



SMM 0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

PROPRIEDADES MECÂNICAS
ENSAIOS DE DUREZA, IMPACTO E
TRAÇÃO
INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE
FALHAS

PROPRIEDADES MECÂNICAS	PROPRIEDADES FÍSICAS
RESISTÊNCIA MECÂNICA	DENSIDADE
DUREZA	VISCOSIDADE
DUTILIDADE	PERMEABILIDADE MAGNÉTICA
TENACIDADE	PERMEABILIDADE ELÉTRICA
TENACIDADE AO IMPACTO	PONTO DE FUSÃO
TENACIDADE À FRATURA	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
MÓDULO DE ELASTICIDADE	CONDUTIVIDADE TÉRMICA
RIGIDEZ	TRANSPARÊNCIA
RESISTÊNCIA À FADIGA	OPACIDADE
COEFICIENTE DE POISSON	COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA
LIMITE DE ESCOAMENTO	MAGNETISMO
LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	CALOR ESPECÍFICO
RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA	ESTABILIDADE DIMENSIONAL

**OS ENSAIOS MECÂNICOS MEDEM AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS
MATERIAIS.**

Uma possível definição:

“Os ensaios mecânicos são aqueles em que se aplicam forças, momentos, deslocamentos ou outros estímulos a um sistema mecânico ou amostra de material, medindo-se a resposta apresentada.”

**UM POUCO DE HISTÓRIA:
ENSAIOS MECÂNICOS NO BRASIL**

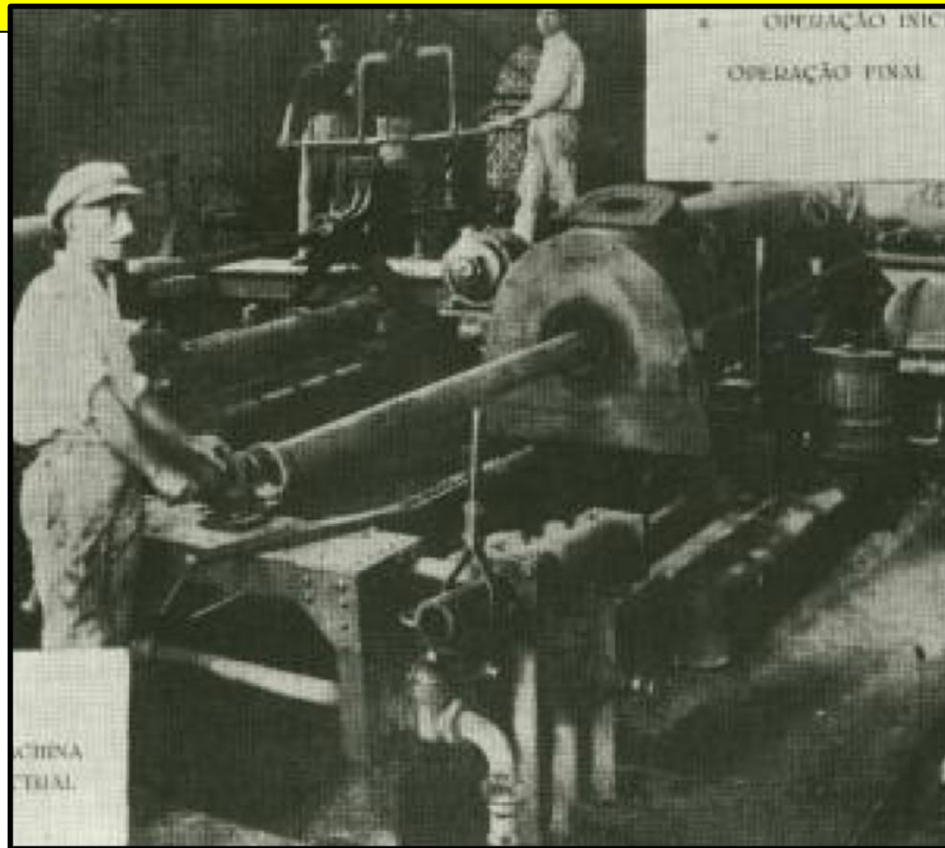
**ENSAIOS MECÂNICOS NO BRASIL
GABINETE DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS (GRM)- EP**



Gabinete de resistência dos Materiais (GRM) da Escola Politécnica de São Paulo [MARCOLIN, 2013].

A primeira obra considerada tecnológica do Brasil foi a publicação, pelo **Grêmio Politécnico**, do **Manual de Resistência de Materiais (1905)**, sob supervisão de **Paula Souza e Francisco de Paula Ramos de Azevedo (1851-1928)** [MARCOLIN, 2013].

Foram os trabalhos do GRM que contribuíram para o desenvolvimento do processo de **produção de tubos de ferro fundido centrifugados, criação brasileira** do Engenheiro francês radicado aqui, Demètre Sensaud de Lavaud (1909).

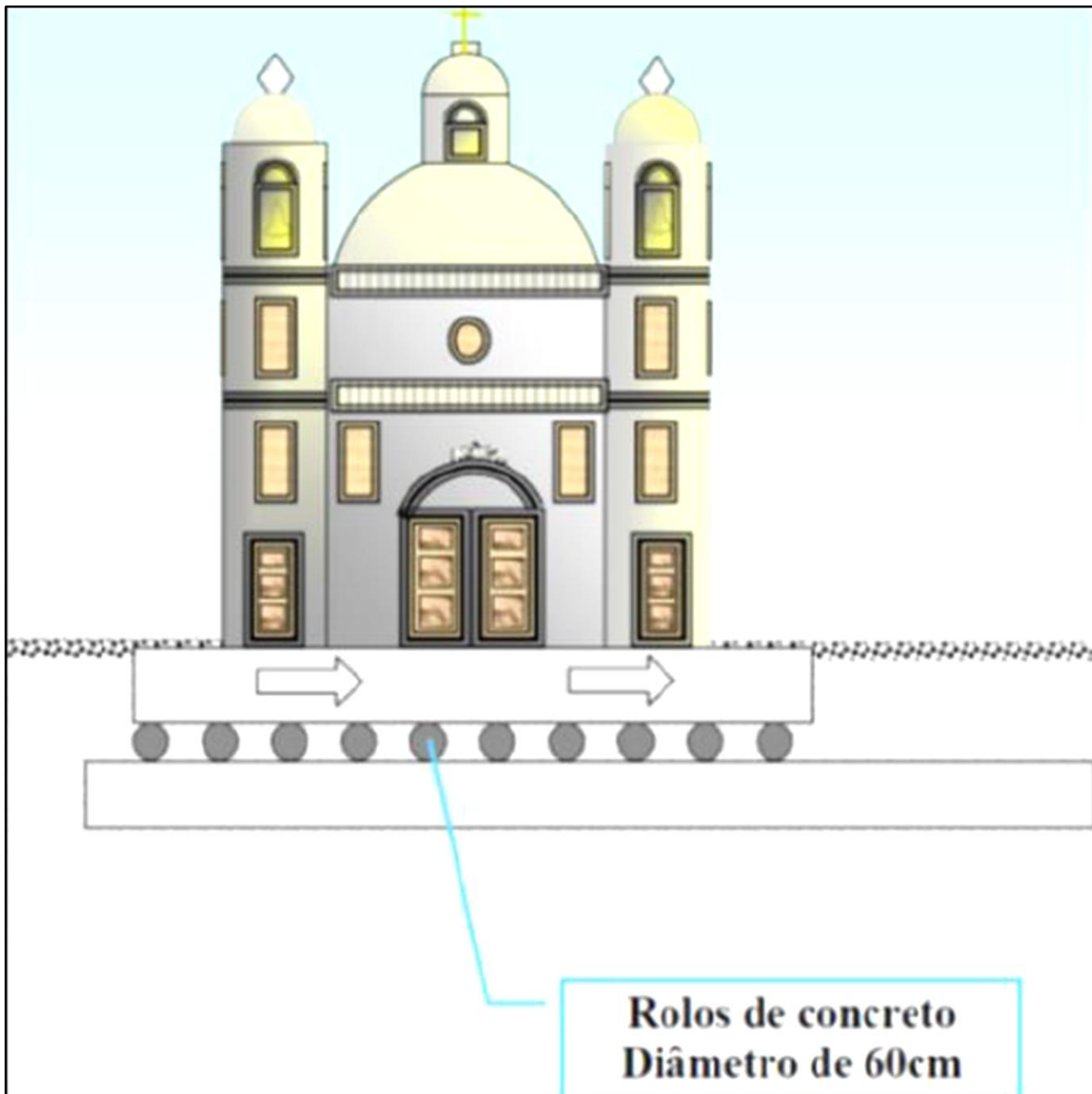


Prof. **Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro** (1913-2001), do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) do Rio de Janeiro.

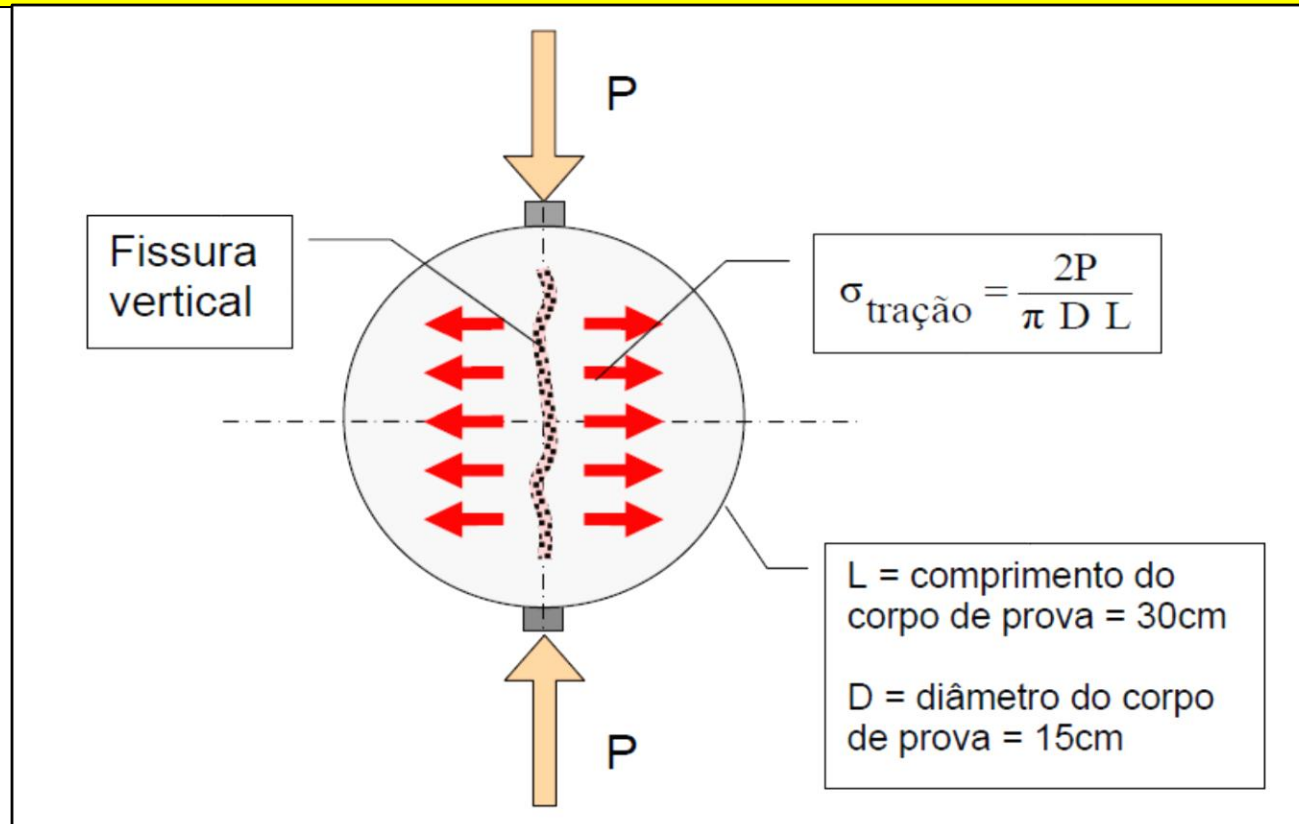
- Abertura da Avenida Presidente Vargas na cidade do Rio de Janeiro (**1941**);
- Igreja de São Pedro dos Clérigos, construída em 1732;
- Procedimento similar ao já realizado na Europa pela empresa Franki para remover a igreja;
- Na parte inferior da edificação seria construído um suporte de concreto e a mesma seria movida sobre rolos cilíndricos. Ao invés de utilizar **rolos de aço**, como **usual**, ocorreu a **ideia da utilização de cilindros de concreto com 60 cm** de diâmetro;

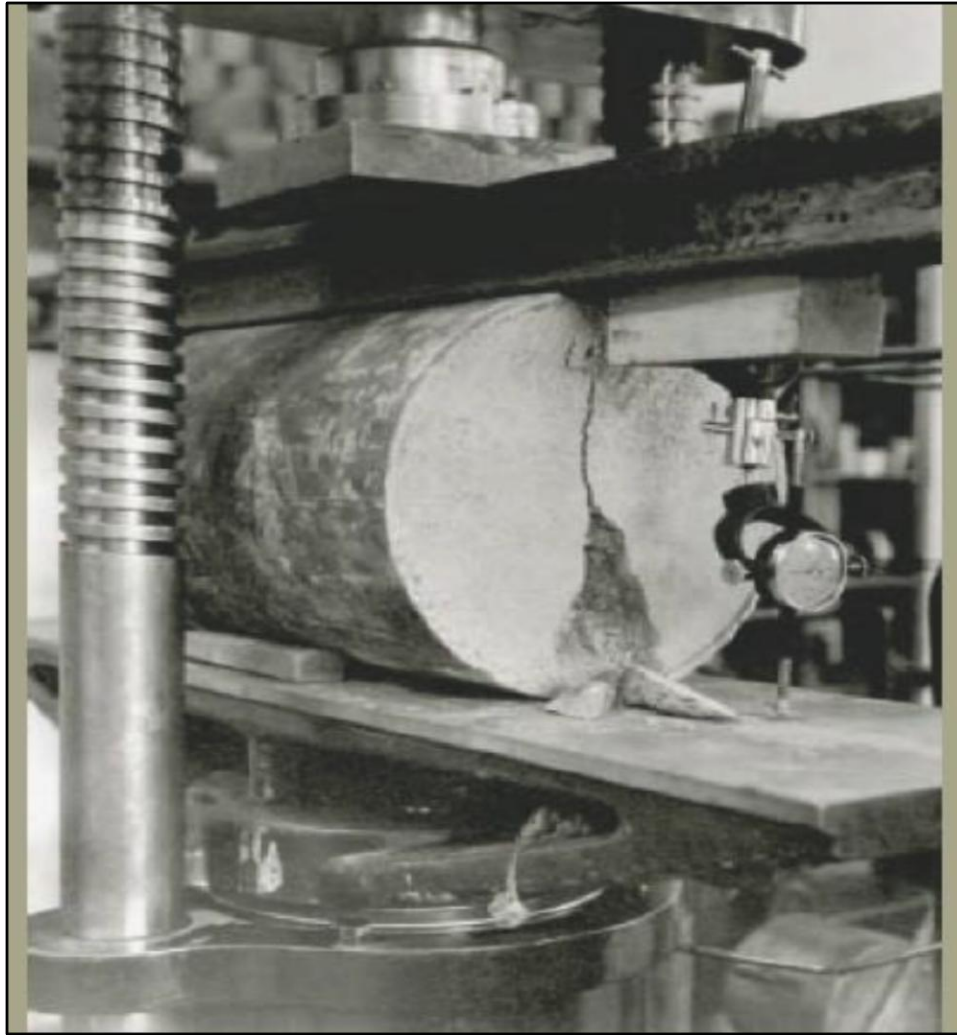


Professor Lobo Carneiro em conferência no Clube de Engenharia, em 27/04/1948



Ao realizar **ensaios invertidos de compressão**, isto é, ao invés de aplicar a **carga** paralelamente ao eixo longitudinal do corpo-de-prova, mas **paralelo ao diâmetro**, o Prof. Lobo notou que ocorria uma **trinca central** e a peça se partia ao meio. Estudando o problema, baseado em física, percebeu que as **tensões geradas eram de tração**, a partir do **centro do corpo-de-prova**



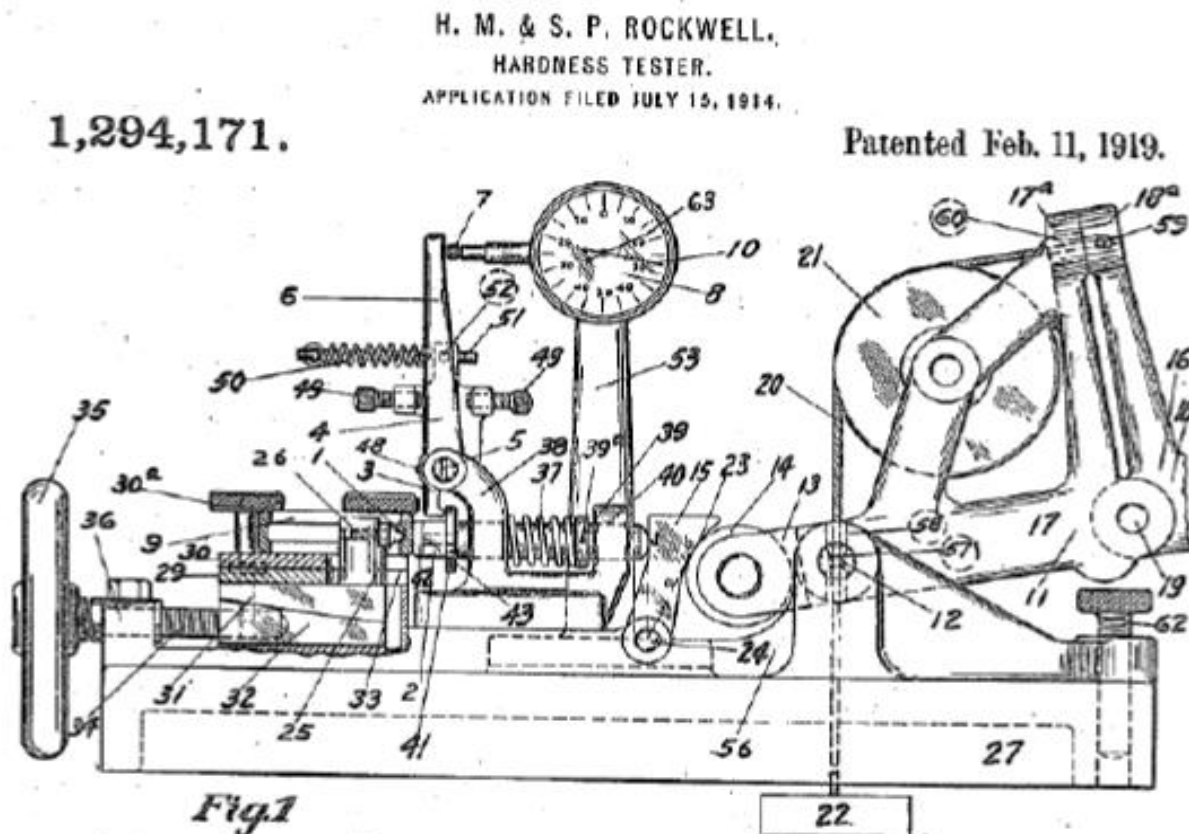


**“Ensaio de Compressão Diametral” ou “Ensaio Indireto de Tração”
Em 1962 o ensaio foi aceito pela ASTM e em 1980 pela ISO.
ASTM C496/C496M-17 (2017). Standard Test Method for Splitting
Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimen**

ENSAIO DE DUREZA-HISTÓRICO

- Mohs(1822) – capacidade de riscar;
- J.A. Brinell(1849-1925) – 1900 dureza por penetração;
- Os irmãos Stanley e Hugh Rockwell – 1919.

Um dos desenhos da primeira patente do durômetro Rockwell, de 1919.



ENSAIO DE DUREZA

Métodos de medição:

- Dureza por risco (escala de Mohs)
- Dureza por choque ou ressalto (Shore)
- Dureza por penetração (Brinell, Rockwell, Vickers)

Importância:

- Análise prévia-movimentação;
- Análise prévia- T.Térmico;
- Controle de qualidade. Ex: Trefilação.

ENSAIO DE DUREZA

Definição: Medida da resistência de um material a uma deformação plástica (permanente) localizada (pequena impressão ou risco)

Principais Vantagens:

- Fácil execução e barato (muito utilizado na indústria)
- Rapidez na execução
- Ensaio pode ser considerado não destrutivo (tamanho impr.)
- Conhecimento aproximado da resistência mecânica por meio de tabelas de correlação

Dureza Mohs - risco

O primeiro método padronizado de ensaio de dureza foi baseado no processo de riscagem de minerais padrões, desenvolvido por Mohs, em 1822.

Curiosidade Escala Mohs (1822)

- | | |
|----|------------------------|
| 1 | – Talco |
| 2 | – Gipsita |
| 3 | – Calcita |
| 4 | – Fluorita |
| 5 | – Apatita |
| 6 | – Feldspato (ortóssio) |
| 7 | – Quartzo |
| 8 | – Topázio |
| 9 | – Safira e corindo |
| 10 | – Diamante |

AUMENTO DA DUREZA

Indicação essencialmente **qualitativa** por comparação com outros minerais (*qualquer mineral da escala risca o que os precede e é riscado pelo seguinte*)

Pouco utilizada (**imprecisa**) nos metais (dureza entre 4 a 8)

Ex. aço dúctil corresponde a uma dureza de 6 Mohs, a mesma dureza Mohs de um aço temperado.

Dureza Shore (HS) – choque ou rebote

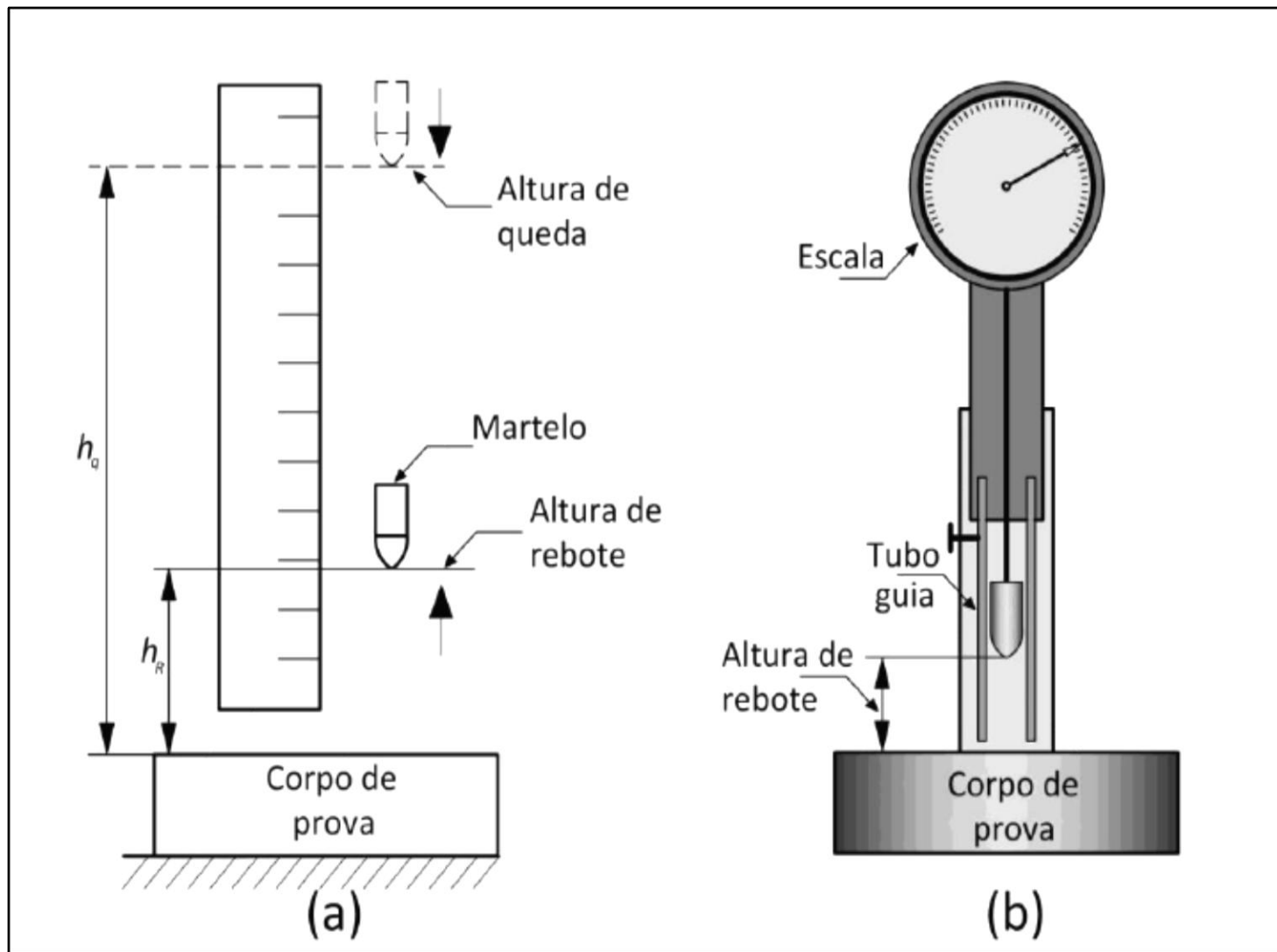
Shore propôs uma medida de dureza por **choque** que mede a altura do rebote de um peso que cai livremente até bater na superfície lisa e plana de um CP. Esta **altura de rebote** mede a **perda de energia** do peso, **absorvida pelo CP**: diferença de **Energia potencial**.

Bancada



Portáteis





Dureza Shore (rebote). Esclerosc6pio, modelo cl6ssico criado em 1905

EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS MODERNOS

DynaPOCKET



DynaMIC



MIC 20



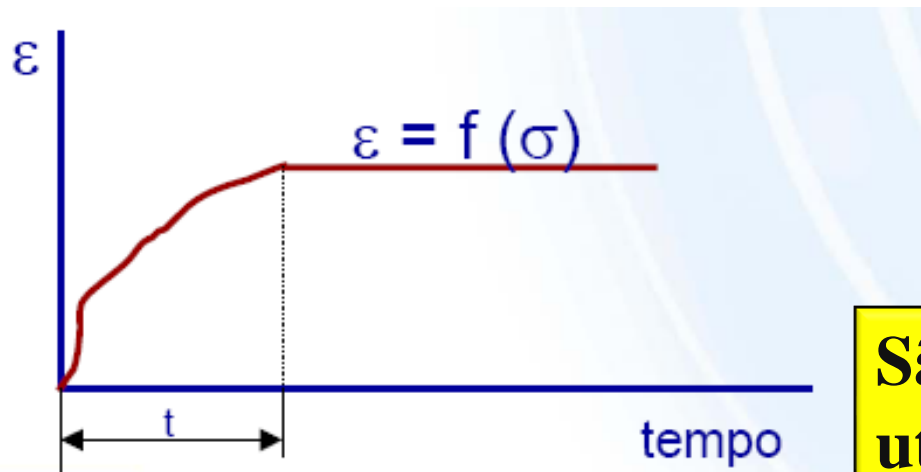
APLICAÇÃO



Dureza por penetração (princípios gerais)

Cuidados na realização dos ensaios:

- **Perpendicularidade** entre a **direção** de aplicação da força e a **superfície** da peça;
- Aplicação **lenta** da carga;
- **Preparação** correta da **superfície** da peça;
- **Tempo** de espera após **aplicação da carga** antes da descarga (**fenômeno de fluência transitória**).



Valores de t:

Mg – 60s

Aços – 10s

São os ensaios de dureza mais utilizados na atualidade

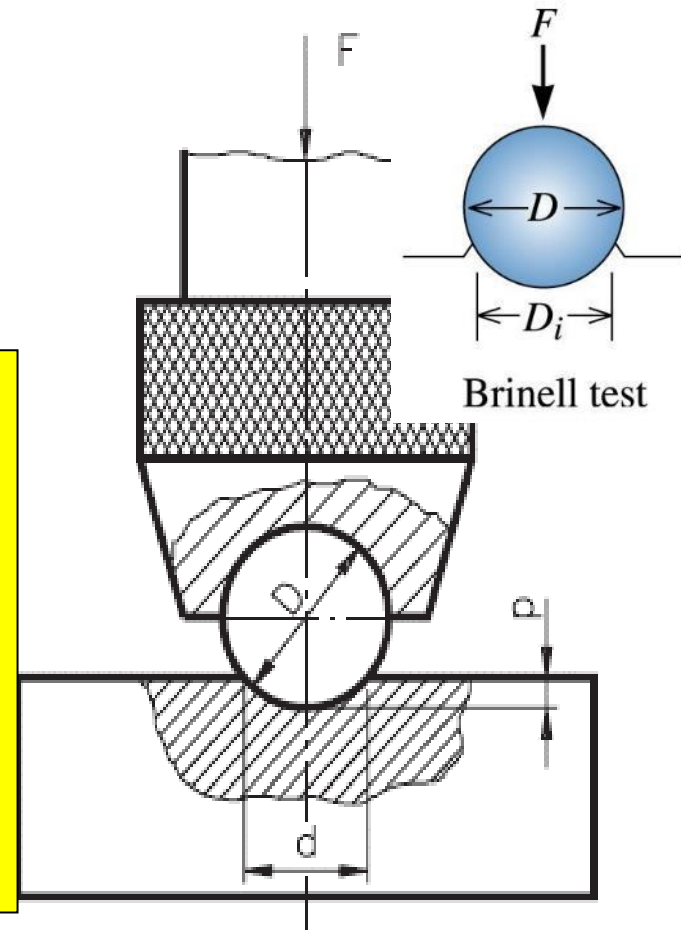
Dureza Brinell (HB) – Ano 1900

Consiste em comprimir lentamente uma **esfera de carbeto de tungstênio (CW) ou aço**, de diâmetro D , sobre uma superfície polida e limpa de um metal através de uma carga F , durante um tempo t .

Penetrador esférico Φ : **1, 2, 2.5, 5 ou 10 mm** (NBR NM187-1999) e/ou **1, 2.5, 5 e 10** (ASTM E10-2007)

Cargas: entre **500 e 3000 kg**

Tempo: entre **10 e 30 s**



$$HB = \frac{F}{A_c} \quad HB = \frac{F}{\pi D p}$$

P = prof. de impressão (da calota)

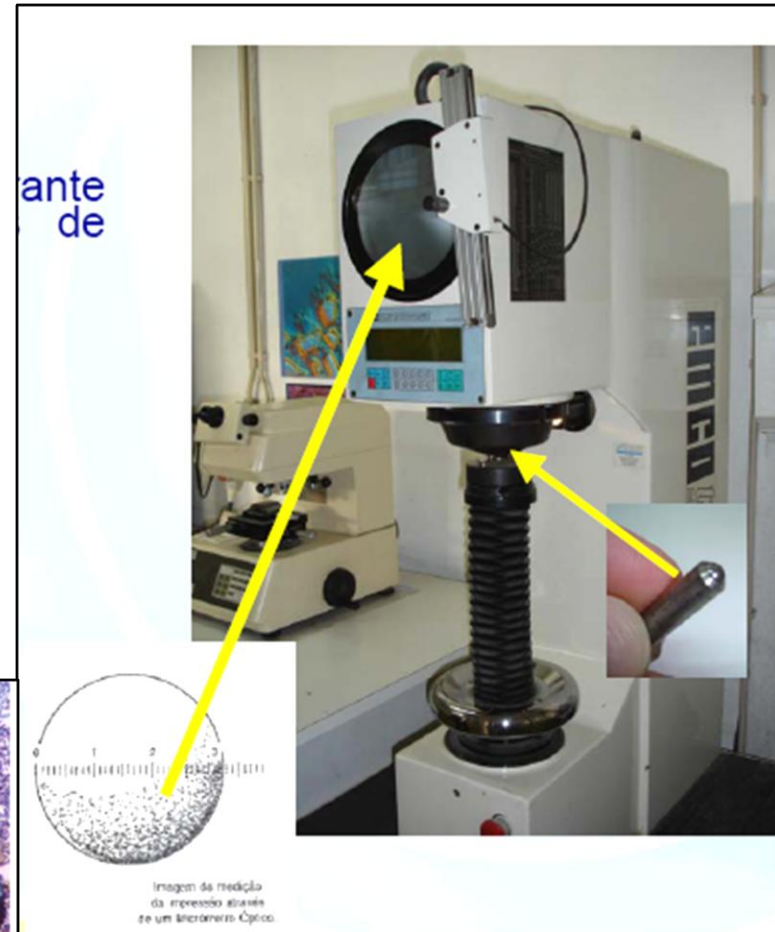
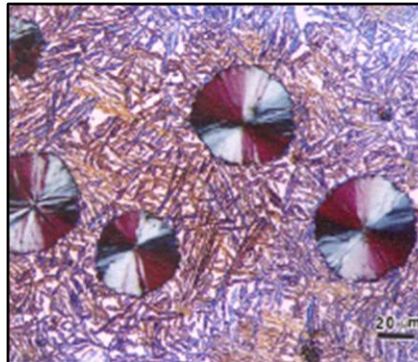
Para **diferenciar** entre os tipos de **esfera** usadas, a dureza Brinell passou a ser especificada como **HBS** para esfera de **aço** (a letra “S” vem de **steel**, aço em inglês) e **HBW** quando se usa esfera de **carbeto de tungstênio** (cujo símbolo químico, **W**, vem de **wolfrâmio**, que por sua vez remete ao mineral **wolframita**).

Mecanismo de Medição Brinell

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

- D=diâmetro da esfera
- d=diâmetro da impressão*

***medido com microscópio especial acoplado, utilizando uma escala gravada em sua ocular**



Dureza Brinell (HB)

A unidade kgf/mm^2 , que deveria ser sempre colocada após o valor de HB, é omitida, uma vez que a dureza Brinell não é um conceito físico satisfatório, pois a força aplicada no material tem valores diferentes em cada ponto da calota.

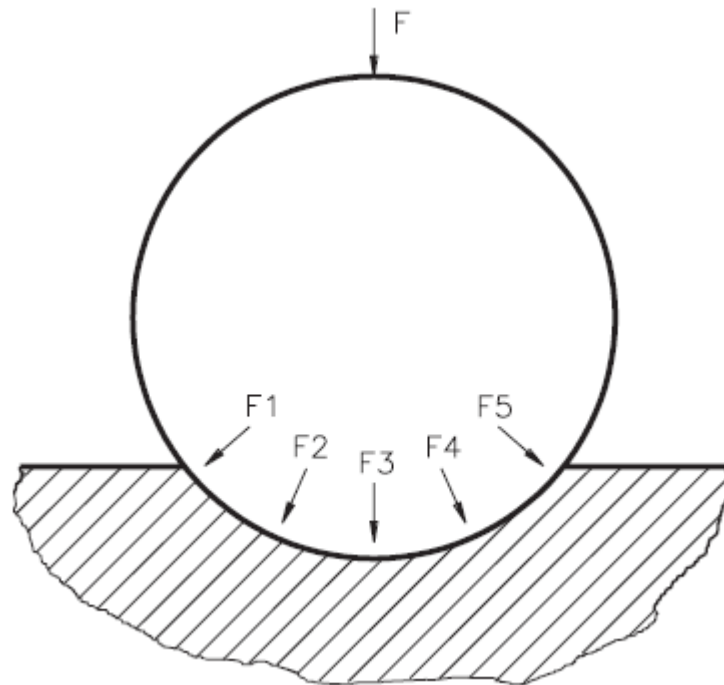


Tabela que fornece os valores de dureza Brinell normal, em função de um diâmetro de impressão d.

