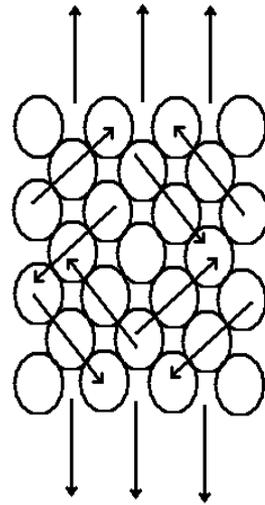




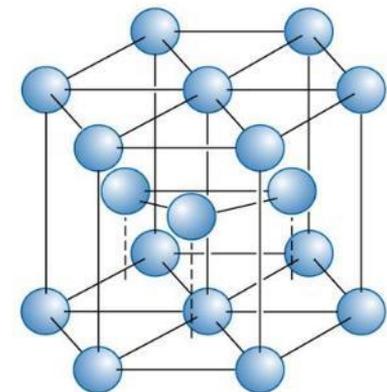
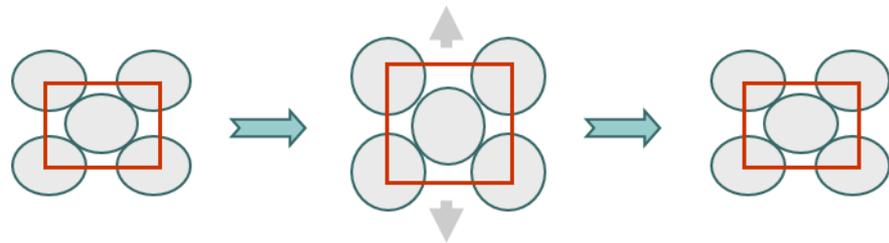
Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia de Materiais - SMM

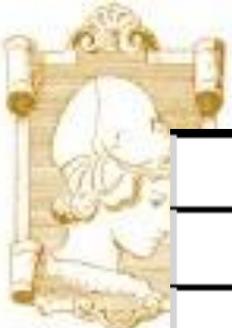


# PROPRIEDADES MECÂNICAS - ENSAIO DE DUREZA E DE IMPACTO



**SMM0193- Engenharia e Ciência dos Materiais I**

**Prof. Dr. José Benedito Marcomini**

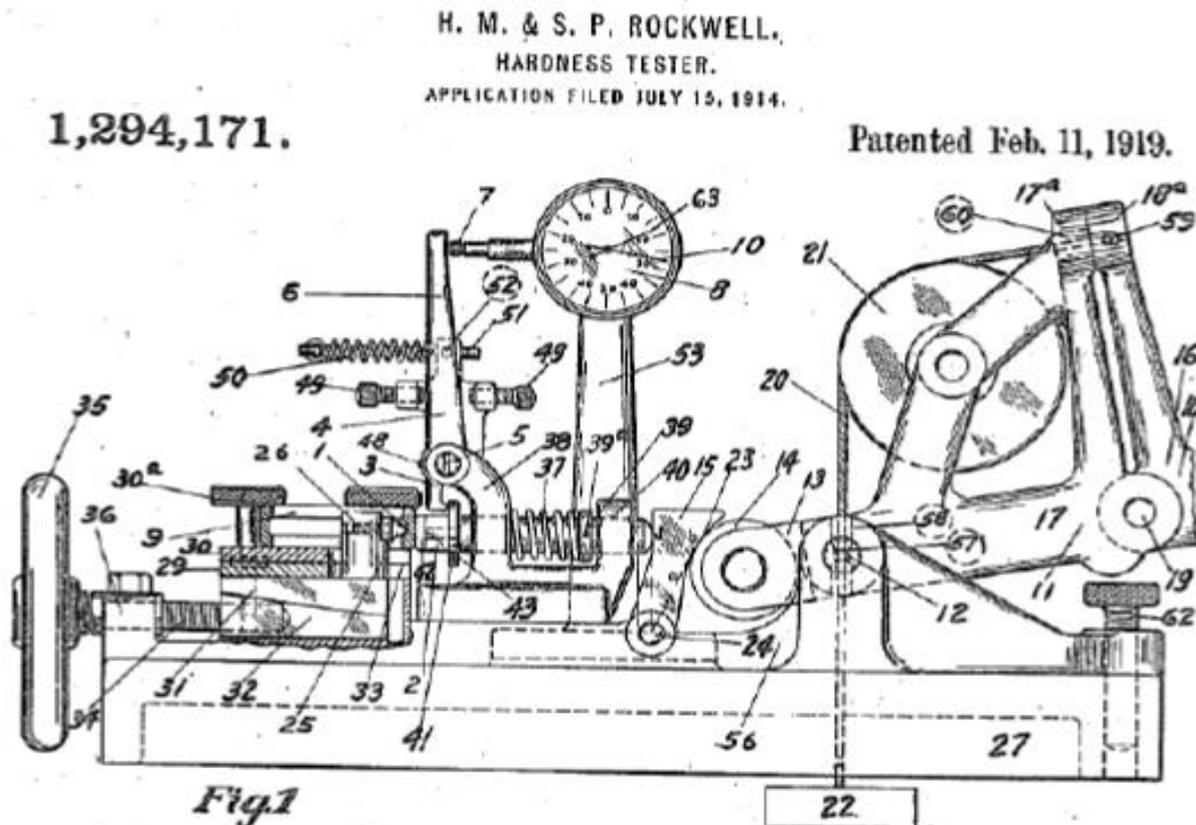


PROPRIEDADES MECÂNICAS	PROPRIEDADES FÍSICAS
RESISTÊNCIA MECÂNICA	DENSIDADE
DUREZA	VISCOSIDADE
DUTILIDADE	PERMEABILIDADE MAGNÉTICA
TENACIDADE	PERMEABILIDADE ELÉTRICA
TENACIDADE AO IMPACTO	PONTO DE FUSÃO
TENACIDADE À FRATURA	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
MÓDULO DE ELASTICIDADE	CONDUTIVIDADE TÉRMICA
RIGIDEZ	TRANSPARÊNCIA
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

# ENSAIO DE DUREZA

- 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.





# 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



# Dureza

## Métodos de medição:

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

## Importância:

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



## 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             |



**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 ressalto

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

## Características e vantagens:

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



**Bancada**



**Portáteis**

# Princípio do rebote: diferença de energia potencial

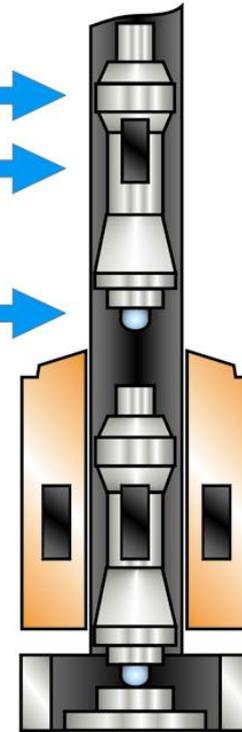


Impact body

Magnet

Tungsten  
carbide ball

**Cross-cut of a typical  
impact device**



Animation



Coil

# EQUIPAMENTOS

DynaPOCKET



DynaMIC



MIC 20





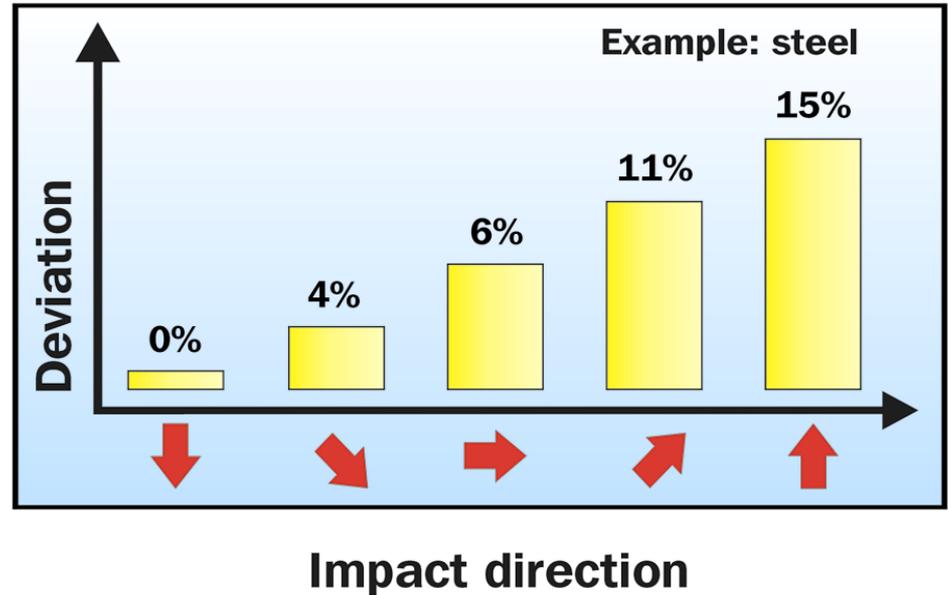
# APLICAÇÃO





# Influence Of Impact Direction

- Measurement is strongly influenced by the impact direction
- ⇒ Correction necessary for conventional rebound instruments



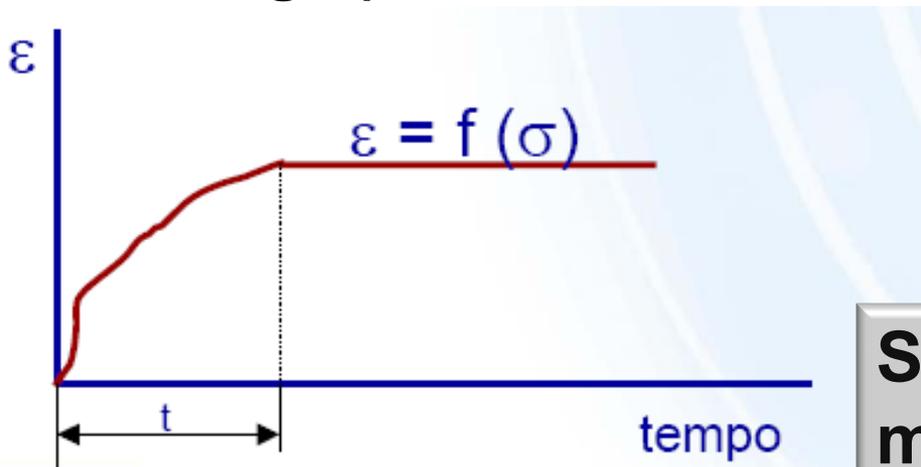
**DynaMIC / DynaPOCKET / MIC 20: Patented Auto-Balancing**



# Dureza por penetração (princípios gerais)

## Cuidados na realização dos ensaios:

- Perpendicularidade entre a 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 aço endurecido ou de carbeto de tungstênio (CW), de diâmetro  $D$ , sobre uma superfície polida e limpa de um metal através de uma carga  $F$ , durante um tempo  $t$ .

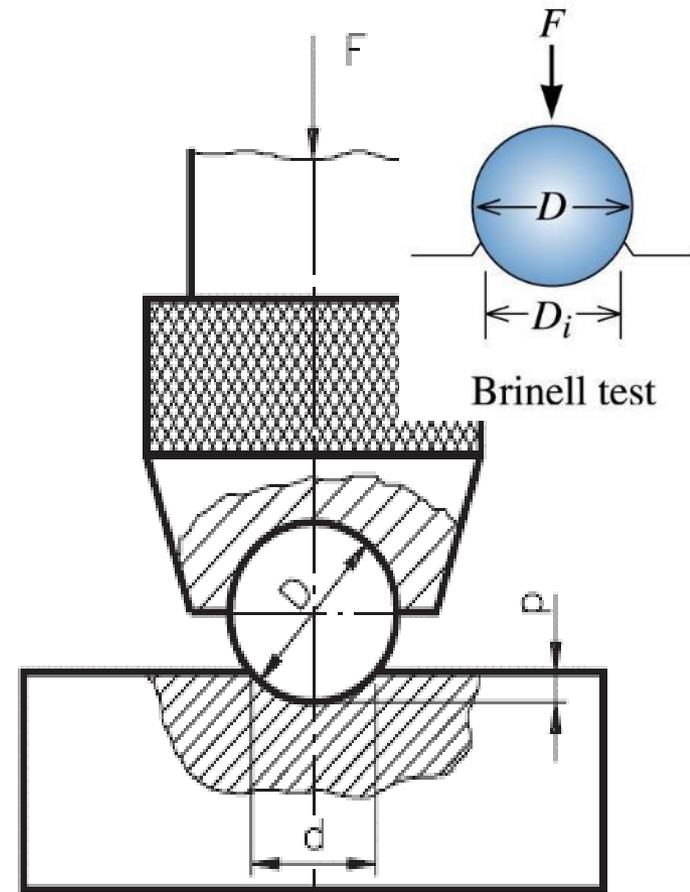
Penetrador esférico  $\phi$  : 1,2 ,5 ou 10 mm

Cargas: entre 500 e 3000 kg

Tempo: entre 10 e 30 s

$$HB = \frac{F}{A_c} \quad HB = \frac{F}{\pi Dp}$$

Dureza Brinell

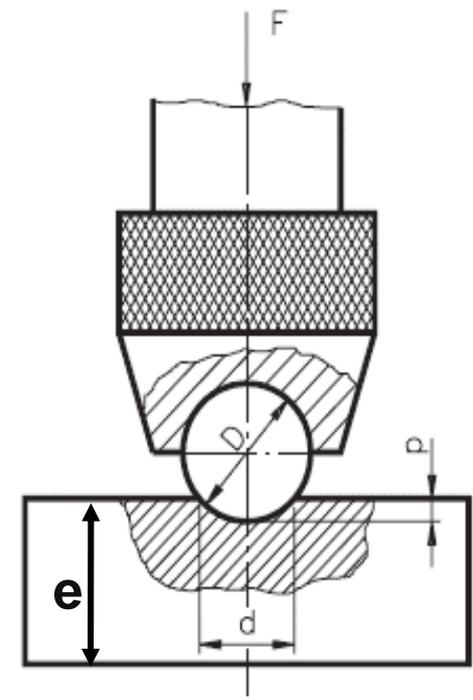


$p$  = prof. de impressão (da calota)



# Dureza Brinell (HB)

O diâmetro da esfera ( $D$ ) é determinado em função da espessura do CP ensaiado ( $e$ ). No caso da norma brasileira, a espessura mínima do material ensaiado deve ser 17 vezes a profundidade da calota ( $p$ ).



O quadro a seguir mostra os diâmetros de esfera mais usados e os valores de carga para cada caso, em função do fator de carga escolhido.

