



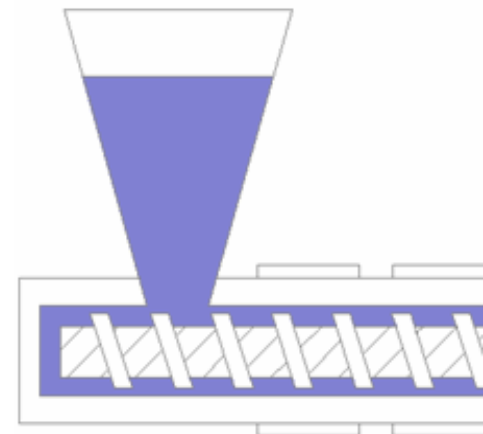
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e
Automobilística



Ensaio Tração Polímero

**SMM0342- Introdução aos Ensaios
Mecânicos dos Materiais**

Prof. Dr. Cassius O.F. Terra Ruchert



Classificação Materiais poliméricos (resposta mecânica a temperatura elevadas)

Termoplásticos

- Necessitam de calor para serem moldados;
- Reversíveis
- Recicláveis
- De uma forma geral não possuem ligações cruzadas
- De maior utilização industrial (70% em peso da quantidade total de plásticos)

Polietileno (PE), polipropileno (PP), poli(tereftalato de etileno) (PET), policarbonato (PC), poliestireno (PS), poli(cloreto de vinila) (PVC), poli(metilmetacrilato) (PMMA)...

Termorrígidos

- A temperatura ou um catalisador provoca uma reação permanente;
- Não podem ser refundidos e remoldados em outra forma
- Não são recicláveis
- Possuem ligações cruzadas

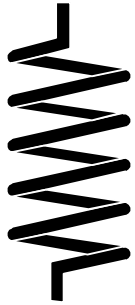
*Baquelite: tomadas; embutimento de amostras metalográficas;
Poliéster: carrocerias, caixas d'água, piscinas, etc., na forma de plástico reforçado (fiberglass).*

Reologia dos materiais poliméricos

Reologia (rheos = fluir e logos = estudo) é a ciência que estuda o **fluxo e a deformação dos materiais**, analisando sua **resposta** quando submetidos a uma **determinada tensão** ou solicitação mecânica externa.

MODELOS IDEAIS

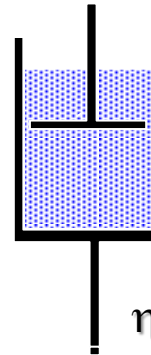
MOLA



Resposta Puramente Elástica
Sólido Hookeano

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

PISTÃO / ÊMBOLO



Resposta Puramente
Viscosa
Líquido Newtoniano

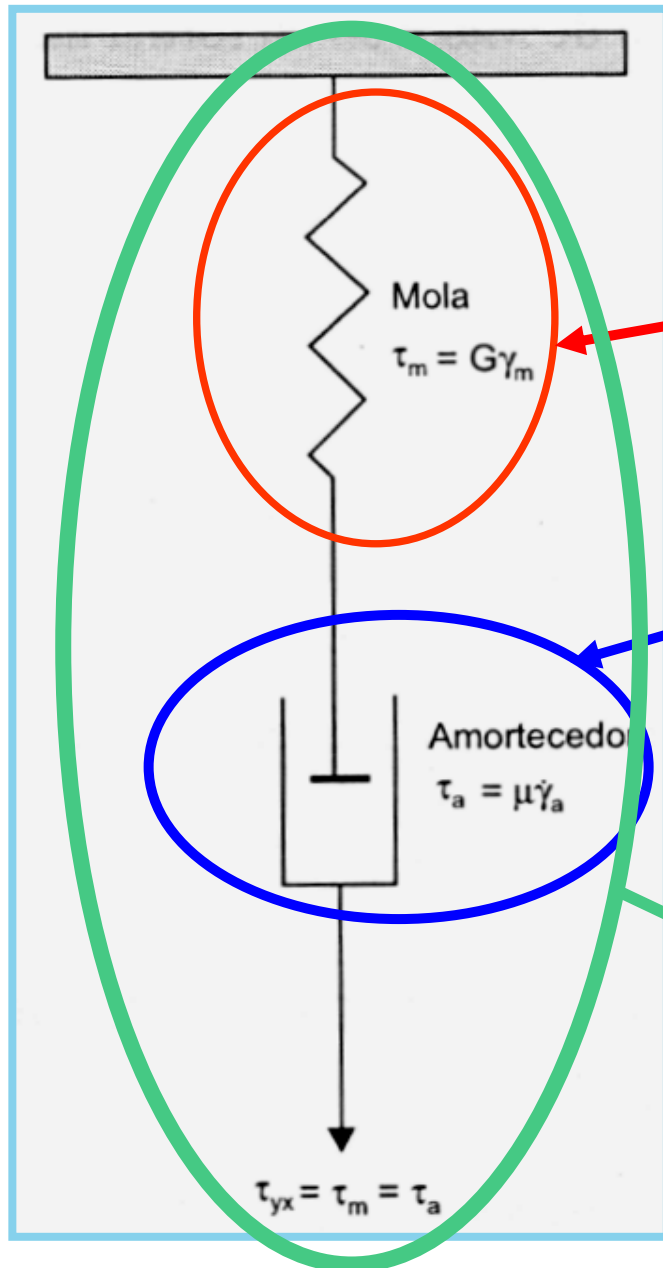
$$\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

η = viscosidade do Fluido
dentro pistão;

$\dot{\gamma}$ = velocidade deformação pistão

Polímeros apresentam simultaneamente as frações elástica e viscosa (plástica), ocorrendo a predominância da fração **elástica** ou **plástica** de acordo com o tipo de **tensão e/ou deformação** aplicada.

Viscoelasticidade



Sólido de Hooke

Os Polímeros apresentam características de sólido e líquido inerentes a materiais de alto peso molecular

Fluido Newtoniano

Material Viscoelástico

Fenômeno pelo qual o polímero apresenta características de um sólido elástico e de um fluido viscoso ao mesmo tempo, quando submetido à ação de uma tensão.

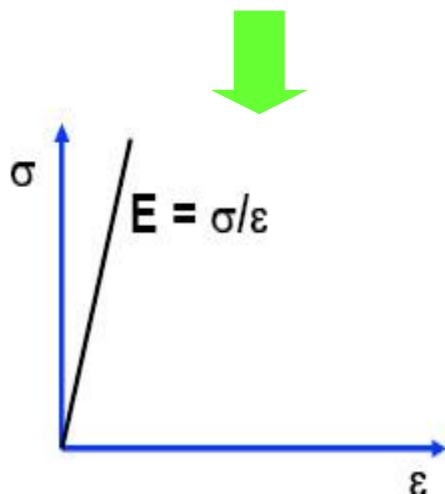
Principais Características do Comportamento Mecânico de Três Classes de Materiais

