

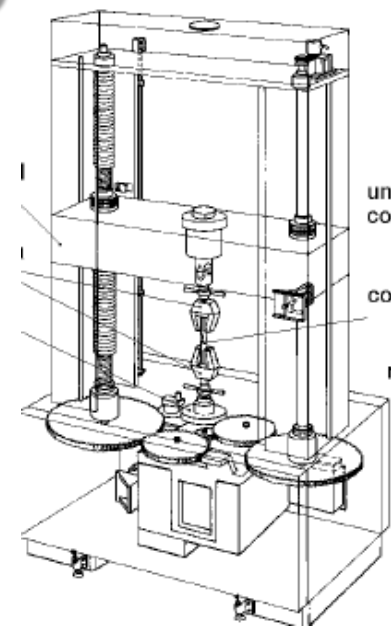


Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de Lorena

Departamento de Engenharia de Materiais

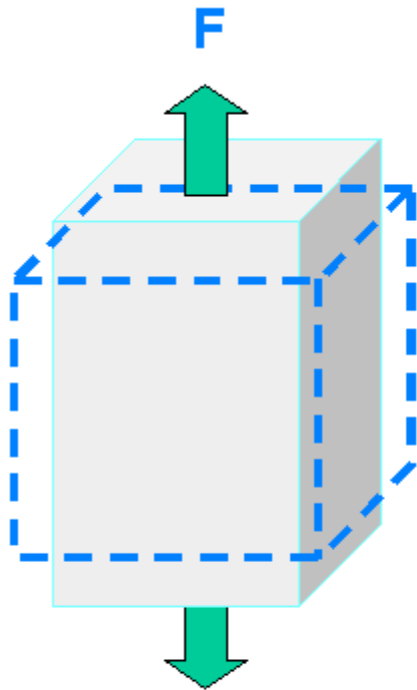
Ensaaios Mecânicos dos Materiais - Tração



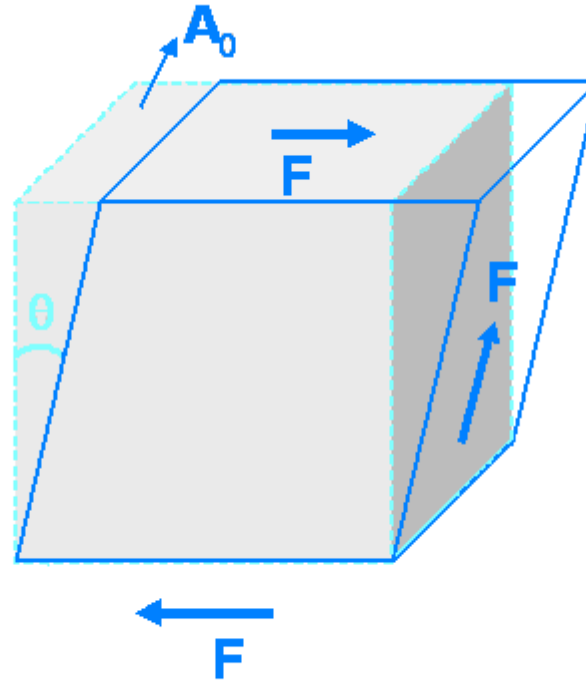
Introdução à Ciência dos Materiais

Prof. Dr. Cassius O.F.T. Ruchert, Professor Associado

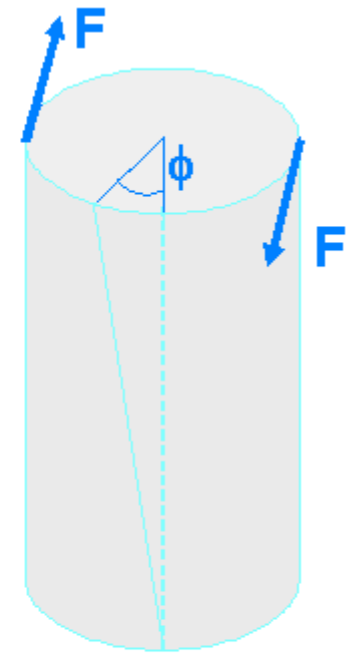
TIPOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES QUE UMA ESTRUTURA ESTA SUJEITA



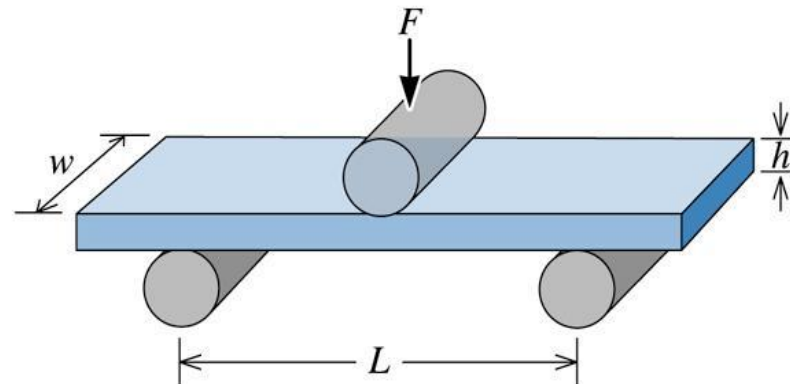
F
TRAÇÃO
ou
compressão



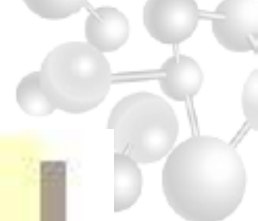
CISALHAMENTO



TORÇÃO



Flexão



- Força de tração

- Força de compressão

Tensão

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Deformação

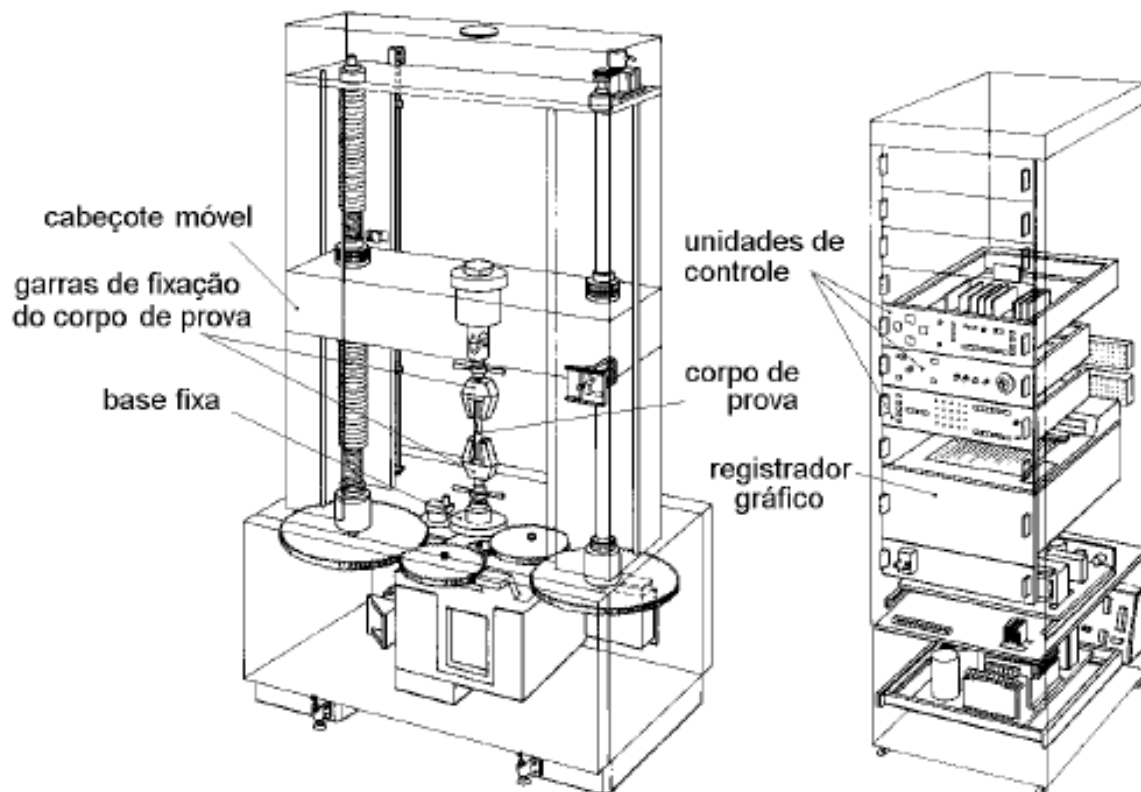
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Módulo de Elasticidade

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

Equipamento para o ensaio de tração

O ensaio de tração geralmente é realizado na máquina universal, que tem este nome porque se presta à realização de diversos tipos de ensaios.



Máquina Universal de Ensaio de Tração.

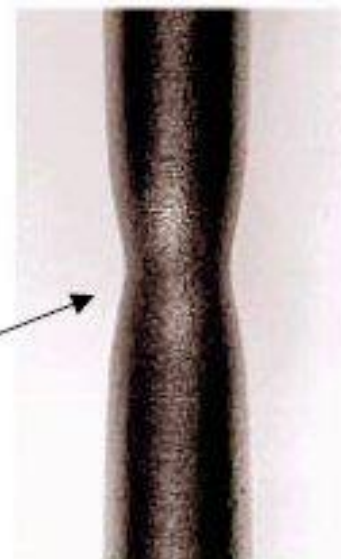
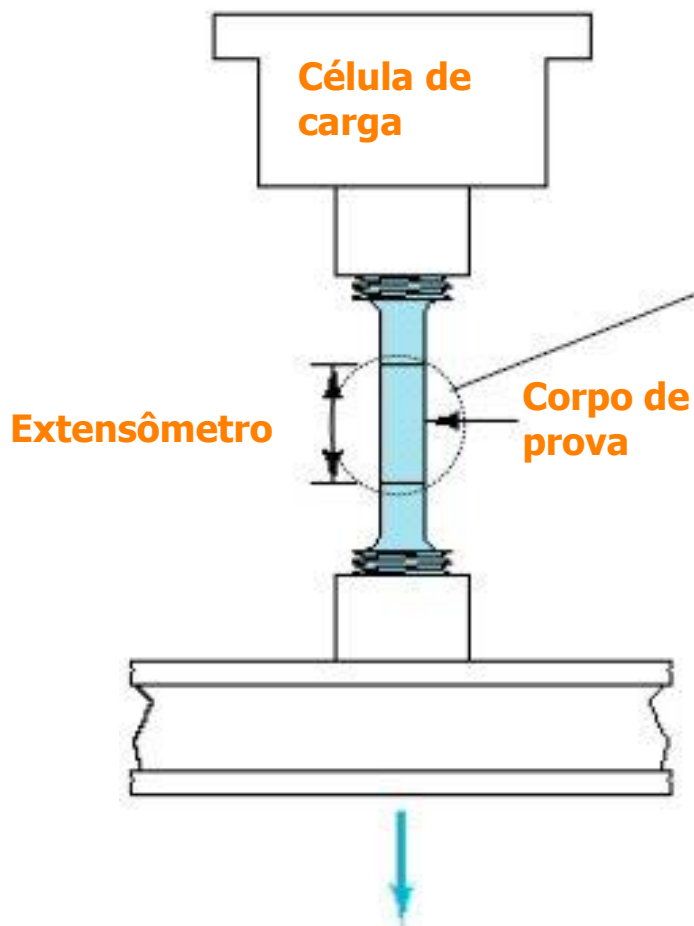
A máquina de tração

- É hidráulica ou eletromecânica, e está ligada a um dinamômetro ou célula de carga que mede a força aplicada ao corpo de prova;
- Possui um registrador gráfico que vai traçando o diagrama de força e deformação, em papel milimetrado, à medida em que o ensaio é realizado.