DUREZA BRINELL EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA IMPRESSÃO (DIÂMETRO DA ESFERA DO PENETRADOR: 10 MM)			
d (mm)	HB (F = 3000 kgf)	d (mm)	HB (F = 3000 kgf)
2,75	(495)	4,05	223
2,80	(477)	4,10	217
2,85	(461)	4,15	212
2,90	444	4,20	207
2,95	429	4,25	201
3,00	415	4,30	197
3,05	401	4,35	192
3,10	388	4,40	187
3,15	375	4,45	183
3,20	363	4,50	179
3,25	352	4,55	174
3,30	341	4,60	170
3,35	331	4,65	167
3,40	321	4,70	163
3,45	311	4,75	159
3,50	302	4,80	156
3,55	293	4,85	152
3,60	285	4,90	149
3,65	277	4,95	146
3,70	269	5,00	143
3,75	262	5,10	137
3,80	255	5,20	131
3,85	248	5,30	126
3,90	241	5,40	121
3,95	235	5,50	116
4,00	229	5,60	111

Relação entre dureza Brinell e limite de resistência à tração

No caso dos aços existe uma **relação empírica** entre **dureza Brinell** e o limite de resistência, σ_r , dada por:

$$\sigma_r = 0,36 * HB \quad [\text{kgf/mm}^2]$$

Segundo O'Neill, o valor de 0,36 vale para aços doces (aço carbono), entretanto este valor pode mudar para:

- 0,49 para Ni recozido
- 0,41 para Ni e latão encruado
- 0,52 para cobre recozido
- 0,40 para alumínio e suas ligas
- 0,34 aços Cr-Mo

Dureza Brinell (HB)

Vantagens e limitações

Vantagens:

- **Estimativa** do limite de resistência à tração (σ_r);
- **Baixo custo** e **simples** operação;
- A **deformação produzida** não afeta o comportamento do material;
- Ensaio **pode ser considerado não destrutivo** (depende do **tamanho da impressão final, dimensões da peça e aplicação**)

Limitações:

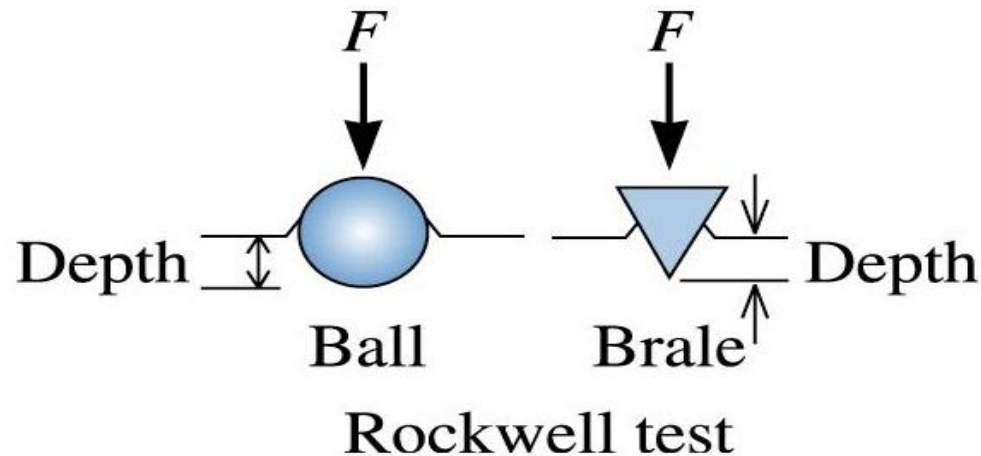
- **Não é aplicável** em peças **muito finas** e em materiais **muito duros**;
- A espessura da peça deve ser tal que não ocorra qualquer deformação no lado oposto ao da impressão
- Método **relativamente lento** para a produção industrial;
- A **impressão** obtida é muito **grande** para peças **acabadas**.

Dureza Rockwell (HR) - 1922

- Método mais utilizado para se medir dureza
- **Não** é necessário **medir** a impressão, portanto, é **mais rápido** e com **menor** possibilidade de erros humanos;
- Fácil execução, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e **pequeno tamanho da impressão**;
- Existe a possibilidade de medida de **dureza Rockwell superficial** é realizado em corpos de prova mais finos (delgados).



Método de Medição Rockwell



Ensaio Rockwell

- Pré-carga = 10 kgf
- Principal = 60, 100 e 150 kgf

Ensaio Rockwell Superficial

- Pré-carga = 3 kgf
- Principal = 15, 30 e 45 kgf

- Para materiais metálicos, o **ensaio** é regido no Brasil pela **norma ABNT NBR NM ISO 6508-1:2019**, intitulada “Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)”;
- A norma norte-americana para esse ensaio é a **ASTM E18-19 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**;
- Existem ao todo **30 escalas**, mas a maioria das aplicações envolvendo **materiais metálicos** são cobertas pelas escalas **B e C**;
- As escalas **L, M, P, R, S e V** são empregadas para **borracha, madeira e plásticos**;
- As escalas **N, T, W, X e Y** são usadas no ensaio de dureza Rockwell **superficial**.

• Os penetradores **esféricos** podem ter os seguintes diâmetros:

• **1/16 in (1,588 mm)** para as escalas **B, F, G e T**;

• **1/8 in (3,175 mm)** para as escalas **E, H, K e W**;

• **1/4 in (6,35 mm)** para as escalas **L, M, P e X**;

• **1/2 in (12,7 mm)** para as escalas **R, S, V e Y**.

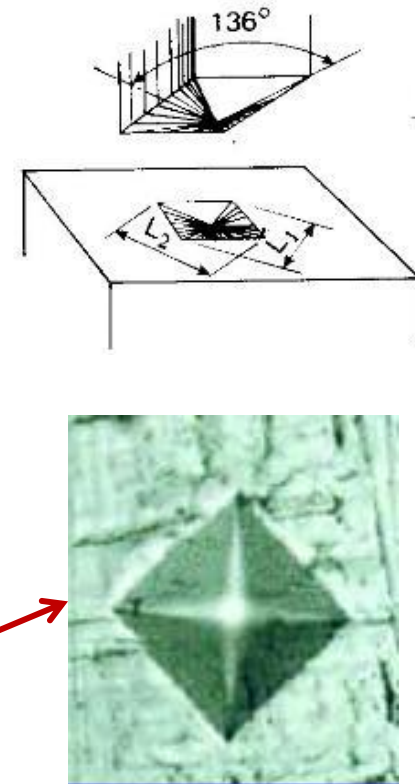
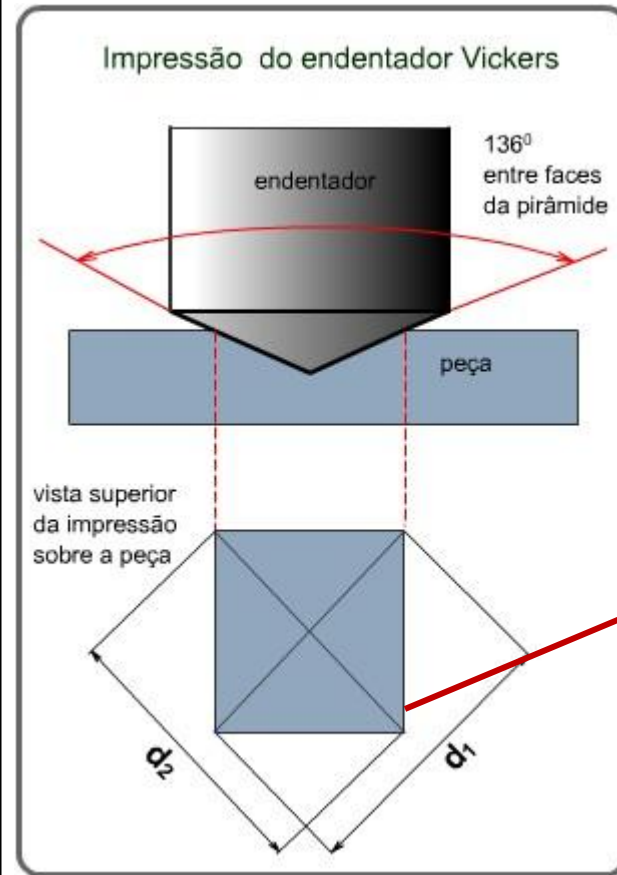
As escalas **A, C, D e N** empregam um **cone de diamante com ângulo de 120° e ponta arredondada com raio 0,2 mm**, denominado penetrador **Brale**.

Escala	Penetrador	Força (kgf)	Aplicação Típica
A	Brale	60	Aço cementado
D	Brale	100	Ferro fundido maleável
C	Brale	150	Aços duros, ligas de titânio
B	esfera 1/16 in	100	Ligas de Cu e de Al, aço macio
E	esfera 1/8 in	100	Ligas de Al e de Mg
M	esfera 1/4 in	100	Metais macios, polímeros duros
R	esfera 1/2 in	60	Polímeros de baixo módulo

- Esfera de aço: máquinas mais antigas. As **esferas de CW** são mais aceitas (**permitidas atualmente, pelas normas**) : **menor deformação- menor erro da medida;**
- Representação:** se um aço temperado apresenta dureza Rockwell C igual a 43, escreve-se **HRC 43 ou 43 HRC;**
- HR15T 57** significa que a **dureza superficial** na escala **T** com carga de **15 kgf** é igual a **57;**

Dureza Vickers (HV) - 1925

- O método é baseado na penetração de uma **pirâmide** de base **quadrada**, com ângulo entre as faces opostas de **136°** feita de **diamante**;
- Adequado para regiões **pequenas** e selecionadas do corpo de prova;
- Impressão é observada em um **microscópio** e medida.



$$D = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV = \frac{2F \operatorname{sen} \frac{136}{2}}{D^2} = \frac{1,8544F}{D^2}$$

Vantagens e limitações

Vantagens:

- Impressões **muito pequenas** que não inutilizam a peça;
- **Grande precisão** das medidas: muito utilizada em **pesquisa**;
- Aplicação de toda a **gama de durezas** encontradas nos diferentes materiais;
- **Deformação nula** do penetrador (diamante);
- Aplicação em **qualquer espessura** de material podendo portanto medir durezas superficiais: **camada** nitretada ou cementada;

Limitações:

- **Morosidade** do ensaio;
- Exige **preparação cuidadosa** da superfície para tornar nítida a impressão;
- Equipamento e acessórios **caros**.

$$\sigma_y = HV/3 (0,1)^{m-2}$$

- σ_y é o limite de escoamento, conforme norma, a 0,2% de deformação, em kgf/mm² ;
- $m-2$ é tabelado;
- Para metais encruados: $\sigma_y = HV/3$

The Determination of Yield Strength
From Hardness Measurements

J. R. CAHOON, W. H. BROUGHTON, AND A. R. KUTZAK

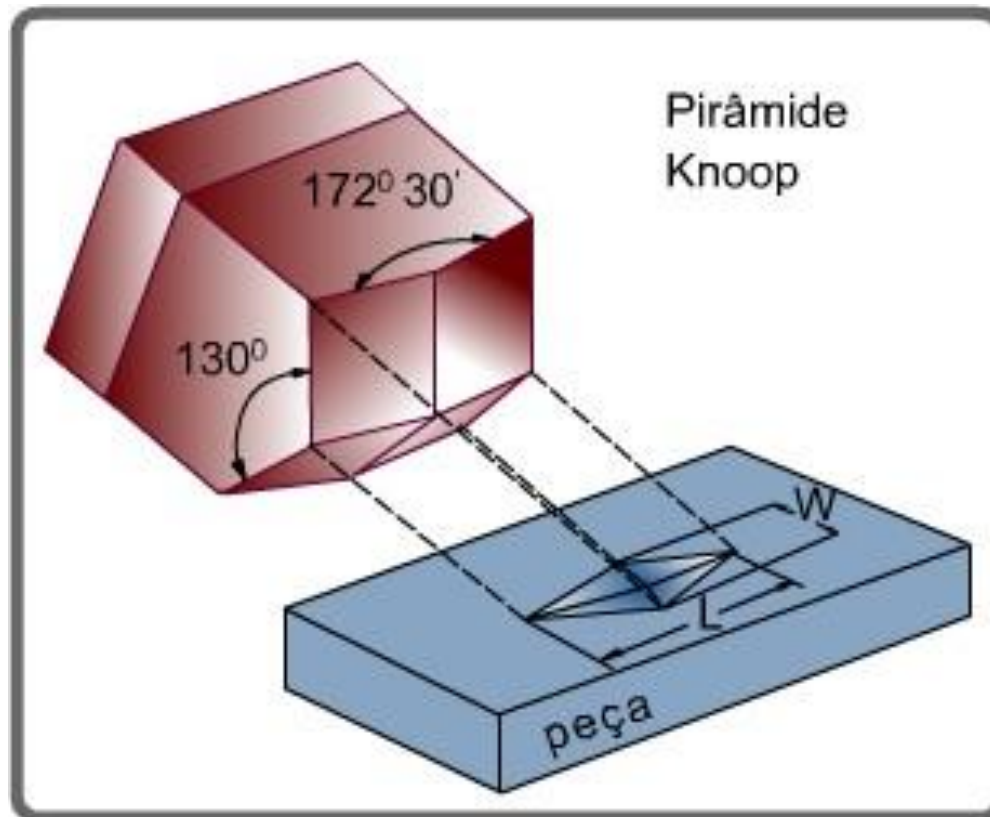
METALLURGICAL TRANSACTIONS

VOLUME 2, JULY 1971

Specimen	Hardness, Dph	Stress at 8 pct Strain, kg/mm ²	<i>n</i>	<i>m-2</i>
Al-1	55.1	19.4	0.09	0.09
Al-2	54.0	19.1	0.09	0.08
Steel-1	258	83	0.11	0.08
Steel-2	260	86	0.09	0.09
Brass-1	124	43	0.12	0.11
Brass-2	128	45	0.12	0.09
A-19	64.6	22.3	0.27	0.23
Al-17 pct Cu	54.4	16.8	0.19	0.19

Ensaio de dureza Knoop (alternativa à dureza Vickers)

Microdureza Knoop: utiliza o mesmo princípio de ensaio de dureza Vickers, mas o penetrador possui geometria diferente



DUREZA X LIMITE DE RESISTÊNCIA



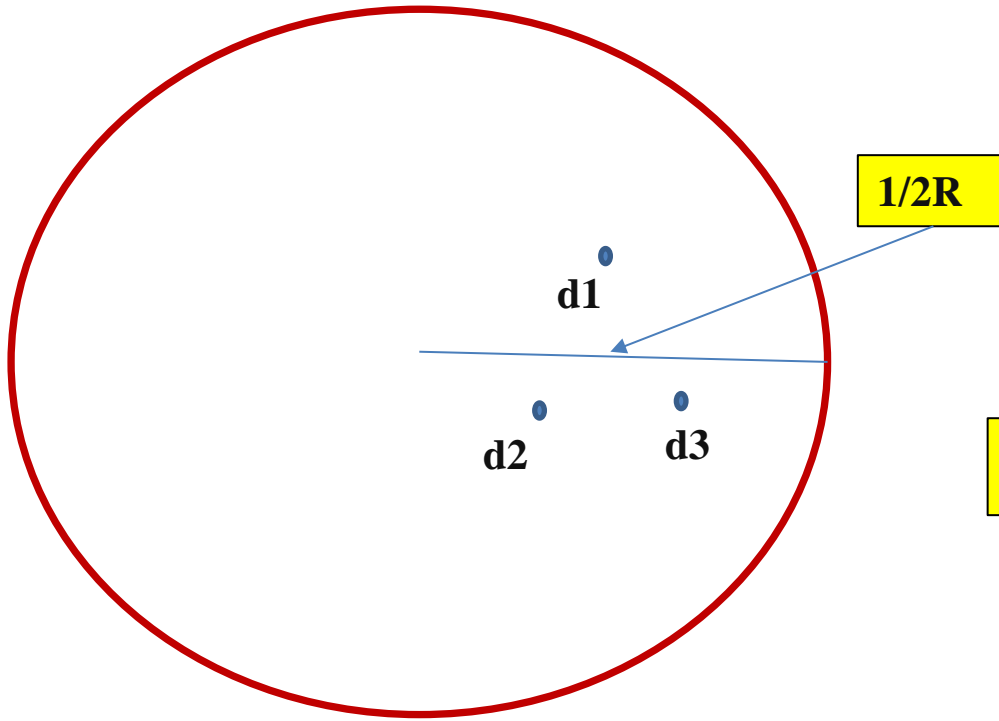
TABLE 2 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels^A (Rockwell C to Other Hardness Numbers)

Rockwell C Scale, 150-kgf Load, Diamond Penetrator	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength, ksi (MPa)
					15N Scale, 15-kgf Load, Diamond Penetrator	30N Scale 30-kgf Load, Diamond Penetrator	45N Scale, 45-kgf Load, Diamond Penetrator	
68	940	...	920	85.6	93.2	84.4	75.4	...
67	900	...	895	85.0	92.9	83.6	74.2	...
66	865	...	870	84.5	92.5	82.8	73.3	...
65	832	739	846	83.9	92.2	81.9	72.0	...
64	800	722	822	83.4	91.8	81.1	71.0	...
63	772	706	799	82.8	91.4	80.1	69.9	...
62	746	688	776	82.3	91.1	79.3	68.8	...
61	720	670	754	81.8	90.7	78.4	67.7	...
60	697	654	732	81.2	90.2	77.5	66.6	...
59	674	634	710	80.7	89.8	76.6	65.5	351 (2420)
58	653	615	690	80.1	89.3	75.7	64.3	338 (2330)
57	633	595	670	79.6	88.9	74.8	63.2	325 (2240)
56	613	577	650	79.0	88.3	73.9	62.0	313 (2160)
55	595	560	630	78.5	87.9	73.0	60.9	301 (2070)
54	577	543	612	78.0	87.4	72.0	59.8	292 (2010)
53	560	525	594	77.4	86.9	71.2	58.6	283 (1950)
52	544	512	576	76.8	86.4	70.2	57.4	273 (1880)
51	528	496	558	76.3	85.9	69.4	56.1	264 (1820)
50	513	482	542	75.9	85.5	68.5	55.0	255 (1760)
49	498	468	526	75.2	85.0	67.6	53.8	246 (1700)
48	484	455	510	74.7	84.5	66.7	52.5	238 (1640)
47	471	442	495	74.1	83.9	65.8	51.4	229 (1580)
46	458	432	480	73.6	83.5	64.8	50.3	221 (1520)
45	446	421	466	73.1	83.0	64.0	49.0	215 (1480)

PROCEDIMENTO PARA A MEDIDA DE DUREZA

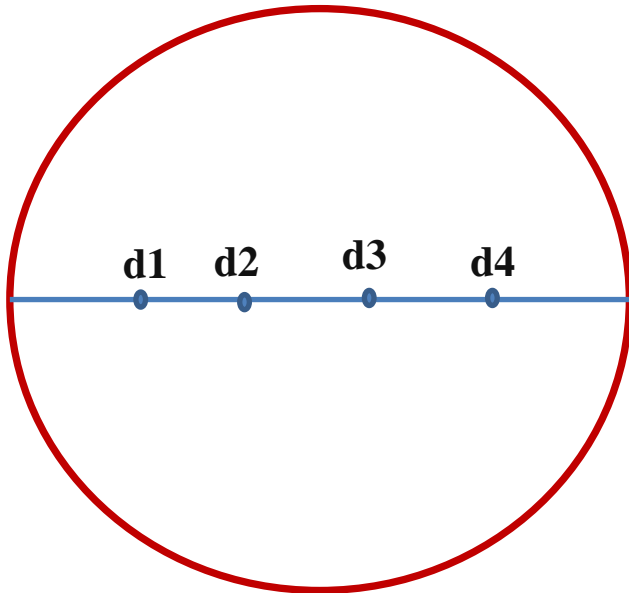
O procedimento mais adotado, com o objetivo de **reduzir os erros**, é o seguinte:

- Pelas normas, a dureza de um material é medida **a meio raio**, caso tenha uma **secção transversal circular** ou **a meio lado** caso a secção seja **quadrada**;
- A **distância entre centros da impressão** deve ser de, no mínimo, **2,5 diâmetros da impressão**;
- **Despreza-se** a primeira medida;
- Executa-se **3 medidas em triângulo** e utiliza-se a **média** para definir a **Dureza global da amostra**;
- Caso haja uma **região de maior interesse**, **faz-se a medida na região**;
- Caso seja necessário analisar a **variação da dureza** ao longo da amostra, pode-se fazer um **mapeamento ao longo do diâmetro**.



$1/2R$

$$D = \frac{d1 + d2 + d3}{3}$$



Mapeamento

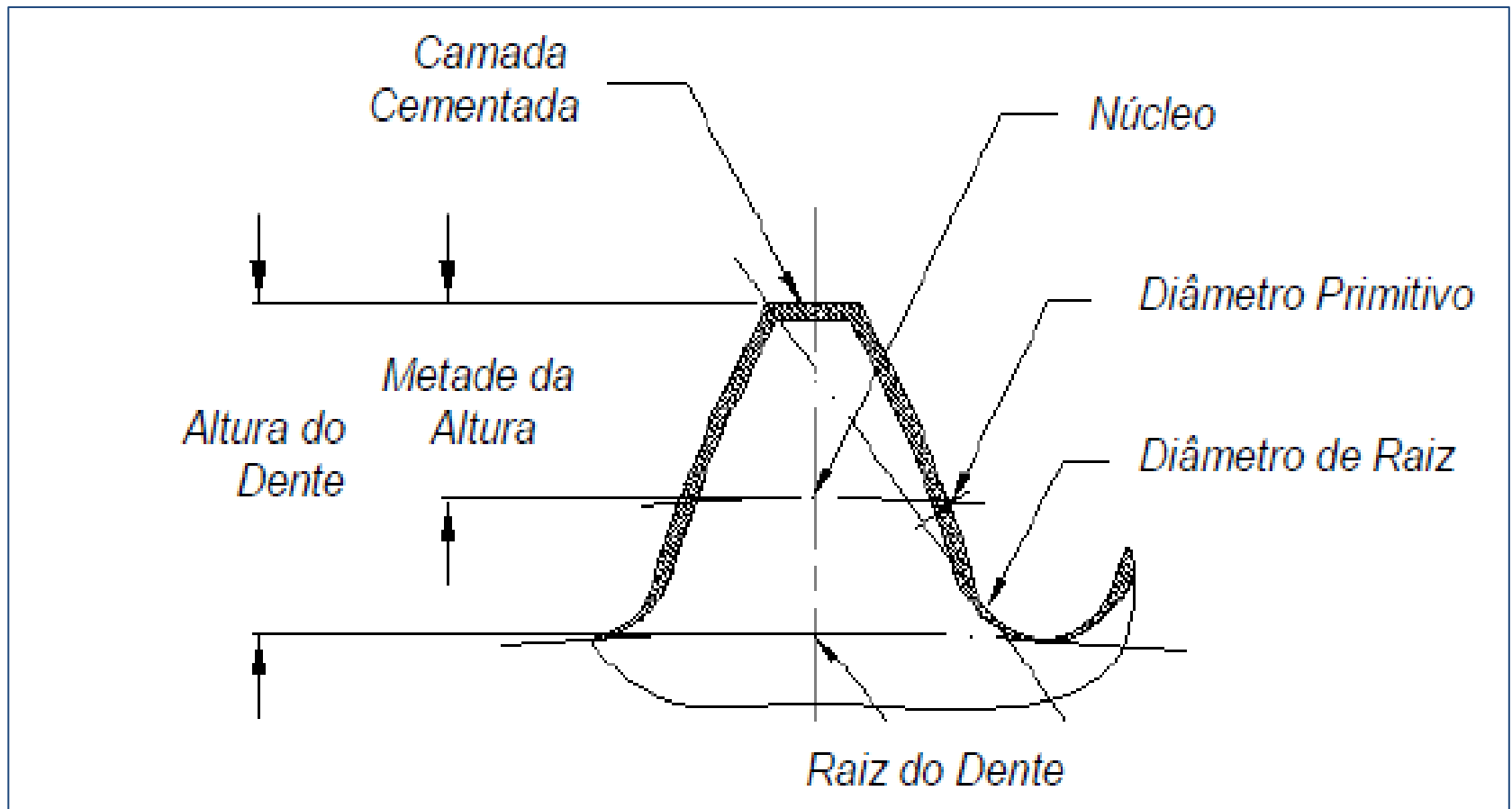
Dureza dos aços

AÇO (ABNT)	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (NM87)							CONDIÇÃO	DUREZA
	C(%)	Mn(%)	S(%)	Ni(%)	Mo(%)	Cr(%)	Pb(%)		
1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,05máx					BRUTO LAMINADO	120-140HB
								NORMALIZADO	130-170HB
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,05máx					NORMALIZADO	215-230HB
								TEMPERADO E REVENIDO	43-59HRC
12L14	0,15máx	0,85-1,15	0,26-0,35				0,15-0,35	BRUTO LAMINADO	120-130HB
								TREFILADO	160-180HB
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,05máx		0,25-0,35	0,80-1,10		NORMALIZADO	28-30HRC
								TEMPERADO E REVENIDO	35-60HRC
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,05máx	1,65-2,00	0,20-0,30	0,70-0,90		NORMALIZADO	30-35HRC
								TEMPERADO E REVENIDO	40-60HRC
5160	0,56-0,64	0,75-1,00	0,05máx			0,70-0,90		NORMALIZADO	28-30HRC
								TEMPERADO E REVENIDO	38-65HRC
52100	0,98-1,10	0,25-0,45	0,05máx			1,30-1,60		NORMALIZADO	40-42HRC
								TEMPERADO E REVENIDO	48-63HRC

Determinação da profundidade de camada efetiva

Effective Hardness Testing (EHT)

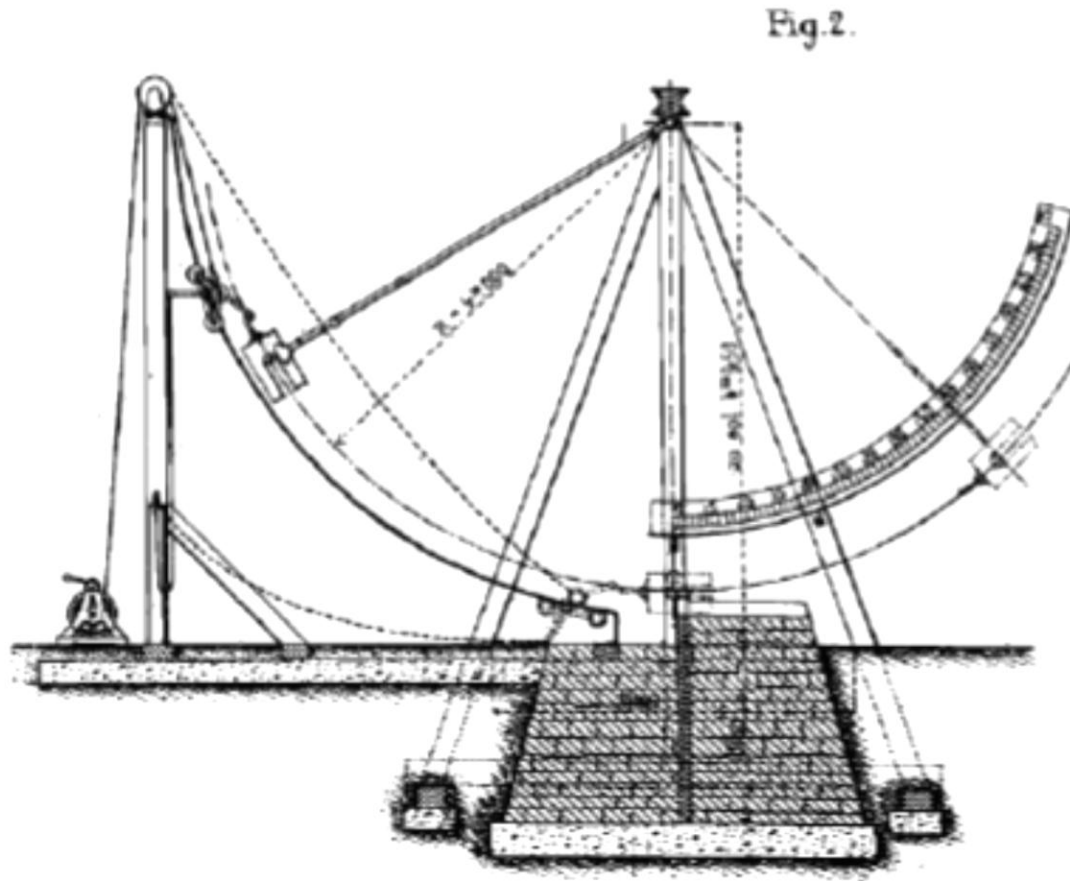
Case Hardness Depth (CHD)



ENSAIO DE IMPACTO

- **1857-** militar e inventor americano **T. J. Rodman (1816-1871)** projetou uma máquina de impacto para avaliar os **aços: fabricação de canhões;**
- **1892 - André Le Chatelier:** observou **ductilidade de aços** quando o teste de impacto era feito em amostras na forma de uma **barra retangular lisa e fragilidade** quando **entalhes** eram introduzidos;
- **1898 – 1ª** máquina de impacto de **pêndulo oscilante**, por **S. B. Russel;**
- **1901 -** O cientista francês **Georges Augustin Albert Charpy (1865-1945):** *Proceedings of the Congress of the International Association for Testing Materials (IATM);*
- **1903 -** O inglês **E. G. Izod (1876-1946)-** alternativa.

Charpy: Proceedings of the Congress of the International Association for Testing Materials (IATM)



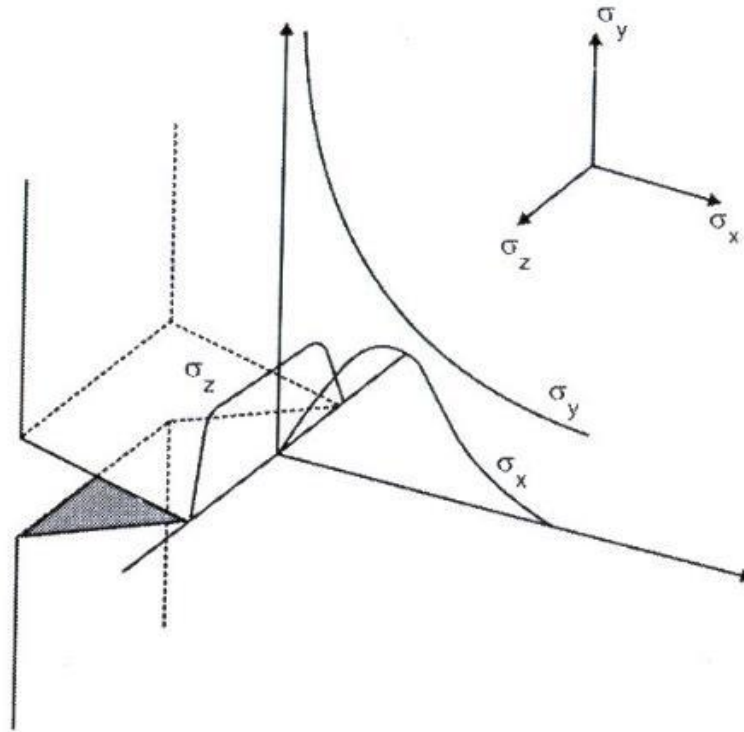
Desenho da máquina para ensaio de impacto proposta por Charpy.

ENSAIO DE IMPACTO

NECESSIDADE DE SE CONHECER O COMPORTAMENTO DO MATERIAL FRENTE À FRATURA FRÁGIL: PRESENÇA DE UMA DESCONTINUIDADE

- Deformação a uma temperatura relativamente baixa (tendência à fratura frágil);**
- Elevada taxa de deformação (tendência à fratura frágil);**
- Estado de tensão triaxial (introduzido pela presença de um entalhe - tendência à fratura frágil).**

Efeito Geometria do Entalhe



- A restrição plástica no entalhe produz um estado de tensão triaxial, sendo a concentração de tensão no entalhe dada por:
- w é ângulo interior do entalhe.

$$K_{\sigma} = \left(1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{2} \right)$$

Efeito Geometria do Entalhe



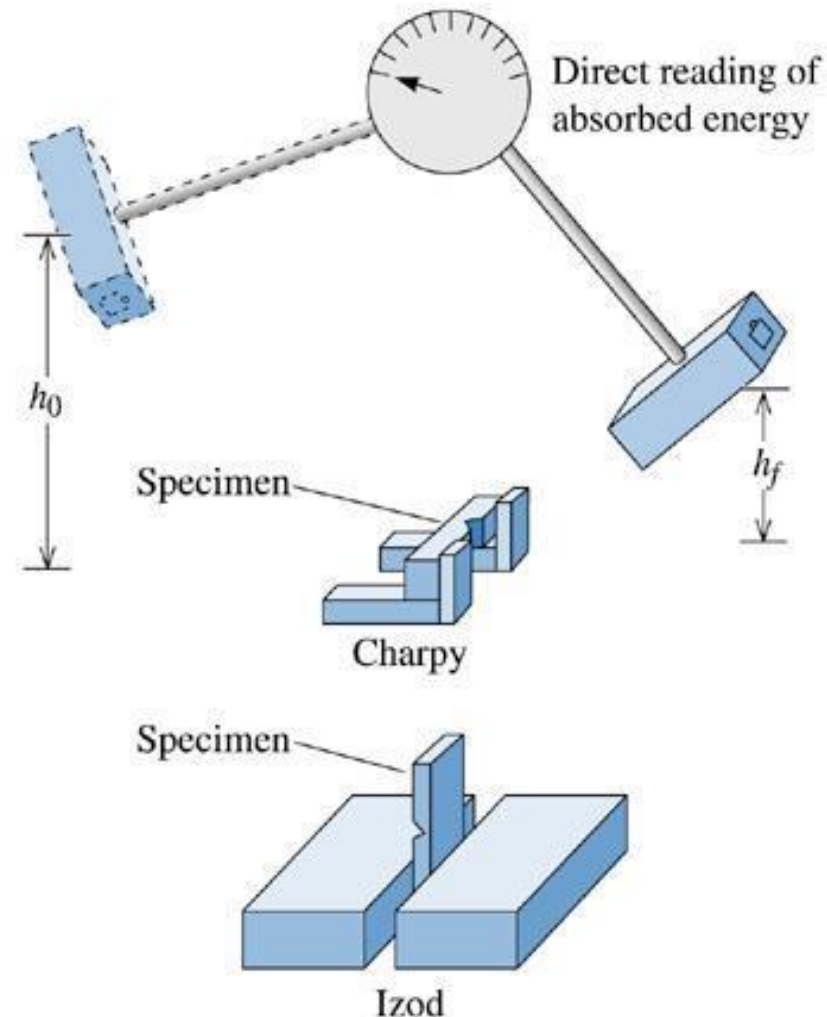
Tanto a **profundidade** quanto o **raio de curvatura** da extremidade do entalhe têm efeito significativo no comportamento a fratura do material

Máquina de Ensaio de Impacto



Técnicas de Ensaio de Impacto: Charpy e Izod

- As técnicas Charpy e Izod são utilizadas para medir a energia de impacto.
- O corpo de prova possui o formato de uma seção quadrada com um entalhe em “V”
- Diferença entre as técnicas Charpy e Izod é como o corpo de prova é sustentado
- A energia absorvida é proporcional à diferença entre h e h' e corresponde à energia absorvida, pelo cp, no ensaio de impacto

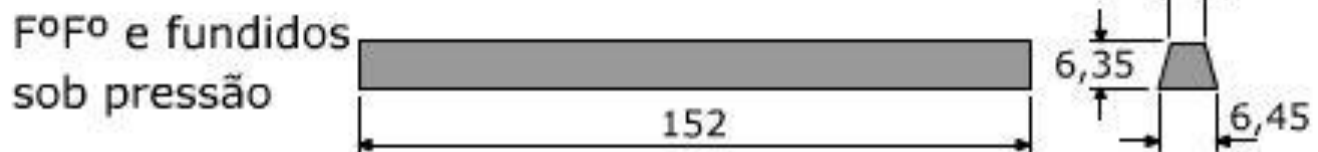
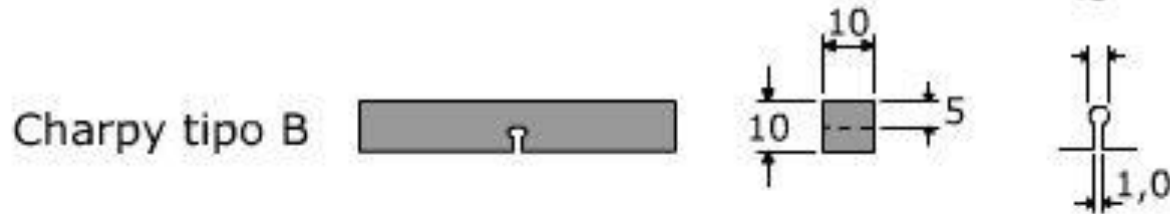
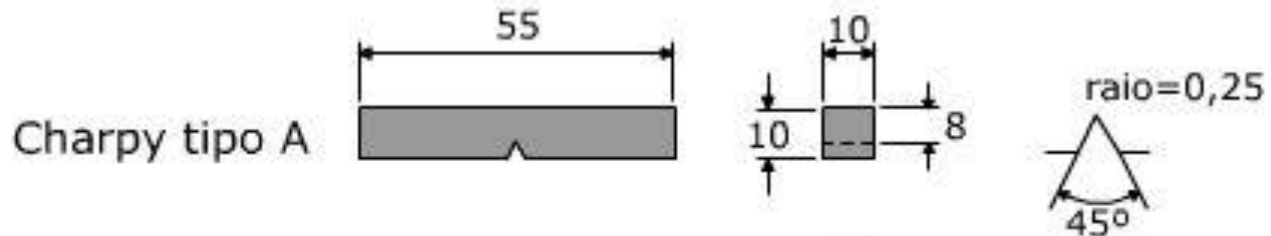


ENSAIO DE IMPACTO

Para os ensaios com o pêndulo (Charpy e Izod) a E_{pot} da elevação do martelo se transforma em E_{cin} na descida. Parte desta energia é transferida para o CP , provocando sua ruptura.

