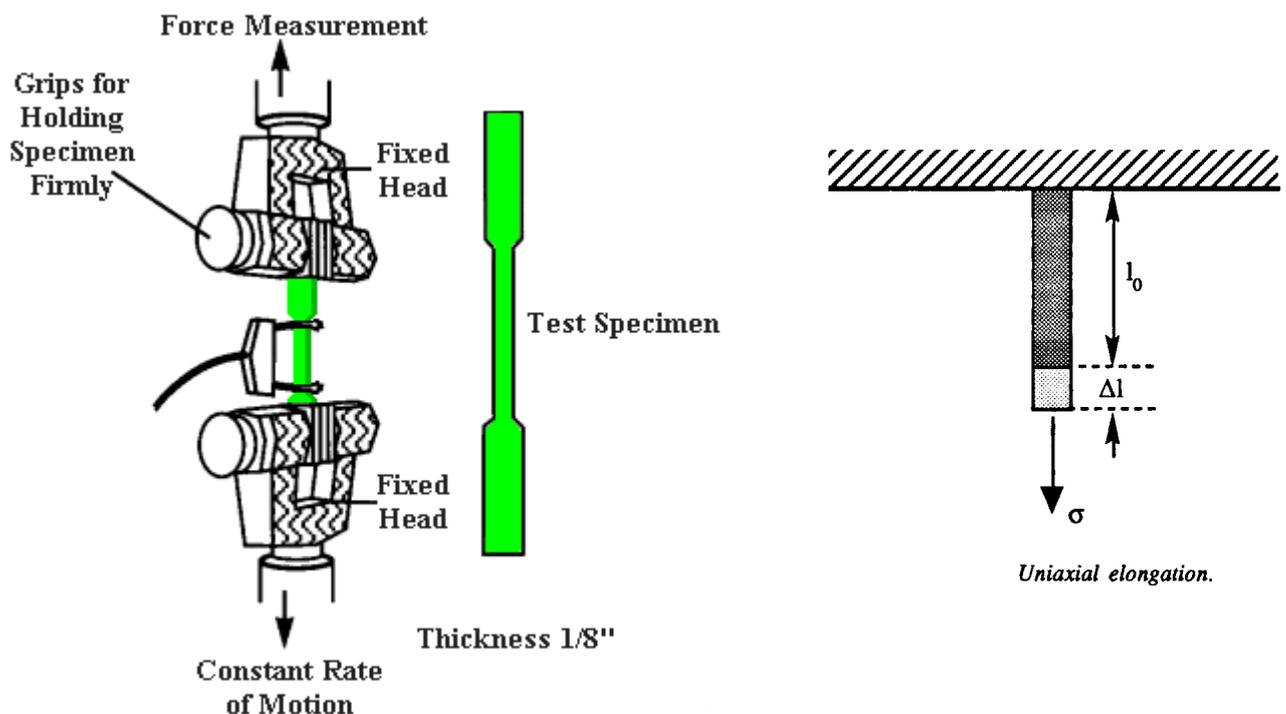


9) ENSAYOS de TENSIÓN/ DEFORMACIÓN a VELOCIDAD de DEFORMACIÓN CONSTANTE

1) Ensayo de Tracción–Elongación

Para el análisis de sólidos, el ensayo más común es el de Tracción-Elongación (o Ensayo Tensil).

La probeta se estira a $\dot{\epsilon}$ constante hasta la rotura y se mide la fuerza necesaria para lograr dicho estiramiento. El ensayo supone disponer de una potencia infinita.

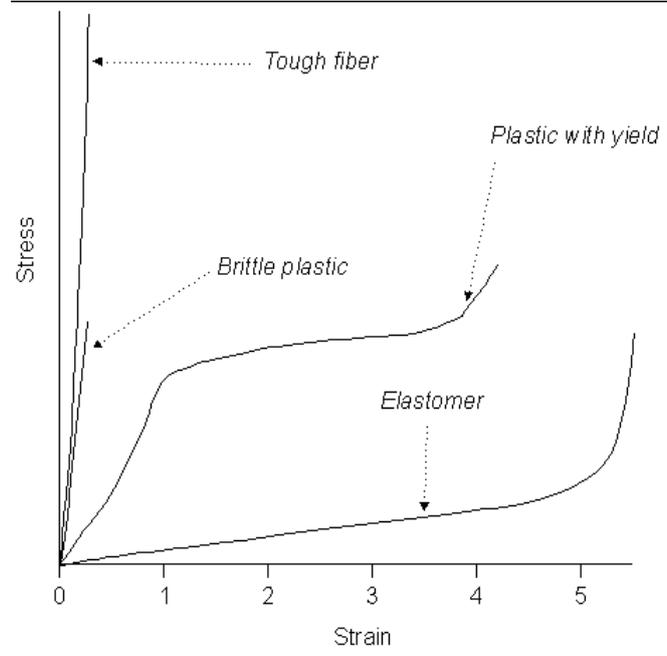


Si bien el ensayo caracteriza al material analizado, el resultado depende de varios factores como: a) la velocidad de estiramiento, b) la temperatura, y c) la historia térmica previa de la probeta.

El ensayo tensil es simple y permite investigar los mecanismos de fallas y roturas. Pero como para ello se requieren altas tensiones y deformaciones, los resultados no resultan demasiado útiles para caracterizar el comportamiento del material viscoelástico en su uso normal, es decir bajo tensiones/ deformaciones lo suficientemente pequeñas como para evitar daños irreversibles en la probeta.

Representamos:

$$\text{Tensión ingenieril} \\ (\sigma = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área inicial}})$$



$$\text{Elongación } (\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0})$$

Rubber and Elastomer Tensile Strength Test - ASTM D412

<http://www.youtube.com/watch?v=9N5SS8f1auI>

Tensile Testing of HDPE

<http://www.youtube.com/watch?v=I28m4FZzqro>

Instron 5569 Seatbelt Tensile Test

<http://www.youtube.com/watch?v=bZKoDd8unPQ>

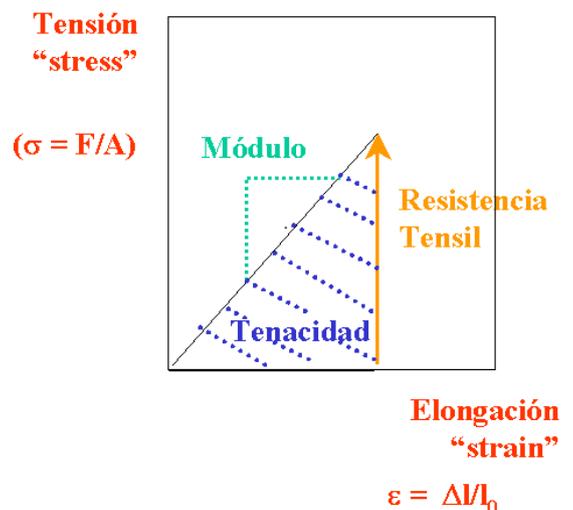
Sólido elástico ideal

Responde a la Ley de Hooke:

$$\sigma = E \epsilon$$

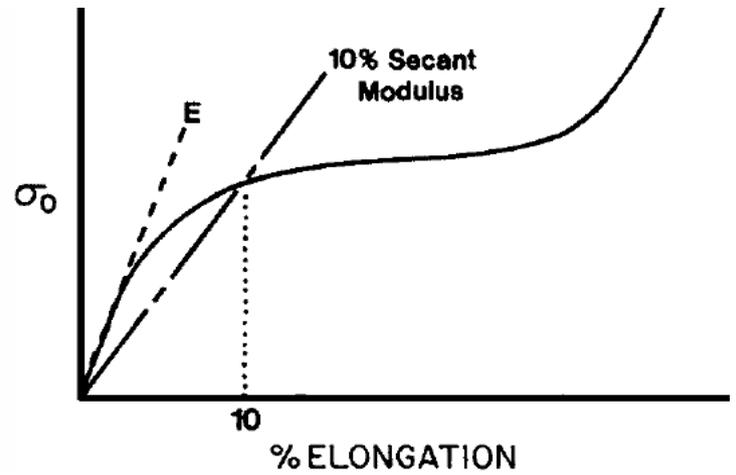
(E: Módulo de Young constante)

Y al eliminar la tensión, el material recupera su forma original en forma instantánea.



El módulo elástico real (E) corresponde a muy bajas tensiones-deformaciones.

Debido a los errores de medición a bajas tensiones, los módulos elásticos que proveen los equipos Instron son normalmente los valores secantes a elongación fija; p.ej. a $\epsilon = 0,1 = 10\%$.



Valores típicos del Módulo Elástico, la Resistencia Tensil y la Elongación en la Rotura

Unidades de Resistencia Tensil y Módulo:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 145 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \text{ (psi)}$$

Polymer Type	Tensile Modulus (GPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)
ABS	2.3	40	30
ABS + 30% Glass Fiber	9	60	2
Acetal Copolymer	2.7	60	45
Acetal Copolymer + 30% Glass Fiber	9.5	110	3
Acrylic	3.2	70	5
Nylon 6	1.8	70	90
Polyamide-Imide	4.5	110	6
Polycarbonate	2.6	70	100
Polyethylene, HDPE	0.8	15	500
Polyethylene Terephthalate (PET)	2.7	55	125
Polyimide	2.5	85	7
Polyimide + Glass Fiber	12	150	2
Polypropylene	1.9	40	100
Polystyrene	3	40	7

Table 3 Representative (approximate) values of Young's modulus [29, 36]

Material	Value of G
Glass	70 GPa
Aluminium, Copper and alloys	100 GPa
Steel	200 GPa
High modulus oriented fibers	>300 GPa
Concrete	10 – 20 GPa
Stones	40 – 60 GPa
Wood	1 – 10 GPa
Ice	10 GPa
Engineering Plastics	5 – 20 GPa
Leather	1 – 100 MPa
Rubber	0.1 – 5 MPa
Polymer and colloidal solutions	1 – 100 Pa
Dry spaghetti	3 GPa
Carrots	20 – 40 MPa
Pears	10 – 30 MPa
Potatoes	6 – 14 MPa
Peach	2 – 20 MPa
Raw apples	6 – 14 MPa
Gelatin Gel	0.2 MPa
Banana	0.8 – 3 MPa

Elastómeros

Si no se imponen deformaciones muy grandes, entonces los ensayos de tracción resultan reversibles; y generan un encuellamiento (o “necking”) uniforme a lo largo de la probeta.