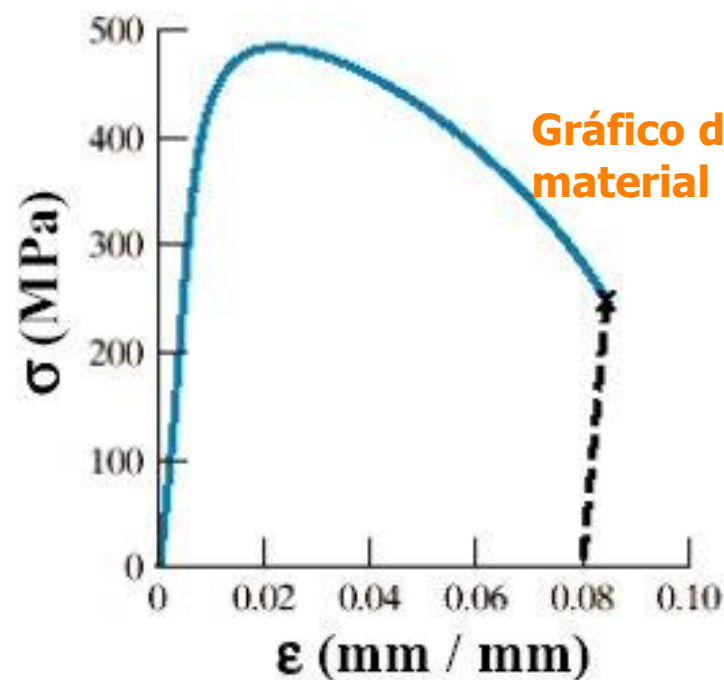
Propriedades Mecânicas dos Materiais



■ Teste de tração:

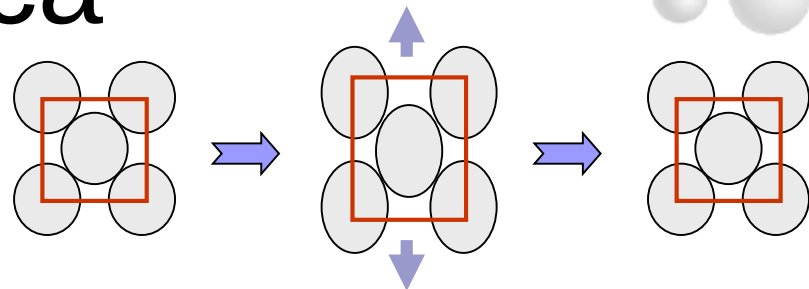


Detalhe do início da estricção do material



Deformação Elástica

Características Principais:

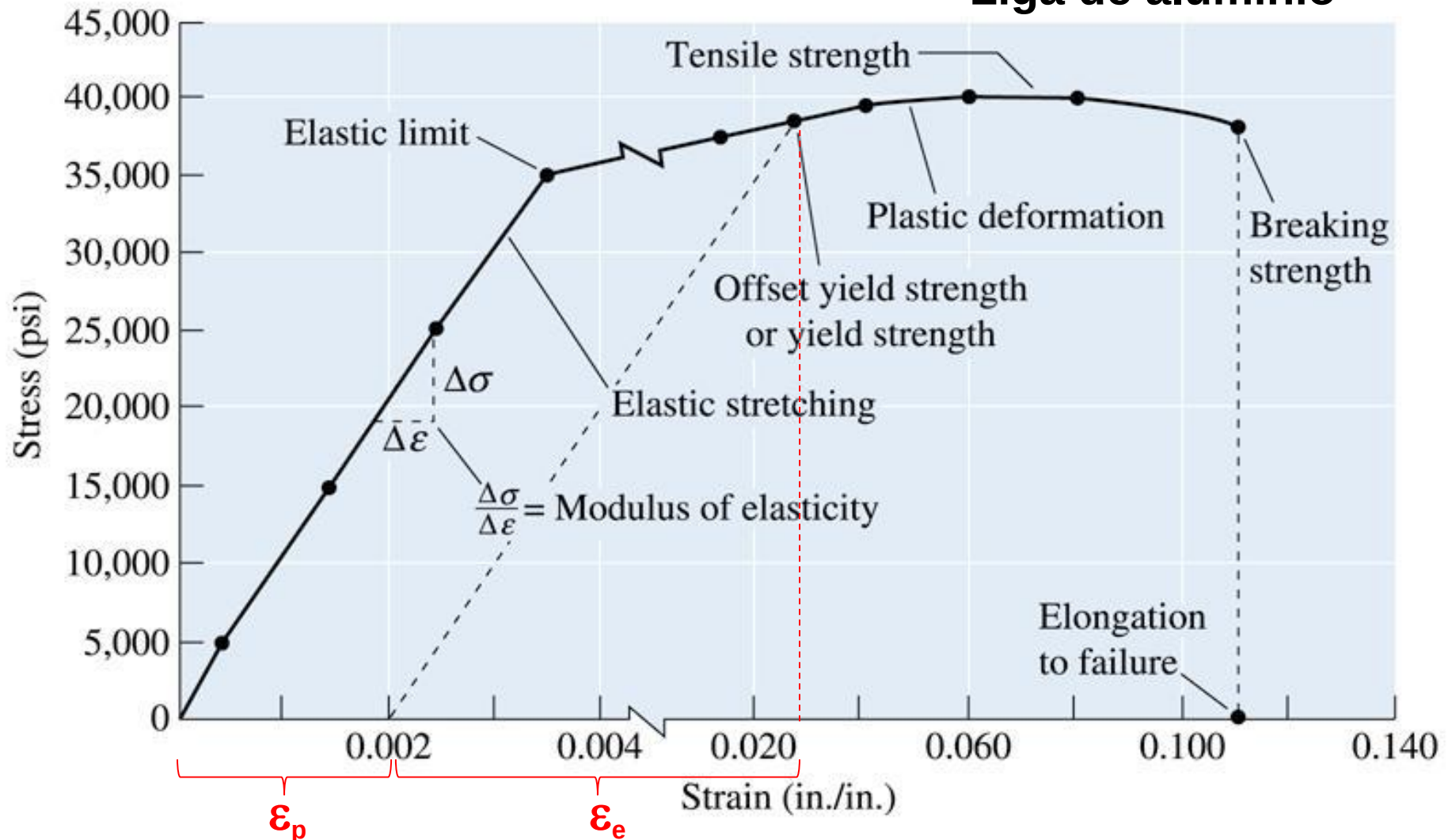


- A deformação elástica é resultado de um pequeno alongamento ou contração da célula cristalina na direção da tensão (tração ou compressão) aplicada;
- Deformação não é permanente, o que significa que quando a carga é liberada, a peça retorna à sua forma original;
- Processo no qual tensão e deformação são proporcionais (obedece a lei de Hooke) → $\sigma = E\varepsilon$ (lembra $F = KX$ -Mola);
- Gráfico da tensão x deformação resulta em uma relação linear. A inclinação deste segmento corresponde ao **módulo de elasticidade** ***E***

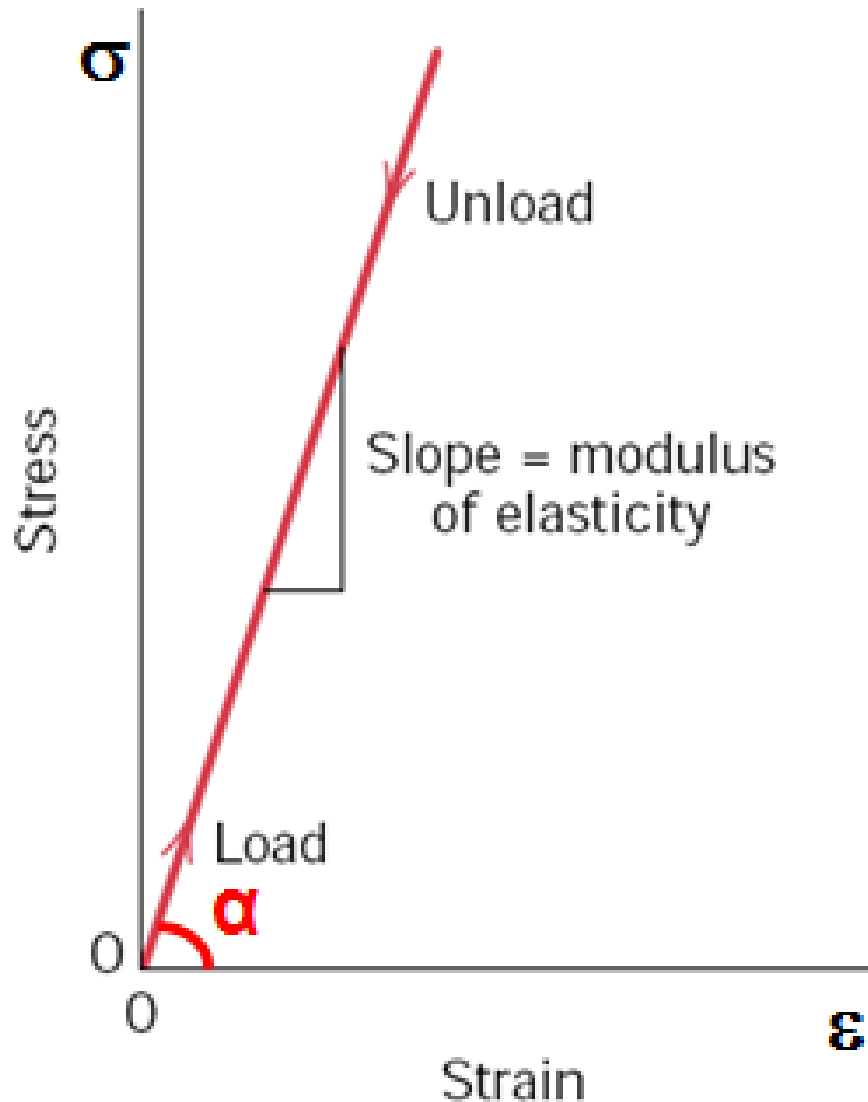
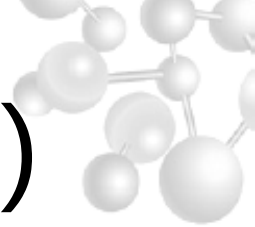
Curva Típica $\sigma \times \varepsilon$ (tração)



Liga de alumínio



Módulo de Elasticidade (E)



$$\sigma = E \varepsilon$$

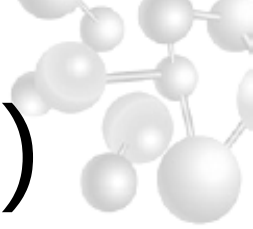
$$\tan g \alpha = \frac{\Delta S}{\Delta \varepsilon} = E$$

E = módulo de elasticidade
ou Young (GPa)

σ = tensão (MPa)

ε = deformação (mm/mm) 8

Módulo de Elasticidade (E)



Principais características:

- Quanto maior o módulo, mais rígido será o material ou menor será a deformação elástica;
- O módulo do aço (≈ 200 GPa) é cerca de 3 vezes maior que o correspondente para as ligas de alumínio (≈ 70 GPa), ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade, menor a deformação elástica resultante.
- O módulo de elasticidade corresponde a ***rigidez*** ou uma ***resistência*** do material à deformação elástica.
- O módulo de elasticidade está ligado diretamente com as forças das ligações interatômicas.

