



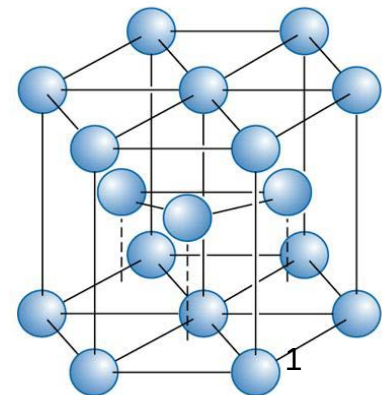
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de Lorena
Departamento de Engenharia de Materiais



Ensaaios Mecânicos dos Materiais - Tração

Introdução à Ciência dos Materiais

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

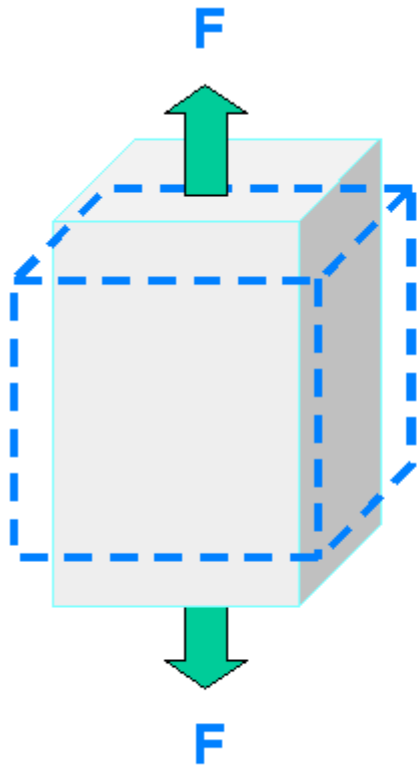




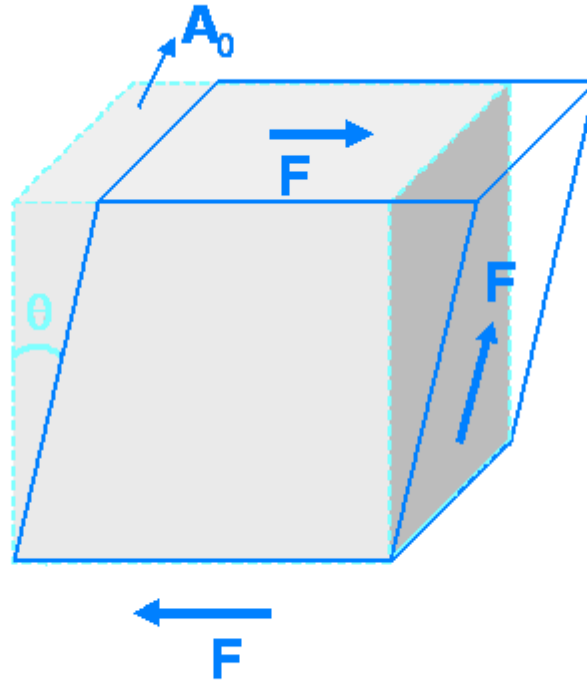
Propriedades Mecânicas de Metais

- Como os metais são materiais estruturais, o conhecimento de suas propriedades mecânicas é fundamental para sua aplicação.
- Um grande número de propriedades pode ser derivado de um único tipo de experimento, o ensaio de tração.
- Neste tipo de ensaio um material é tracionado e se **deforma** até fraturar. Mede-se o valor da **força** e do **alongamento** a cada instante, e gera-se uma curva tensão-deformação.

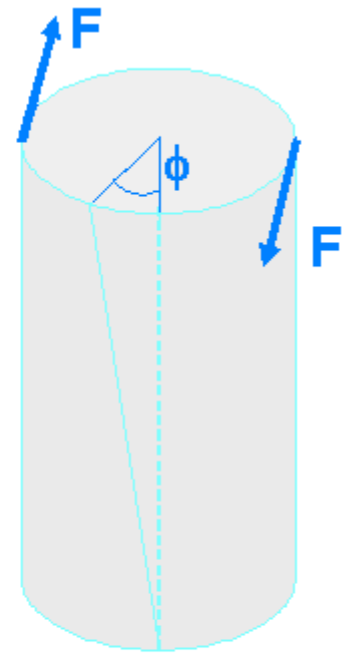
TIPOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES QUE UMA ESTRUTURA ESTA SUJEITA



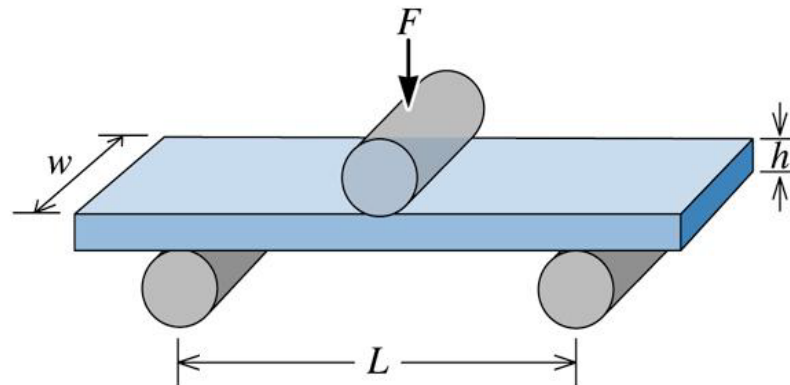
TRAÇÃO
ou
compressão



CISALHAMENTO



TORÇÃO



Flexão

Cisalhamento

- Uma tensão cisalhante causa uma deformação cisalhante, de forma análoga a uma tração.

- Tensão cisalhante

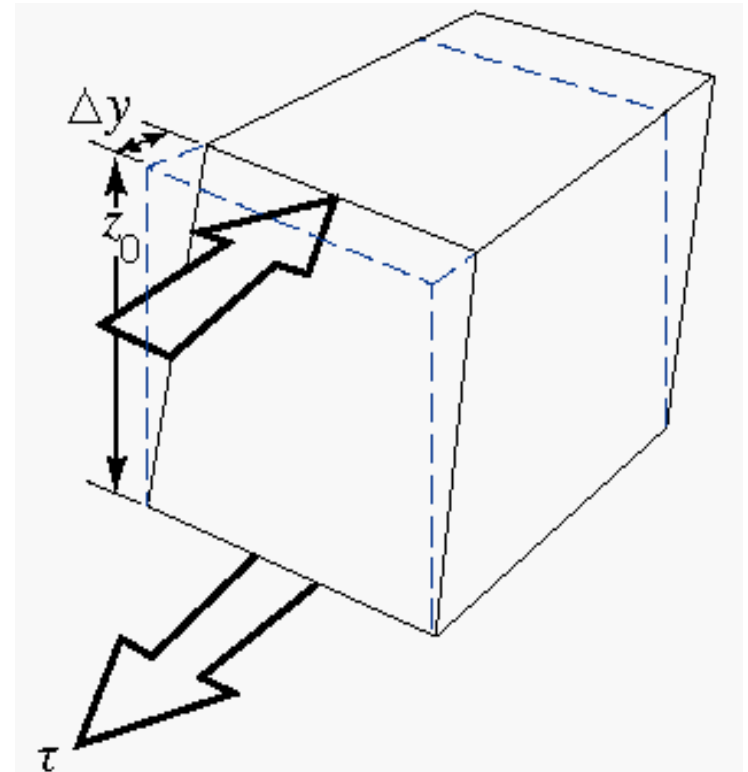
- $\tau = F/A_0$
- onde A_0 é a área **paralela** a aplicação da força.

- Deformação cisalhante

- $\gamma = \tan \alpha = \Delta y/z_0$
- onde α é o ângulo de deformação

- Módulo de cisalhamento G

- $\tau = G \gamma$



Coeficiente de Poisson

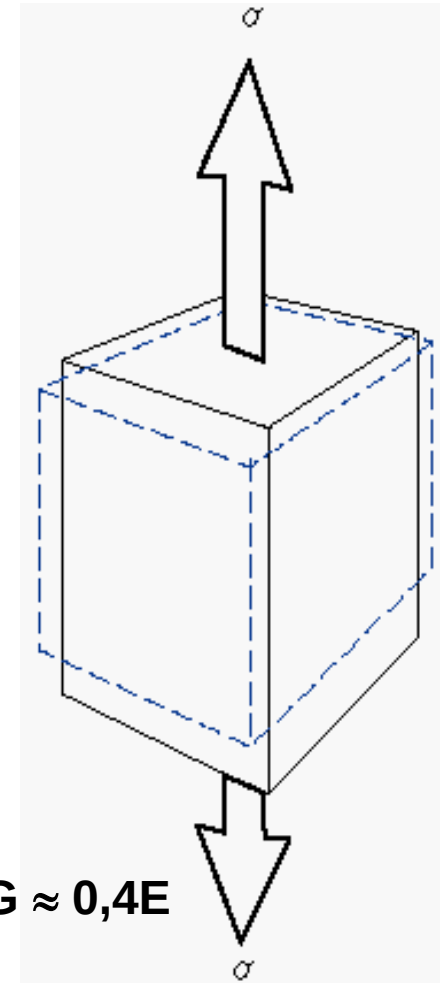


- Quando ocorre alongamento ao longo de uma direção, ocorre contração no plano perpendicular.
- A Relação entre as deformações é dada pelo **coeficiente de Poisson** ν .

$$\nu = - \epsilon_x / \epsilon_z = - \epsilon_y / \epsilon_z$$

- o sinal negativo apenas indica que uma extensão gera uma contração e vice-versa
- Os valores de ν para diversos metais estão entre 0,25 e 0,35 (max 0,50)

$$E = 2G(1+\nu) \quad \text{Para a maioria dos metais } G \approx 0,4E$$



O coeficiente de Poisson (materiais isotropicos) pode ser usado para estabelecer uma relação entre o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento de um material.



Propriedades Mecânicas dos Materiais

- Força de tração

- Força de compressão

- Cisalhamento

Tensão

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

Deformação

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

Módulo de Elasticidade

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

Tensão

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

Deformação

$$\gamma = \tan \theta$$

Módulo de cisalhamento

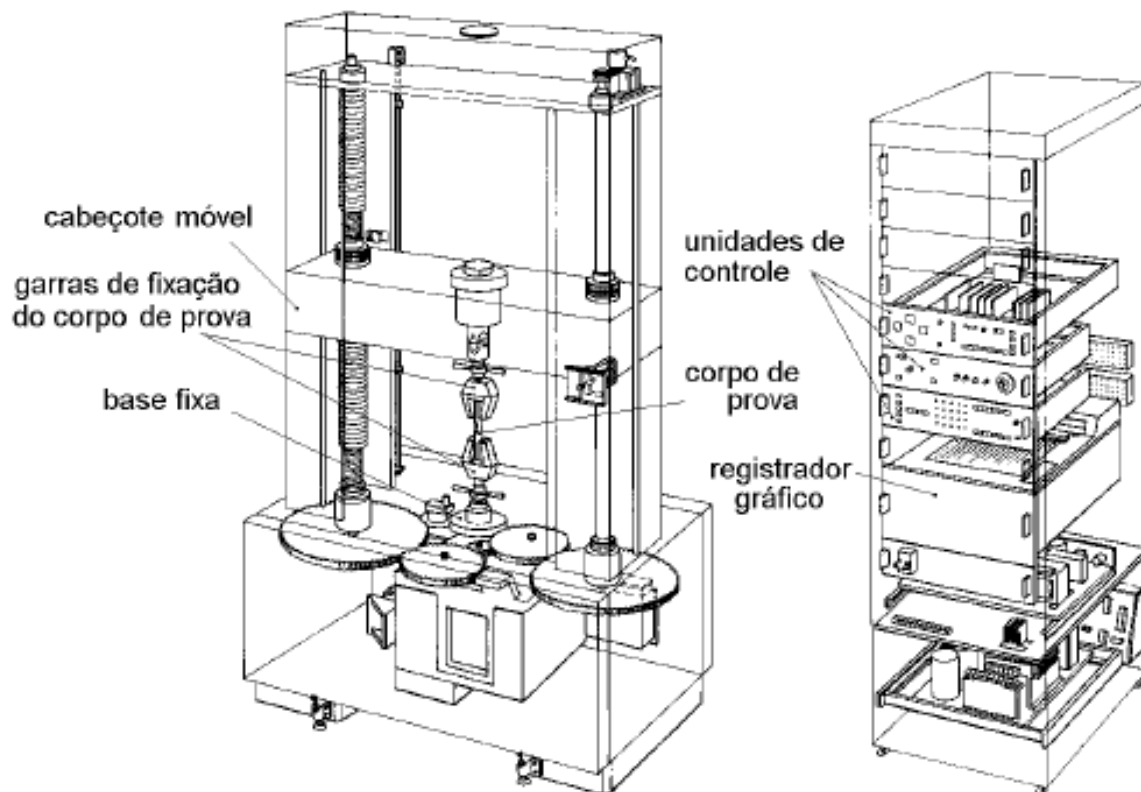
$$\tau = G \cdot \gamma$$

Razão de Poisson :

$$\nu = - \frac{\frac{\Delta A}{A_0}}{2 \cdot \frac{\Delta l}{l_0}}$$

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.

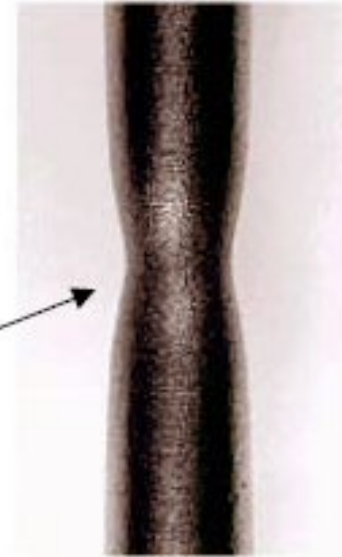
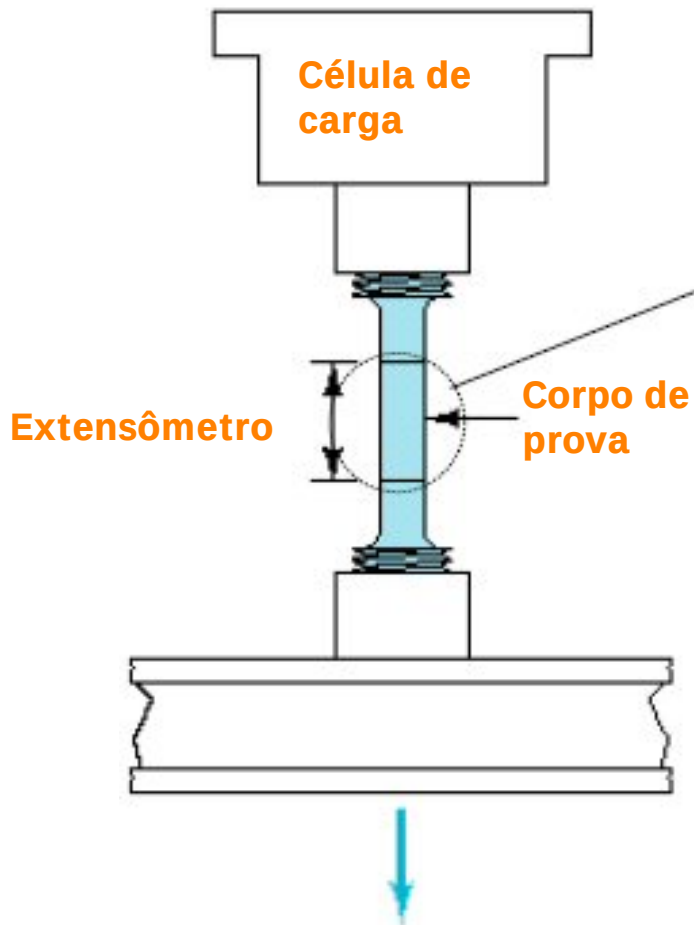
A máquina de tração

- 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

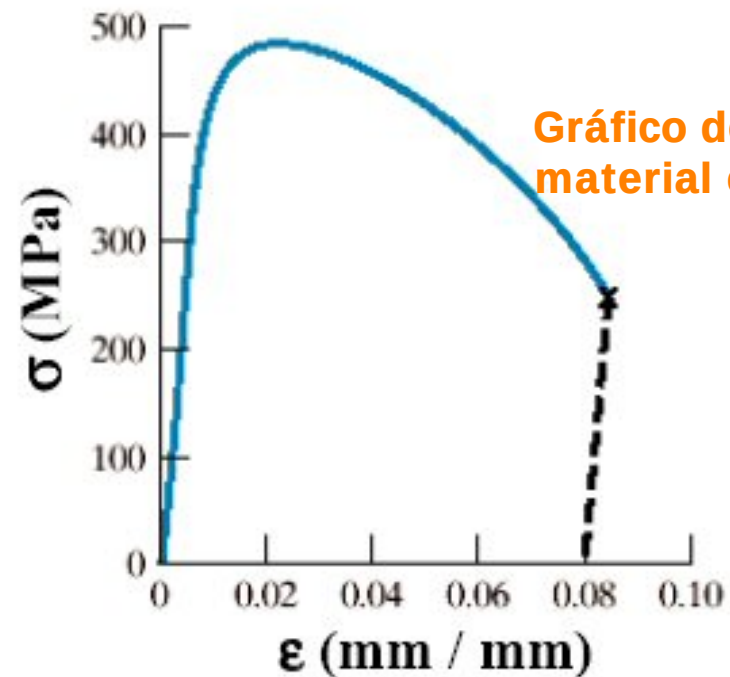
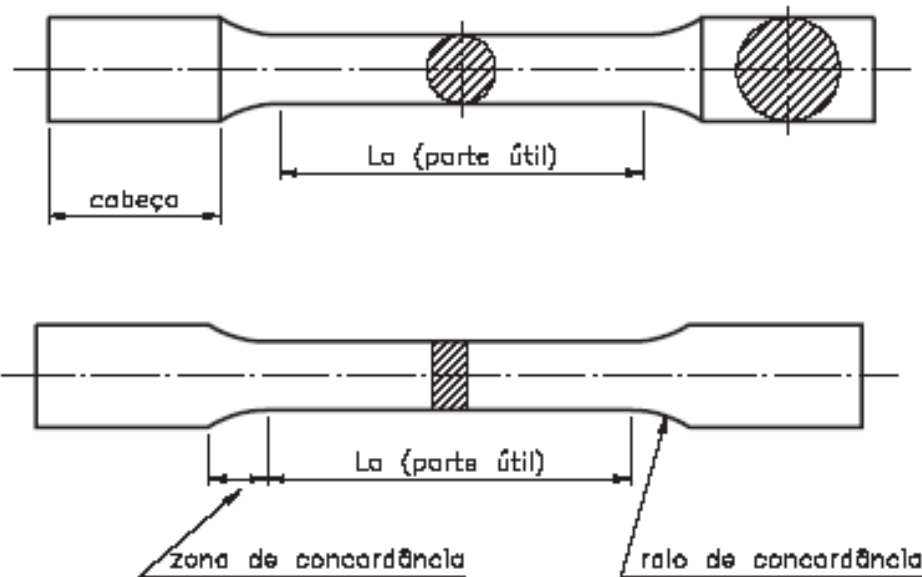


Gráfico de $\sigma \times \epsilon$ do material ensaiado

Corpos de prova

- Possuem características especificadas de acordo com normas técnicas. Suas dimensões devem ser adequadas à capacidade da máquina de ensaio;
- Normalmente utilizam-se corpos de prova de seção circular ou de seção retangular, dependendo da forma e tamanho do produto acabado do qual foram retirados, como mostram as ilustrações a seguir.

