



SMM 0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

PROPRIEDADES MECÂNICAS

ENSAIOS DE DUREZA E IMPACTO

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.**

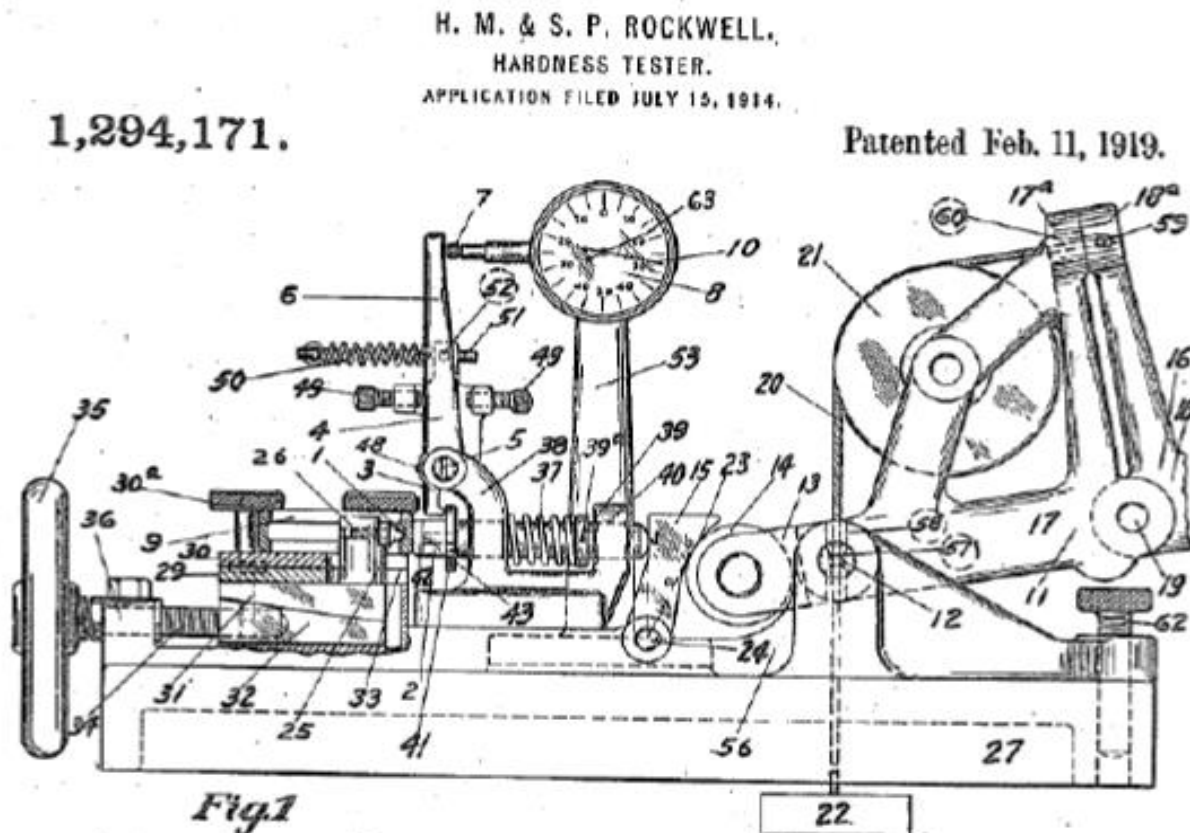
Uma possível definição:

“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.”

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.



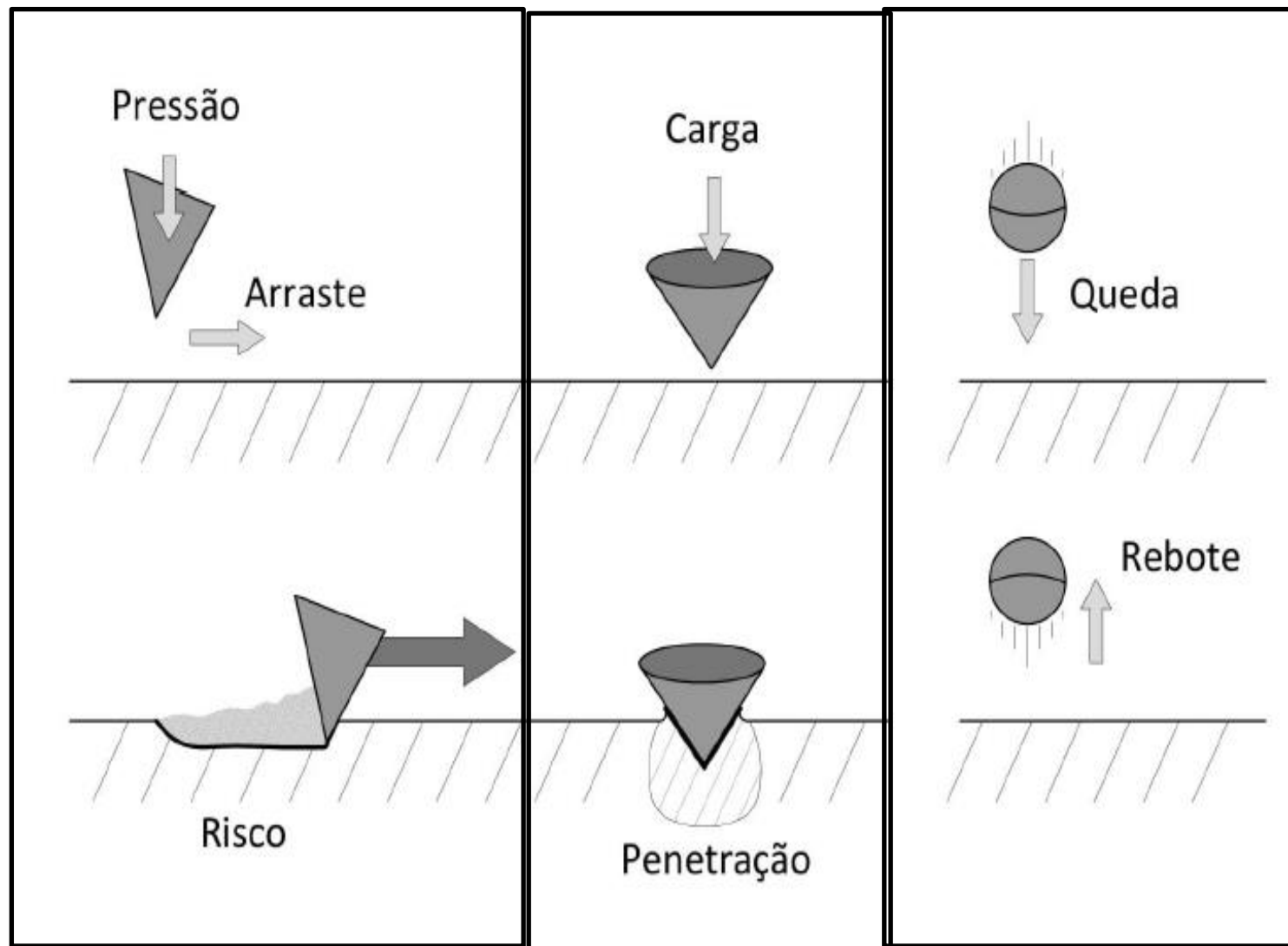
ENSAIO DE DUREZA

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 através do uso de tabelas de correlação

Deformação Elástica e
Deformação Plástica

Seleção do Tipo de Ensaio de Dureza

Material	Tipo de Ensaio			
	Rockwell	Vickers	Knoop	Brinell
Aços macios, ligas de cobre, ligas de alumínio, ferro fundido maleável	●	●	●	●
Aços, ferros fundidos duros, ferro perlítico maleável, titânio, aço c/ endurecimento profundo	●	●	●	●
Metal duro, aços de pouca espessura, aço com endurecimento superficial	●	●	●	
Aços de pouca espessura, aço c/ endurecimento de média profundidade, ferro perlítico maleável	●	●	●	
Ferro fundido, alumínio, ligas de magnésio, metais macios	●	●	●	●
Ligas recozidas de cobre, chapas finas de metal macio	●	●	●	
Bronze fosforoso, berílio, cobre, alumínio, zinco, chumbo	●	●	●	●
Metais macios e outros materiais finos e macios	●	●	●	
Estanho	●	●	●	
Alumínio	●	●	●	●
Zinco	●	●	●	●
Pinturas e revestimentos orgânicos			●	
Borracha dura	●			
Plásticos	●	●	●	

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



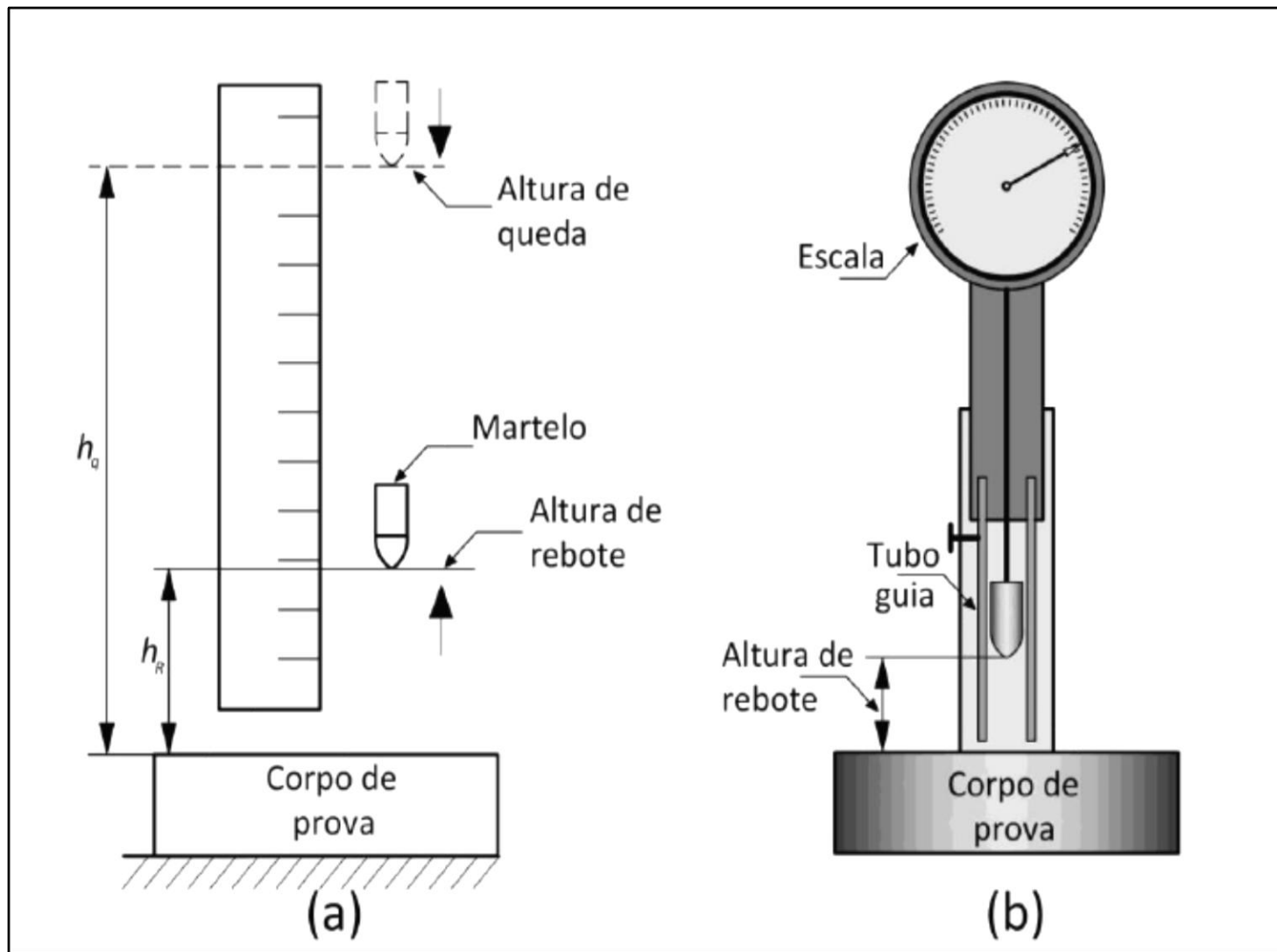
Portáteis



Dureza Shore (HS) – choque ou rebote

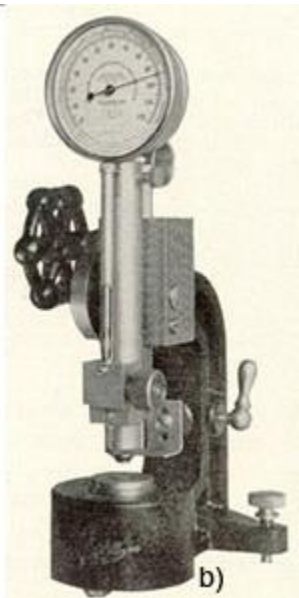
Características e vantagens

- Normalmente **equipamento é portátil** e de fácil utilização;
- Possibilidade de medir durezas de peças de grandes dimensões que não cabem em máquinas de penetração **(em campo)**;
- **Impressão muito pequena** sendo utilizada em **peças acabadas** (controle qualidade);
- Utilizado em **polímeros, borracha e metais**.