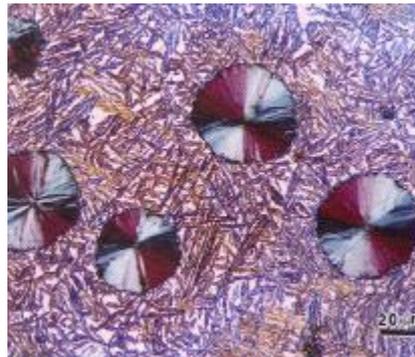
DIÂMETRO DA ESFERA (mm)	$F \text{ (kgf)} = 30 D^2$	$F \text{ (kgf)} = 10 D^2$	$F \text{ (kgf)} = 5 D^2$	$F \text{ (kgf)} = 2,5 D^2$
10	3.000	1.000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187.5	62,5	31.25	15.625

# Mecanismo de Medição Brinell

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

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

\*medido através de microscópio especial, utilizando uma escala gravada em sua ocular

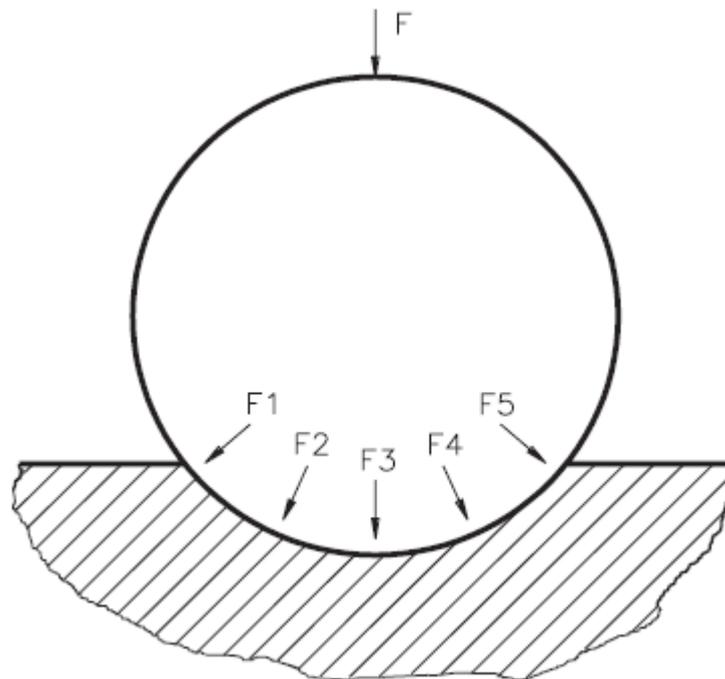


**Dureza Brinell**



# Dureza Brinell (HB)

A unidade  $\text{kgf/mm}^2$ , 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

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

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

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:**

- Conhecimento aproximado da resistência do material sem atingir a ruptura;
- 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 e do uso do componente)

### **Limitações:**

- Não é aplicável em peças muito finas e em materiais muito duros;
- Método relativamente lento para a produção industrial;
- A impressão obtida é muito grande para peças acabadas.



# Dureza Rockwell (HR) - 1922

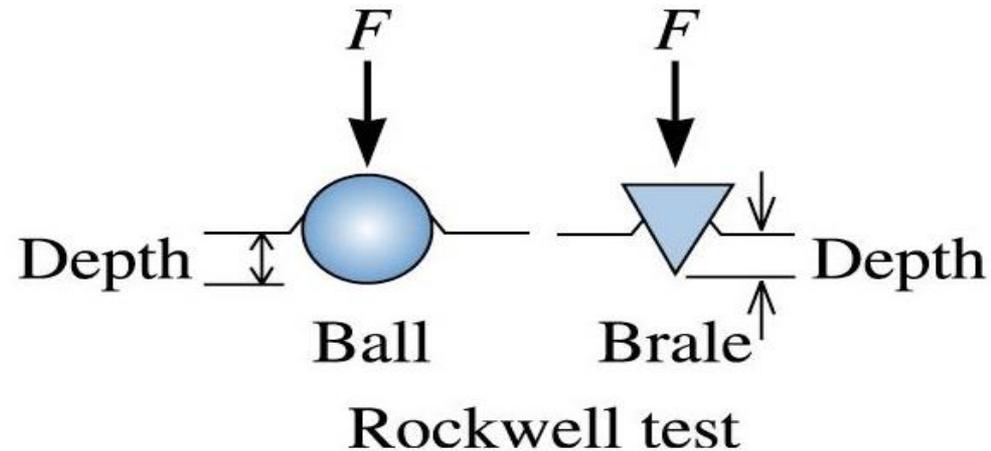
- Método mais utilizado para se medir dureza
- Elimina o tempo necessário para a medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado é diretamente lido na máquina de ensaio, sendo portanto rápido e livre de erros humanos;
- Fácil execução, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e pequeno tamanho da impressão;
- Ensaio Rockwell superficial é realizado em corpos de prova mais finos (delgados).





# Método de Medição Rockwell

- Índice (HR) é determinado pela diferença na profundidade de penetração de uma carga inicial (pré-carga) seguida de uma carga principal.
- 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



## Penetradores do ensaio Rockwell:

- Esferas de aço endurecidas com  $\phi$  : 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 pol.
- Penetradores cônicos de diamante (brale) usado para materiais mais duros

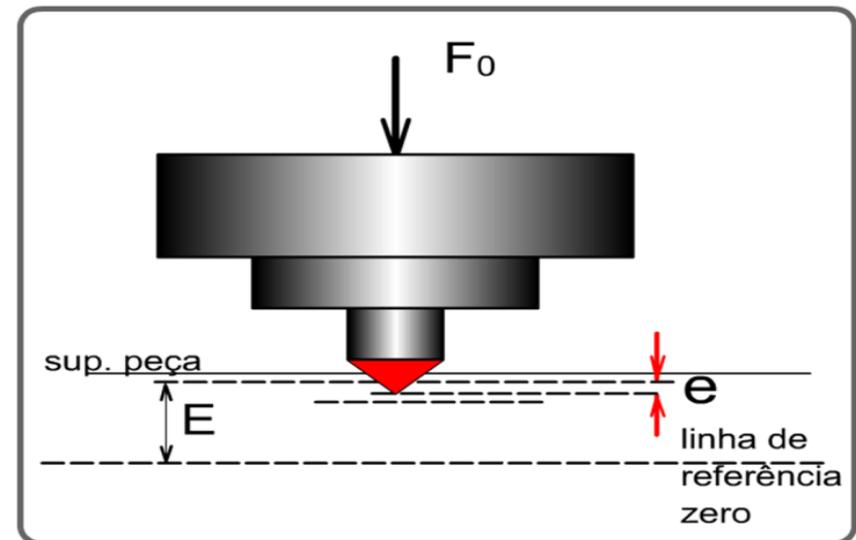


# Dureza Rockwell

$$HR = E - e$$

Onde:

- $e$  = aumento permanente da profundidade de penetração devido à carga maior  $F_1$  medido em unidades de 0,002 mm
- $E$  = constante que depende do formato do endentador: 100 para endentador de diamante, 130 para endentador de esfera de aço
- $HR$  = valor da dureza Rockwell
- $F_0$  = pré-carga em kgf
- $F_1$  = carga em kgf
- $F = F_0 + F_1$  = carga total em kgf





## Indicações de aplicação do Ensaio de Dureza Rockwell

Escala	Endentador	Carga Maior $F_1$ (kgf)	$E$	Aplicação
A	Cone diamante 120°	50	100	Chapa de aço, metal duro, aço com endurecimento superficial
B	Esfera de aço 1/16"	90	130	Cobre, ligas de alumínio, aço de baixo carbono, ferro fundido maleável
C	Cone diamante 120°	140	100	Aços endurecidos mais usados, ferro fundido duro, titânio
D	Cone diamante 120°	90	100	Aços duros de pouca espessura, ferro perlítico maleável
E	Esfera de aço 1/16"	90	130	Ferro fundido, alumínio, ligas moles
F	Esfera de aço 1/16"	50	130	Ligas de cobre recozidas, metais moles de pouca espessura
G	Esfera de aço 1/16"	140	130	Bronze fosforado, cobre-berílio, ferro fundido maleável, chumbo, etc
H	Esfera de aço 1/8"	50	130	Metais moles (Al, Zn, Pb), plásticos
K	Esfera de aço 1/8"	140	130	<b><math>F = F_0 + F_1</math></b>  Metais macios e outros materiais finos muito moles, inclusive plásticos.
L	Esfera de aço 1/4"	50	130	
M	Esfera de aço 1/4"	90	130	
P	Esfera de aço 1/4"	140	130	
R	Esfera de aço 1/2"	140	130	
S	Esfera de aço 1/2"	90	130	
V	Esfera de aço 1/2"	140	130	

**pré-carga  $F_0$  de 10 kgf.**



## Indicações de aplicação do Ensaio de Dureza Superficial Rockwell

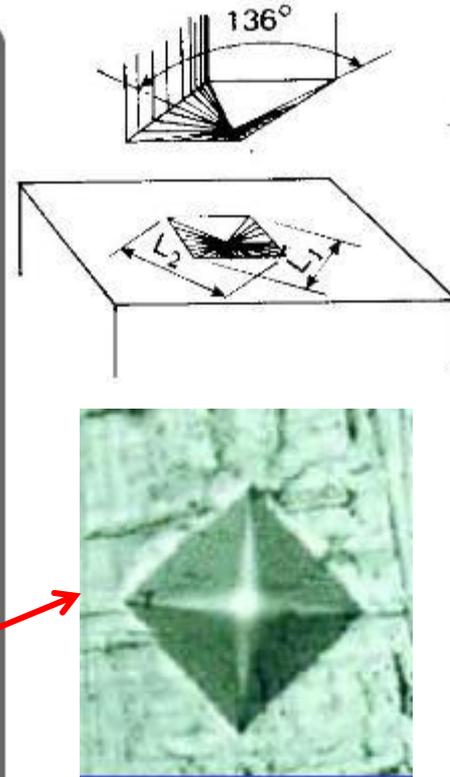
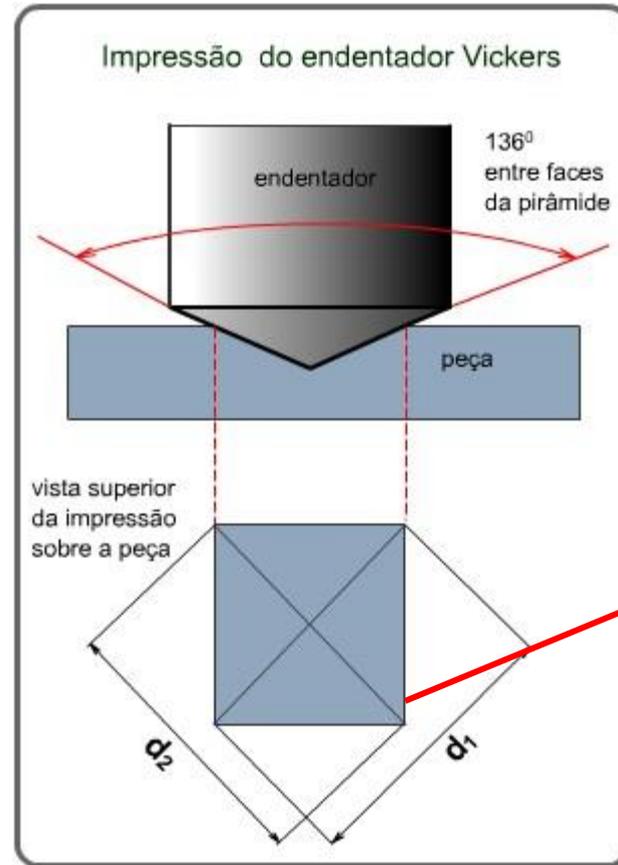
Escala	Tipo de Endentador	Carga Maior $F_1$ (kgf)	Valor de $E$	Aplicação
HR 15 N	Cone Diamante 120°	12	100	Metal duro, aços com pouca espessura, aços com endurecimento superficial
HR 30 N	Cone Diamante 120°	27	100	Aço, ferro fundido duro, ferro fund maleável, titânio, aço com endurecimento profundo, outros materiais mais duros que B100
HR 45 N	Cone Diamante 120°	42	100	Aços de pouca espessura, aços endurecidos a média profundidade, ferro fundido maleável
HR 15 T	Esfera de aço 1/16"	12	100	Ligas de cobre, aços macios, ligas de alumínio, ferro fundido maleável
HR 30 T	Esfera de aço 1/16"	27	100	Ligas de cobre recozidas, chapas finas de metais macios
HR 45 T	Esfera de aço 1/16"	42	100	Bronze fosforado, cobre-berílio, ferros maleáveis.
HR 15 W	Esfera de aço 1/8"	12	100	$F = F_0 + F_1$ <p>Ferro fundido e magnésio, metais macios Alumínio, zinco, chumbo Aço, ferro fundido maleável, ferros fundidos duros</p>
HR 30 W	Esfera de aço 1/8"	27	100	
HR 45 W	Esfera de aço 1/8"	42	100	
HR 15 X	Esfera de aço 1/4"	12	100	
HR 30 X	Esfera de aço 1/4"	27	100	
HR 45 X	Esfera de aço 1/4"	42	100	
HR 15 Y	Esfera de aço 1/2"	12	100	
HR 30 Y	Esfera de aço 1/4"	27	100	
HR 45 Y	Esfera de aço 1/4"	42	100	

pré-carga  $F_0$  de 3 kgf.



# Dureza Vickers (HV) - 1925

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

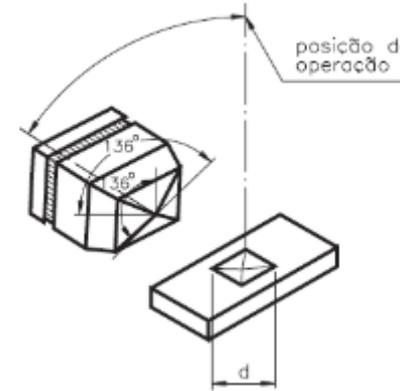


$$D = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

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

# Dureza Vickers (HV) - 1925

## Vantagens e limitações



### Vantagens:

- escala contínua de dureza;
- 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;
- diversas formulações de conversões para outras escalas.