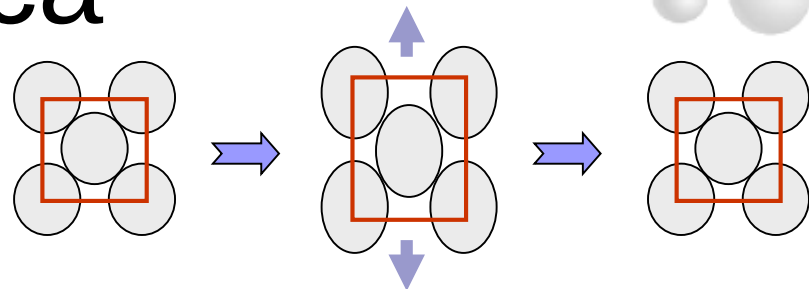


- A parte útil do corpo de prova, identificada na figura anterior por L_0 , é a região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas do material.

- As cabeças são as regiões extremas, que servem para fixar o corpo de prova à máquina de modo que a força de tração atuante seja axial.

Deformação Elástica

Características Principais:

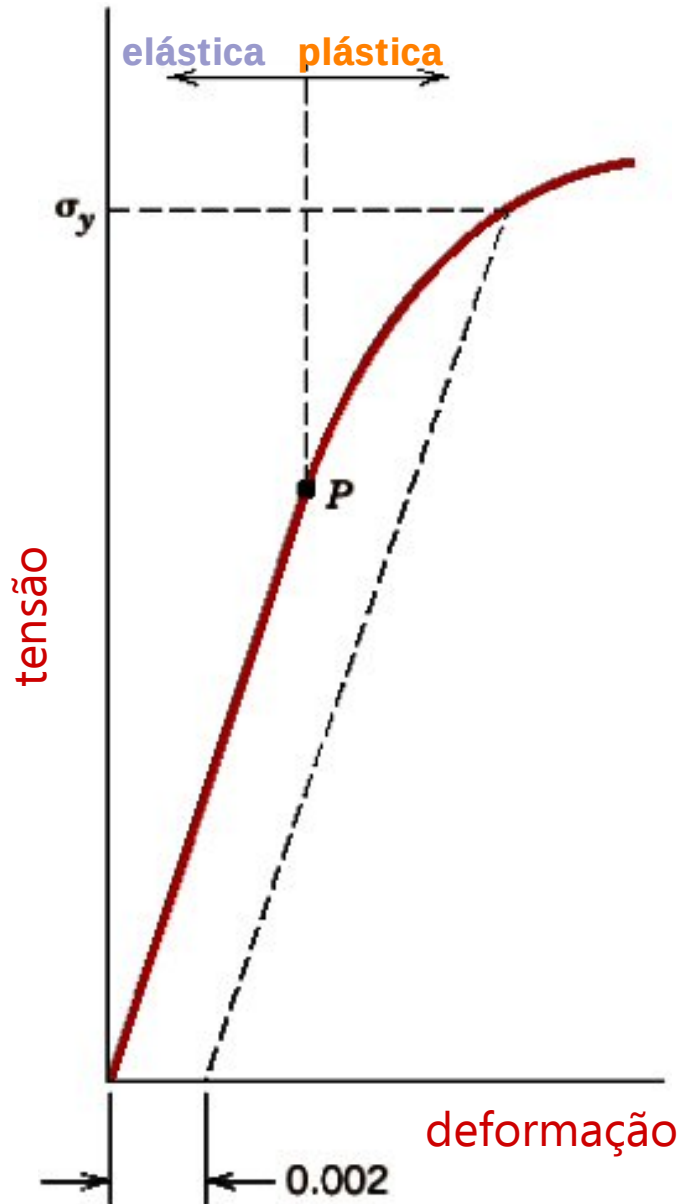


- A deformação elástica é resultado de um pequeno alongamento ou contração da célula cristalina na direção da tensão (tração ou compressão) aplicada;
- Deformação não é permanente, o que significa que quando a carga é liberada, a peça retorna à sua forma original;
- Processo no qual tensão e deformação 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



Propriedades Mecânicas dos Materiais

- Comportamento $\sigma \times \varepsilon$:

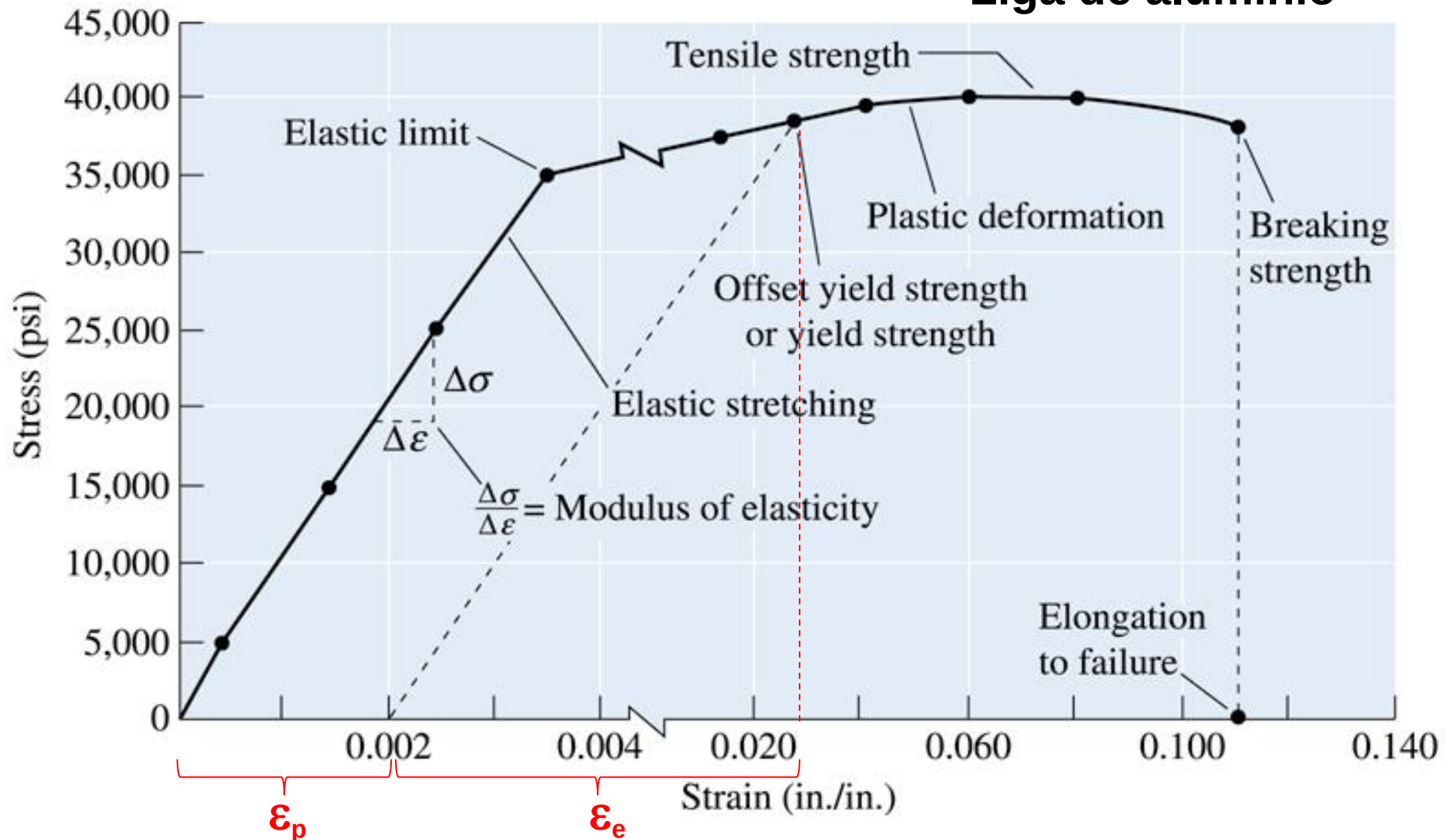


- Deformação elástica:** é reversível, ou seja, quando a carga é retirada, o material volta às suas dimensões originais;
 - ✓ átomos se movem, mas não ocupam novas posições na rede cristalina;
 - ✓ numa curva de $\sigma \times \varepsilon$, a região elástica é a parte linear inicial do gráfico.
- Deformação plástica:** é irreversível, ou seja, quando a carga é retirada, o material não recupera suas dimensões originais;
 - ✓ átomos se deslocam para novas posições em relação uns aos outros.

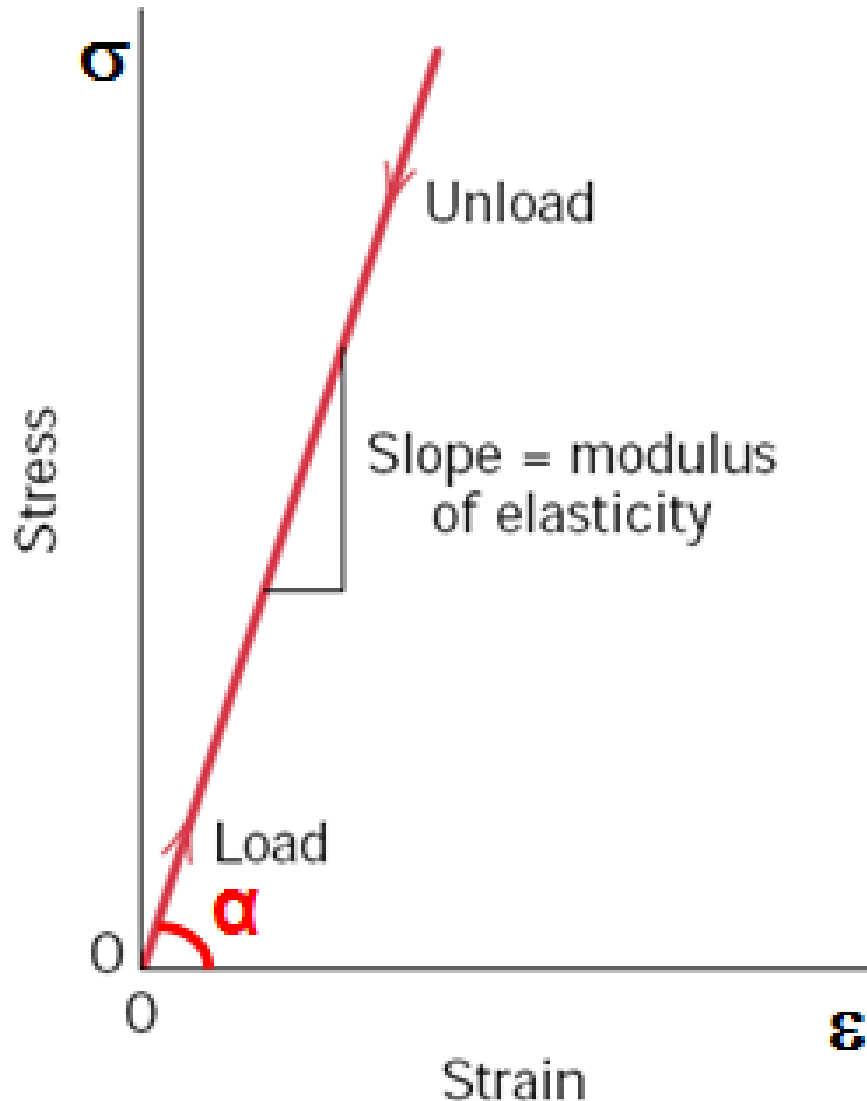
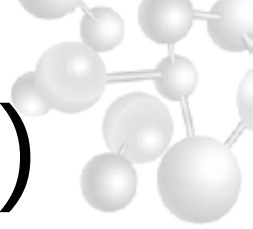
Curva Típica $\sigma \times \varepsilon$ (tração)



Liga de alumínio



Módulo de Elasticidade (E)



$$\sigma = E \varepsilon$$

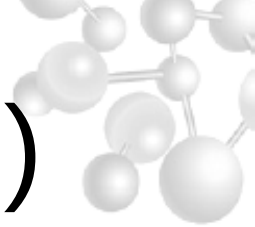
$$\tan g \alpha = \frac{\Delta S}{\Delta \varepsilon} = E$$

E = módulo de elasticidade
ou Young (GPa)

σ = tensão (MPa)

ε = deformação (mm/mm)

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

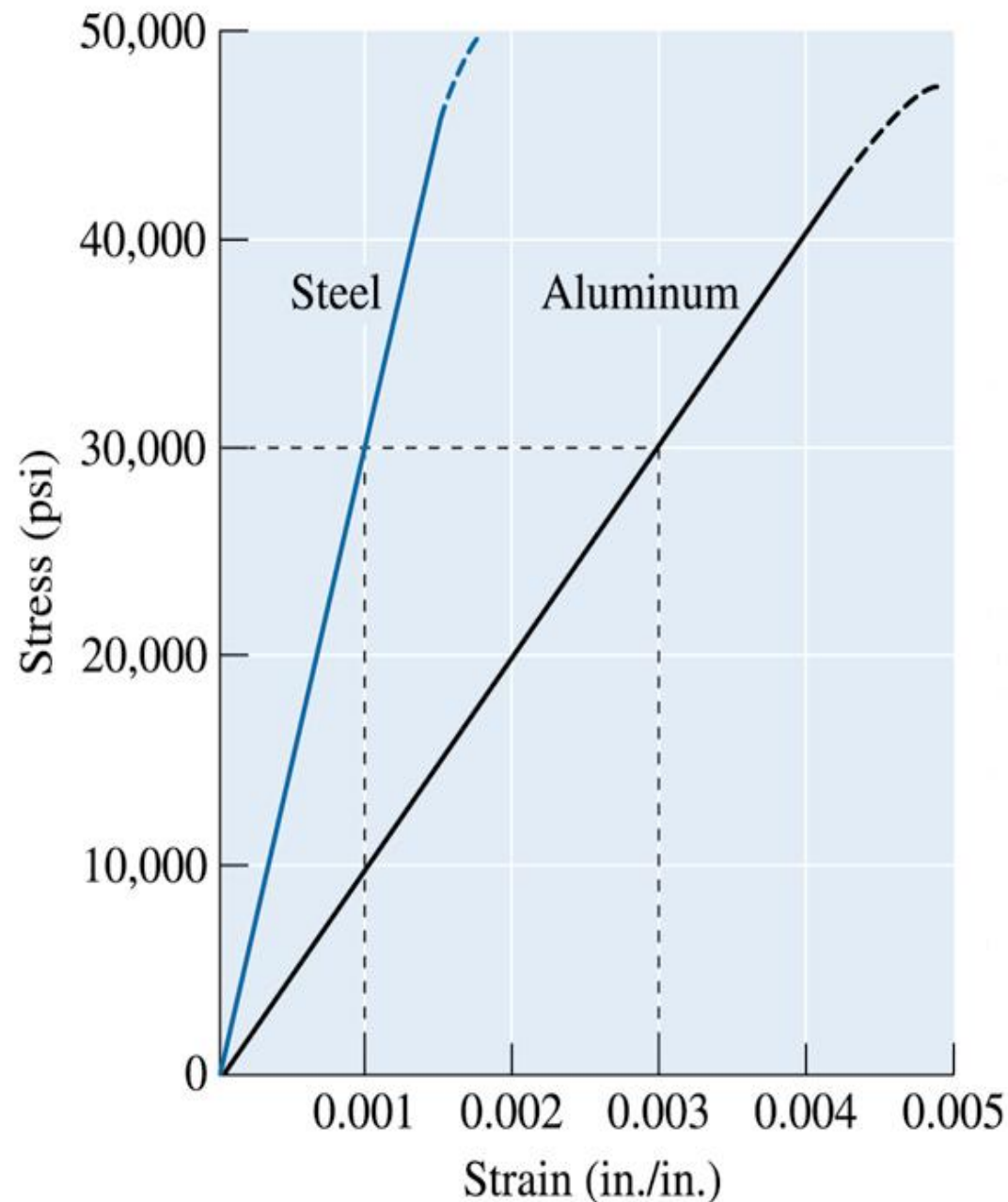


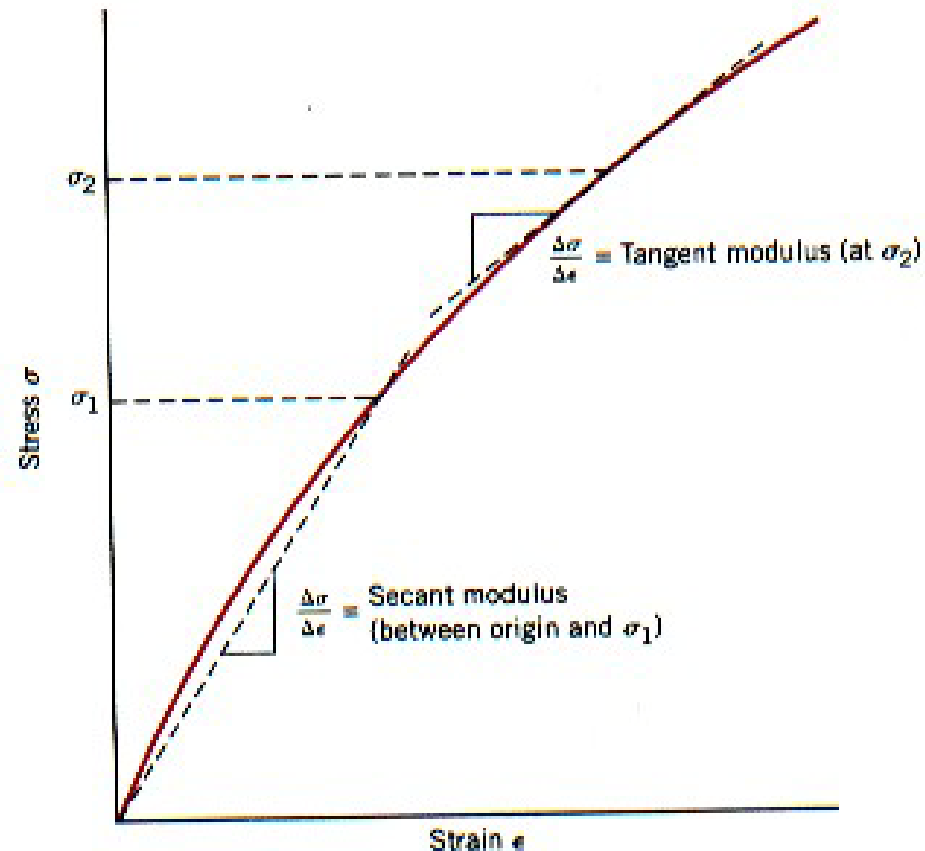
TABLE 2.5 Elastic and Shear Moduli and Poisson Ratios for Polycrystalline Metals^a

<i>Metal</i> (20°C)	<i>E</i> (GPa)	<i>G</i> (GPa)	ν
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.