Sólido Hookeano

Proporcionalidade entre a tensão e a deformação

Elasticidade independente do tempo

Módulo elevado

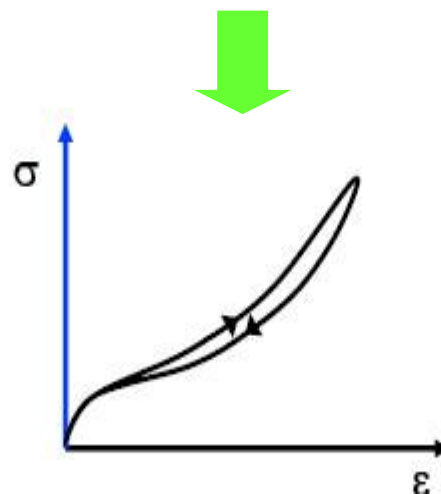


Elastômero

Não há proporcionalidade entre a tensão e a deformação

Elasticidade independente do tempo

Módulo baixo, dependente da temperatura

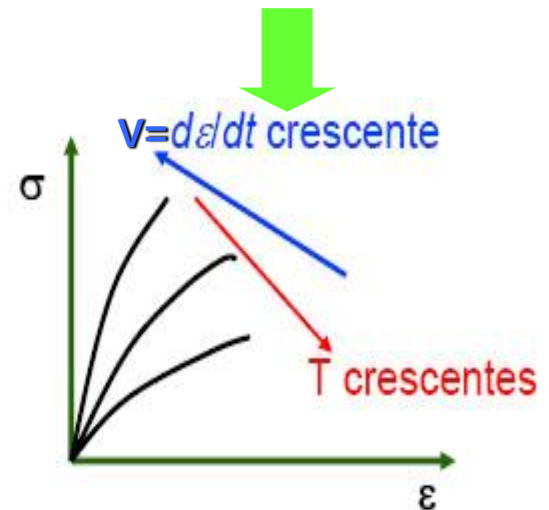


Polímero Termoplástico

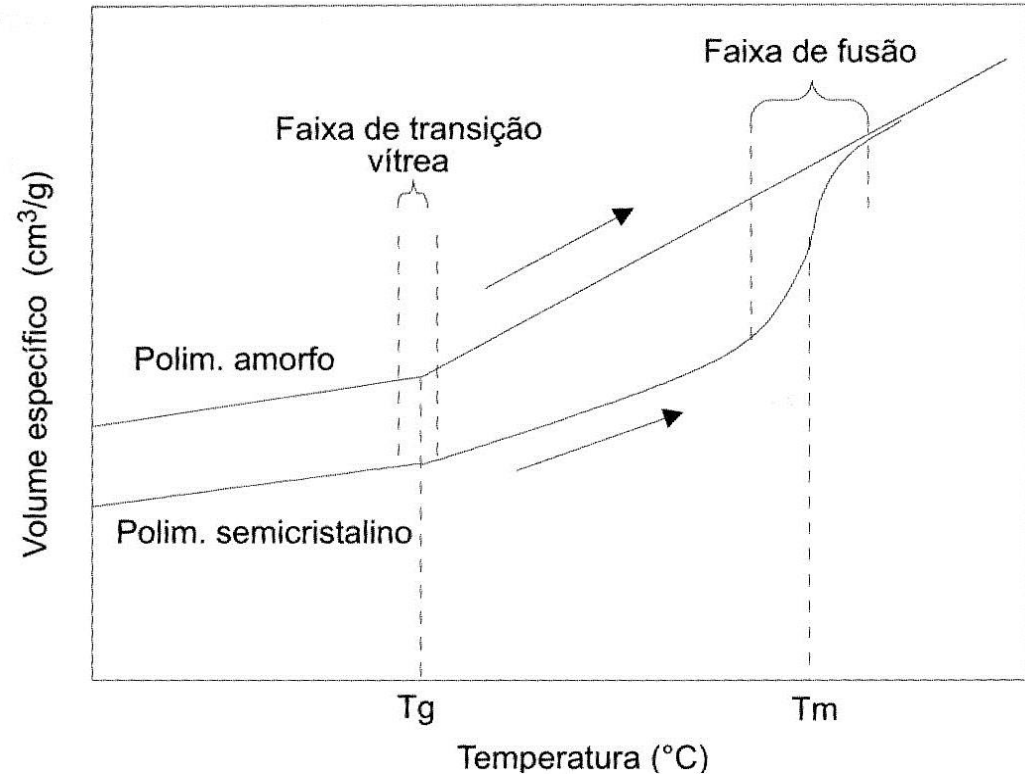
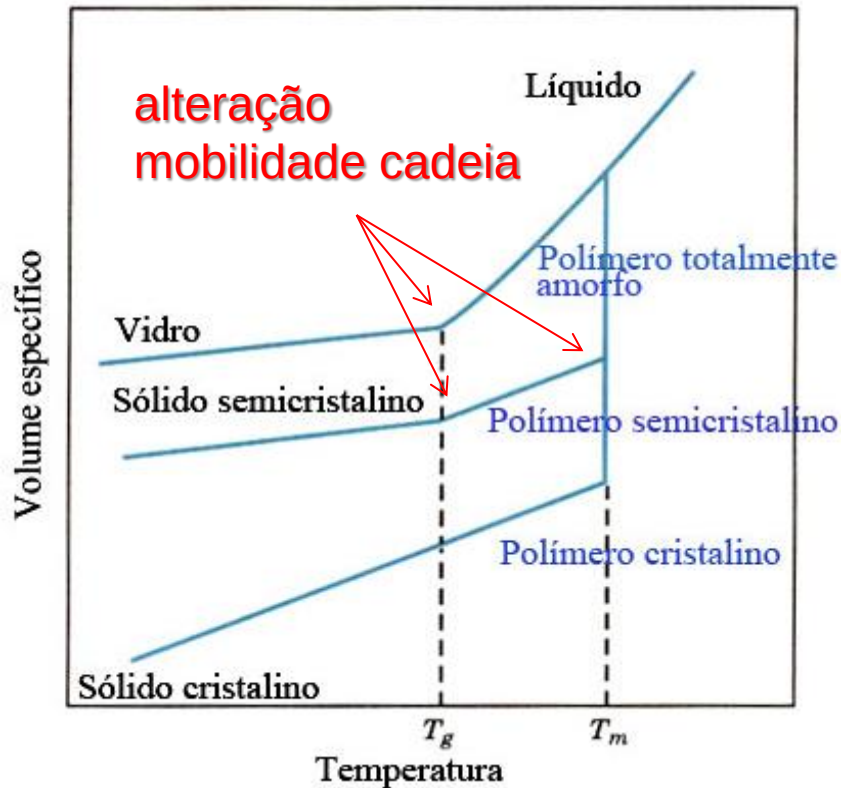
Não há proporcionalidade entre a tensão e a deformação

Elasticidade dependente do tempo

Módulo dependente da temperatura e tempo



Temperatura de Transição Vítrea (T_g , T_v) e de Fusão (T_m , T_f)



A **fusão** de um cristal de **polímero** corresponde a transformação de um **sólido** (estrutura **ordenada**, cadeias **alinhas**) em um **líquido viscoso** (estrutura altamente **aleatória**)

T_g – **temperatura** na qual o polímero experimenta a **transição** do estado no qual apresenta características de **borracha** em um **sólido rígido**.

A T_g ocorre em polímeros amorfos (ou vítreos) e semicristalinos e é devida a redução no movimento de grandes segmentos de cadeias moleculares pela diminuição da temperatura.

Temperaturas de Fusão e de Transição Vítrea para Alguns Materiais Poliméricos Mais Comuns

<i>Material</i>	<i>Temperatura de Transição Vítrea [°C (°F)]</i>	<i>Temperatura de Fusão [°C (°F)]</i>
Polietileno (baixa densidade)	-110 (-165)	115 (240)
Politetrafluoroetileno	-97 (-140)	327 (620)
Polietileno (alta densidade)	-90 (-130)	137 (279)
Polipropileno	-18 (0)	175 (347)
Náilon 6,6	57 (135)	265 (510)
Poliéster (PET)	69 (155)	265 (510)
Cloreto de polivinila	87 (190)	212 (415)
Poliestireno	100 (212)	240 (465)
Policarbonato	150 (300)	265 (510)

Classificação dos estados físicos-mecânicos de um polímero semicristalino com relação a temperatura

Vítreo – Acontece abaixo da t_g . Baixo nível energético portanto as cadeias não possuem energia suficiente para apresentar mobilidade (Deformação essencialmente Elastica)

Borrachoso – Entre T_g e T_m . Mobilidade somente da fase amorfa, mantendo a fase cristalina rígida. Flexibilidade devido a mobilidade da fase amorfa, restrita pela rigidez da cristalina.

Viscoso – Acima da T_m . Alto nível energético caracterizado por apresentar todas as cadeias altamente móveis (Deformação Plástica). Estado em que os polímeros são processados pois apresentam alta conformabilidade.

Polímeros semicristalinos podem apresentar os três estágios mas polímeros amorfos não apresenta a fase borrachoso.

Principais fatores que afetam o comportamento mecânico dos polímeros (parâmetros estruturais e externos):