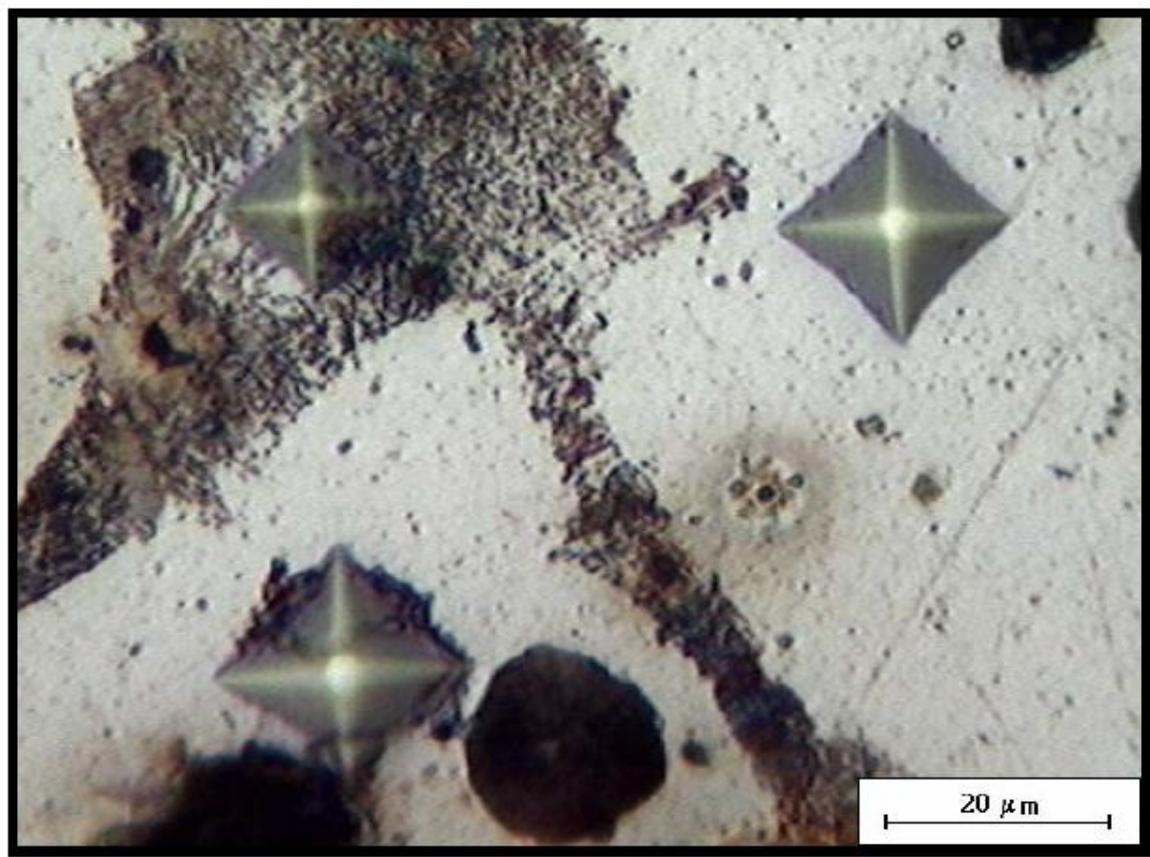
### Limitações:

- morosidade do ensaio;
- exige preparação cuidadosa da superfície para tornar nítida a impressão;
- processo muito caro.



# Indentação Vickers

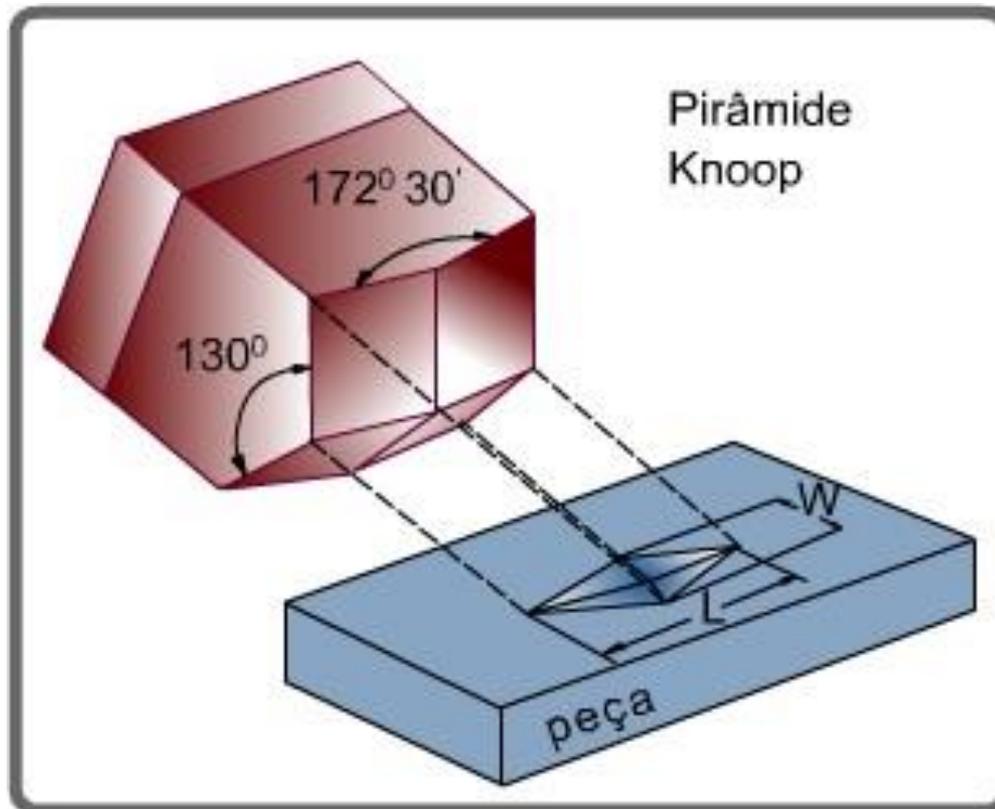
**Identação em um  
fofo Nodular,  
162HV (fase clara –  
Ferrita), 324HV  
(fase escura –  
Perlita). Ataque  
Nital, 500x**





# Ensaio de dureza Knoop

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



# DUREZA X LIMITE DE RESISTÊNCIA

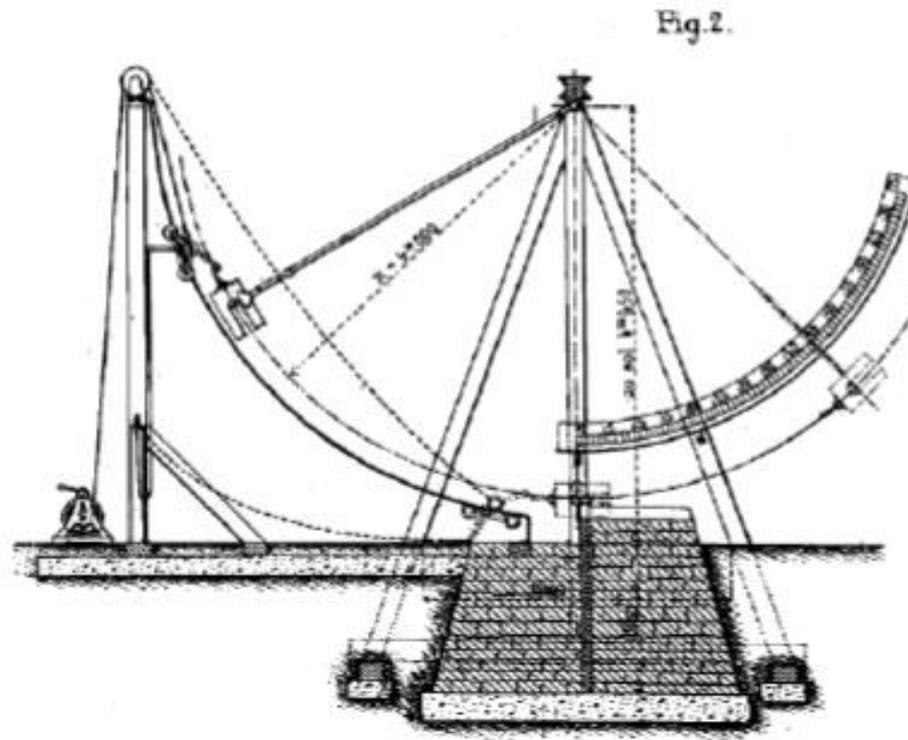


**TABLE 2 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels<sup>A</sup> (Rockwell C to Other Hardness Numbers)**

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)

# 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.



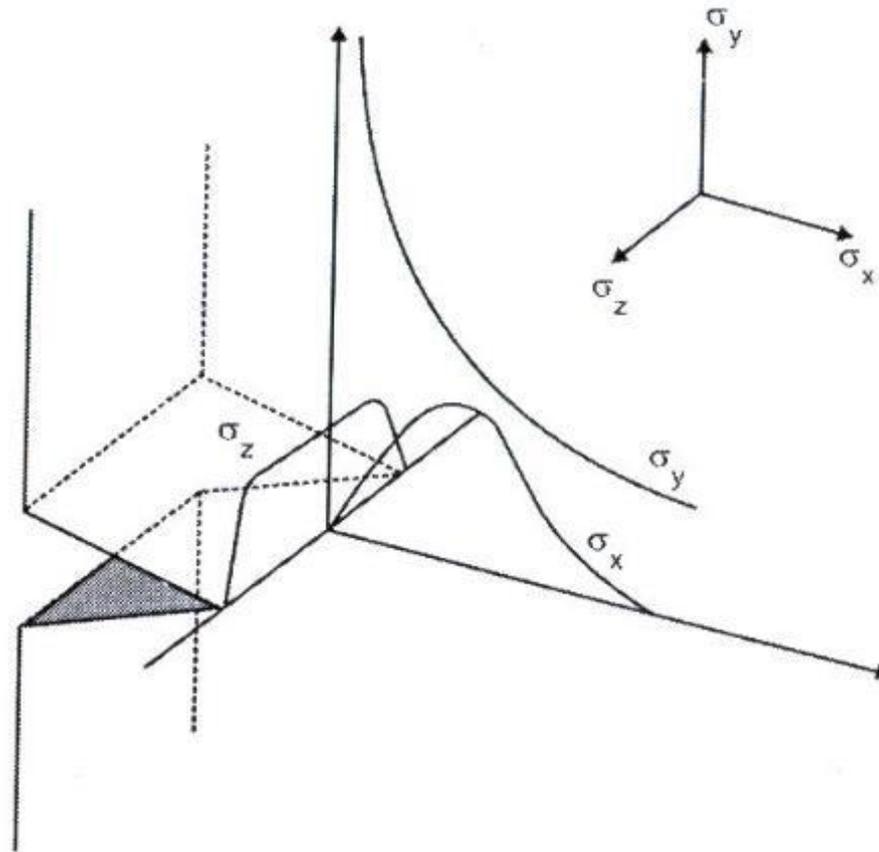
# Ensaio de Impacto

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

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

onde  $\omega$  é ângulo interior do entalhe.