Comportamento não-linear

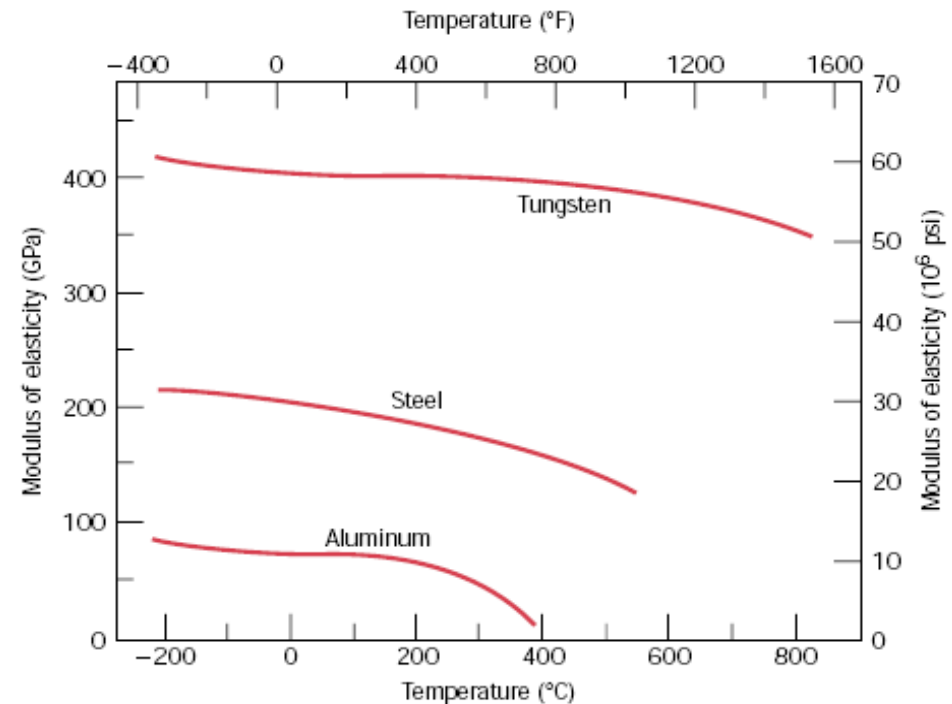
- Alguns metais como ferro fundido cinzento, o concreto e muitos polímeros apresentam um comportamento não linear na parte elástica da curva tensão x deformação



Módulo de Elasticidade



- O módulo de elasticidade é dependente da temperatura;
- Quanto maior a temperatura o E tende a diminuir.



Valores típicos dos módulos de elasticidade a diferentes temperaturas.

	Módulo de Elasticidade, <u>GPa.</u>				
Material	20°C	205°C	427°C	538°C	649°C
Aço carbono	210	190	158	137	127
Ligas de Ti	116	98	75	71	
Ligas de Al	74	67	55		



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



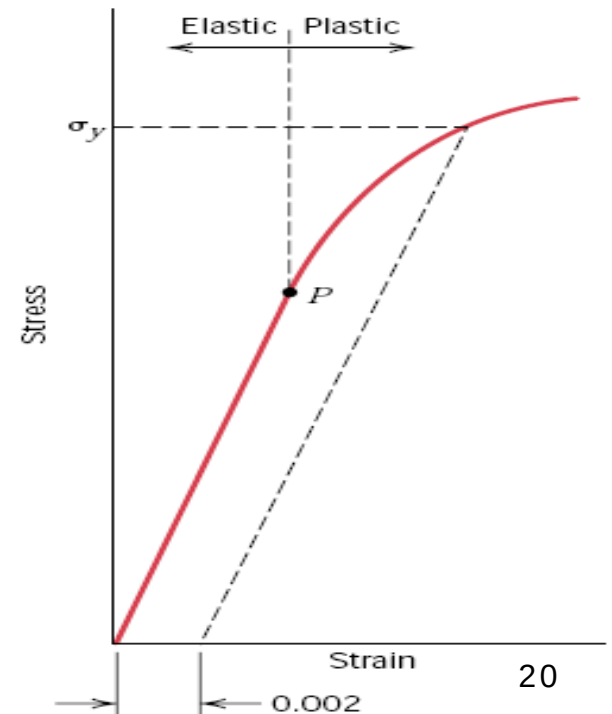
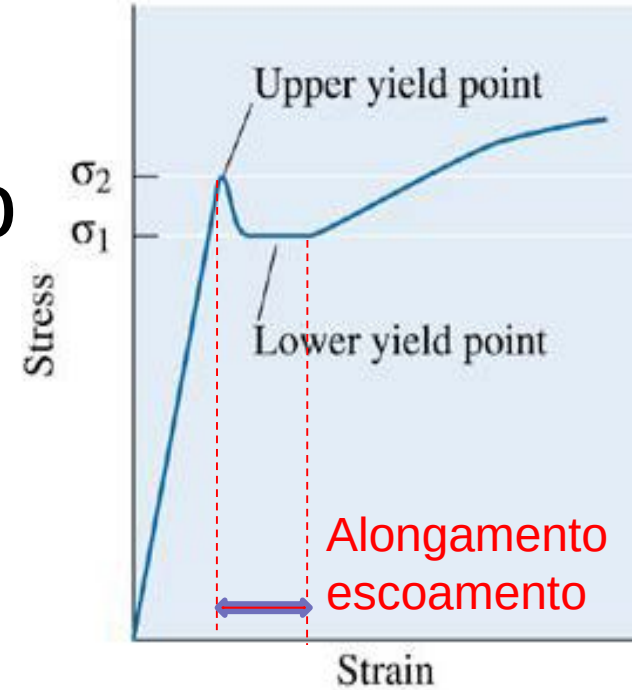
- Para a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste apenas até deformações de aproximadamente 0,2 a 0,5%.
- À medida que o material é deformado além, desse ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação (lei de Hooke) e ocorre uma deformação permanente não recuperável denominada 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**).

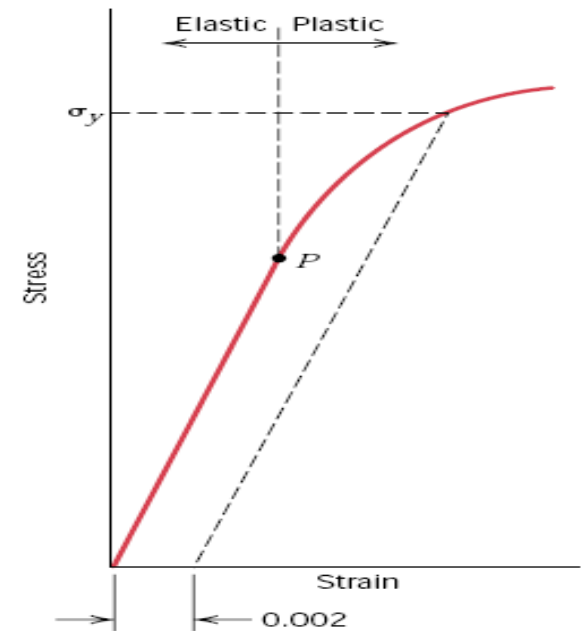
➤ A posição deste ponto pode não ser determinada com precisão. Por consequência foi adotada uma convenção: é construída uma linha paralela à região elástica a partir de uma pré-deformação de 0,002 ou 0,2%.

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

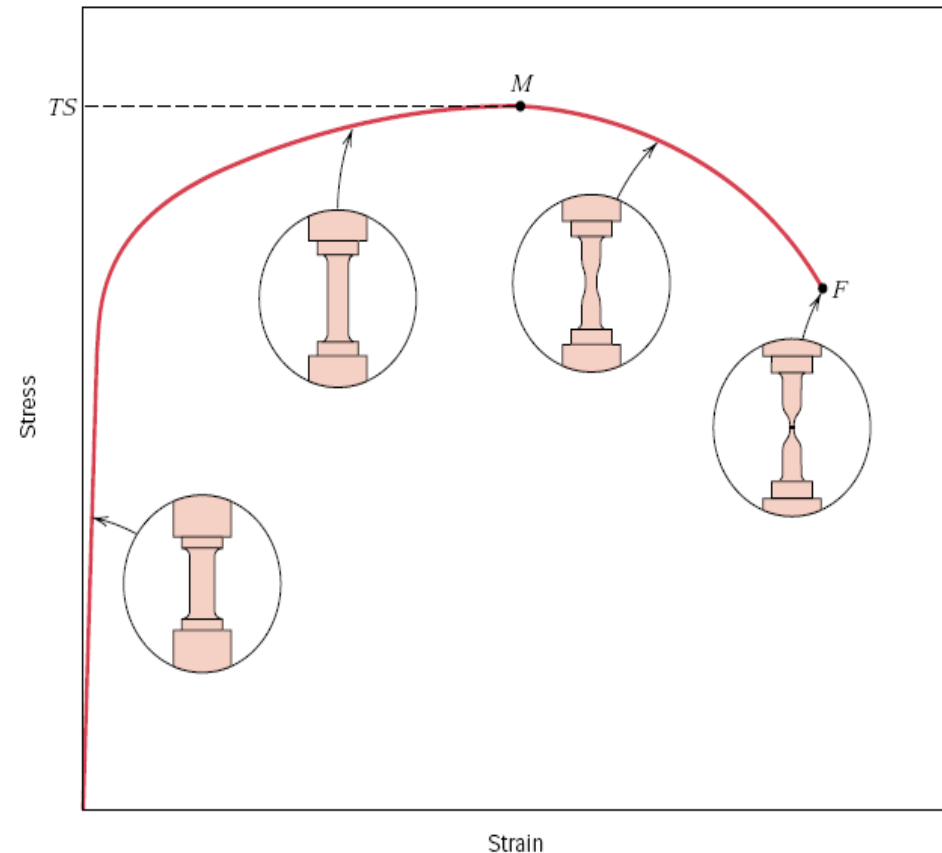
Polímeros: $n = 0,5 \% \ (\epsilon = 0,005)$

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



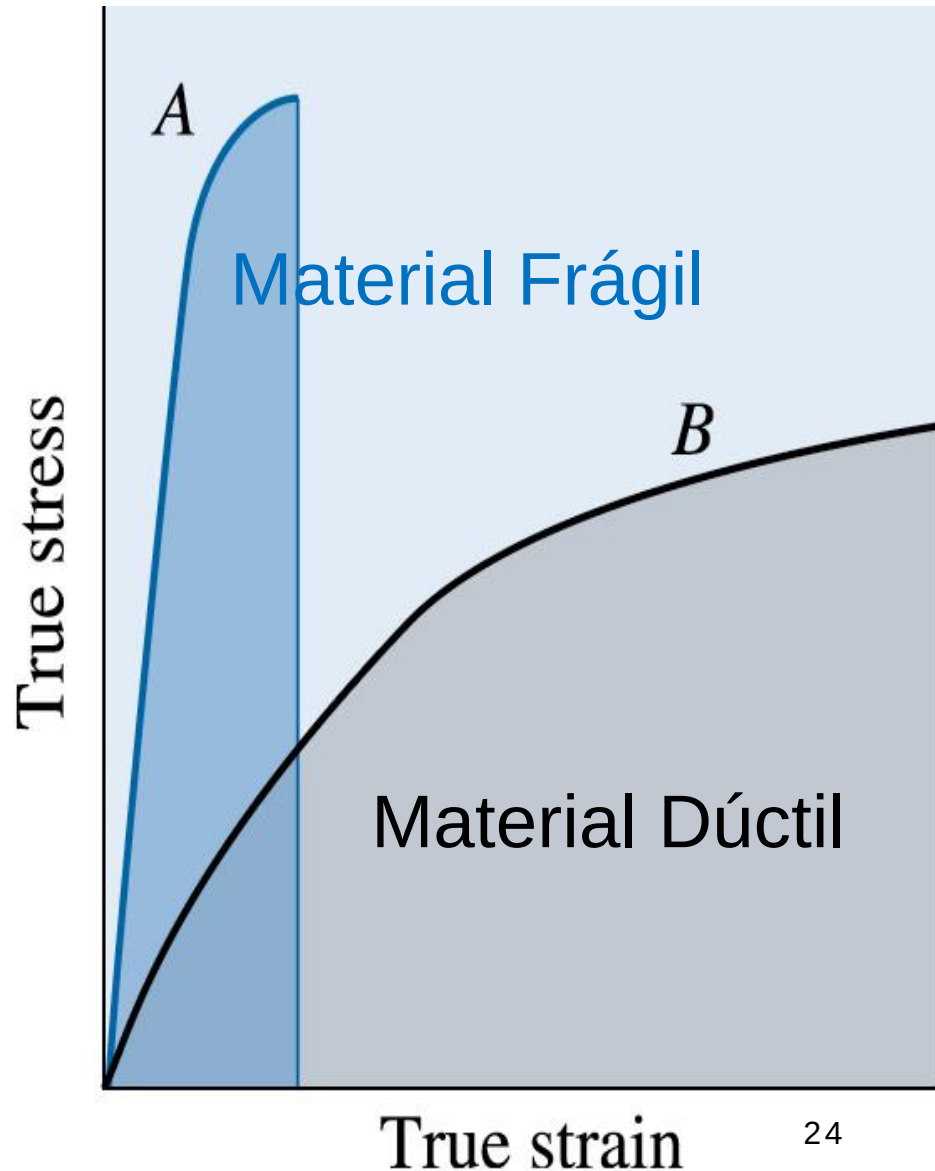
- Representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a fratura;
- Pode ser determinada a partir da curva $\sigma \times \epsilon$. Ela é a área sobre a curva;
- Para que um material seja tenaz, deve apresentar resistência e ductilidade. Materiais dúcteis são mais tenazes que os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



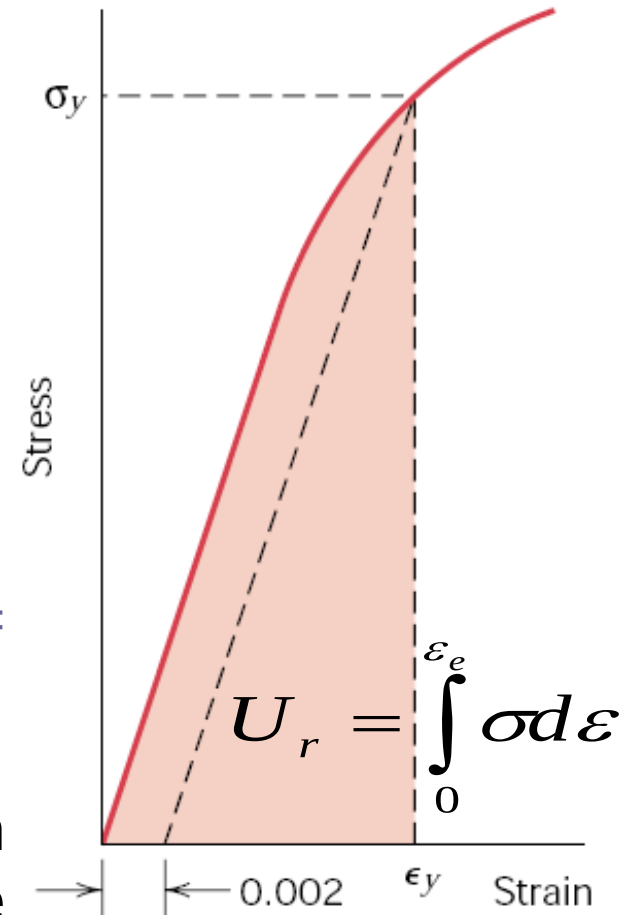
Definição: Capacidade de um material absorver energia sob tração quando ele é deformado elasticamente e devolvê-la quando relaxado (recuperar);

✓ 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: $U_r = \int_0^{\epsilon_e} \sigma d\epsilon$