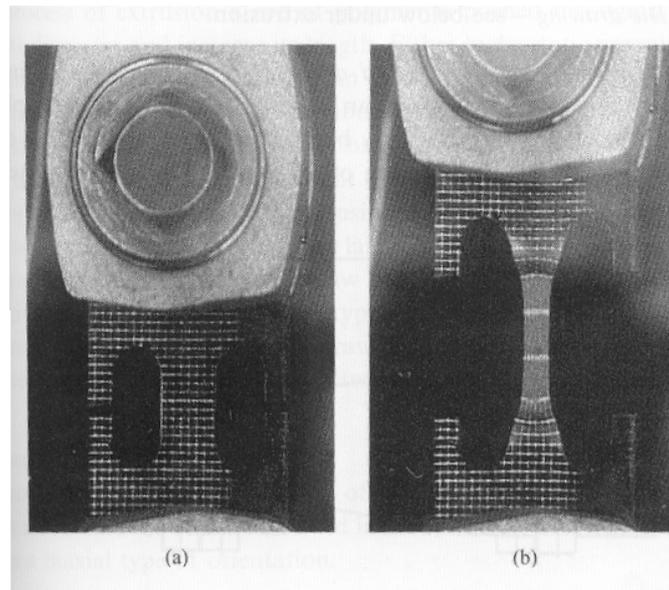
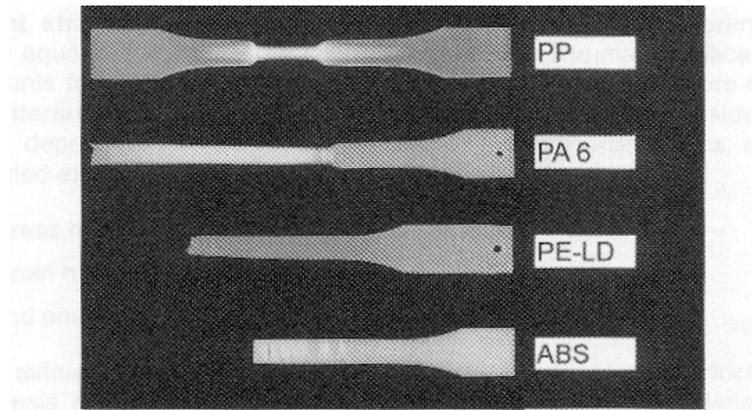


Fig. 10.2 The appearance of a sample undergoing necking when drawn: (a) the sample before drawing, with a reference grid of squares marked on it; and (b) after drawing. The central section has increased in length by a factor of about five, i.e. the draw ratio is 5. (Courtesy of Dr J. Sweeney and Dr P. Caton-Rose.)

Encuellamiento: reducción localizada del área transversal de una probeta bajo una carga de tracción. Se ignora al calcular el esfuerzo de ingeniería, pero se tiene en cuenta al determinar el esfuerzo verdadero.

Tipos de Fallas en Termoplásticos Semicristalinos y Amorfos:

- Plásticos semicristalinos (PP y Nylon 6): exhiben encuellamiento no uniforme antes de la rotura debido a la reorientación de los cristales.
- Plásticos amorfos (LDPE y ABS): no presentan encuellamiento.

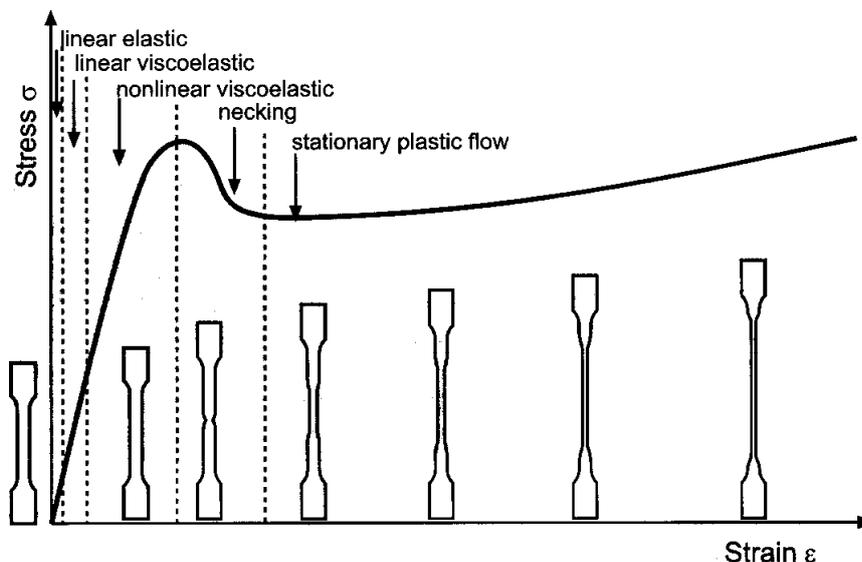


Failure of tensile test specimens

- high crystalline, isotactic polypropylene (PP)
- polyamide 6 (PA 6)
- low-density polyethylene (PE-LD)
- amorphous acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS)

Termoplástico semicristalino: “Necking” No Uniforme e Irreversible a $T_g < T < T_m$

El encuellamiento irreversible implica la falla irreversible del material.



Stress-strain curve of a semi-crystalline thermoplastic with a schematic representation of the development of the necked region

Nótese que la reducción de la tensión luego del máximo es un artificio matemático, que resulta de representar la tensión ingenieril en lugar de la tensión real (más alta) en el encuellamiento.

En el encuellamiento, ocurre una recristalización del material en la dirección del estiramiento (“cold drawing”). Se genera un material orientado (anisotrópico) que se opone a la rotura.

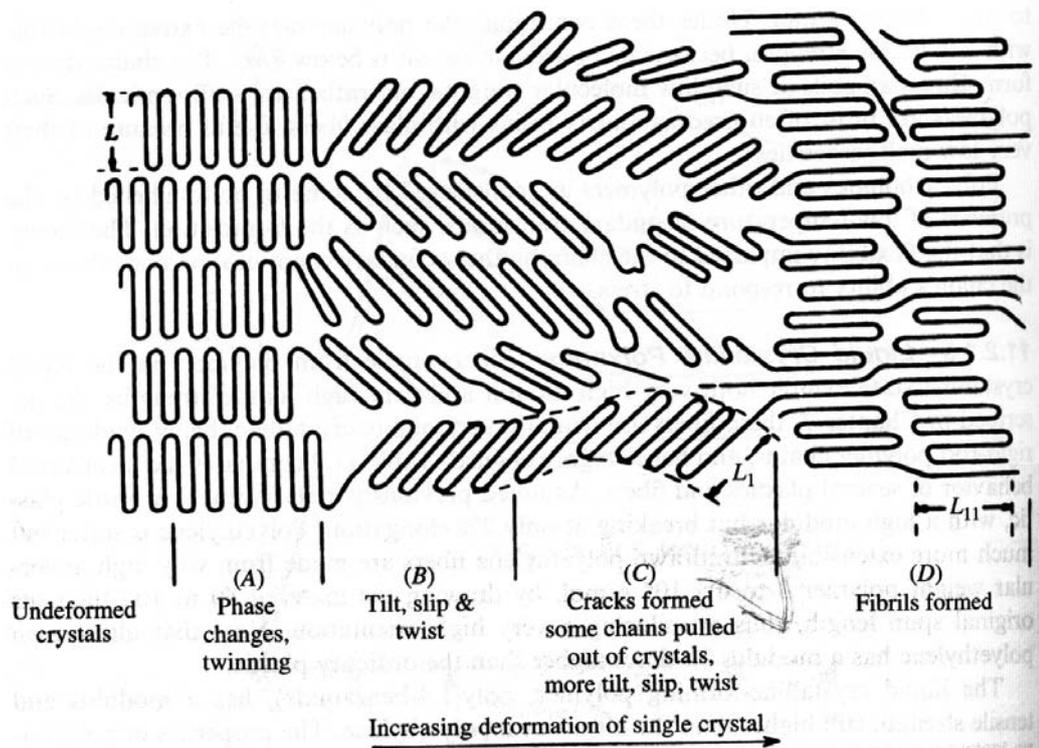


Figure 11.8 Proposed mechanism of reorientation of crystalline structures during necking (7).

Termoplásticos amorfos: Efectos de la Temperatura y de la Velocidad de Estiramiento

a) Efecto de T

El módulo elástico y las demás variables características cambian enormemente si por calentamiento nos acercamos a la T_g del sólido.

- PMMA a T entre 4 y 60 °C ($T_{g\text{PMMA}} \cong 105$ °C):

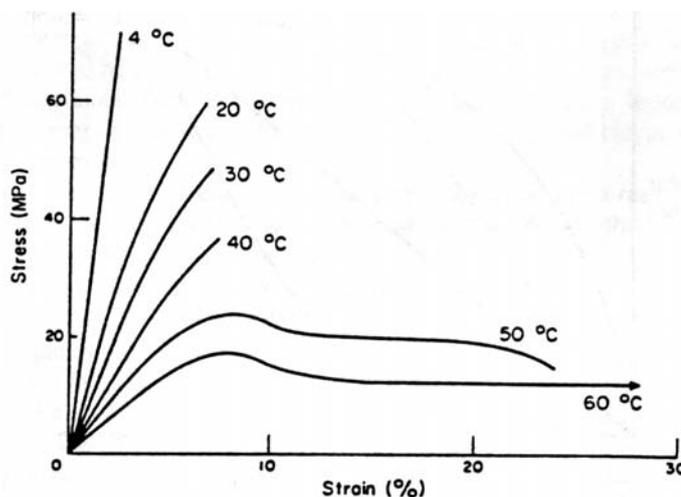
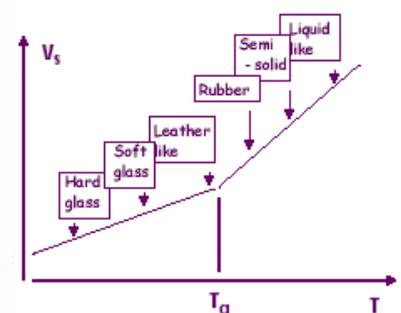


Figure 11.15 Stress-strain curves of a glassy polymer, poly(methyl methacrylate), as a function of temperature. Reproduced with permission from T. S. Carswell and H. K. Nason, Symposium on Plastics, American Society for Testing Materials, Philadelphia, (1944).