Módulo de Elasticidade – Aço vs. Alumínio

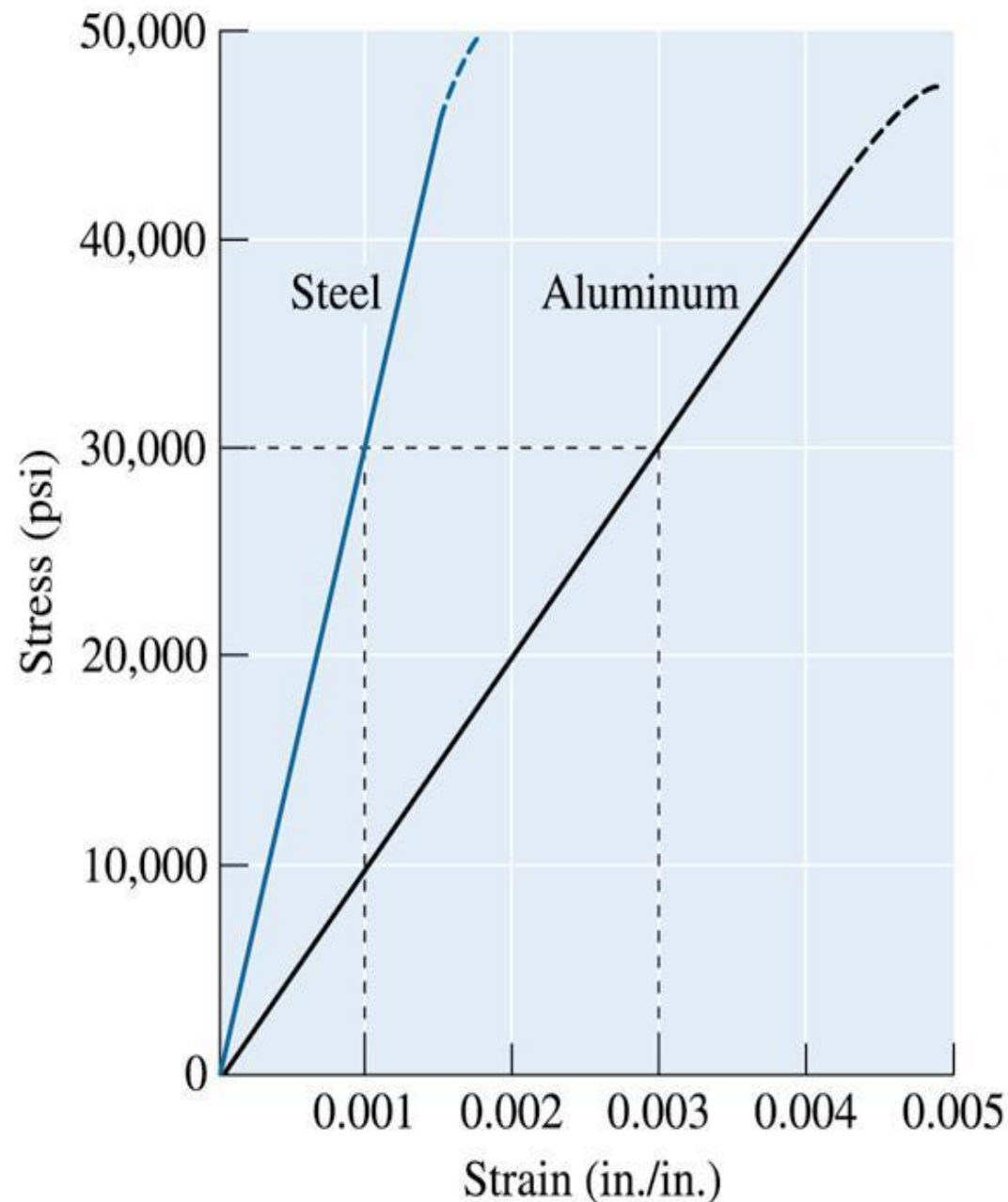


TABLE 2.5 Elastic and Shear Moduli and Poisson Ratios for Polycrystalline Metals^a

<i>Metal</i> (20°C)	<i>E</i> (GPa)	<i>G</i> (GPa)	<i>ν</i>
Aluminum	70.3	26.1	0.345
Cadmium	49.9	19.2	0.300
Chromium	279.1	115.4	0.210
Copper	129.8	48.3	0.343
Gold	78.0	27.0	0.440
Iron	211.4	81.6	0.293
Magnesium	44.7	17.3	0.291
Nickel	199.5	76.0	0.312
Niobium	104.9	37.5	0.397
Silver	82.7	30.3	0.367
Tantalum	185.7	69.2	0.342
Titanium	115.7	43.8	0.321
Tungsten	411.0	160.6	0.280
Vanadium	127.6	46.7	0.365

^a Adapted with permission from R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Material*, New York: John Wiley, 1976, p. 8.



Material * Polímero termoplástico ** Polímero termofixo *** Compósitos	MÓDULO DE ELASTICIDADE OU YOUNG (E)	
	GPa	10 ⁶ Psi
Polietileno alto peso molecular *	0,7	0,1
Resina Epóxi **	3,5	0,5
Acrílicos	3,5	0,5
Epóxi reforçado com fibra vidro ***	40	5,8
Magnésio	45	6,5
Alumínio	70	10
Latão	97	14
Titânio	107	15,5
Cobre	110	16
Níquel	207	30
Aço	207	30
Compostos grafite/epóxi ***	280	40,7
Tungstênio	407	59

Deformação Plástica



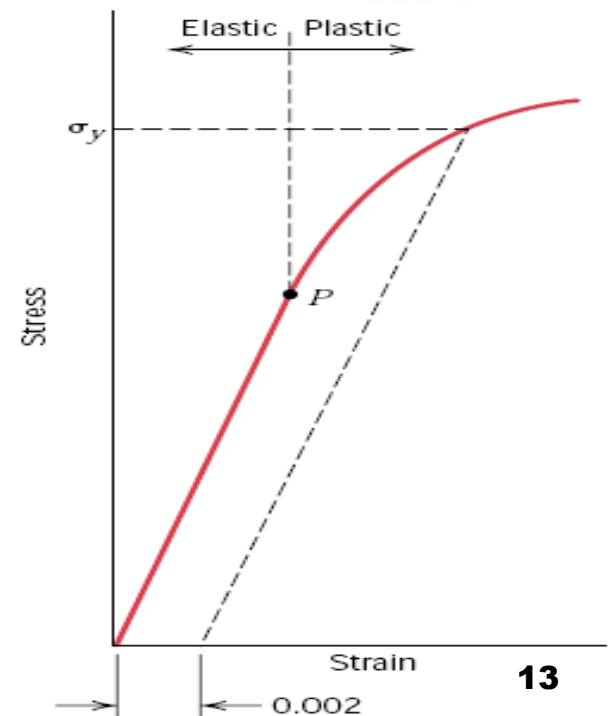
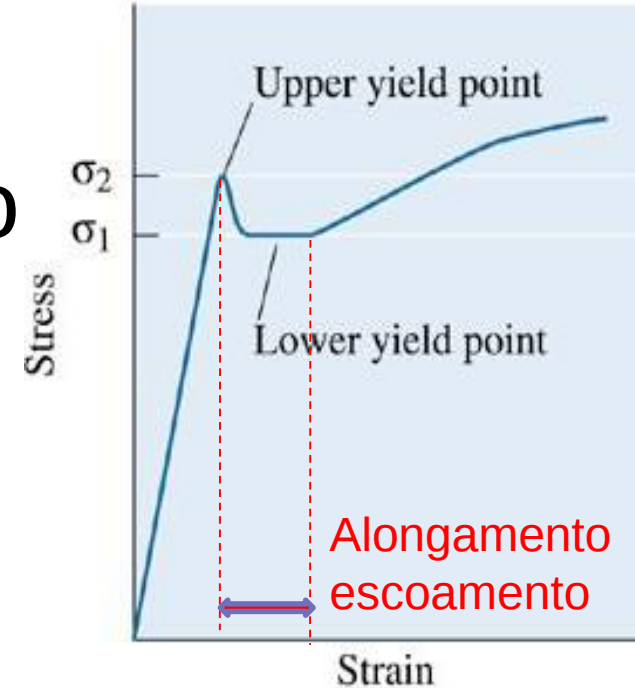
- Para a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste apenas até deformações de aproximadamente 0,2 a 0,5%.
- À medida que o material é deformado além, desse ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação (lei de Hooke) e ocorre uma deformação permanente não recuperável denominada de deformação plástica;
- A deformação plástica corresponde à quebra de ligações com os átomos vizinhos originais e em seguida formação de novas ligações;
- A deformação plástica ocorre mediante um processo de escorregamento (cisalhamento) , que envolve o movimento de discordâncias.

Limite de proporcionalidade e Tensão limite de escoamento

➤ O limite de proporcionalidade pode ser determinado como o ponto onde ocorre o afastamento da linearidade na curva tensão – deformação (**ponto P**).

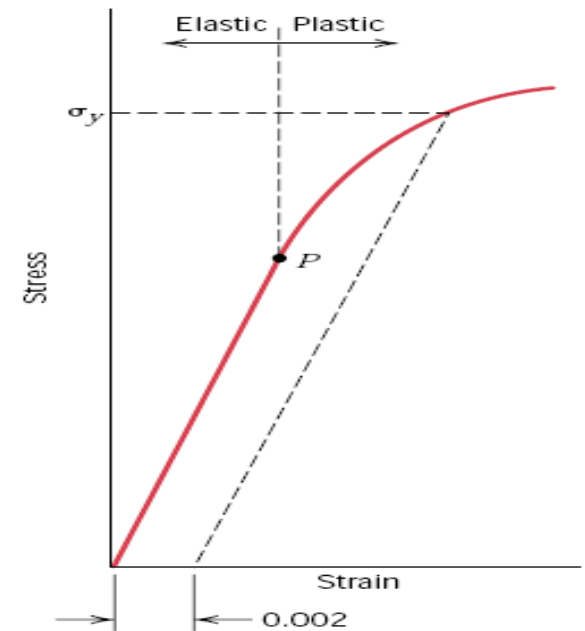
➤ A posição deste ponto pode não ser determinada com precisão. Por consequência foi adotada uma convenção: é construída uma linha paralela à região elástica a partir de uma pré-deformação de 0,002 ou 0,2%.