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

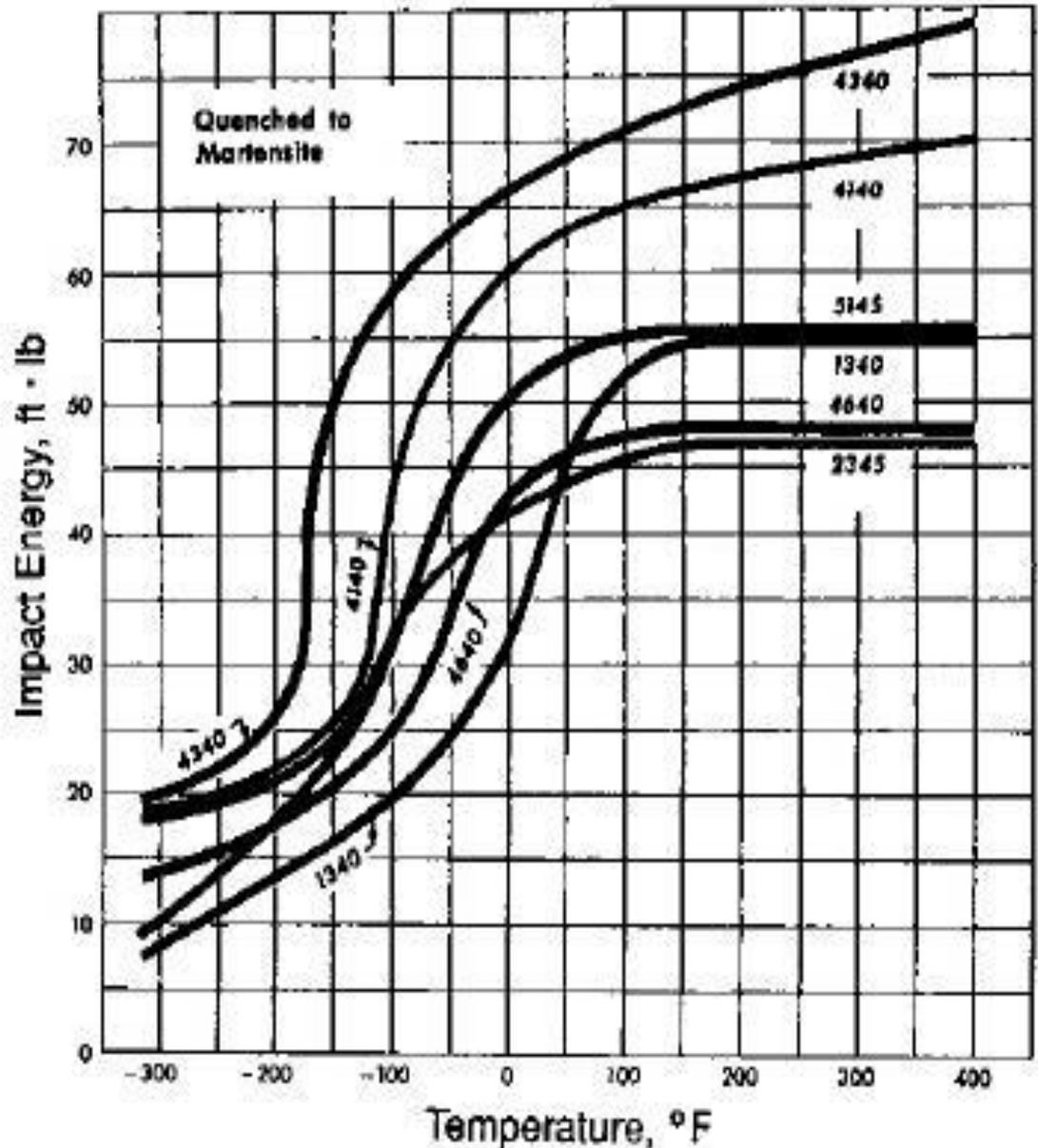
# Efeito Geometria do Entalhe



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

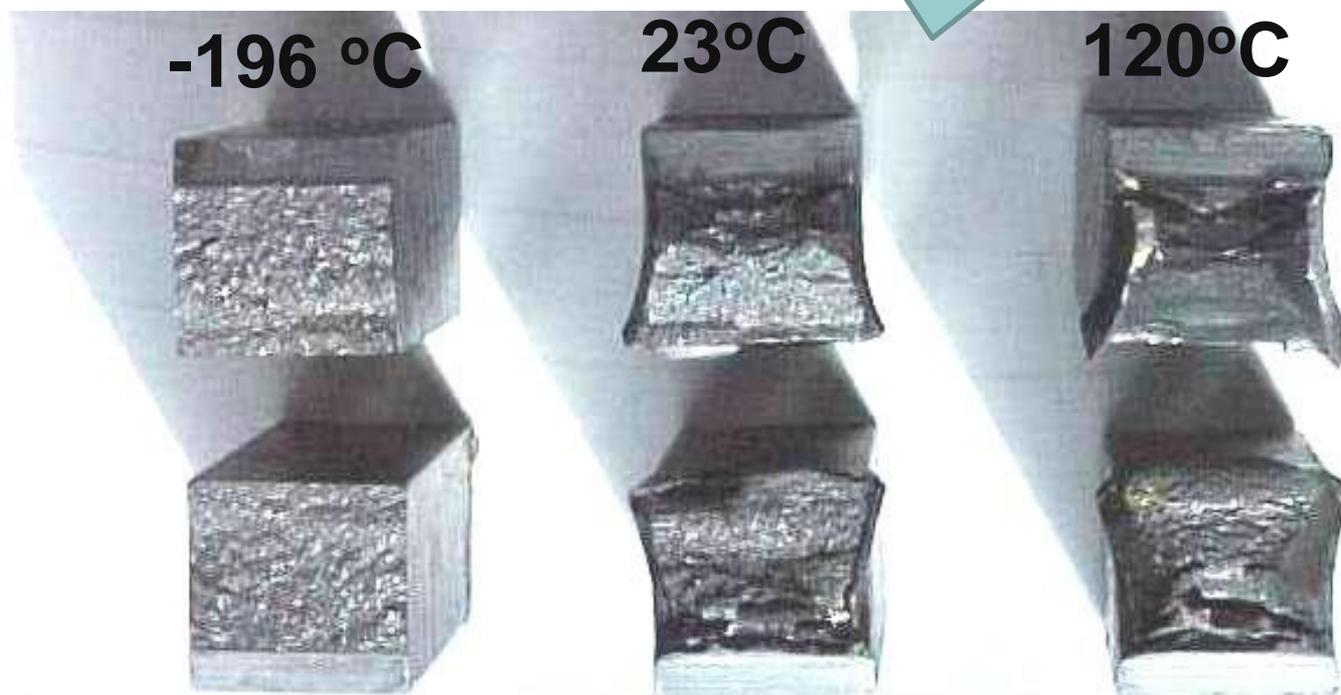


# Efeito Temperatura



# Efeito Temperatura na Res. Impacto

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



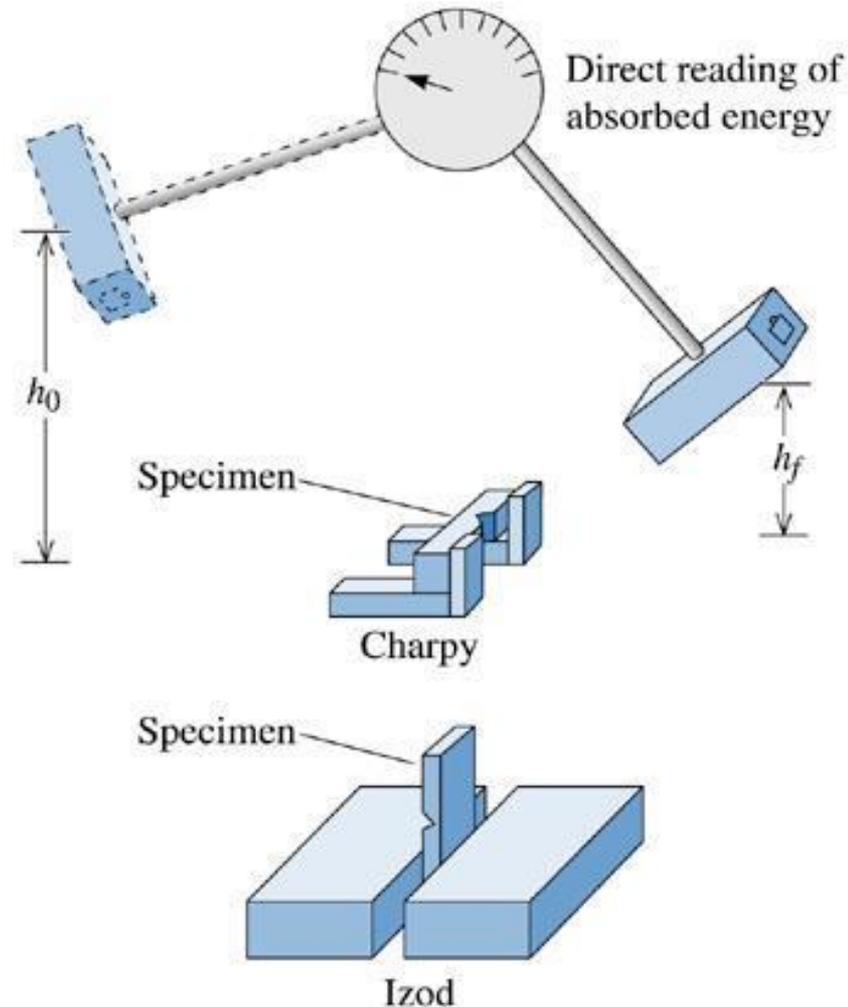


# Máquina de Ensaio Charpy



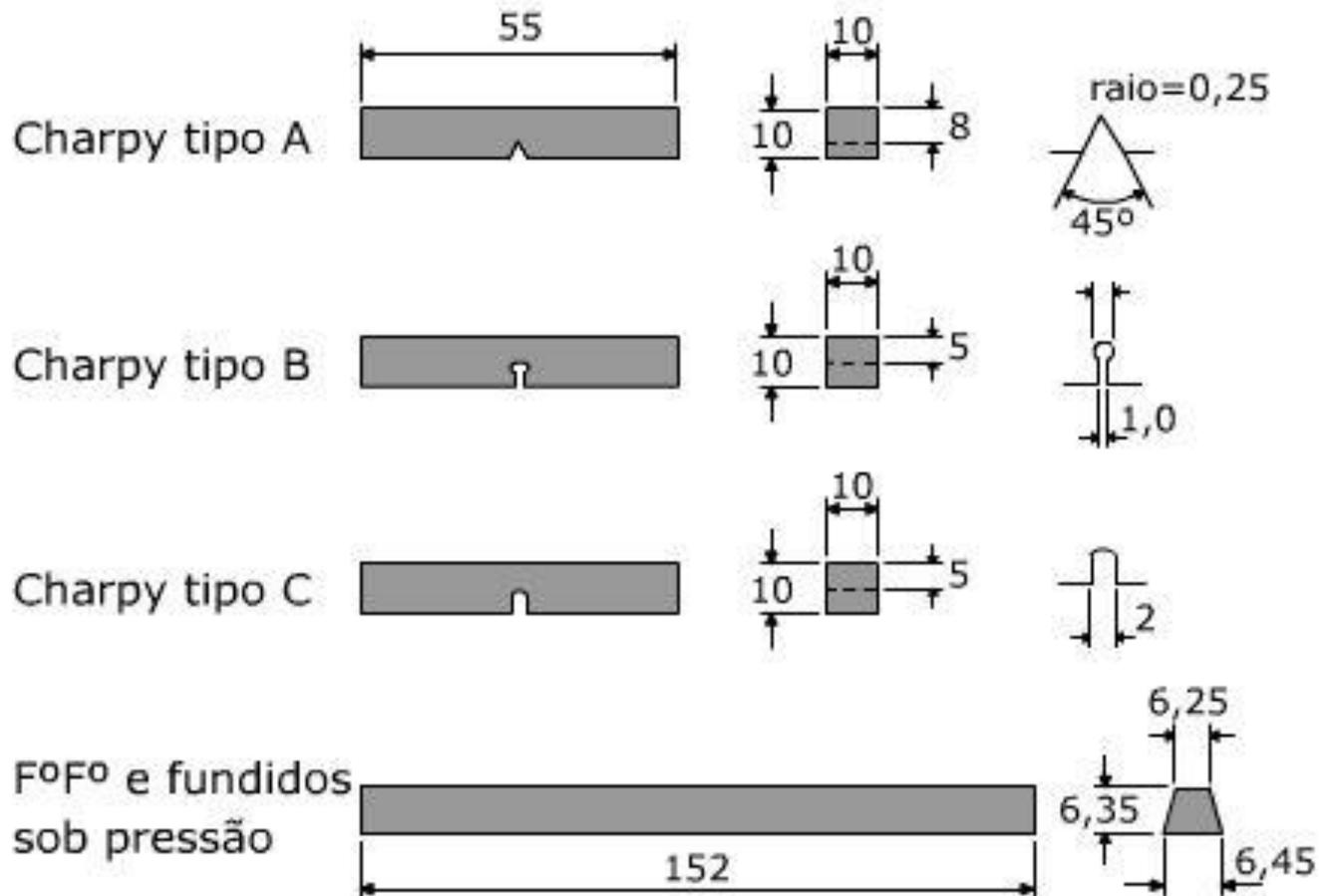
# Técnicas de Ensaio de Impacto: Charpy e Izod

- 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



# Principais Configuração CPs Charpy

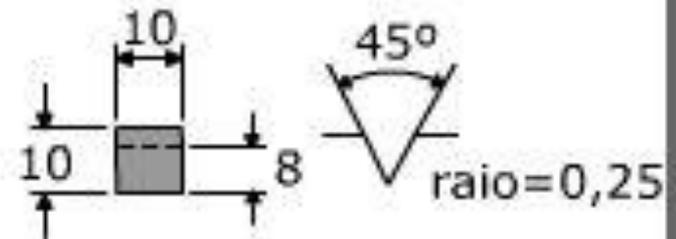
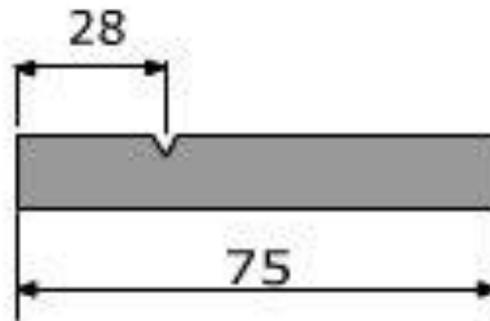
Todas as dimensões em mm



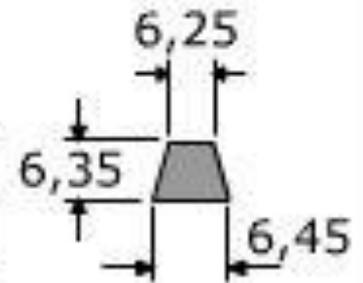
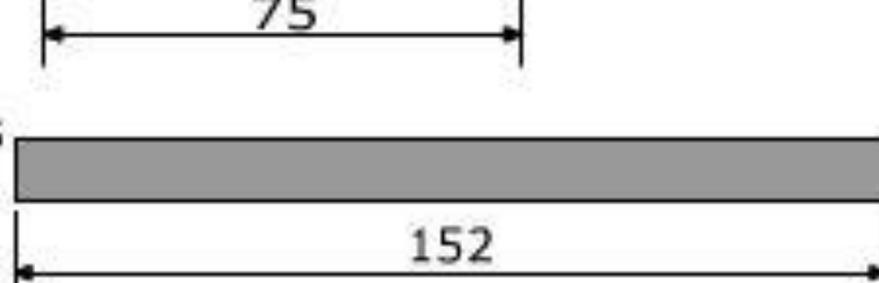
# Principais Configuração CPs IZOD

Todas as dimensões em mm

Izod (tipo D)



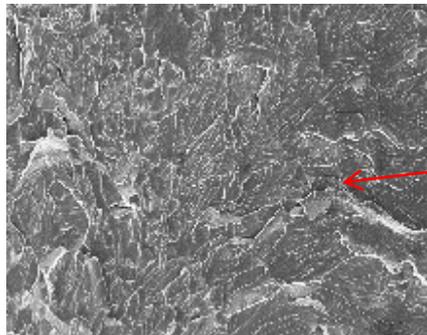
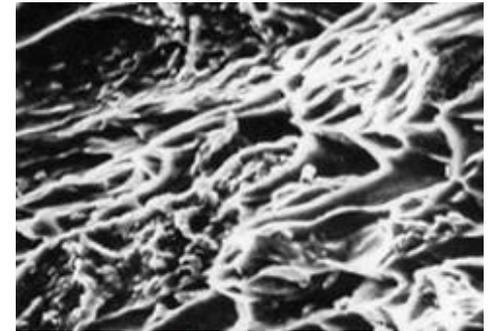
F<sup>o</sup>F<sup>o</sup> e fundidos sob pressão



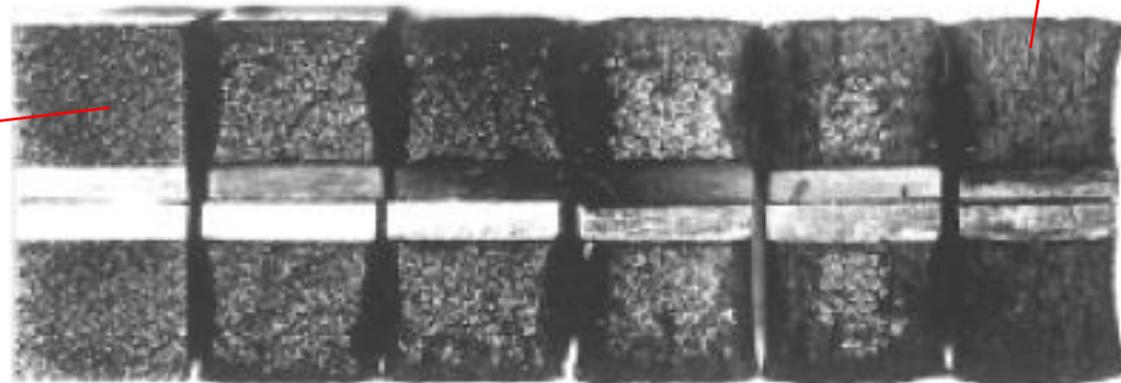


# Transição Dúctil - Frágil

- ✓ Uma das principais funções dos ensaios de impacto é determinar se um material apresenta transição dúctil – 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.