- Poliestireno de Alto Impacto (HIPS) ($T_{gPS} \cong 95^{\circ}\text{C}$)

Vel. de estir.: 2 mm/min. y
Barrido de T entre -40 y 80°C

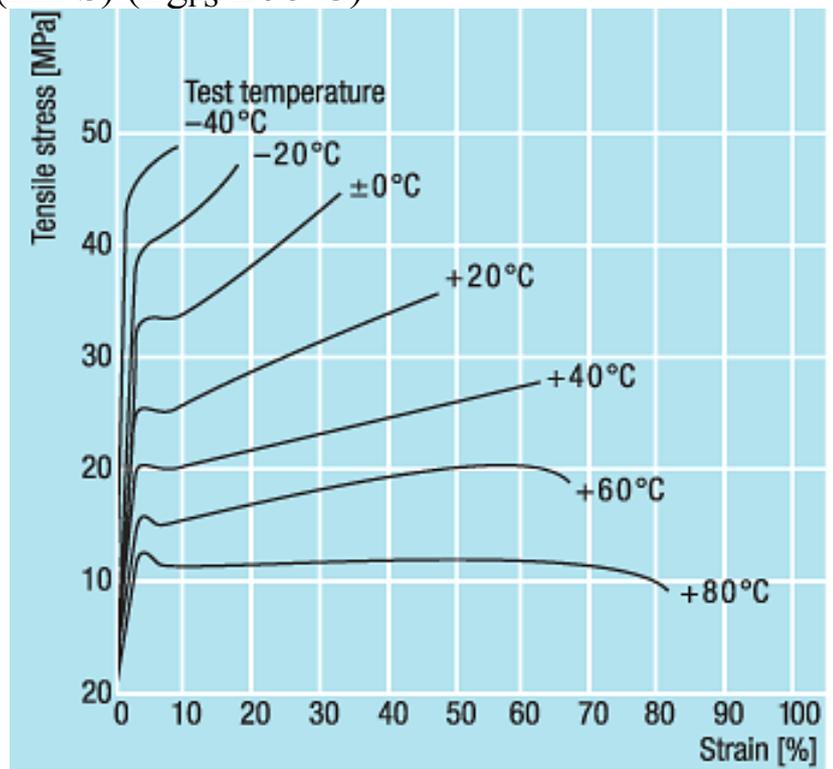


Fig. 4:
Stress-strain curves of high-impact Polystyrene at various test temperatures; strain rate = 2 mm/min, determined on injection-molded test specimens.

b) Efecto de la Velocidad de Estiramiento

- Poliestireno de Alto Impacto (HIPS) ($T_{gPS} \cong 95^{\circ}\text{C}$)
T = 20°C y
Barrido de Vel. de Estir. entre 0,1 y 500 mm/min.

A altas velocidades de estiramiento, el material no alcanza a relajarse, y luce como más rígido y quebradizo. Los menores tiempos de ensayos tienen efectos equivalentes a la reducción de la T a vel. estiramiento constante.

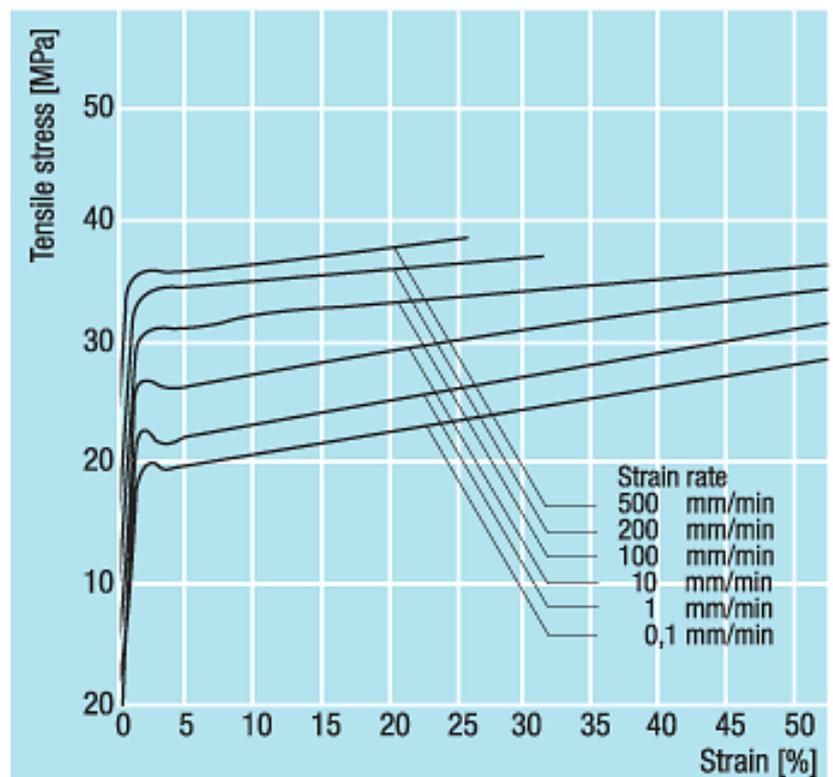
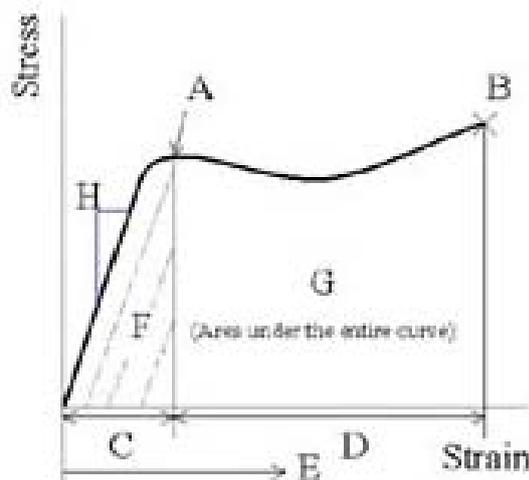
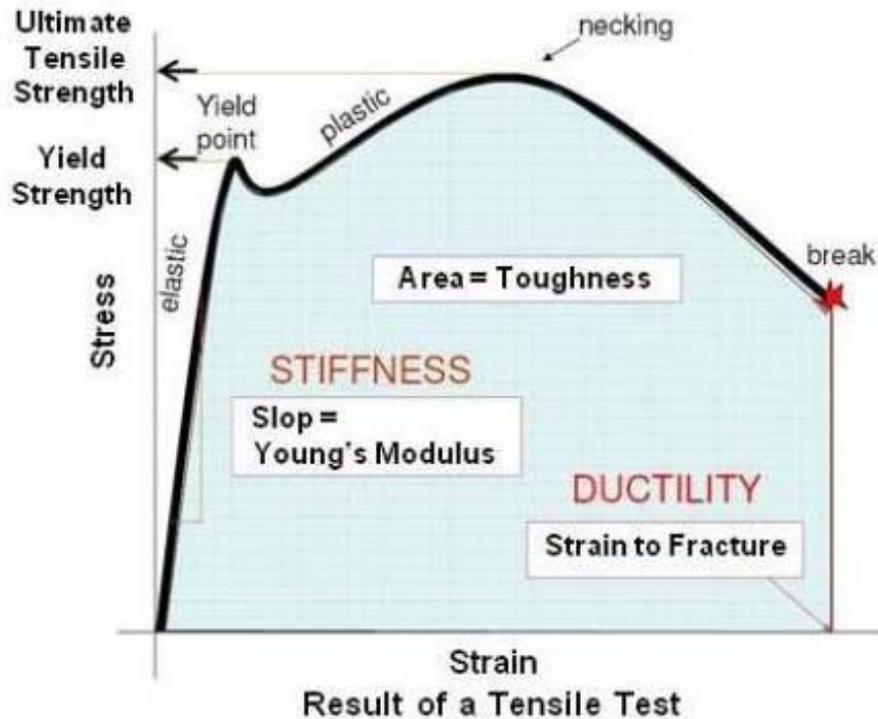


Fig. 5:
Stress-strain curves of high-impact Polystyrene at different strain rates. Determined on injection-molded test specimens.

Parámetros Característicos



- | | |
|--------------------|---------------------|
| (A) Yield Point | (B) Fracture Point |
| (C) Elastic Region | (D) Plastic Region |
| (E) Ductility | (F) Resilience |
| (G) Toughness | (H) Young's Modulus |

Dureza, Rigidez (“Stiffness”): Habilidad del material para soportar grandes esfuerzos sin grandes cambios en las dimensiones (medido por el Módulo Elástico a bajas deformaciones).

Elasticidad: Habilidad del material para sufrir deformaciones reversibles, sin generar deformación permanente luego de retirada la carga. Está determinada por el límite elástico.

Resistencia Tensil (“Tensile Strength”): máxima tensión que puede soportar un material.

Ductilidad: Medida de lo que puede estirarse un material antes de la rotura.

Tenacidad (“Toughness”): Habilidad del material para absorber energía y deformarse plásticamente sin fractura. Queda definida por la cantidad de energía por unidad de volumen que puede absorber un material antes de

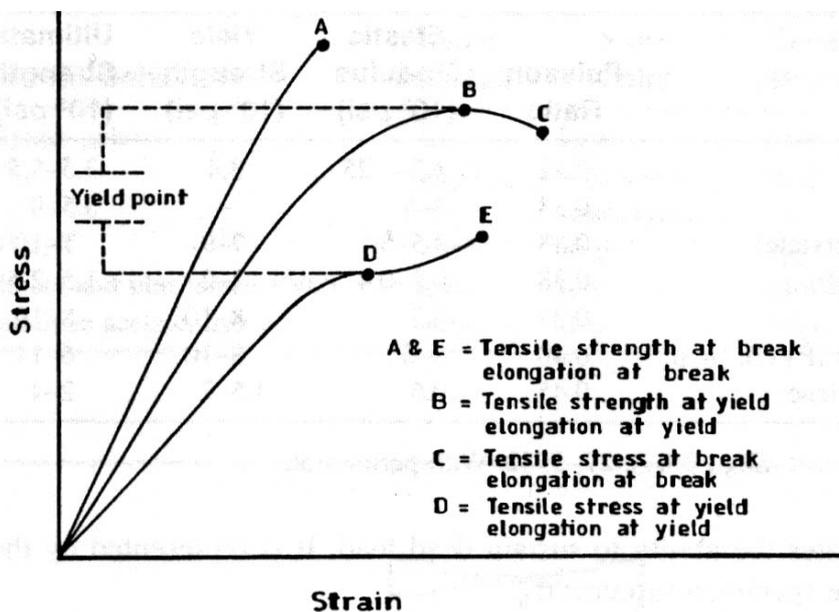
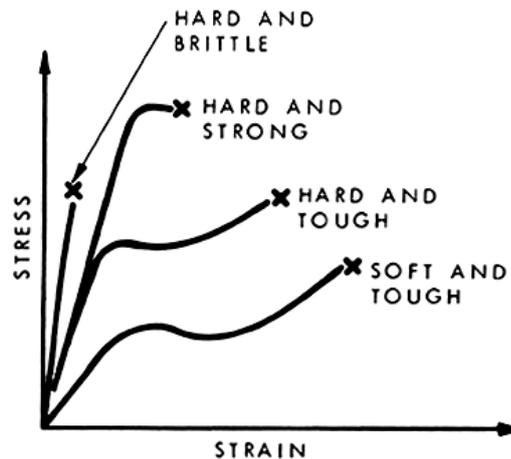
romperse. También, se relaciona a la tenacidad con la resistencia a la fractura. La tenacidad resulta de un balance entre una alta resistencia tensil y una alta ductilidad.