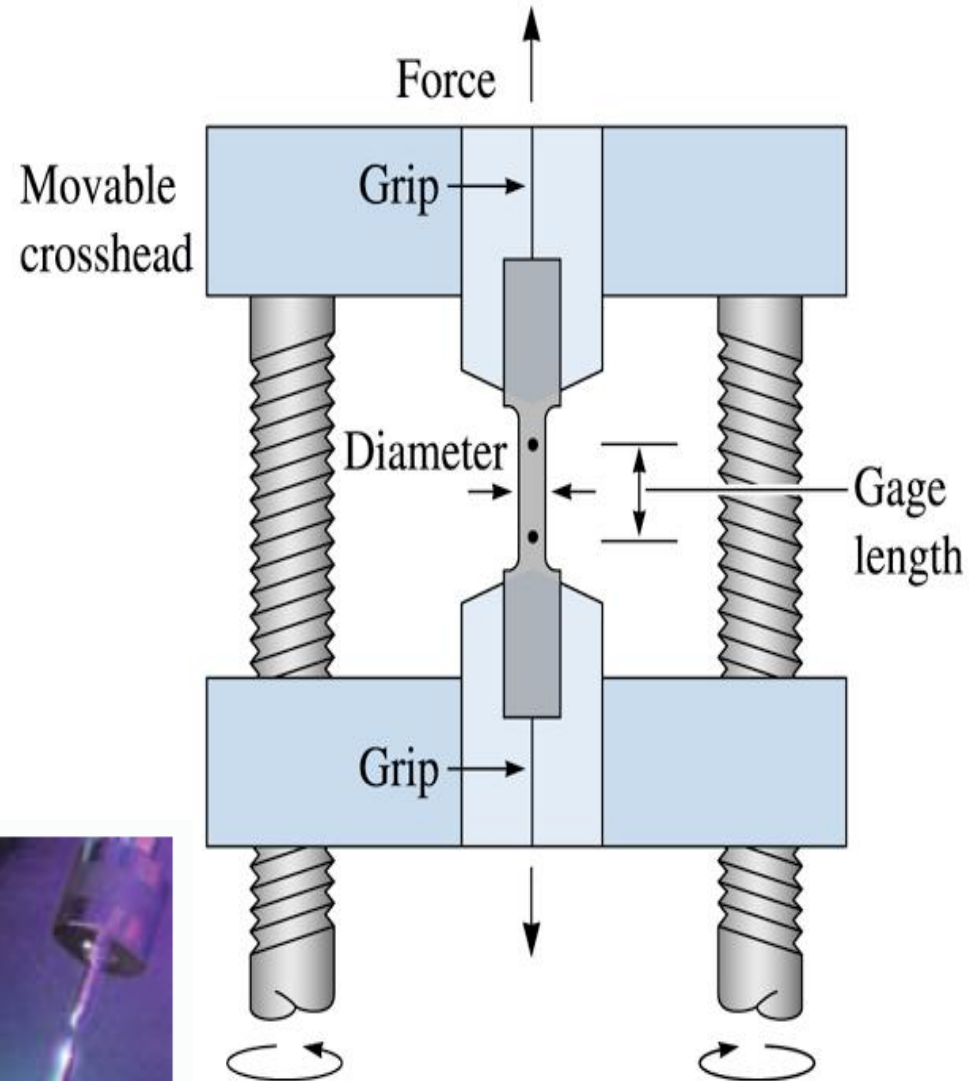
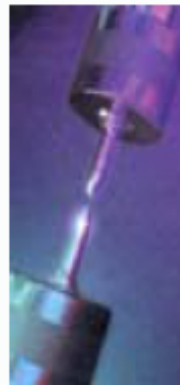
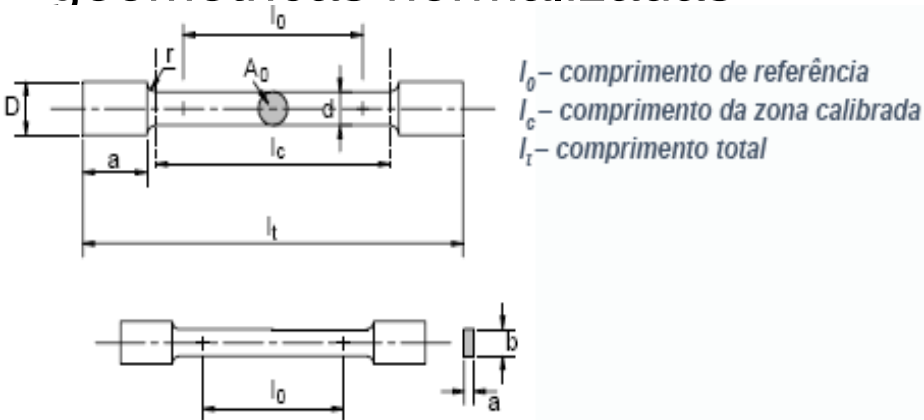
✓ Na região linear $U_r = \sigma_y \epsilon_y / 2 = \sigma_y (\sigma_y / E) / 2 = \sigma_y^2 / 2E$

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



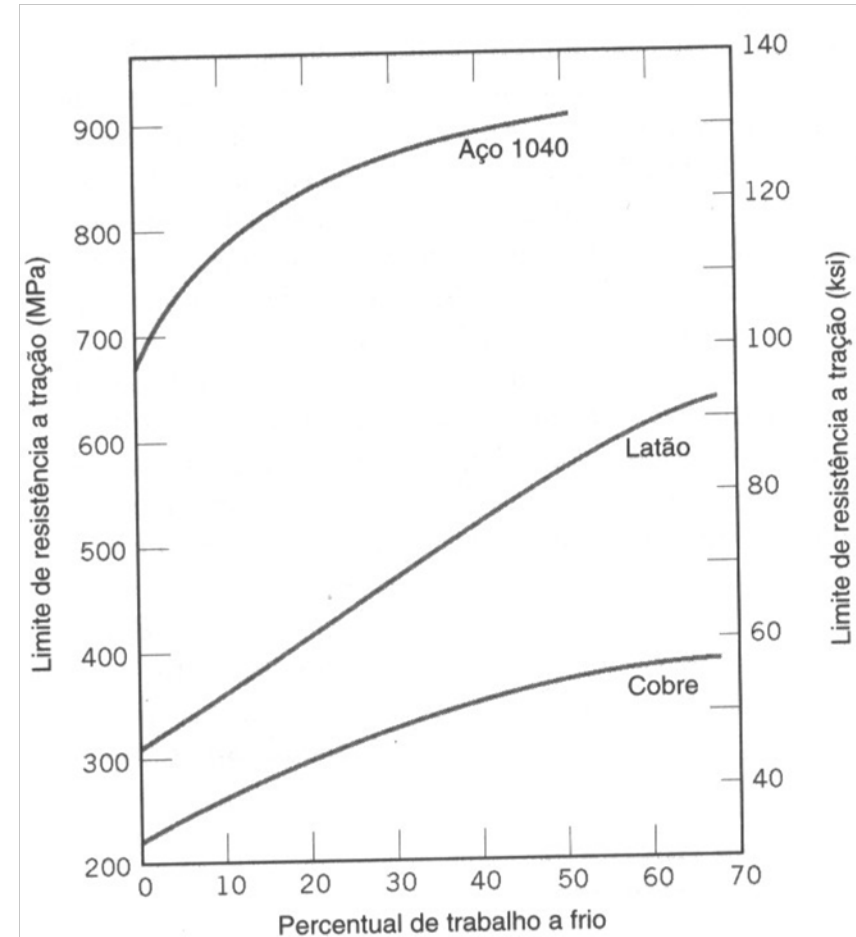
Ensaio de tração uniaxial

- O ensaio de tração consiste na aplicação de carga uniaxial crescente até a ruptura. Mede-se a variação do comprimento como função da carga e fornece dados quantitativos das características mecânicas dos materiais;
- Os CPs geralmente possuem seção transversal circular ou retangular com proporções geométricas normalizadas



Encruamento

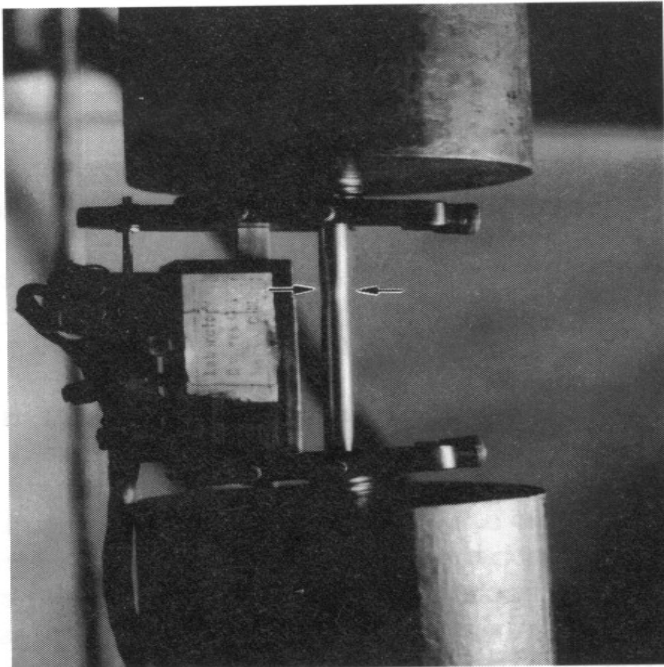
- A partir da região de escoamento, o material entra no campo de deformações permanentes, onde ocorre endurecimento por trabalho a frio (**encruamento**);
- Resulta em função da interação entre discordâncias e das suas interações com obstáculos como solutos e contornos de grãos. É preciso uma energia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



Empescoçamento - Estricção

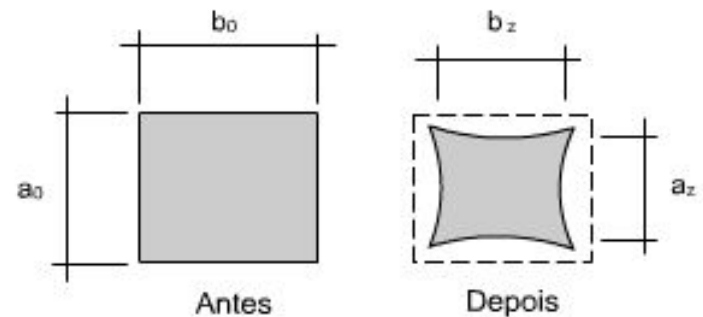


- Região localizada em uma seção reduzida em que grande parte da deformação se concentra;
- Ocorre quando o aumento da dureza por encruamento é menor que a tensão aplicada e o material sofre uma grande deformação.



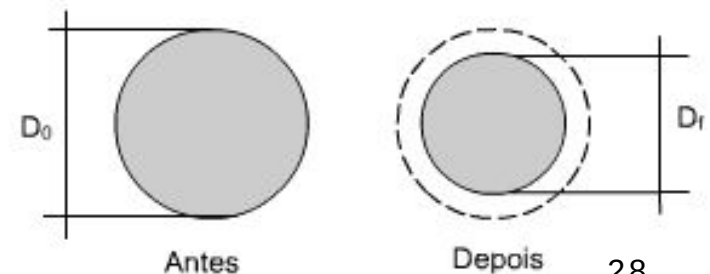
Redução da área no teste de tração - CP seção retangular

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



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)

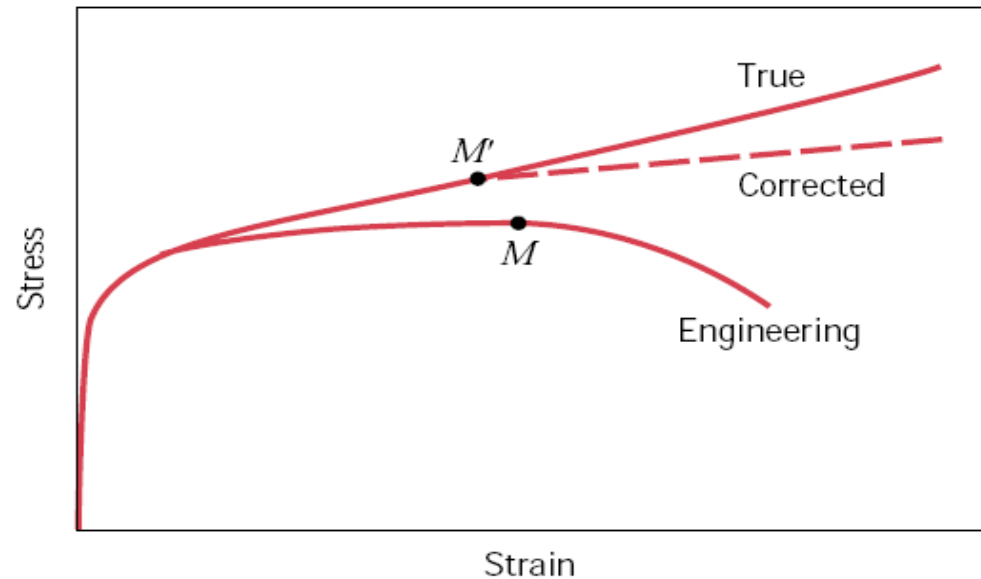


- A Tensão Verdadeira é definida como sendo a carga P dividido sobre a área instantânea, ou seja, área do pescoço após o limite de resistência à tração

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

- 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

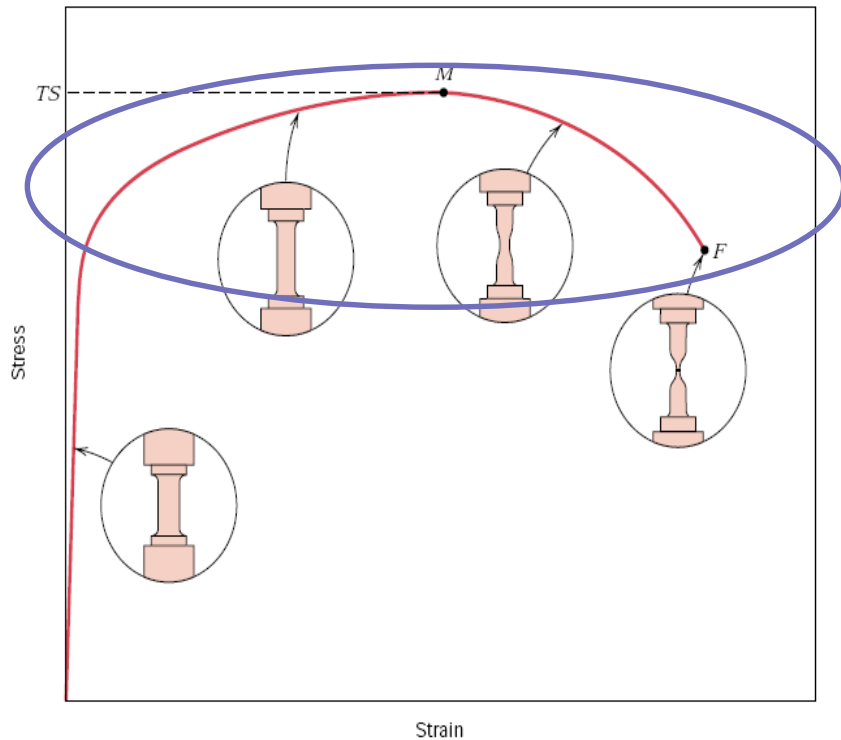
$$\ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

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

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

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

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= expoente de encruamento (representa a capacidade com que o material distribui a deformação)

K e na para alguns materiais



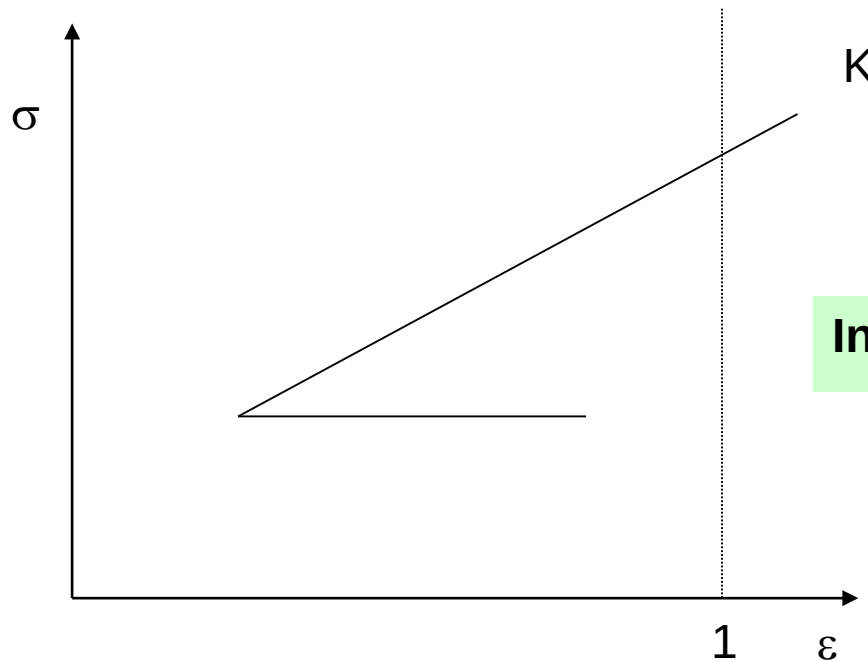
Material	n	K (MPa)
Aço baixo teor de carbono recozido	0,26	530
Aço 4340 recozido	0,15	640
Aço inox 304 recozido	0,45	1275
Alumínio recozido	0,2	180
Liga de Alumínio 2024 T	0,16	690
Cobre recozido	0,54	315
Latão 70-30 recozido	0,49	895