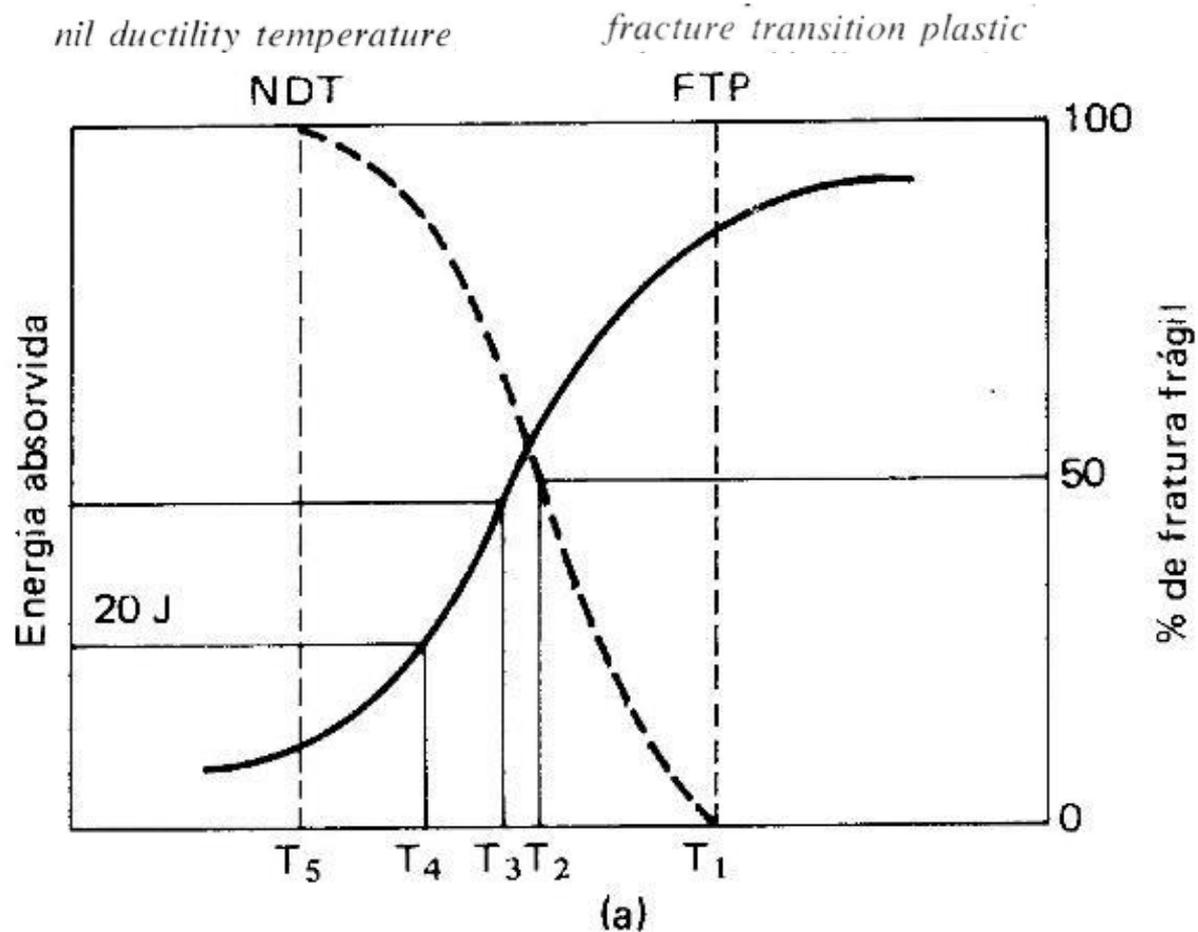


-59      -12      4      16      24      79



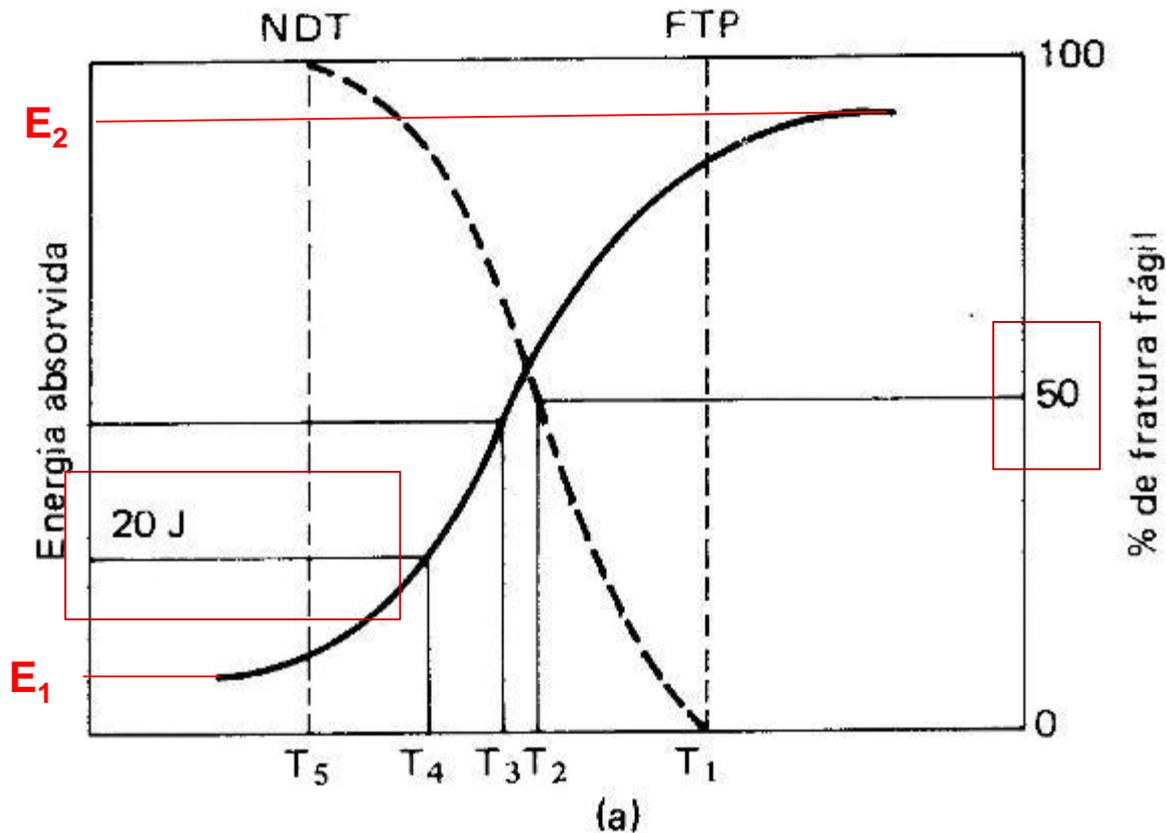


Desta forma o ensaio de impacto é mais significativo quando realizado em um intervalo de temperatura, de maneira que pode ser determinado a temperatura de transição quando a fratura passa de dútil para frágil, como observado na figura. Pode ser adotado pelo menos cinco critérios para a temperatura de transição.





# Transição Dúctil - Frágil



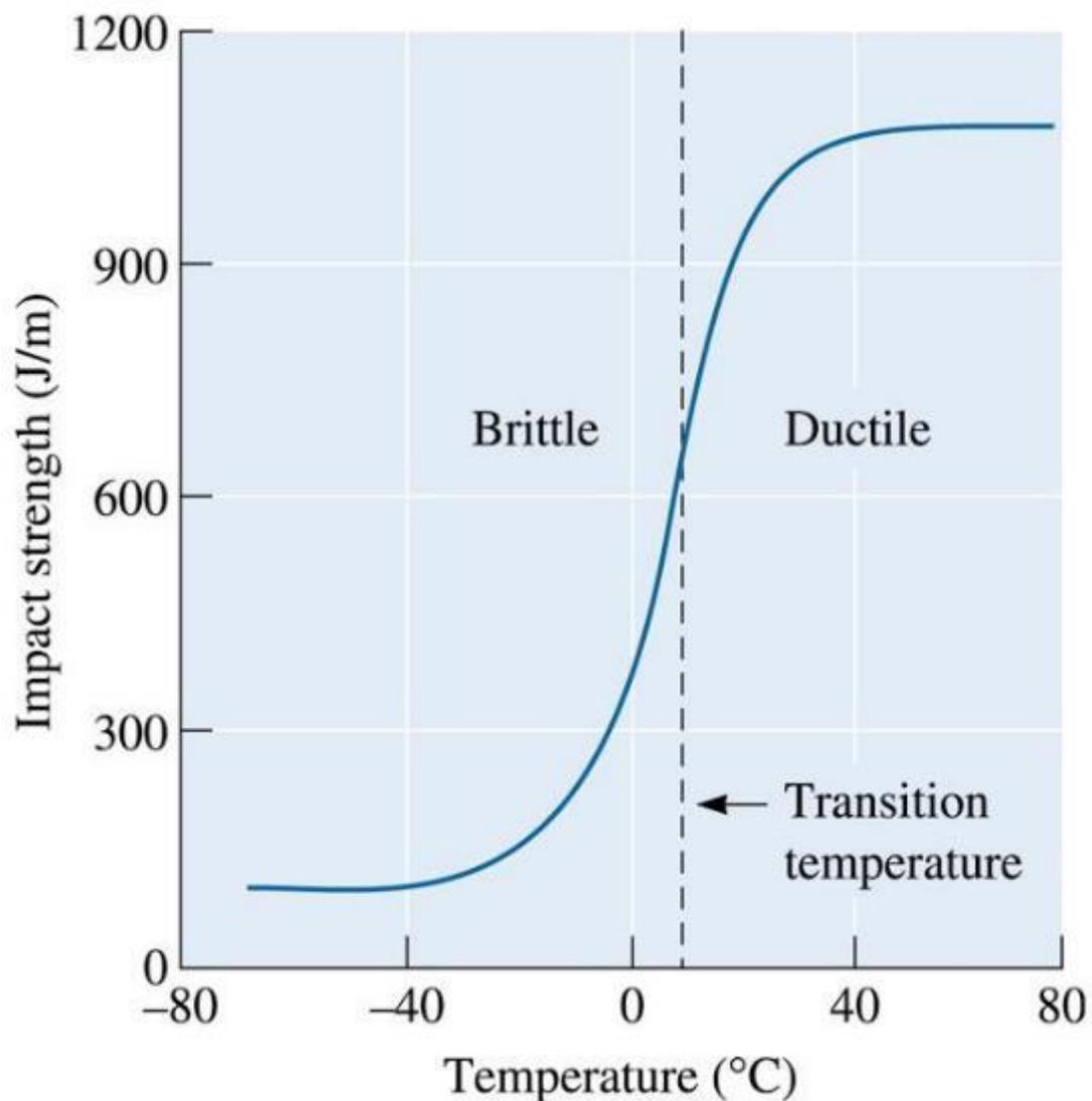
Temperatura de transição (Média das energias)

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



# Transição Dúctil - Frágil

Em um aço em temperaturas elevadas a energia é relativamente grande e a medida que a temperatura é reduzida, a energia de impacto cai para um valor constante, porém pequeno, i.é, o modo de fratura é frágil.





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

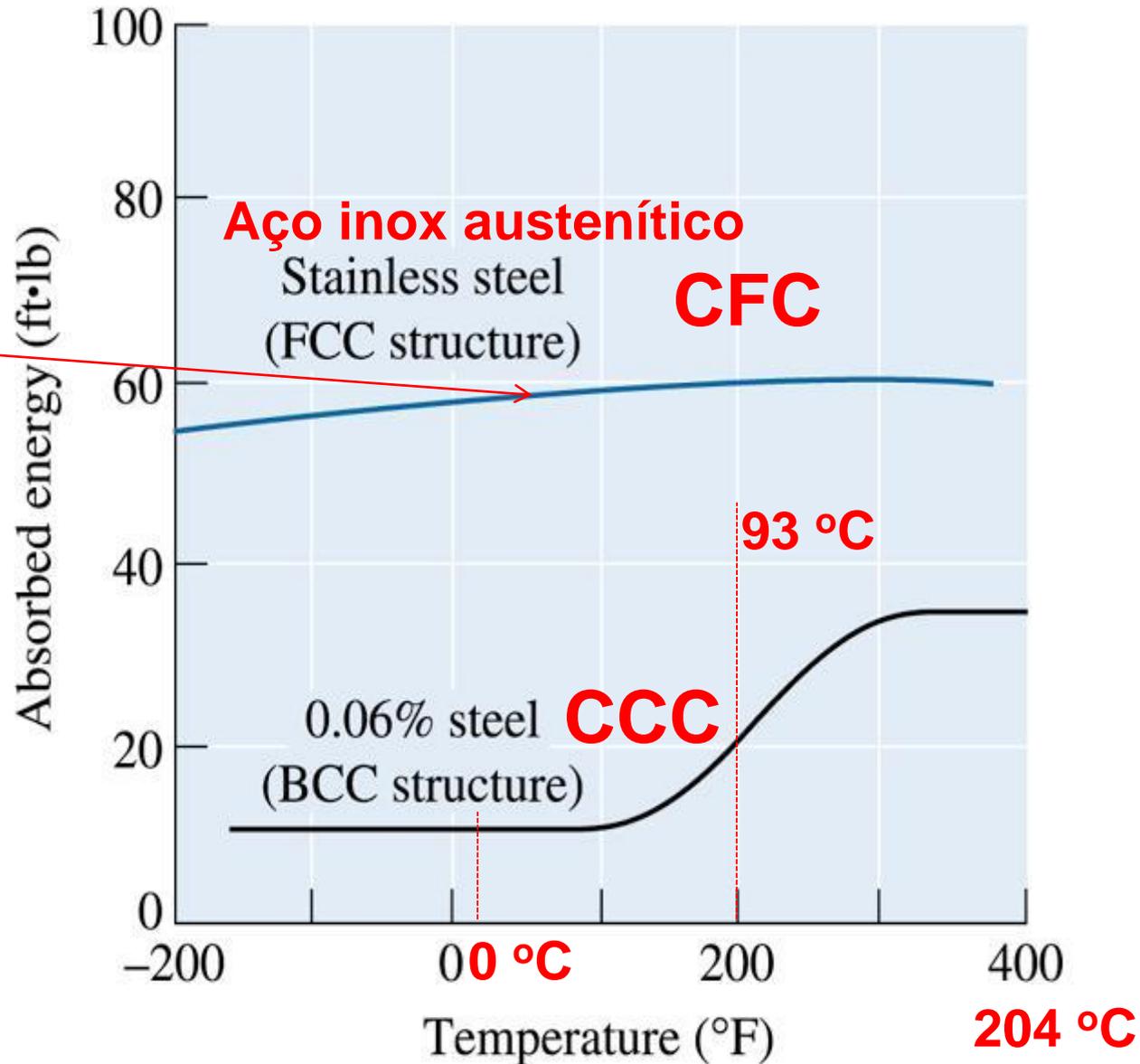
**Caso sim, como transportamos nitrogênio líquido? Temperatura de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ .**



# Transição Dúctil - Frágil

Não apresenta  
transição  
dúctil/frágil

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



# Transição Dúctil - Frágil

Materiais que apresentam esse comportamento devem ser usados somente em temperaturas acima da temperatura de transição para evitar fraturas frágeis catastróficas