Cedencia o Fluencia (“Yield”): Proceso irreversible de deformación a tensión constante que determina la falla del material ante tensiones en general mucho mayores que las esperadas en el uso normal.

Resiliencia: Habilidad para absorber energía sin sufrir deformación permanente (medida por el área bajo la curva antes del “yield” irreversible).

Clasificación de Materiales según los parámetros del ensayo a la tracción

Módulo	Duro /rígido (“hard”) ↔ Blando (“soft”)	↑ con $\dot{\epsilon}$
Resist. Tensil	Fuerte (“strong”) ↔ Débil (“weak”)	↑ con $\dot{\epsilon}$
Tenacidad	Tenaz (“tough”) ↔ Quebradizo (“brittle”)	
Elong. a la rotura	Dúctil ↔ Quebradizo	↓ con $\dot{\epsilon}$



B, D: puntos de cedencia o “yield”.

La resistencia tensil se mide en:

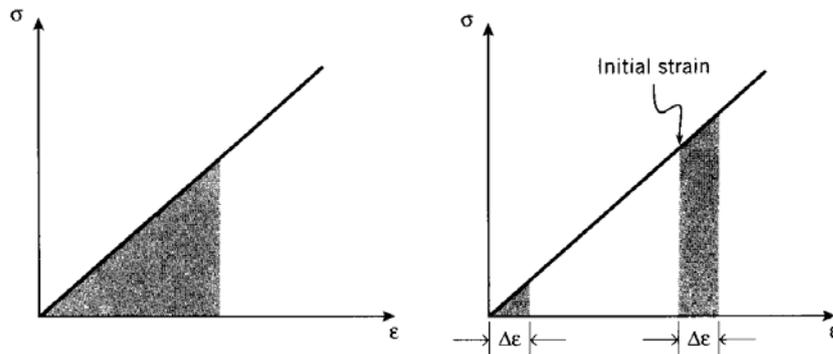
- A, E: puntos de rotura o “break”, y
- B: punto de “yield”.

Energía absorbida en ensayo de tracción

U^* : Energía mecánica total consumida por unidad de volumen de probeta.

$$U^* = \frac{1}{V} \int F dL = \int_0^L \frac{F}{A_0} \frac{dL}{L_0} = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon$$

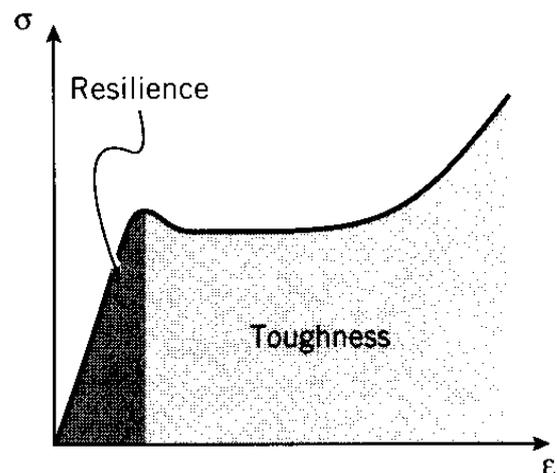
Si no hay disipación de energía por deslizamiento molecular irreversible, entonces el material almacena la energía recibida en forma reversible como energía de tensión.



Nótese que las energías elásticas almacenadas aumentan con el cuadrado de la tensión. El segundo gráfico ilustra porqué para lanzar flechas con arco, es conveniente que este se estire a partir del material ya curvado y tensionado.

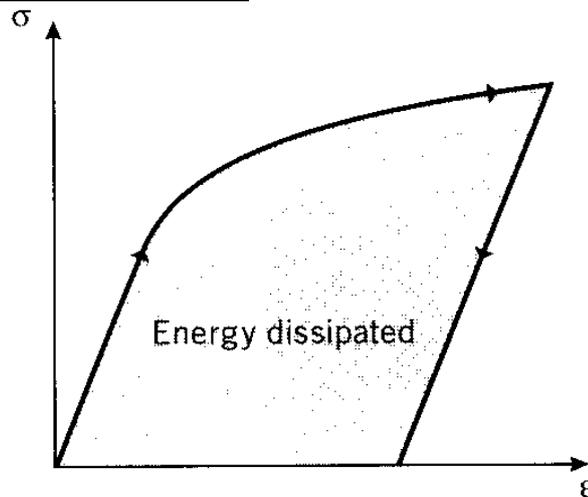
“Módulos” de Resiliencia y Tenacidad

- Módulo de resiliencia: área bajo la curva hasta el punto de “yield”. Indica la cantidad de energía/U. vol. que puede absorber el material sin sufrir daño.
- Módulo de tenacidad: área total hasta la fractura. Indica la cantidad de energía/U. vol. necesaria para romper el material.



El término “módulo” es confuso y no recomendable, pero se usa porque las unidades de energía de tensión por unidad de volumen (en N m/m^3) coinciden con las del módulo elástico (en N/m^2).

Si a un material viscoelástico se le elimina la tensión, este devolverá sólo una parte de la energía absorbida. La diferencia entre las energías absorbida y entregada se disipa en forma de calor.



Tenacidad y Resistencia al Impacto

La tenacidad se mide en el ensayo de Tracción-Elongación, y su valor depende de la velocidad de estiramiento.

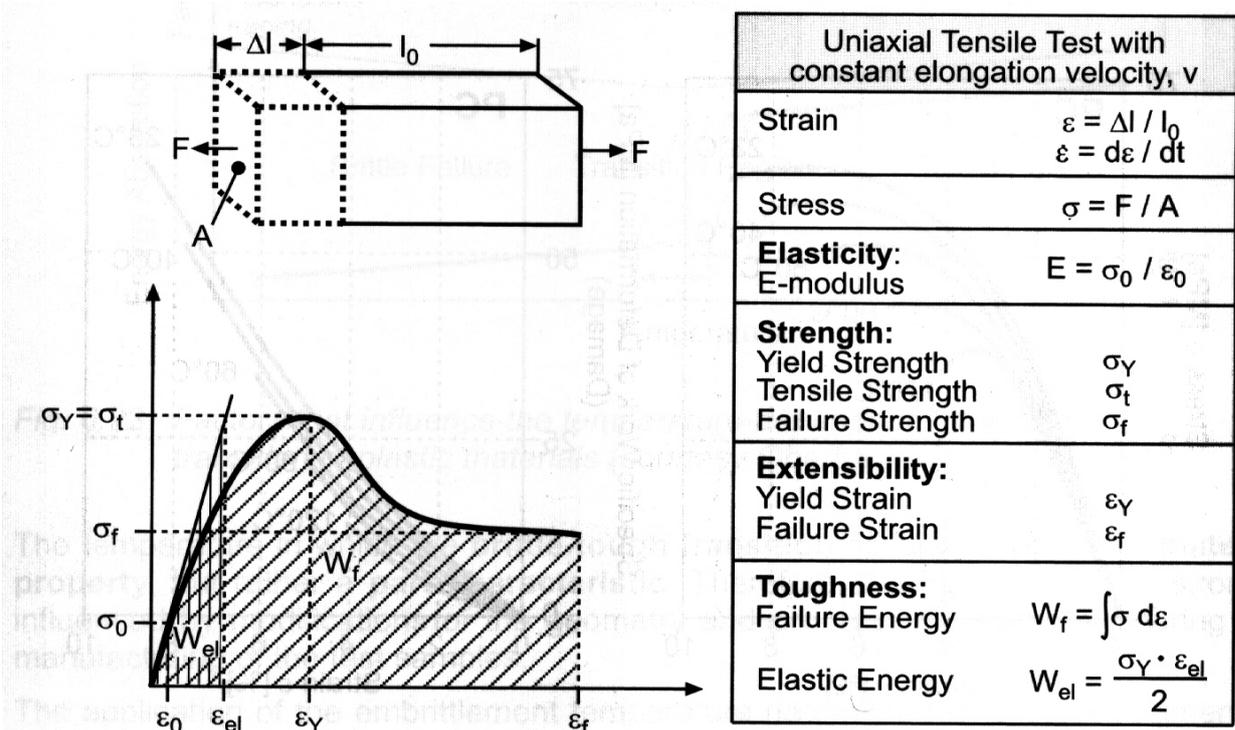


Fig. 6.20: Terms and characteristic values associated with the mechanical properties of plastics determined via tensile testing (courtesy Retting)

Los materiales muy tenaces también generalmente exhiben una buena resistencia al impacto.