➤ A intersecção desta linha com a curva tensão – deformação é a **tensão limite de escoamento (σ_y)**



Limite de Escoamento

Quando não observa-se nitidamente o fenômeno de escoamento, a tensão de escoamento corresponde à tensão necessária para promover **uma deformação permanente de 0,2% ou outro valor especificado** (Ver gráfico ao lado)



Quando não nítido, utiliza-se da convenção de um deformação padrão

Metais e ligas em geral : $n = 0,2 \% \ (\epsilon = 0,002)$

Cobre e suas ligas: $n = 0,5 \% \ (\epsilon = 0,005)$

Ligas metálicas duras: $n = 0,1 \% \ (\epsilon = 0,001)$

Cerâmicos : $n = 0,1 \% \ (\epsilon = 0,001)$

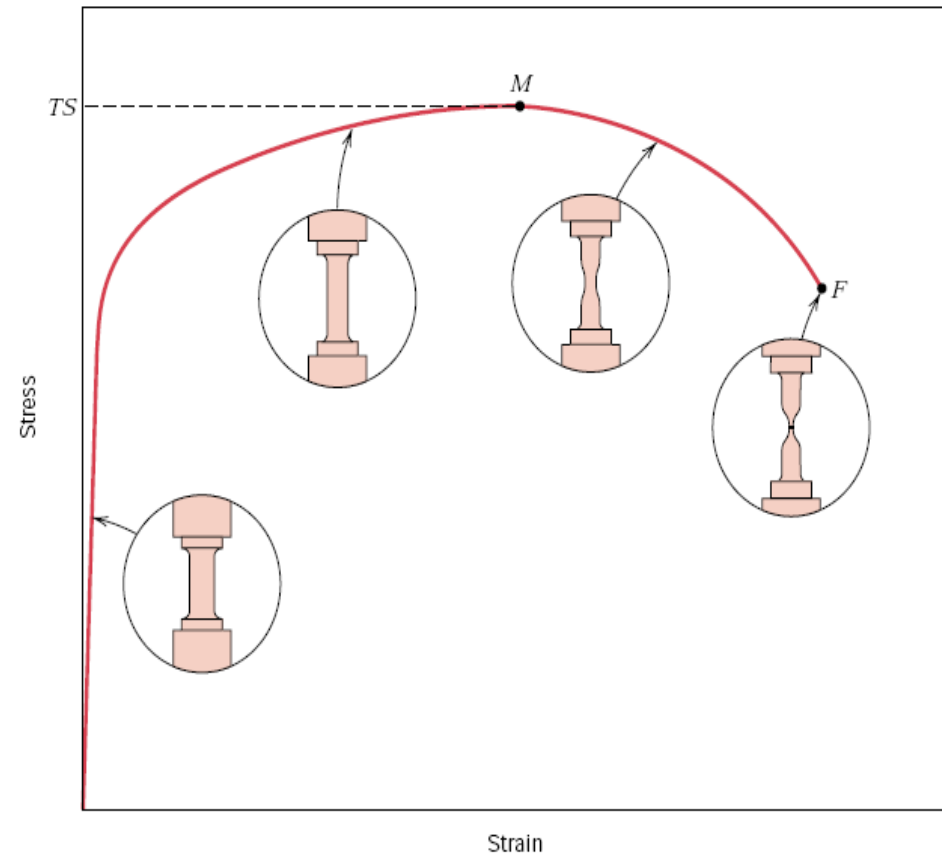
Polímeros: $n = 0,5 \% \ (\epsilon = 0,005)$

Limite de resistência à tração



➤ Após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica aumenta até um valor máximo (**ponto M**) e então diminui até a fratura do material;

➤ Para um material de alta capacidade de deformação plástica, o ϕ do CP decresce rapidamente ao ultrapassar o ponto M e assim a carga necessária para continuar a deformação, diminui até a ruptura final.



O limite de resistência à tração é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação. É a máxima tensão que pode ser sustentada por uma estrutura que se encontra sob tração (**ponto M**).

Ductilidade



Definição: é uma medida da extensão da deformação que ocorre até a fratura

Ductilidade pode ser definida como:

- Alongamento percentual $\%AL = 100 \times (L_f - L_0)/L_0$
 - onde L_f é o alongamento do CP na fratura
 - uma fração substancial da deformação se concentra na estricção, o que faz com que $\%AL$ dependa do comprimento do corpo de prova. Assim o valor de L_0 deve ser citado.
- Redução de área percentual $\%RA = 100 \times (A_0 - A_f)/A_0$
 - onde A_0 e A_f se referem à área da seção reta original e na fratura.
 - Independente de A_0 e L_0 e em geral é $\neq$ de $AL\%$

Tenacidade



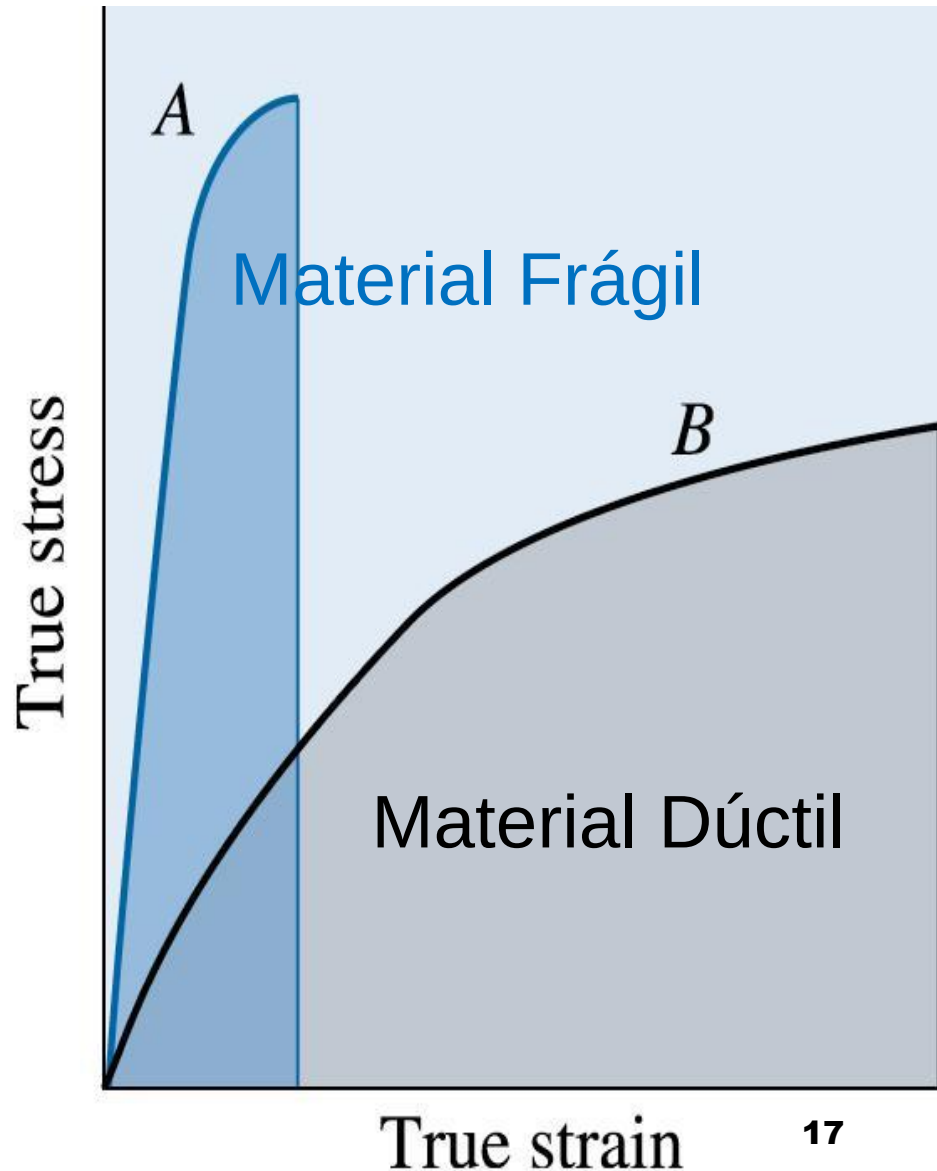
- Representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a fratura;
- Pode ser determinada a partir da curva $\sigma \times \epsilon$. Ela é a área sobre a curva;
- Para que um material seja tenaz, deve apresentar resistência e ductilidade. Materiais dúcteis são mais tenazes que os frágeis.

Materiais Dúcteis

$$U_t = (\sigma_{esc} + \sigma_{LRT})/2 \cdot \epsilon_{fratura} \text{ em N.m/m}^3$$

Materiais Frágeis

$$U_t = (2/3) \cdot \sigma_{LRT} \cdot \epsilon_{fratura} \text{ em N.m/m}^3$$



Resiliência



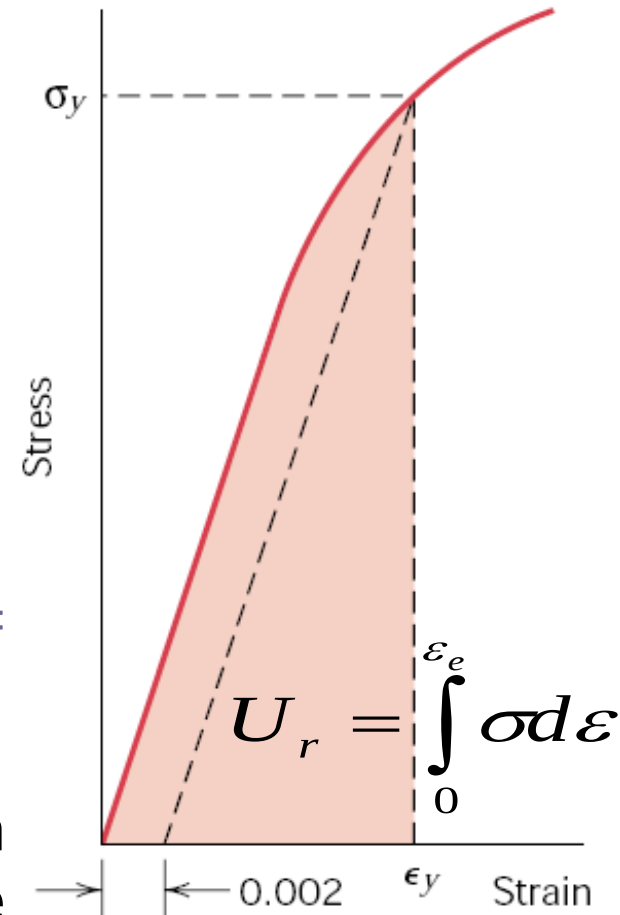
Definição: Capacidade de um material absorver energia sob tração quando ele é deformado elasticamente e devolvê-la quando relaxado (recuperar);

✓ para aços carbono varia de 35 a 120 MJ/m³

✓ O módulo de resiliência é dado pela área da curva tensão-deformação até o escoamento ou através da fórmula: $U_r = \int_0^{\epsilon_e} \sigma d\epsilon$