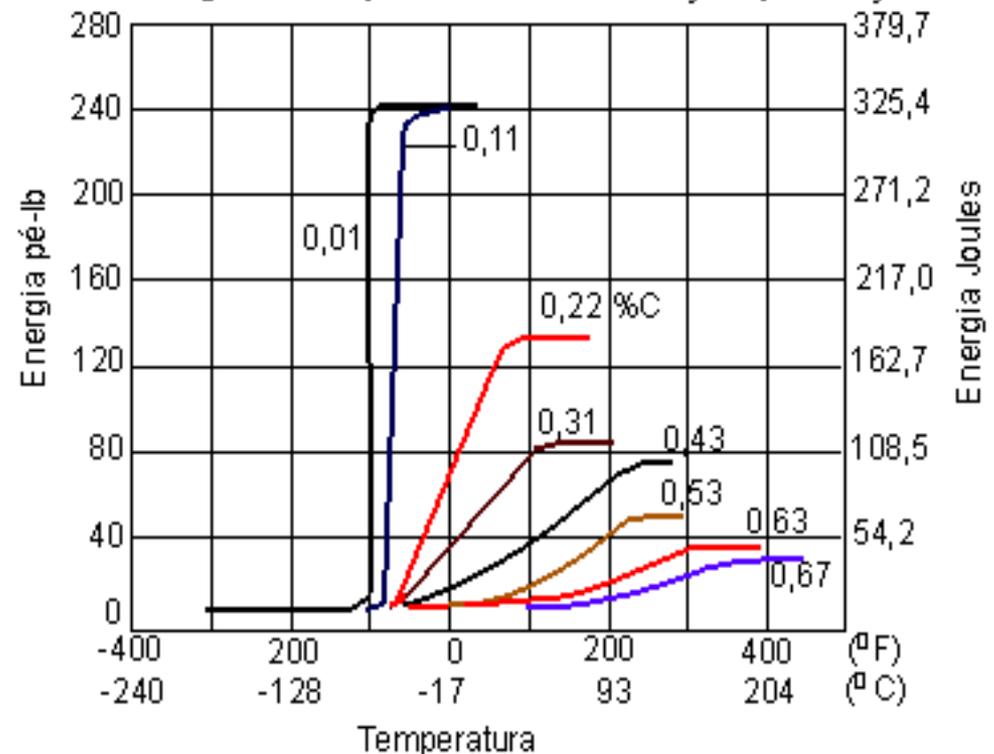
A temperatura de transição é sensível à composição e à microestrutura da liga

↓ Tamanho de grão

↓ Temperatura de transição

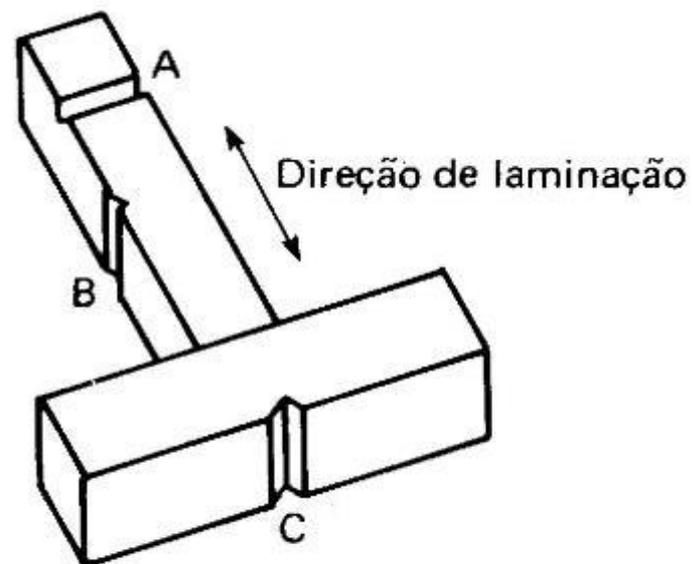
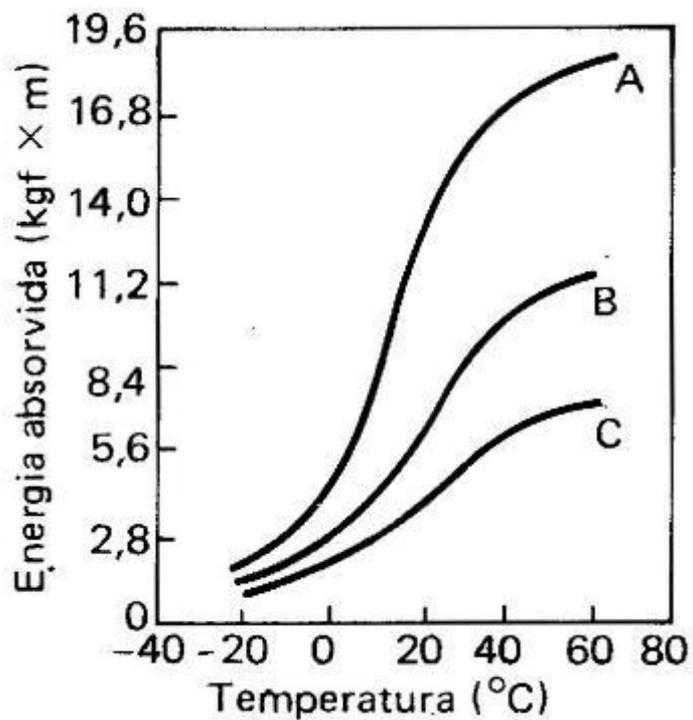
↓ Teor de carbono  
↓ Temperatura de transição

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





# Transição Dúctil - Frágil

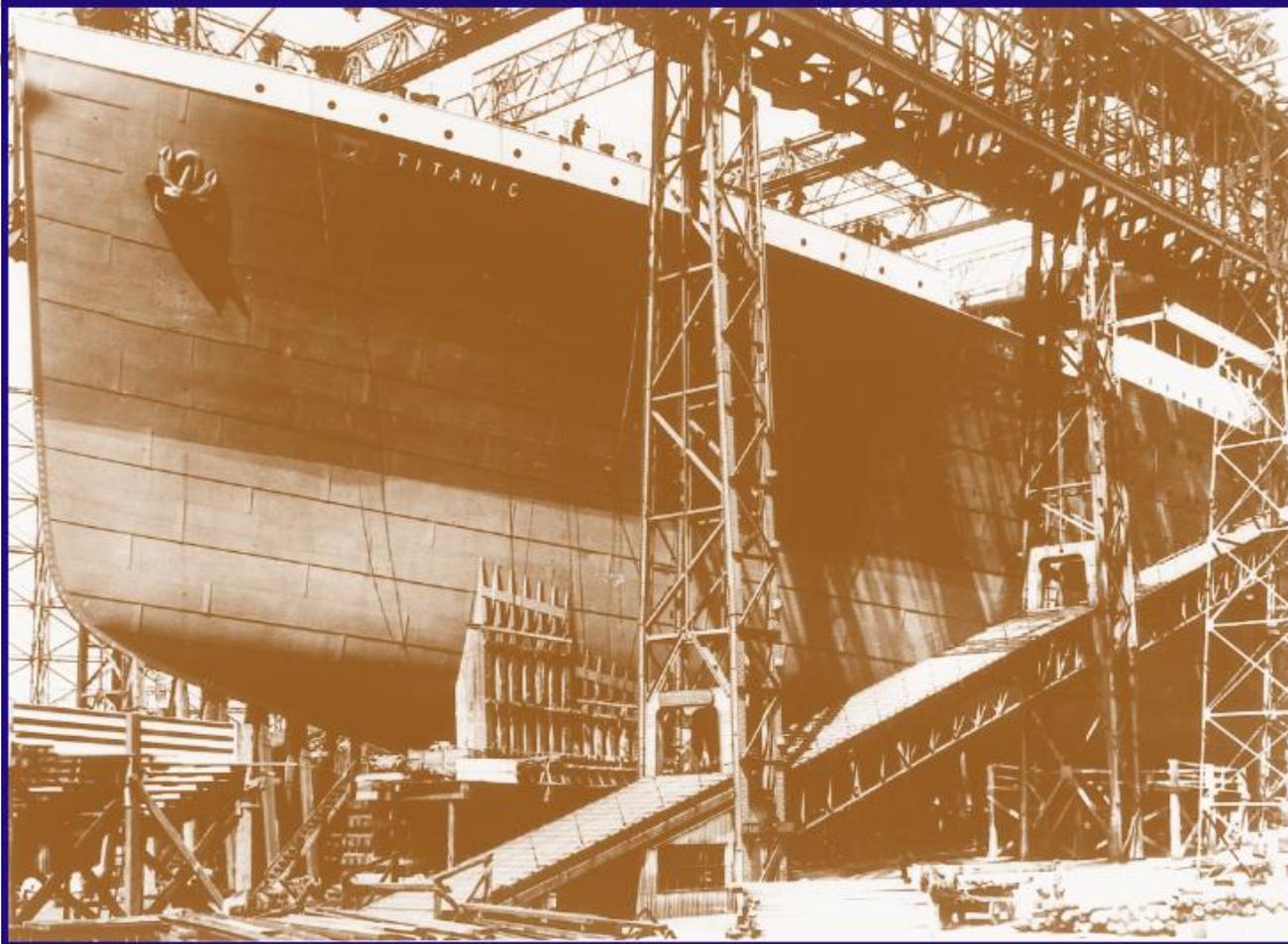




**TITANIC- ABRIL, 1912**



## TITANIC- ABRIL, 1912



**Construído  
em ritmo  
frenético.  
Foram  
registrados  
mais de 250  
acidentes de  
trabalho.**



# TITANIC- ABRIL, 1912

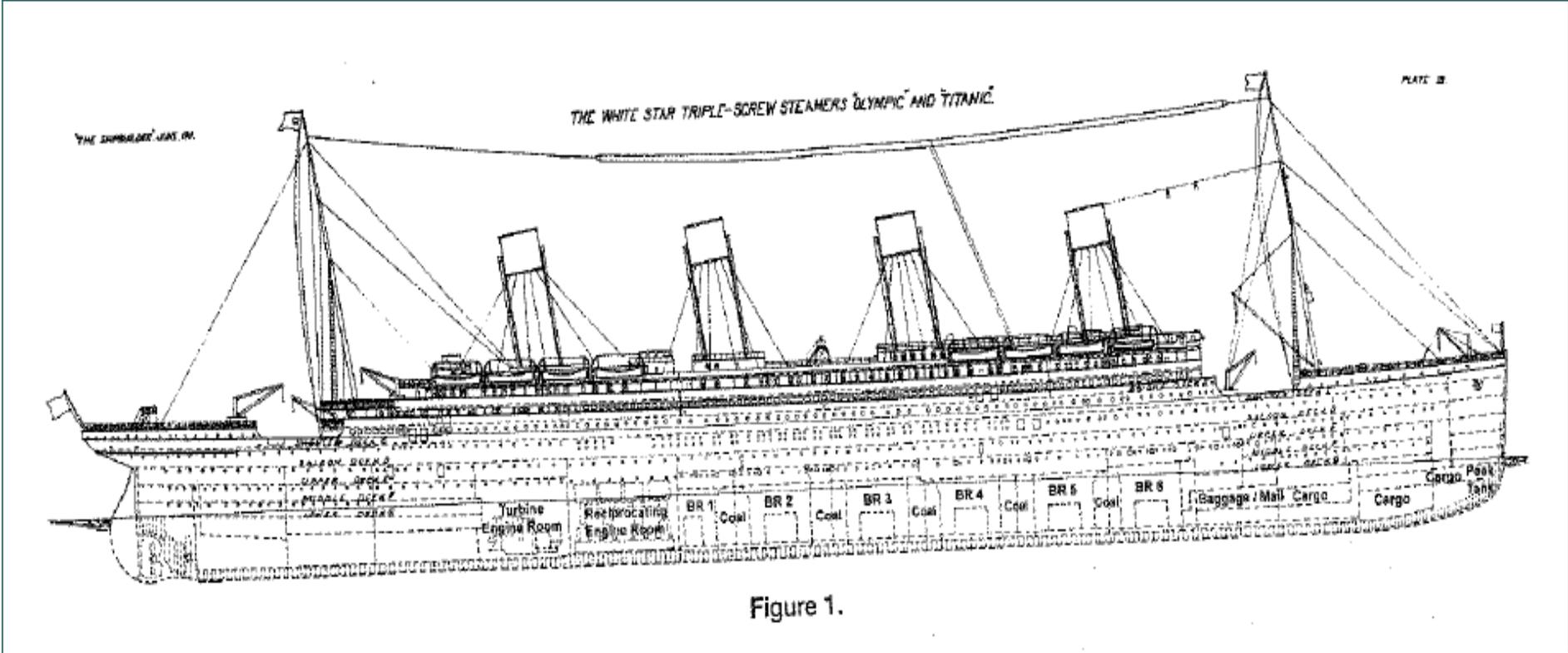
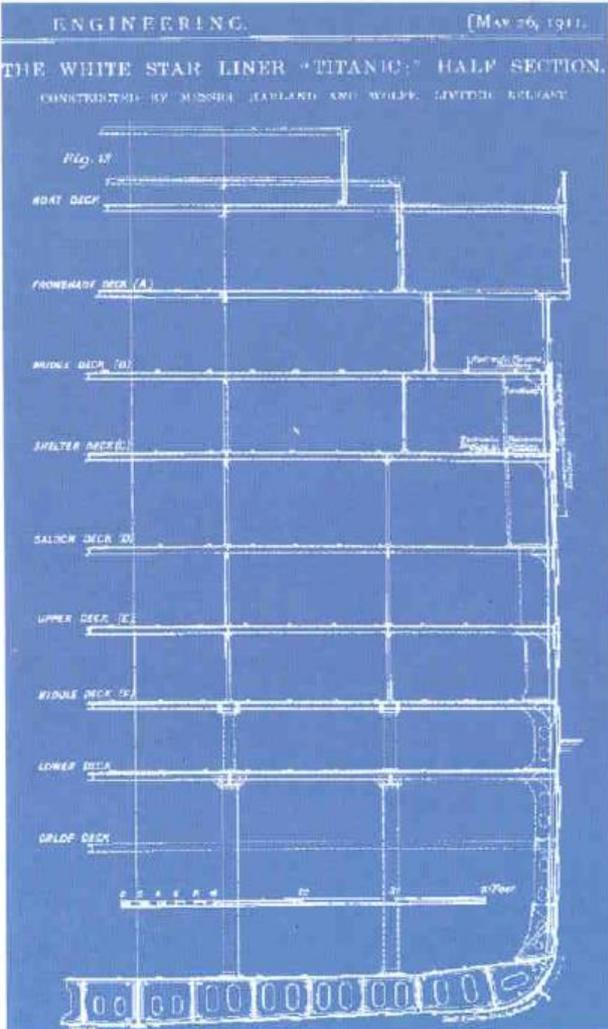


Figure 1.