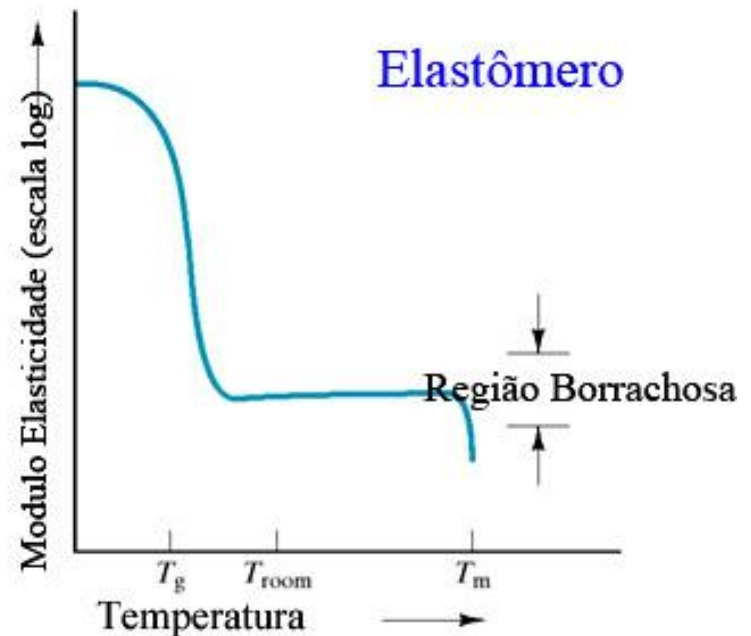
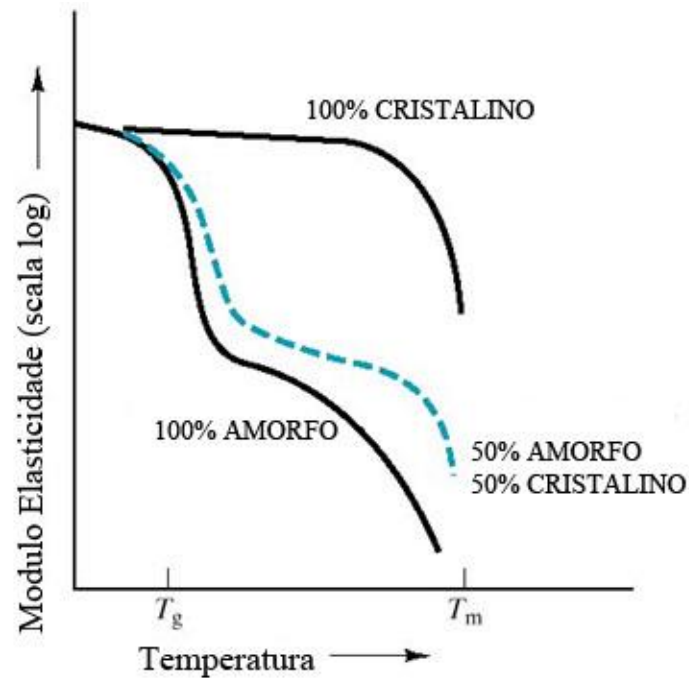
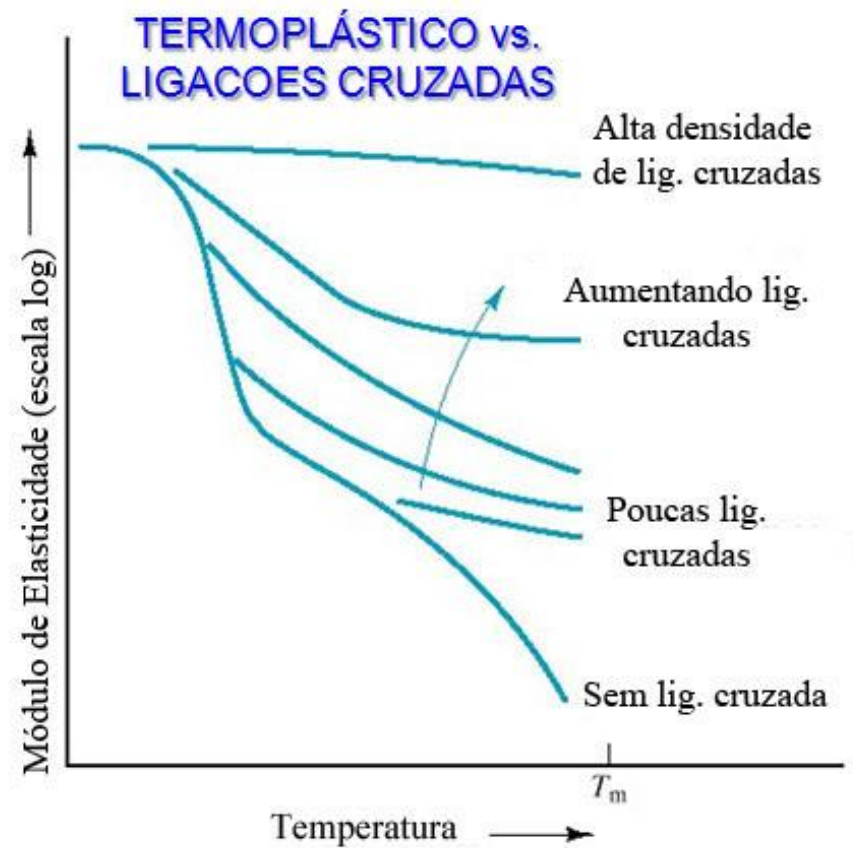
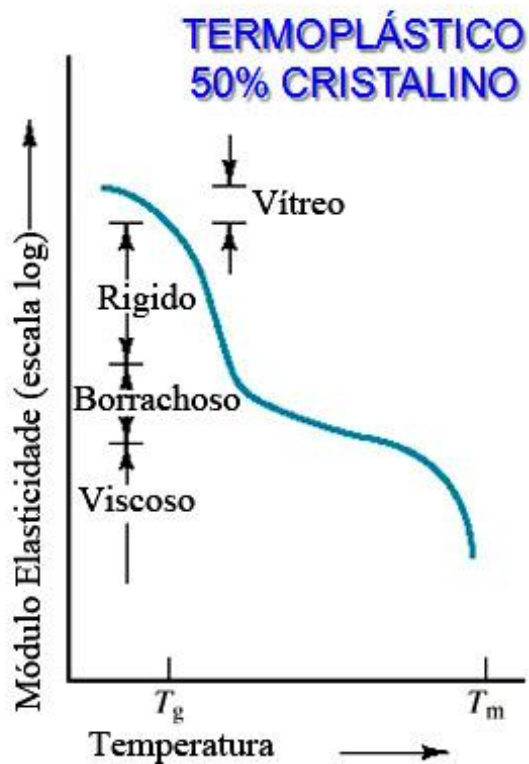
Parâmetros estruturais:

- Estrutura química;
- Presença de grupos polares;
- Massa molar (peso molecular);
- Copolimerização (+ de 1 mero/SBR);
- Ligações cruzadas ;
- Grau de cristalinidade;
- Pré-deformação por estiramento;
- Tratamento térmico (recozimento)
- Densidade (ex: HDPE vs. LDPE)

etc...

Parâmetros externos:

- Presença de plastificante;
- de Elastômero (tenaficação);
- de monômero residual;
- reforço com fibras ;
- Pré-deformação por estiramento;
- água etc...

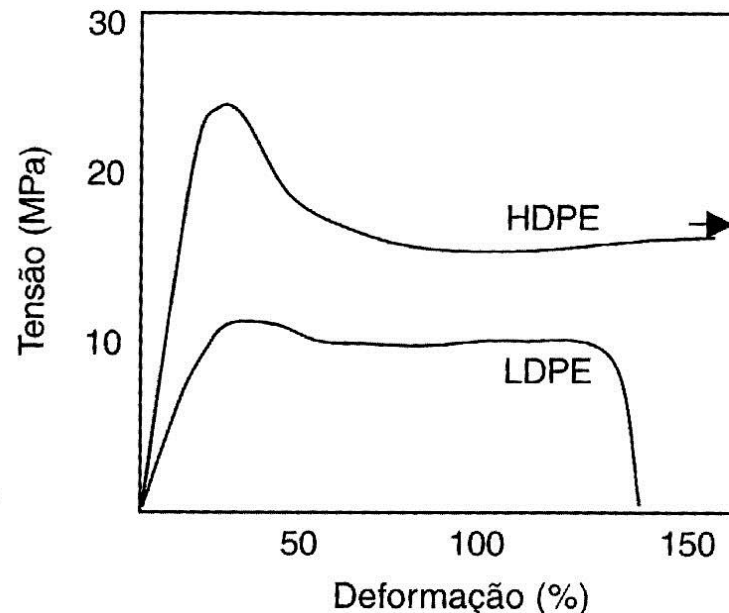


Cristalinidade (densidade) vs. Propriedade Mecânica

Propriedades mecânicas de polietileno com vários graus de cristalinidade

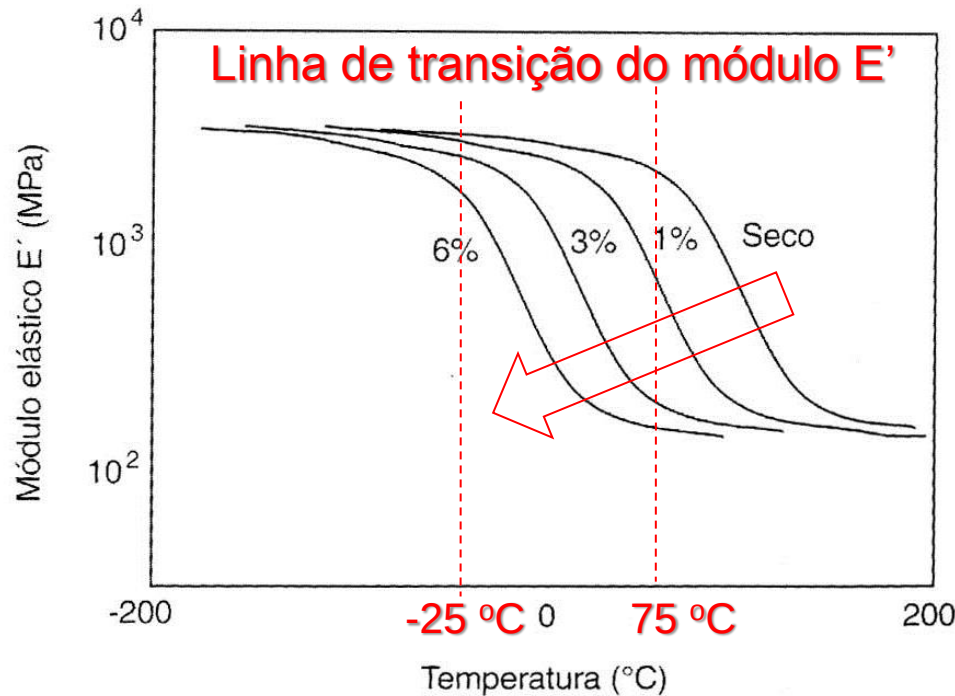
Propriedade	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Densidade (g/cm^3)	0,910 - 0,925	0,926 - 0,940	0,941 - 0,965
Resistência à tração (MPa)	4,1 - 15,9	8,3 - 24,1	21,4 - 37,9
Módulo sob flexão (GPa)	0,05 - 0,41	0,41 - 0,73	0,69 - 1,8
Dureza Rockwell D	41 - 48	50 - 60	60 - 70

A densidade em polietilenos pode ser considerada proporcional ao grau de cristalinidade



Curvas de tensão-deformação em tração para polietileno de alta (HDPE) e baixa (LDPE) densidades

Efeito Absorção de água no Módulo vs. Temperatura



A **absorção** preferencial de **água** em polímeros como náilons, poliuretanas e plásticos a base de celulose, ocorre em função da possibilidade de formação de **pontes de H** entre as moléculas de água e grupos oxigenados (carbonila, hidroxila, etc..)

Efeito da umidade nas propriedades mecânicas do náilon 6,6

A **água** age como **plastificante** para esses polímeros tendendo a diminuir o número de pontos de H entre suas moléculas **reduzindo** assim as **forças intermoleculares**.