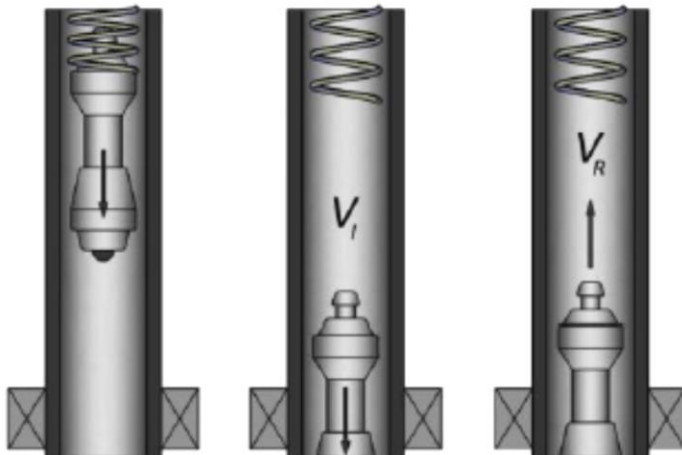
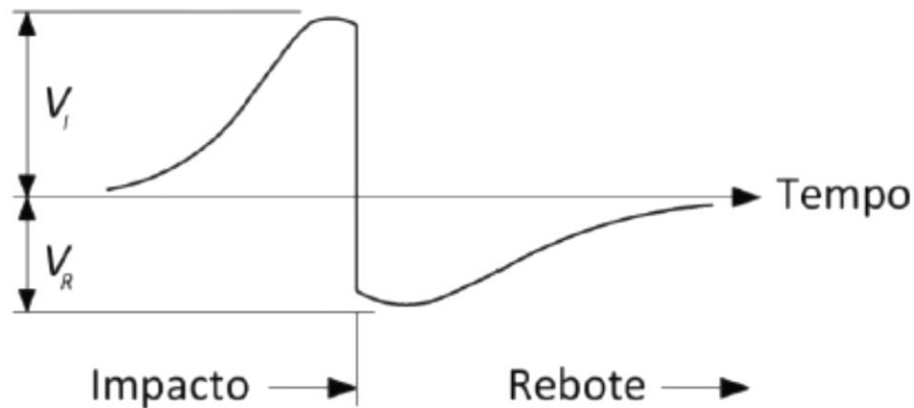
Dureza Shore (rebote). Esclerosc6pio, modelo cl6ssico criado em 1905

Dureza Shore (HS) – choque ou rebote



Escleroscópico Shore

Em 1975, Leeb e Brandestini desenvolveram a medida por meio de aparelhos portáteis. O ensaio é regido por normas como ASTM A956 Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products e ISO/DIS 16859-1 Leeb hardness test Part 1: Test method.



$$HL = \frac{V_R}{V_I} \cdot 1000$$

EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS MODERNOS

DynaPOCKET



DynaMIC



MIC 20



APLICAÇÃO



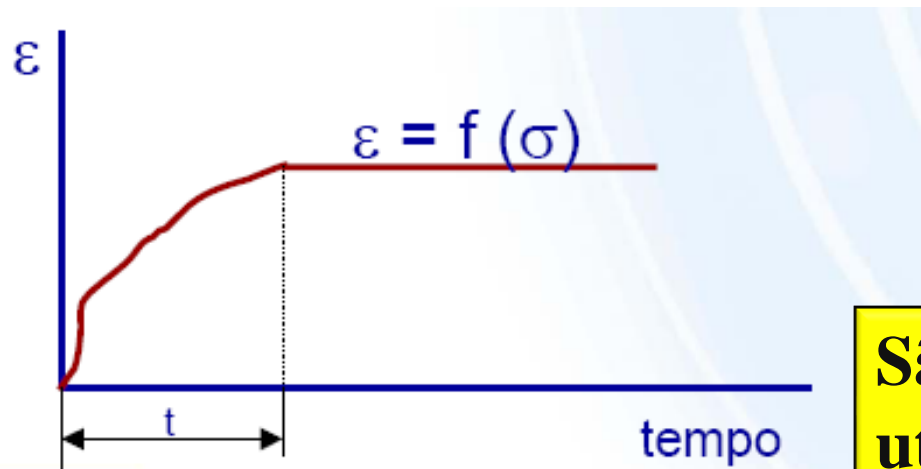
ROGÉRIO CENI



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

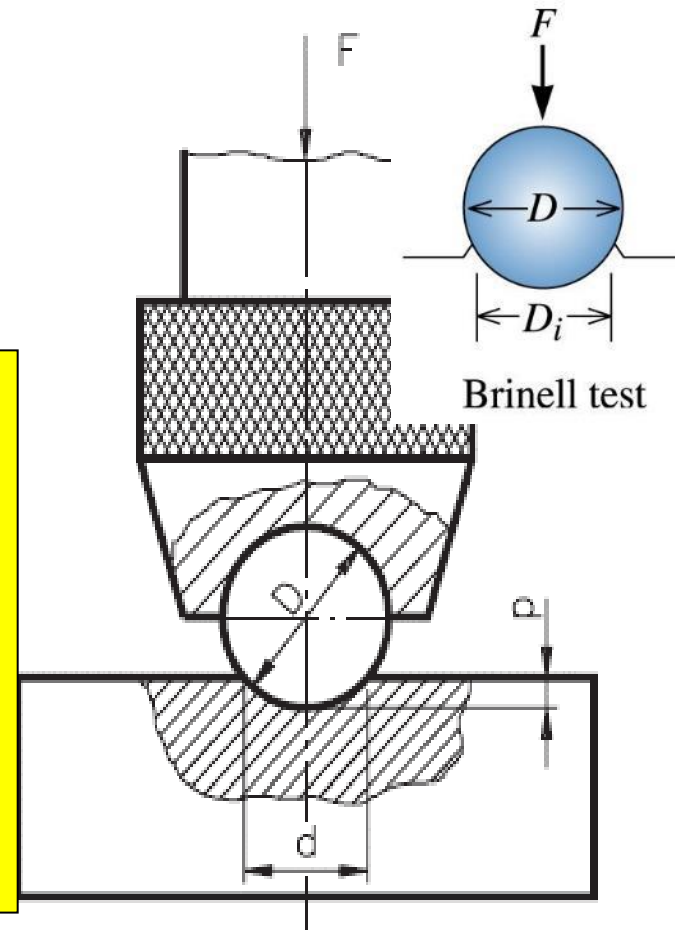
Dureza Brinell (HB) – Ano 1900

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)

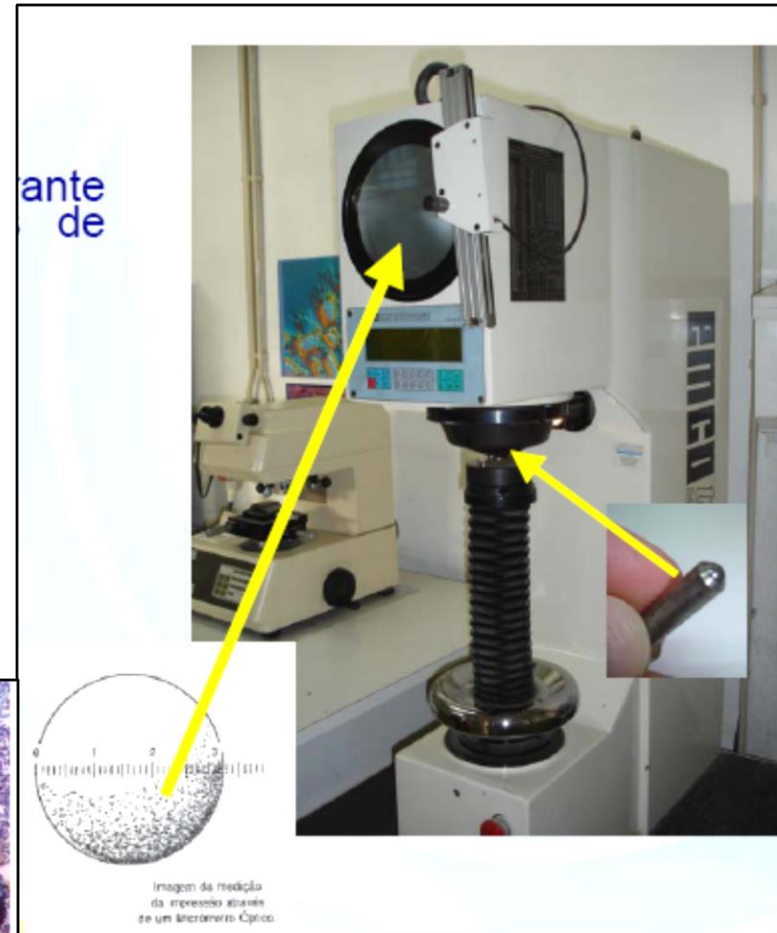
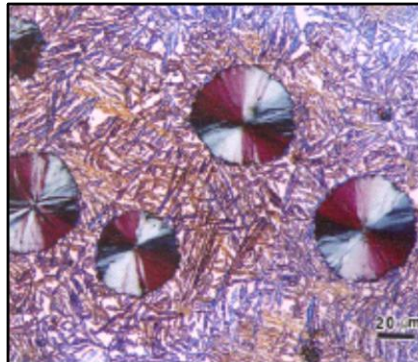
Para **diferenciar** entre os tipos de **esfera** usadas, a dureza Brinell passou a ser especificada como **HBS** para esfera de **aço** (a letra “S” vem de **steel**, aço em inglês) e **HBW** quando se usa esfera de **carbeto de tungstênio** (cujo símbolo químico, **W**, vem de **wolfrâmio**, que por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

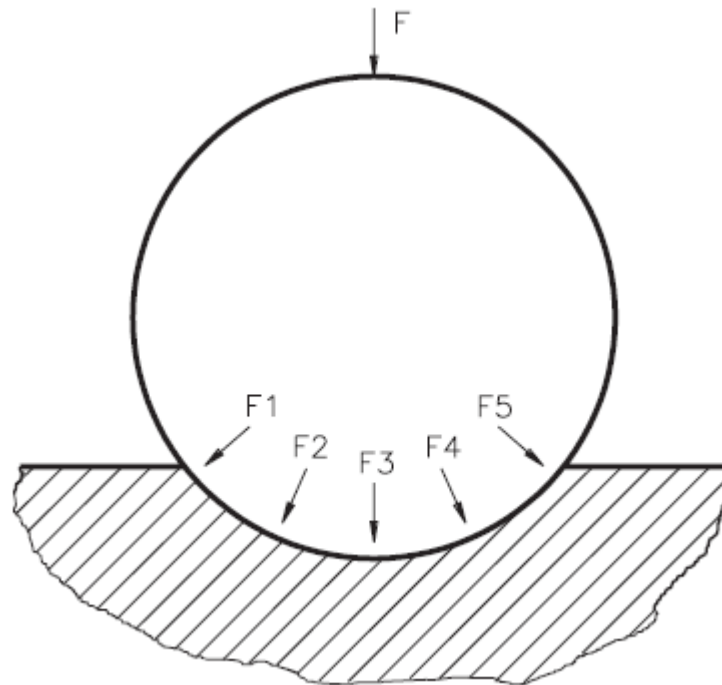


Tabela que fornece os valores de dureza Brinell normal, em função de um diâmetro de impressão d.