Determinação de K e n

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

Para $\varepsilon = 1$ $\xrightarrow{\text{extrapolando}}$ $\sigma = k$

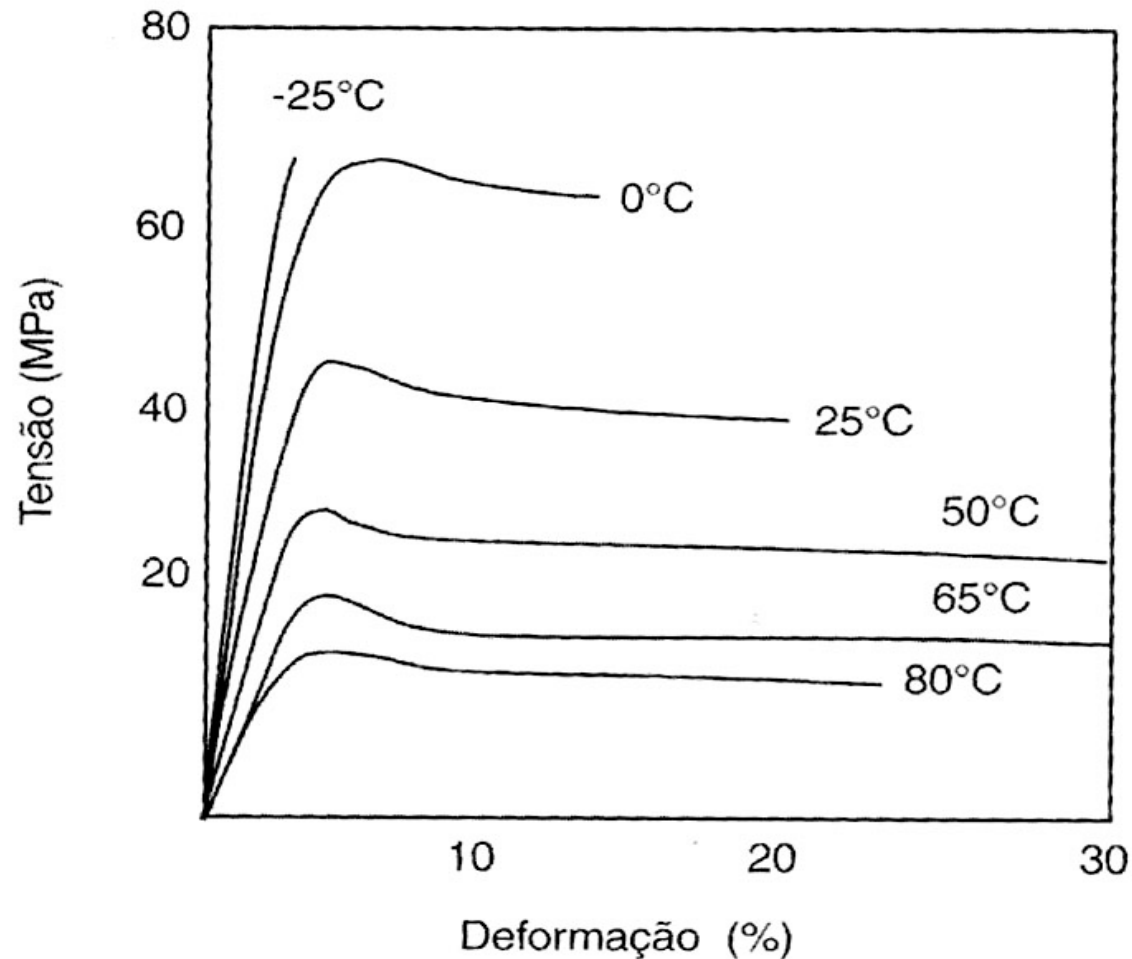


Inclinação= n

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

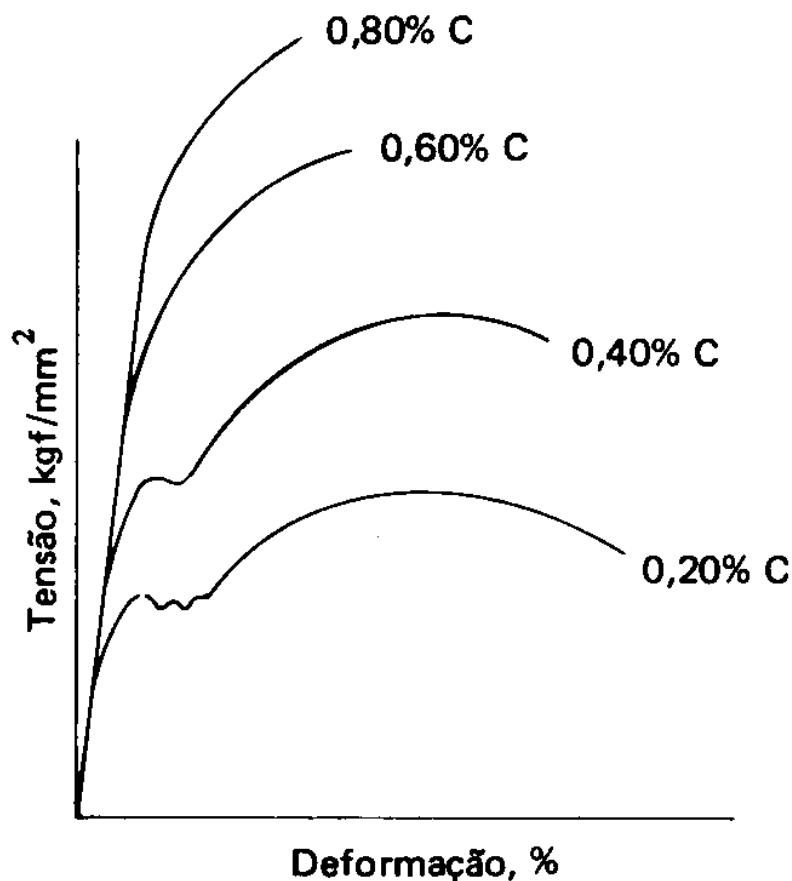


Efeito %C nas Propriedades de Tração



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

Propriedades – Exercício Realizar em Casa

- 1) Um aço carbono tratado termicamente (têmpera e resfriamento na água) foi submetido ao ensaio de tração (quadro abaixo). O diâmetro original da amostra era 12,5 mm e o diâmetro final 11,6 mm. Usando um instrumento de medida de 50 mm, obtiveram-se os seguintes dados:

Carga (kN)	Alongamento (mm)	Carga (kN)	Alongamento (mm)
25,9	0,051	88,6	0,508
36,0	0,071	93,4	0,711
46,6	0,092	98,8	1,016
54,4	0,107	107,2	1,524
70,8	0,152	113,5	2,032
74,8	0,203	117,5	2,541
80,5	0,305	121,0	3,048
85,0	0,406	123,3	3,560

Determine:

- (a) Diagrama tensão x deformação de engenharia e verdadeiro
- (b) Determinar o limite de escoamento convencional a 0,2%.
- (c) Determinar o módulo de elasticidade
- (d) Determinar o limite de ruptura
- (e) O %RA e o %AL – O material exhibe comportamento dúctil?
- (f) Resiliência
- (g) Tenacidade a tração



Um aço tratado termicamente

(têmpera e resfriamento na água) foi submetido ao ensaio de tração. O diâmetro original da amostra era 12.5mm e o diâmetro final 11.6mm. Usando um segu

Carga (KN)	Alongamento (mm)
25.9	0.051
36.0	0.071
46.6	0.092
54.4	0.107
70.8	0.152
74.8	0.203
80.5	0.305
85.0	0.406
88.6	0.508
93.4	0.711
98.8	1.016
107.2	1.524
113.5	2.032
117.5	2.541
121.0	3.048
123.3	3.560

Questões:

- Diagrama tensão x deformação de engenharia e verdadeiro.
- Determine o limite de escoamento convencional a 0.2%.
- Determine o módulo de elasticidade.
- Determine o limite de ruptura.
- Determine a redução de área percentual e o

Quais as informações úteis emitidas pelo enunciado?

Diâmetro inicial (D_0)=12.5mm

Diâmetro final (D_f)= 11.6mm

Comprimento inicial (L_0)= 50mm

IMPETUS AFEE155000 = 59.33 N/mm²



Primeiramente, analisemos as equações fundamentais para a plotagem do gráfico tensão x deformação:

O que significa os

σ_c Tensão de engenharia

P Carga aplicada

A_0 Área antes do ensaio

ϵ_c Deformação de engenharia

Δl Alongamento vertical

l_0 Comprimento inicial do CP

σ_R Tensão verdadeira

ϵ_R Deformação verdadeira

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0}$$

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

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

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

Tensão engenharia (N/mm ²)	Deformação de engenharia (mm/mm)	Tensão verdadeira (N/mm ²)	Deformação verdadeira (mm/mm)
211.05	0.00102	211.26	0.00101
293.37	0.00142	293.78	0.00141
379.75	0.00184	380.44	0.00183
443.32	0.00214	444.26	0.00213
576.97	0.00304	578.72	0.00303
609.56	0.00406	612.03	0.00405
656.01	0.00610	660.01	0.00608
692.69	0.00812	698.31	0.00808
722.02	0.01016	729.35	0.01010
761.14	0.01422	771.96	0.01411
805.15	0.02032	821.51	0.02011
871.97	0.03048	898.54	0.03002
924.94	0.04064	962.52	0.03983
957.54	0.05082	1006.20	0.04957
986.06	0.06096	1046.17	0.05917
1004.80	0.07120	1076.34	0.06877

123.3

3.560

1004.80

0.07120

1076.34

0.06877

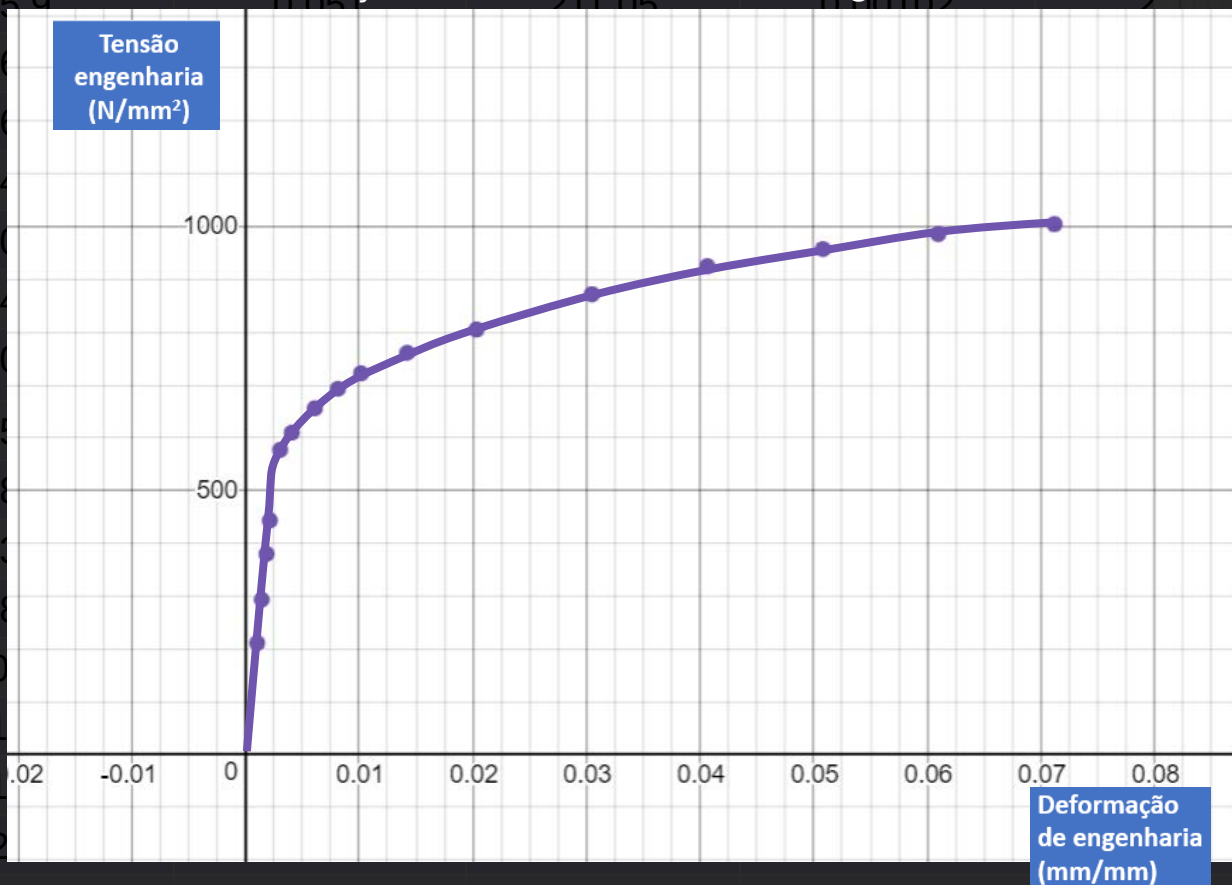


Carga (KN)	Alongamento (mm)	Tensão engenharia (N/mm ²)	Deformação de engenharia (mm/mm)	Tensão verdadeira (N/mm ²)	Deformação verdadeira (mm/mm)
25.9	0.051	211.05	0.00102	211.26	0.00101
36.0	0.071	293.37	0.00142	293.78	0.00141
46.6	0.092	379.75	0.00184	380.44	0.00183
54.4	0.107	443.32	0.00214	444.26	0.00213
70.8	0.152	576.97	0.00304	578.72	0.00303
74.8	0.203	609.56	0.00406	612.03	0.00405
80.5	0.305	656.01	0.00610	660.01	0.00608
85.0	0.406	692.69	0.00812	698.31	0.00808
88.6	0.508	722.02	0.01016	729.35	0.01010
93.4	0.711	761.14	0.01422	771.96	0.01411
98.8	1.016	805.15	0.02032	821.51	0.02011
107.2	1.524	871.97	0.03048	898.54	0.03002
113.5	2.032	924.94	0.04064	962.52	0.03983
117.5	2.541	957.54	0.05082	1006.20	0.04957
121.0	3.048	986.06	0.06096	1046.17	0.05917
123.3	3.560	1004.80	0.07120	1076.34	0.06877
123.3	3.560	1004.80	0.07120	1076.34	0.06877



Segundo os dados da tabela é possível plotar o gráfico de tensão x deformação convencionais ou de engenharia.

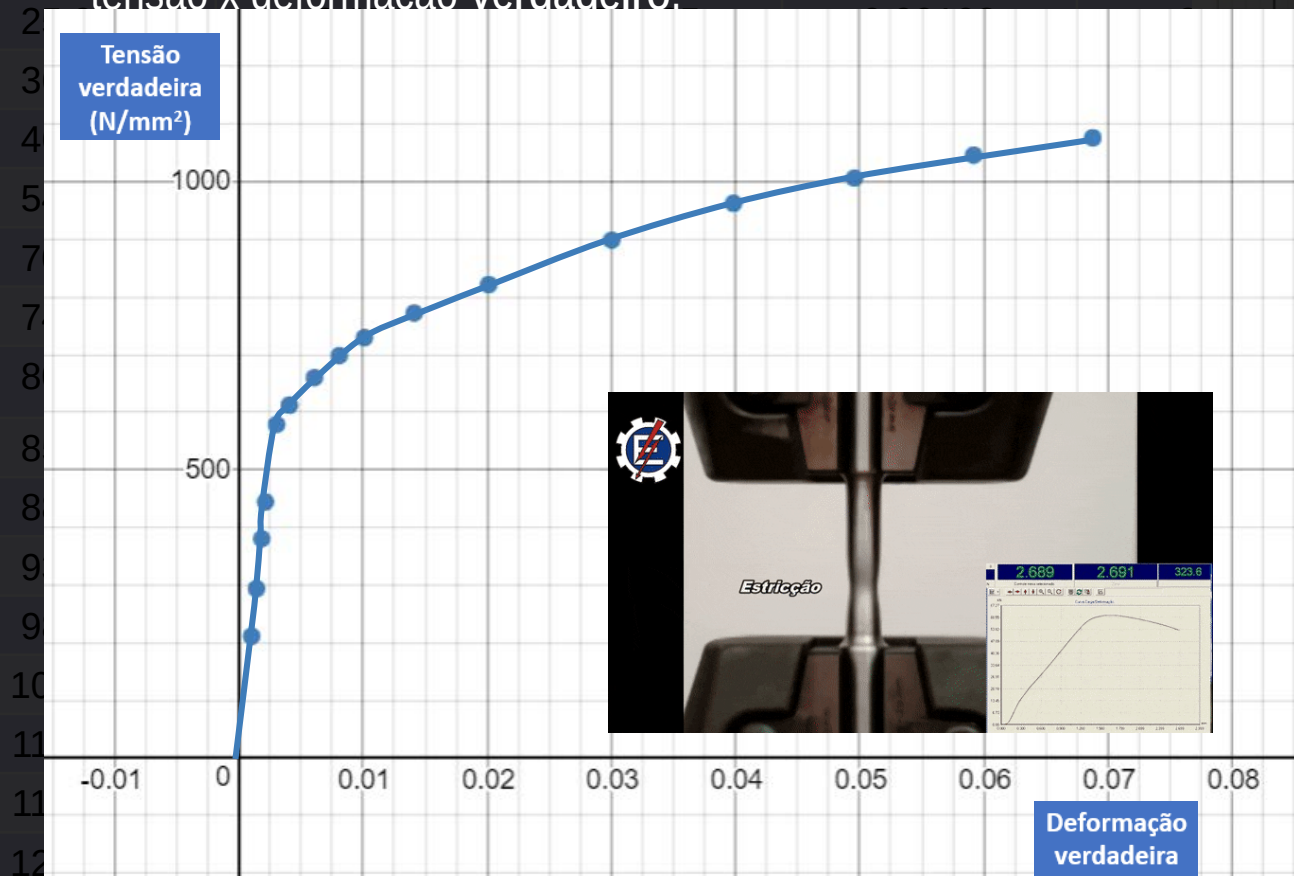
O gráfico de engenharia não leva em conta a redução de área que ocorre durante a estricção (O famoso "empescoamento").



Tensão engenharia (N/mm²)	Deformação de engenharia (mm/mm)
211.05	0.00102
293.37	0.00142
379.75	0.00184
443.32	0.00214
576.97	0.00304
609.56	0.00406
656.01	0.00610
692.69	0.00812
722.02	0.01016
761.14	0.01422
805.15	0.02032
871.97	0.03048
924.94	0.04064
957.54	0.05082
986.06	0.06096
1004.80	0.07120



Segundo os dados da tabela é possível plotar o gráfico de tensão x deformação verdadeiro.