Propriedade	0,2% água	2,5% água
Resistência à tração (MPa)	81,4	77,3
Deformação na ruptura (%)	60	300
Resistência no escoamento (MPa)	81,4	58,6
Deformação no escoamento (%)	5	25
Módulo sob flexão (GPa)	2,8	1,2

Comportamento Mecânico do Epóxi (termorrígido) de alto Desempenho com Vários Tipos de Fibras

Fibra Compósito *	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência a tração (GPa)	Densidade (g/cm ³)
Resina epóxi	3,5	0,09	1,20
Fibra de vidro tipo E	72,4	2,4	2,54
Compósito de epóxi	45	1,1	2,10
Fibra de vidro tipo S	85,5	4,5	2,49
Compósito de epóxi	55	2,0	2,00
Fibra de boro	400	3,5	2,45
Compósito de epóxi	207	1,6	2,10
Fibra de grafite de alta resistência	253	4,5	1,80
Compósito de epóxi	145	2,3	1,60
Fibra de grafite de alto módulo	520	2,4	1,85
Compósito de epóxi	290	1,0	1,63
Fibra de aramida (Kevlar)	124	3,6	1,44
Compósito de epóxi	80	2,0	1,38

* Compósito com 33,3% de fibra unidirecional

Efeito do Tratamento Térmico (recozimento) nas Propriedades Mecânicas do Polímero

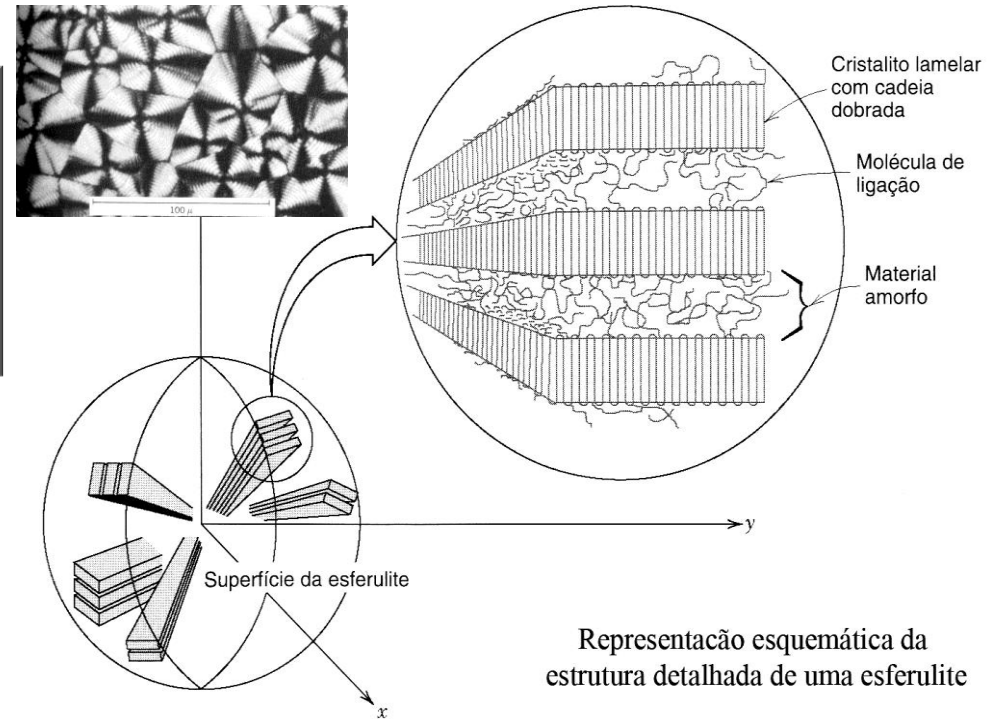
O tratamento térmico (**recozimento**) de polímeros semicristalinos leva a **modificações** no **tamanho** e na **perfeição** dos **cristalitos** bem como na estrutura **esferulítica**.

O aumento da temp. de recozimento em polímero semicristalino leva ao (não estirados e tempo constante) :

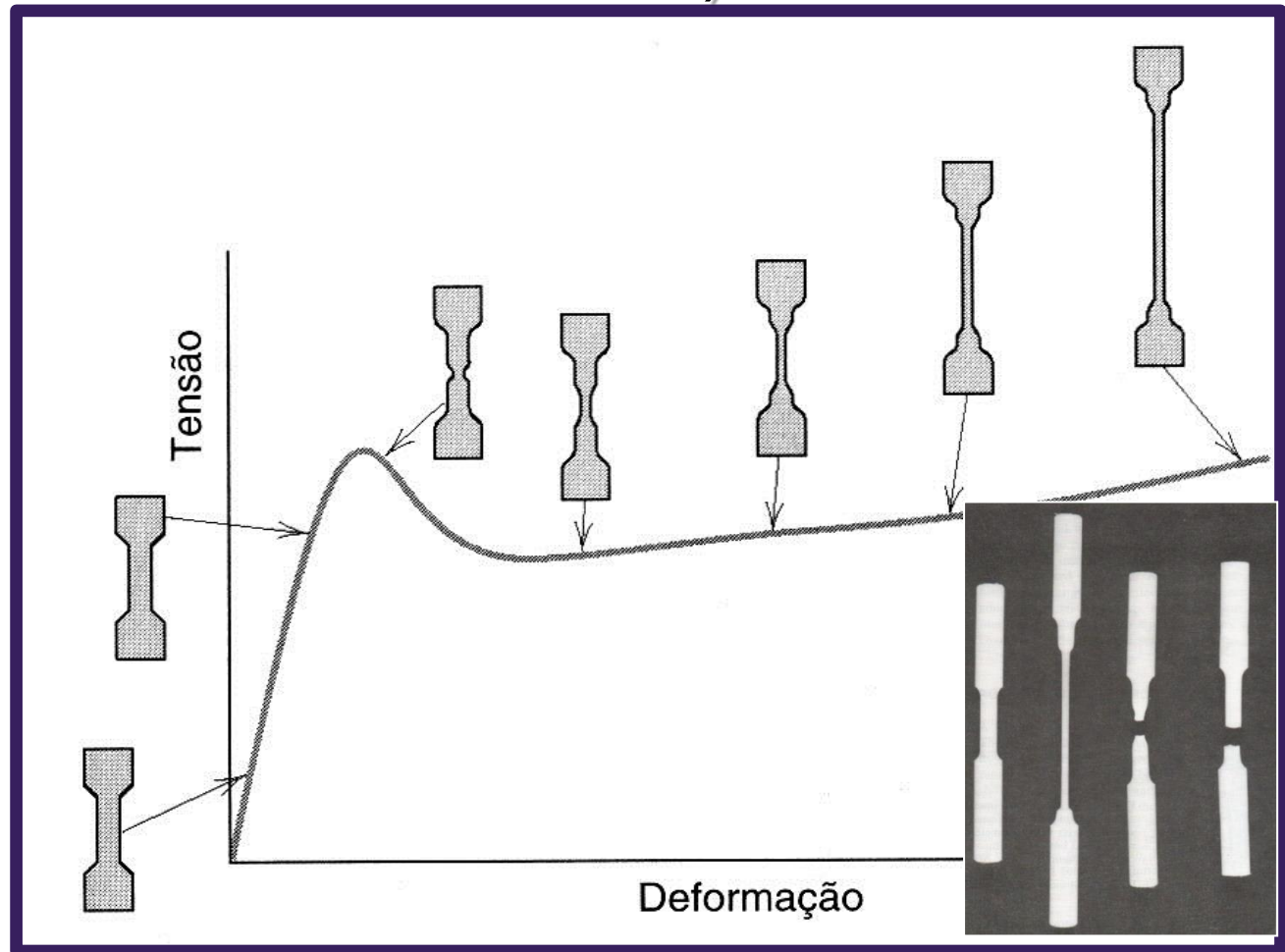
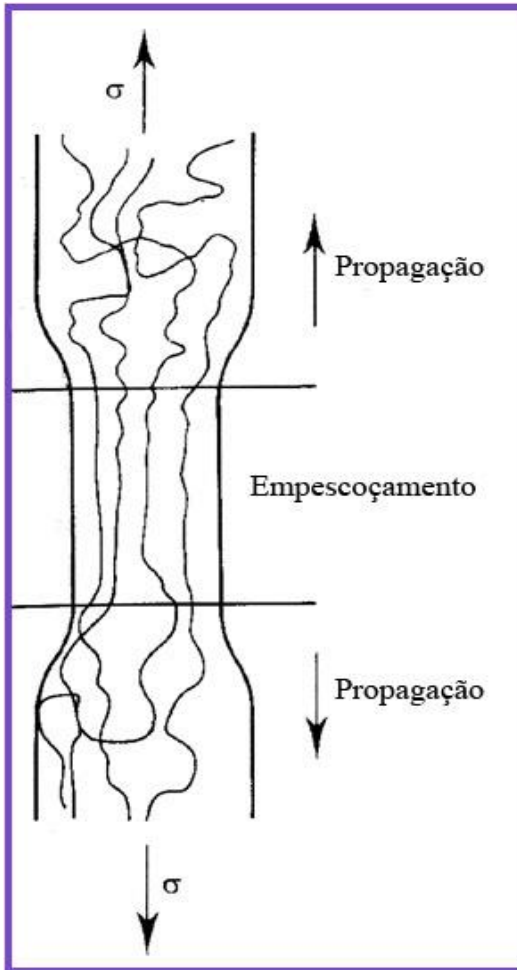
- ✓ aumento do módulo de tração;
- ✓ aumento do limite de escoamento;
- ✓ redução da ductilidade.