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:

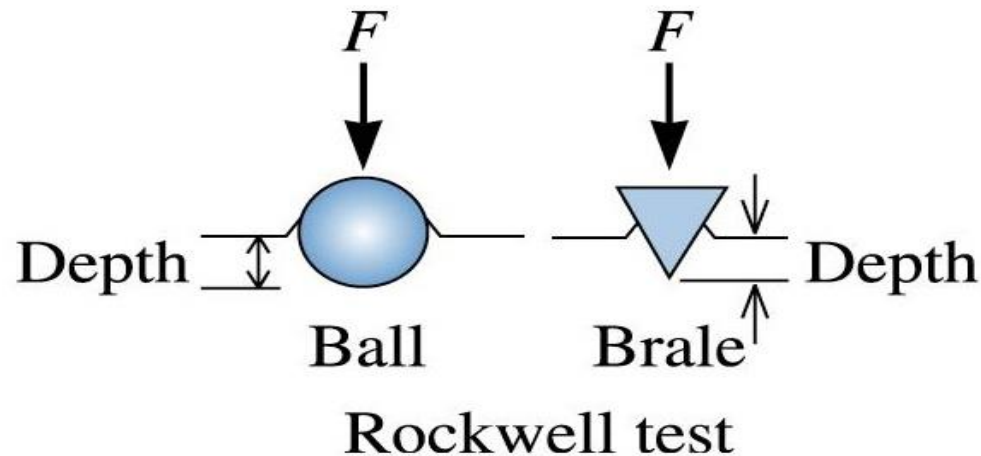
- **Não é aplicável** em peças **muito finas** e em materiais **muito duros**;
- A espessura da peça deve ser tal que não ocorra qualquer deformação no lado oposto ao da impressão
- Método **relativamente lento** para a produção industrial;
- A **impressão** obtida é muito **grande** para peças **acabadas**.

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;

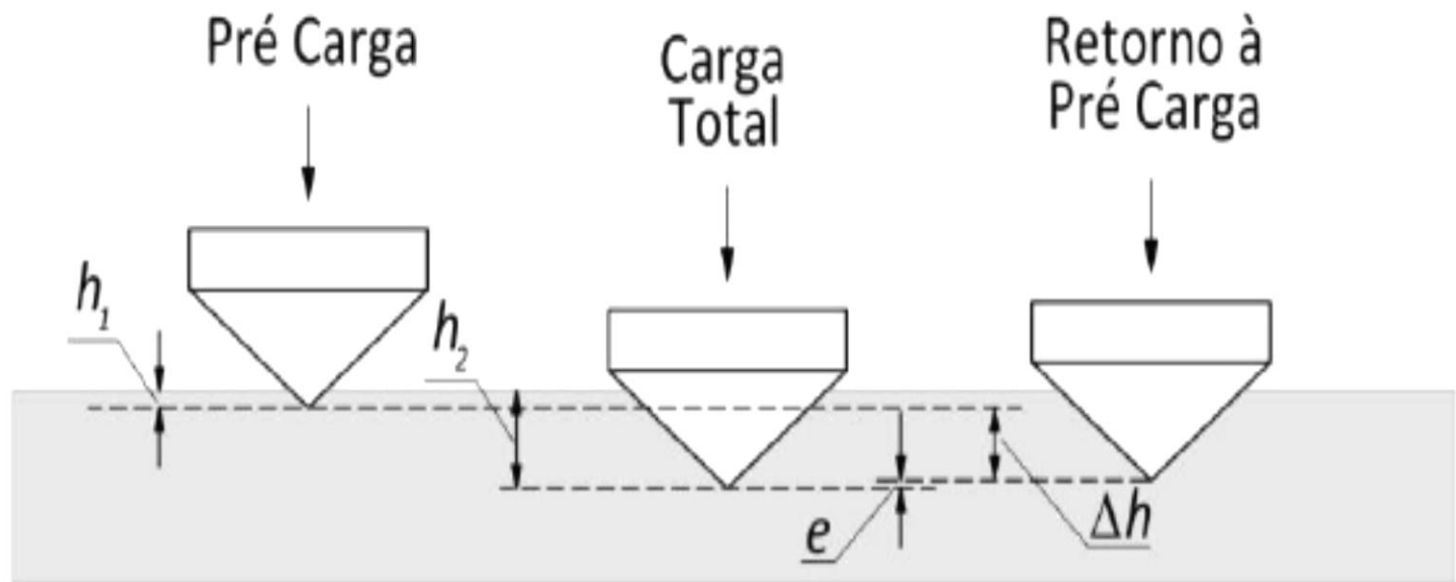
• 1/2 in (12,7 mm) para as escalas R, S, V e Y.

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

$$HR = M - \frac{\Delta h}{0,002}$$

$$\Delta h = (h_2 - h_1 - e).$$



e : recuperação elástica, $M=130$ para penetrador esférico e $M=100$ para penetrador Brale

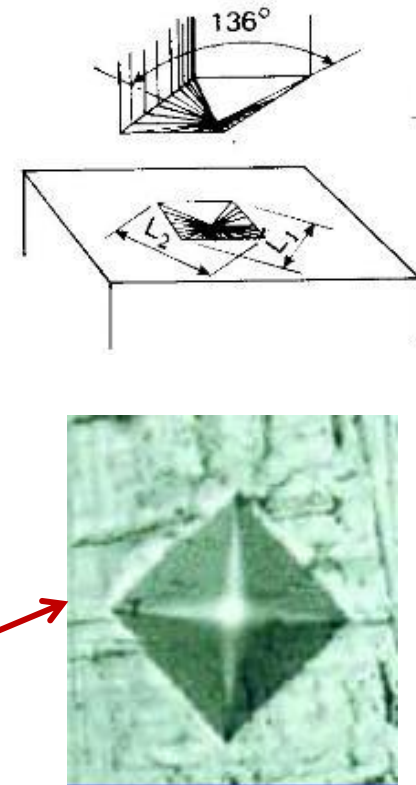
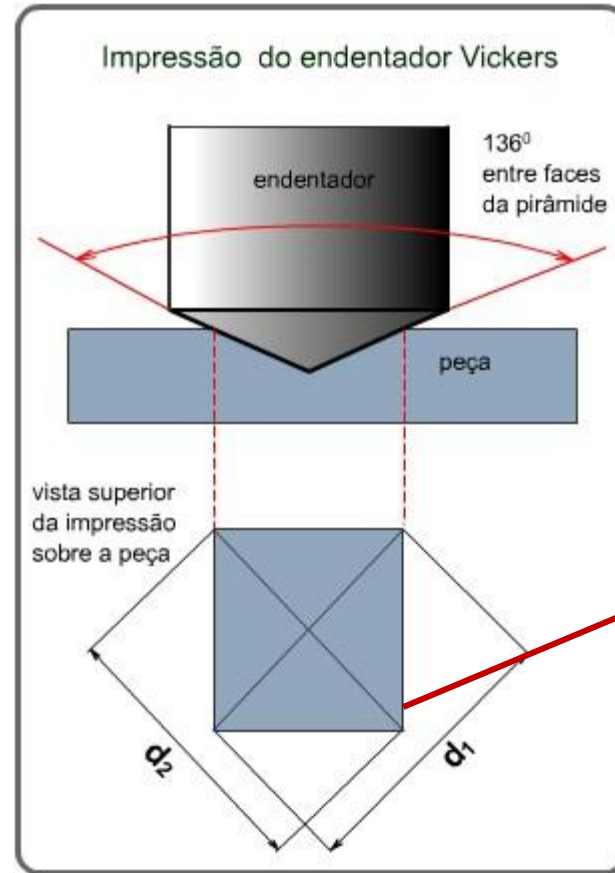
•Esfera de aço: máquinas mais antigas. As **esferas de CW** são mais aceitas (**permitidas atualmente, pelas normas**) : **menor deformação- menor erro da medida;**

•**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

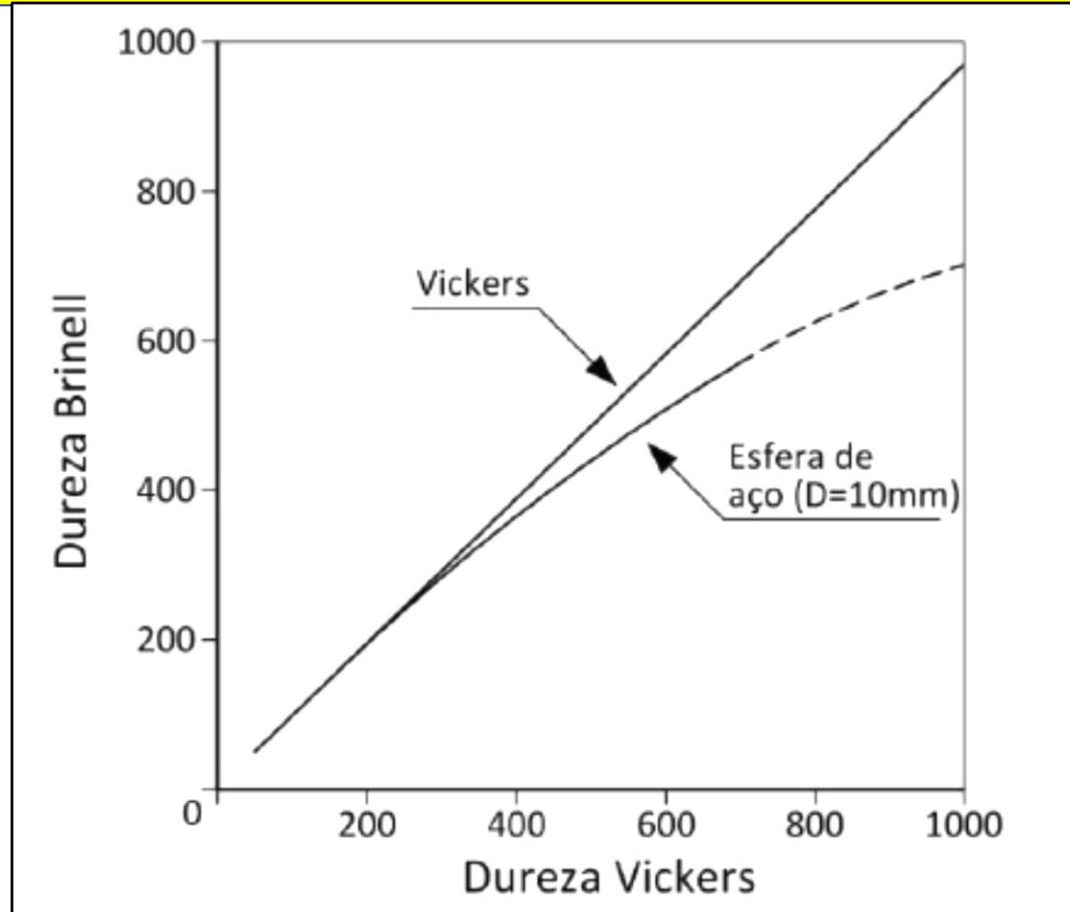
Vantagens:

- 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**.