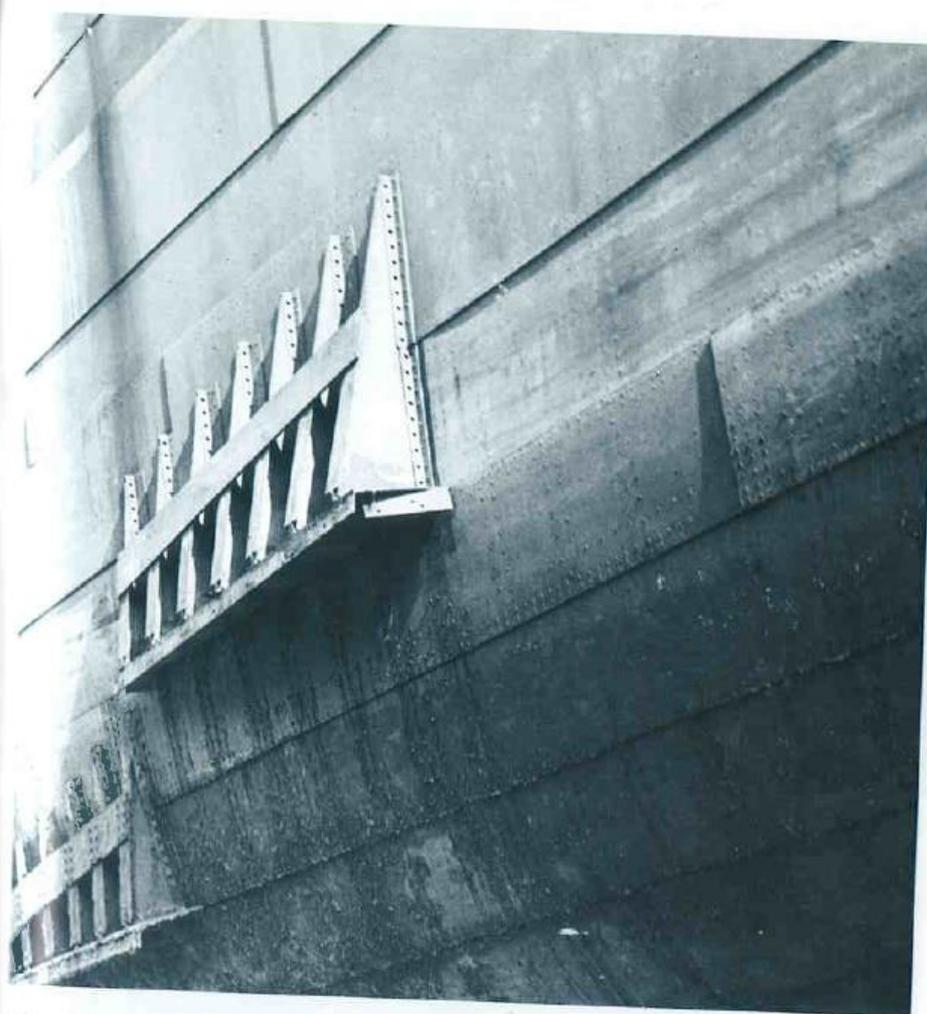
**Compartimentado-rebites: compartimentos separados.**



# TITANIC- ABRIL, 1912



A blueprint of the *Titanic's* hull showing all nine decks in cross section.



This photo taken during *Titanic's* construction shows the joggled surface that was created by *Titanic's* overlapping steel plates. (Harland and Wolff Photographic Collection, © National Museums Northern Ireland, Ulster Folk Transport Museum)



## 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

## Remains of the *Titanic*

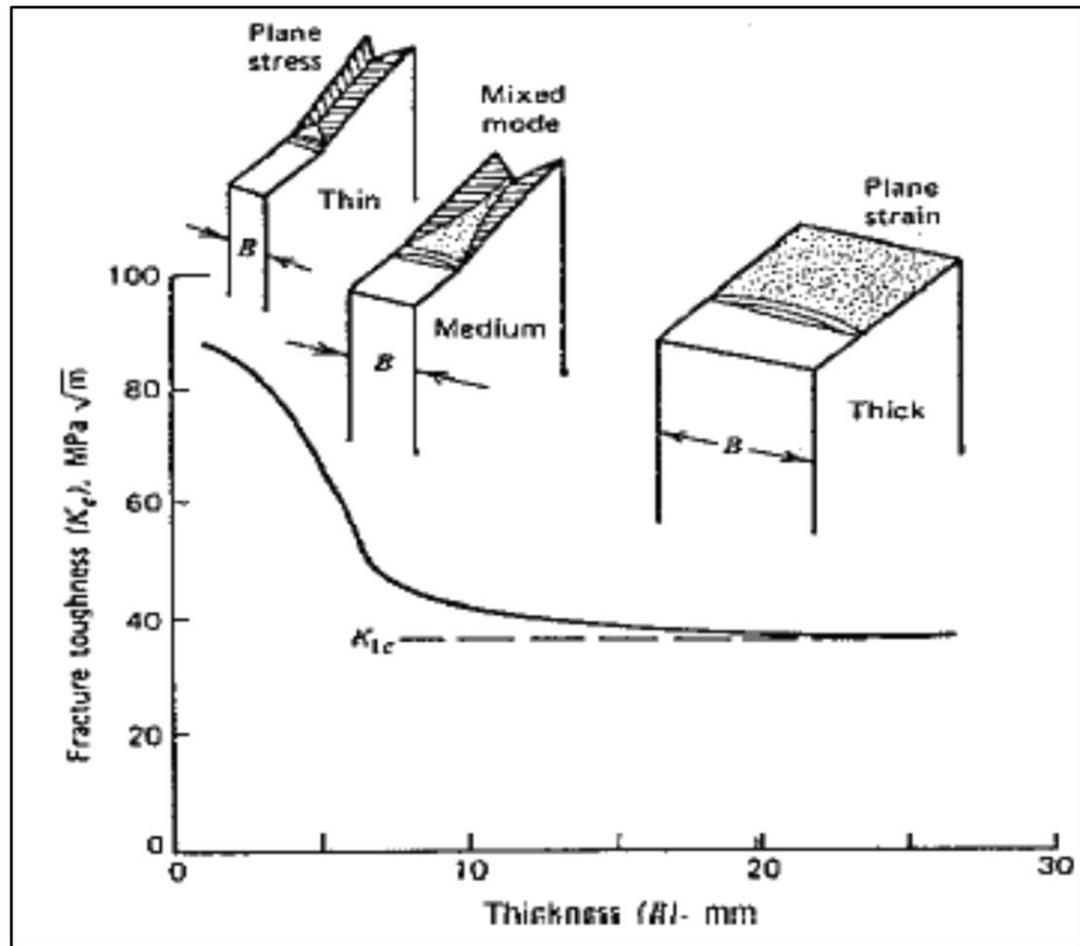
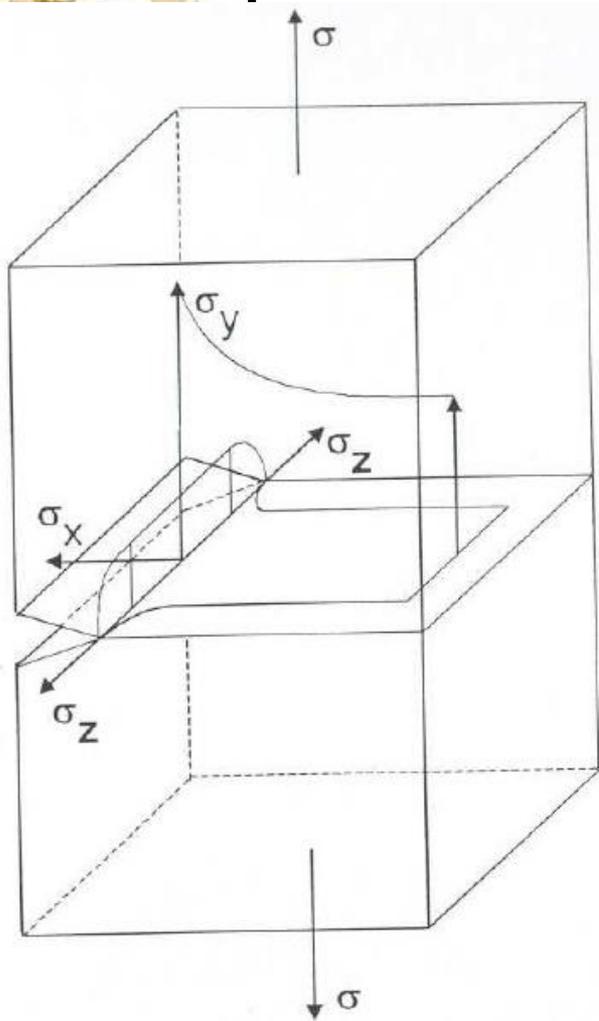




## TITANIC- ABRIL, 1912

- **Desconhecimento da Mecânica de Fratura:**
- **Temperatura de transição frágil-dúctil é levantado com cp de impacto- secção de (10x10)mm;**
- **Baseados nisso aumentaram a espessura das chapas para construção no navio (50mm)- maior espessura- estado plano de tensões passa para estado plano de deformações-aumenta a criticidade do estado triaxial de tensões-reduz  $K_{IC}$ .**

# ESTADO TRIAXIAL



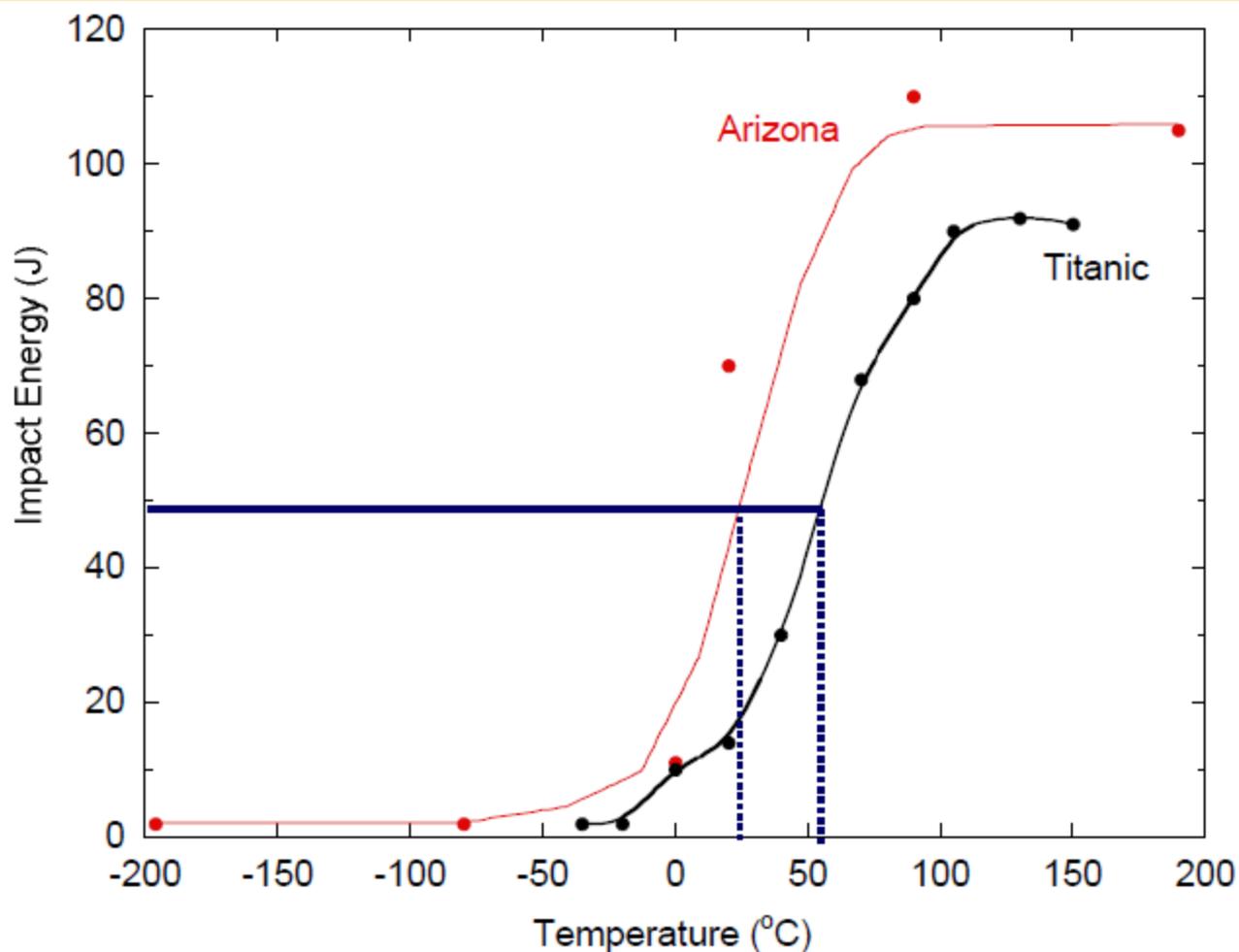


# TITANIC- ABRIL, 1912

## Análise do aço:

Material	C	Mn	P	S	Si	Cu	O	N	Mn-to-S Ratio
<i>Titanic Hull Plate</i>	0.21	0.47	0.045	0.069	0.017	0.024	0.013	0.0035	6.8:1
ASTM 36	0.20	0.55	0.012	0.037	0.007	0.01	0.079	0.0032	14.9:1