**Efeito Contrário
Metais**

- ✓ enfraquecimento;
- ✓ amolecimento;
- ✓ melhoria ductilidade.



Estiramento do Polímero Semicristalino (semelhante ao encruamento nos metais)



As propriedades dos materiais estirados são altamente anisotrópicas

Aumento de resistência empregada na fabricação de fibras e películas.

Durante estiramento as cadeias moleculares deslizam umas sobre as outras tornando-se altamente orientadas aumentando a resistência.

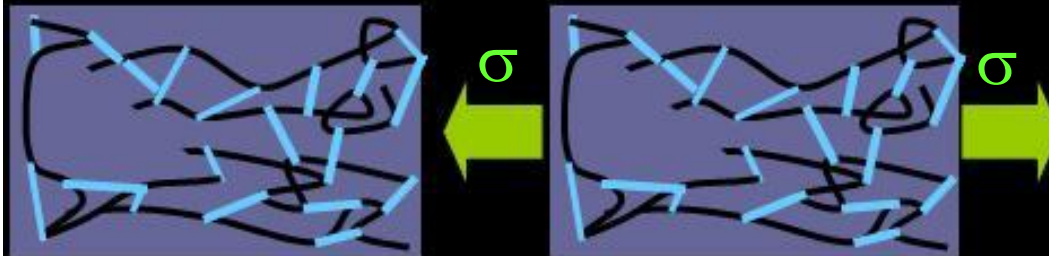
Mecanismo de Deformação de Alguns Tipos de Polímeros



Termoplástico flexível: sem lig. cruzada → deformação plástica

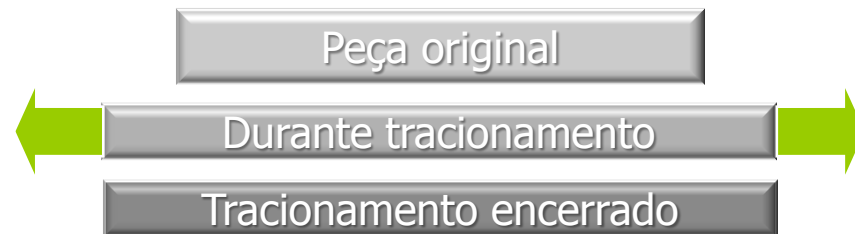


Termofixo plástico: muitas lig. cruzadas → pouca deformação



Comportamento Deformacional dos Plásticos (regido pela estrutura molecular)

Deformação plástica: **permanente, irreversível**



Plásticos AMORFOS (termoplásticos e termofixos):

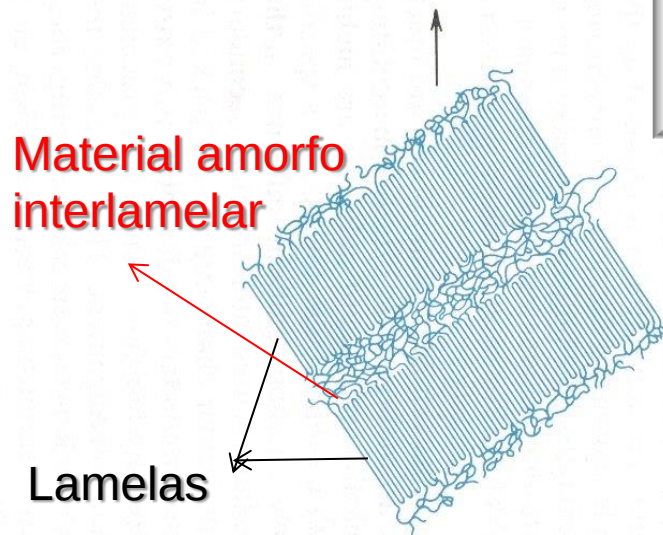
- ✓ as cadeias não se desenrolam
- ✓ material resiste à deformação
- ✓ ruptura com pequena ou nenhuma deformação

Plásticos SEMICRISTALINOS, com $T_g < \text{ambiente}$:

- ✓ a parte amorfa se desenrola → pequena deformação elástica.
- ✓ material resiste à deformação até ruptura de planos da estrutura cristalina → deformação plástica
- ✓ material rompe após grande deformação

*Comportamento
Mecânico*

Estágios na Deformação de um Polímero Semicristalino

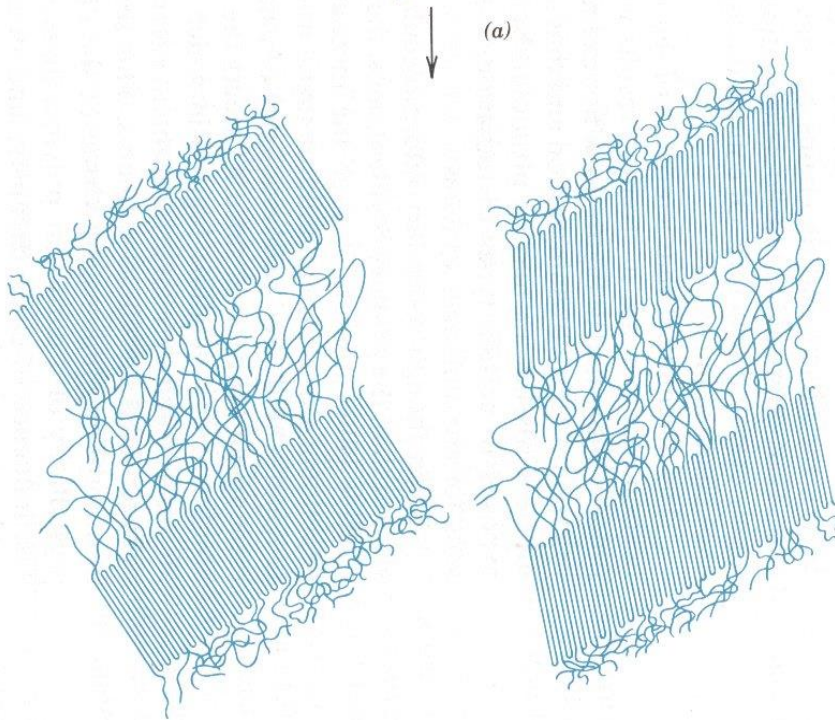
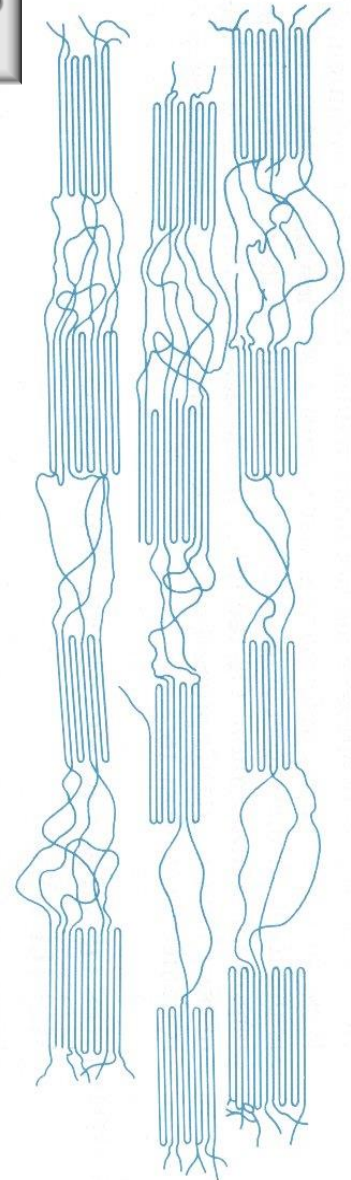


(a) 2 lamelas com cadeias dobradas

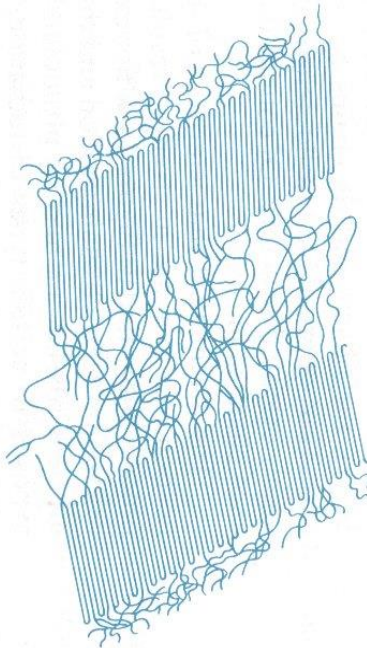
(d) Separação de segmentos de blocos cristalinos durante o 3º estágio;

(e) Orientação dos segmentos de bloco e cadeias de ligação com o eixo de tração no estágio final da deformação.