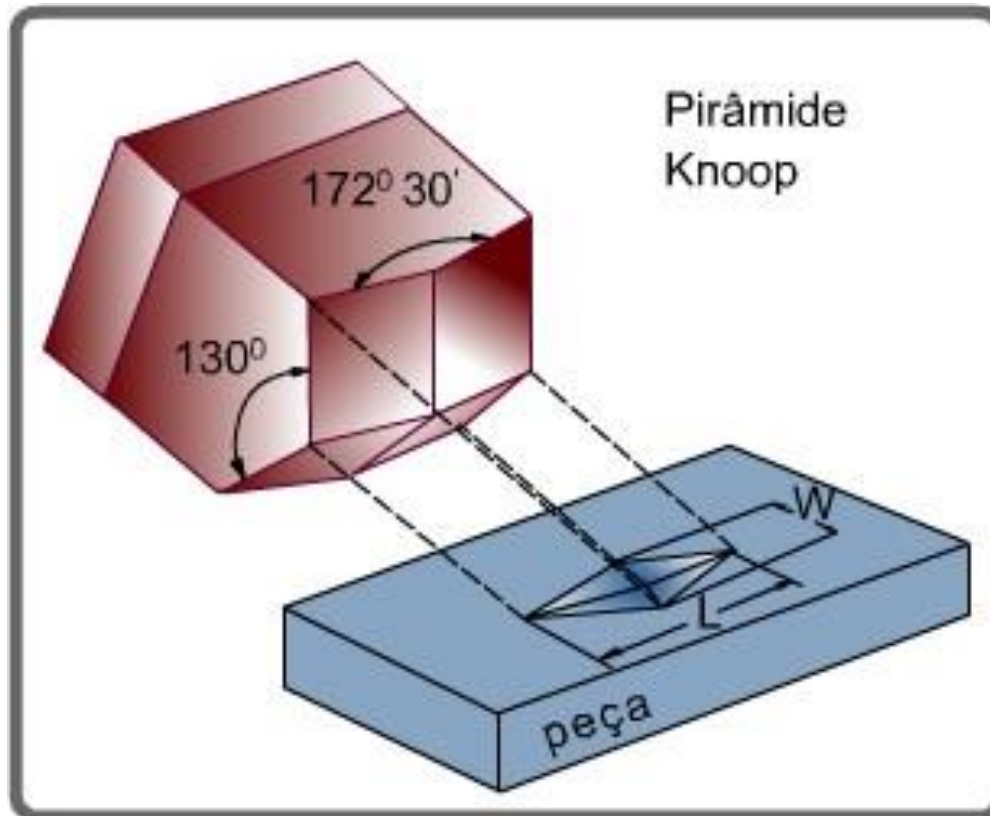
Valores de dureza Brinell e Vickers, mostrando que estes são praticamente **idênticos até próximo de 300 HB**. A partir daí os resultados passam a **divergir devido à deformação** sofrida pelo penetrador Brinell (**esfera de aço**) ao ensaiar materiais de alta dureza



[Suryanarayana, 2011].

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



A 370 – 03a

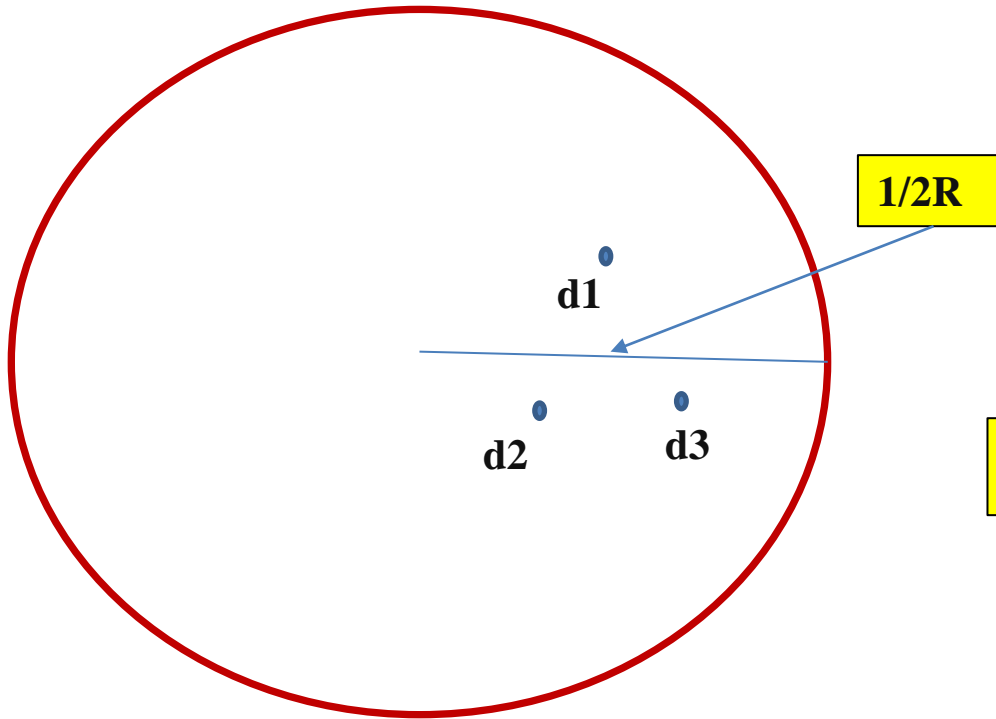
TABLE 2 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels^A (Rockwell C to Other Hardness Numbers)

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)

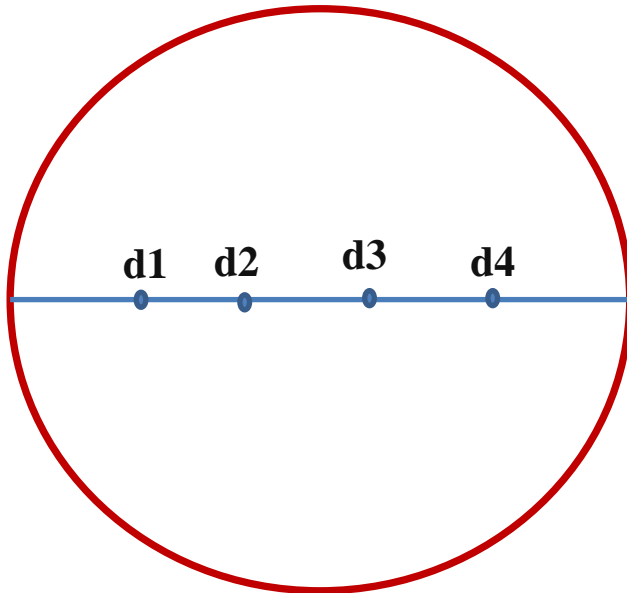
PROCEDIMENTO PARA A MEDIDA DE DUREZA

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**.



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

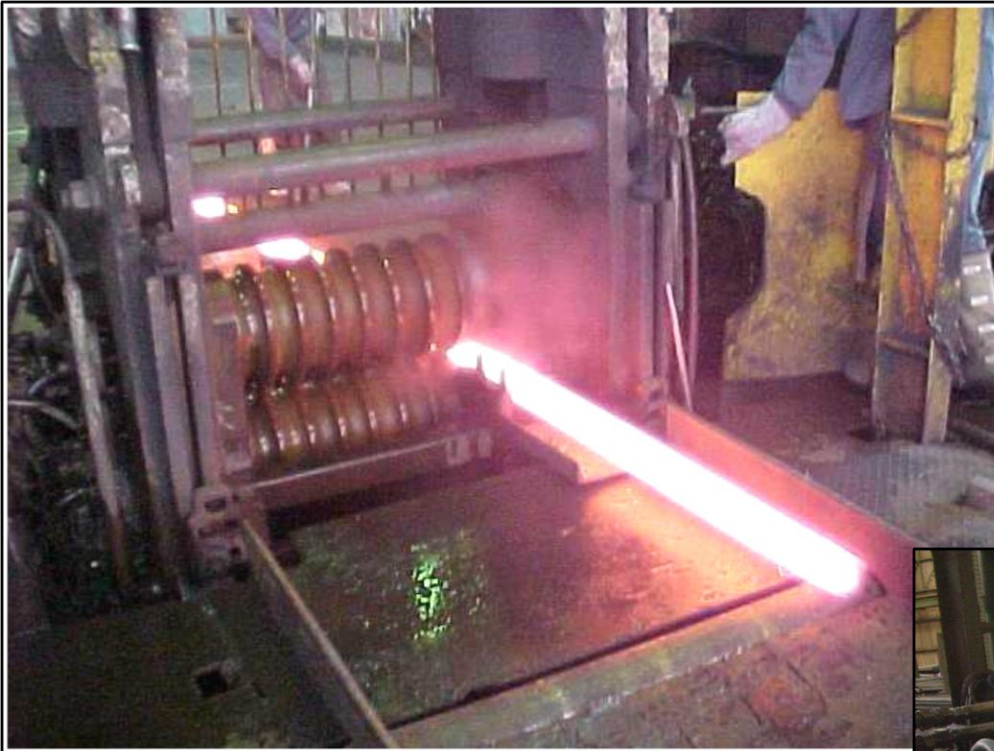


Mapeamento

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

Laminação a quente

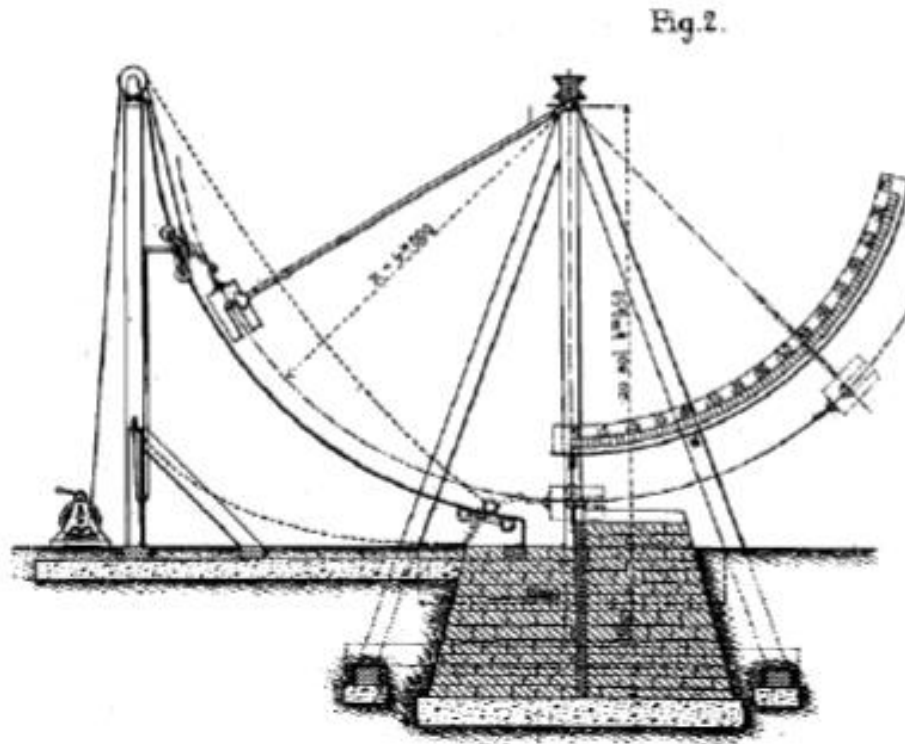


Trefilação



ENSAIO DE IMPACTO

- O cientista francês **Georges Augustin Albert Charpy** (1865-1945);
- **1901 - *Proceedings of the Congress of the International Association for Testing Materials (IATM)***;
- O inglês **E. G. Izod** (1876-1946)- alternativa, em **1903**.