Principais Configuração CPs Charpy

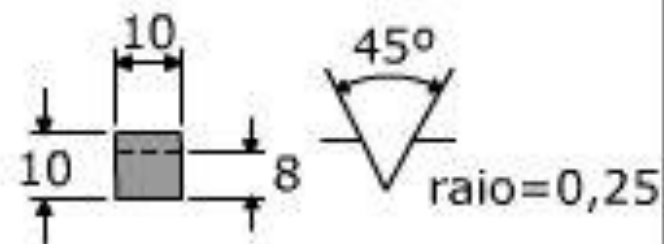
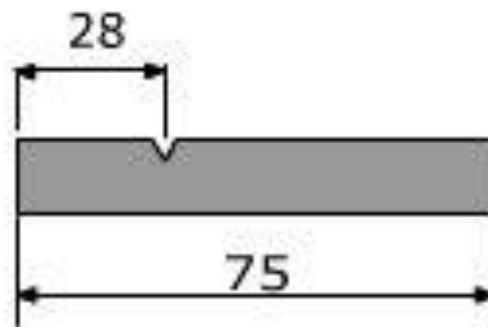
Todas as dimensões em mm



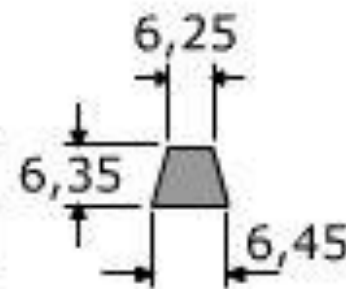
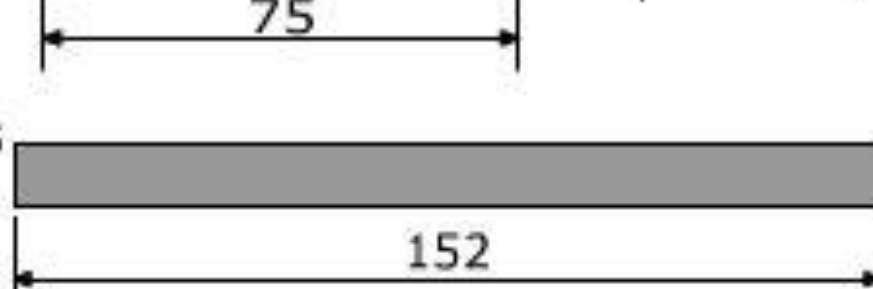
Principais Configuração CPs IZOD

Todas as dimensões em mm

Izod (tipo D)



F^oF^o e fundidos sob pressão

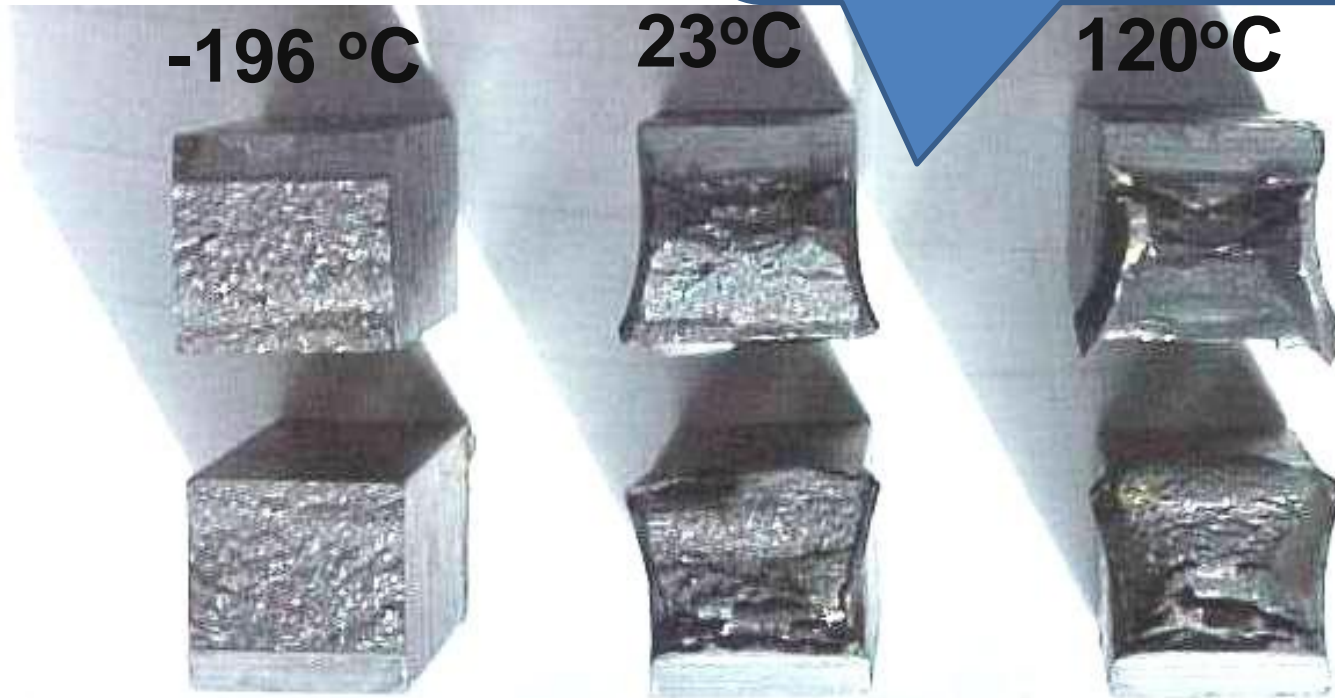


RESULTADOS DO ENSAIO DE IMPACTO

- **Energia absorvida (J);**
- **Quantidade de fratura dúctil e frágil (%);**
- **Expansão lateral (mm).**

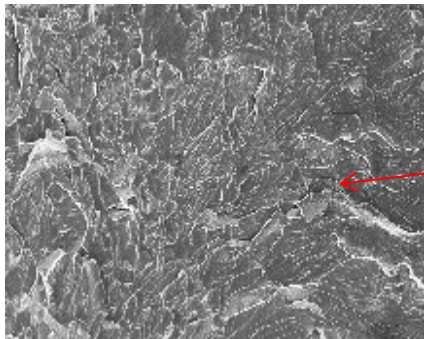
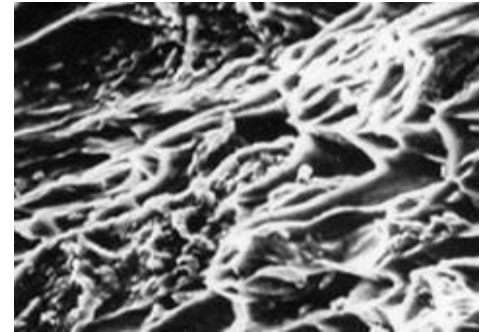
Efeito Temperatura na Res. Impacto

Por meio do ensaio Charpy pode-se verificar se um material tem uma temperatura de transição dúctil-frágil

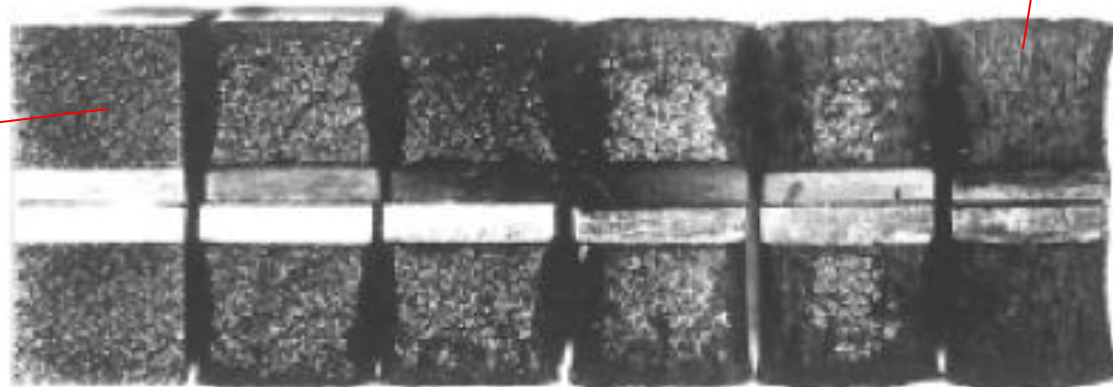


Transição Dúctil - Frágil

- ✓ **transição dúctil – frágil: comportamento frágil com a diminuição da temperatura.**
- ✓ **Uma análise da superfície de fratura de CPs testados em diferentes temperaturas indicam a transição dúctil-frágil pelo % de fratura dúctil e frágil em cada temperatura.**

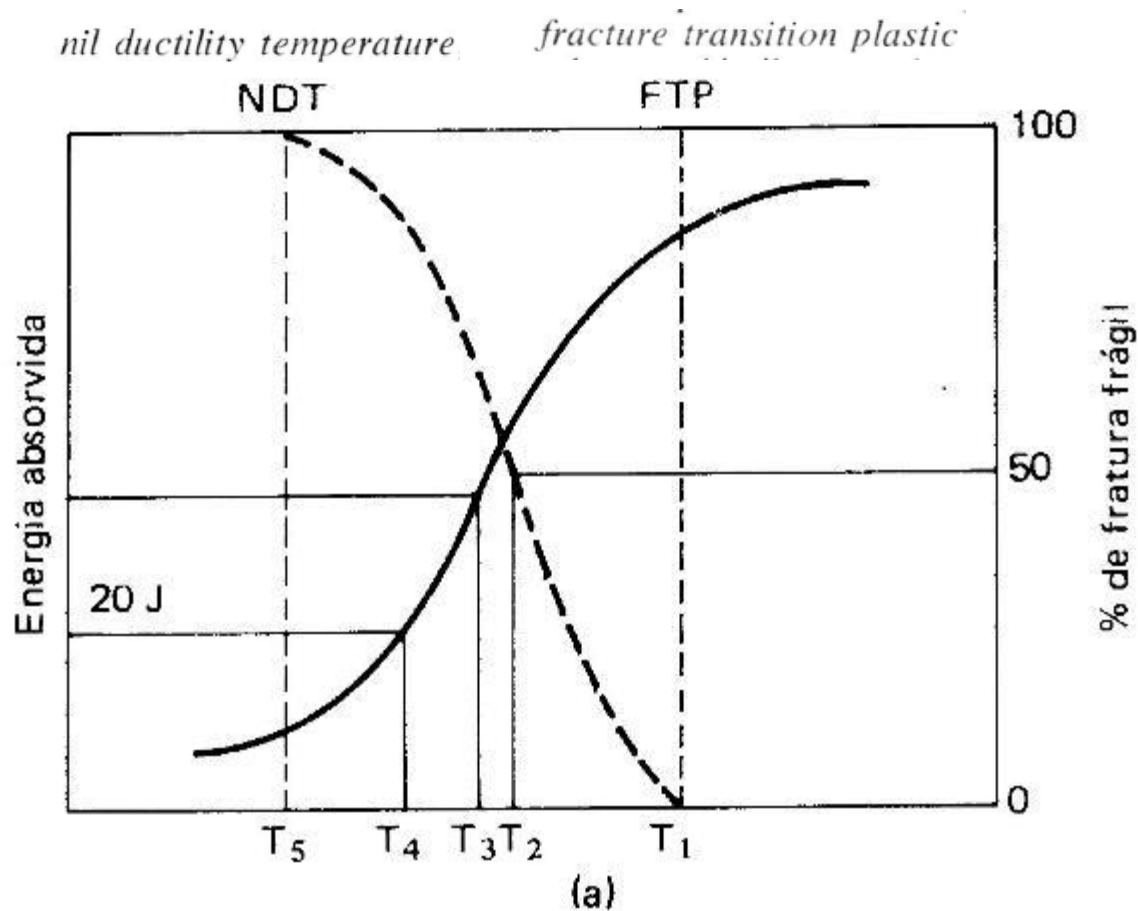


-59 -12 4 16 24 79

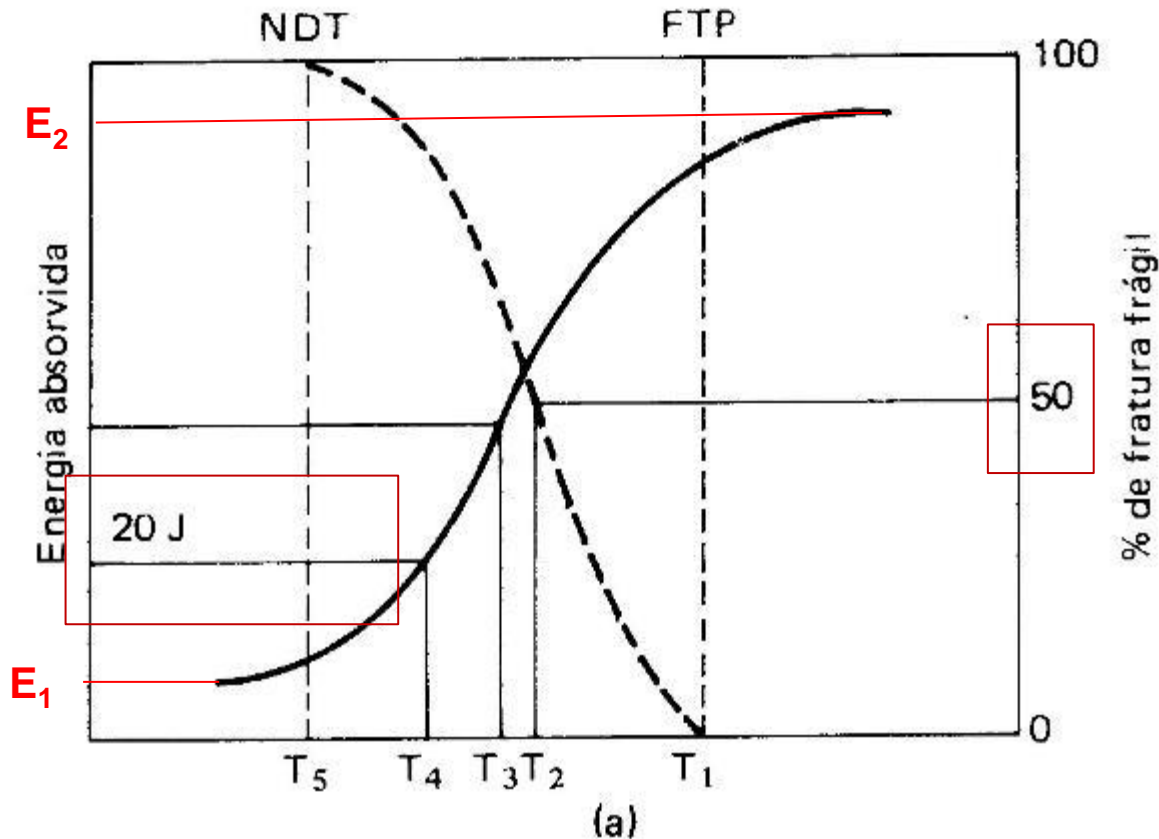


O ensaio é realizado em, **pelo menos 5 temperaturas**, iniciando de uma **temperatura negativa** para se detectar a temperatura de transição quando a fratura passa de dútil para frágil. Podem ser adotados **alguns critérios** para a determinação da temperatura de transição.

- A temperatura de transição é sensível à composição e à microestrutura da liga
- ↓ Tamanho de grão
- ↓ Temperatura de transição
- ↓ Teor de carbono
- ↓ Temperatura de transição



Temperatura de Transição Dúctil – Frágil (TTDF)-critério de energia



Temperatura de transição (Média das energias)

$$Trans = \frac{E_1 + E_2}{2} + E_1$$

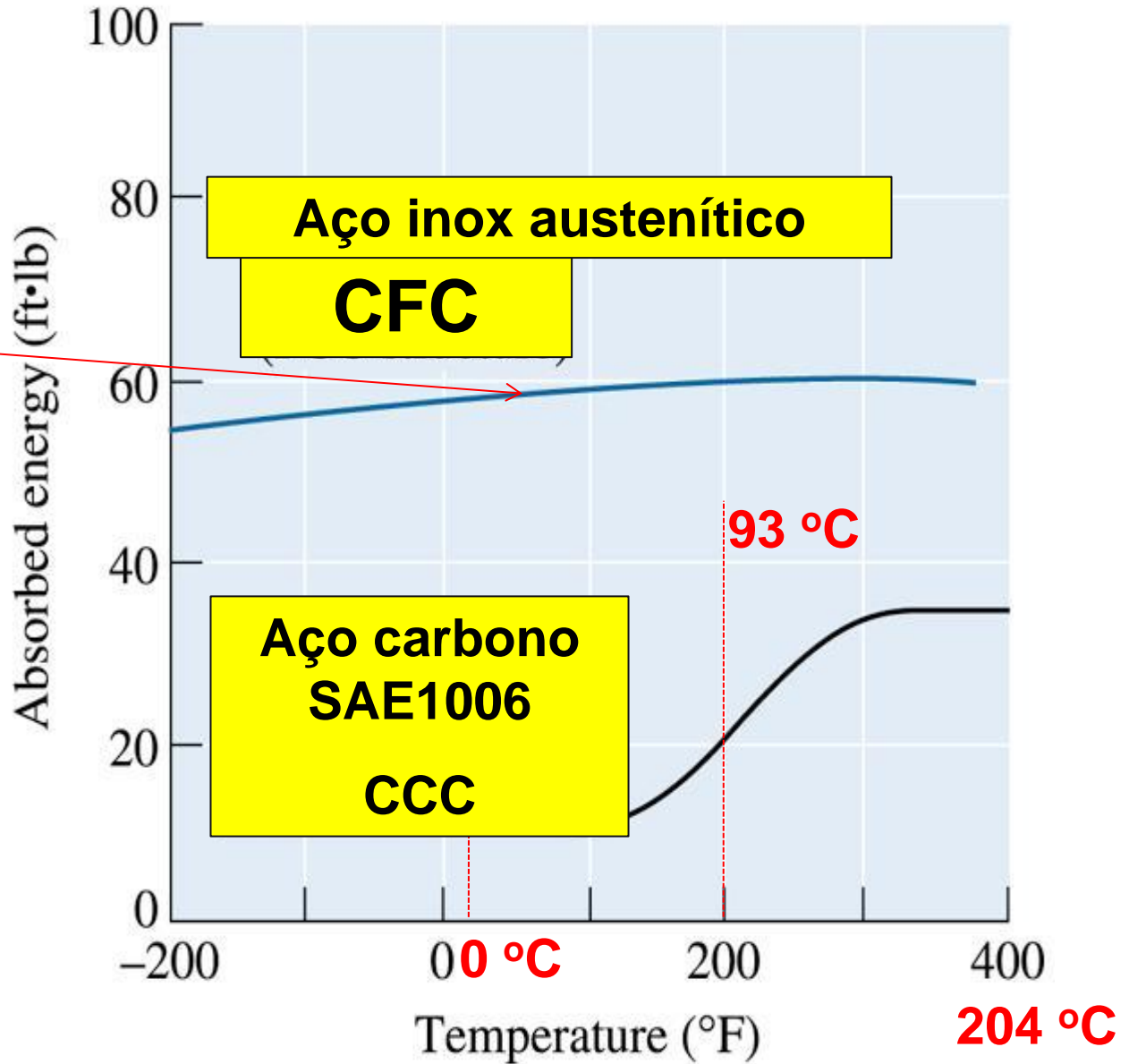
Será que todos os metais apresentam temperatura de transição dútil – frágil?

Caso sim, como transportamos nitrogênio líquido? Temperatura de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Transição Dúctil - Frágil

Não apresenta transição dúctil/frágil

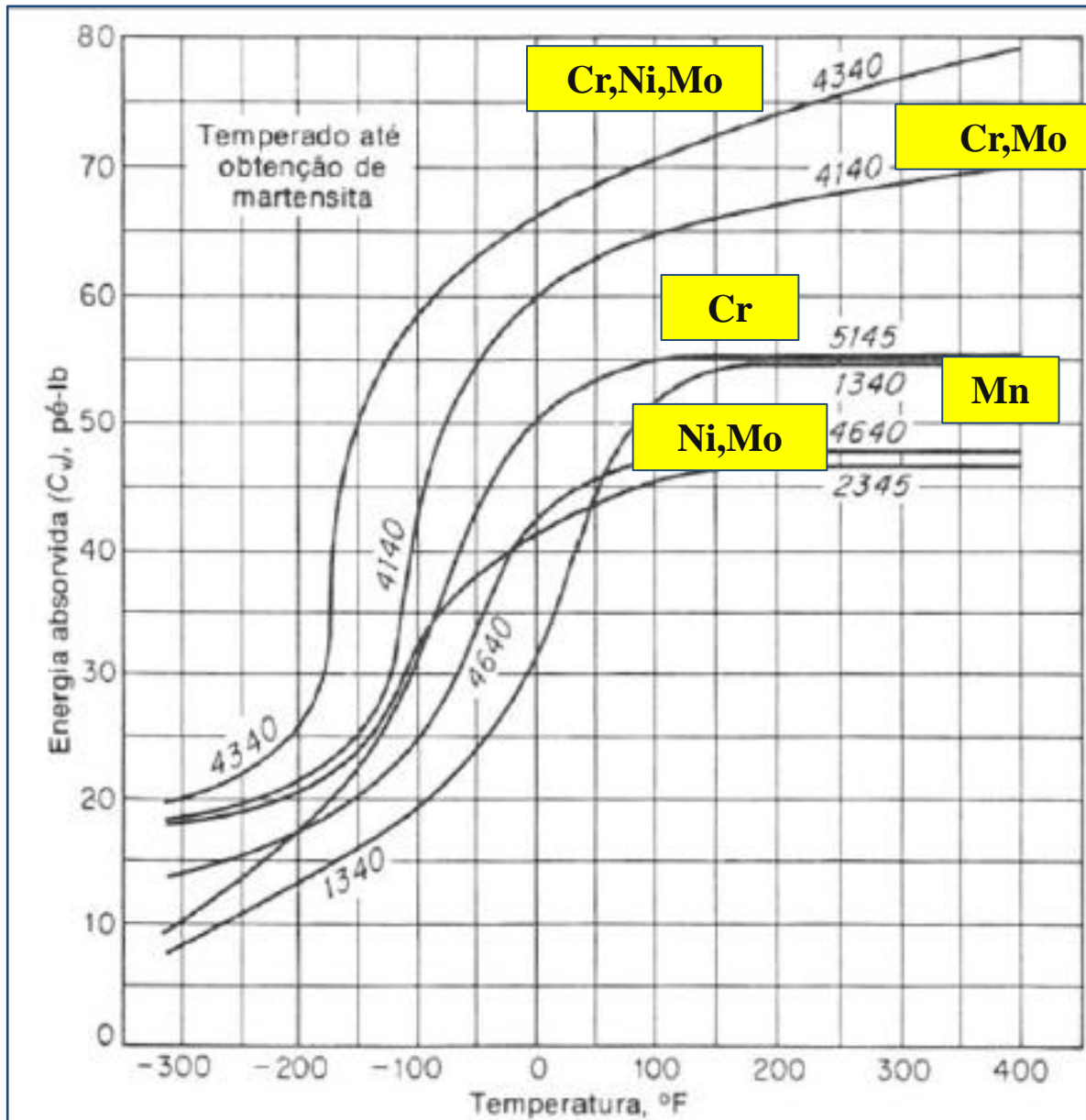
Recipiente inox nitrogênio líquido (-197 °C) possui uma Estrutura CFC



Transição Dúctil - Frágil

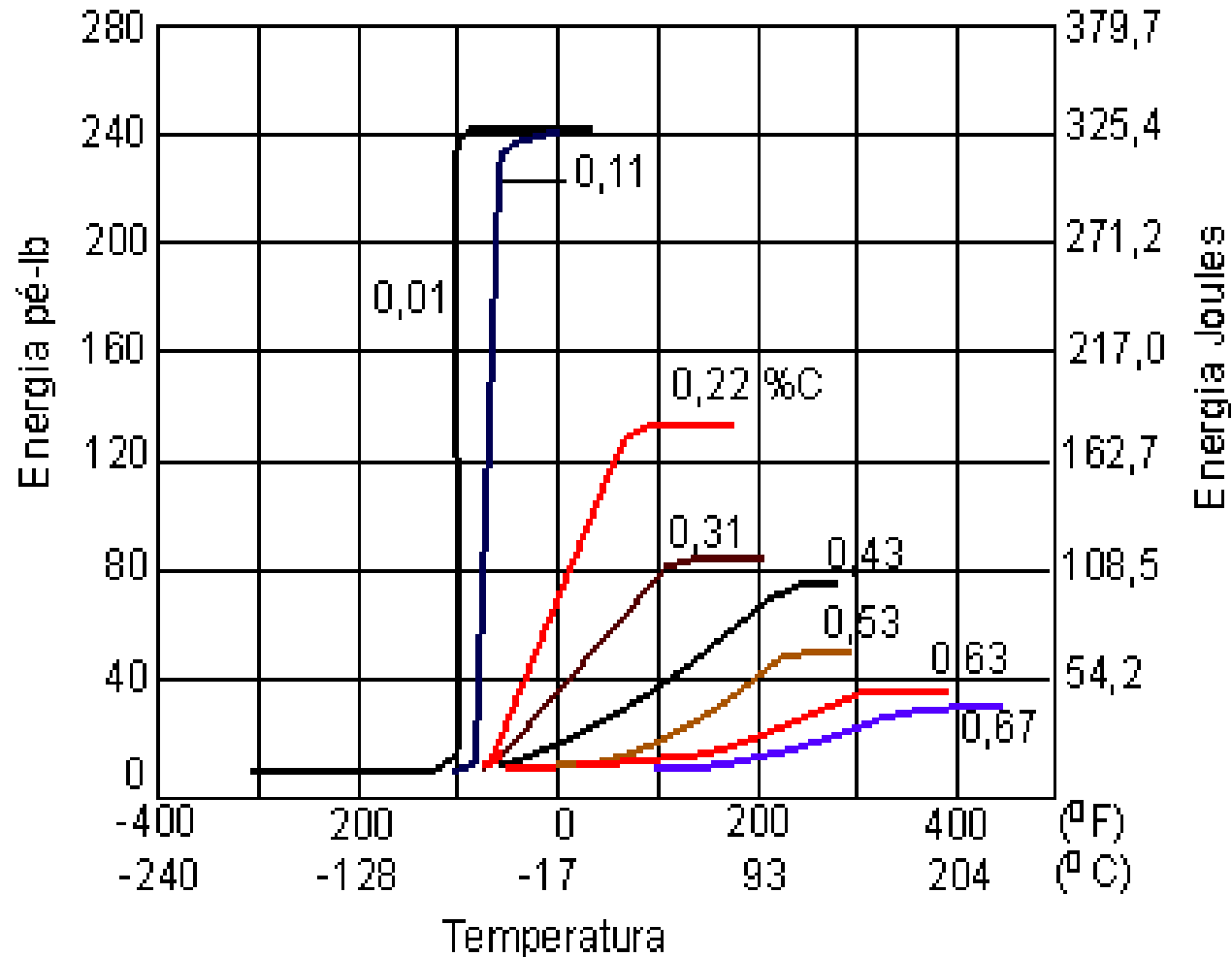
Materiais que apresentam temperatura de **transição frágil-dútil** devem ser **usados** **somente** em temperaturas **acima** da **temperatura de transição** para evitar fraturas frágeis catastróficas

Efeito Temperatura X Elementos liga

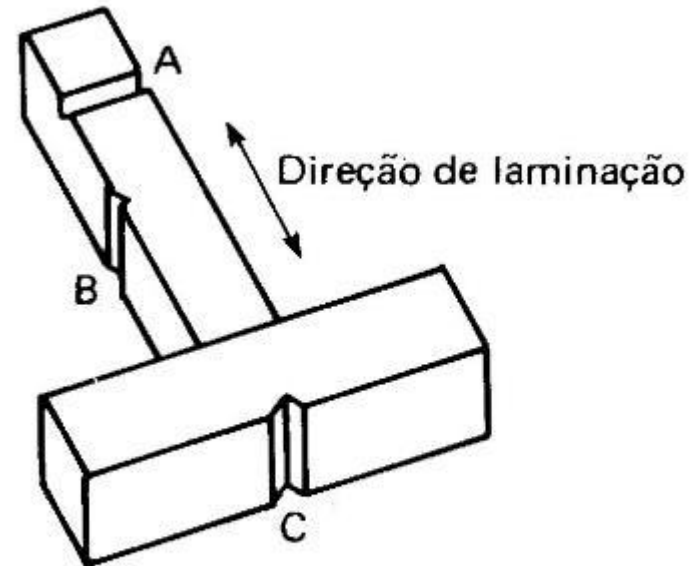
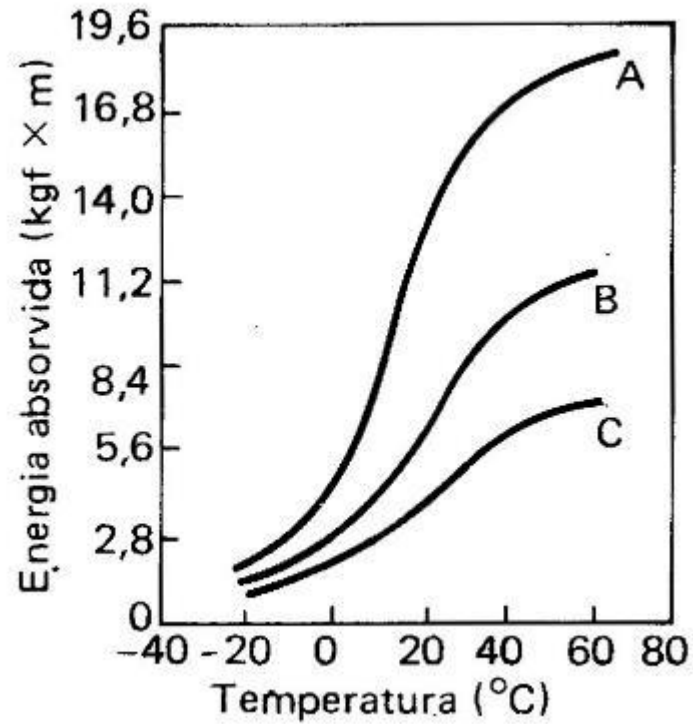


- ↓ Teor de carbono
- ↓ Temperatura de transição

Influência do teor de Carbono no comportamento da curva energia X temperatura de transição para aços



Transição Dúctil - Frágil



Normas

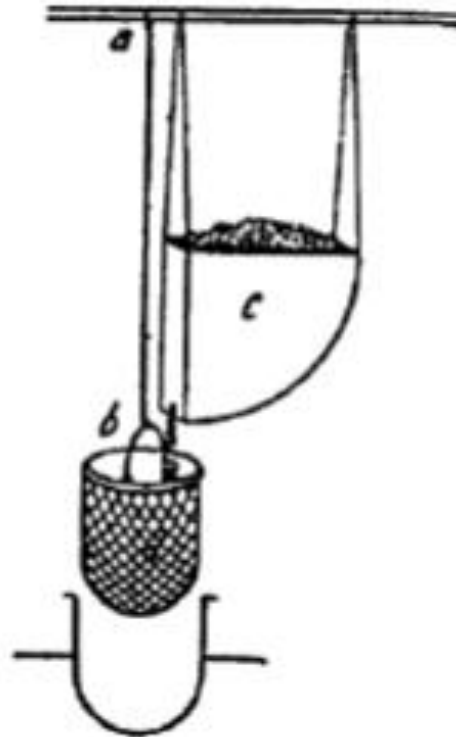
- **ASTM A 370;**
- **ASTM E23-18 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials;**
- **DIN EN ISO 148-1 (05/2017)- antiga DIN50115;**
- **NBR ISO 148-1:2013.**

TRAÇÃO

ENSAIO DE TRAÇÃO



Leonardo Da Vinci (1452-1519)

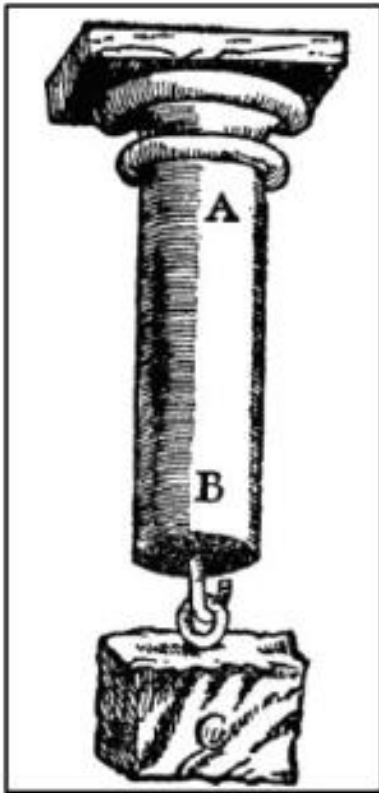


Testar as propriedades dos fios de ouro que laminava: a probabilidade de um arame metálico apresentar trincas era diretamente proporcional ao seu comprimento

Esquema do ensaio de tração idealizado por Leonardo Da Vinci.