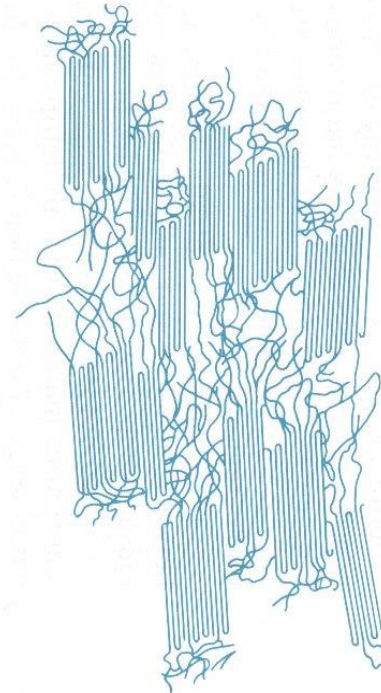
estágio de deformação;



(b)



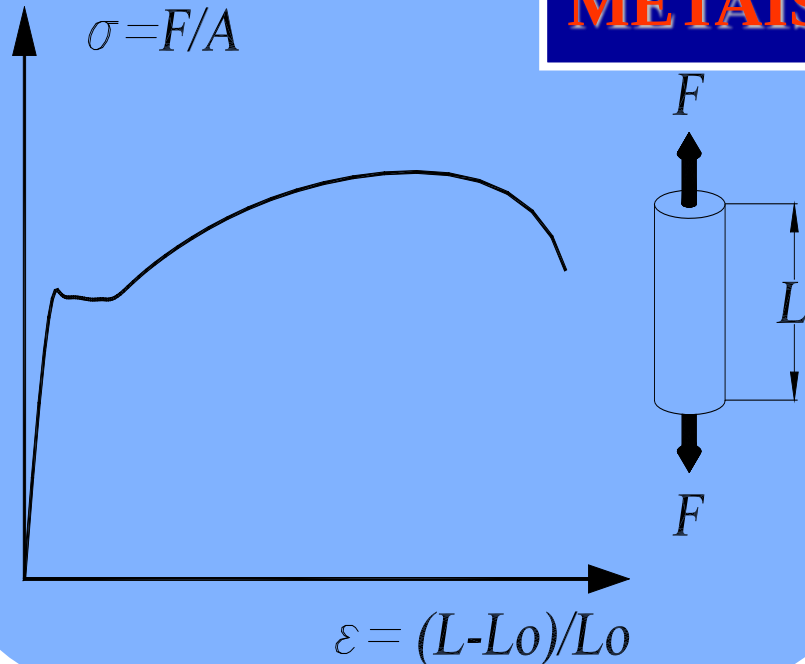
(c)



(d)

(e)

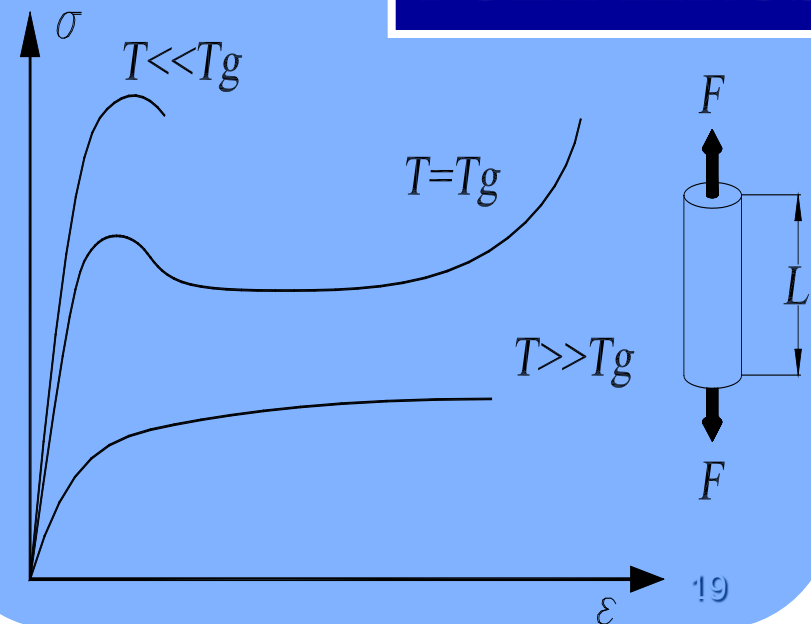
METAIS



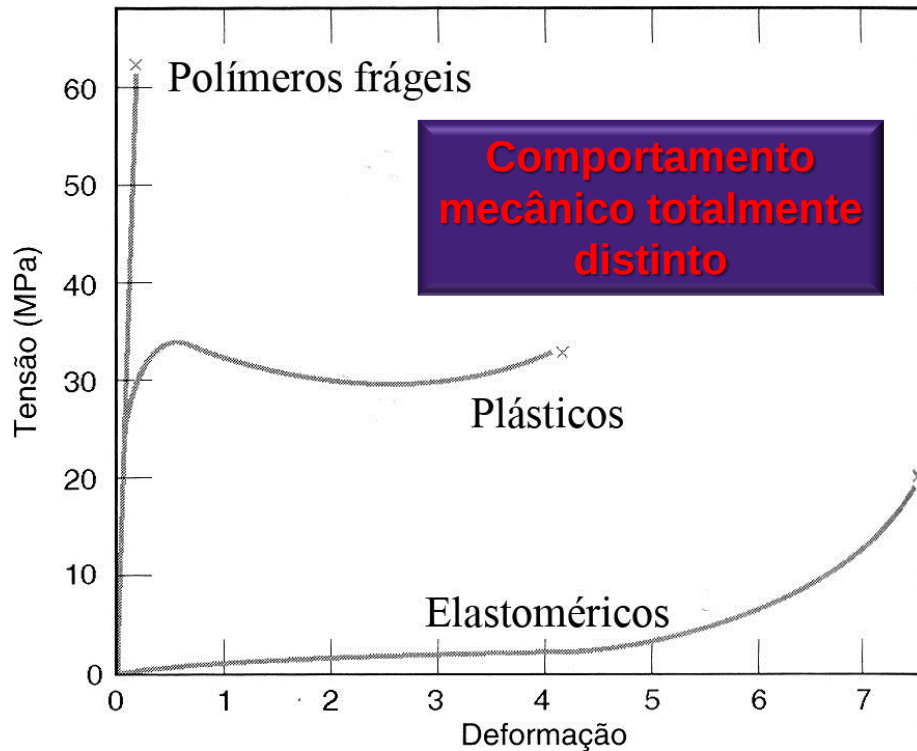
DISTINTOS COMPORTAMENTOS TENSÃO-DEFORMAÇÃO

- As propriedades mecânicas são fortemente dependentes da temperatura, do peso molecular e da umidade relativa.

POLÍMEROS



Comportamento Frágil e Dúctil dos Polímeros

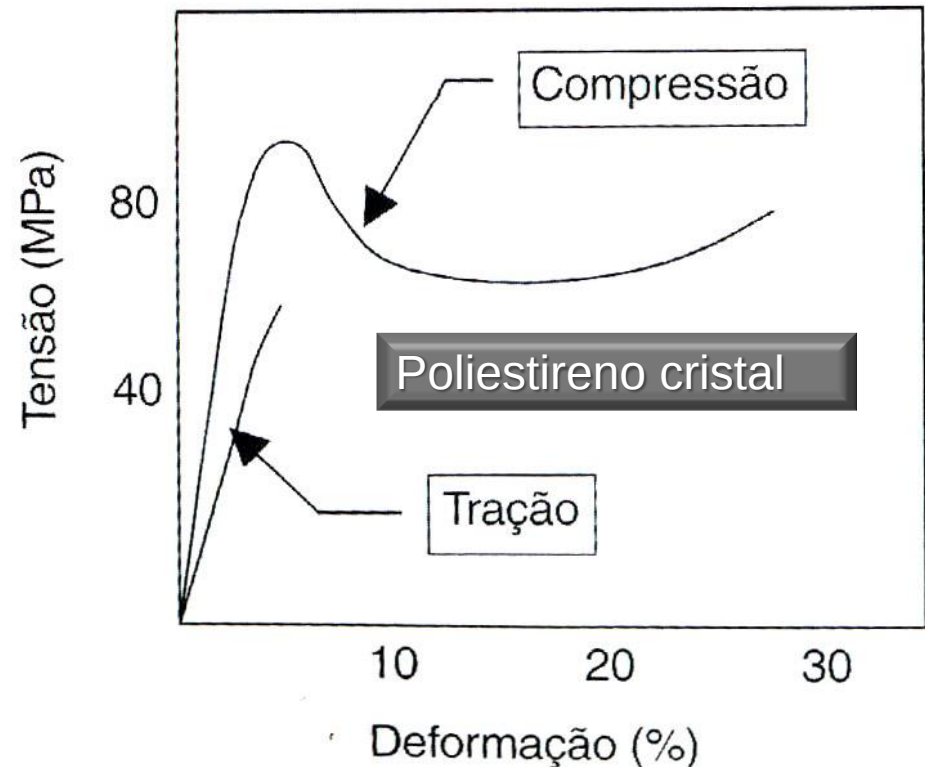


Polímero com comportamento frágil não apresentam ponto de escoamento portanto não se deformam plasticamente.

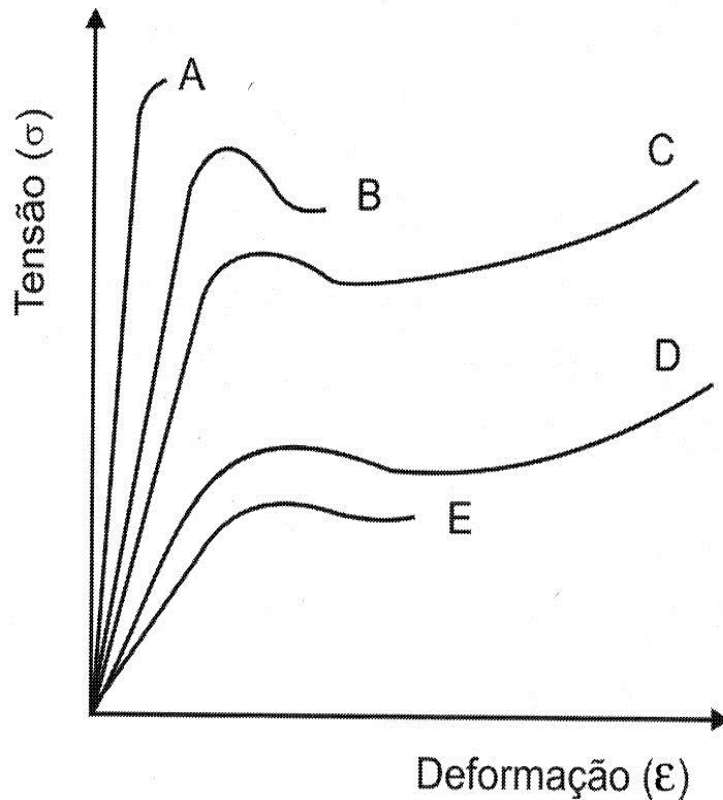
Polímero com comportamento dúctil apresentam ponto de escoamento nítido e deformam-se plasticamente.