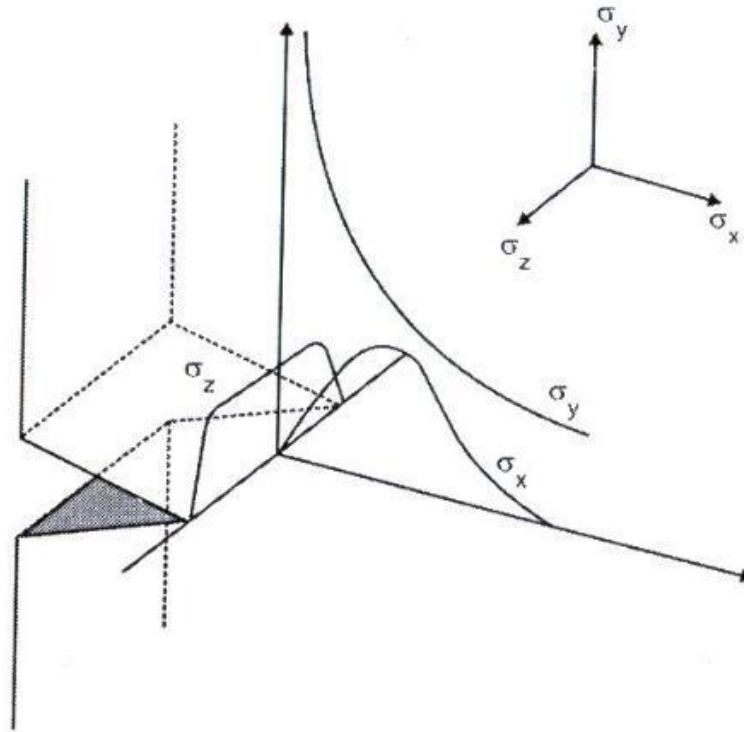
Desenho da máquina para ensaio de impacto proposta por Charpy.

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

Velocidade de Impacto

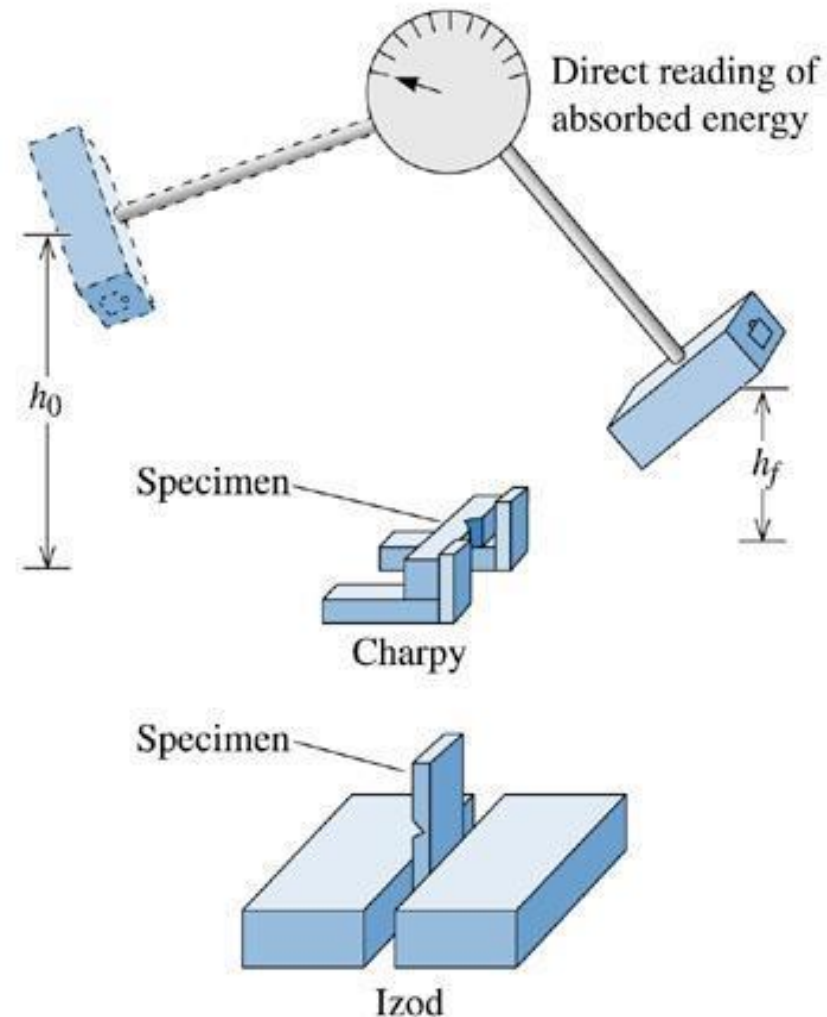
A **velocidade de impacto** têm um efeito significativo no comportamento do material **metálico ou polimérico**. Em baixa velocidade de impacto o material pode apresentar um comportamento de **fratura dúctil** e em **altas velocidades, comportamento frágil**. Existe uma **velocidade de impacto crítica**, acima da qual o material fratura fragilmente. Para a maioria dos **metais** a velocidade crítica de impacto está entre **30 e 150 m/s**. a velocidade do ensaio de impacto convencional é de 33 a 330m/s. A velocidade de impacto de um **projétil de arma de fogo** pode atingir **3.300m/s**. A velocidade do **som no ar** é aproximadamente **340m/s**.

Máquina de Ensaio Charpy



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 medida através da diferença entre h e h' e corresponde à energia 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.

ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

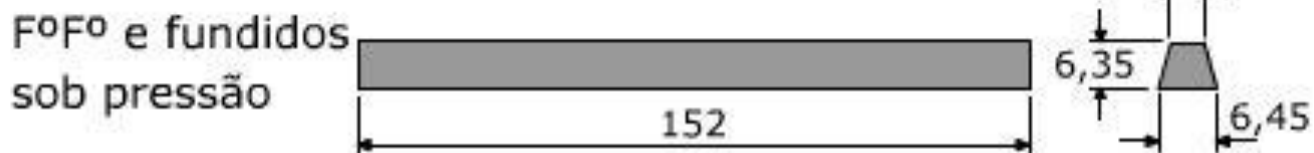
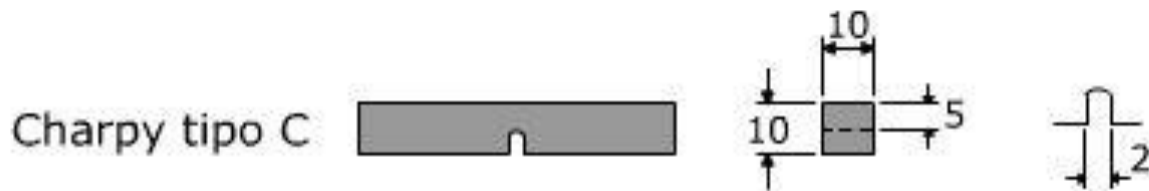
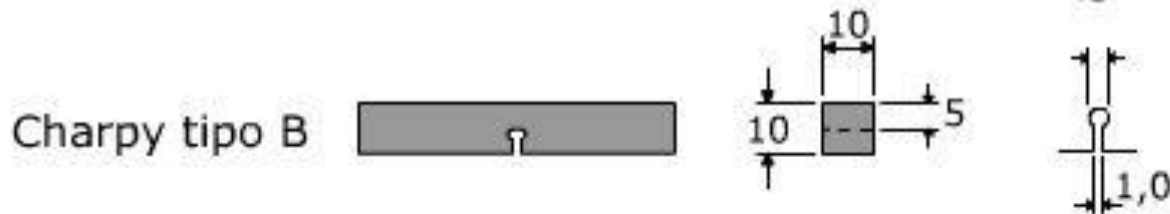
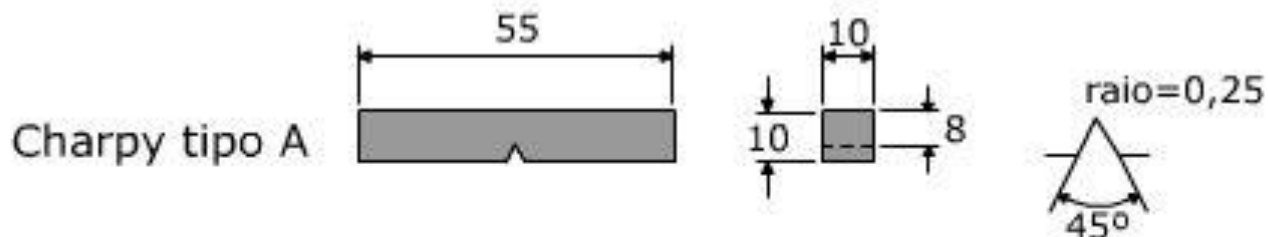
Pêndulo e Configuração do
Teste Charpy

ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Posição de impacto sobre o corpo de prova
Charpy

Principais Configuração CPs Charpy

Todas as dimensões em mm



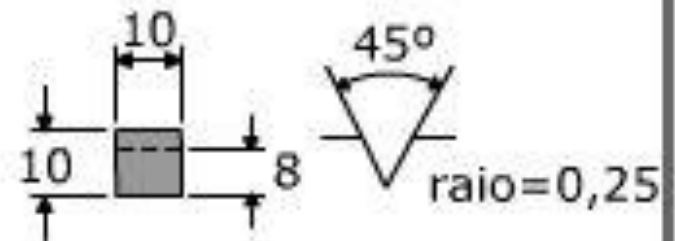
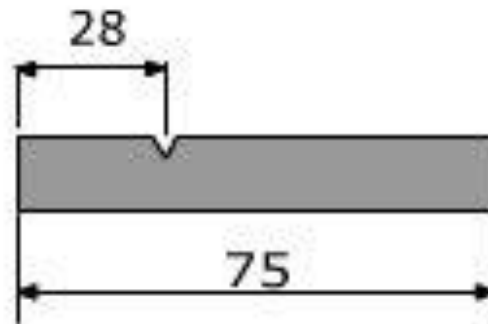
Ensaio Impacto IZOD

Posição de impacto sobre o corpo de prova
Izod

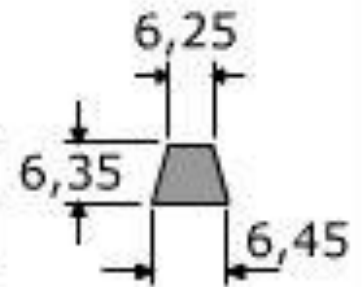
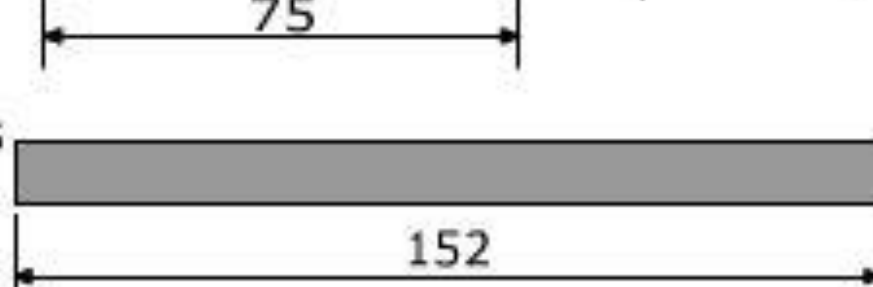
Principais Configuração CPs IZOD

Todas as dimensões em mm

Izod (tipo D)