Galileu Galilei (1564-1642)



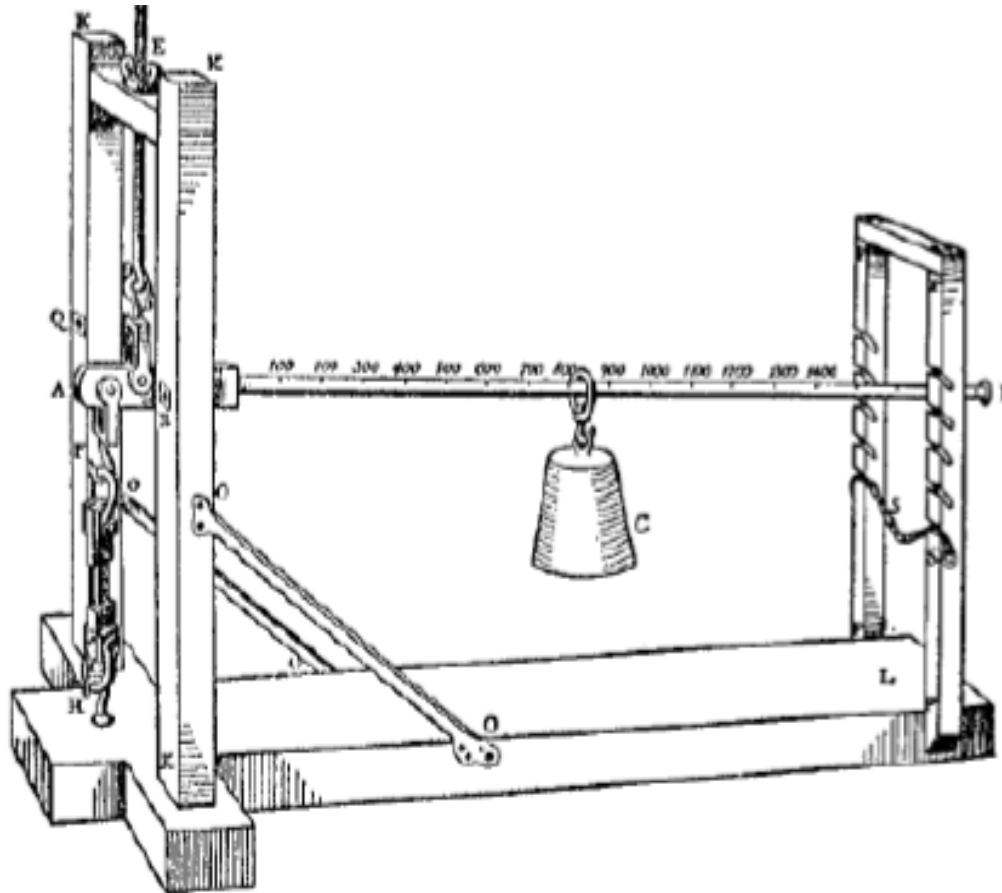
A resistência à tração de uma barra era proporcional à área da secção transversal e independente do comprimento: “Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nuove Scienze” (1638).

Ilustração de Galileu para o ensaio de tração.



P. Van Musschenbroek (1692-1761)

Máquina de tração de Musschenbroek.



**“Physicae
Experimentales et
Geometricae”,
publicado em 1729**

Ensaio de Tração: Procedimentos Normalizados

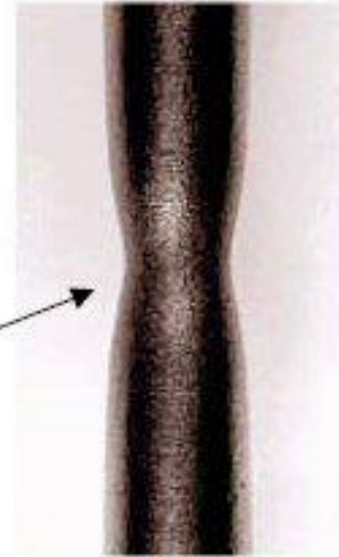
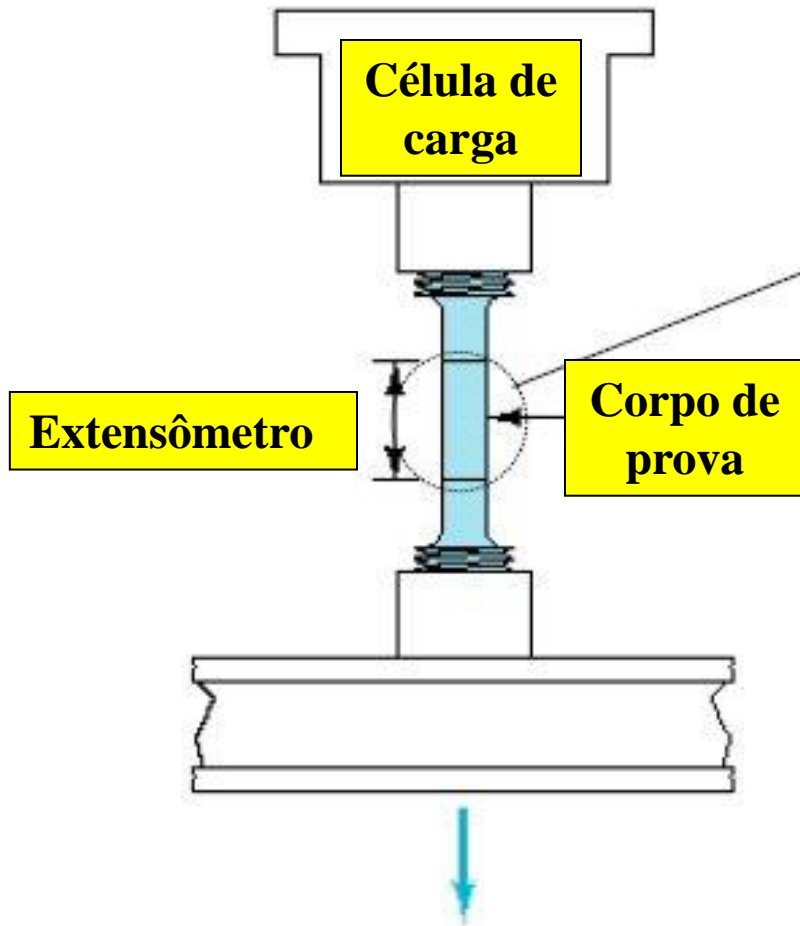
Os Ensaio Mecânicos podem ser realizados em:

- **Produtos acabados:** os ensaios têm maior significado pois procuram simular as condições de funcionamento do mesmo (Ex: **Barras de protensão**). Mas na prática isso nem sempre é realizável;
- **Corpos de prova:** Avalia a propriedades dos materiais independentemente das estruturas em que serão utilizados. Estas propriedades (Ex. limite de elasticidade, de resistência, alongamento, etc.) são afetadas pelo comprimento do corpo de prova, pelo seu formato, pela velocidade de aplicação da carga e pelas imprecisões do método de análise dos resultados do ensaio.

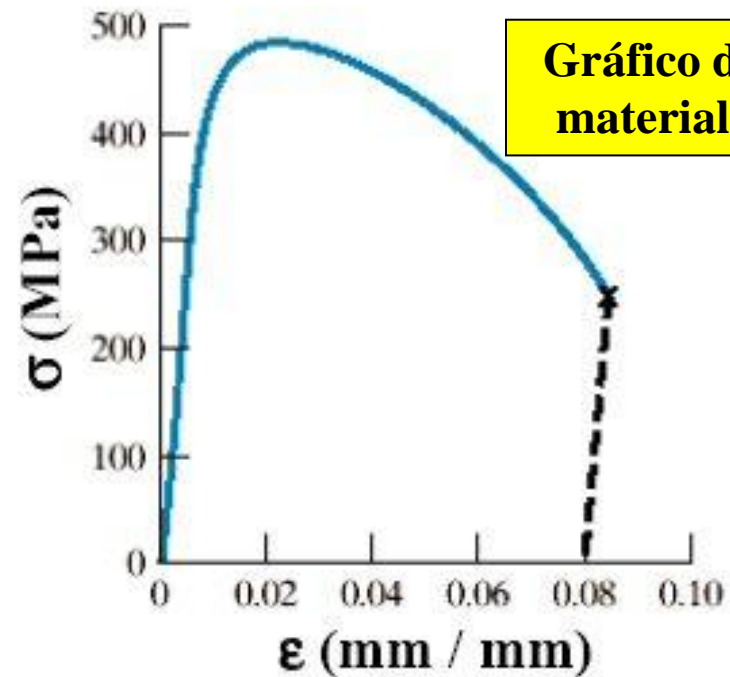


Para padronizar: Utilizam-se as **NORMAS**

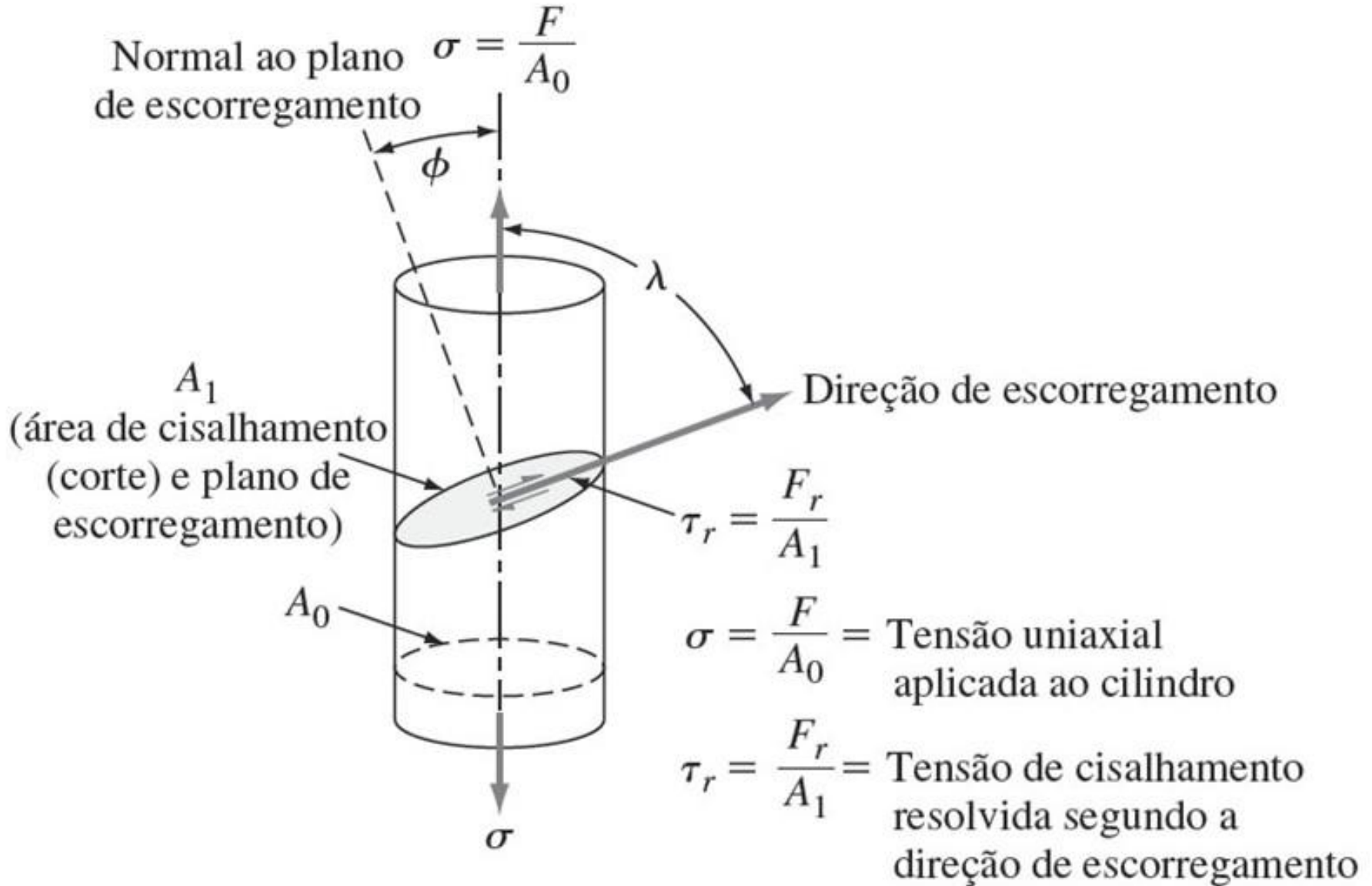
ENSAIO DE TRAÇÃO



Detalhe do início da estrição do material



Lei de Schmidt

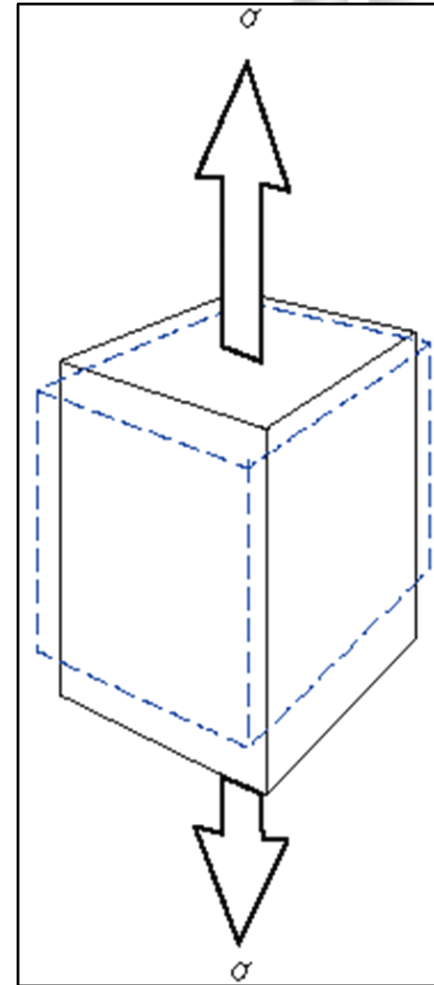


Coeficiente de Poisson

- 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)**



DEFINIÇÕES

Tensão (σ), Força (F), Área inicial (S_0)

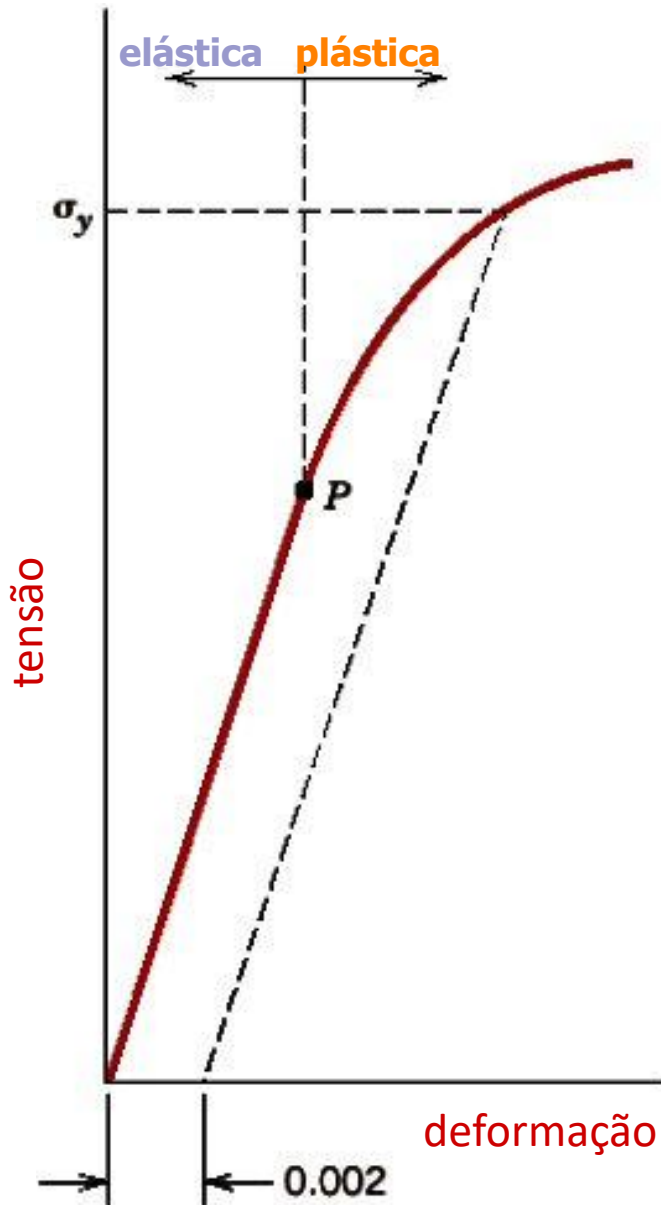
$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Deformação (ε), $\Delta L = L - L_0$, Comprimento final (L), Comprimento inicial (L_0), Módulo de Elasticidade (E)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\sigma = E\varepsilon$$

Comportamento $\sigma \times \varepsilon$



- **Deformação elástica:** é reversível, ou seja, quando a carga é retirada, o material volta às suas dimensões originais;

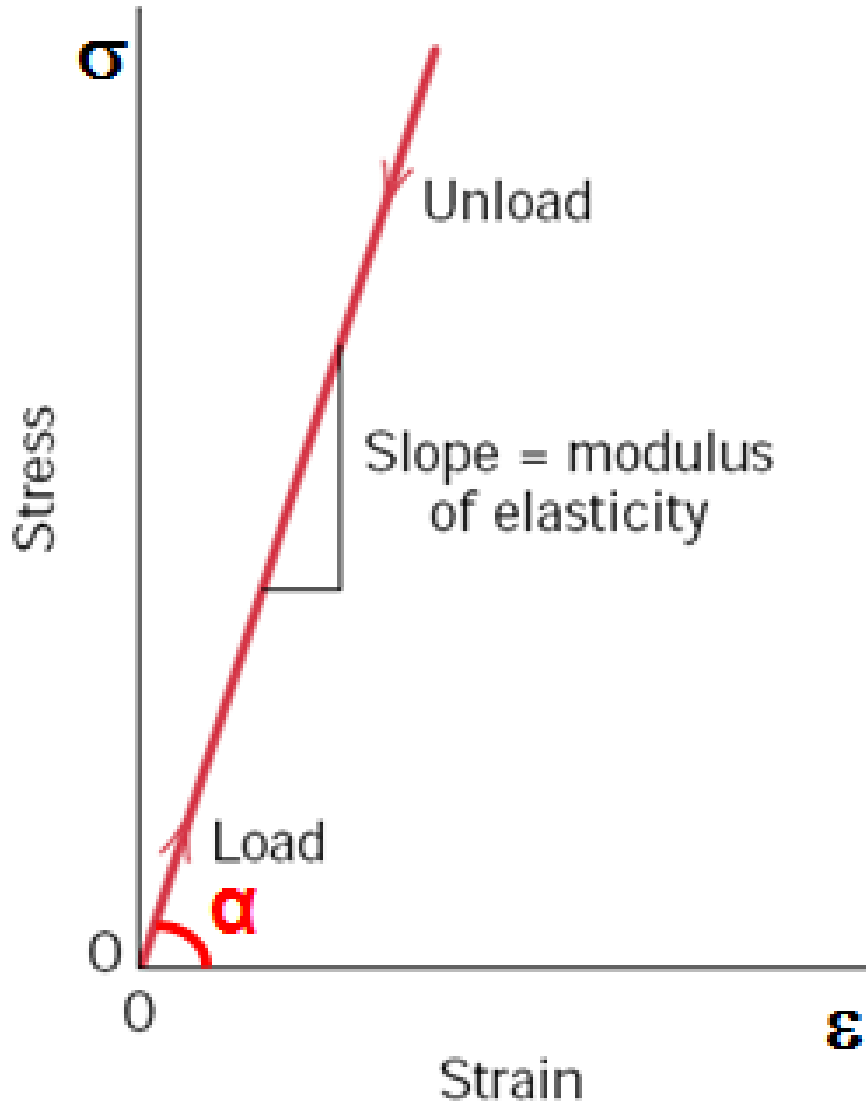
- ✓ átomos se movem, mas não ocupam novas posições na rede cristalina;

- ✓ 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.

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)

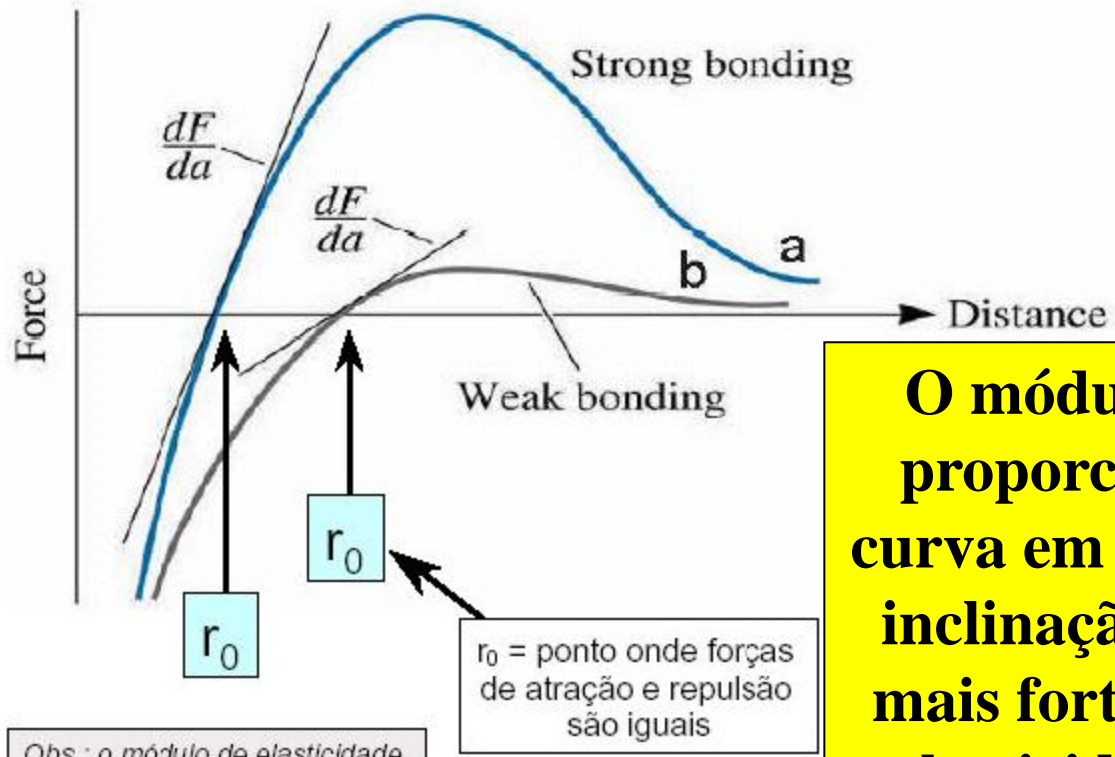
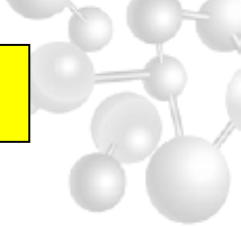
ε = deformação (mm/mm) 76

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.

Propriedades mecânicas: módulo de Elasticidade



Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é proporcional à derivada da curva em $r=r_0$: quanto maior a inclinação da curva, ligações mais fortes, maior módulo de elasticidade. Material a tem maior módulo que material b!

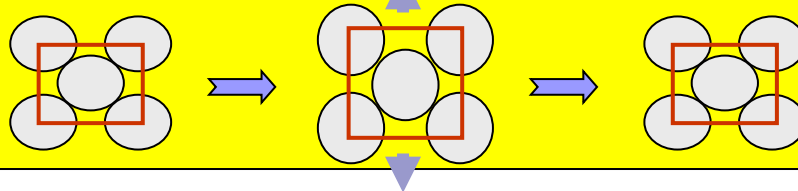
Obs.: o módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que será estudada em detalhe mais à frente no curso

r_0 = ponto onde forças de atração e repulsão são iguais

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) $\rightarrow \sigma = E\varepsilon$ (lembra $F = KX$ -Mola);
- Gráfico da tensão x deformação resulta em uma relação linear. A inclinação deste segmento corresponde ao *módulo de elasticidade* E



Módulo de Elasticidade – Aço vs. Alumínio

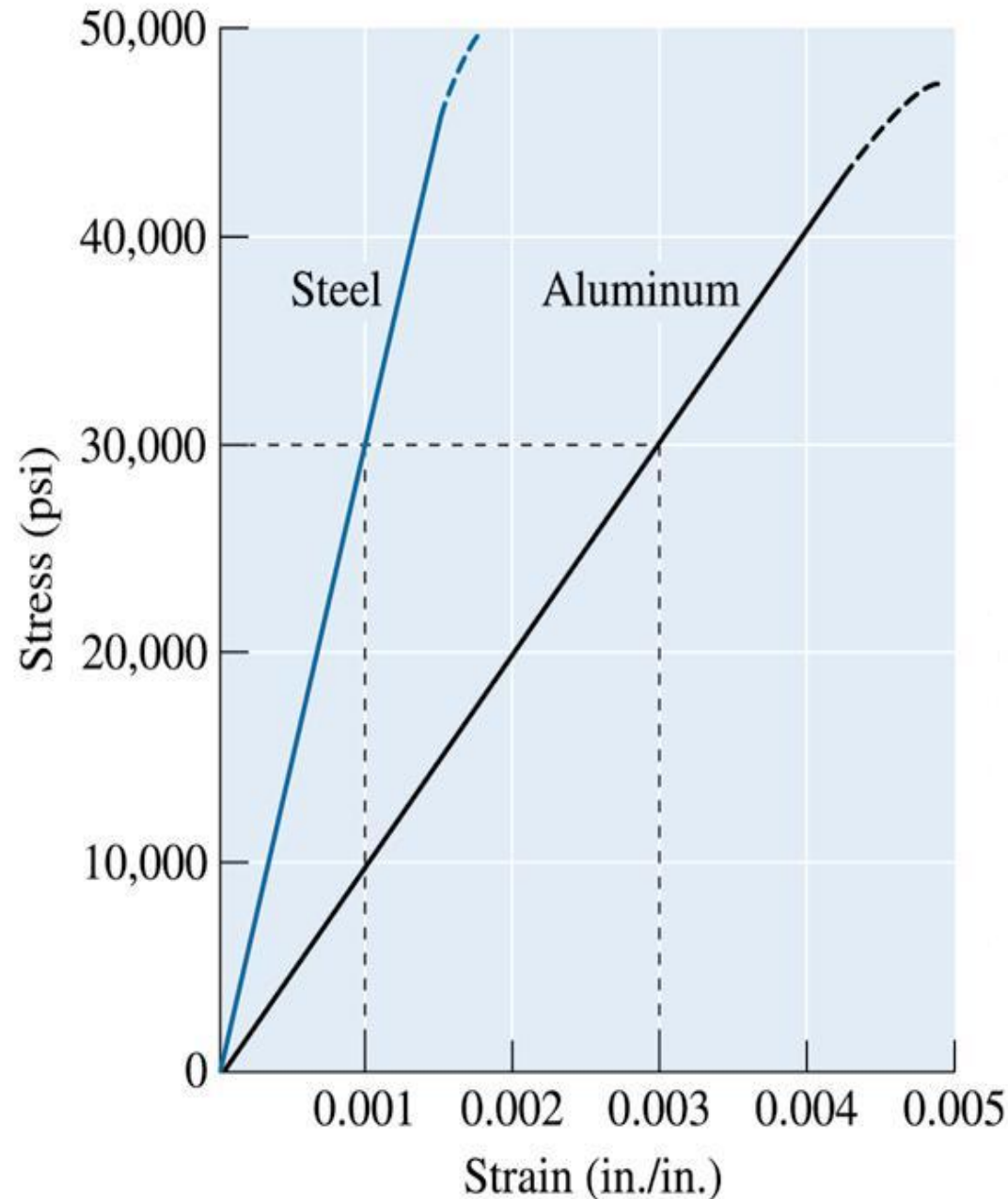


TABLE 2.5 Elastic and Shear Moduli and Poisson Ratios for Polycrystalline Metals^a

<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

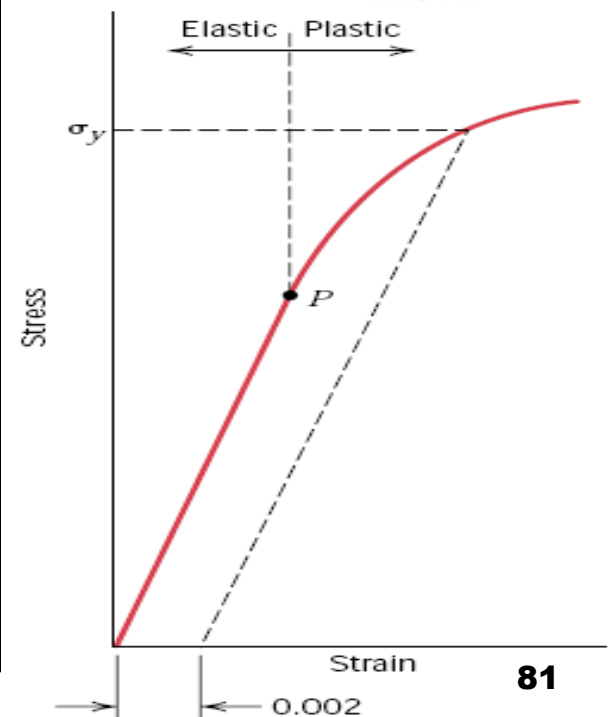
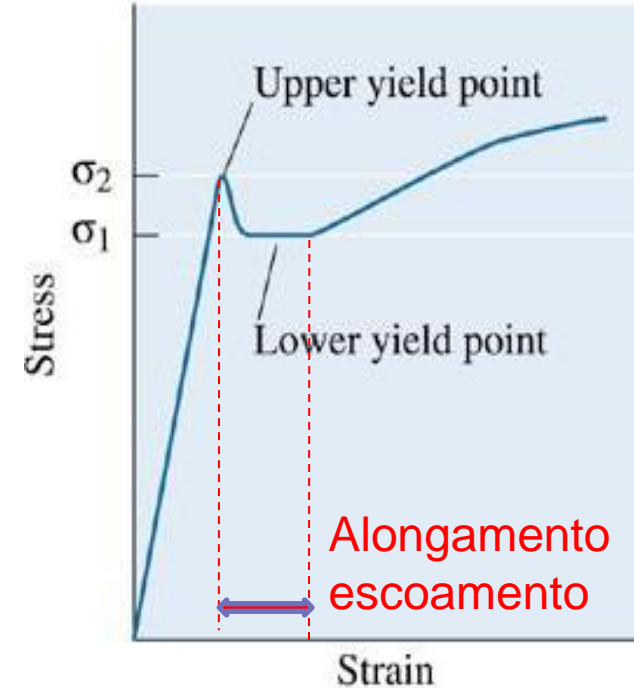
^a Adapted with permission from R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Material*, New York: John Wiley, 1976, p. 8.

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*).

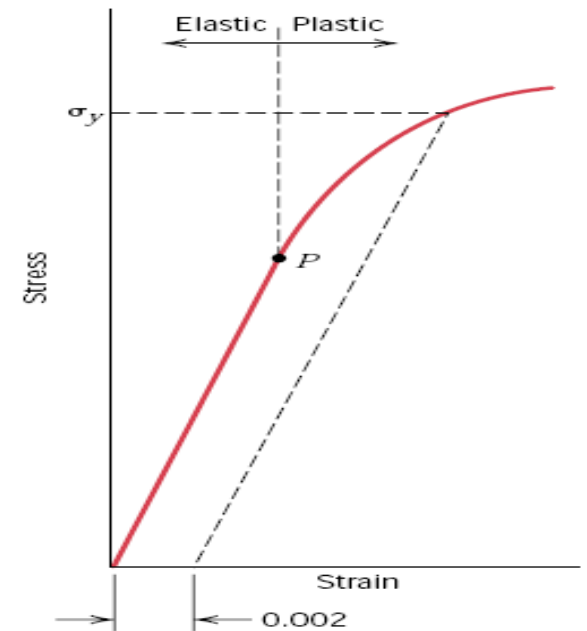
➤ A posição deste ponto pode não ser determinada com precisão. Por consequência foi adotada uma convenção: é construída uma linha paralela à região elástica a partir de uma pré-deformação de 0,002 ou 0,2%.

➤ 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 : $n = 0,2 \% (\epsilon = 0,002)$

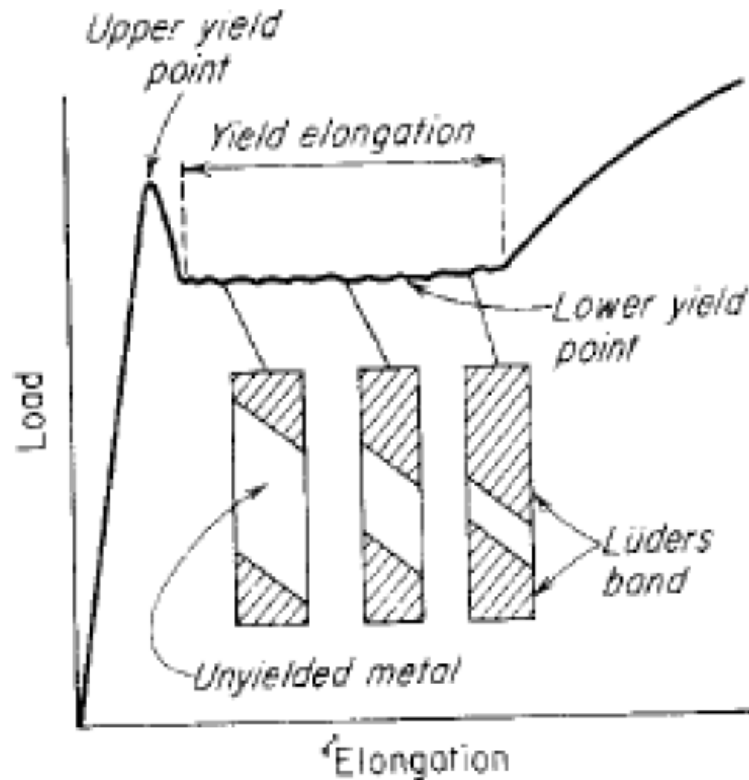
Cobre e suas ligas: $n = 0,5 \% (\epsilon = 0,005)$

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

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

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

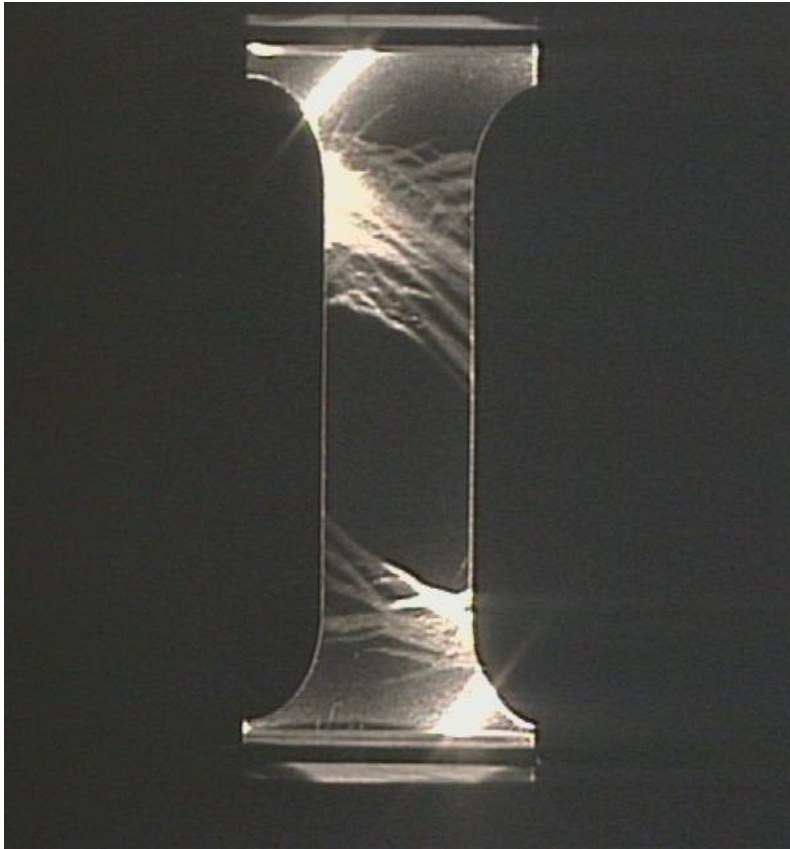
LIMITE DE ESCOAMENTO DESCONTÍNUO LED



**Atmosferas de Cotrel
(Cotrel e Bilby, 1949)
e geração e
movimentação de LD
(Johnston e Gilman,
em 1959 e Johnston,
em 1962)**

Limite de escoamento descontínuo e bandas de Lüder (**Mechanical Metallurgy – Dieter, G.E. -1986**).