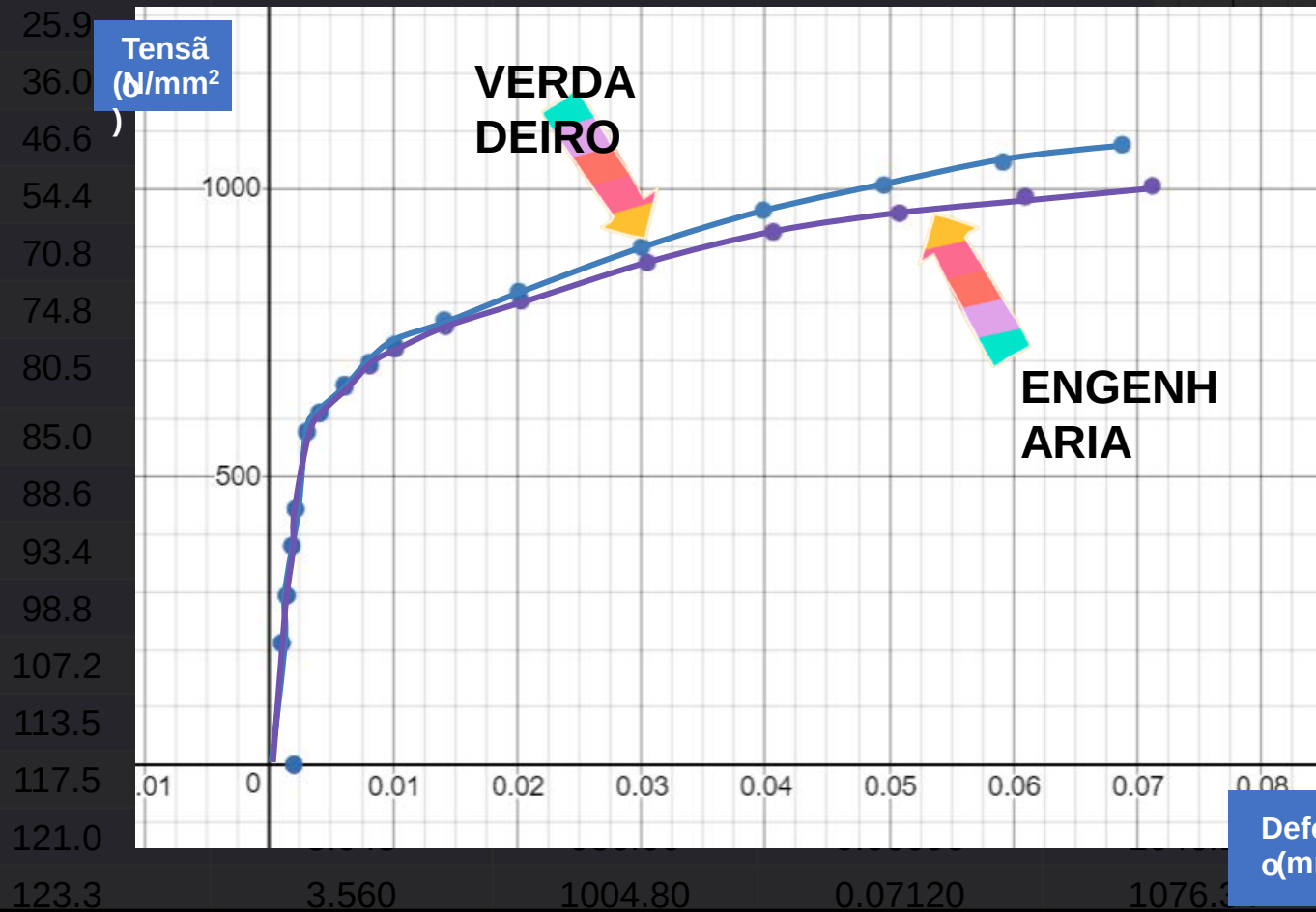
Aqui a redução de área (quando houver) é válida nos cálculos.

Tensão verdadeira (N/mm²)	Deformação verdadeira (mm/mm)
211.26	0.00101
293.78	0.00141
380.44	0.00183
444.26	0.00213
578.72	0.00303
612.03	0.00405
660.01	0.00608
698.31	0.00808
729.35	0.01010
771.96	0.01411
821.51	0.02011
898.54	0.03002
962.52	0.03983
1006.20	0.04957
1046.17	0.05917
1076.34	0.06877

123.3 3.560 1004.80 0.07120 1076.34 0.06877

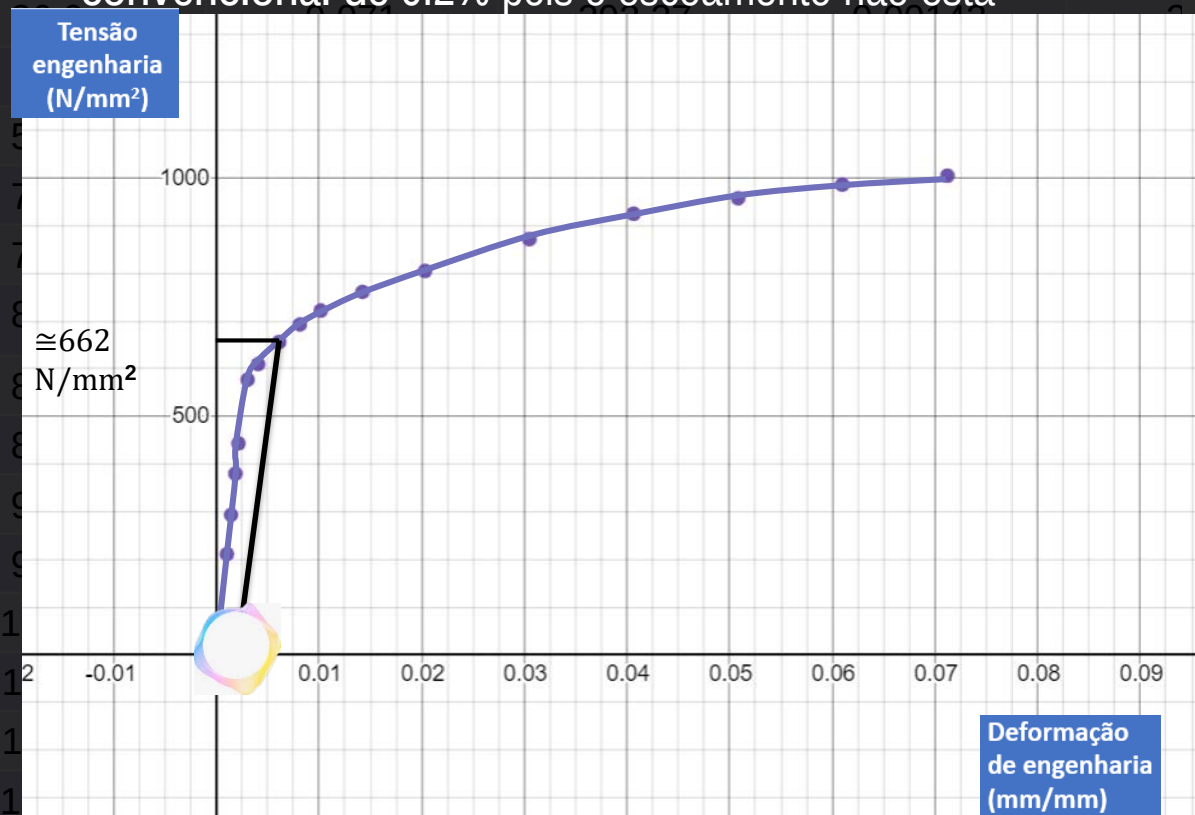


Comparação entre os dois gráficos:





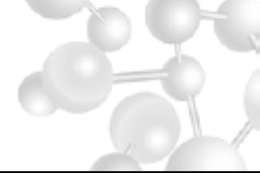
Feito os gráficos, agora é possível encontrar o limite de escoamento. Nesse caso é necessário usar a técnica convencional de 0.2% pois o escoamento não está



O Limite de escoamento

é a tensão máxima que o material suporta ainda no

regime elástico de deformação



É possível encontrar o módulo de elasticidade ao calcular a derivada da função plotada na parte elástica, isto é, calcular a tangente da reta, a qual segue a lei de Hooke.

Poderia ser outros pontos, mas analise os pontos abaixo da

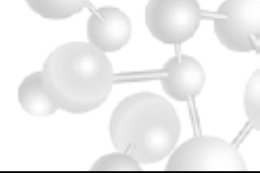
Tensão engenharia (N/mm ²)	Deformação de engenharia (mm/mm)
211.05	0.00102
293.37	0.00142

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

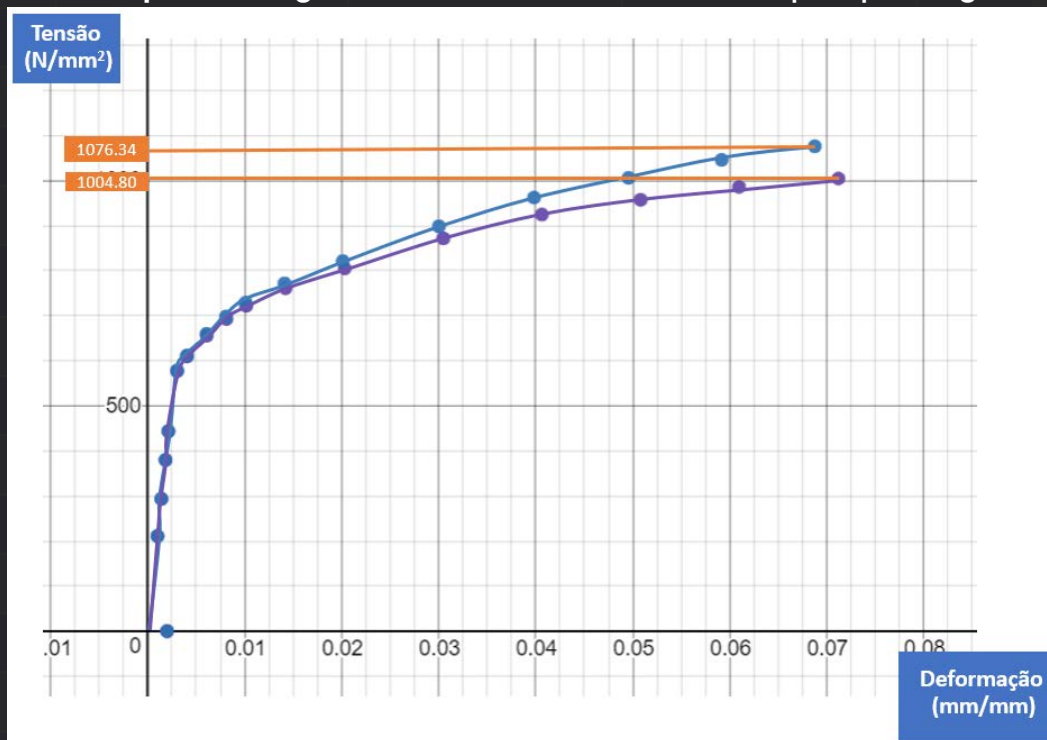
$$\frac{293.37 - 211.05}{0.00142 - 0.00102} = 205.800 \text{ N/mm}^2$$



O Módulo de elasticidade define a relação entre tensão e deformação em um material no regime de elasticidade linear de uma deformação uniaxial.



É necessário observar bem o gráfico, pois ele pode mudar seu comportamento dependendo do material. Nesse caso, o limite de ruptura é igual ao limite de resistência porque o gráfico é



O limite de ruptura é o ponto no qual o material fratura.

Carga
(kN)

Alongamento
(mm)

Tensão
engenharia
(N/mm²)

Deformação de
engenharia

Tensão
(N/mm²)

25.9
36.0
46.6
54.4
70.8
74.8
80.5
85.0
88.6
93.4
98.8
107.2
113.5
117.5
121.0
123.3

3.048
3.560

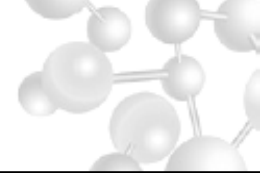
986.06
1004.80

0.06096
0.07120

1046.17
1076.34

0.05917
0.06877

Deformação
(mm/mm)



Carga
(KN)

Alongamento
(mm)

Tensão
engenharia

Deformação de
engenharia

Tensão
(N/mm²)

25.9

36.0

46.6

54.4

70.8

0.107

0.152

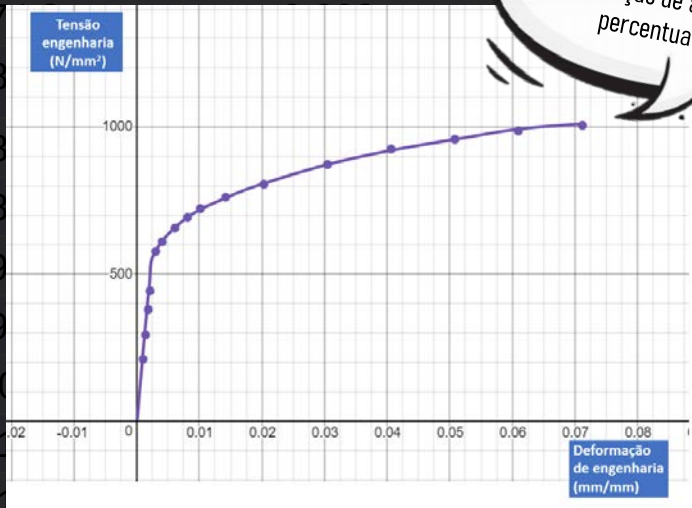
Observação: o gráfico não
te dá informação
suficiente para calcular a
redução de área
percentual.

$$A_o = \pi \times \left(\frac{D_o}{2}\right)^2 = 122.71 \text{ mm}^2$$

$$A_f = \pi \times \left(\frac{D_f}{2}\right)^2 = 105.68 \text{ mm}^2$$

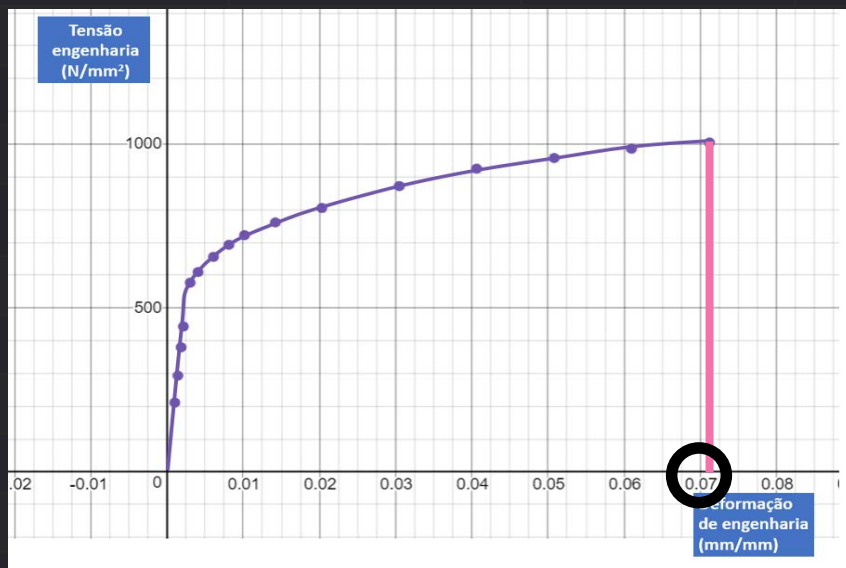
$$\%RA = 100 \times \frac{A_o - A_f}{A_o}$$

$$100 \times \frac{122.71 - 105.68}{122.71} = 13.87\%$$





Agora, se pedir para calcular o alongamento percentual é mais fácil. O gráfico te informa isso (deixei explícito no gráfico). Entretanto, há outras maneiras de calcular essa medida, como resolvi passo a passo à direita.



$$L_0 = \frac{\Delta l}{\epsilon_c} = \frac{0.051}{0.00102} = 50\text{mm}$$

$$L_f = (\epsilon_c \times L_0) + L_0 = 53.56\text{mm}$$

$$\begin{aligned} \%AL &= 100 \times \frac{L_f - L_0}{L_0} \\ 100 \times \frac{53.56 - 50}{50} &= \\ &= 7.12\% \end{aligned}$$

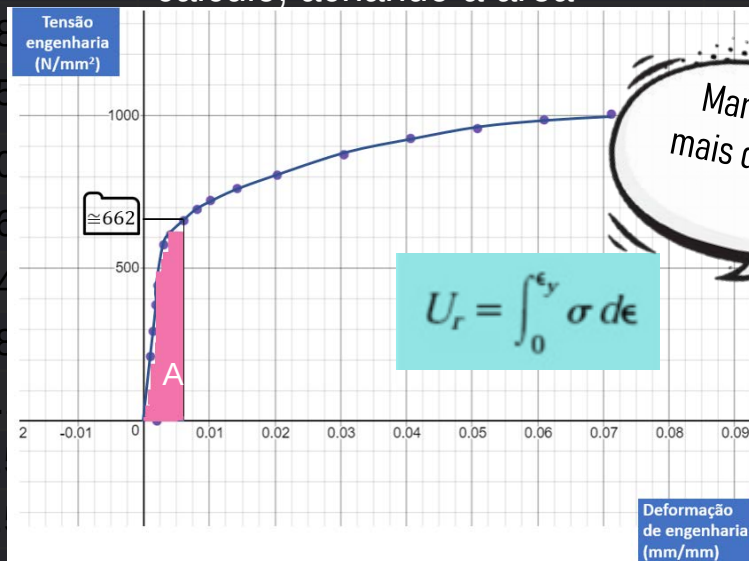
Portanto, o material pode ser considerado como um material dúctil.



A resiliência é a capacidade de um material absorver energia sob tração quando ele é deformado elasticamente e devolvê-la quando relaxado.

Primeiro método: Usar o conceito de “Integral” do cálculo, achando a área

Segundo método: Usar a fórmula.



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

$$U_r = \frac{662^2}{2 \times 205.800}$$

$$U_r = 1.064 \text{ N/mm}^2$$



A tenacidade é a medida da habilidade de um material em absorver energia até a fratura.