# Impact Toughness of Steel in *Titanic* vs. *U.S.S. Arizona*

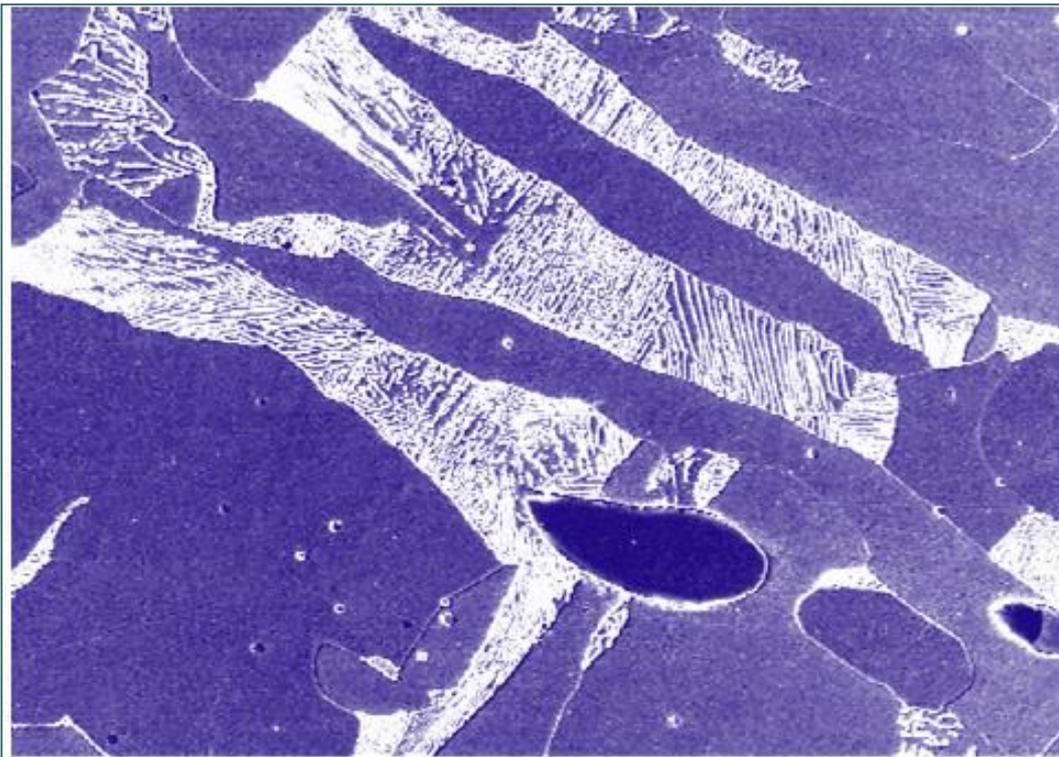


**Steel of U.S.S. Arizona had lower DBTT!**



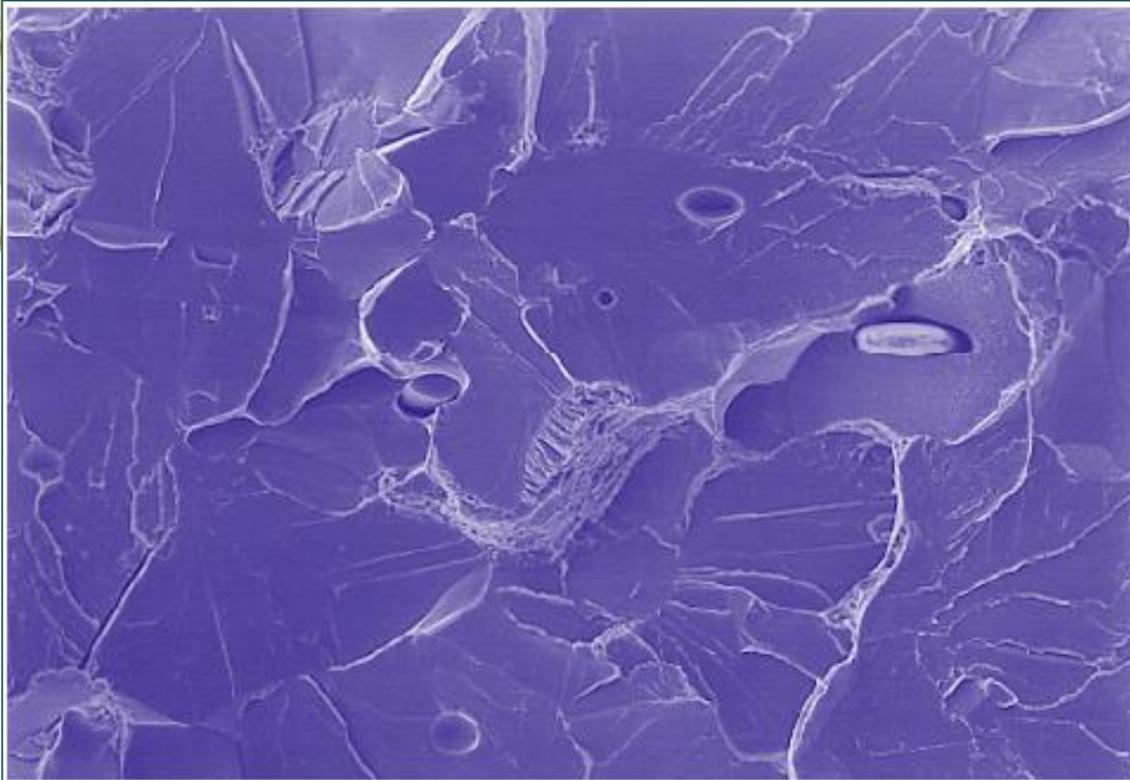
## TITANIC- ABRIL, 1912

- Pela composição química, a baixa relação Mn/S leva a formação de mais MnS, o que aumenta a fragilidade e aumenta a temperatura de transição frágil-dútil;
- O aço do Titanic era semi- acalmado, baixa desoxidação, o que fragiliza o aço;
- Foram encontrados sulfetos tanto na micrografia da estrutura quanto na superfície de fratura, na análise de MEV.



10  $\mu\text{m}$

Figure 4. A scanning electron micrograph of the etched surface of the *Titanic* hull steel showing pearlite colonies, ferrite grains, an elongated MnS particle, and nonmetallic inclusions. Etchant is 2% Nital.



20  $\mu\text{m}$

Figure 5. A scanning electron micrograph of a Charpy impact fracture surface newly created at 0°C, showing cleavage planes containing ledges and protruding MnS particles.

**MICROMECHANISMO DE FRATURA POR CLIVAGEM E QUASE-CLIVAGEM DEMONSTRAM QUE O SULFETO NÃO FOI O CAUSADOR DA FRATURA. FOSSE ESTE O CASO HAVERIA A OCORRÊNCIA DE DIMPLES.**

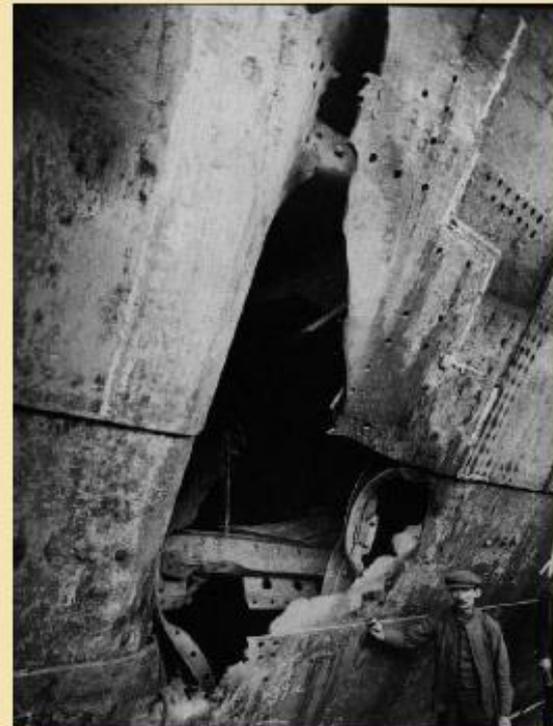
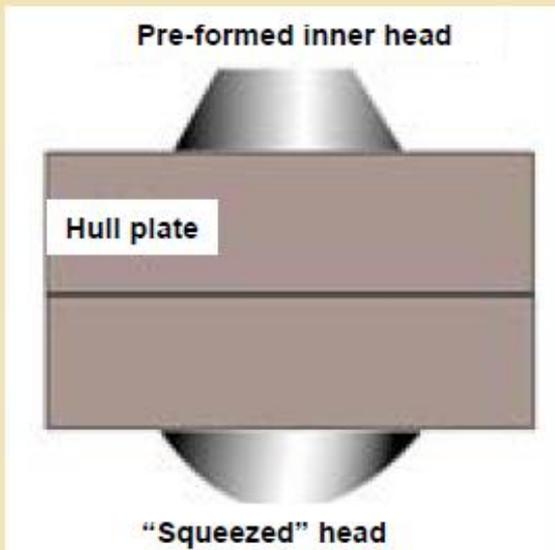


## TITANIC- ABRIL, 1912

**Conclusion #1: The brittle steel theory is wrong.**

- **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 alongamento do ensaio de tração está muito bom, retirado de outra região, provavelmente;**
- **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.**

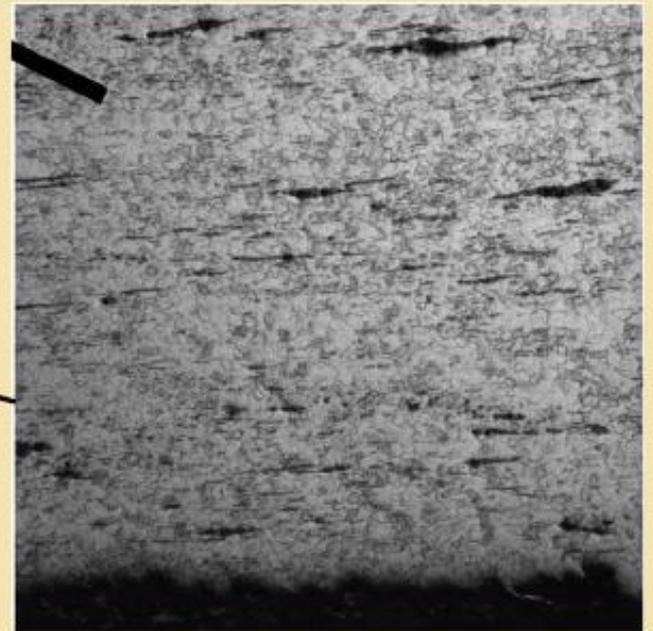
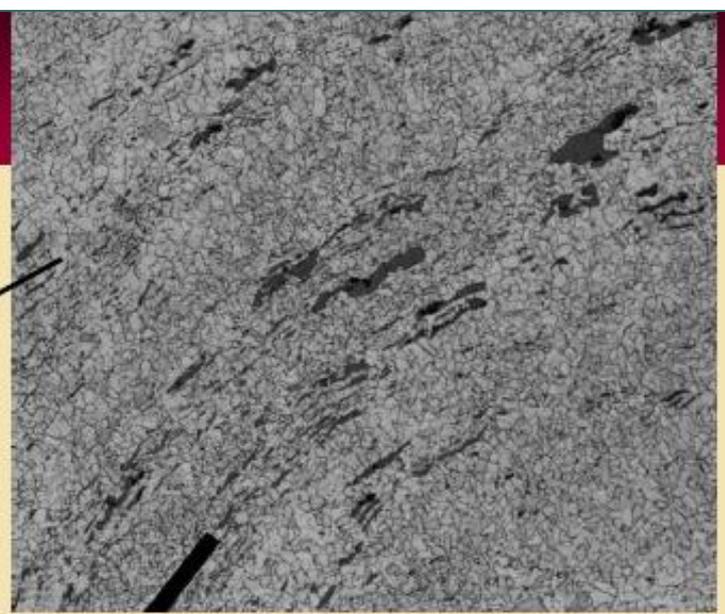
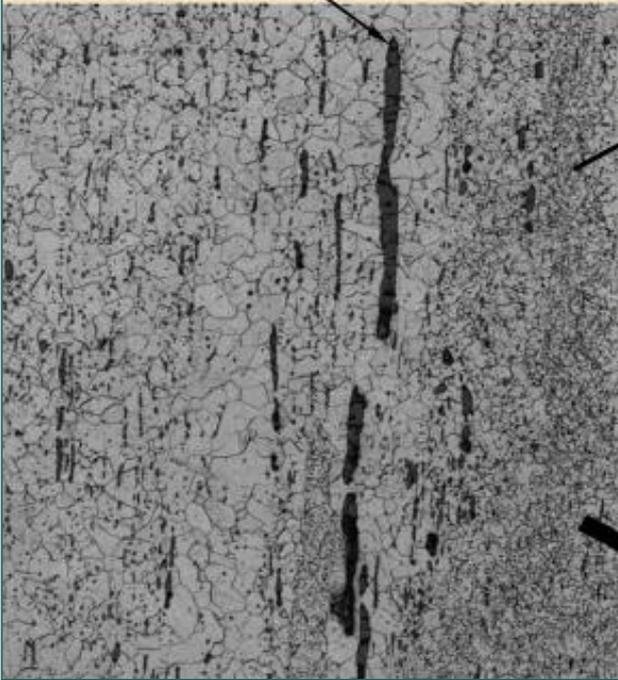
# TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES



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

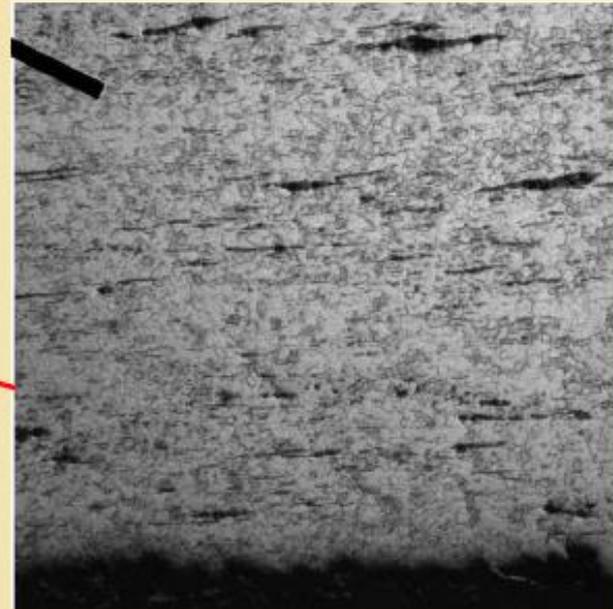
# Microstructure of Titanic Rivet

Fe-silicate "stringers"



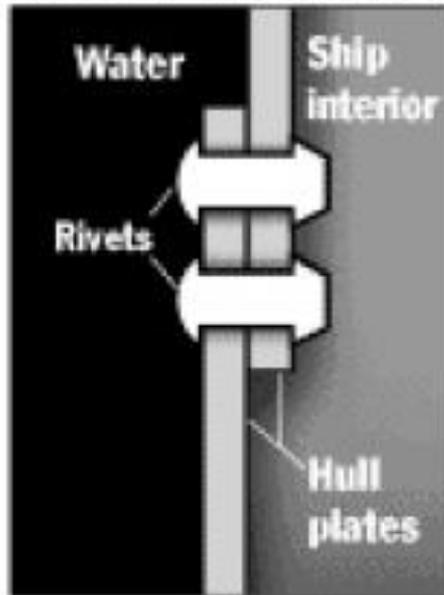
## Microstructure of Titanic Rivet

- 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 dos rebites:**

- **“A natureza do impacto não usual”;**
- **Presença de grande quantidade de silicatos em sua estrutura.**



## **APÓS TITANIC**

**Desenvolvimento da Mecânica de Fratura**

**Desenvolvimento dos ensaio de ultrassom**



**FIM**