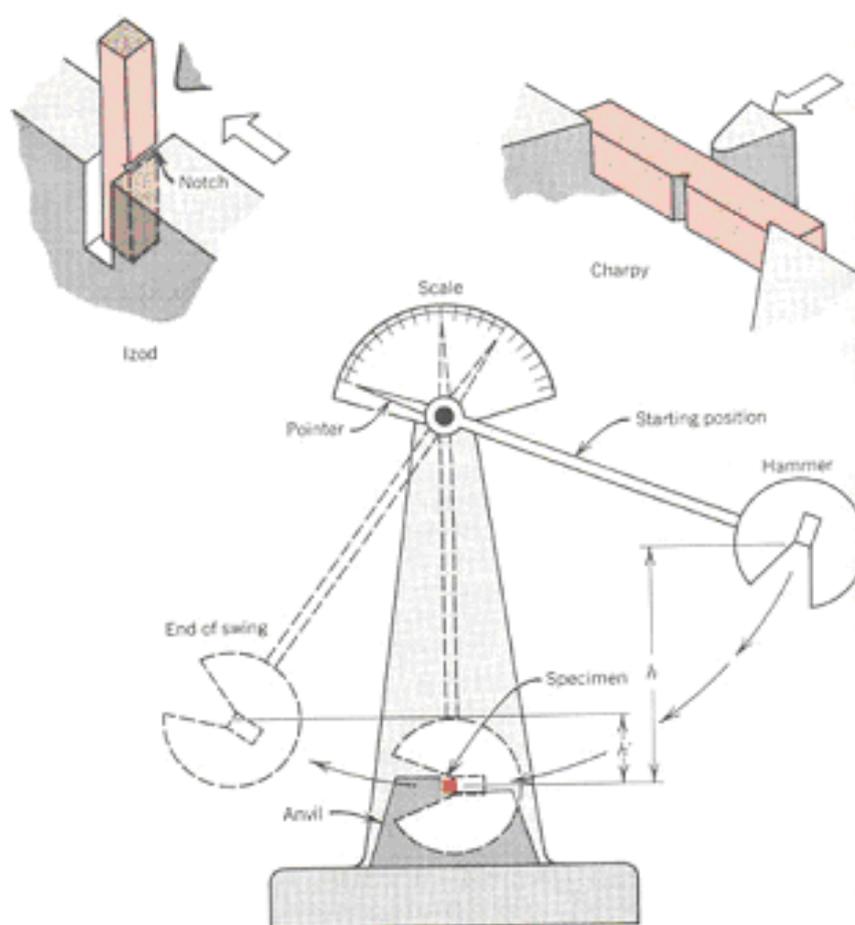
Resistencia al Impacto de Muestras con Entalladura

Mide la energía necesaria para romper una pieza en un ensayo casi instantáneo. Dichas energías se expresan normalmente en J/m^2 ; y miden la energía necesaria para crear una nueva superficie fracturada.

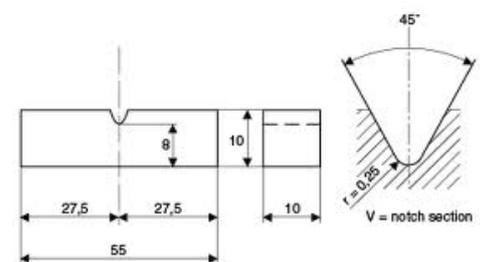
Equipo Charpy: permite determinar la energía potencial aplicada a la pieza. Dividiendo el valor de dicha energía por la superficie generada, se obtiene la resistencia al impacto del material, que es independientemente del tamaño del espécimen.

Resistencia Charpy: Energía necesaria para generar una superficie de rotura en una pieza con entalladura sometida a un golpe por flexión desde el lado opuesto a la entalladura.

Resistencia Izod: la entalladura está del lado del golpe y la probeta se monta como viga Cantilever.



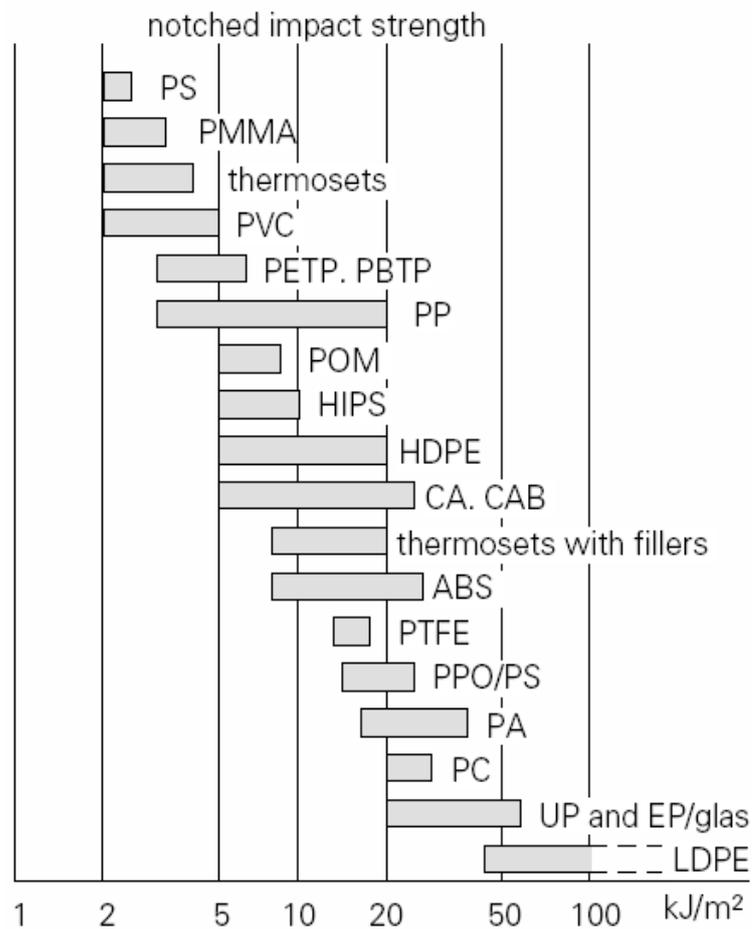
Las mediciones son fuertemente dependientes de T y del diámetro de la entalladura.



Energías al Impacto de Termoplásticos

Table 13.1 Impact Energies of Some Polymers

Polymer	Grade	Impact Energy (J)
Polystyrene	General purpose	0.34–0.54
Polystyrene	Impact	0.68–10.80
Poly(vinyl chloride)	Rapid	0.54–4.07
Poly(vinyl chloride)	Plasticized	1.36–20.33
Polypropylene	Unmodified	0.68–2.71
Poly(methyl methacrylate)	Molding	0.41–0.68
Poly(methylmethacrylate)	High impact	1.90
Polyoxymethylene		1.90–3.12
Nylon 6,6		1.36–3.39
Nylon 6		1.36–4.07
Poly(propyleneoxide)		6.78
Polycarbonate		16.26–24.39
Polyethylene	Low density	21.70
Polyethylene	High density	0.68–27.10
Polytetrafluoroethylene		4.07
Polypropylene		0.68–2.71

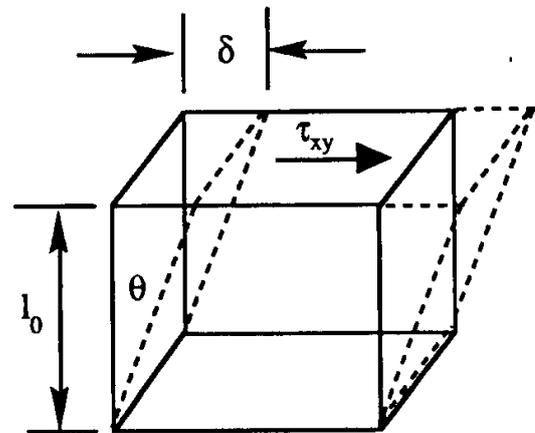


2) Ensayos No Elongacionales (Corte, Compresión y Flexión)

1) Ensayo al Corte y relación con el Ensayo a la Tracción

Se aplica una fuerza distribuida y tangente a la cara superior del cubo; y se mide el desplazamiento δ :

A_{xy} : área paralela a la aplicación de la fuerza



Material subjected to a shear stress.

- Esfuerzo de Corte (“Shear Stress”): $\tau_{xy} = \frac{F}{A_{xy}}$
- Deformación por Corte (“Shear Strain”): $\tan \theta = \frac{\delta}{l_0} = \gamma_{xy} \cong \theta$

Ley de Hooke para el Corte:

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy} ; \quad (G: \text{Módulo de Corte})$$

O más representativo de la causalidad normal: $\gamma_{xy} = J \tau_{xy}$ con:

$$J = \frac{1}{G} \quad (\text{Compliancia de Corte}).$$

Módulo elástico extensional (E) vs. Módulo Elástico de corte (G)

En un ensayo extensional, definimos la deformación adimensional en la dirección transversal al estiramiento (contracción) como:

$$\varepsilon_{tr} = \frac{W_0 - W}{W_0}$$

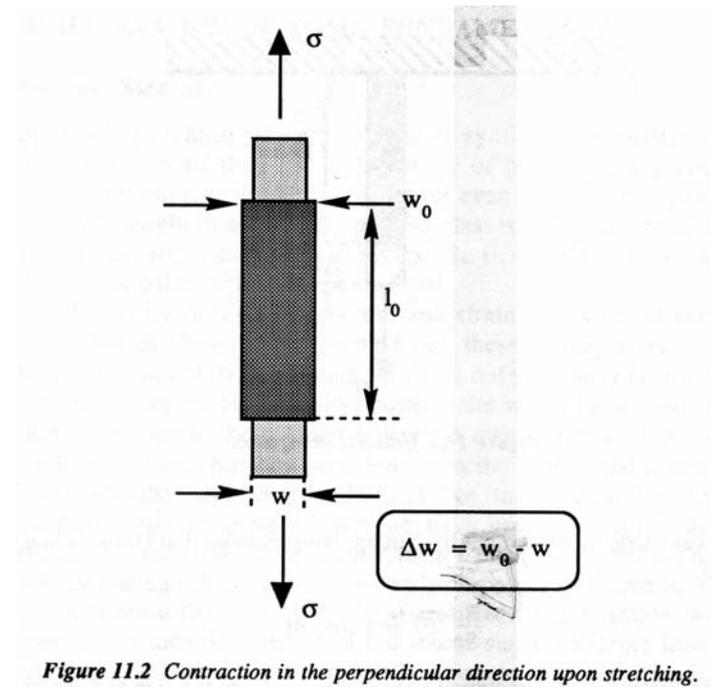


Figure 11.2 Contraction in the perpendicular direction upon stretching.