Sob tração = comportamento frágil

Sob compressão = comportamento dúctil



Curvas Típicas σ vs. ϵ Obtidas do Ensaio de Tração para diversos Polímeros



(A)

- ✓ Elevado E e baixo alongamento na ruptura;
- ✓ Pode ou não escoar antes da ruptura;
- ✓ Exemplo típico: resina fenólica.

(B)

- ✓ Elevado E , S_e , S_{rup} , e moderado alongamento na ruptura;
- ✓ Exemplo típico: Poliacetais.

(C)

- ✓ Elevado E , S_e , S_r , alongamento na ruptura;
- ✓ Exemplo típico: Policarbonato que é considerado duro (resistente) e tenaz ao mesmo tempo.

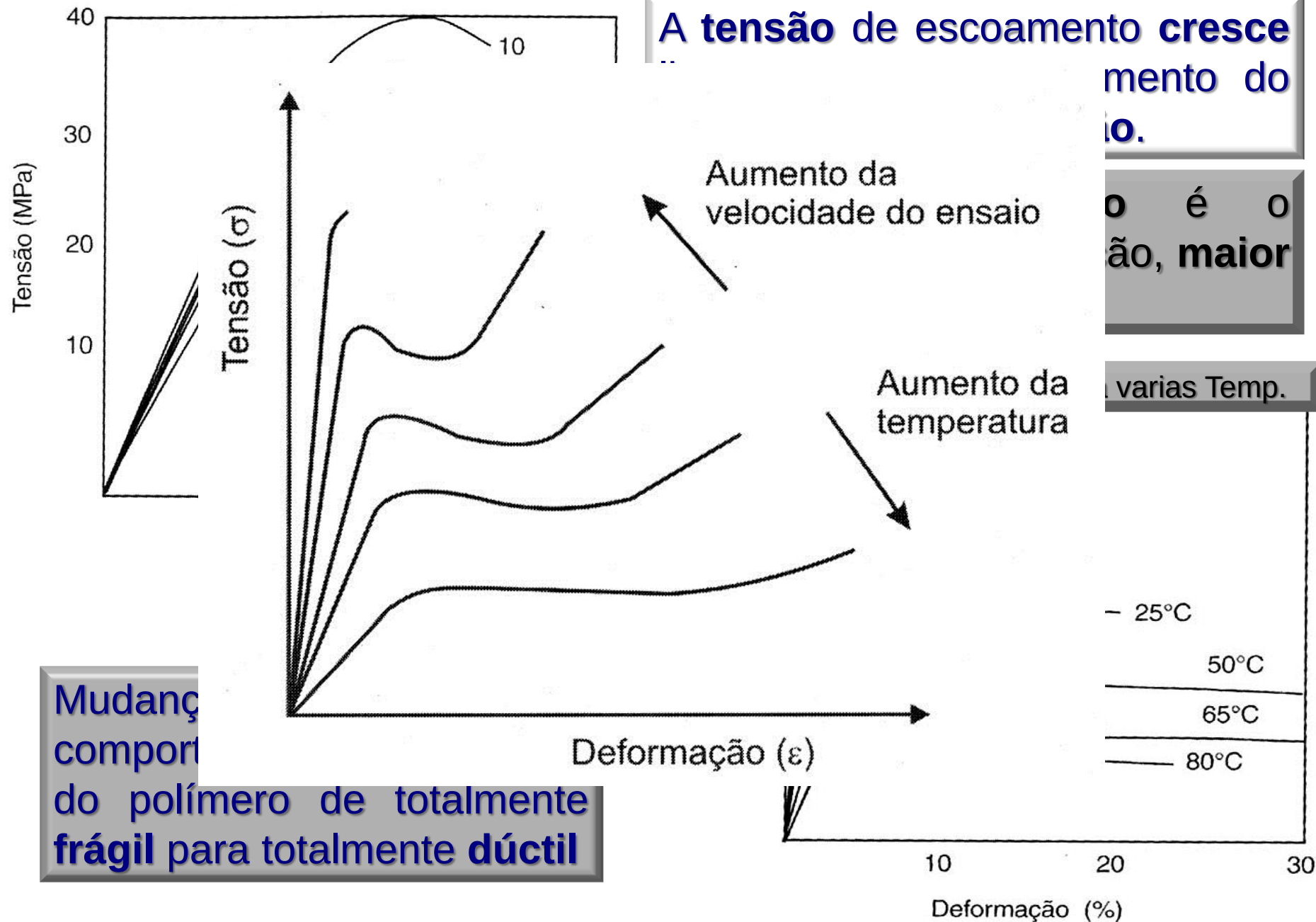
(D)

- ✓ Baixo E , S_e , elevado alongamento e tensão (S_{rup}) na ruptura;
- ✓ Exemplo típico : Polietileno.

(E)

- ✓ Baixo E , S_e , moderado a elevado alongamento na ruptura;
- ✓ Exemplo típico : Politetrafluoretileno (PTFE) - TEFLON

Efeito da taxa de deformação (TEMPO) e Temperatura sob σ vs. ϵ (Causa = Comportamento Viscoelástico)



Parâmetro (Principais)	Norma (ASTM/ISO)	Unidade
Módulo em tração	D638/527-1	MPa, GPa
Tensão e <i>deformação</i> no escoamento em tração		MPa, %
Tensão e <i>deformação</i> na ruptura em tração		MPa, %
Tensão a 50% de deformação		MPa
Módulo de fluência em tração (1h e 1000h)	899-1	MPa
Resistência ao impacto Charpy	D256/179-1	kJ/m ²
Resistência ao impacto Charpy com entalhe	D6110	kJ/m ²
Resistência a tração-impacto com entalhe	8256-1	kJ/m ²
Módulo em flexão	D790/178 (3 pontos) e D6272 (4 pontos)	MPa
Tensão de flexão na ruptura		MPa
Resistência a flexão		MPa
Modulo Elasticidade Tangente em flexão		MPa

Comparação das Propriedades de Resistência a Ruptura e Módulo de alguns Materiais

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)
Compostos grafite-epóxi	280
Aço	210
Alumínio	70
Epóxi reforçado com fibra de vidro	40
Poliéster reforçado com fibra de vidro	14
Nylons reforçado com 30% de fibra de vidro	10
Acrílicos	3,5
Resinas epóxi	3,1
Policarbonato	3,1
Acetal copolímero	2,9
Polietileno de alto peso molecular	0,7

Material	Tensão à tração na ruptura (MPa)	Tensão à compressão na ruptura (MPa)
Aço para construção civil	≥ 370	370
Concreto	1,5 – 3,5	20 – 40
Plástico rígido não reforçado	10 – 150	7 – 200
Plásticos reforçados (compósito)	200 – 1000	150 – 500

Porque os polímeros apresentam resistência mecânica bastante inferior comparado aos metais e cerâmicas?

Diferença na estrutura e nas ligações atômicas

Metais

Ligações muito fortes
do tipo metálica

Cerâmica

Ligações fortes do tipo
covalentes e iônica

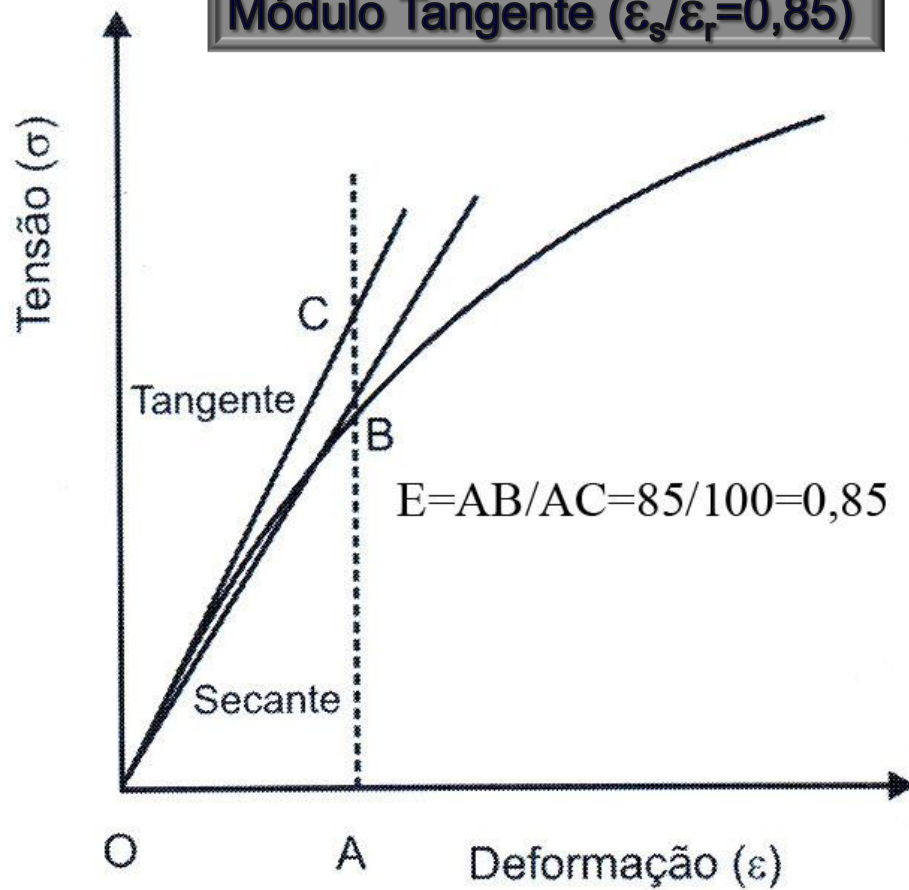
Polímero

Ligações covalentes primárias entre átomos da cadeia principal e ligações secundárias fracas com baixa energia de ligação (Van der Waals; dipolos; lig. de H_2)

Esta diferença na estrutura dos polímeros na comparação com metais e cerâmicas em termos de energia de ligação é o maior responsável pelo comportamento mecânico inferior dos polímeros.