F^oF^o e fundidos
sob pressão

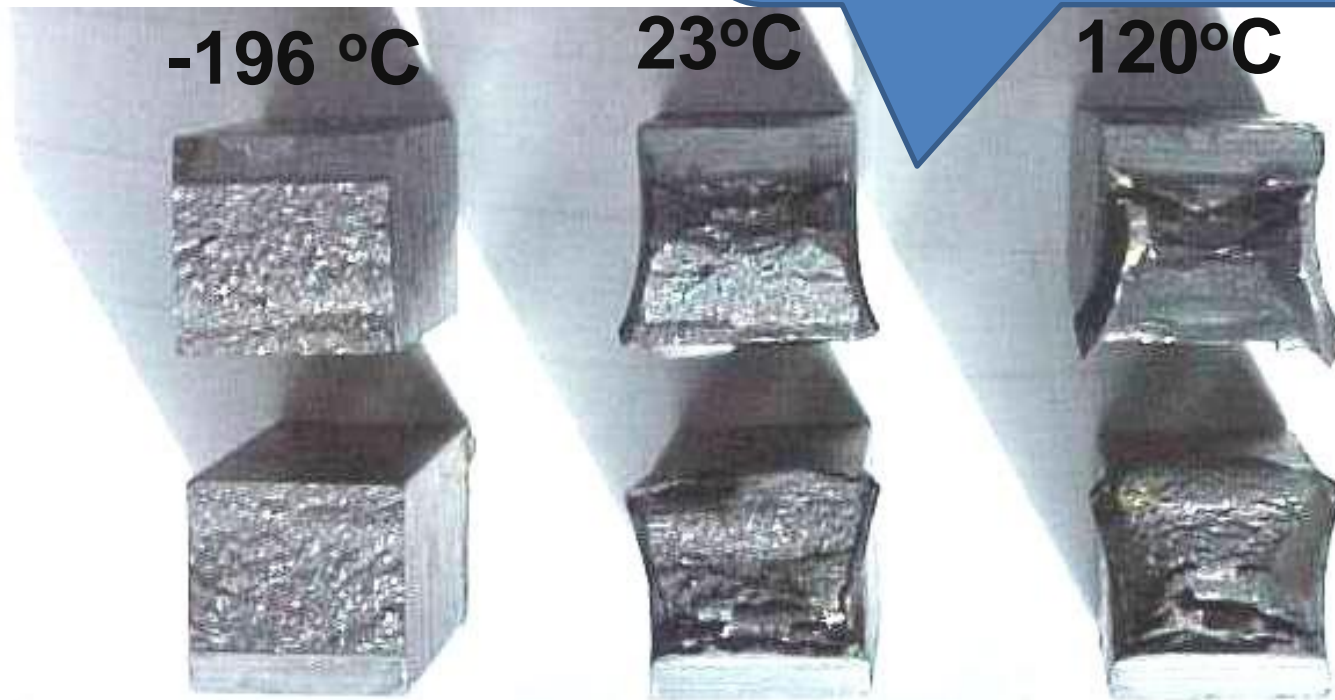


RESULTADOS DO ENSAIO DE IMPACTO

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

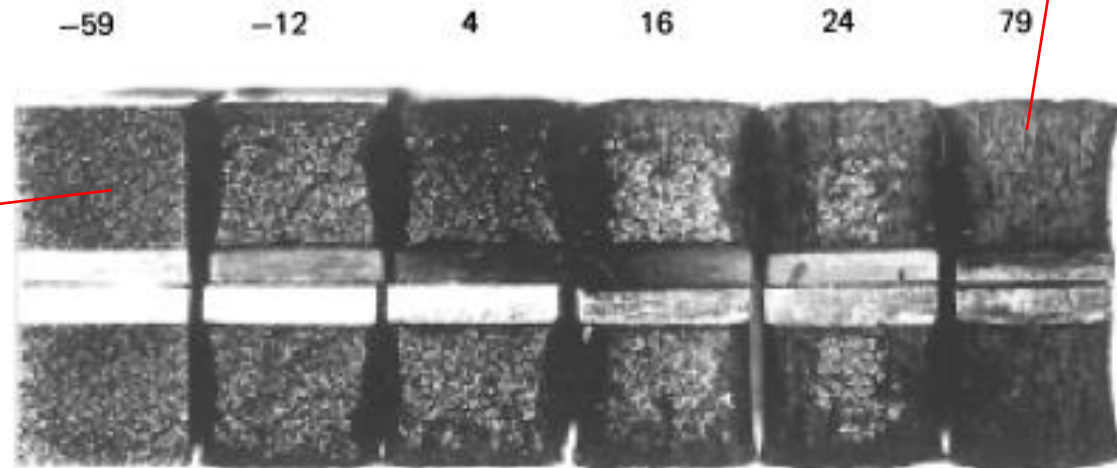
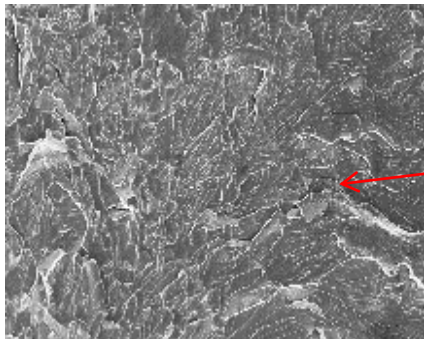
Efeito Temperatura na Res. Impacto

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



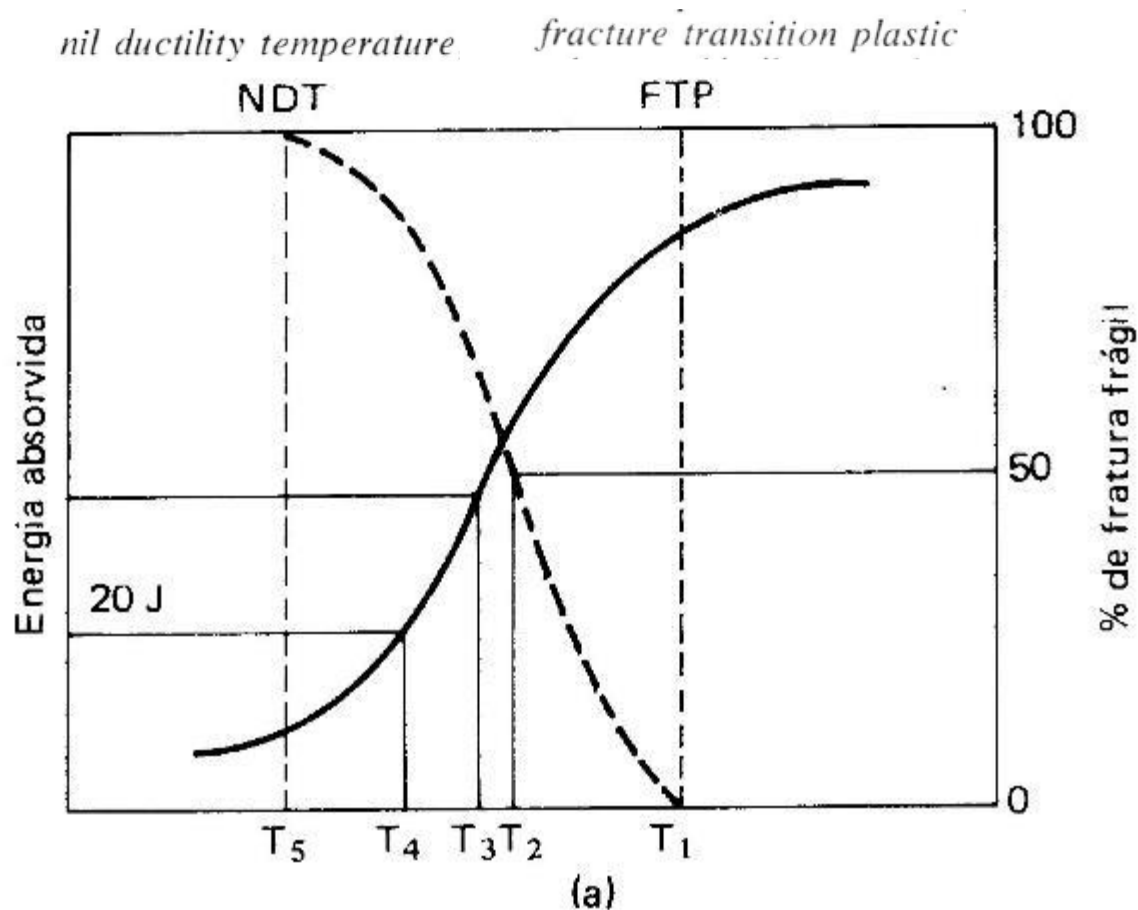
Transição Dúctil - Frágil

- ✓ **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.**

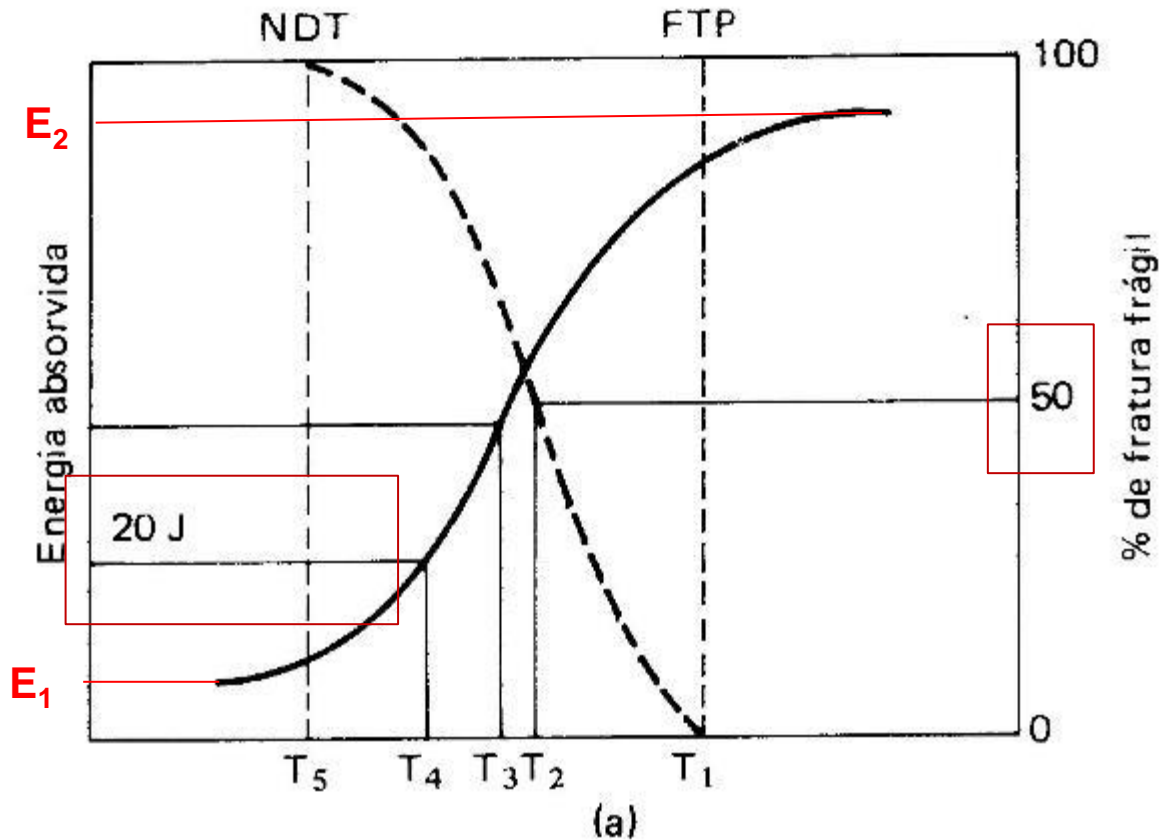


O ensaio é realizado em, **pelo menos 5 temperaturas**, iniciando de uma **temperatura negativa** para se detectar a temperatura de transição quando a fratura passa de dútil para frágil. Podem ser adotados **alguns critérios** para a determinação da temperatura de transição.