El Módulo de Poisson (ν) se define como el cociente de las deformaciones transversal y longitudinal

$$\nu \equiv \frac{\varepsilon_{tr}}{\varepsilon_{long}} = \frac{\Delta w / w_0}{\Delta l / l_0}$$

En elastómeros incompresibles, se verifica:

$$\nu = 0,5 \quad \text{y} \quad G = E$$

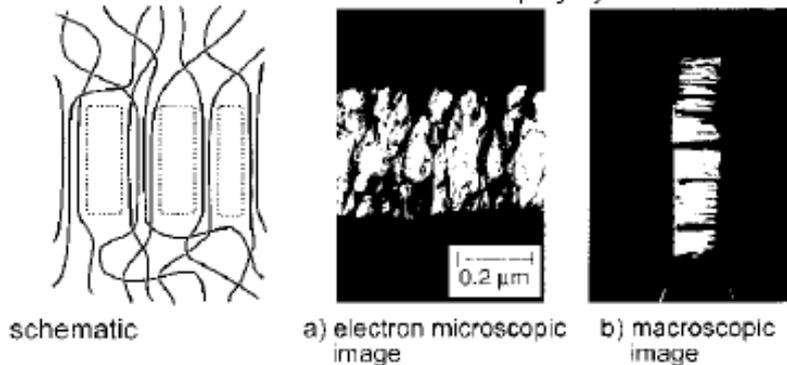
Más generalmente, en sólidos elásticos ideales, se verifica:

$$G = \frac{E}{2(1 - \nu)}$$

Fallas por Corte en Ensayo a Tracción

Micrografías de plásticos amorfos exhibiendo microfisuras (o “crazing”) a 45° generados en ensayos a la tracción:

Normal Yield Crazes: Inhomogeneous Density and Orientation



Shear Yield Bands: Inhomogeneous Orientation

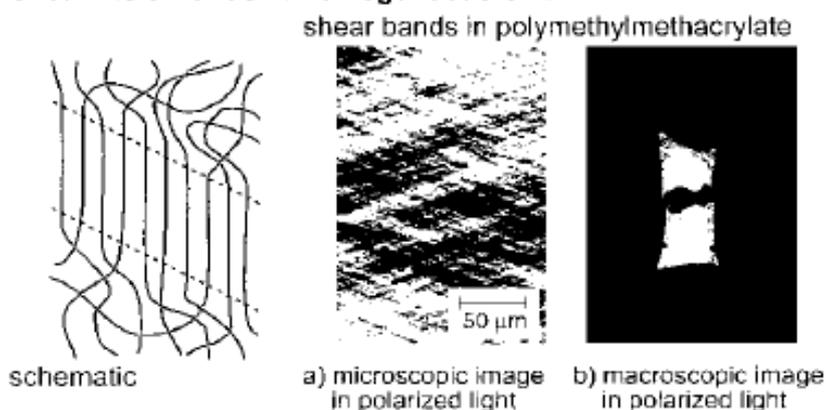


Fig. 6.29: Deformation mechanisms for craze formation (courtesy Breuer)

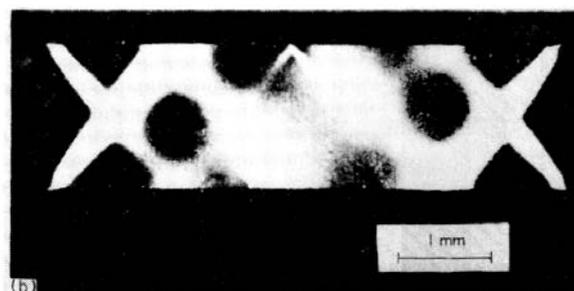
top: normal deformation for polystyrene (PS)

bottom: shear yield band for polymethylmethacrylate (PMMA)

Poliestireno



Polimetacrilato de metilo



Supongamos una pieza sometida a la tracción.

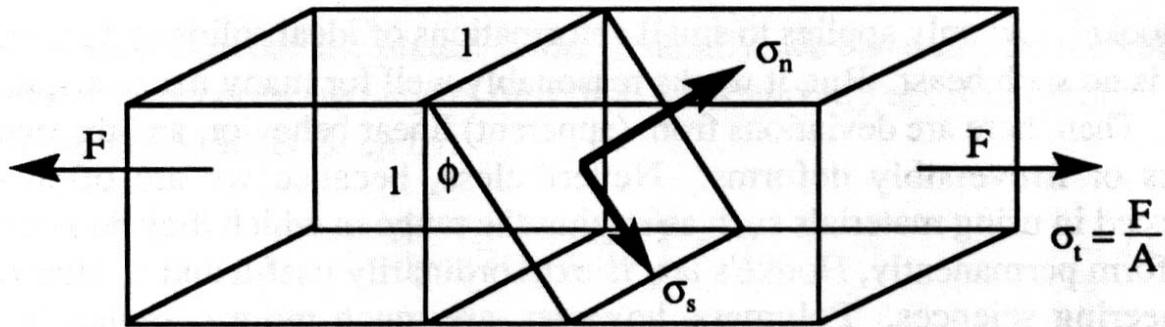


Figure 11.5 Shear stresses in a material under a uniaxial tensile load (F).

- $\sigma_{\text{tracción}} = \frac{F}{l^2} = \frac{F}{A}$

En un plano arbitrario con ángulo ϕ con respecto a la sección transversal original, descomponemos la fuerza de tracción en 2 componentes, en las direcciones normal y tangente a dicho plano.

- $F_n = F_{\text{tracc.}} \cos \phi;$ $F_{\text{shear}} = F_{\text{tracc.}} \sin \phi$
- Área plano inclinado = $A / \cos \phi$

Se genera una tensión de corte σ_s y una tensión normal σ_n .

$$\sigma_n = \frac{F \cos \phi}{A / \cos \phi} = \frac{F}{A} \cos^2 \phi; \quad \sigma_s = \frac{F}{A} \sin \phi \cos \phi = \frac{F}{2A} \sin(2\phi)$$

A 45° : $\cos \phi = \frac{1}{\sqrt{2}}$, entonces:

$$\sigma_{s,45^\circ} = \sigma_{n,45^\circ} = \frac{F}{2A}, \quad (\text{y } \sigma_s \text{ es máximo}).$$

A pesar de que la tensión de corte vale la mitad de la tensión longitudinal, el material puede fallar por fluencia (“crazing”) de corte a 45° , antes que transversalmente a la tracción.

2) Ensayo a la Compresión

Tracción–Deformación vs. Compresión–Deformación de un típico polímero vítreo (PS)

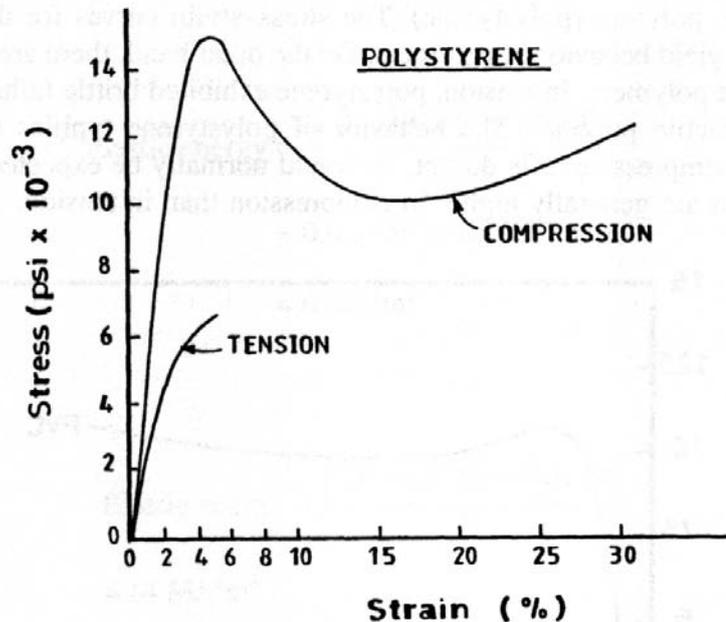


Figure 13.18 The stress–strain behavior of a normally brittle polymer, polystyrene, under tension and compression. (From Nielsen, L.E., *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, Vol. 2, Marcel Dekker, New York, 1974. With permission.)

En compresión, el módulo elástico, las resistencia tensil y de rotura son considerablemente mayores que los correspondientes valores en tracción.

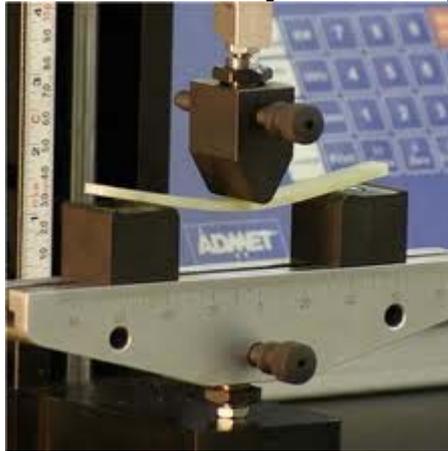
El motivo es que en tracción se incrementan las roturas debidas a fallas y microfisuras superficiales.

En tracción, se acumulan las tensiones superficiales porque el material “se soporta de un lado solamente”. En cambio, en compresión las separaciones de las fisuras se acercan en lugar de alejarse, y no se acumulan tensiones en microfisuras superficiales.

En compresión, la interpretación de resultados es compleja y por ello, este ensayo no es muy usado.

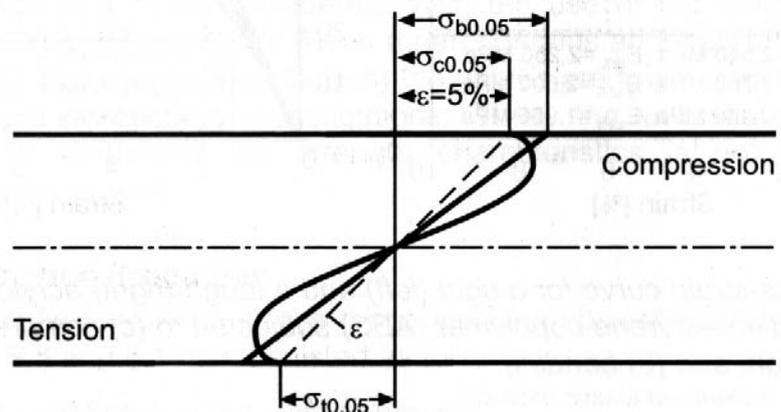
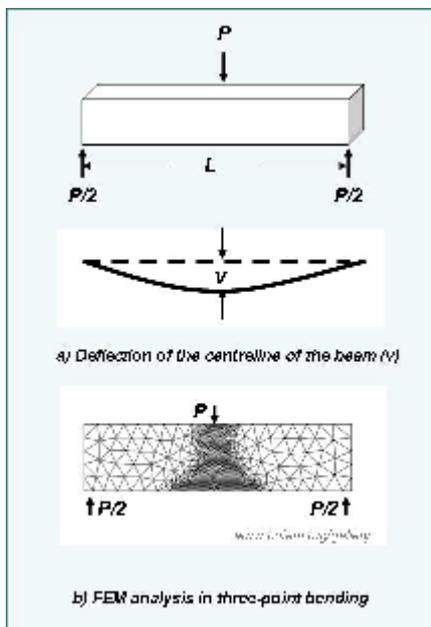
3) Ensayo a la Flexión

En flexión coexisten una tracción inferior y una compresión superior.



- Tensión de Flexión \equiv Valor de la Tensión por tracción en la Superficie
- Deformación adimensional = $\frac{\text{Deformación Transversal}}{\text{Longitud del Espécimen}}$

A muy bajas deformaciones, el perfil de tensiones es lineal y la tensión máxima ocurre sobre la superficie. En cambio, a mayores tensiones, el módulo máximo ocurre internamente, y esto genera una subestimación de la tensión.