LED E BANDAS DE LÜDER



(www.pearson-studium.de)

- Aços ferríticos, polidos: “**bandas de Lüder**” formadas no patamar, após o limite inferior de escoamento, antes que a tensão comece a aumentar novamente (**faixas a 45°**);
- Este **ângulo** está relacionado à **direção mais compacta** da estrutura CCC da ferrita, $\langle 111 \rangle$, que sofre uma rotação e assume direção **paralela ao plano de máxima tensão de cisalhamento**, em tração (círculo de Mohr);

Deformação Plástica

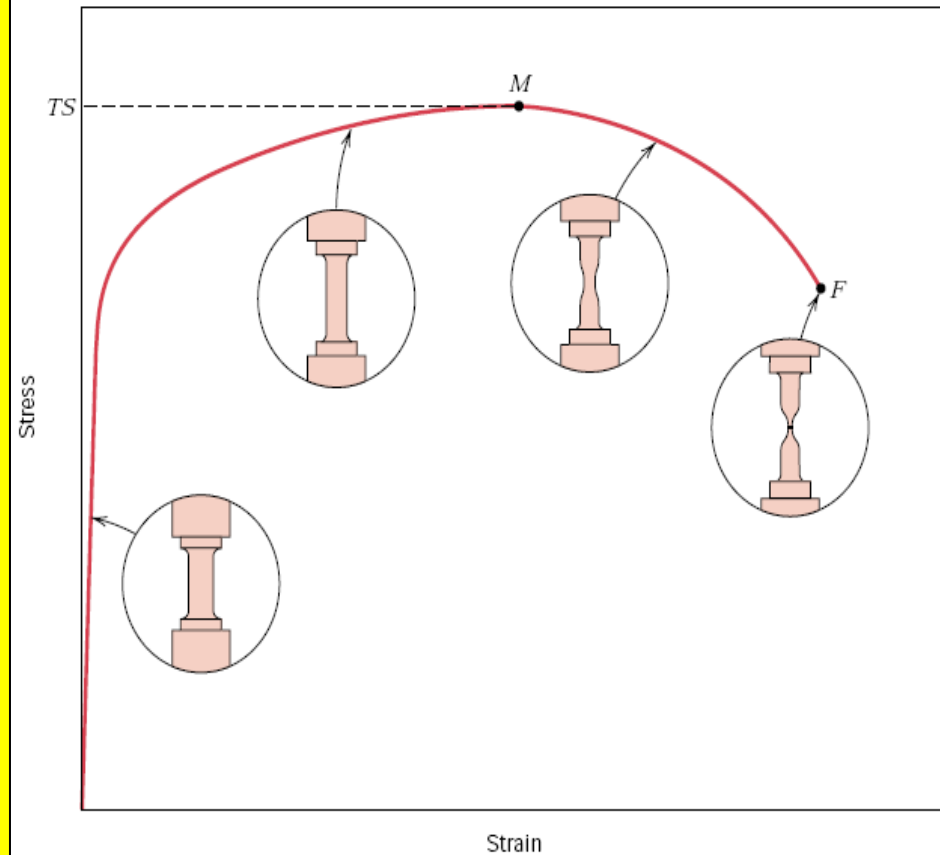
- Para a maioria dos materiais metálicos, o **regime elástico** persiste apenas até **deformações** de aproximadamente **0,2 a 0,5%**.
- À medida que o material é deformado **além desse ponto**, a tensão **não é mais proporcional** à deformação (lei de Hooke) e ocorre uma deformação **permanente** não 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 (linhas de discordâncias)**;
- A **deformação plástica** ocorre mediante um processo de **escorregamento (cisalhamento)**, que envolve o movimento de **discordâncias**.

Limite de resistência à tração



➤ Após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica aumenta (**encruamento**) 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**).



LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	LIMITE DE ESCOAMENTO
σ_r	σ_e
σ_u	σ_y
S_u	S_y
LR	LE
UNIDADES	UNIDADES
Sistema Internacional: Pa, kPa, MPa, N/mm ²	Sistema Internacional: Pa, kPa, MPa, N/mm ²
Sistema Inglês: psi, ksi	Sistema Inglês: psi, ksi
kgf/mm ²	kgf/mm ²

Ductilidade

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

Medidas de ductilidade no ensaio de tração

- **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 estrição, 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 proporcional ao AL .

Módulo de Tenacidade



Capacidade um material **absorver energia até a fratura**;

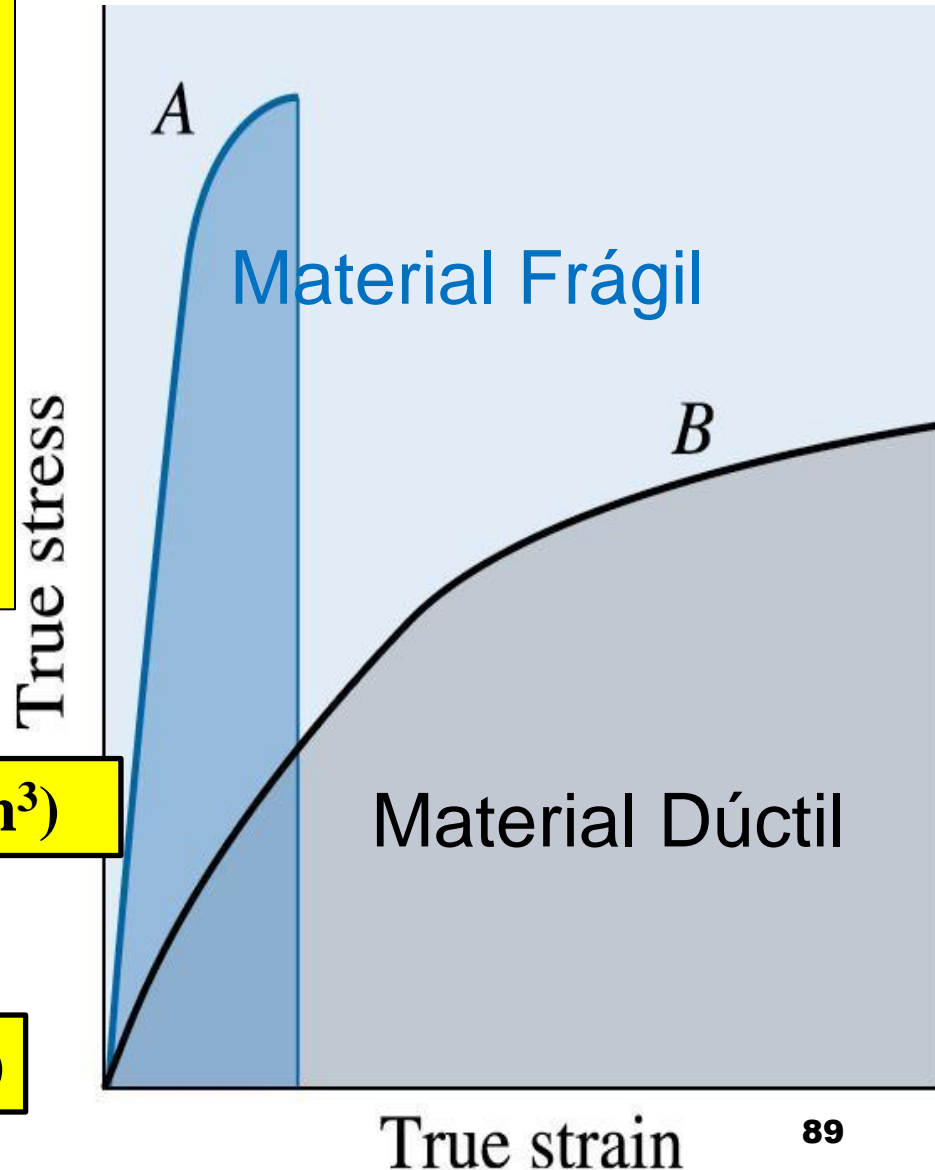
Pode ser determinada a partir da **curva $\sigma \times \epsilon$** . Ela é a área sob a curva; Para que um material seja tenaz, deve apresentar certa resistência e ductilidade. **Materiais dúcteis são mais tenazes que os frágeis.**

Materiais Dúcteis

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

Materiais Frágeis

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



Módulo de Resiliência



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

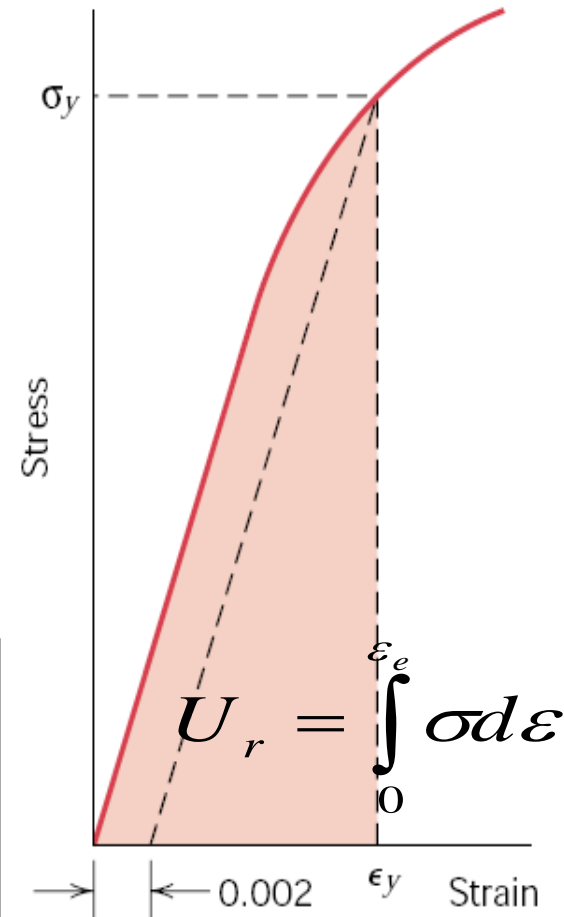
Para **aços carbono** varia de **35 a 120 MJ/m³**

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**.

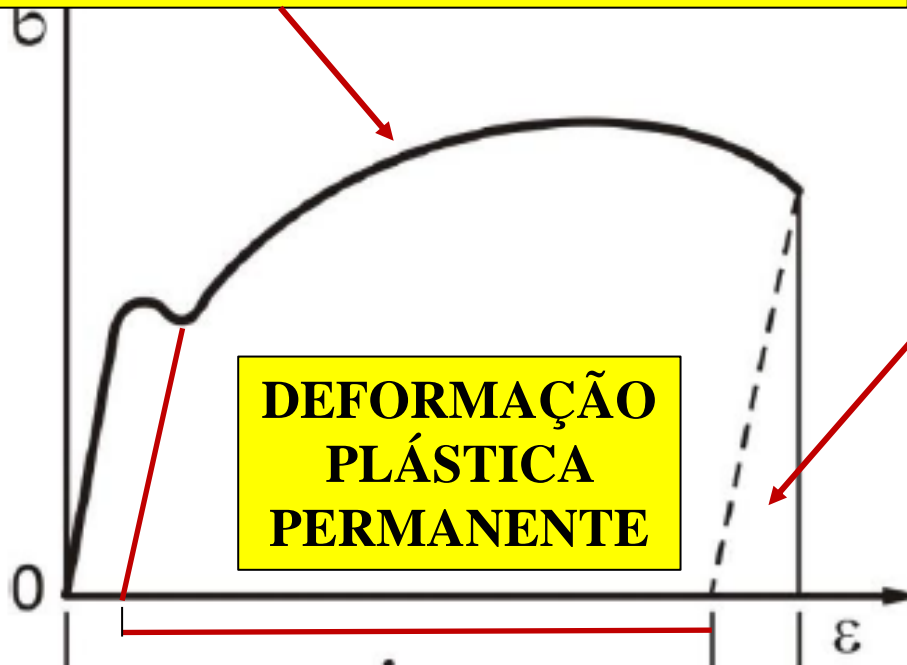


DEFORMAÇÃO NA CURVA $\sigma \times \epsilon$

A paralela à parte elástica é utilizada para determinação da deformação plástica.

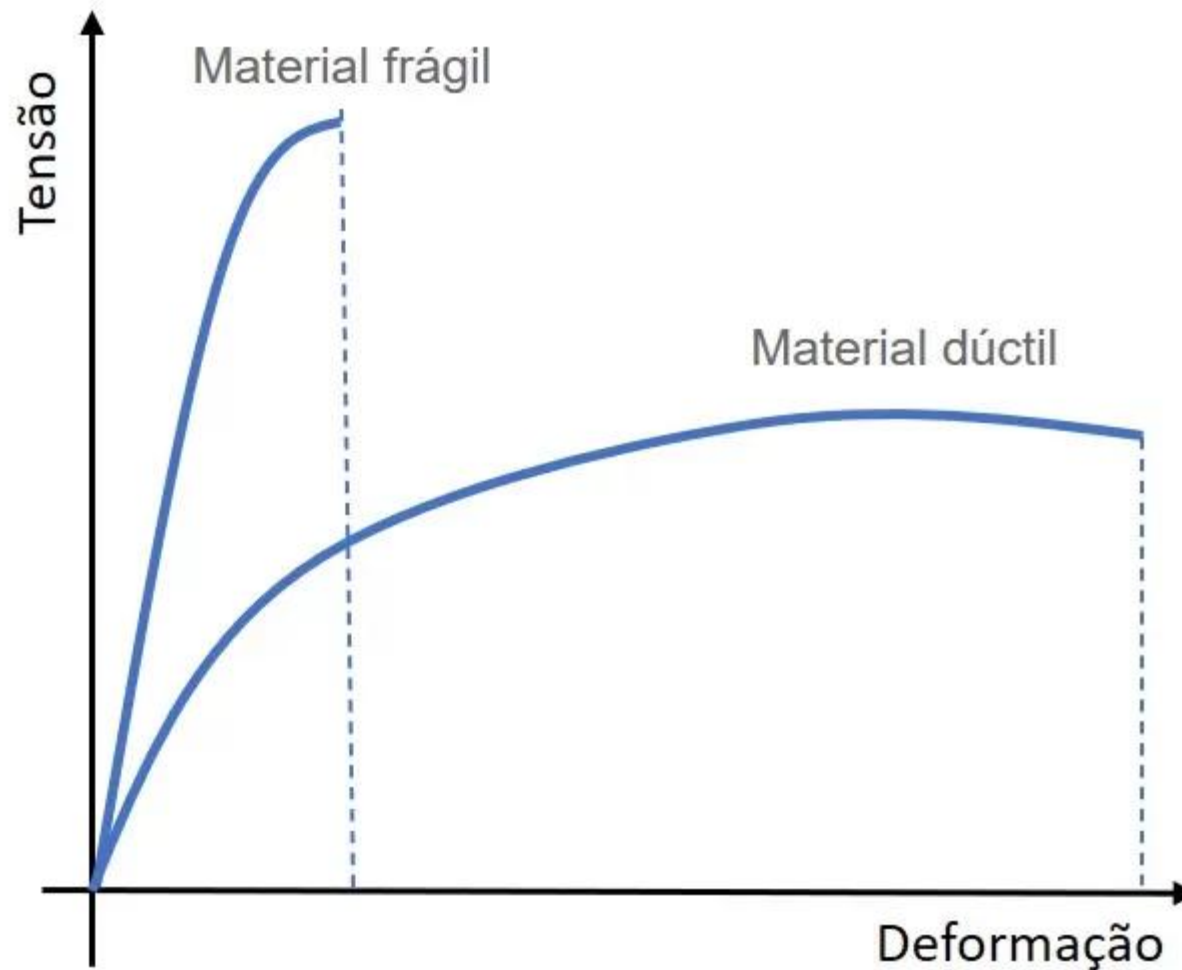
ENCRUAMENTO: AUMENTO DA TENSÃO NECESSÁRIA À DEFORMAÇÃO PLÁSTICA ATÉ O LR

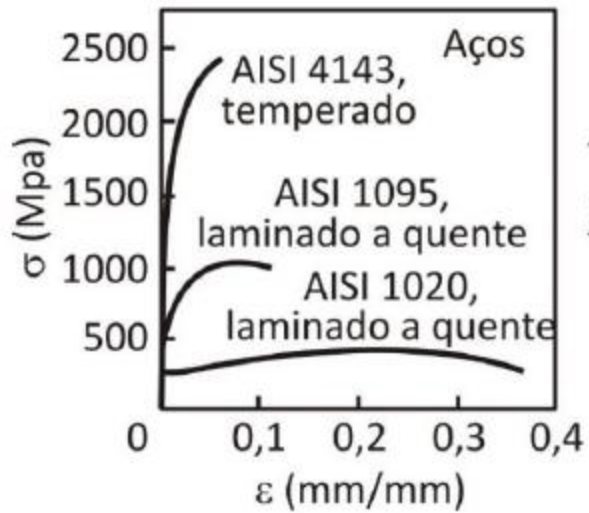
RECUPERAÇÃO ELÁSTICA



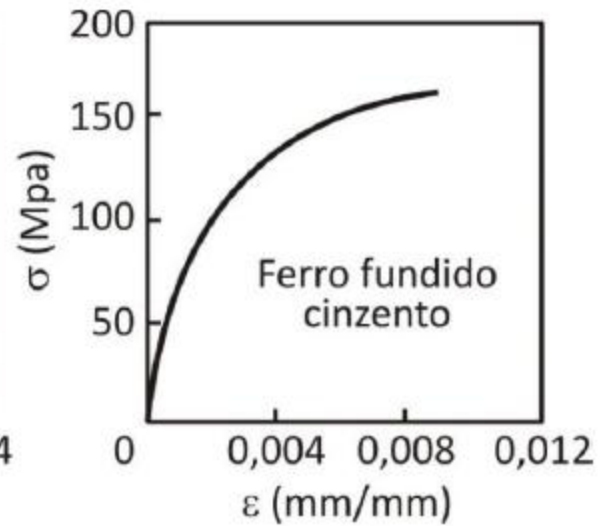
DEFORMAÇÃO PLÁSTICA PERMANENTE

Curvas σ x ϵ para materiais frágeis e dúcteis

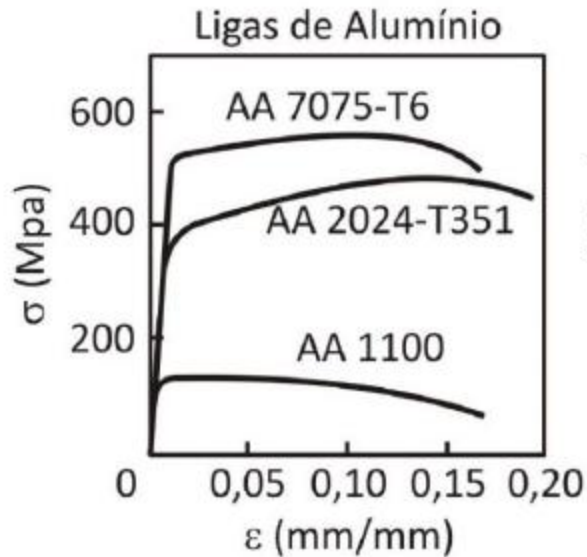




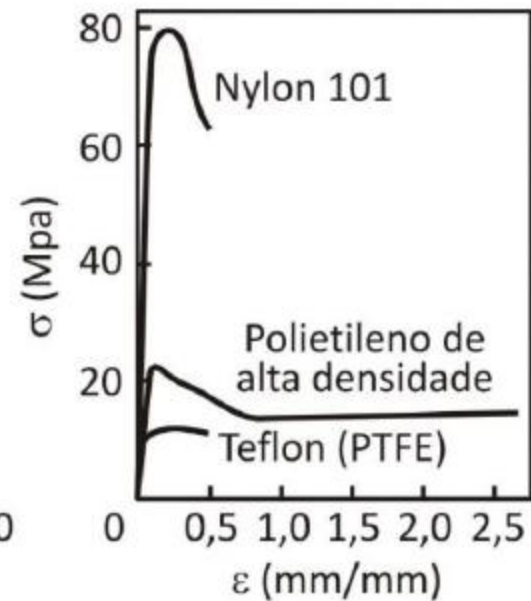
(a)



(b)

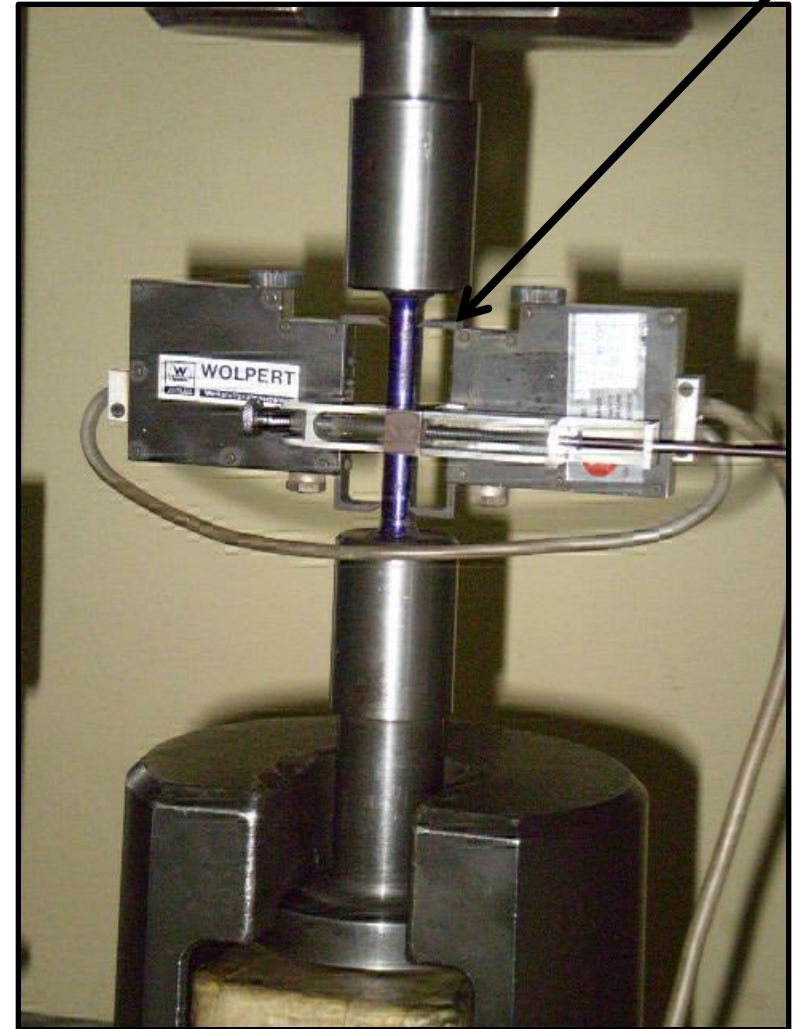
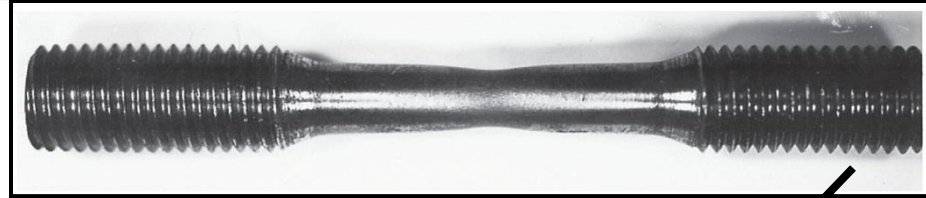


(c)



(d)

ENSAIO DE TRAÇÃO



ENSAIO DE TRAÇÃO EXTENSÔMETRO

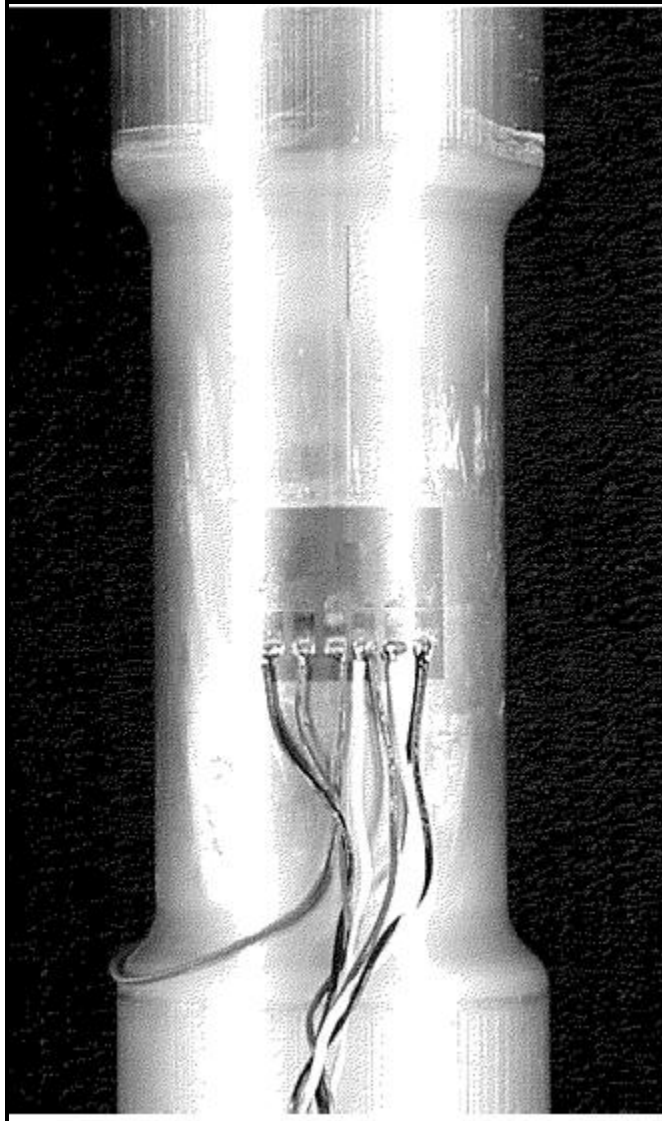
FUNÇÃO PRINCIPAL: DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO-MONITORA A DEFORMAÇÃO PLÁSTICA



(ASM METALS HANDBOOK, VOL.8)

ENSAIO DE TRAÇÃO

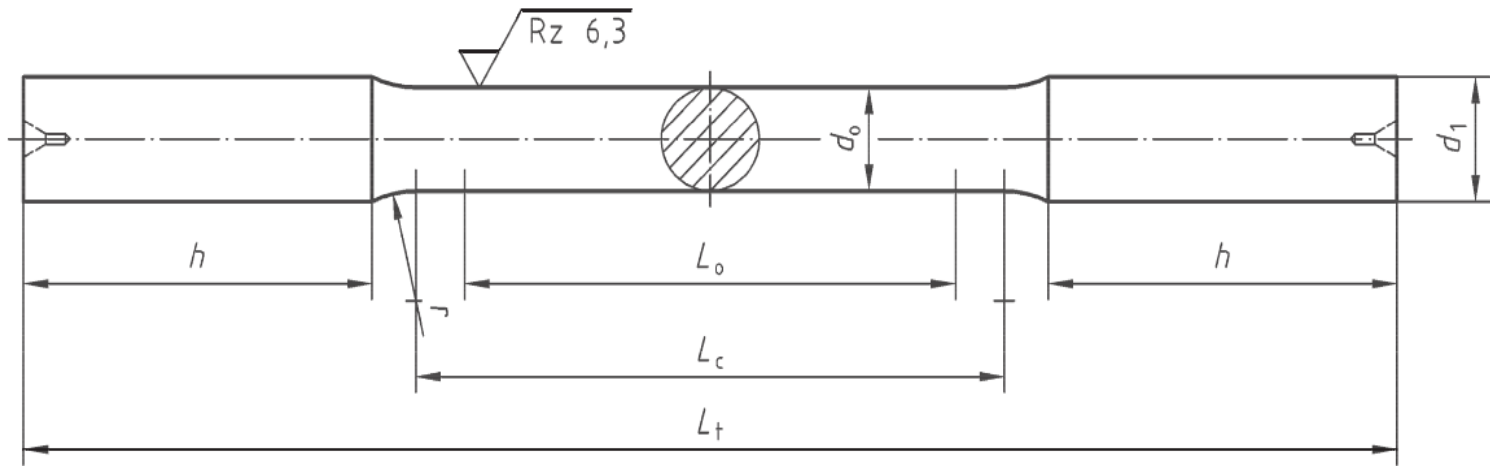
Extensômetro (“strain Gage”)



(ASM METALS HANDBOOK, VOL.8)

Determinação do **limite de escoamento** (principal função) e monitoramento da **deformação plástica/alongamento** para evitar interferência das **deformações dos dispositivos**.

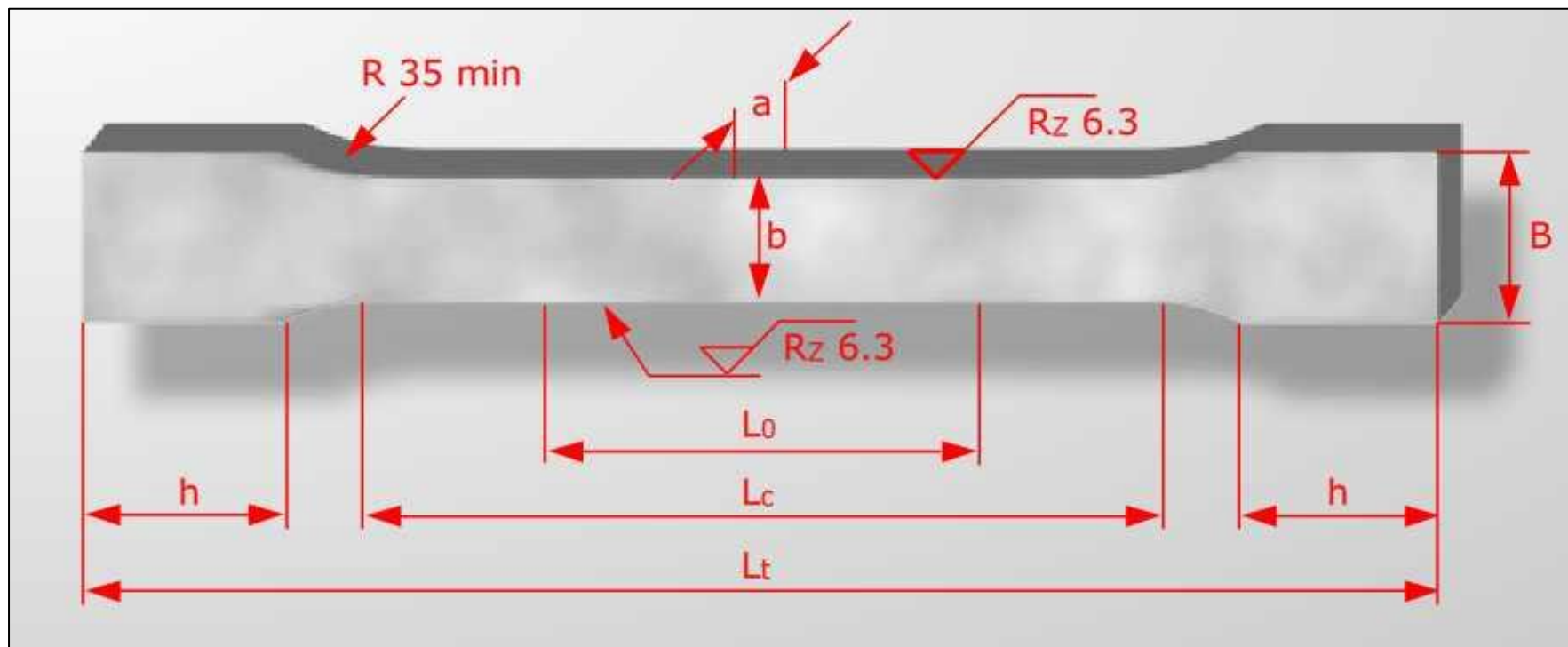
4.2 Type A test pieces



Key

d_0	test piece diameter	L_0	original gauge length ($L_0 = 5 d_0$)
d_1	diameter of gripped ends ($\geq 1,2 d_0$)	L_c	parallel length ($L_c \geq L_0 + d_0$)
h	length of gripped ends	L_t	total length of test piece

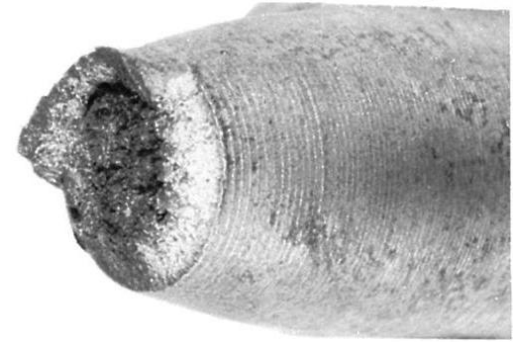
Figure 1 — Type A test piece, of circular cross-section, with smooth, cylindrical ends for clamping in wedge grips





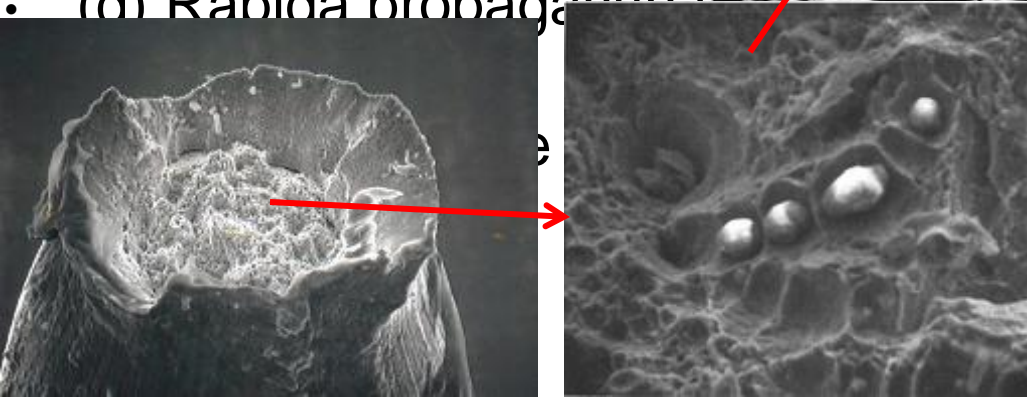
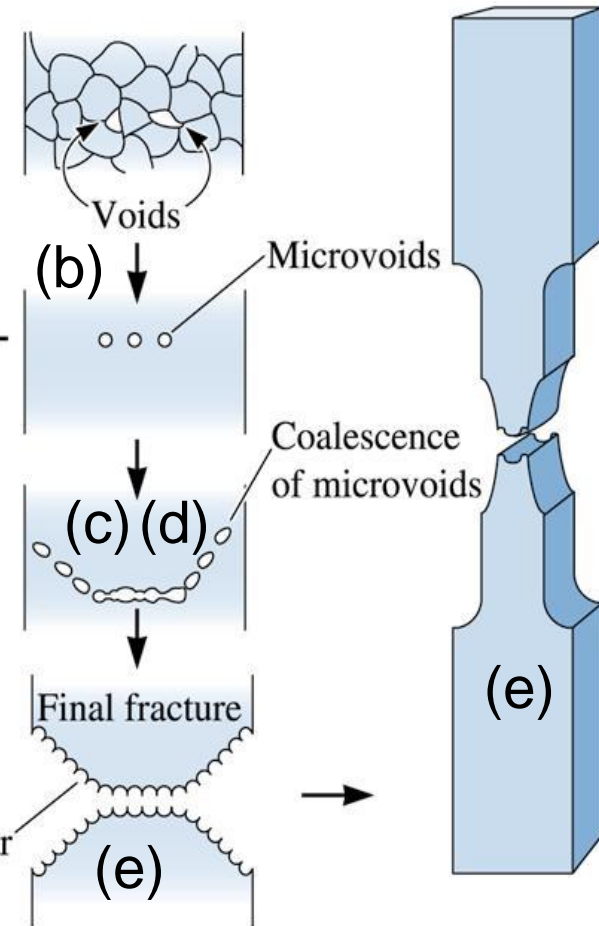
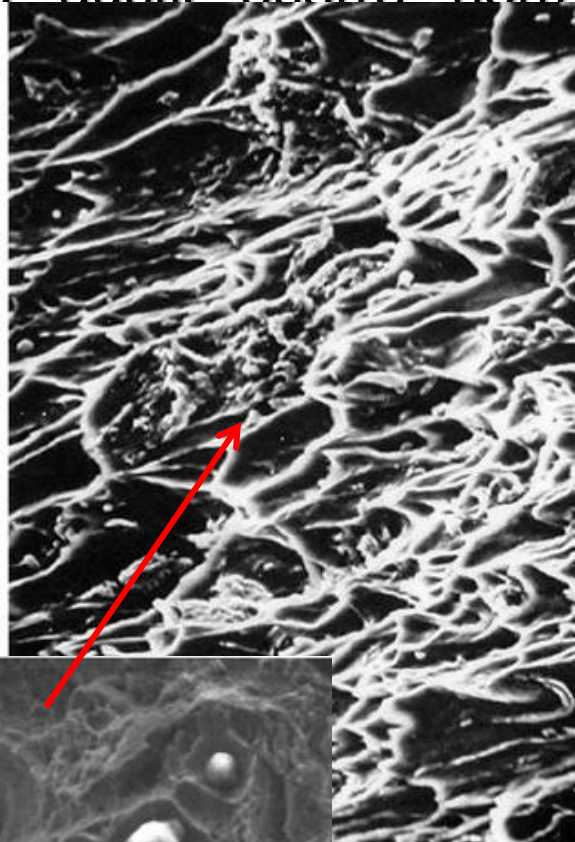
- Segundo a **ABNT**, o **comprimento da parte útil** dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração deve corresponder a **5 vezes o diâmetro da seção da parte útil**;
- Por acordo internacional, sempre que possível um corpo de prova deve ter 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento inicial. Não sendo possível retirada de um corpo de prova deste tipo, deve-se adotar um corpo com dimensões proporcionais a essas (*subsize*). Dimensões padronizadas podem ser encontradas nas normas como :
 - **ASTM E8M**;
 - **DIN50125**;
 - **ASTM A 370**;
 - **ABNT NBR ISO 6892-1:2013**.