Ensaio de Tração (ASTM D638 e ISO 527-1)

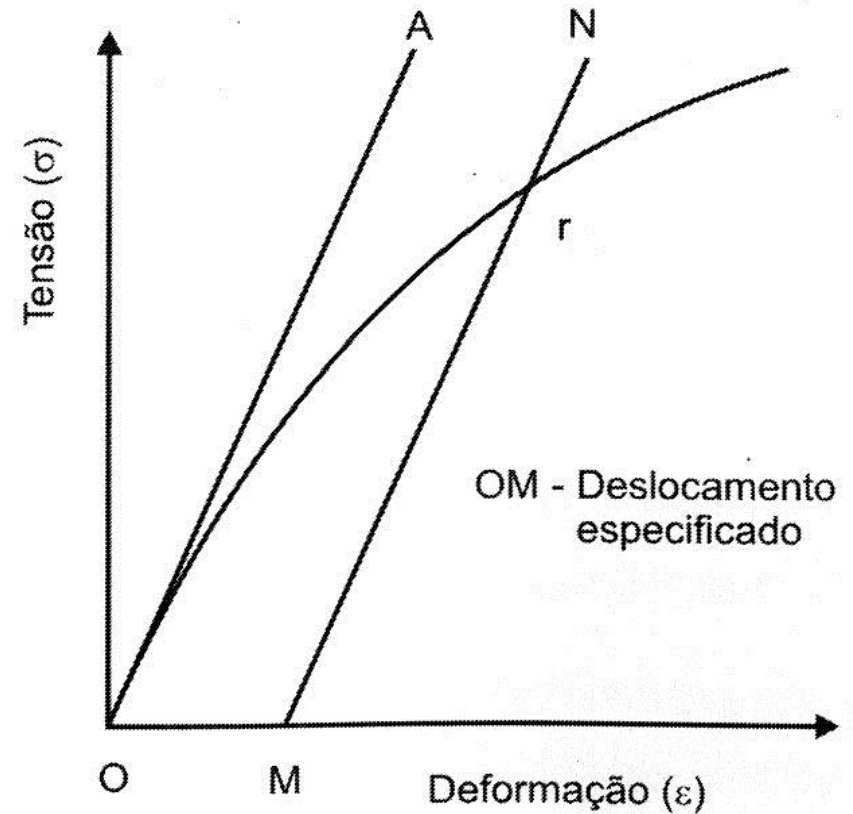
Módulo Tangente ($\epsilon_s/\epsilon_r=0,85$)



$$\% \Delta L = \Delta L / L_0$$

$$\epsilon_t = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0$$

Tensão de escoamento deslocada

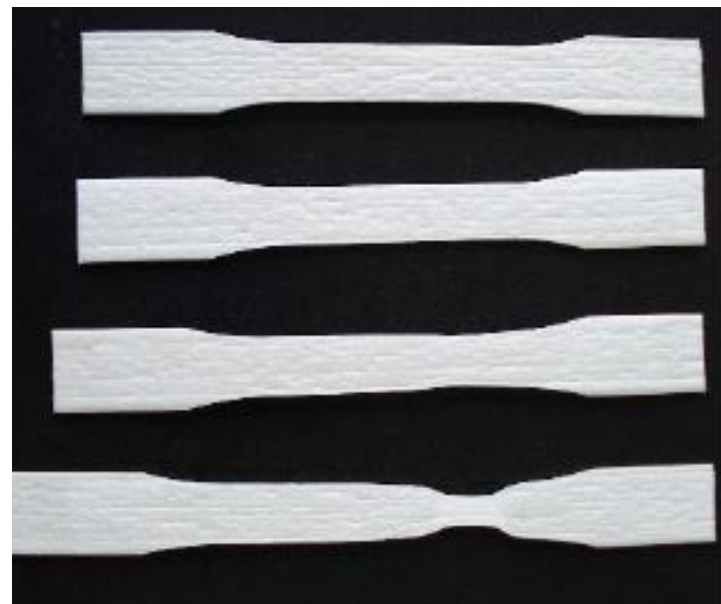
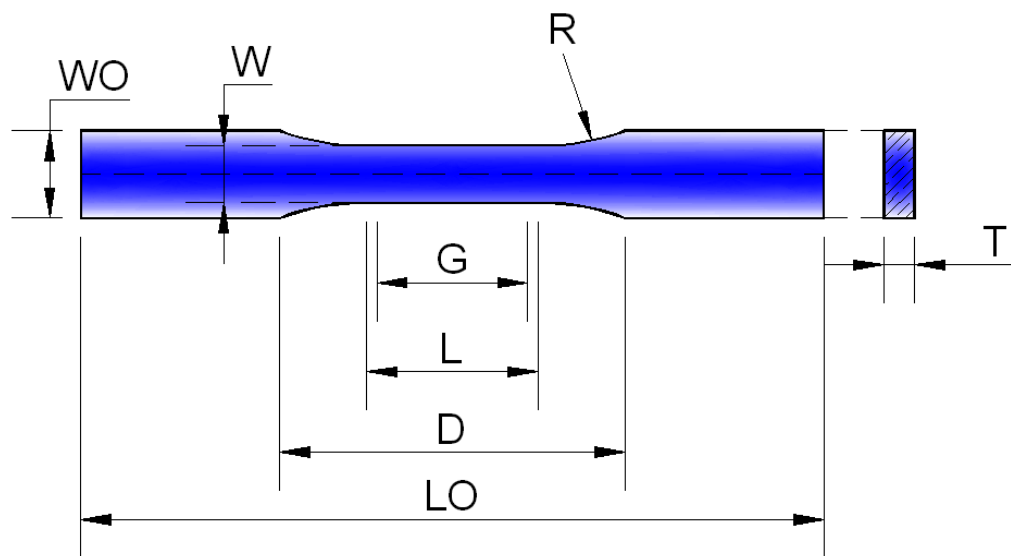


$$\sigma_t = F_{\text{máx}} / A_0$$

$$E = \sigma / \epsilon$$

Dimensões do CP para Ensaio de Tração (ASTM D638)

DIMENSÕES (MM)	$T \leq 7 \text{ mm}$		$T = 7 - 14 \text{ mm}$
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
W – LARGURA DA SEÇÃO DELGADA	13	6	19
L – Comprimento da seção delgada	57	57	57
WO – Largura total	19	19	29
LO – Comprimento total	185	183	246
G – Comprimento p/ instrumentação	50	50	50
D – Distância entre garras	115	135	115
R – raio	76	76	76



Designação da velocidade de ensaio

CLASSIFICAÇÃO ²	Tipo do corpo-de-prova	Velocidade do ensaio (mm/min)	Taxa de deformação no início do ensaio
Rígidos e semi-rígidos	I, II, III barras e tubos	5 +/- 25%	0,1
		50 +/- 10%	1
		500 +/- 10%	10
	IV	5 +/- 25%	0,15
		50 +/- 10%	1,5
		500 +/- 10%	15
Flexíveis	V	1 +/- 25%	0,1
		10 +/- 25%	1
		100 +/- 25%	10
	III	50 +/- 10%	1
		500 +/- 10%	10
	IV	50 +/- 10%	1,5
		500 +/- 10%	15

Norma: CDP rompa em um período de ½ a 5 minutos

Propriedades mecânicas de plásticos importantes

Material	Densidade (kg/m ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deformação ¹ (%)
ABS (alto impacto)	1040	38	2200	8
Acrílico	1190	74	3000	2
Resinas epóxicas	1600 - 2000	68 - 200	20000	4
PEEK ²	1300	62	3800	4
PEEK (30% carbono)	1400	240	14000	1,6
PET	1360	75	3,00	70
PET (30% fibra de vidro)	1630	180	12000	3
Policarbonato	1150	65	2800	100
Poliamida	1420	72	2500	8
Polipropileno	1200	27	1300	200 - 700
Poliestireno	1300	48	3400	3
Polietileno (BD ³)	920	10	200	400
Polietileno (AD ⁴)	1450	20 - 30	1200	200 - 100
PVC rígido	1330	48	3400	200
PVC flexível	1300	14	7	300