Stress and strain distribution through the thickness direction subjected to bending

$E_{b0.05} = 1140 \text{ MPa}$, bending modulus via 5% edge strain

$\sigma_{b0.05} = 57.1 \text{ MPa}$, via theory of elasticity for bending

$\sigma_{c0.05} = 41.5 \text{ MPa}$, via compression test

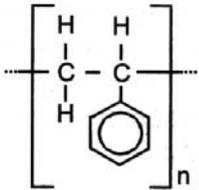
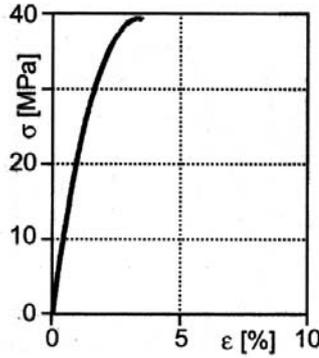
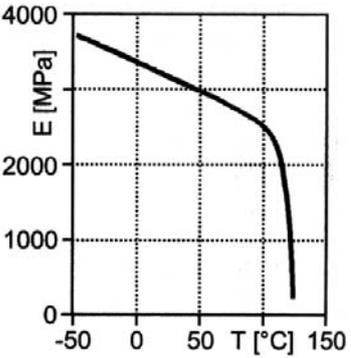
$\sigma_{t0.05} = 35.0 \text{ MPa}$, via tensile test

Instron 5544 3 Point Bend Test

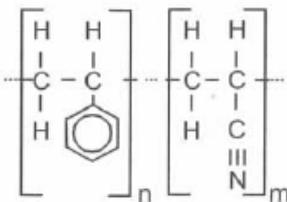
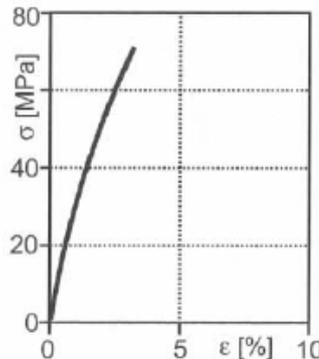
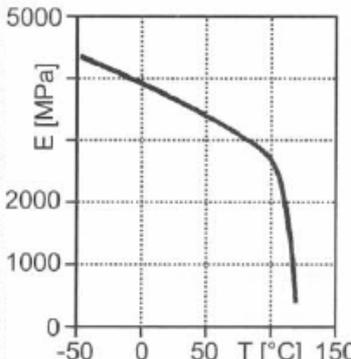
<http://www.youtube.com/watch?v=zeyqcPiUFPs>

Termoplásticos amorfos del estireno: PS y SAN y correspondientes “plásticos de ingeniería” resistentes al impacto (HIPS y ABS)

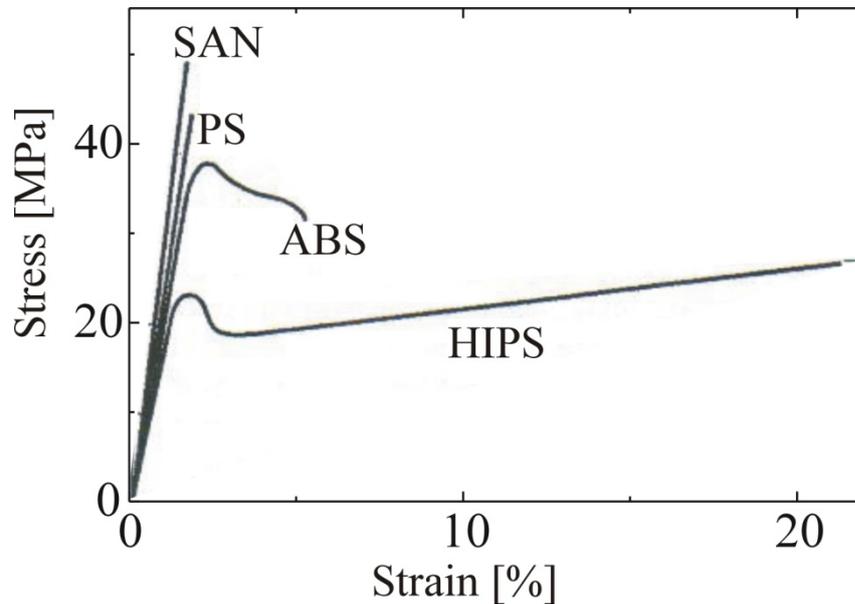
Poliestireno (PS):

<p>Type: amorphous</p> <p>Characteristics: stiffness, brittleness, good dimensional stability, inexpensive, smooth surfaces, susceptibility to stress cracking, limited chemical resistance</p> <p>Identified by: transparency, smell of styrene when burned, yellow flame, soot forming</p>		<p>Structure:</p> 
<p>Properties:</p> <p>$\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$ $E = 3100 - 3300 \text{ MPa}$ $\sigma_F = 30 - 55 \text{ MPa}$ $\epsilon_Y = -$ $\epsilon_F = 1.5 - 3\%$ $T_g = 90 - 100^\circ\text{C}$</p> <p>Thermal Limits: Short-time $\sim 90^\circ\text{C}$ Long-time $\sim 80^\circ\text{C}$</p>	<p>Stress-Strain Diagram:</p> 	<p>Elastic Modulus f (Temp):</p> 

Poli(estireno-co-acrilonitrilo) (SAN):

<p>Type: amorphous</p> <p>Characteristics: high strength and stiffness, good dimensional stability, good chemical resistance, lower resistance against stress cracking than PS</p> <p>Identified by: yellowish, transparency, smell of styrene when burned, bright flame, soot forming</p>		<p>Structure:</p> 
<p>Properties:</p> <p>$\rho = 1.08 \text{ g/cm}^3$ $E = 3500 - 3700 \text{ MPa}$ $\sigma_F = 65 - 85 \text{ MPa}$ $\epsilon_Y = -$ $\epsilon_F = 2.5 - 5\%$ $T_g = 95 - 105^\circ\text{C}$</p> <p>Thermal Limits: Short-time $\sim 95^\circ\text{C}$ Long-time $\sim 85^\circ\text{C}$</p>	<p>Stress-Strain Diagram:</p> 	<p>Elastic Modulus f (Temp):</p> 

Por el agregado de partículas elastoméricas en HIPS y ABS, aumentan la tenacidad y la resistencia al impacto, pero disminuyen el módulo elástico y la resistencia tensil:



ABS: Ensayos de Tensión-Deformación por Tracción, Compresión y Flexión

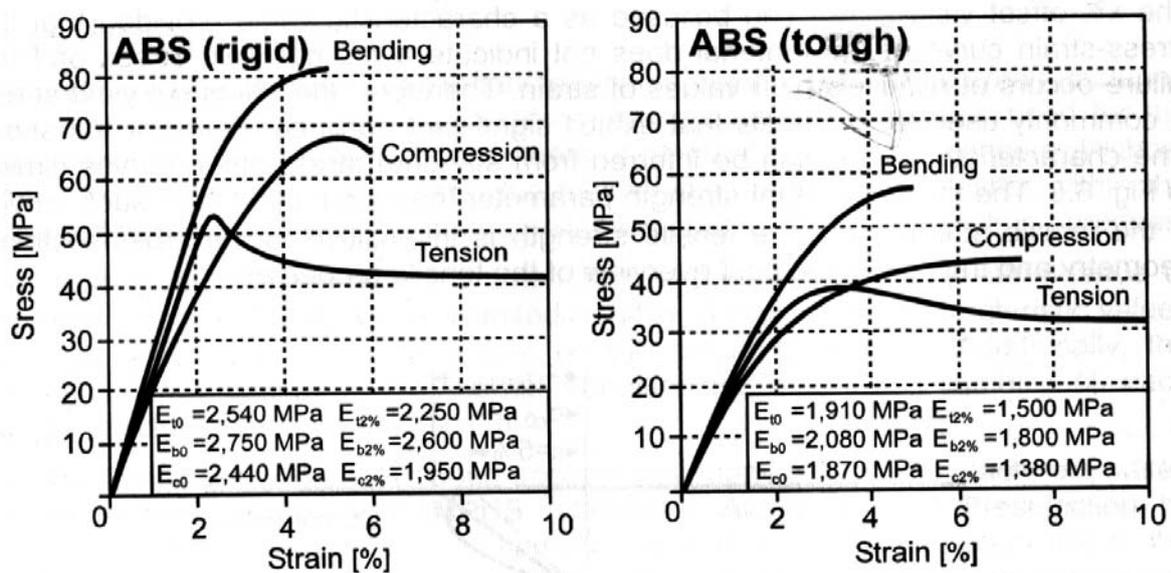
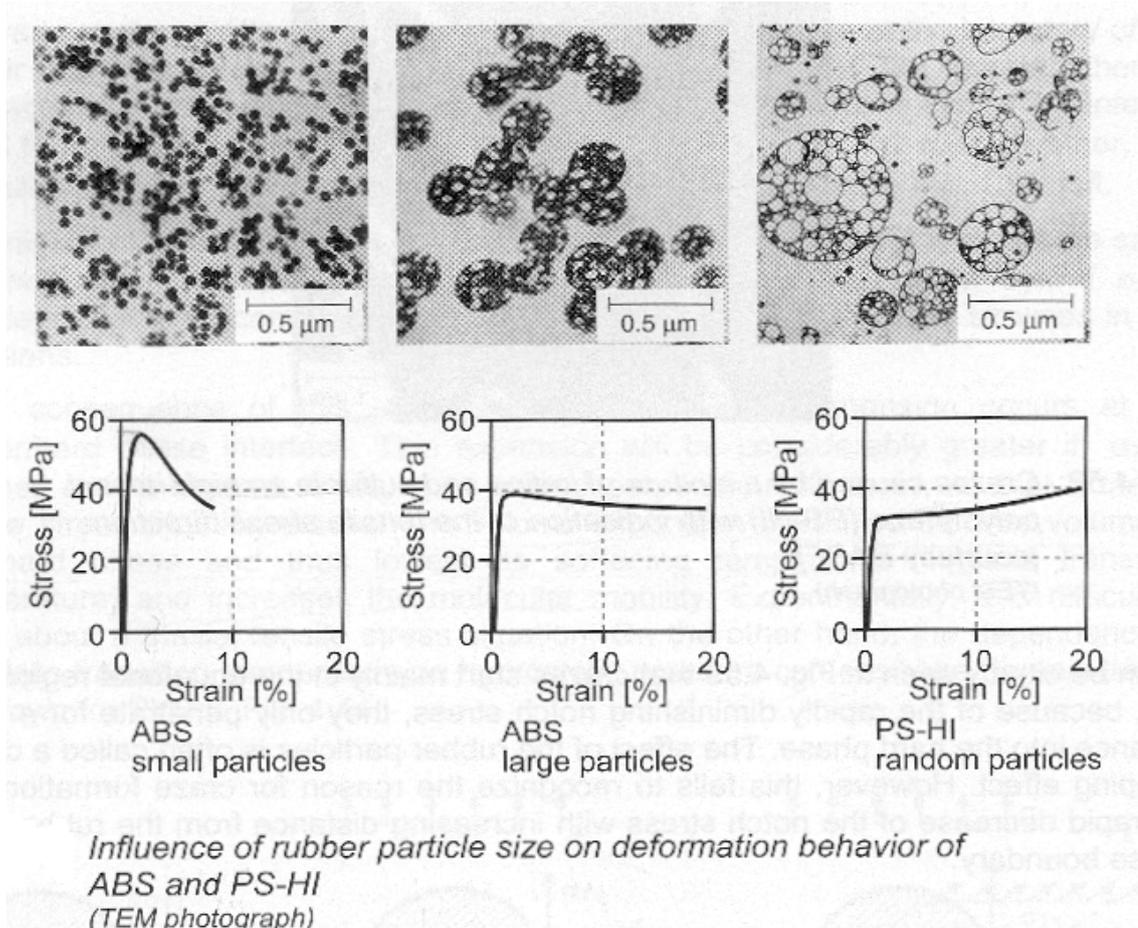