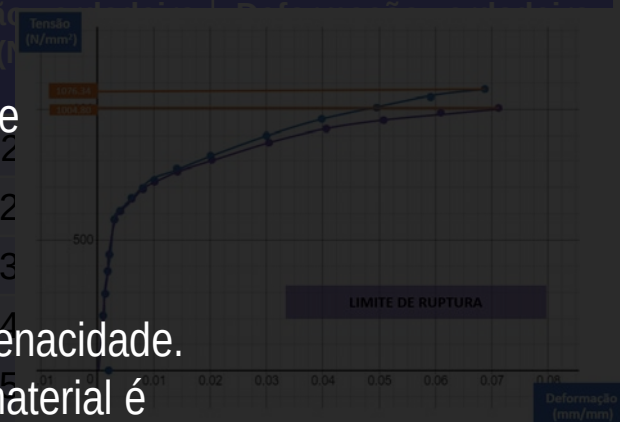
Existem duas fórmulas para calcular o módulo da tenacidade.

Para saber qual usar, você tem que saber se o material é dúctil ou frágil. No caso desse exercício, o material é considerado dúctil. Portanto,

$$U_t = \frac{\sigma_y + \sigma_r}{2} \times \epsilon_f$$

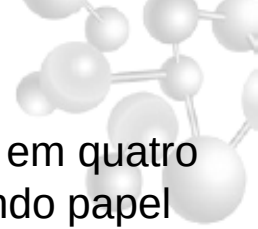
$$U_t = \frac{662 + 1004.80}{2} \times 0.07120$$

$$U_t = 59.33 \text{ N/mm}^2$$



Carga (KN)	Alongamento (mm)	Tensão engenharia (N/mm²)	Deformação de engenharia (mm/mm)	Tensão (N/mm²)	Deformação (mm/mm)
25.9	0.051	211.05	0.00102	500.00	0.00102
36.0	0.071	293.37	0.00142	550.00	0.00142
46.6	0.092	379.75	0.00184	600.00	0.00184
54.4	0.107	442.32	0.00214	650.00	0.00214
70.8	0.152	576.97	0.00304	700.00	0.00304
74.8	0.202	602.56	0.00406	750.00	0.00406
80.5	0.305	656.01	0.00610	800.00	0.00610
85.0	0.406	698.31	0.00808	850.00	0.00808
88.6	0.508	729.35	0.01010	900.00	0.01010
93.4	0.711	771.96	0.01411	950.00	0.01411
98.8	1.016	821.51	0.02011	1000.00	0.02011
107.2	1.524	898.54	0.03002	1050.00	0.03002
113.5	2.032	962.52	0.03983	1100.00	0.03983
117.5	2.541	957.54	0.05082	1150.00	0.05082
121.0	3.048	986.06	0.06096	1200.00	0.06096
123.3	3.560	1004.80	0.07120	1250.00	0.07120

Lista 04 – Exercício Impacto



Q11 – Os dados a seguir foram obtidos com uma série de ensaios de impacto Charpy em quatro tipos de aço, cada um deles com um teor de manganês distinto. Trace o gráfico utilizando papel milimetrado de energia absorvida-temperatura e determine:

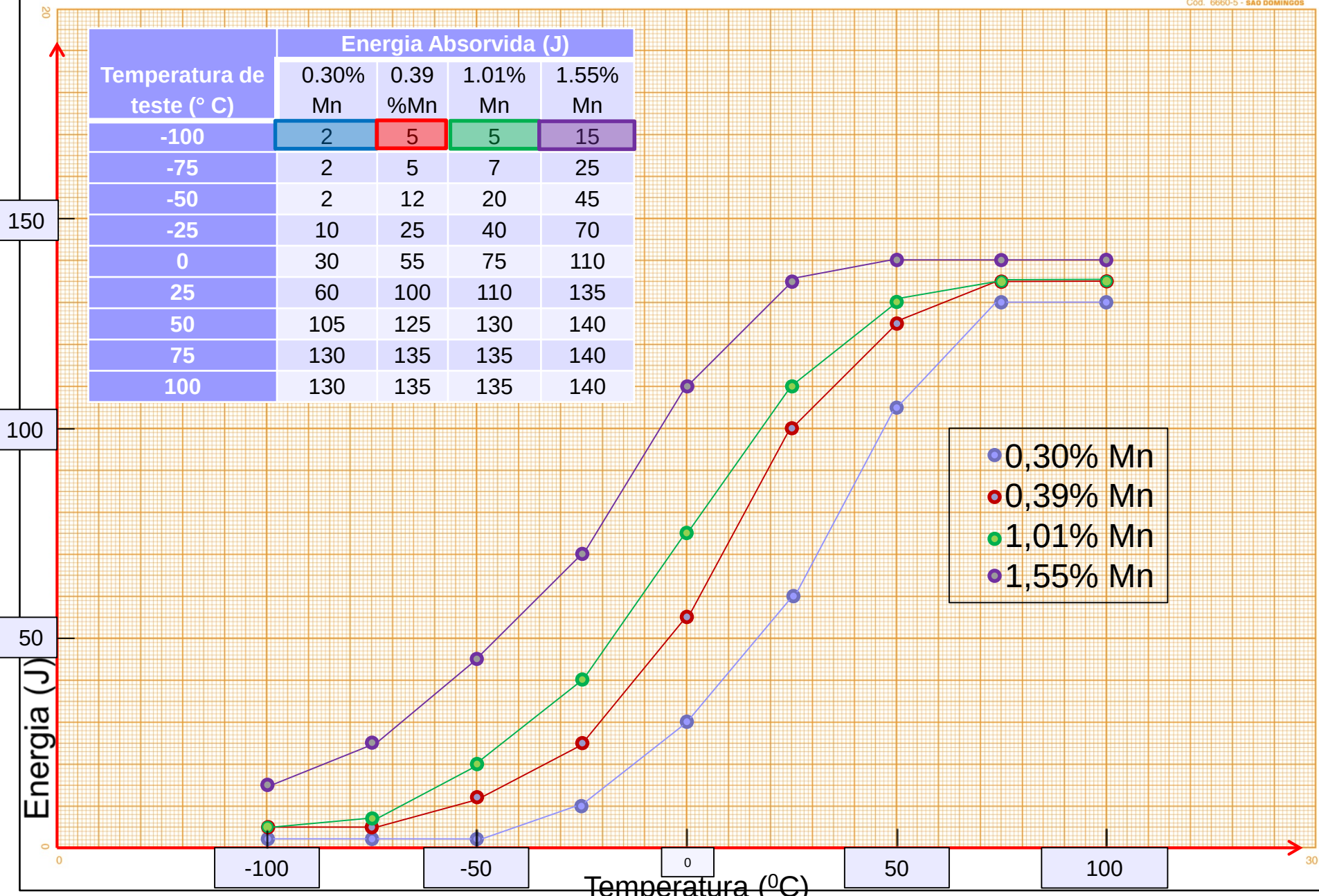
- (a) a temperatura de transição em função do teor de manganês definida pela média das energias absorvidas nas regiões dúctil e frágil;
- (b) a temperatura de transição em função do teor de manganês definida como a temperatura correspondente a 50 J de energia absorvida.
- (c) Qual seria o teor mínimo de manganês para que o aço pudesse ser empregado em uma peça usada a 0°C?

Tabela 2 – Energia absorvida de um aço para diferentes teores de Mn.

Temperatura de teste (° C)	Energia Absorvida (J)			
	0,30%Mn	0,39%Mn	1,01%Mn	1,55%Mn
-100	2	5	5	15
-75	2	5	7	25
-50	2	12	20	45
-25	10	25	40	70
0	30	55	75	110
25	60	100	110	135
50	105	125	130	140
75	130	135	135	140
100	130	135	135	140