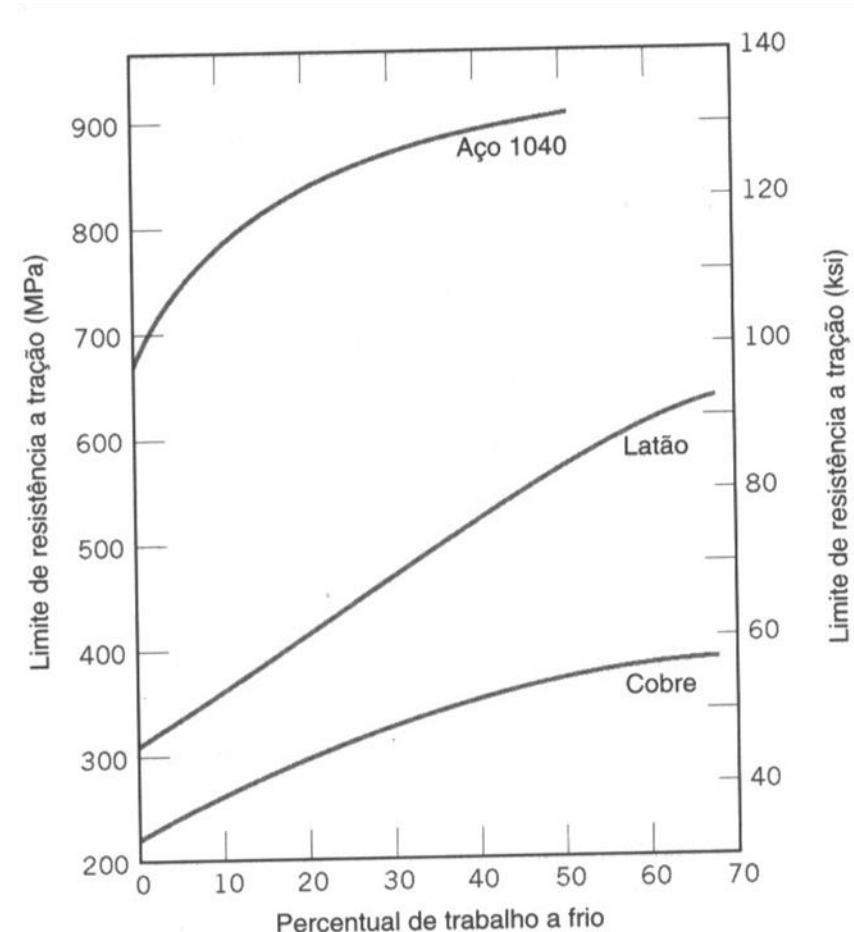
✓ Na região linear $U_r = \sigma_y \epsilon_y / 2 = \sigma_y (\sigma_y / E) / 2 = \sigma_y^2 / 2E$

Assim, materiais de alta resiliência possuem alto limite de escoamento e baixo módulo de elasticidade. Estes materiais seriam ideais para uso em molas.



Encruamento

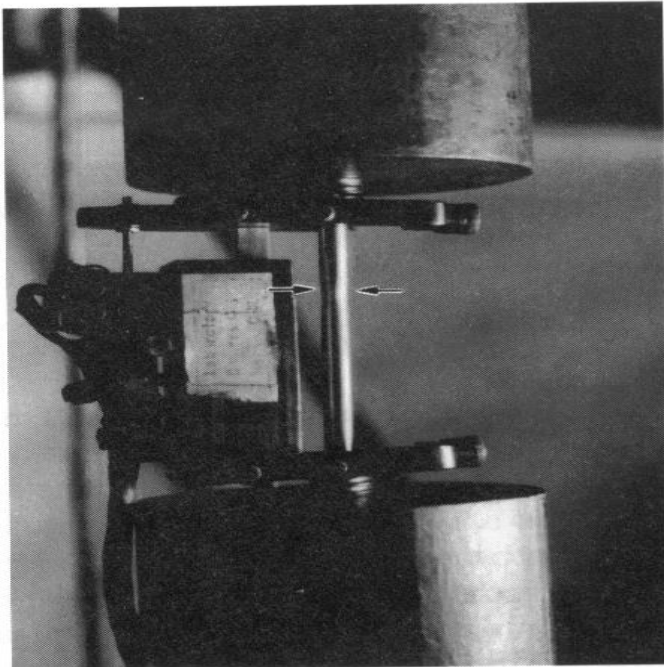
- A partir da região de escoamento, o material entra no campo de deformações permanentes, onde ocorre endurecimento por trabalho a frio (**encruamento**);
- Resulta em função da interação entre discordâncias e das suas interações com obstáculos como solutos e contornos de grãos. É preciso uma energia cada vez maior para que ocorra essa movimentação



Empescoçamento - Estricção

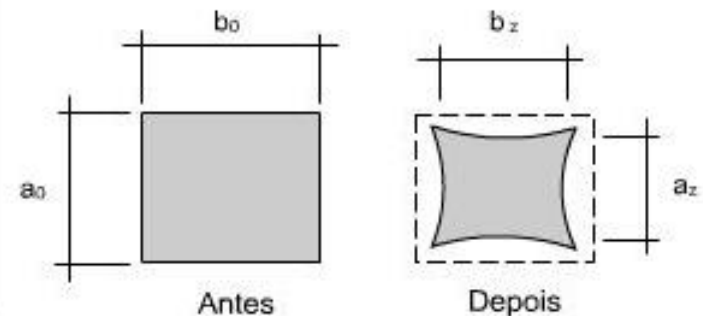


- Região localizada em uma seção reduzida em que grande parte da deformação se concentra;
- Ocorre quando o aumento da dureza por encruamento é menor que a tensão aplicada e o material sofre uma grande deformação.



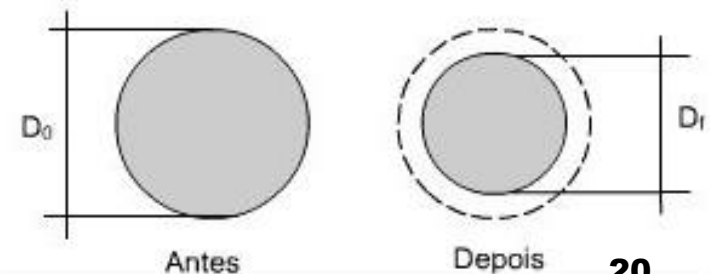
Redução da área no teste de tração - CP seção retangular

$$\varphi = q \times 100 = \frac{(a_z b_z - a_0 b_0)}{a_0 b_0} \times 100$$



Redução da área no teste de tração - CP seção circular

$$\varphi = q \times 100 = \frac{(D_0^2 - D_f^2)}{D_0^2} \times 100$$



Tensão Verdadeira (Real) e Deformação Verdadeira (Real)

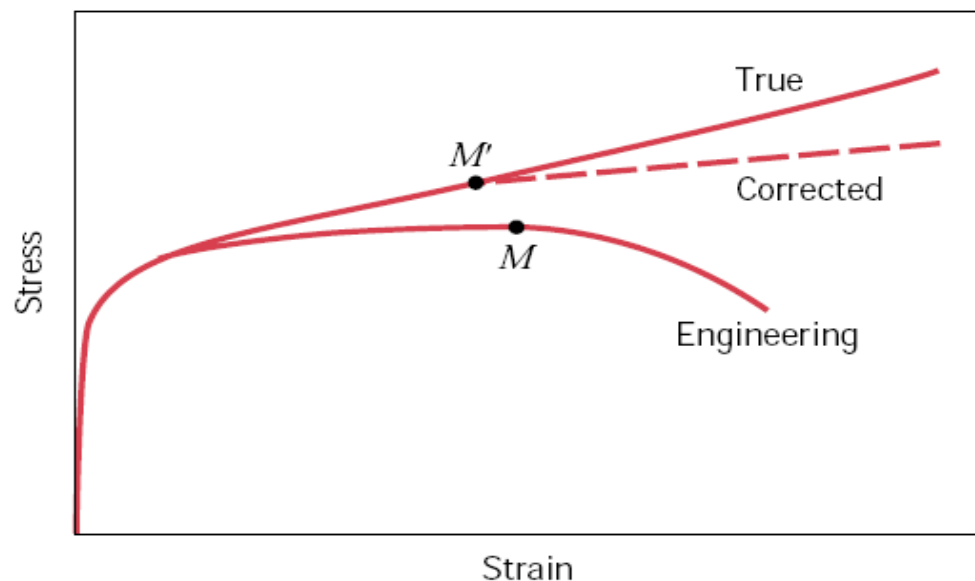


- A Tensão Verdadeira é definida como sendo a carga P dividido sobre a área instantânea, ou seja, área do pescoço após o limite de resistência à tração

$$\sigma_V = \frac{P}{A_i}$$

- A Deformação Verdadeira é definida pela expressão

$$\varepsilon_V = \ln \frac{l_i}{l_0}$$



Relações entre Tensões e Deformações Reais (Verdadeira) e Convencionais



■ Deformação

$$\varepsilon_C = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon_C$$

$$\varepsilon_r = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

■ Tensão

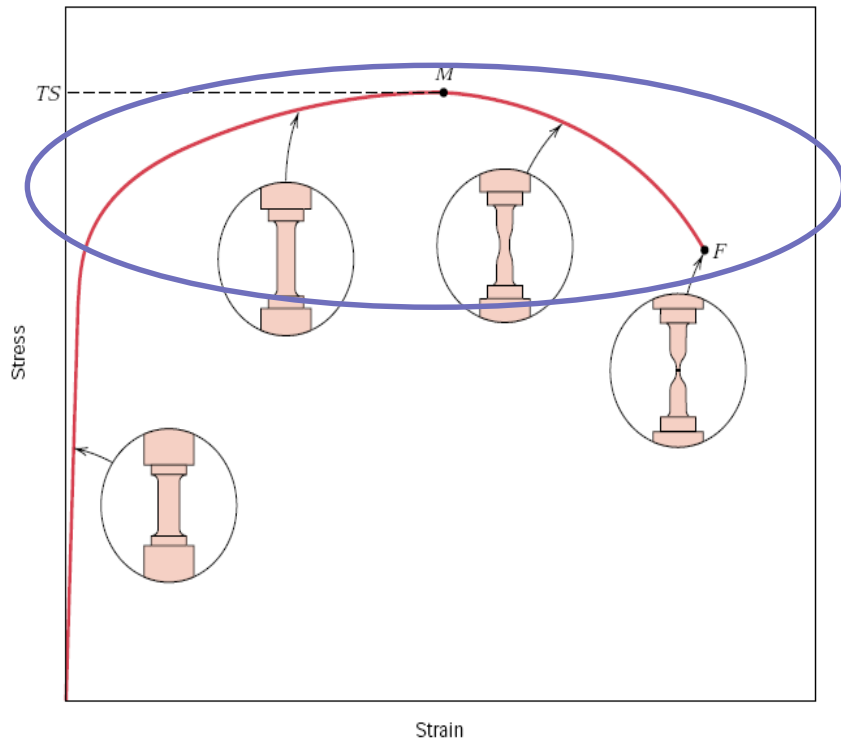
$$\ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

$$S = \frac{S_0}{1 + \varepsilon_C}$$

$$\sigma_r = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_0} (1 + \varepsilon_C)$$

$$\sigma_r = \sigma_C (1 + \varepsilon_C)$$

TENSÃO PARA A REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA



$$\sigma = K\varepsilon^n$$

K e n são constantes que dependem do material e dependem do tratamento dado ao mesmo, ou seja, se foram tratados termicamente ou encruados