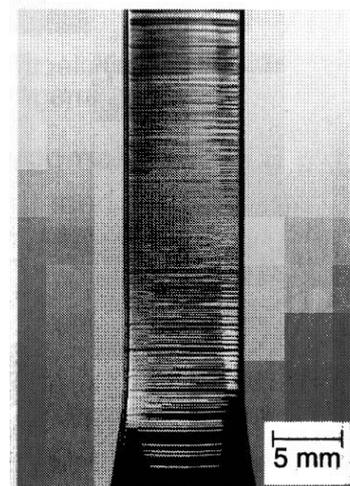
Fig. 6.10: Stress-strain curve for a rigid (left) and a tough (right) acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS) subjected to (c) compression, (t) tension, and (b) bending

Efecto de la morfología en ABS y HIPS



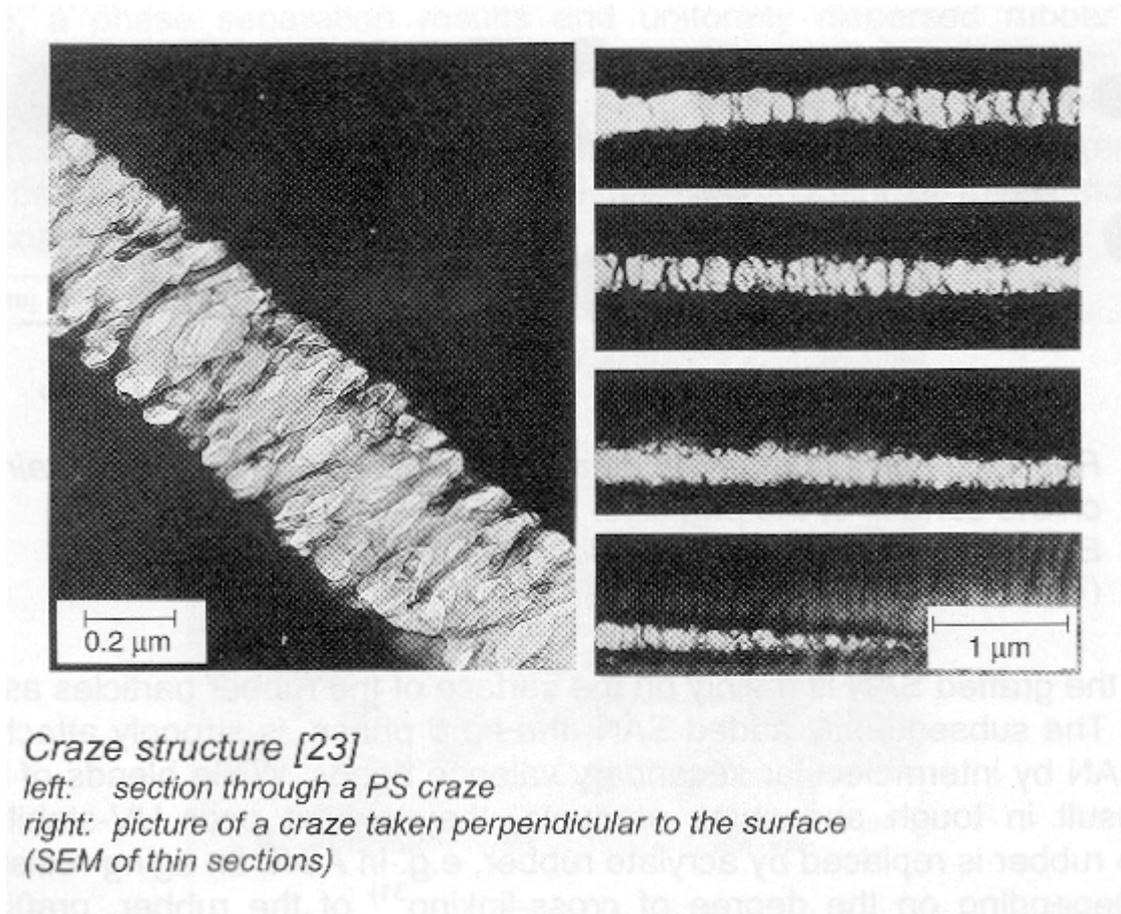
“Yield” por Microfisuras (o “Crazing”) en PS

Los termoplásticos amorfos exhiben valores no tan bajos de tenacidad y elongación a la rotura gracias al mecanismo de microfisurado o “crazing”, que implica la falla del material.



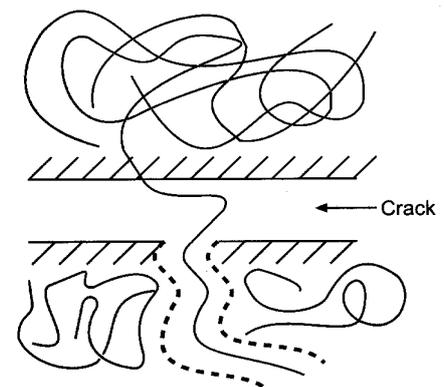
Probeta de PS aún sin romper a 115 MPa (rompió a 145 MPa).

Micrografía de una microfisura en PS, con “extracción” de moléculas o fibrillas perpendicularmente a la microfisura

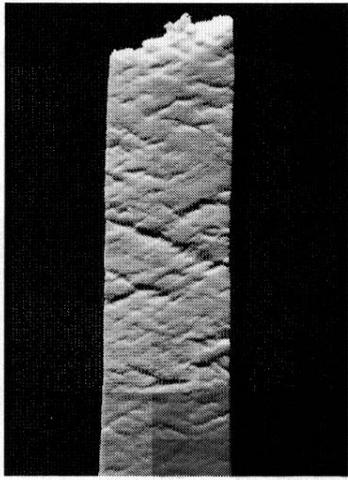


Proceso de Desenredamiento (o “Disentanglement”)

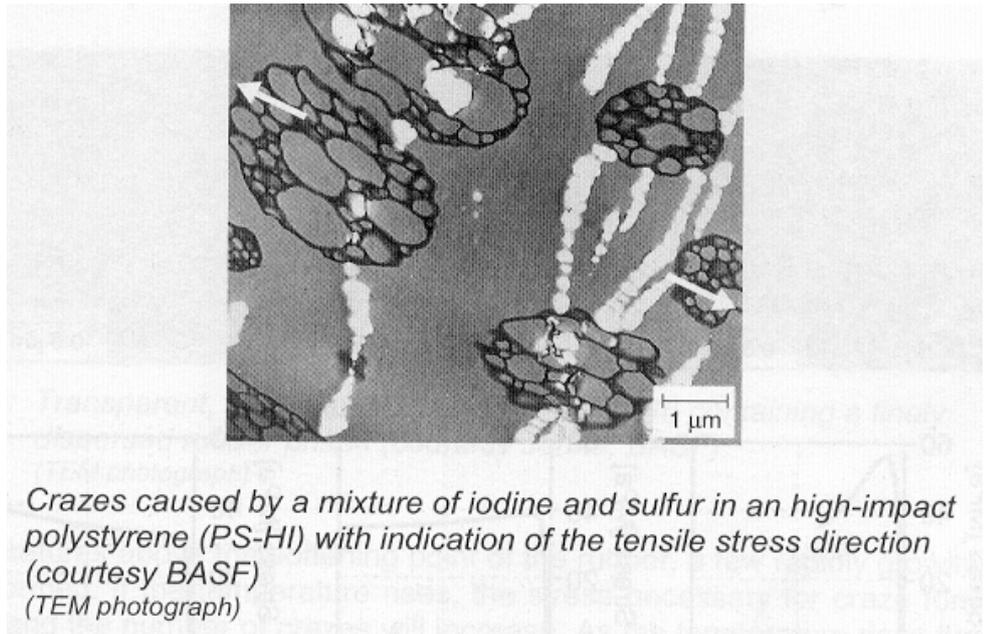
Le permite al material absorber energía de deformación sin romperse.



Tenacidad e Impacto en HIPS y ABS



Probeta de ABS con
fractura por corte a
45°.



Crazes caused by a mixture of iodine and sulfur in an high-impact polystyrene (PS-HI) with indication of the tensile stress direction (courtesy BASF) (TEM photograph)

Motivos de las mayores tenacidades del HIPS/ ABS con respecto al PS/ SAN

1. Microcrazing masivo inducido por las partículas de goma.

Se generan altas tensiones en la superficie externa y en muchos puntos sobre la interfaz virtual goma-vidrio, en el Ecuador de las partículas con respecto al estiramiento.

Las tensiones internas se generan durante el enfriamiento desde el fundido porque:

Módulo Elástico Goma \ll Módulo Elástico PS o SAN.

2. Absorción de energía por estiramiento de la fase gomosa (un PB entrecruzado y unido solidariamente a la fase continua).

A T ambiente y antes del crazing, la goma se encuentra estirada en todas direcciones. Durante el enfriamiento desde un fundido a unos 200 °C; el material se contrae más en la fase goma que la vítrea porque:

Coef. exp. térm. goma $>$ Coef. exp. térm. PS o SAN.