Fratura dúctil

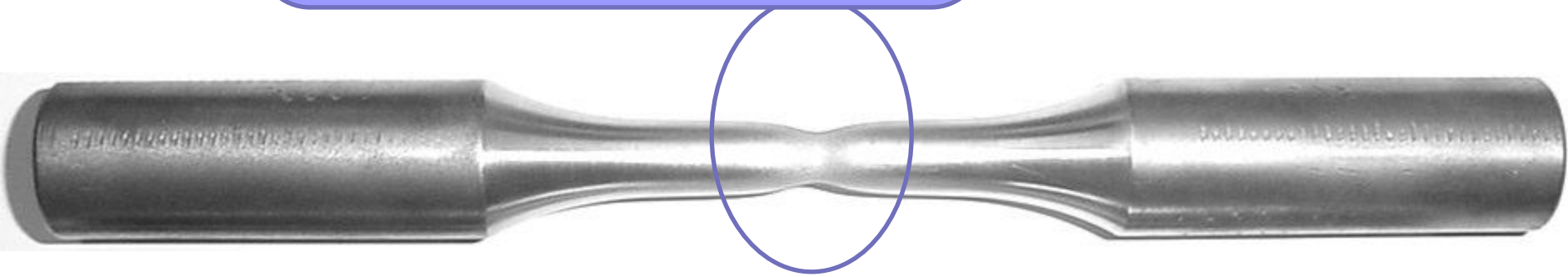
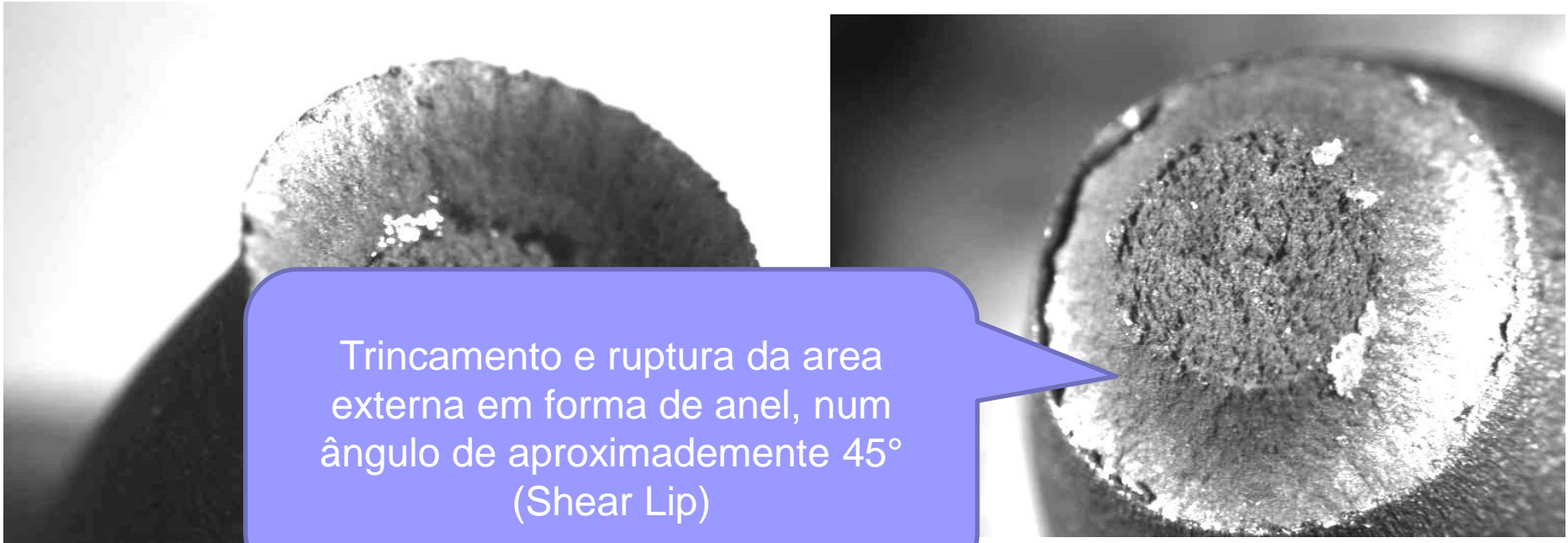


O processo de fratura dúctil ocorre normalmente em vários estágios

- (a) Empescoçamento inicial
- (b) Pequenas cavidades microvazios se formam
- (c) Microvazios aumentam e coalescem para formar elíptica
- (d) Rápida propagação



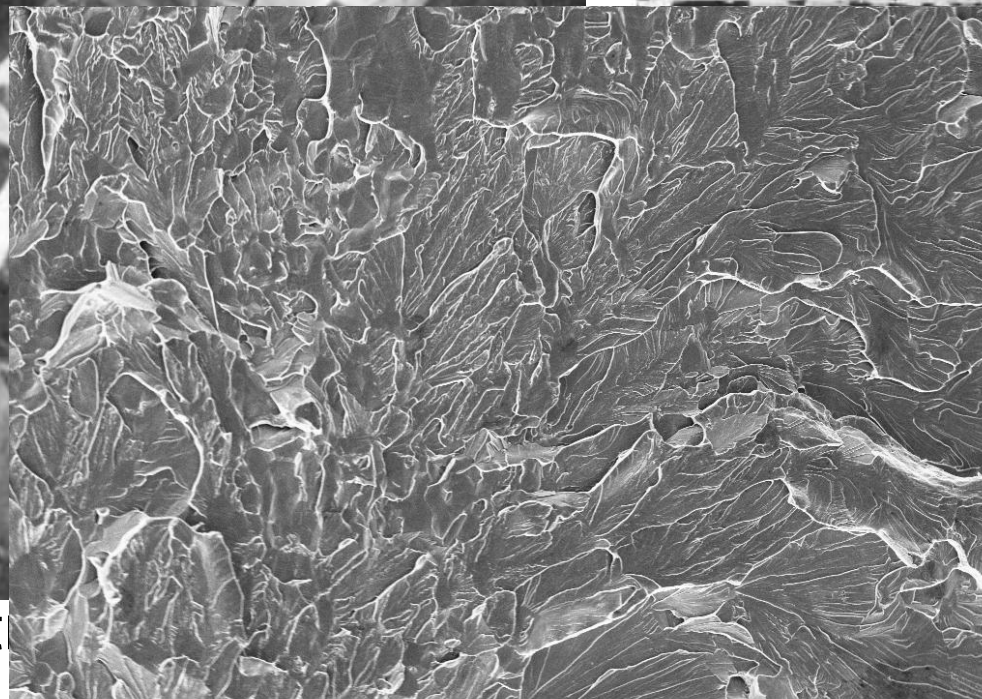
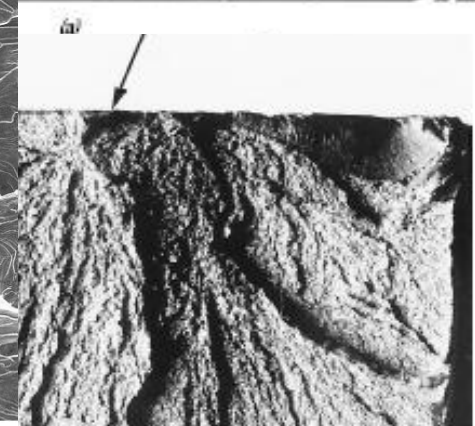
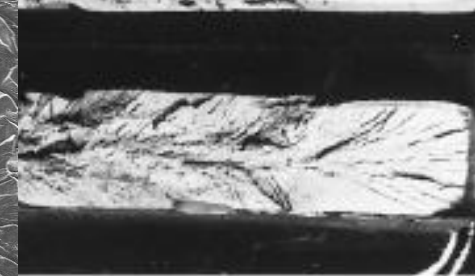
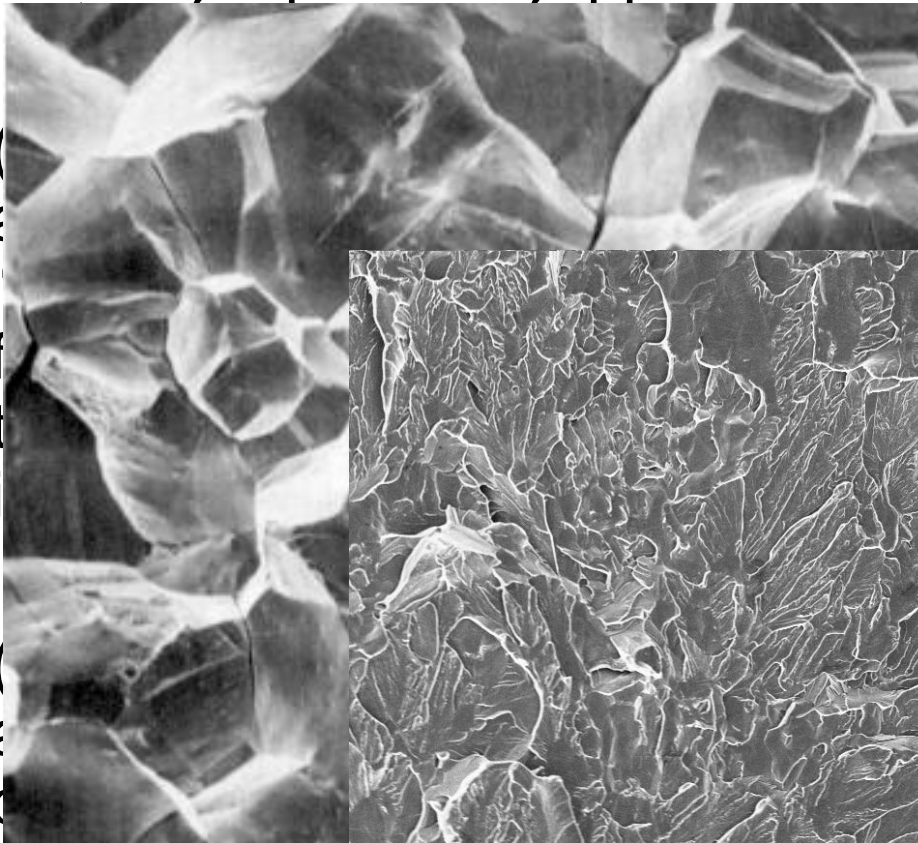
Fratura dúctil (Tipo Taça Cone)



Fratura frágil



Fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e formação de trincas

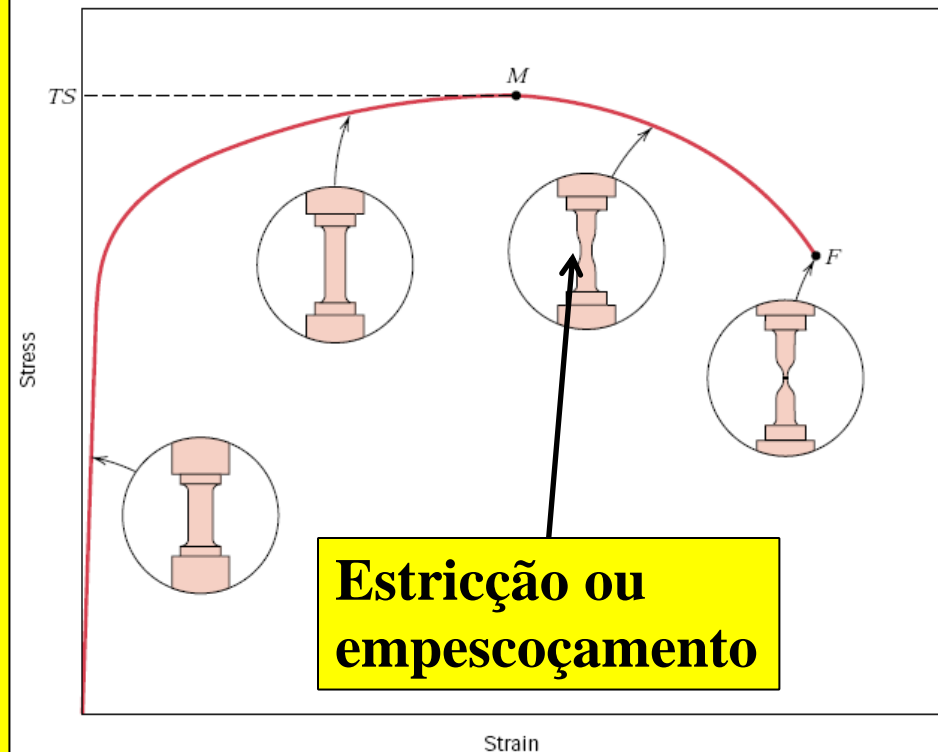


IQSC EHT=20.00 kV WD= 22 mm Mag= 500 X Detector= SE1
10µm H Photo No.=7 25-Apr-2006

origem da t
leque

Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

- Na curva **tensão-deformação convencional** após o ponto máximo (**ponto M**), o material **aumenta em resistência** devido ao **encruamento**, mas a área da seção reta está diminuindo devido ao **empescoçamento**;
- Resulta em uma redução na capacidade do corpo em suportar carga;
- A **tensão calculada** nessa carga é baseada na **área inicial** e não leva em conta o **pescoço**.



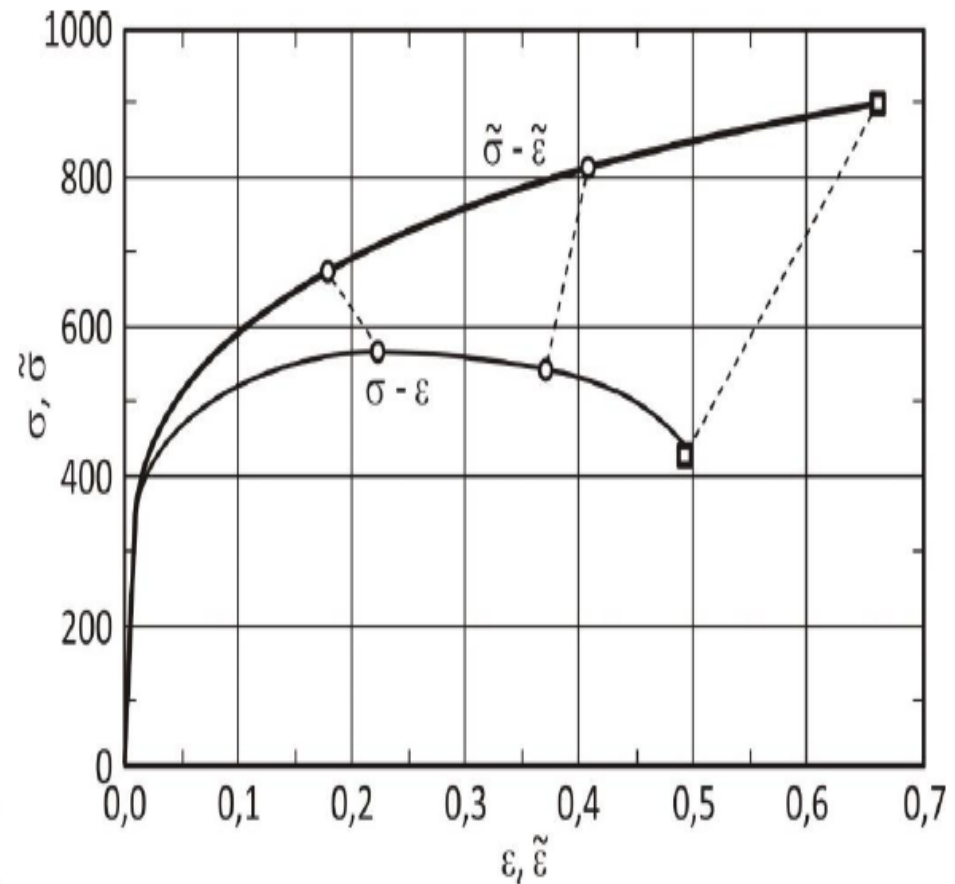
Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

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

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

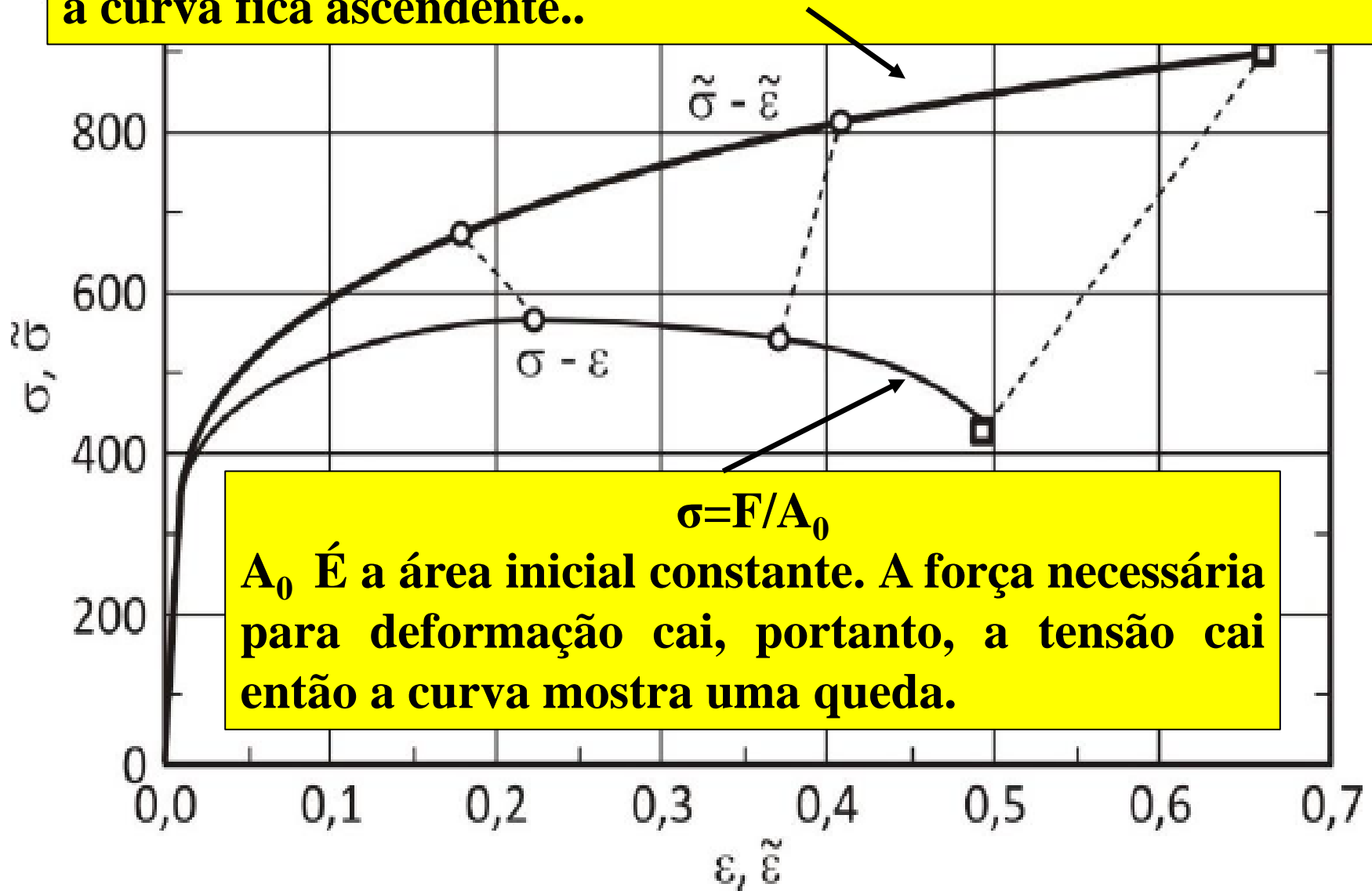
A Deformação Verdadeira é definida pela expressão

$$d\varepsilon_r = \frac{dl}{l} \quad \varepsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$



$$\sigma = F/A_i$$

A_i É a área instantânea e cai mais rápido que a força. Assim, a curva fica ascendente..



$$\sigma = F/A_0$$

A_0 É a área inicial constante. A força necessária para deformação cai, portanto, a tensão cai então a curva mostra uma queda.

Relações entre Tensões e Deformações Reais e Convencionais

■ Deformação

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

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

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

Geralmente,
representa-se

$$\varepsilon_C = \mathbf{e}$$

■ Tensão

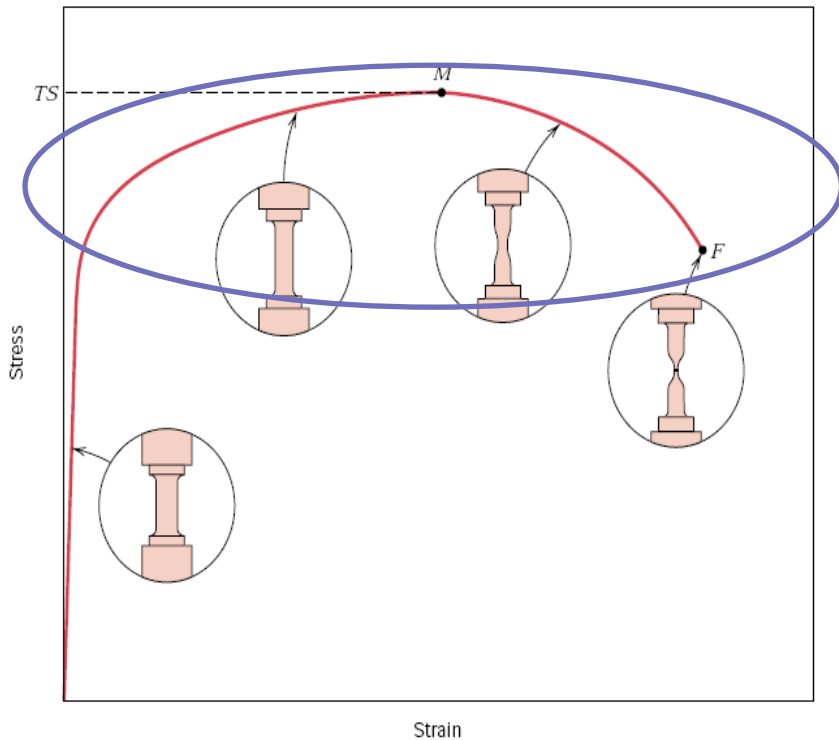
$$\ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_C)$$

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

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

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

TENSÃO PARA A REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA



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

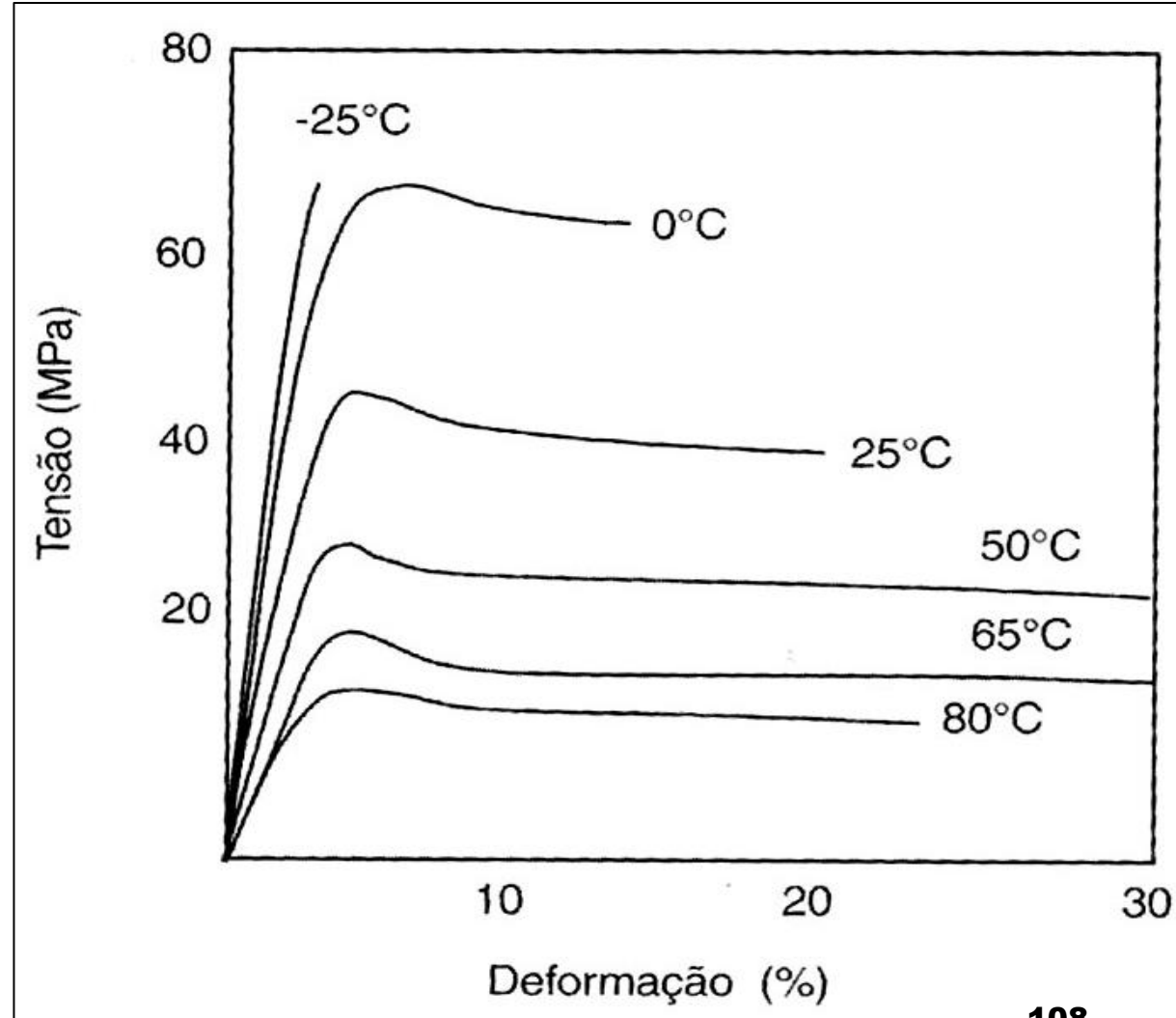
K e **n** são constantes que dependem do material e da condição: tratados termicamente ou encruados

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)

Efeito da temperatura

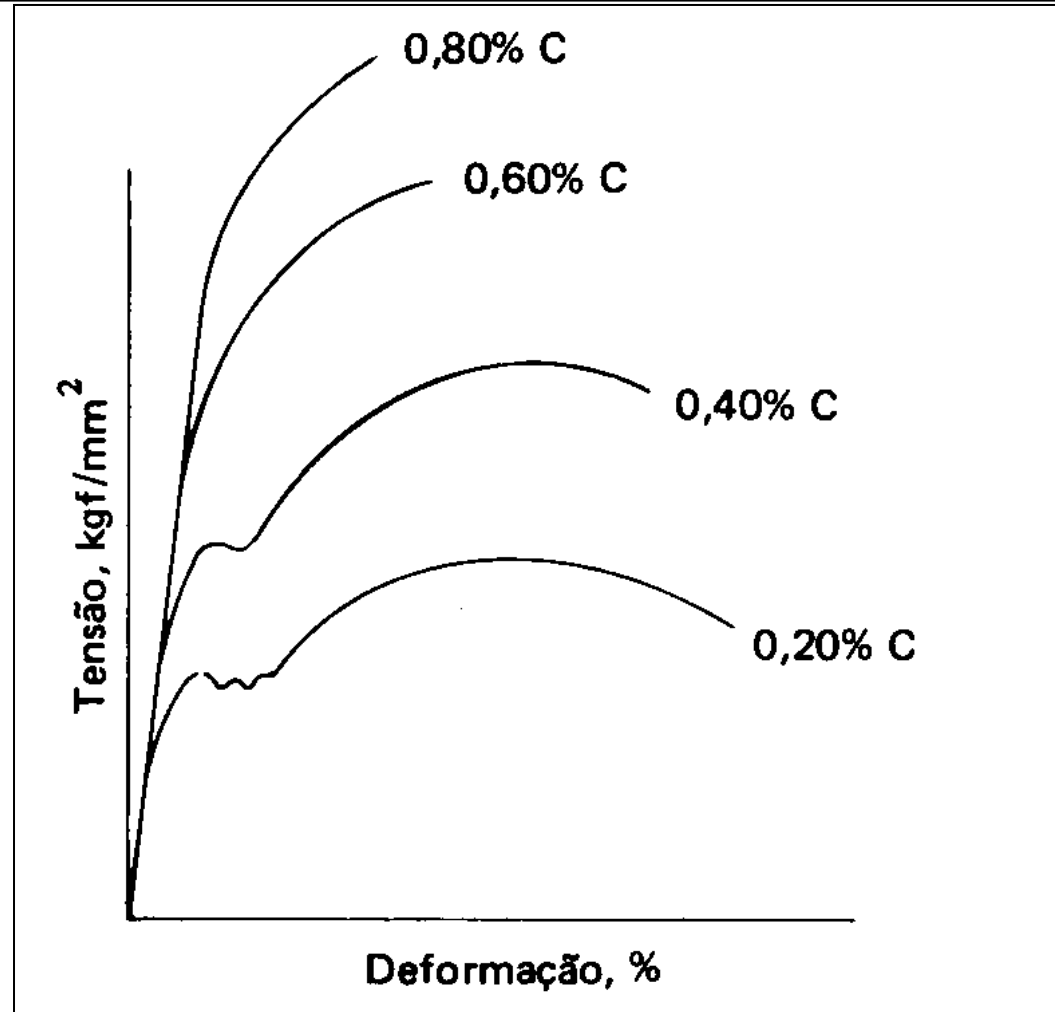


Em geral, a **resistência diminui** e a **ductilidade aumenta** com o aumento de temperatura.



Efeito %C nas Propriedades de Tração

- **Baixo** % de carbono – Menor LE, Menor LR. **dúctil e tenaz;**
- **Alto** % de carbono – Maior LE, Maior LR. **Duro e frágil.**
- E constante.



INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE FALHAS

REFERÊNCIAS:

- **Fatigue of Materials– S.Suresh, Cambridge University Press, 1998;**
- **O Desenvolvimento Histórico da Metalurgia Física – Robert Franklin Mehl, Tradução: José Roberto Gonçalves da Silva, apostila, UFSCar, 1985.**
- **Metalografia e Análise de Falhas, Tibério Cescon e Cesar R.F. Azevedo, ABM, São Paulo, 2006;**
- **ASM Handbook Vol. 11 - Failure Analysis – 2001;**
- **Analyses and Prevention of Aircraft Structural Failures, curso- L. Molent, 2011;**
- **Engineering disasters: learning from failure, N. Chawla, apresentação, 2007;**

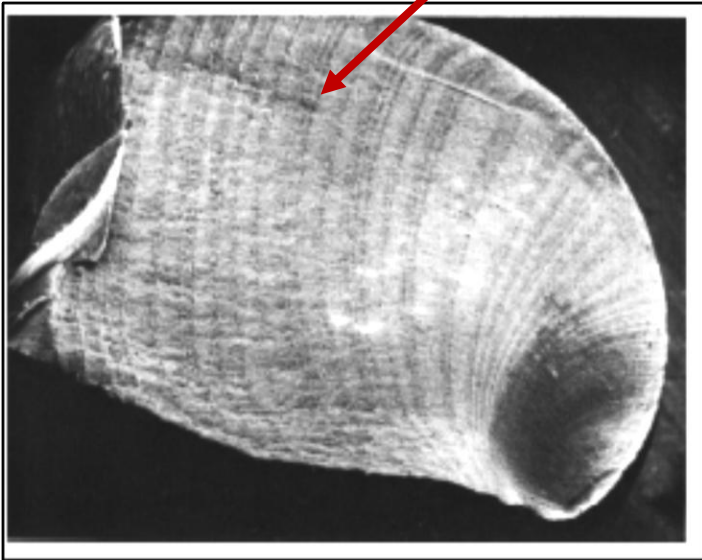


- Trabalho investigativo em vários aspectos: histórico e a falha em si;
- Perícia forense, indústria, pesquisa;



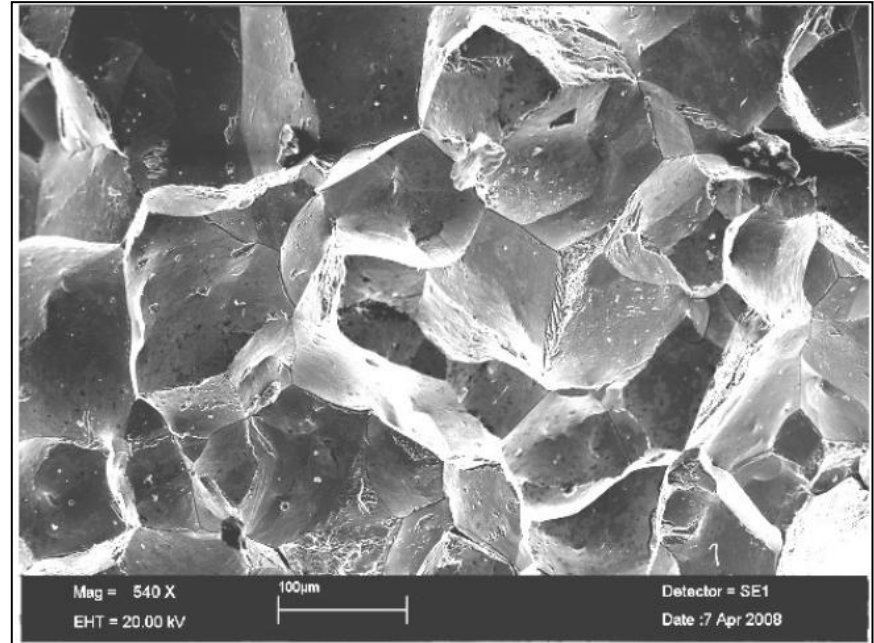
- A maior parte das informações sobre uma fratura (caso particular de falha) é obtida por análise visual a olho “pelado” ou com um instrumento de no máximo 10 vezes de aumento.