Lista 04

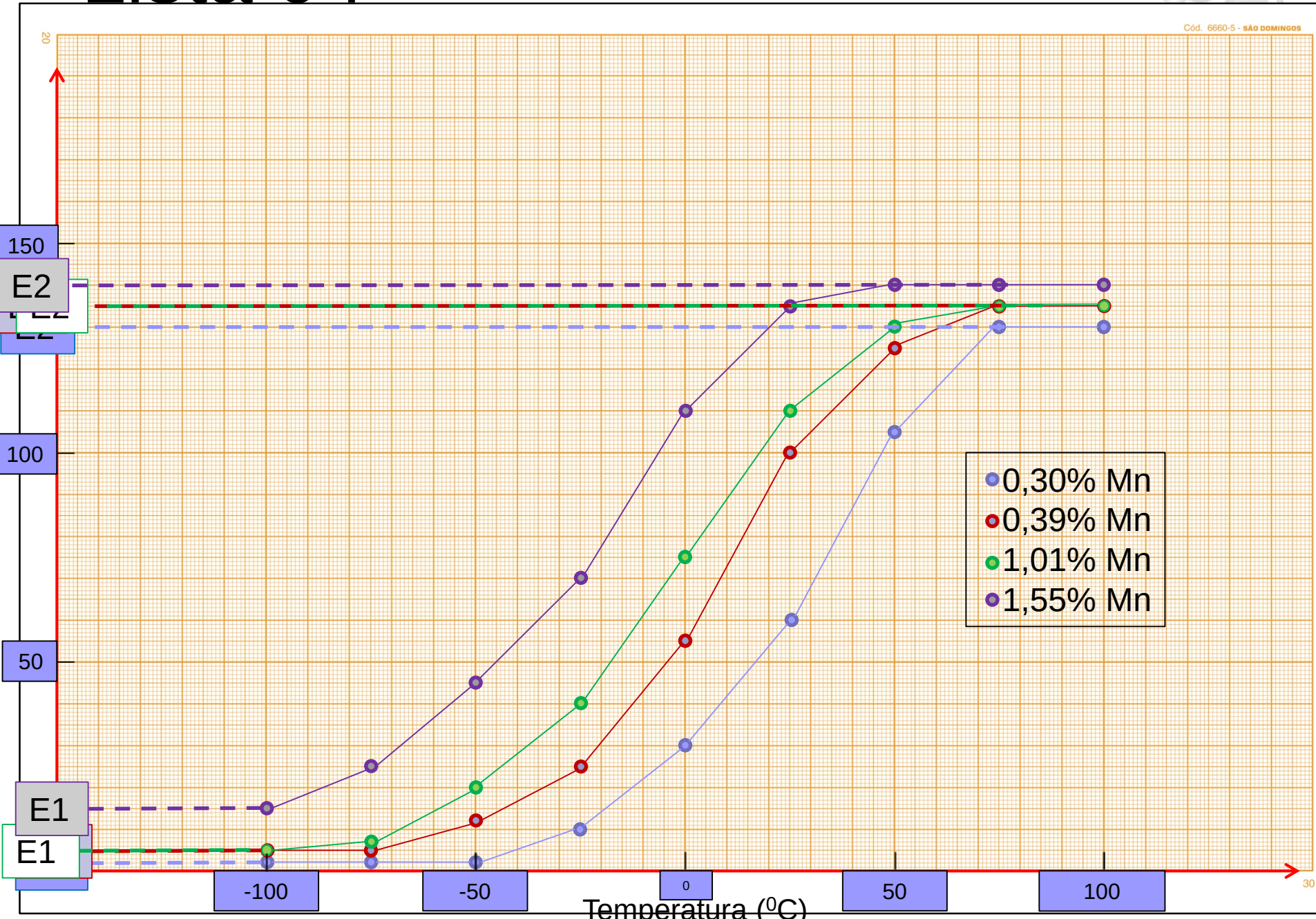
Cód. 6660-5 - SÃO DOMINGOS



Lista 04



Cód. 6660-5 - SÃO DOMINGOS



Lista 04



$$E_{trans} = \frac{E2 + E1}{2} + E1$$

- 0,30% Mn E1= 2 J E2= 130 J

$$E_{trans} = \frac{2 + 130}{2} + 2$$

$$E_{trans} = 68 J$$

- 0,39% Mn E1= 5 J E2= 135 J

$$E_{trans} = \frac{5 + 135}{2} + 5$$

$$E_{trans} = 75 J$$

- 1,01% Mn E1= 5 J E2= 135 J

$$E_{trans} = \frac{5 + 135}{2} + 5$$

$$E_{trans} = 75 J$$

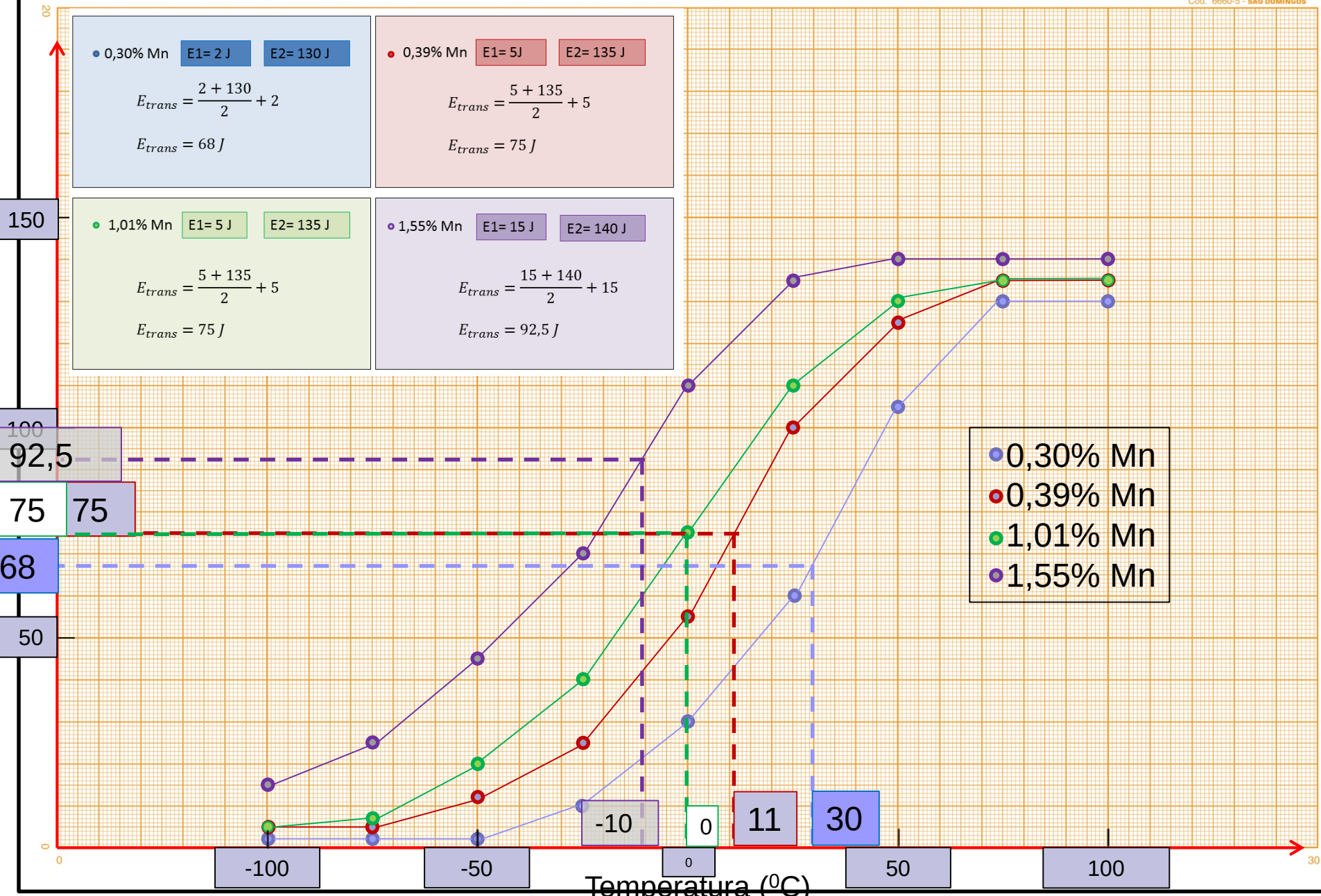
- 1,55% Mn E1= 15 J E2= 140 J

$$E_{trans} = \frac{15 + 140}{2} + 15$$

$$E_{trans} = 92,5 J$$

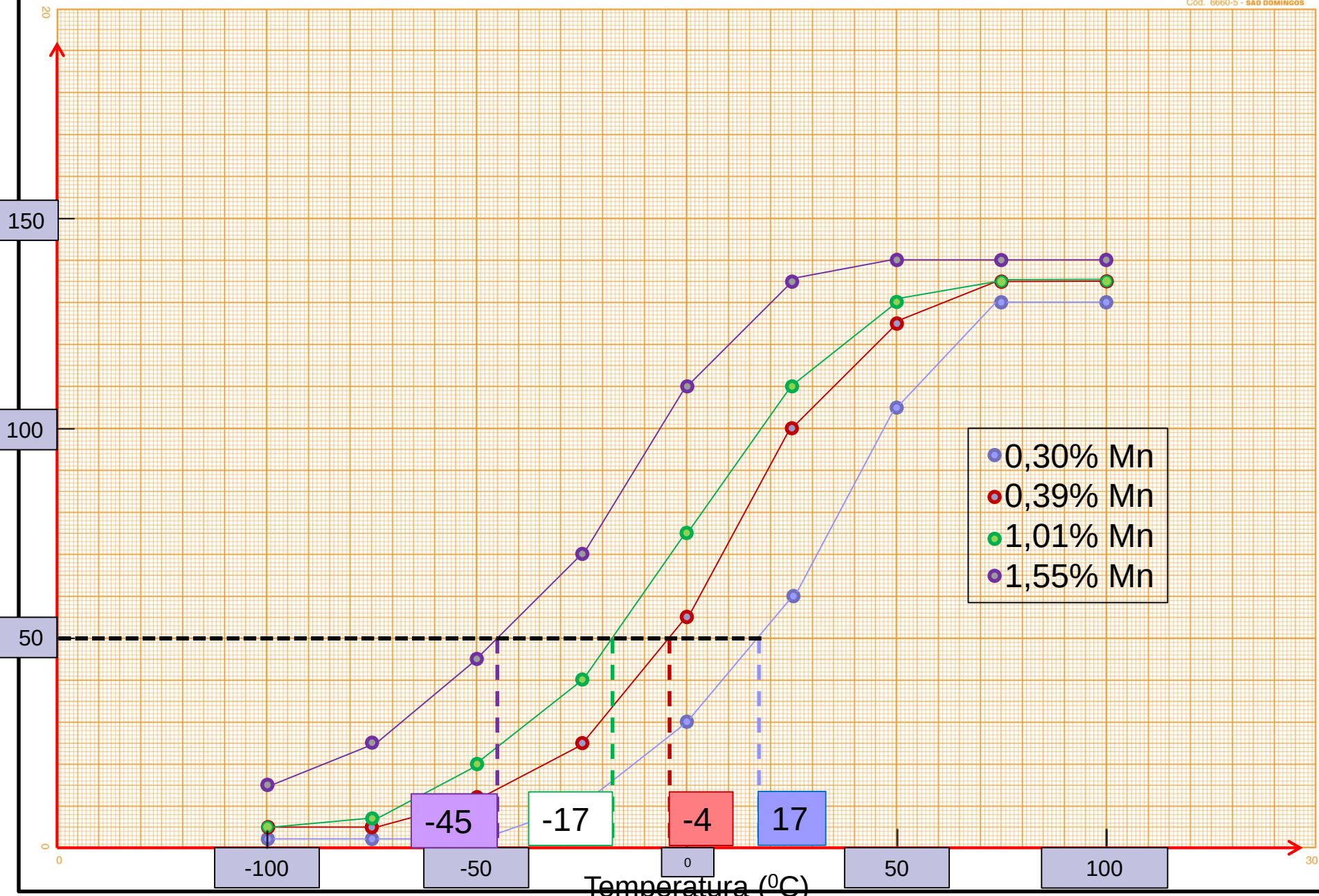
Lista 04

Cód. 6660-5 - SÃO DOMINGOS



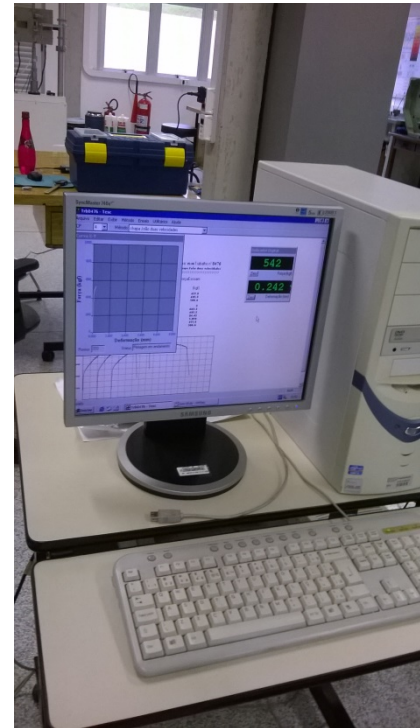
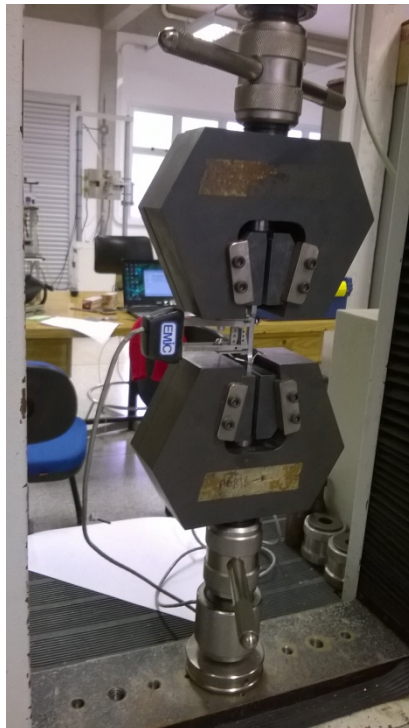
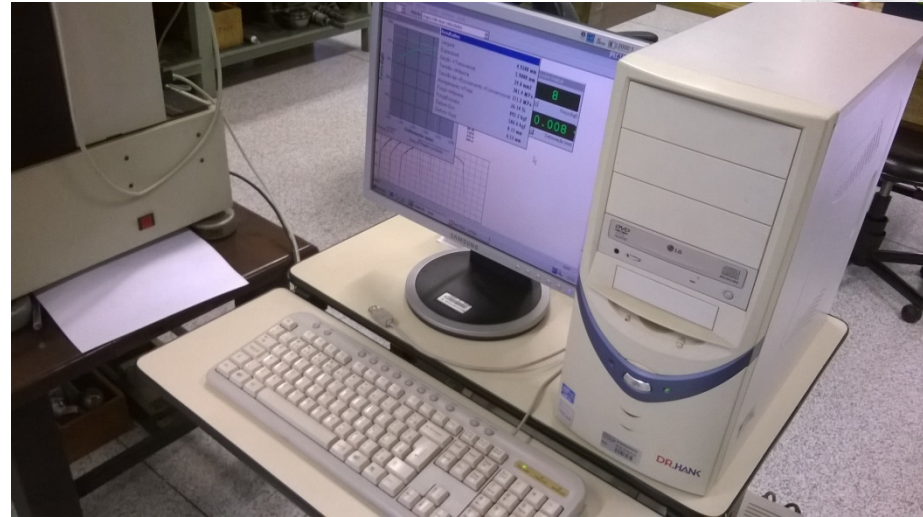
Lista 04

Cód. 6660-5 - SÃO DOMINGOS



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

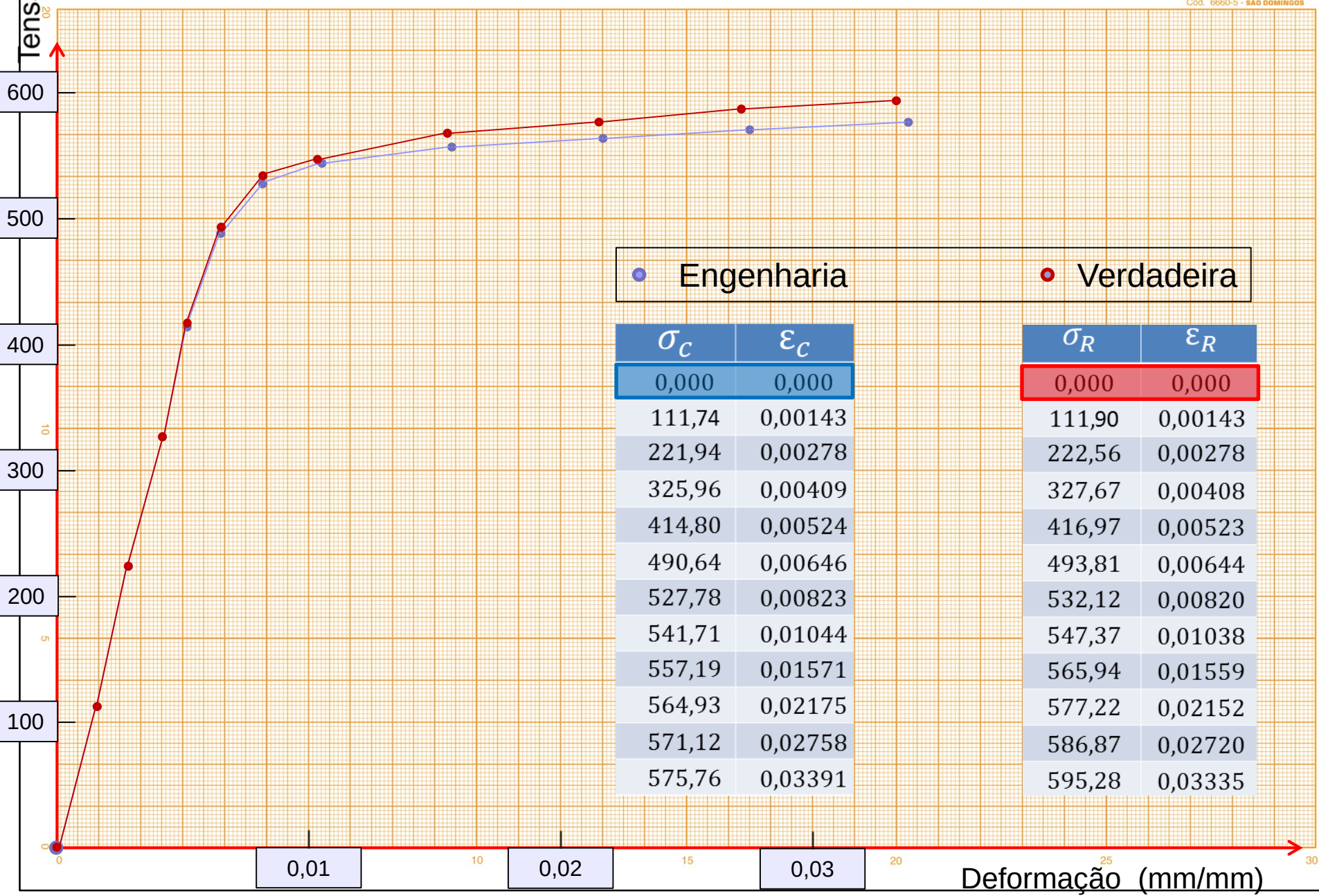
$$A_0 = 64,61 \text{ mm}^2$$

P (N)	Δl (mm)	σ_c	ε_c	$1 + \varepsilon_c$	σ_R	ε_R
0	0	$\sigma_c = 0,000 \sigma_0$	$\varepsilon_c = 0,000 \varepsilon_0$	1,00000	$\sigma_R = 0,000 \sigma_c$	$\varepsilon_R = 0,000 \varepsilon_c$
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

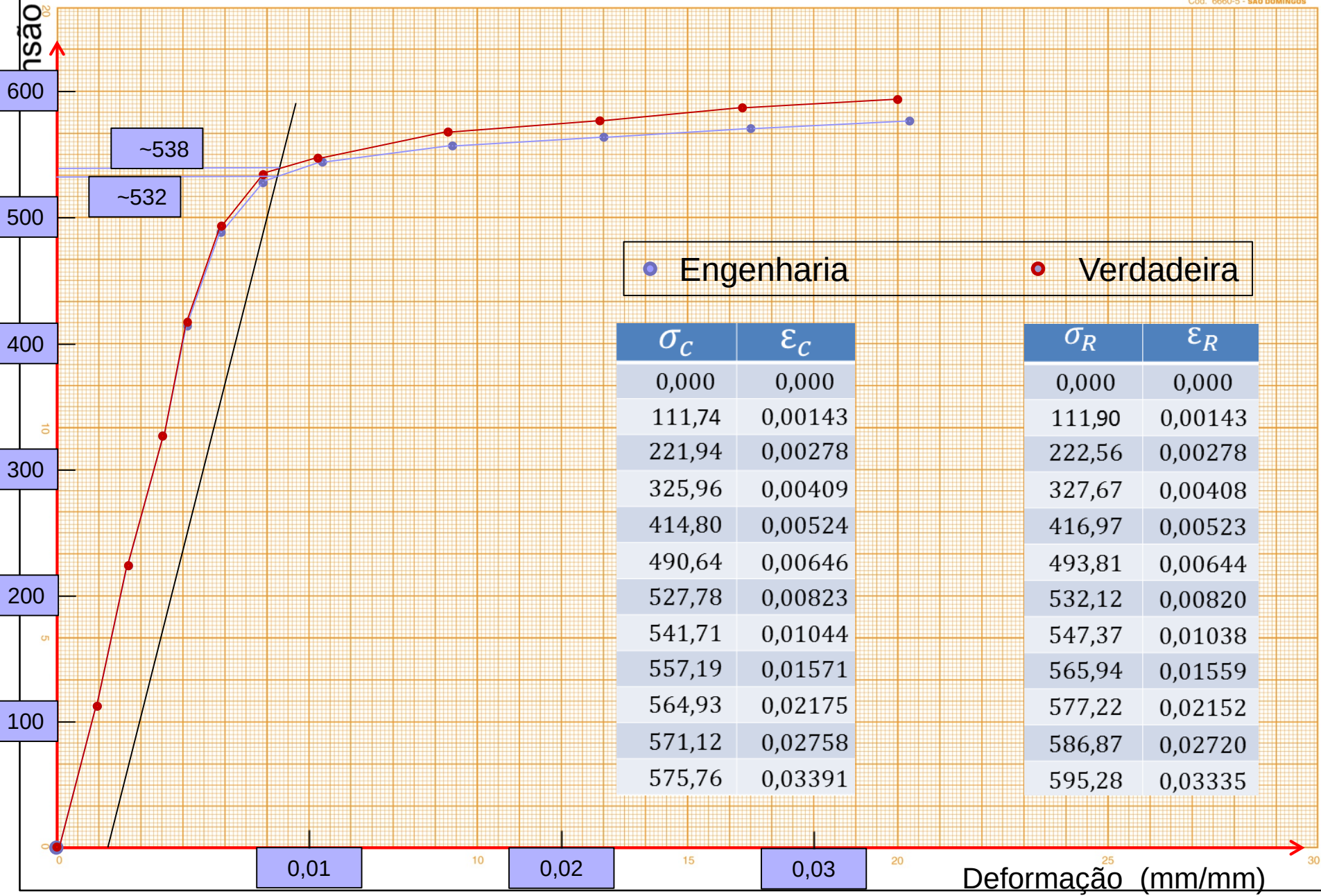
Cód. 6660-5 - SÃO DOMINGOS



Pressão (MPa)

Lista 05

Cód. 6660-5 - SÃO DOMINGOS



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 resistencia

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

Módulo de Resiliência

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

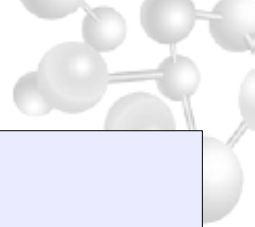
$$U_r = \frac{532^2}{2 \times 79160}$$

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

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)

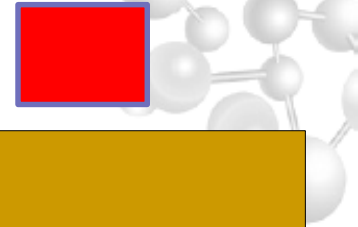
$$\%RA = 100 \times \frac{A_o - A_f}{A_o} \quad \%RA = 100 \times \frac{64,61 - 62,21}{64,61}$$

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

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)

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

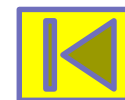
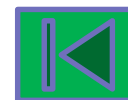
$$n \approx 0,072$$

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

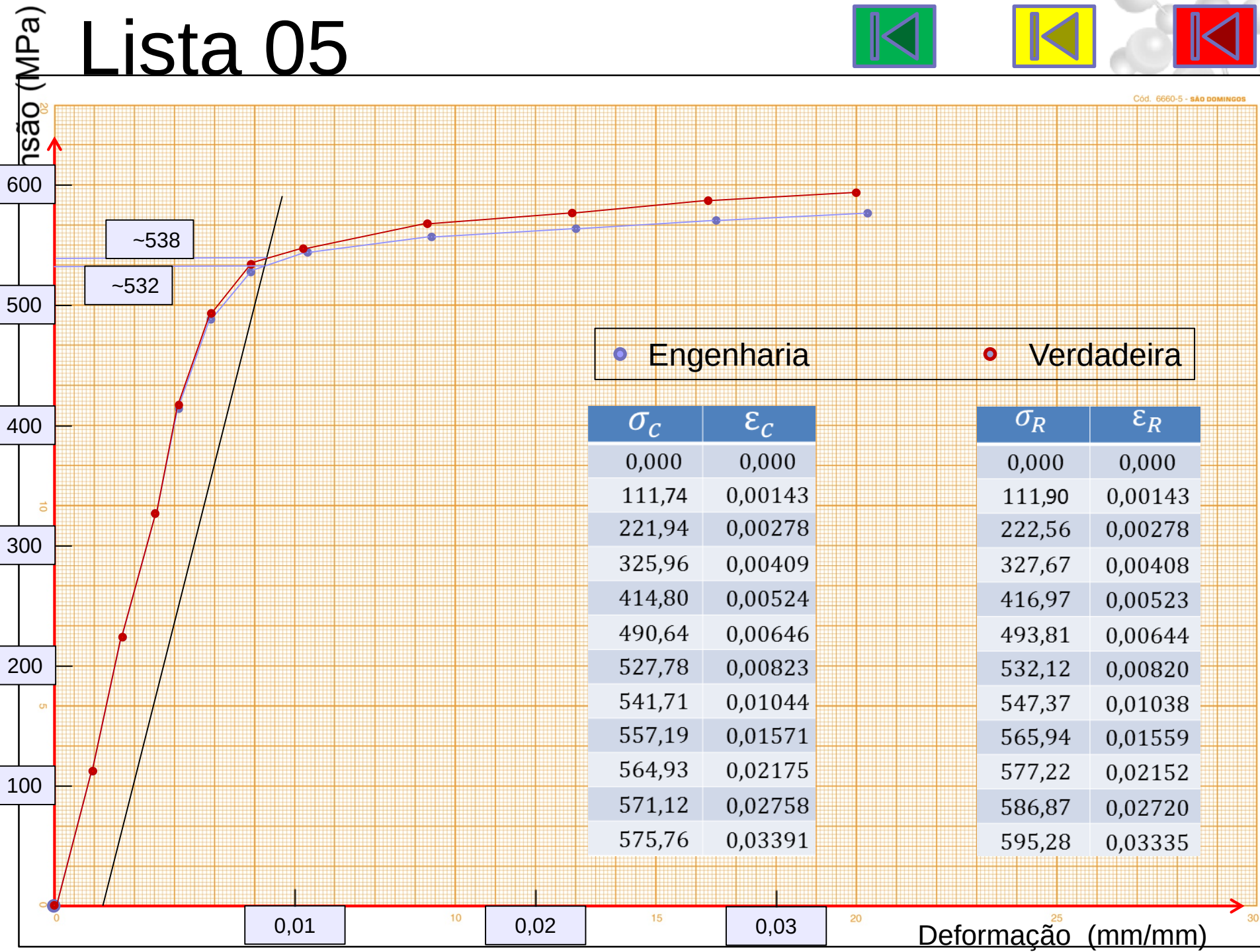
Ver Gráfico

Ver Tabela

Lista 05



Cód. 6660-5 - SÃO DOMINGOS

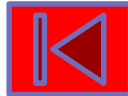
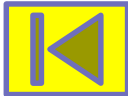
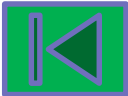


$$l_0 = 58,8 \text{ mm}$$

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 !!!