- 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)

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

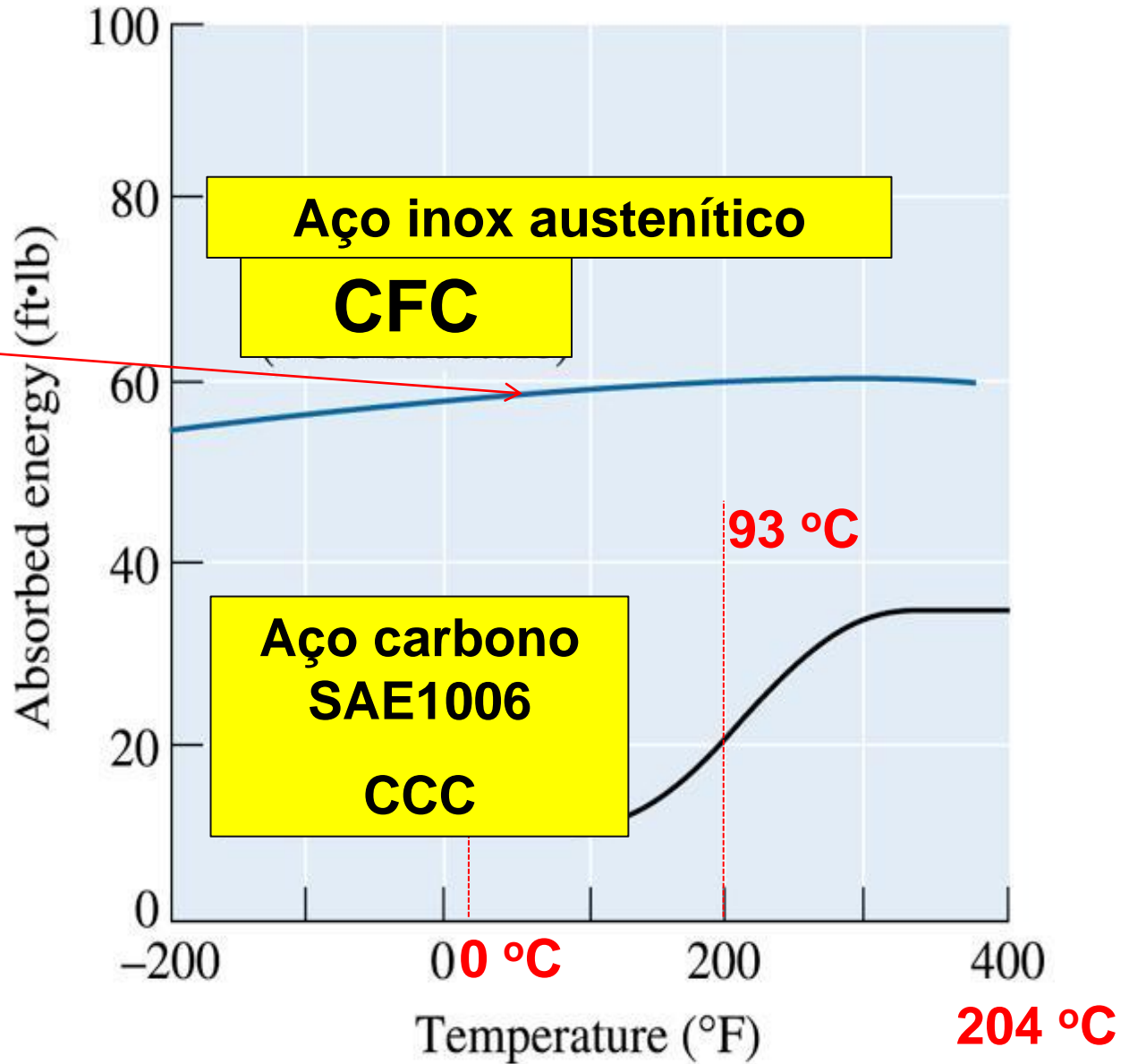
Será que todos os metais apresentam temperatura de transição dútil – frágil?

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

Transição Dúctil - Frágil

Não apresenta transição dúctil/frágil

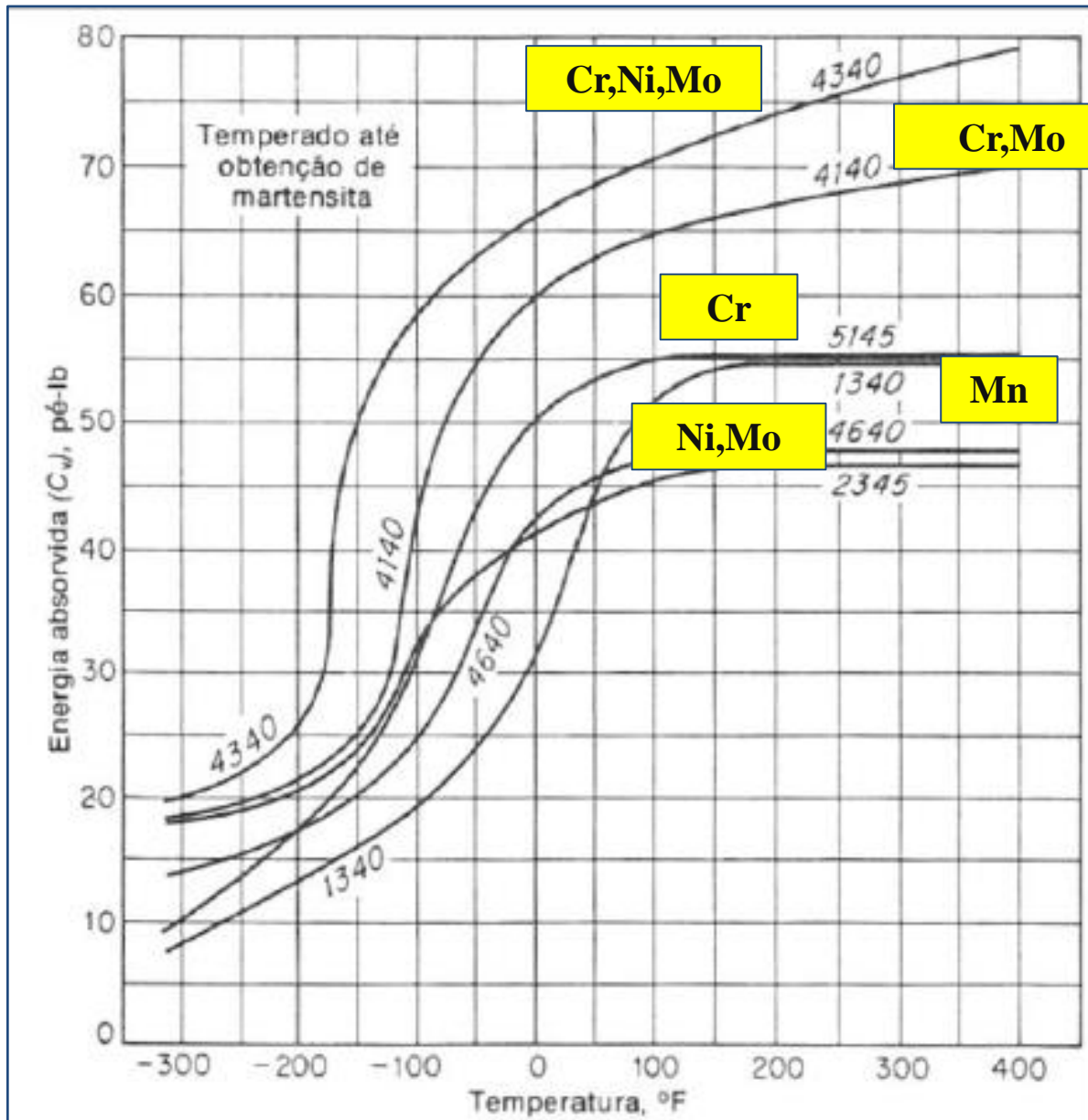
Recipiente inox nitrogênio líquido (-197 °C) possui uma Estrutura CFC



Transição Dúctil - Frágil

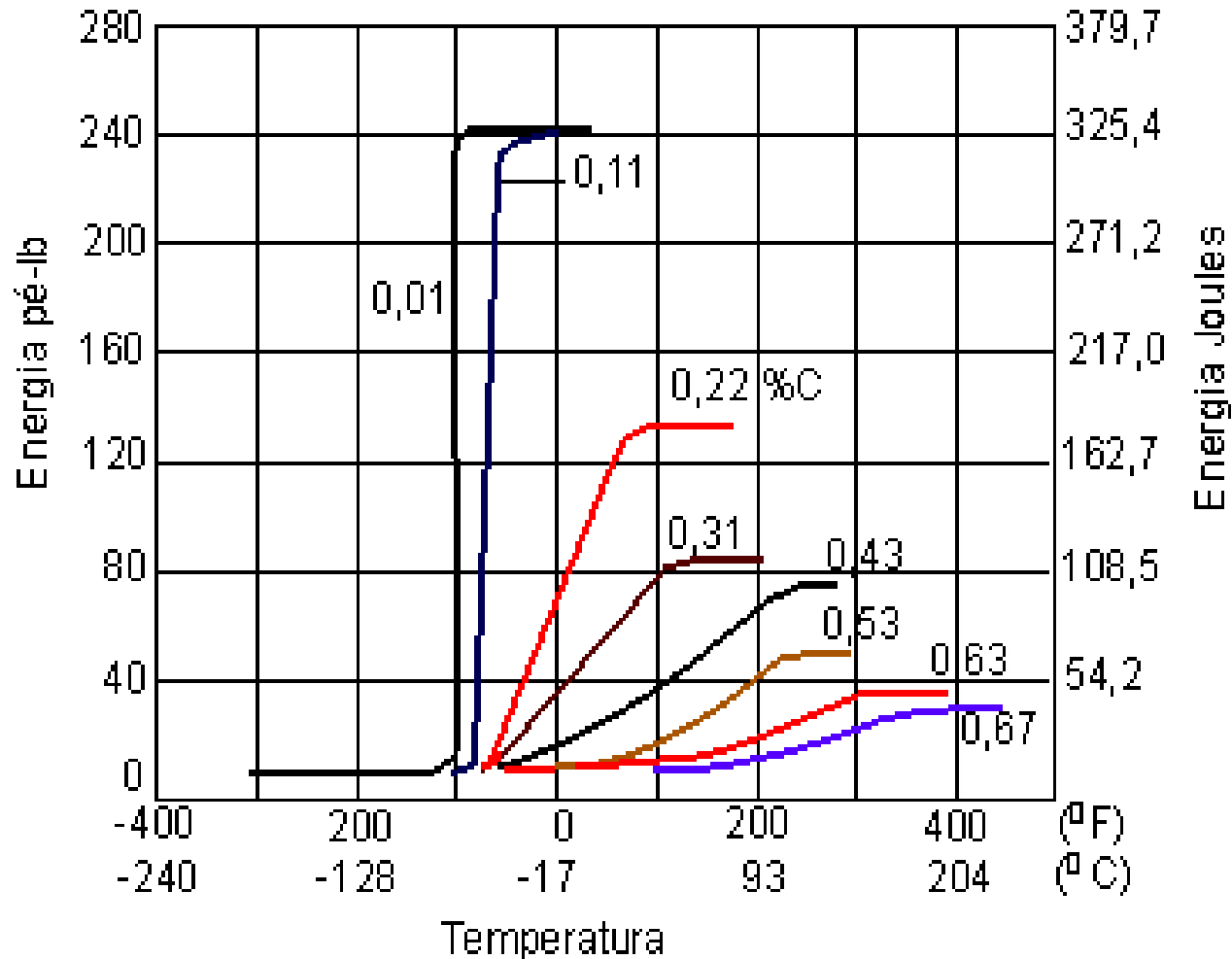
Materiais que apresentam temperatura de **transição frágil-dútil** devem ser **usados** **somente** em temperaturas **acima da** **temperatura de transição** para evitar fraturas frágeis catastróficas