Análise macroscópica superfície de fratura: quantidade de deformação plástica: fratura frágil (pouca) ou dúctil; origem da fratura (ex.: marcas de praia-fadiga)

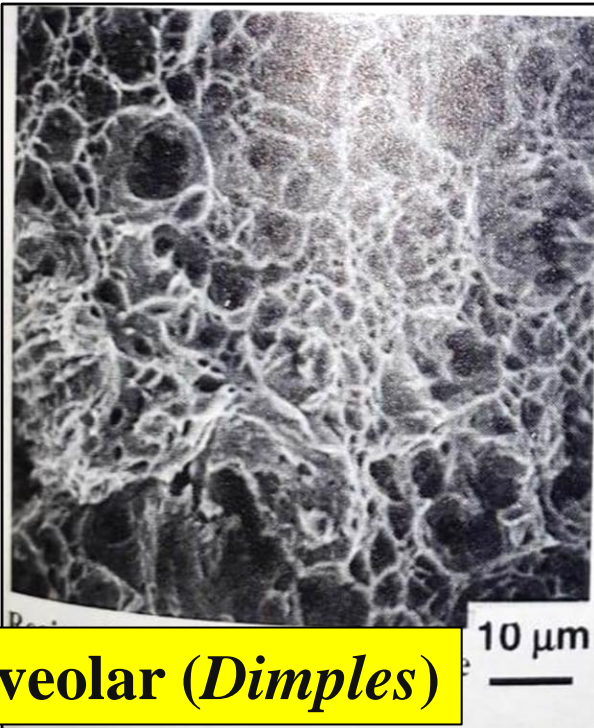


Análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), da superfície de fratura: micromecanismos de fratura de alta energia (alveolar-*“Dimples”*), de baixa energia (Intergranular, Transgranular por Quase-clivagem/Clivagem) ou fadiga: Estrias.

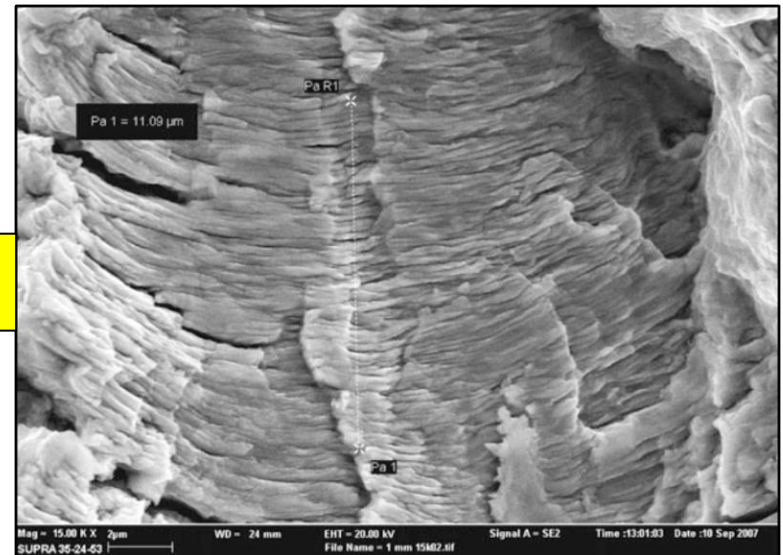
Intergranular



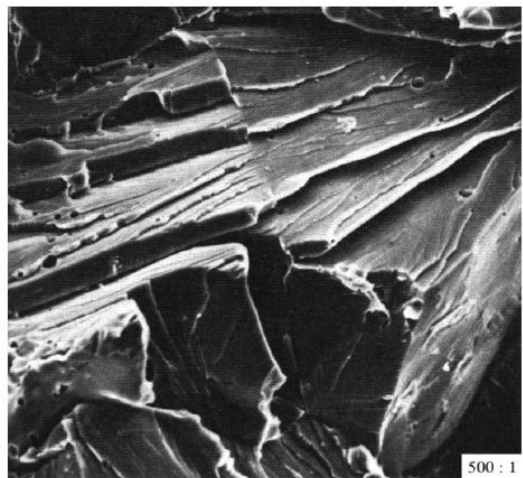
Alveolar (*Dimples*)



Estrias



Clivagem



HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS

PRIMÓRDIOS

Moeda da Pérsia- “Siglos” – séc.V- fabricada com prata (aprox. 5,4 g) e a parte traseira era “forjada” a frio ou a quente com uma matriz de bronze e, às vezes acabava deixando a “impressão digital” da matriz fraturada.



HISTÓRICO DA MECÂNICA DE FRATURA

- *1913- Inglis desenvolve o modelo de tensões para um furo circular (rebites) e percebe que se o fizer elíptico- similar a trinca;*
- *1920- Griffith – Teoria da fratura para vidros:
"uma trinca se propagará quando a diminuição da energia de deformação elástica é pelo menos igual à energia requerida para criar a nova superfície da trinca".*
- *1945- Orowan aperfeiçoa a teoria introduzindo uma componente plástica;*
- *1956-1957- Irwin propõe uma taxa crítica (G) de variação da energia potencial por unidade de área da trinca ($dA = da \cdot t$), ou seja a força motriz;*
- *Surge o conceito “tenacidade à fratura” para designar diferentes parâmetros que mostram como a presença de uma trinca afeta a resistência mecânica de um material.*

TITANIC- ABRIL, 1912



TITANIC- ABRIL, 1912

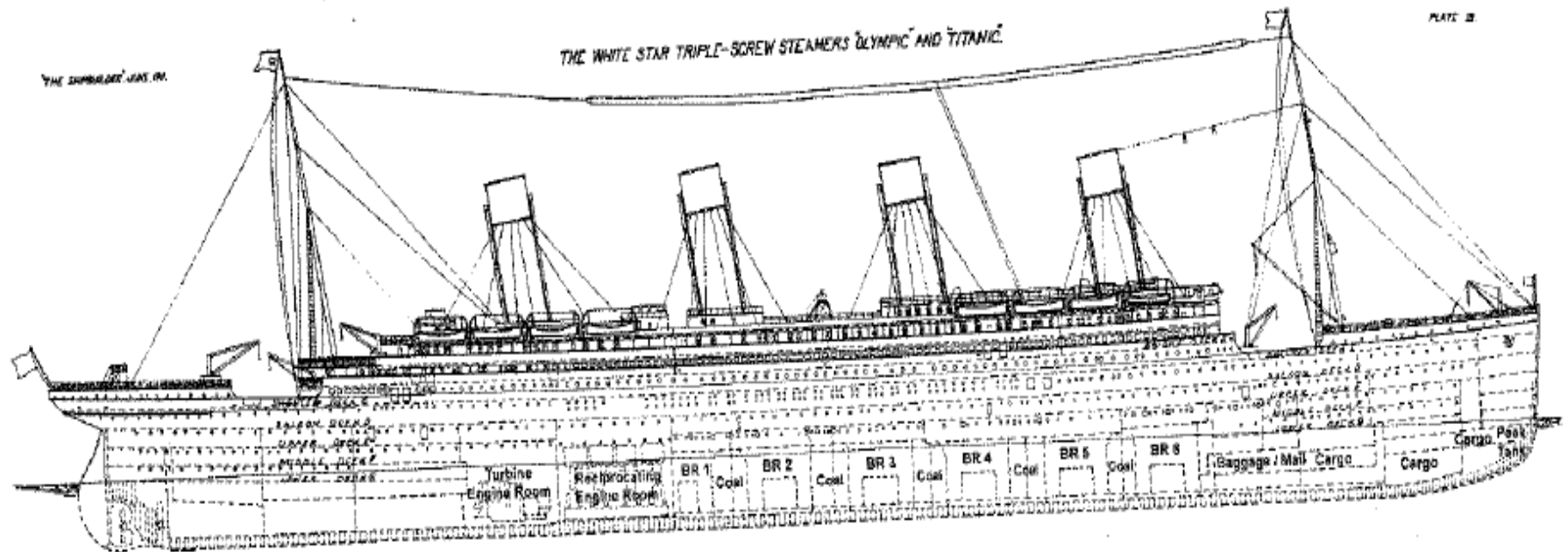


Figure 1.

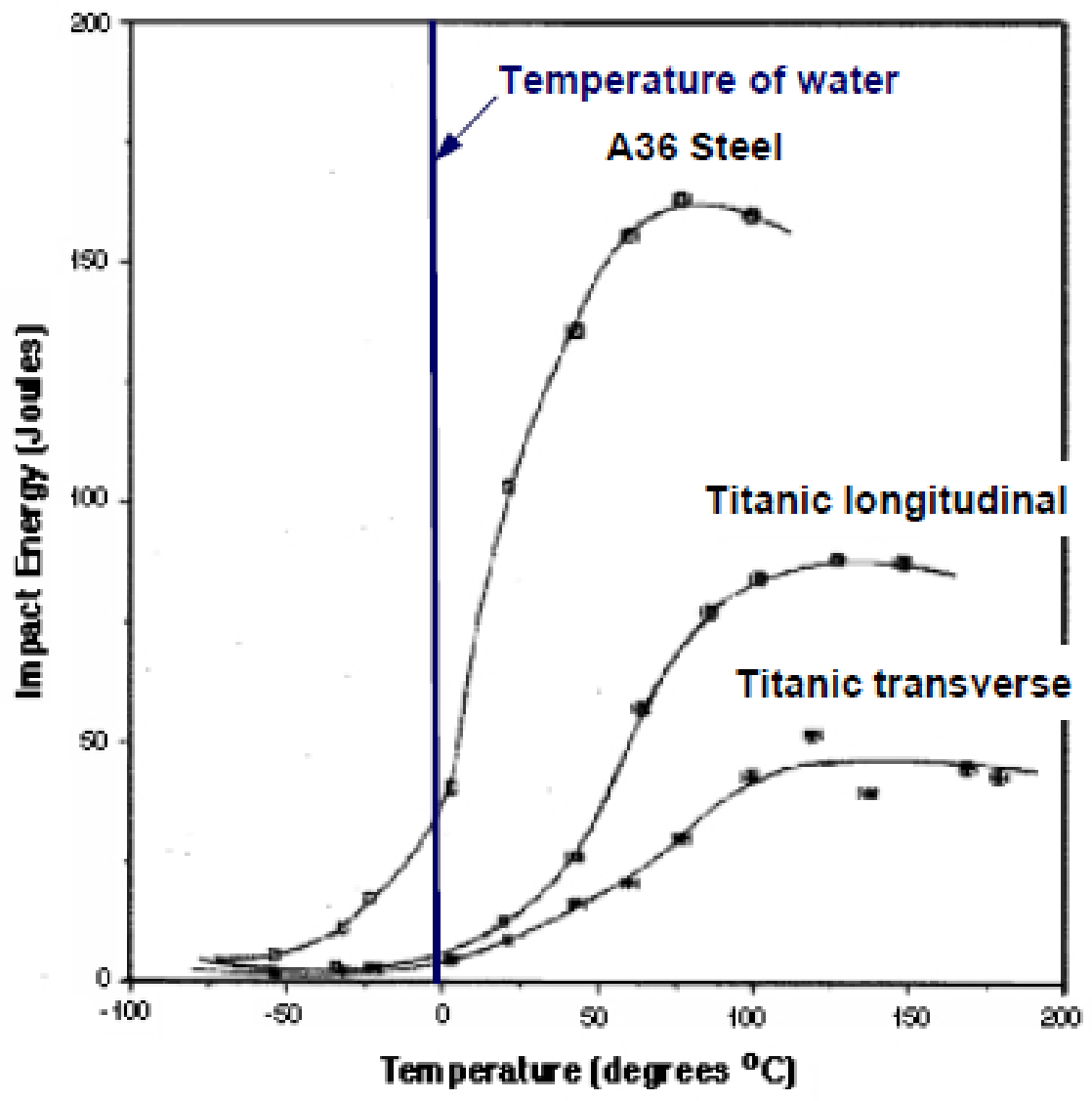
Compartimentado-rebites: compartimentos separados.

TITANIC- ABRIL, 1912

- **Fatos:** na noite de **14 de abril de 1912 às 23h40min** a tripulação visualizou o **Iceberg** de 50 a 300.000 ton- **após 40 s** houve a **colisão**;
- **Às 2h20min** ocorreu o **afundamento** com mais de **1500 vítimas**.
- **Análise do Titanic (1991-2008): Dr. Tim Foeck e Dra. Jennifer Hooper McCarty;**
- **Duas principais teorias:**
 - **Qualidade do aço do casco** somado à **falta de conhecimento da mecânica de fratura;**
 - **Qualidade dos rebites.**

TITANIC- ABRIL, 1912

- **Desconhecimento da Mecânica de Fratura;**
- **Temperatura de transição frágil-dúctil é levantada com cp de impacto- secção de (10x10)mm [não era obrigatório, na época].**

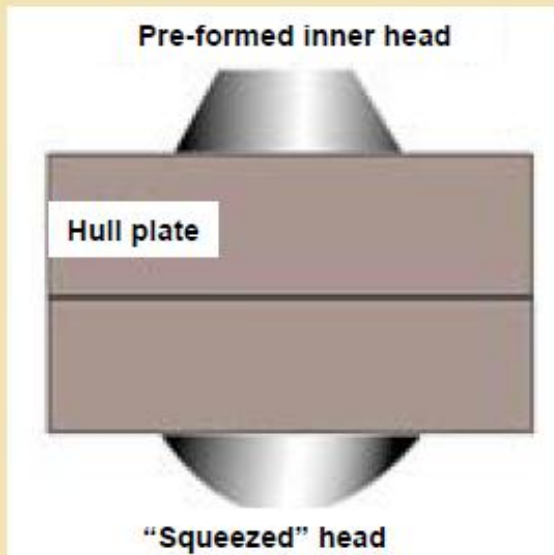


Temperature of the water was -2°C !!

TITANIC- ABRIL, 1912

- **A primeira conclusão** apresentada no livro é que a **teoria do aço frágil** estava **errada**: a **amostra** do casco retirada para o **ensaio de impacto**, em **1991**, era de uma região **já fraturada em três pontos**, tratando-se, portanto, de uma **chapa particularmente frágil**;
- **O ensaio de impacto não** seria o **melhor** método para **avaliação** da fragilidade do aço pois a **taxa de deformação** envolvida é **muito maior** do que a que **ocorreu de fato**.

TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES

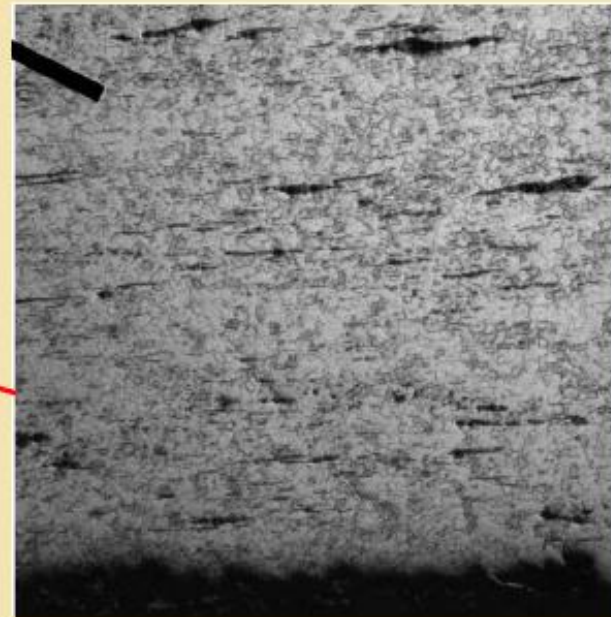


Hull of the *Olympic*, *Titanic's* sister ship after a collision in 1911.

TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES

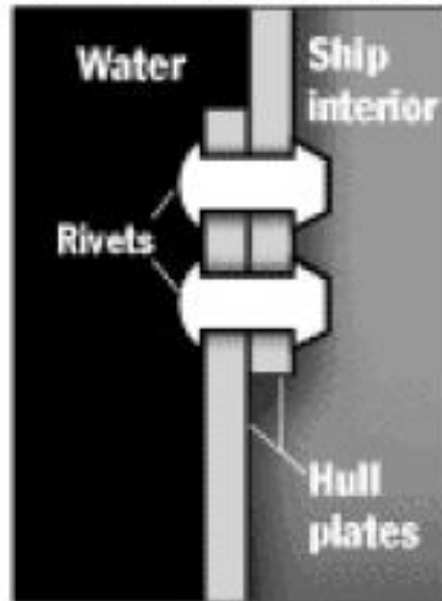
Microstructure of Titanic Rivet

- Orientation of Fe-silicate stringers is perpendicular to loading axis at the end of the rivet
 - Much lower strength and inferior resistance to crack propagation



TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES

HOW THE RIVETS MAY HAVE CONTRIBUTED TO DISASTER



1. The rivets were used to seal the hull plates together, with the hammered end on the exterior.



2. Pressure from the iceberg collision may have caused the rivets to pop along some hull plates, causing the seams to open.



3. The total area open to the sea may have been no bigger than a closet door, through which 34,000 tons of water seeped.

A conclusão final indica que ocorreu uma combinação de fatores que levaram à falha:

- **“A natureza do impacto não usual”;**
- **Presença de grande quantidade de inclusões de escória (silicatos), nos rebites.**

APÓS TITANIC

Desenvolvimento da Mecânica de Fratura

Desenvolvimento dos ensaio de ultrassom

HISTÓRICO DA ANÁLISE DE FALHAS AVIÕES DE HAVILLAND-1954

Aviões COMET

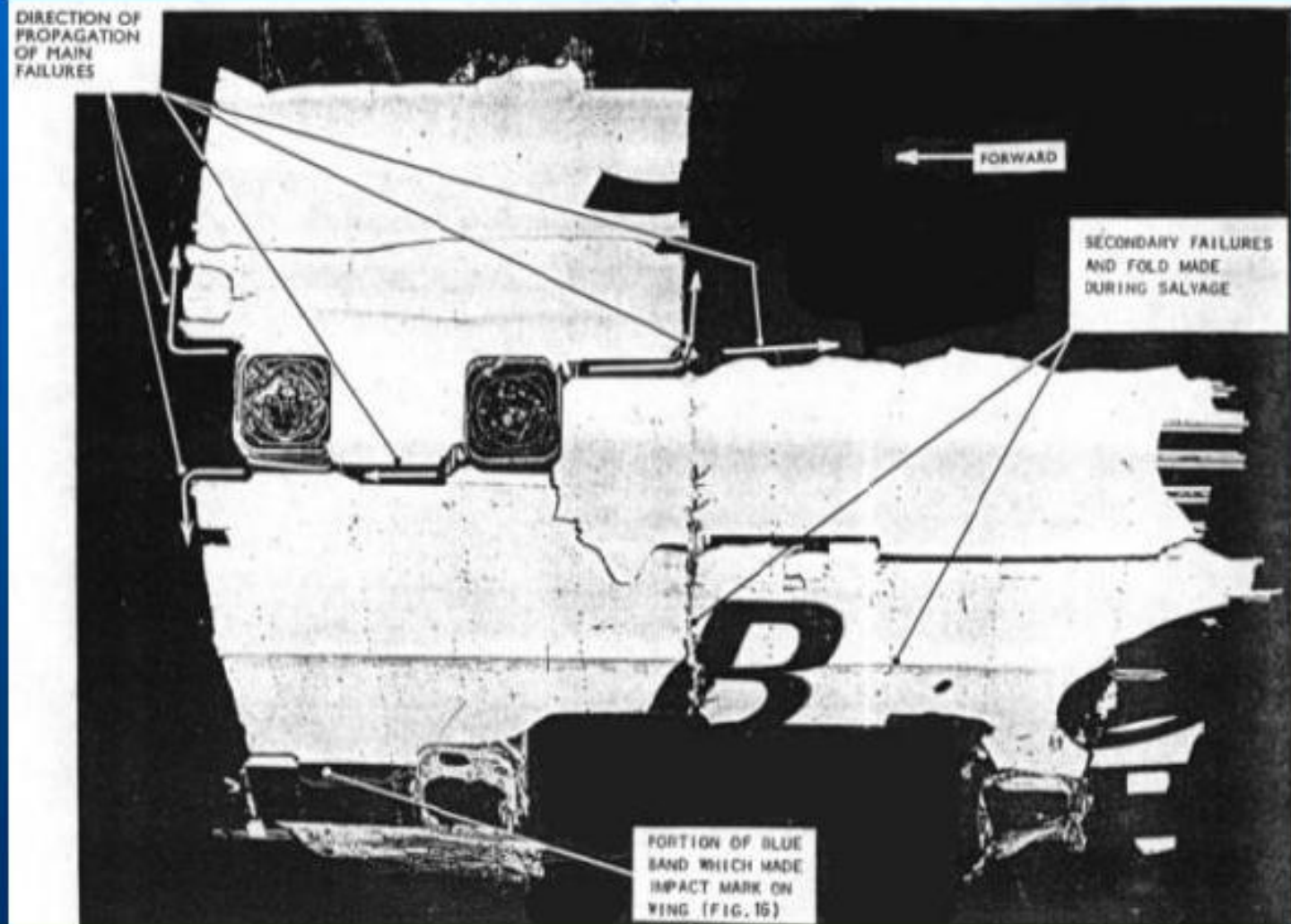


JATOS COMET (De Havilland)

Após teste em container pressurizado, com água.



Jatos Comet



COMET-TRINCAS QUE LEVARAM À FRATURA.

A análise de falhas :

A fratura ocorreu devido à **compressão e descompressão**, no pouso e decolagem, causando a **nucleação de trincas de fadiga** em pontos de **concentração de tensão**, próximo às **extremidades das escotilhas retangulares**. A **cabine era pressurizado com pressões duas vezes maiores que a dos outros aviões (56,9kPa)**

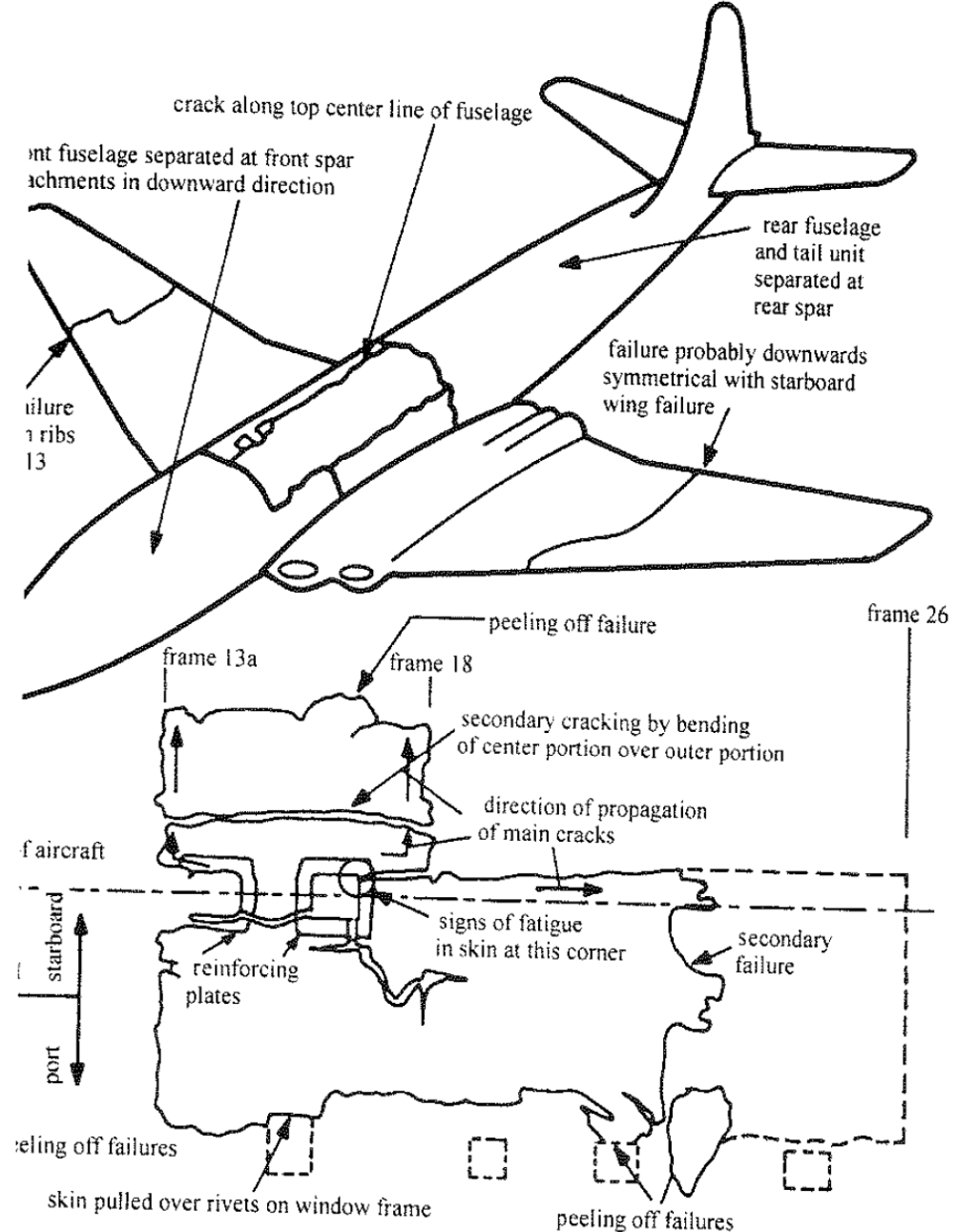
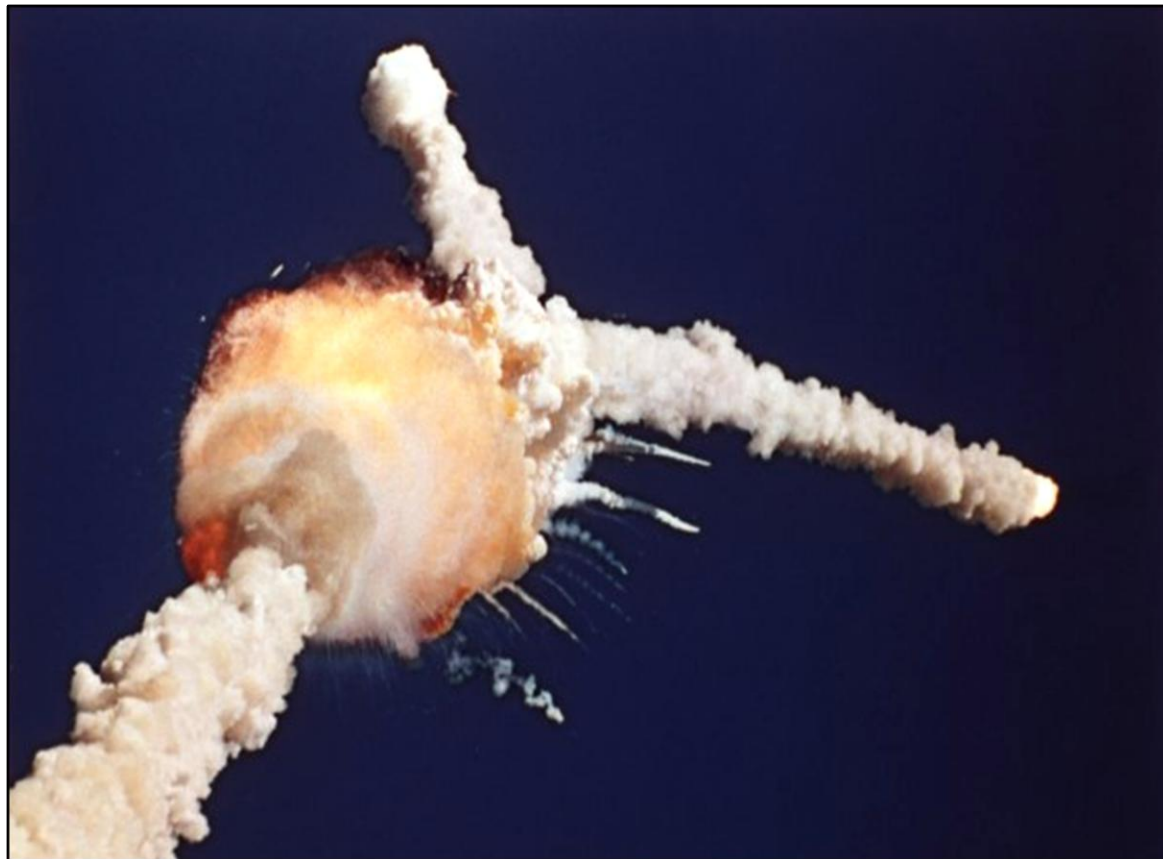


Fig. 1.1. Schematic diagram illustrating the location of fatigue cracks in a failed Comet airplane. (After Petroski, 1996.)

Em 1986 um acidente deixou o mundo em choque, com a morte de sete tripulantes, incluindo uma professora, que seria a primeira civil a ser enviada ao espaço. O ônibus espacial Challenger explodiu 73 segundos após o lançamento, em sua décima missão. A análise da falha mostrou que a temperatura na hora e local do lançamento ($\sim -2^{\circ}\text{C}$) contribuiu para fragilizar um anel de vedação na parte inferior de um dos foguetes permitindo o contato entre as chamas e o combustível.