- K= coeficiente de resistência (quantifica o nível de resistência que o material pode suportar)
- n= coeficiente de encruamento (representa a capacidade com que o material distribui a deformação)

K e na para alguns materiais



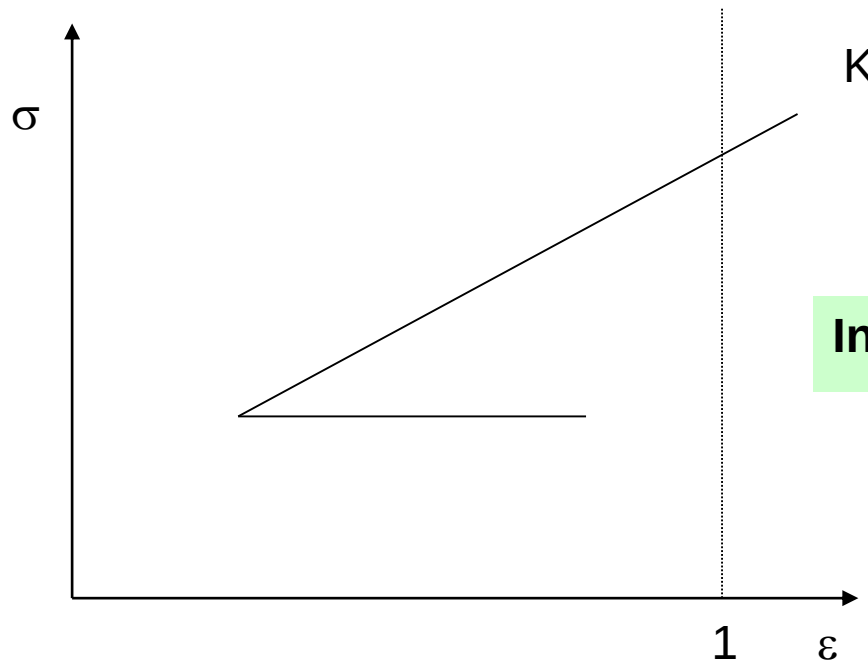
Material	n	K (MPa)
Aço baixo teor de carbono recozido	0,26	530
Aço 4340 recozido	0,15	640
Aço inox 304 recozido	0,45	1275
Alumínio recozido	0,2	180
Liga de Alumínio 2024 T	0,16	690
Cobre recozido	0,54	315
Latão 70-30 recozido	0,49	895

Determinação de K e n



$$\blacksquare \log \sigma = \log k + n \log \varepsilon$$

Para $\varepsilon = 1$ → extrapolando $\sigma = k$

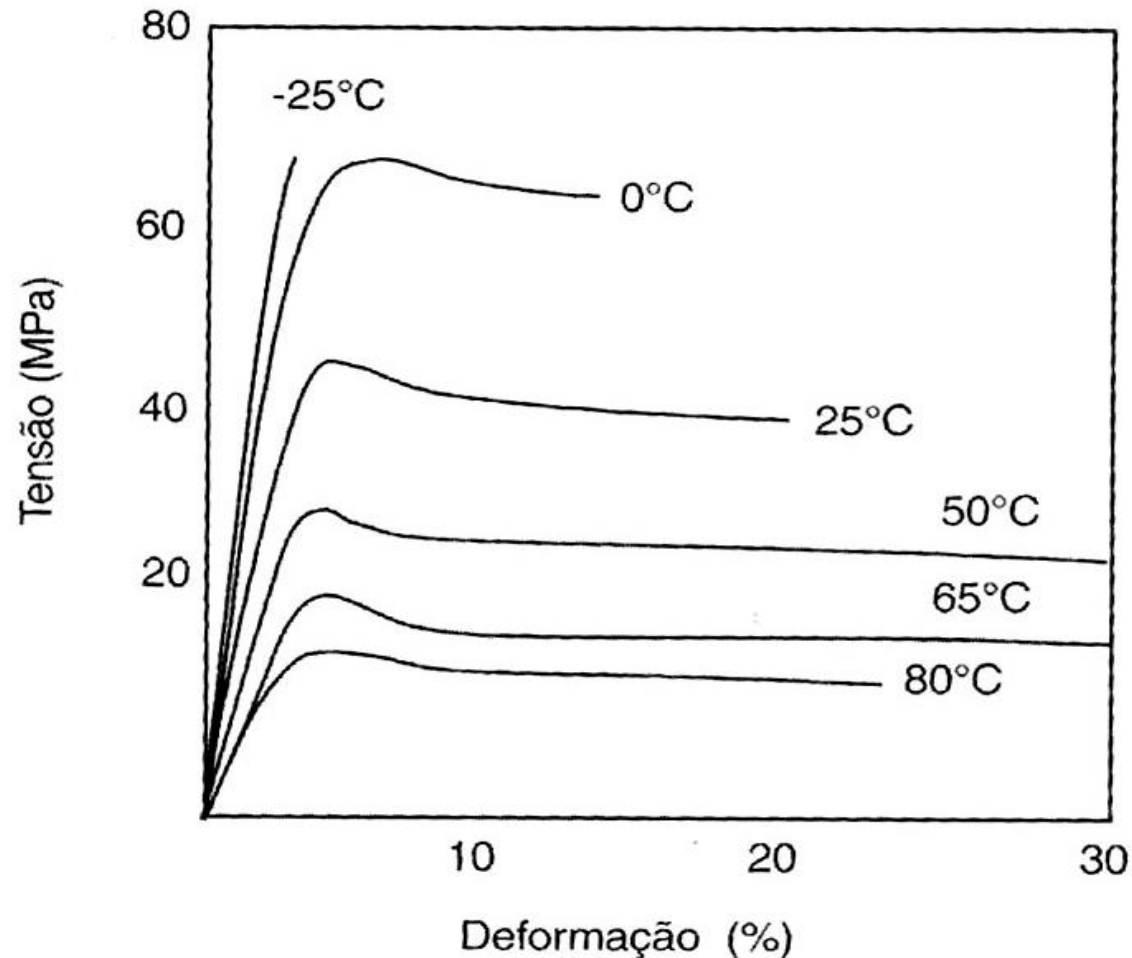


Inclinação= n

Efeito da temperatura



- A temperatura pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas levantadas pelo ensaio de tração
- Em geral, a resistência diminui e a ductilidade aumenta conforme o aumento de temperatura

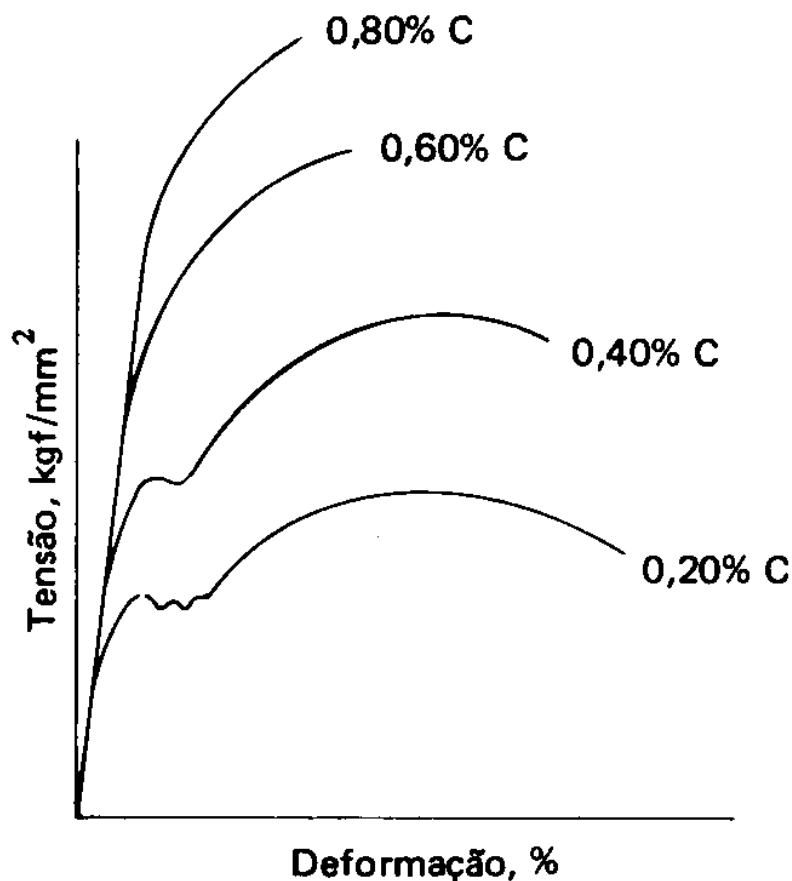


Efeito %C nas Propriedades de Tração



Diferentes limites de resistência para ligas de Fe-C(Aços)

- ✓ baixo % de carbono – dúctil e tenaz
- ✓ alto % de carbono – limite de escoamento convencional mais elevado que o de baixo C, assim ele é mais resiliente que o de baixo C
- ✓ E constante

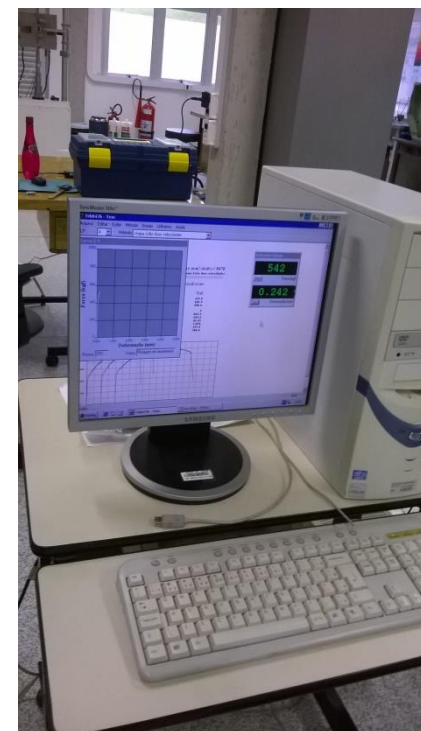
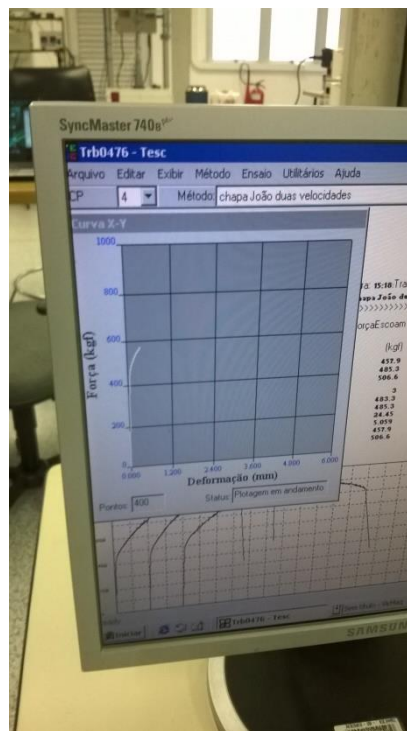
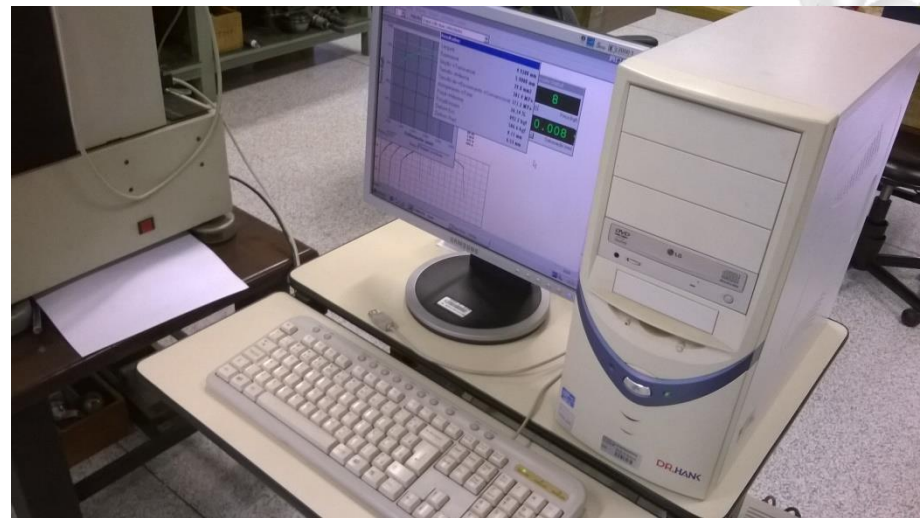