Efeito Temperatura X Elementos liga

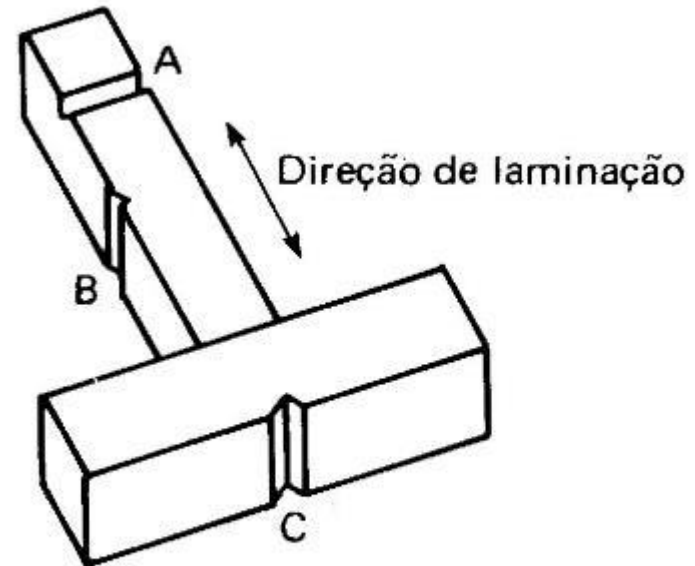
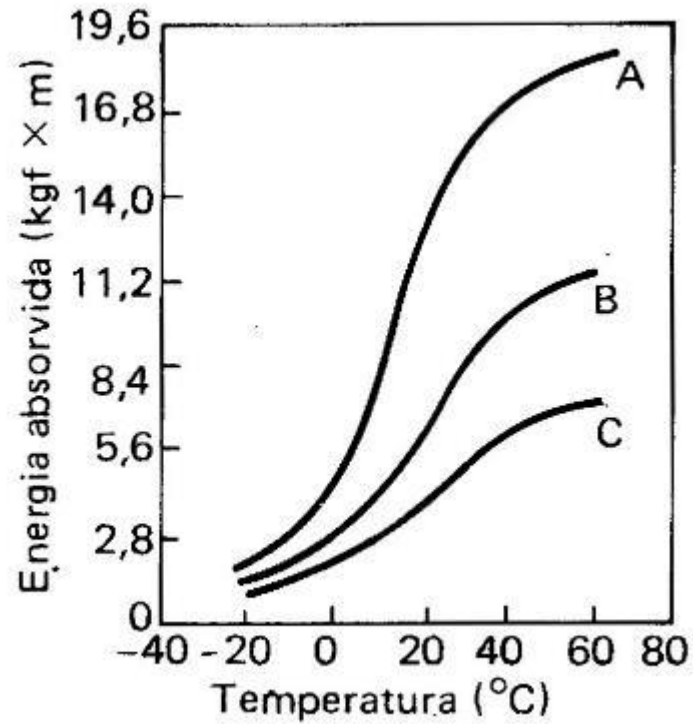


- ↓ Teor de carbono
- ↓ Temperatura de transição

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.**

TITANIC- ABRIL, 1912



TITANIC- ABRIL, 1912

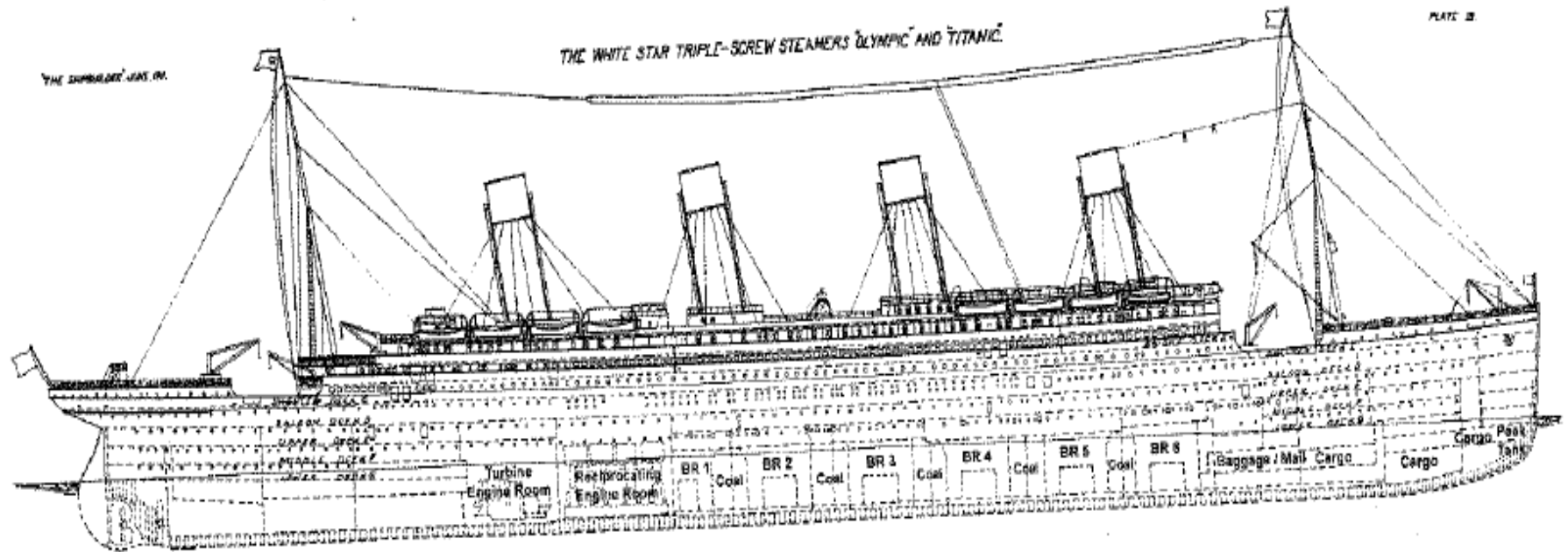


Figure 1.

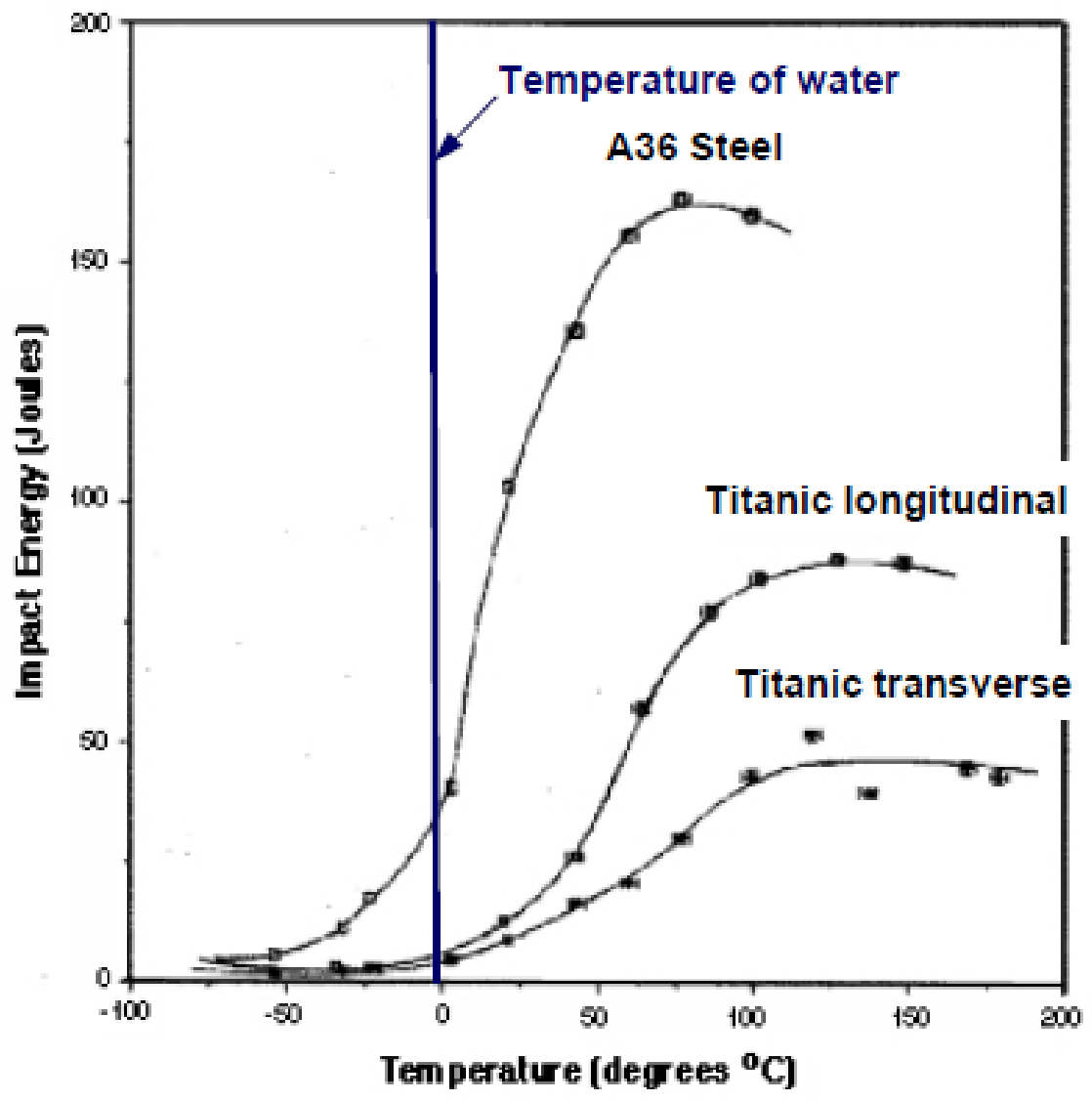
Compartimentado-rebites: compartimentos separados.

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 levantado com cp de impacto- secção de (10x10)mm.**

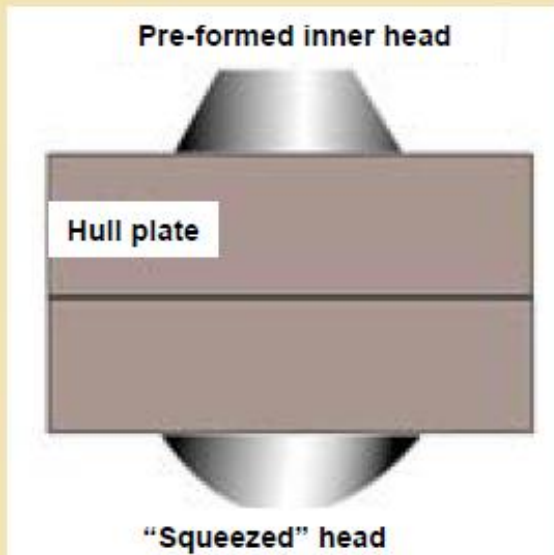


Temperature of the water was -2°C !!

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.

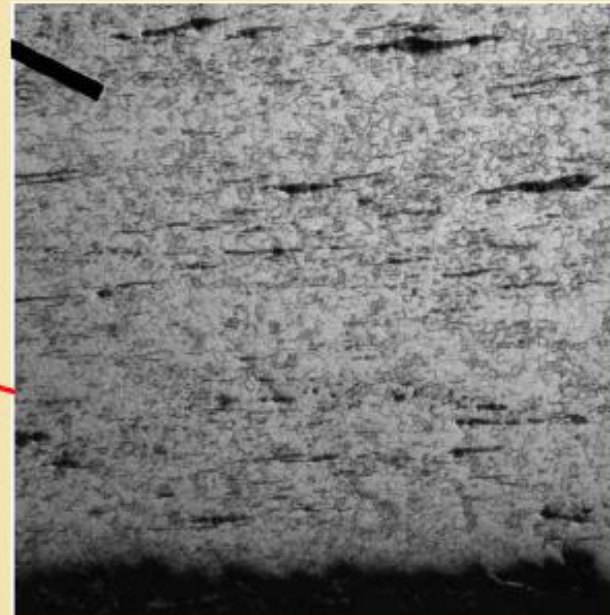
TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES

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

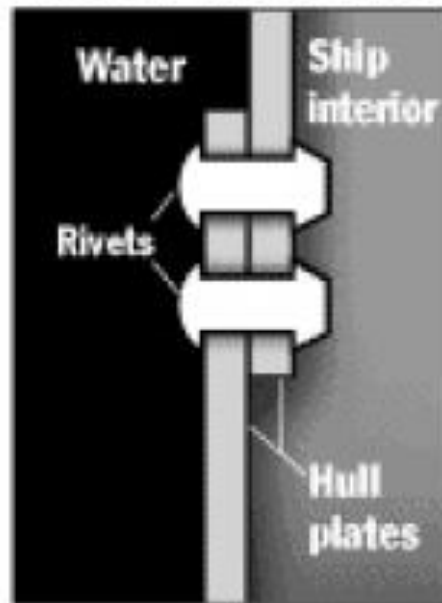


Pulling force



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

FIM