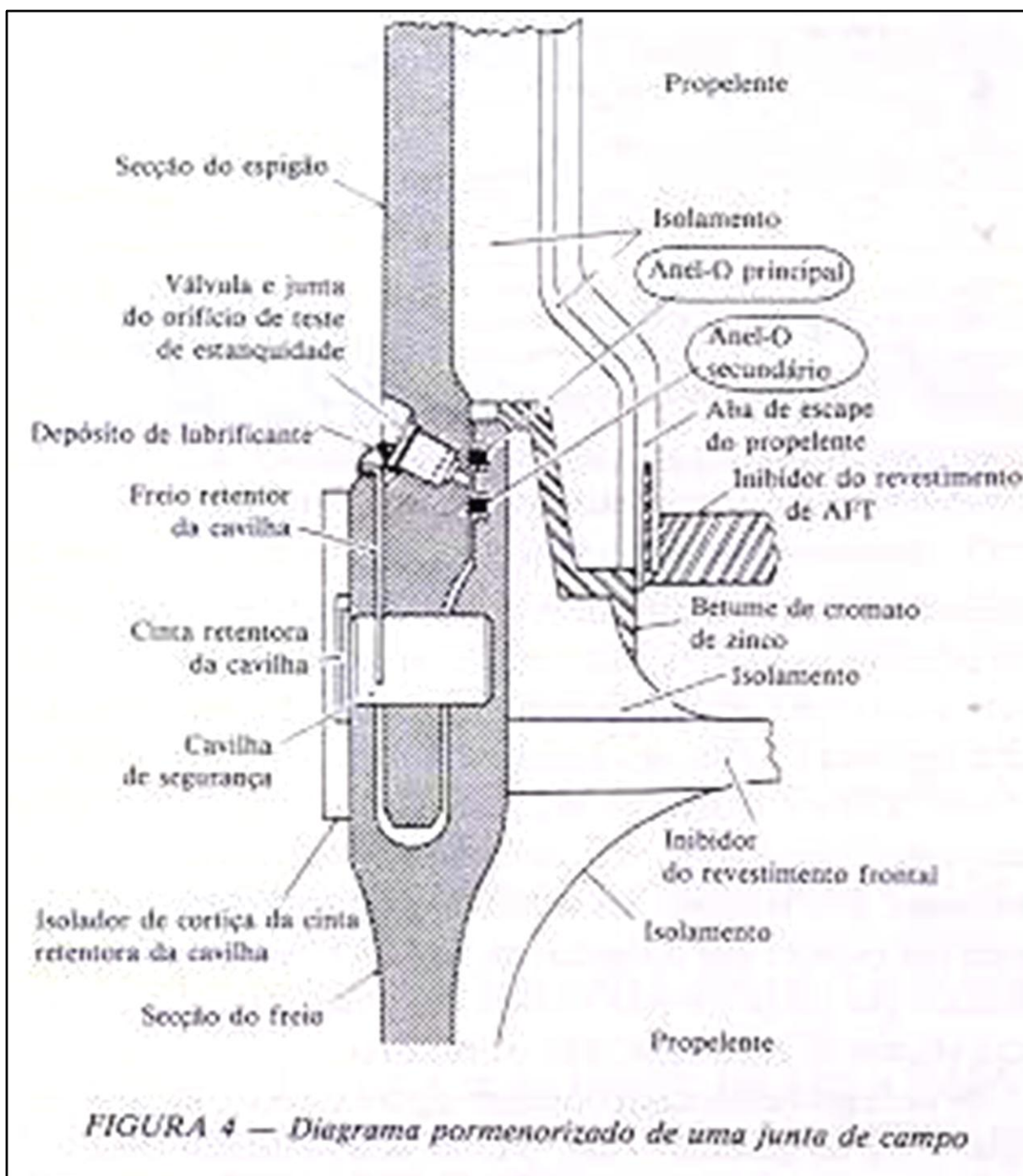


FIGURA 4 — Diagrama pormenorizado de uma junta de campo

FOGUETE AUXILIAR

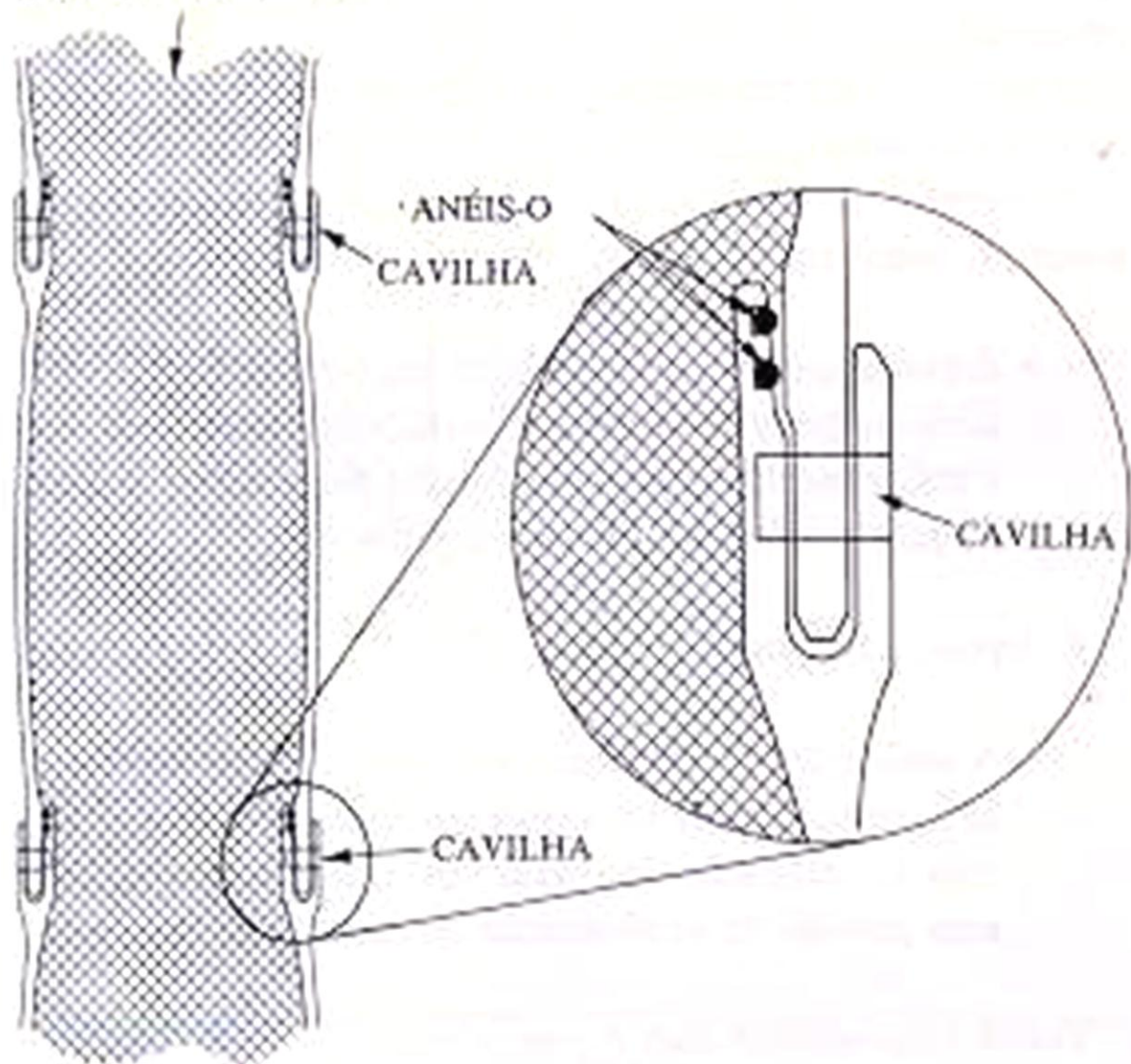


FIGURA 7 — A rotação da junta é originada pela pressão vinda do interior do foguete, que obriga as paredes a afastarem-se das juntas. O intervalo aumenta e o gás aquecido passa por um ou ambos os anéis-O

- **Richard Feynman** (PNF-1965): *An outsider's inside of the Challenger Inquiry* (O olhar de um estranho na investigação do acidente com o ônibus espacial Challenger), *Physics today*, fevereiro de 1988- conta sobre a análise do acidente que se iniciou alguns dias depois do acidente, em 1986;
- A equipe de engenharia sabia que havia problemas com os O-rings de borracha: vazamentos. O New York Times publicou uma carta do **orçamentista do projeto, Sr. Cooks**, expondo o fato;
- **O Engº Allan MacDonald** participou de uma das reuniões e trouxe um relatório mostrando que a equipe de engenharia da empresa *Morton Thiokol Company* sabia do problema e alertou que eles não deveriam voar se a Ta estivesse abaixo de 53°F (11,67°C);
- **Em uma reunião pública, Feynman mergulhou uma amostra do O-ring de borracha em um copo com água gelada e mostrou que ela perdia a elasticidade e poderia fraturar ao sofrer uma solicitação mecânica como impacto ou vibração.**



O ASM Metals Handbook, Vol.11- Failure Analysis and Prevention faz a seguinte citação sobre o caso: *“If the design team had understood and learned how to use its latent power effectively, Challenger would not have been launched”* (pág.113)



THE
CHALLENGER
DISASTER



ESTUDO DE CASOS

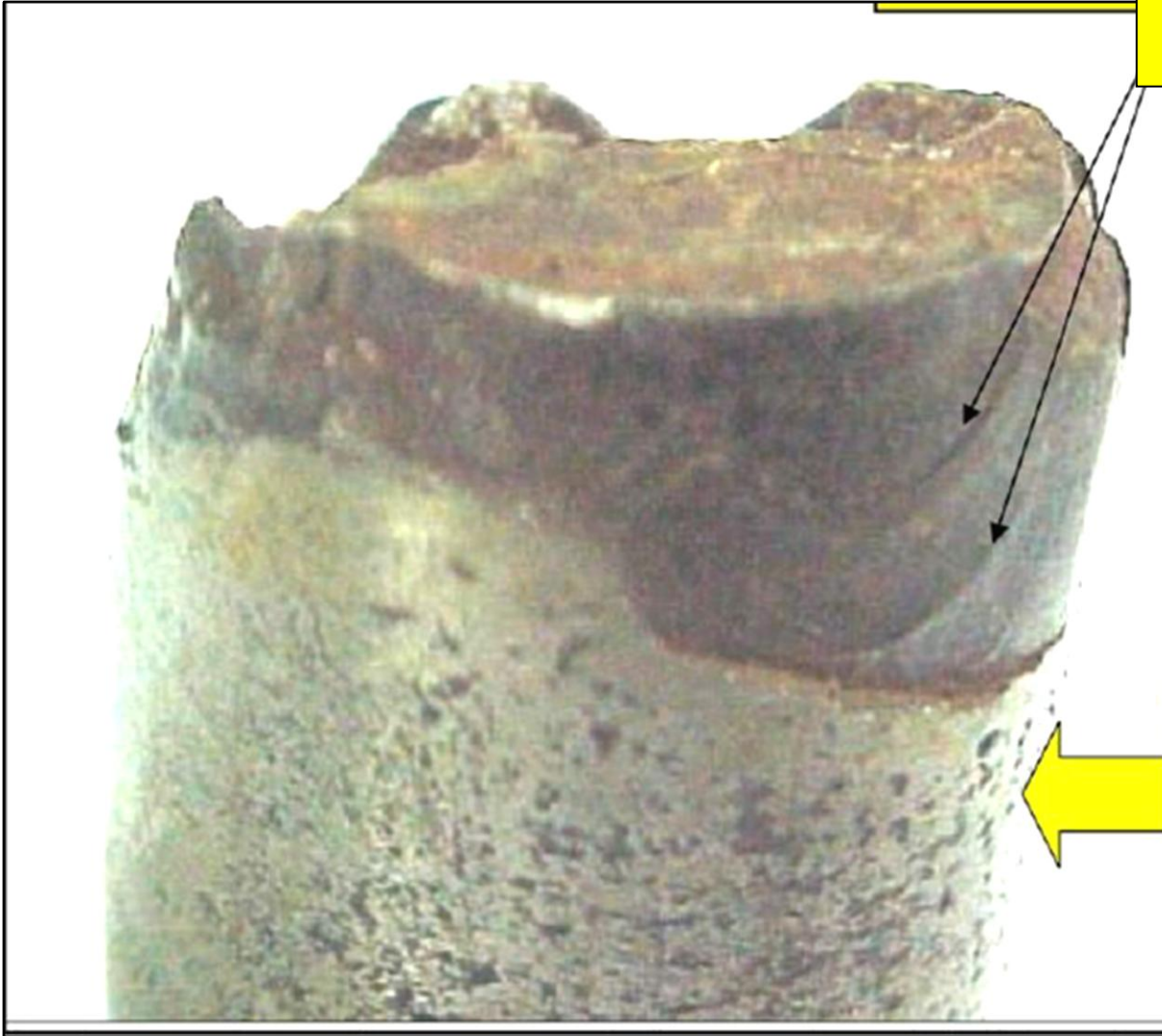
FRATURA DE EIXO DE AÇO LAMINADO SAE4140, DIÂMETRO 25,40MM - 2013



**EIXO DE CORRENTE DE ESTEIRA TRANSPORTADORA DE BAGAÇO DE
CANA DE AÇUCAR-USINA DE ALCOOL**

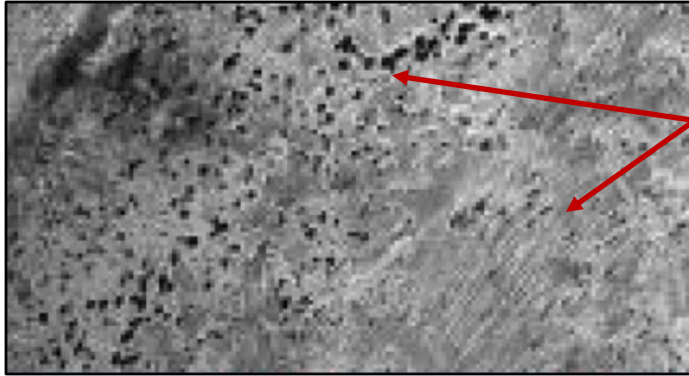
SERÁ PUBLICADO NO “CORROSION ATLAS VOL.IV-2025”

**MARCAS DE
PROPAGAÇÃO/MARCAS
DE PRAIA**



**CORROSÃO
ALVEOLAR-TÍPICA
DE DEPÓSITO DE
ELETRÓLITO.**

CORROSÃO ALVEOLAR + FADIGA: FADIGA CORROSÃO

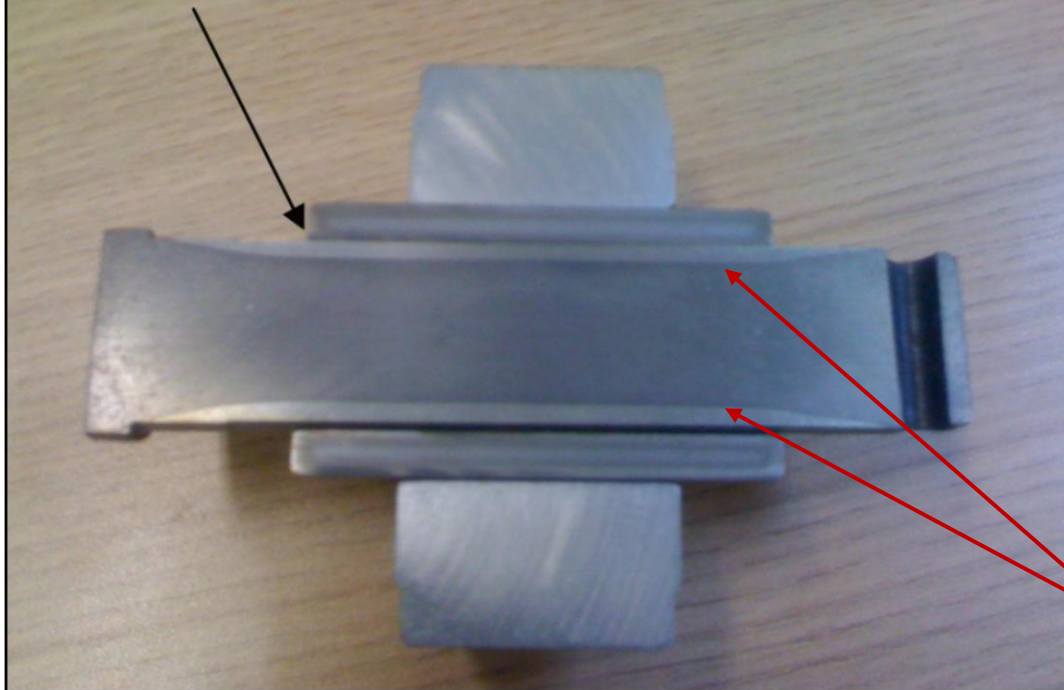


**ESTRIAS +
CORROSÃO**



**CORROSÃO ALVEOLAR +
FADIGA: FADIGA
CORROSÃO**

POSSÍVEL ALOJAMENTO DE ELETRÓLITO



**MARCAS DE TÊMPERA
SUPERFICIAL POR
INDUÇÃO**



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

www.elsevier.com/locate/jmbbm



Short Communication

Investigation of a fatigue failure in a stainless steel femoral plate

JB. Marcomini^{a,*}, C.A.R.P. Baptista^a, J.P. Pascon^a, R.L. Teixeira^b, F.P. Reis^a

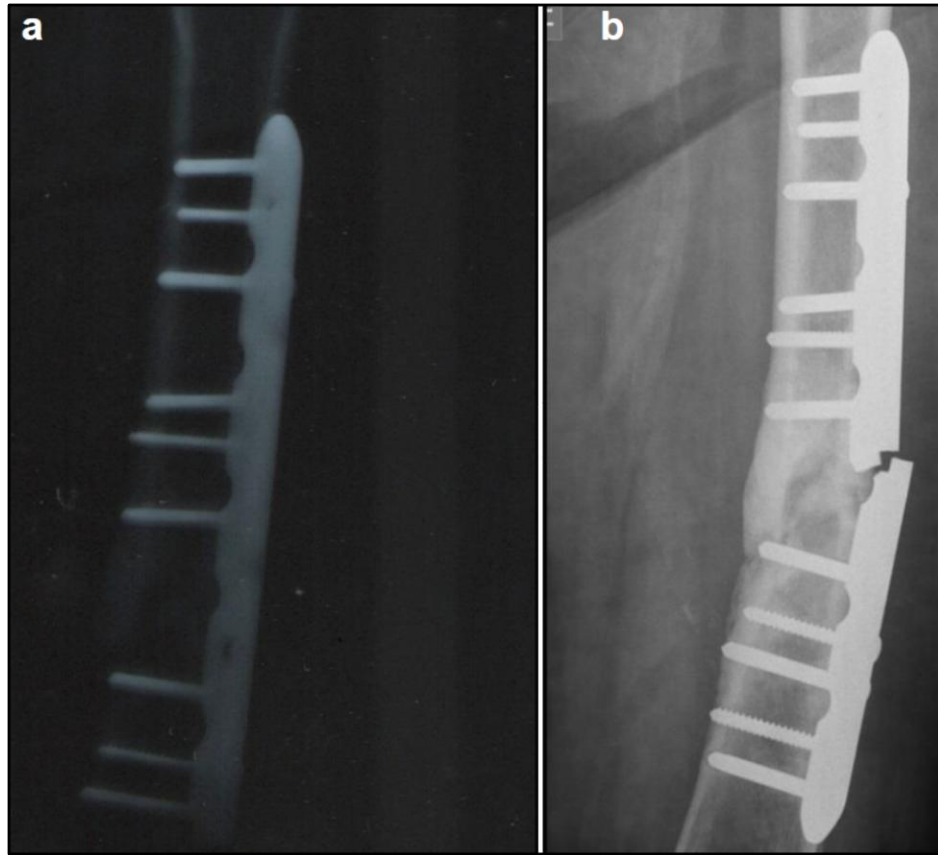
^aDepartment of Materials Engineering, EEL/USP, University of São Paulo, Lorena/SP, Brazil

^bBardella SA Mechanical Industries, Guarulhos, Brazil

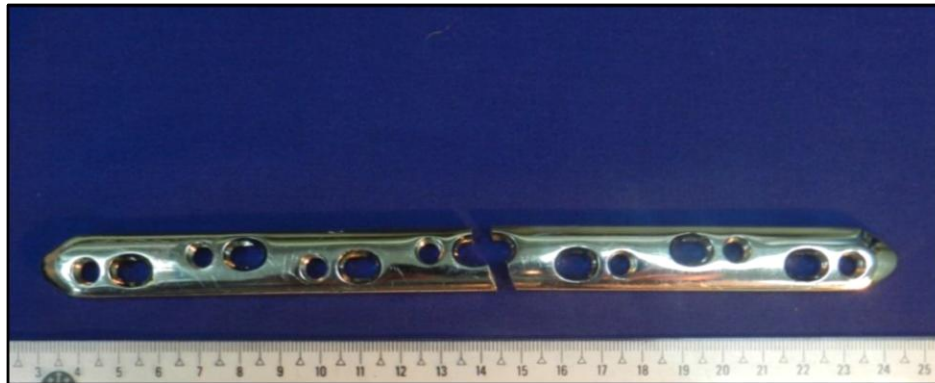


Prof.Dr. José Benedito Marcomini

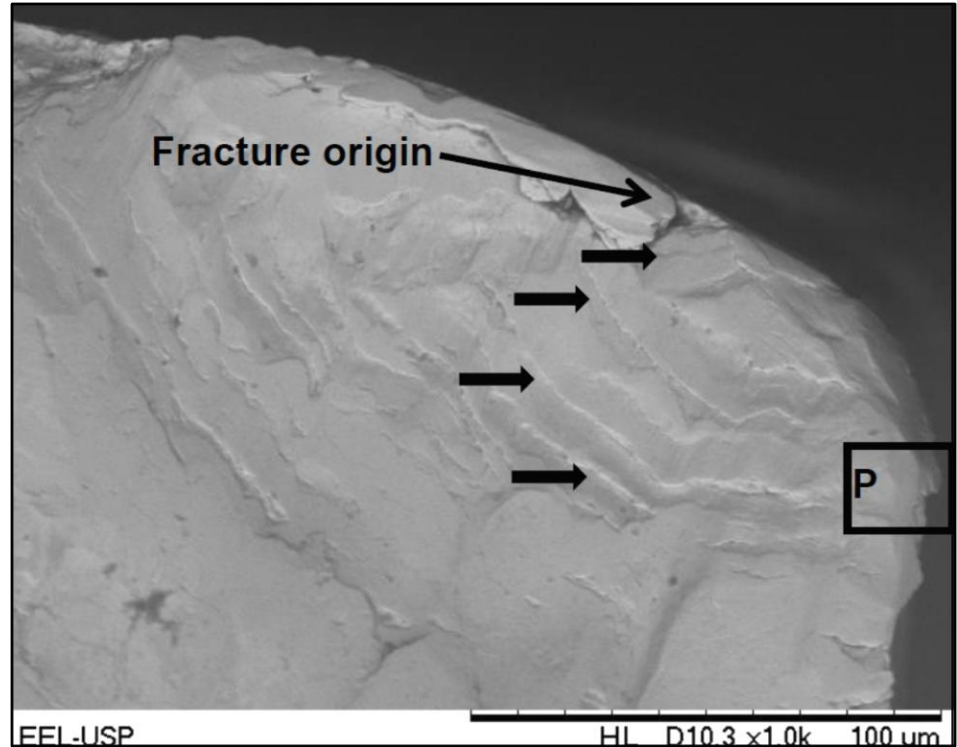
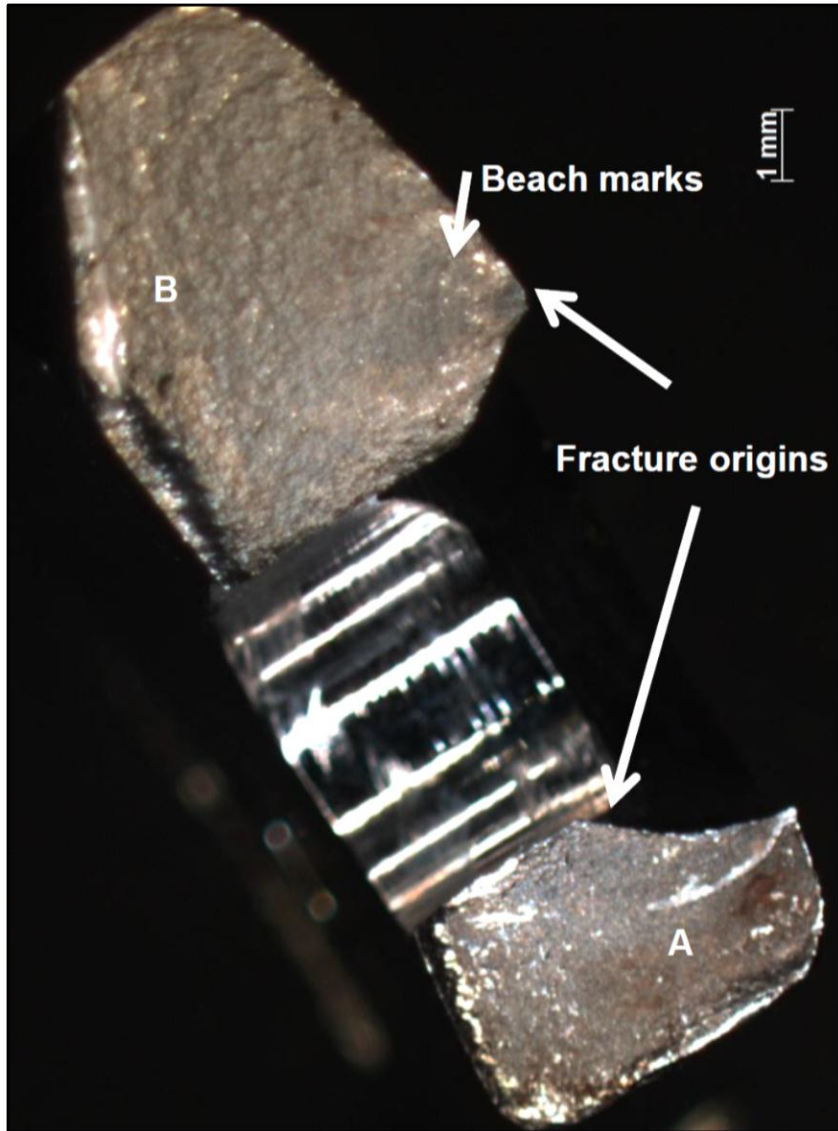
FRATURA EM PLACA FEMURAL - 2013



Placa foi implantada em uma mulher de 83 anos e fraturou após 4 meses. Nova placa implantada fraturou novamente em 6 meses. Mesmo fornecedor. Houve outro caso com outra pessoa.



ANÁLISE VISUAL E MEV DA SUPERFÍCIE DE FRATURA



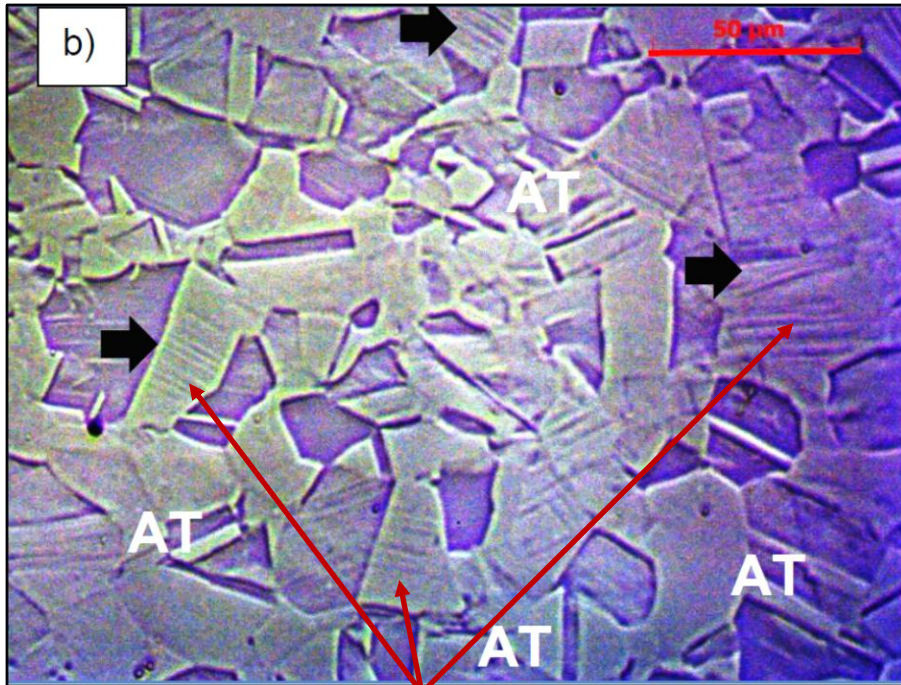
- Chemical composition of DCP femoral plate

C(%)	Cr(%)	Ni(%)	P(%)
0.03	17.65	15.00	0.046

ISO 5832-9

maximum P 0.025%

MICROGRAFIAS



BANDAS DE CISALHAMENTO



GRÃOS ALINHADOS

DEFORMAÇÃO A FRIO

**DUREZA NORMAL PARA APLICAÇÃO: 230HB
A PEÇA ESTAVA COM 288HB.**

IMAGEM DE MEV DA SUPERFÍCIE DE FRATURA APRESENTANDO BANDAS DE CISALHAMENTO (*SHEAR BANDS-SB*)

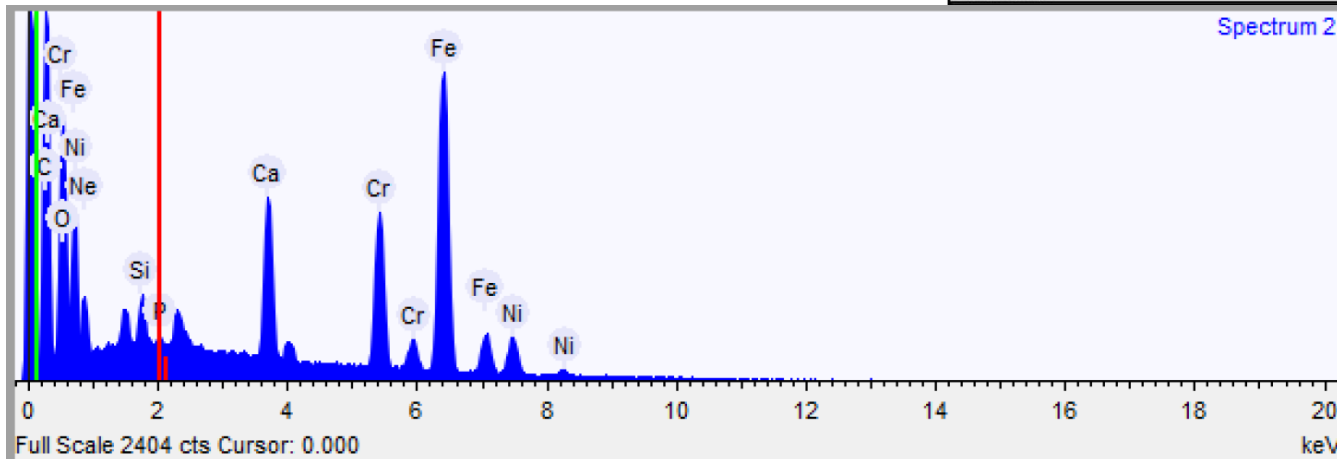
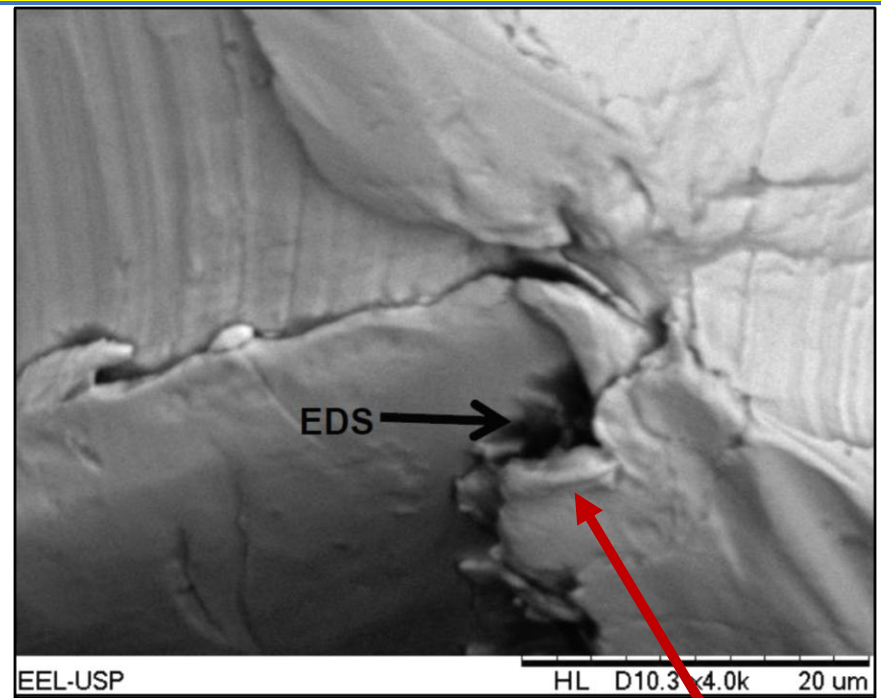
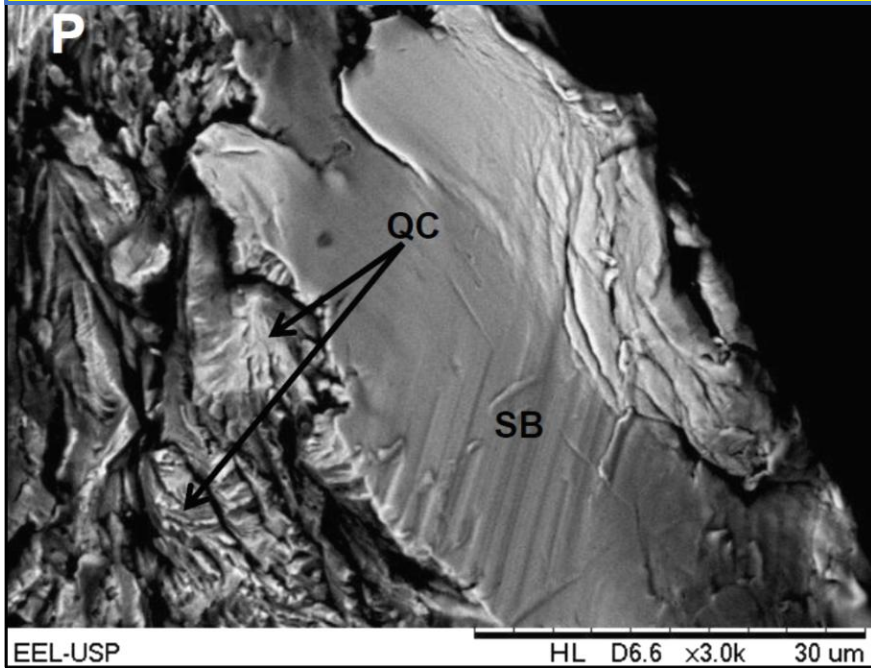
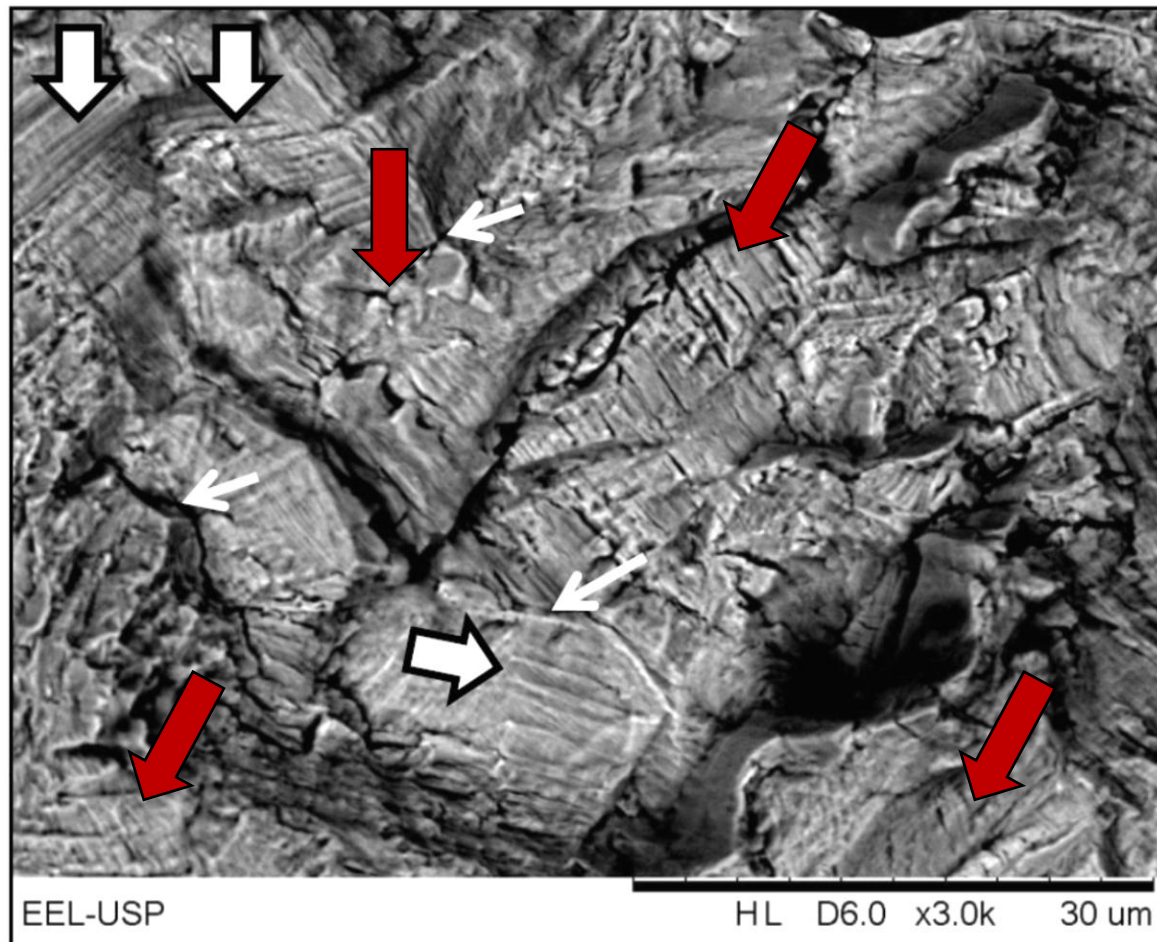


Figure 2.5- EDS analysis of the crack on the fracture surface (Fig.2.4). Phosphorus was detected inside the crack.

**LOCAL ONDE
FOI REALIZADA
A ANÁLISE DE
EDS, NA QUAL
FOI
DETECTADA A
PRESENÇA DE
FÓSFORO (P)**

IMAGEM DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) DA SUPERFÍCIE DE FRATURA



Setas espessas brancas: bandas de cisalhamento (deformação a frio), setas brancas finas: trincas secundárias (intergranular-P em CG) setas espessas vermelhas: Estrias (Fadiga)

Conclusão

A placa femoral foi submetida à esforços cíclicos do andar. A prótese deveria suportar estes esforços por, pelo menos, 10 a 15 anos. A falha prematura ocorreu devido à combinação dos fenômenos de fragilização pelo fósforo e encruamento do trabalho a frio. O micromecanismo de fratura intergranular demonstra o efeito da segregação de P. O efeito do trabalho a frio (encruamento) levou à fratura de natureza frágil (pouca deformação plástica), evidenciado ainda pelas inúmeras bandas de cisalhamento e os grãos alinhados, apresentados na micrografia.

- **HISTÓRICO;**
- **CONHECER A APLICAÇÃO, TENSÕES APLICADAS NA PEÇA;**
- **ANÁLISE VISUAL DA SUPERFÍCIE DE FRATURA-PLANEJAR OS ENSAIOS;**
- **ANÁLISE QUÍMICA;**
- **ANÁLISE METALOGRÁFICA:ESTRUTURA, TG,INCLUSÕES;**
- **ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE FRATURA:MEV, FEG OU FIB/FEG;**
- **ENSAIOS MECÂNICOS-QUANDO POSSÍVEL;**
- **ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS –QUANDO POSSÍVEL;**
- **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL, SE POSSÍVEL;**
- **DEPENDENDO DO RESULTADO-ANALISAR LOTE/CORRIDA;**
- **AÇÃO DE CONTENÇÃO;**
- **AÇÃO CORRETIVA;**
- **AÇÃO PREVENTIVA.**

FIM