Designação	Carbono, %	Manganês, %
1006 A	0,08 máx.	0,25 – 0,40
1008 A	0,10 máx.	0,25 – 0,50
1010 A	0,08 – 0,13	0,30 – 0,60
1015 A	0,13 – 0,18	0,30 – 0,60
1020 A	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60
1025 A	0,22 – 0,28	0,30 – 0,60
1026 A	0,22 – 0,28	0,60 – 0,90
1030 A	0,28 – 0,34	0,60 – 0,90
1035 A	0,32 – 0,38	0,60 – 0,90
1038 A	0,35 – 0,42	0,60 – 0,90
1040 A	0,37 – 0,44	0,60 – 0,90
1041 A	0,36 – 0,44	1,35 – 1,65
1043 A	0,40 – 0,47	0,70 – 1,00
1045 A	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90
1046 A	0,43 – 0,50	0,70 – 1,00
1050 A	0,48 – 0,55	0,60 – 0,90
1060 A	0,55 – 0,65	0,60 – 0,90
1070 A	0,65 – 0,75	0,60 – 0,90
1080 A	0,75 – 0,88	0,60 – 0,90
1095 A	0,90 – 1,03	0,30 – 0,50

Lista 05



Lista 05



Lista 05



Q7 – Os valores de P e Δl estão dados na tabela abaixo e correspondem a parte inicial do gráfico de ensaio de tração para liga de alumínio 7075 T651. O diâmetro inicial de ensaio foi de 9,07mm e o comprimento inicial L_0 era 58,8mm.

- (a) Desenhe o gráfico tensão-deformação de engenharia e verdadeiro.
- (b) Determine a tensão de escoamento para uma deformação de 0,002.
- (c) Qual a força necessária para causar escoamento para uma barra fabricada com a mesma liga porém com diâmetro inicial de 20 mm. Compare os valores e explique a diferença em função do diâmetro das barras (9,07 e 20mm).

P (N)	Δl (mm)
0	0
7220	0,0839
14340	0,1636
21060	0,241
26800	0,308
31700	0,380
34100	0,484
35000	0,614
36000	0,924
36500	1,279
36900	1,622

Lista 05

Tensão-deformação de Engenharia (Convencional)

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0} \quad \epsilon_c = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Tensão-deformação Verdadeiro (Real)

$$\sigma_R = \sigma_c (1 + \epsilon_c)$$

$$\epsilon_R = \ln(1 + \epsilon_c)$$

Q7 – Os valores de P e Δl estão dados na tabela abaixo e correspondem a parte inicial do gráfico de ensaio de tração para liga de alumínio 7075 T651. O diâmetro inicial de ensaio foi de 9,07mm e o comprimento inicial L_0 era 58,8mm.

$$A_0 = \pi \times \left(\frac{D_o}{2}\right)^2 \quad A_0 = \pi \times \left(\frac{9,07}{2}\right)^2$$

$$A_0 = 64,61 \text{ mm}^2$$

$$l_0 = 58,8 \text{ mm}$$

$$l_0 = 58,8 \text{ mm}$$

Lista 05

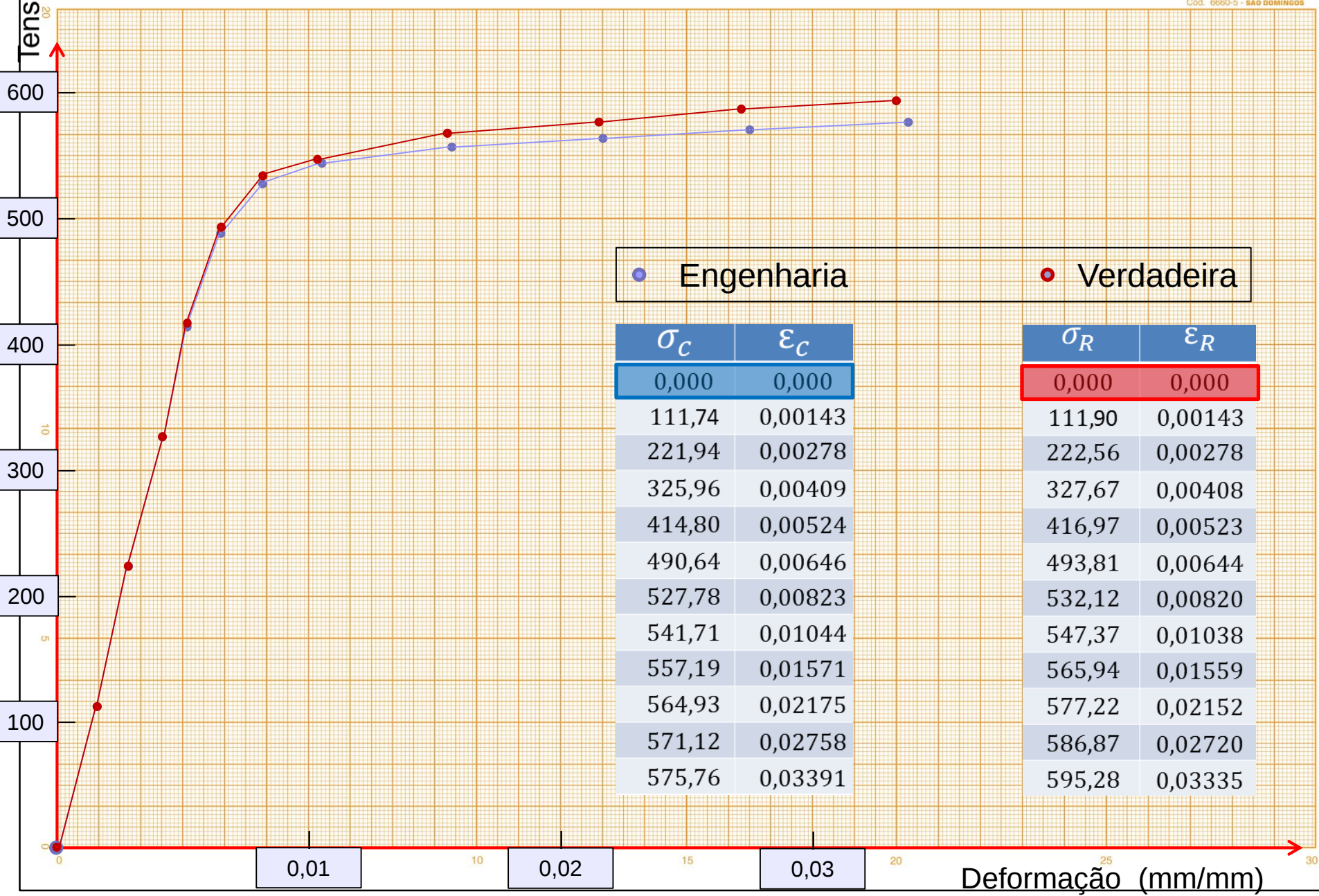
$$A_0 = 64,61 \text{ mm}^2$$

P (N)	Δl (mm)	σ_c	ε_c	$1 + \varepsilon_c$	σ_R	ε_R
0	0	$\sigma_c = 0,0000 \sigma_0$	$\varepsilon_c = 0,0000 \varepsilon_0$	1,00000	$\sigma_R = 0,0000 \sigma_c$	$\varepsilon_R = 0,0000 \varepsilon_c$
7220	0,0839	111,74	0,00143	1,00143	111,90	0,00143
14340	0,1636	221,94	0,00278	1,00278	222,56	0,00278
21060	0,241	325,96	0,00409	1,00409	327,67	0,00408
26800	0,308	414,80	0,00524	1,00524	416,97	0,00523
31700	0,380	490,64	0,00646	1,00646	493,81	0,00644
34100	0,484	527,78	0,00823	1,00823	532,12	0,00820
35000	0,614	541,71	0,01044	1,01044	547,37	0,01038
36000	0,924	557,19	0,01571	1,01571	565,94	0,01559
36500	1,279	564,93	0,02175	1,02175	577,22	0,02152
36900	1,622	571,12	0,02758	1,02758	586,87	0,02720
37200	1,994	575,76	0,03391	1,03391	595,28	0,03335

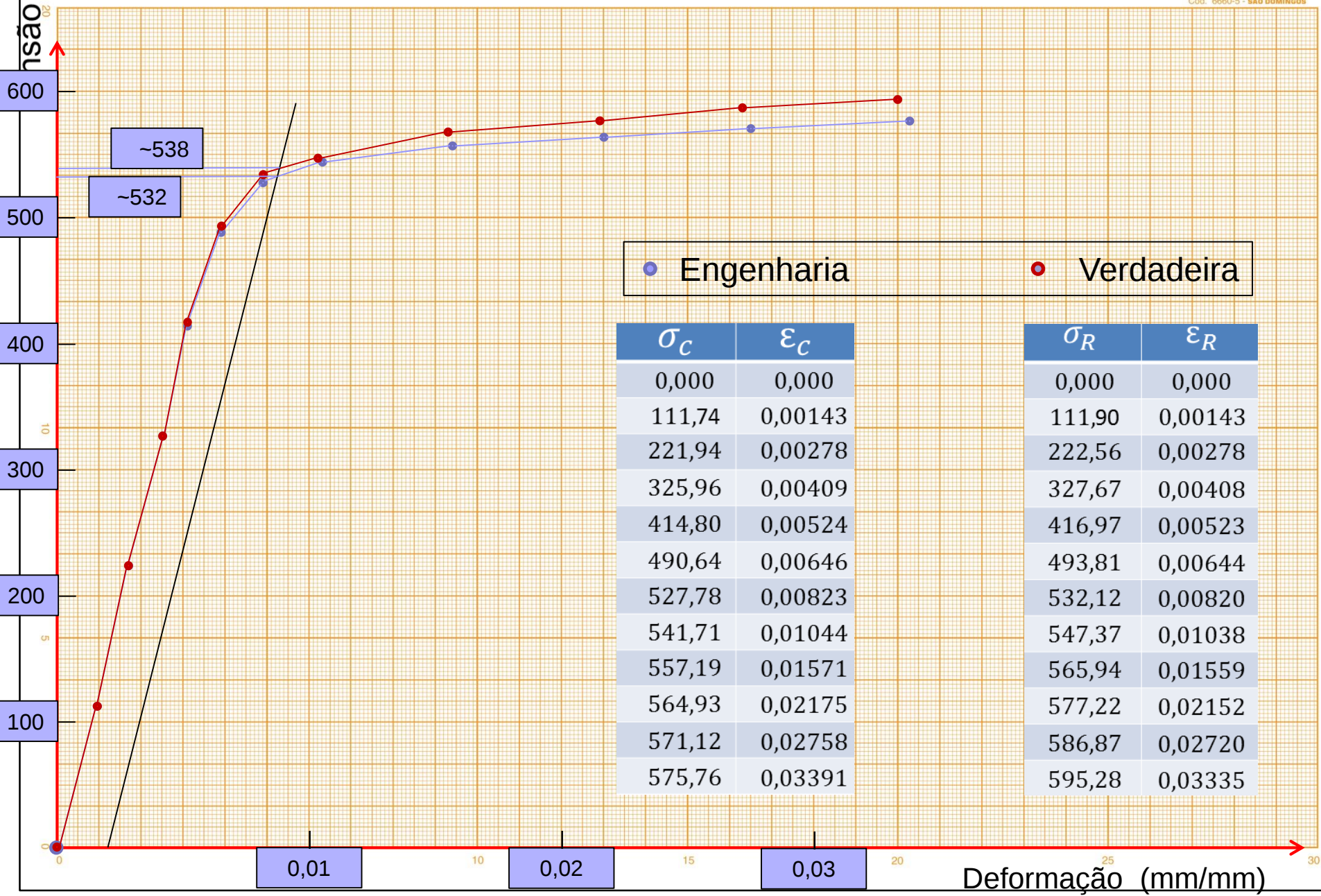
$$\sigma_c = \frac{P}{A_0} \qquad \varepsilon_c = \frac{\Delta l}{l_0} \qquad \sigma_R = \sigma_c(1 + \varepsilon_c) \qquad \varepsilon_R = \ln(1 + \varepsilon_c)$$

Lista 05

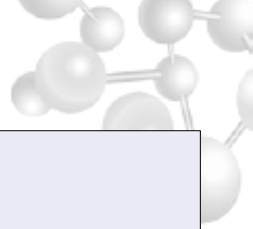
Cód. 6660-5 - SÃO DOMINGOS



Lista 05



Lista 05



Cálculo do módulo de Elasticidade (E)

$$E = \tan \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$$

$$E = \frac{414,80 - 0}{0,00524 - 0}$$

$$E = 79\,160,30 \text{ MPa}$$

$$E = 79,16 \text{ GPa}$$

Limite de ruptura

$$\sigma_r = 575,76 \text{ MPa}$$

Módulo de Resiliência

$$U_r = \frac{\sigma_{LP}^2}{2E} = \frac{\sigma_Y^2}{2E}$$

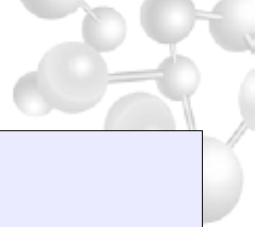
$$U_r = \frac{532^2}{2 \times 79160}$$

$$U_r = 1,78 \text{ N mm/mm}^3$$

Ver Gráfico

Ver Tabela

Lista 05



Alongamento percentual %AL

$$\%AL = 100 \times \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad \%AL = 100 \times \frac{60,79 - 58,80}{58,80}$$

$$\%AL = 3,38 \%$$

Redução de área percentual %RA (Foi adotado Df=8,9mm)

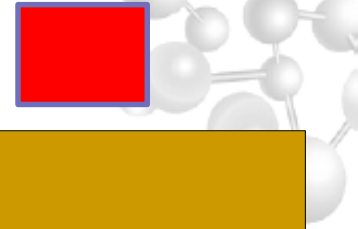
$$\%RA = 100 \times \frac{A_o - A_f}{A_o} \quad \%RA = 100 \times \frac{64,61 - 62,21}{64,61}$$

$$\%RA = 3,71 \%$$

Ver Gráfico

Ver Tabela

Lista 05



Módulo de tenacidade U_t

$$U_t = \frac{\sigma_Y + \sigma_r}{2} \times \varepsilon_f \quad U_t = \frac{532 + 575,76}{2} \times 0,03391$$

$$U_t = 18,78 \text{ Nmm/mm}^3$$

Parâmetros k e n (região plástica – curva tensão real-deformação real)

$$\sigma_R = k \varepsilon_R^n \quad \begin{cases} 547,37 = k \times 0,01038^n \\ 595,28 = k \times 0,03335^n \end{cases}$$

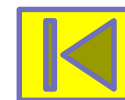
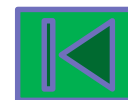
$$n \approx 0,072$$

$$k \approx 760 \text{ MPa}$$

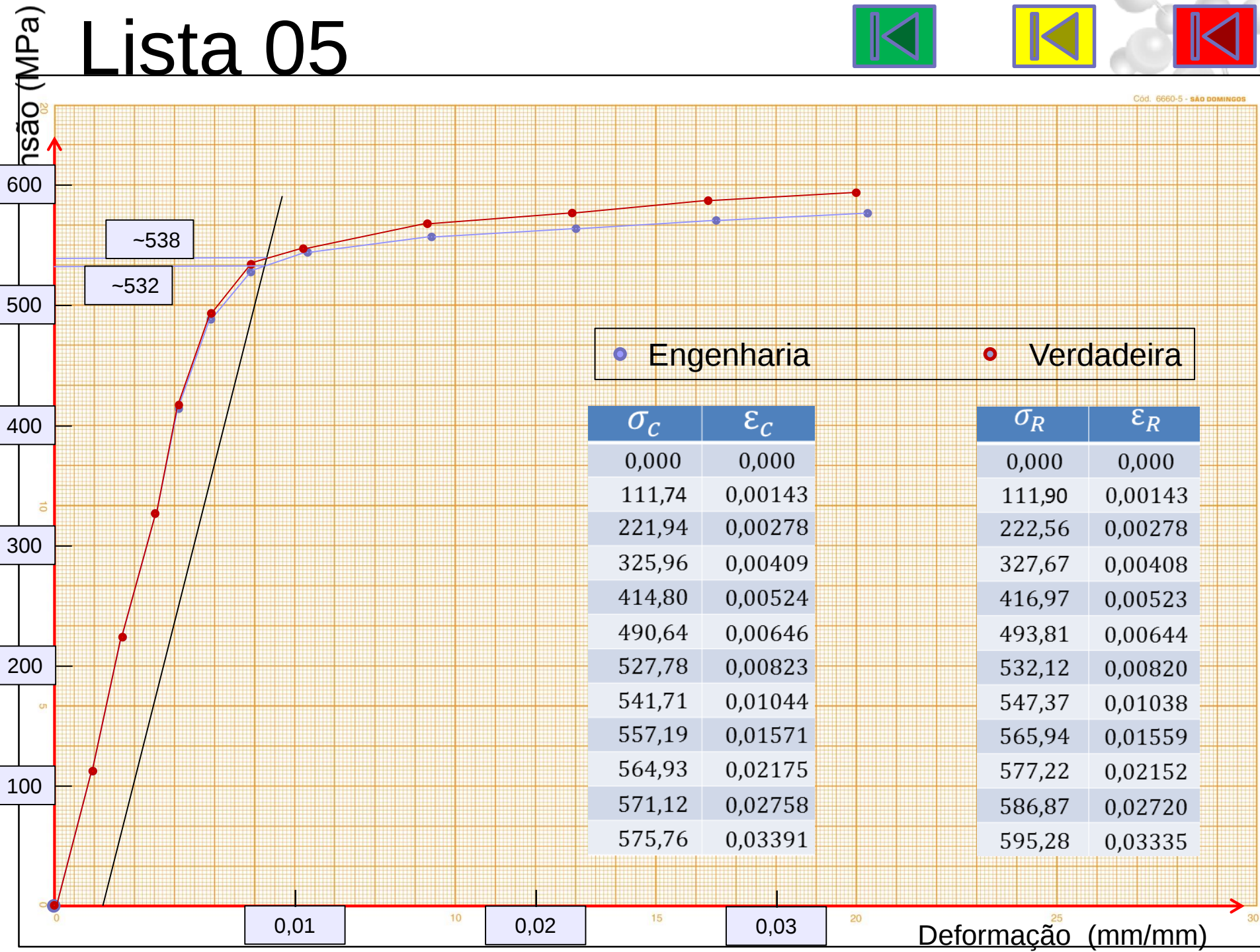
Ver Gráfico

Ver Tabela

Lista 05



Cód. 6660-5 - SÃO DOMINGOS

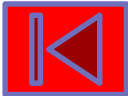
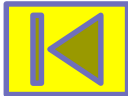
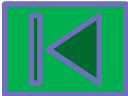


$$l_0 = 58,8 \text{ mm}$$

Lista 05

$$A_0 = 64,61 \text{ mm}^2$$

P (N)	Δl (mm)	σ_c	ε_c	$1 + \varepsilon_c$	σ_R	ε_R
0	0	0,000	0,000	1,00000	0,000	0,000
7220	0,0839	111,74	0,00143	1,00143	111,90	0,00143
14340	0,1636	221,94	0,00278	1,00278	222,56	0,00278
21060	0,241	325,96	0,00409	1,00409	327,67	0,00408
26800	0,308	414,80	0,00524	1,00524	416,97	0,00523
31700	0,380	490,64	0,00646	1,00646	493,81	0,00644
34100	0,484	527,78	0,00823	1,00823	532,12	0,00820
35000	0,614	541,71	0,01044	1,01044	547,37	0,01038
36000	0,924	557,19	0,01571	1,01571	565,94	0,01559
36500	1,279	564,93	0,02175	1,02175	577,22	0,02152
36900	1,622	571,12	0,02758	1,02758	586,87	0,02720
37200	1,994	575,76	0,03391	1,03391	595,28	0,03335



Bibliografia



- ❑ Ciência e Engenharia de Materiais – uma Introdução, Willian D. **Callister**, Jr. LTC 5. edição.
- ❑ The Science and Engineering of Materials, 4th ed Donald R. **Askeland** – Pradeep P. Phulé.
- ❑ **Dieter**, G.E. Metalurgia Mecânica 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- ❑ Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos teóricos e práticos. 5º. Edição. Sérgio Augusto de **Souza**
- ❑ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8M-01A (2001)**. Standard test methods of tension testing of metallic materials. Metric. Philadelphia.
- ❑ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E9-89a00 (2000)**. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature



OBRIGADO PELA

ATENÇÃO !!!