



Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e
Automobilística

ENSAIO DE DUREZA E DE IMPACTO

Engenharia e Ciência dos Materiais I

Profa. Dra. Luralice Canale

Prof. Dr. Cassius O.F.T. Ruckert



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



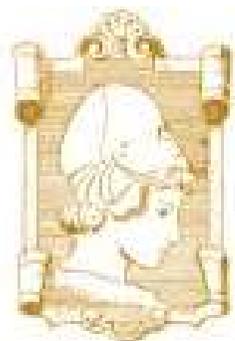
Dureza

Principais objetivos:

- ✓ Conhecimento das resistências mecânica e ao desgaste;
- ✓ Controle de qualidade nos processos de conformação plástica e nas condições de fabricação;
- ✓ Verificação das condições de tratamento térmico.

Métodos de medição:

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



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.

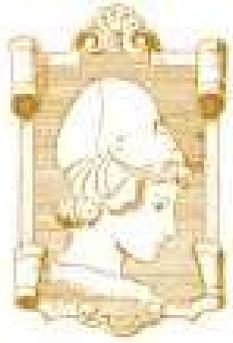
Curiosidade Escala Mohs (1822)	
1	– Talco
2	– Gipsita
3	– Calcita
4	– Fluorita
5	– Apatita
6	– Feldspato (ortóssio)
7	– Quartzo
8	– Topázio
9	– Safira e corindo
10	– Diamante

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 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



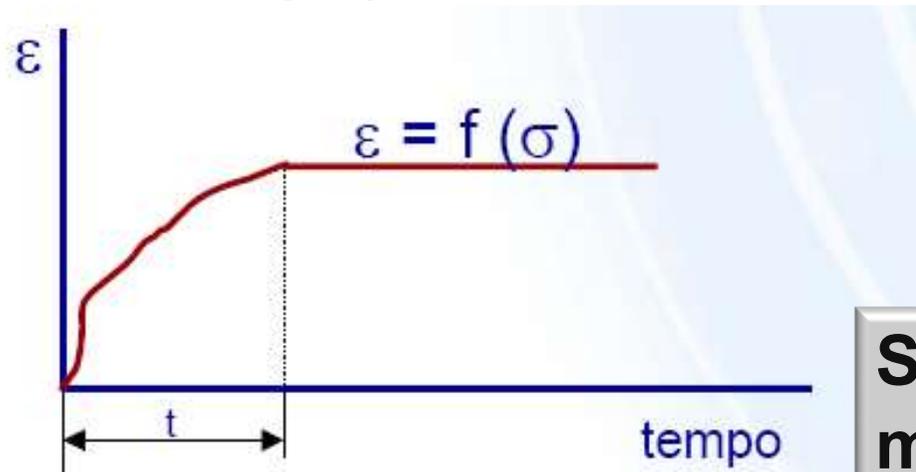
Portáteis



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).

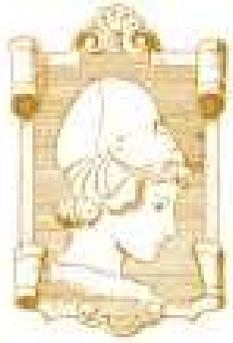


Valores de t:

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 .

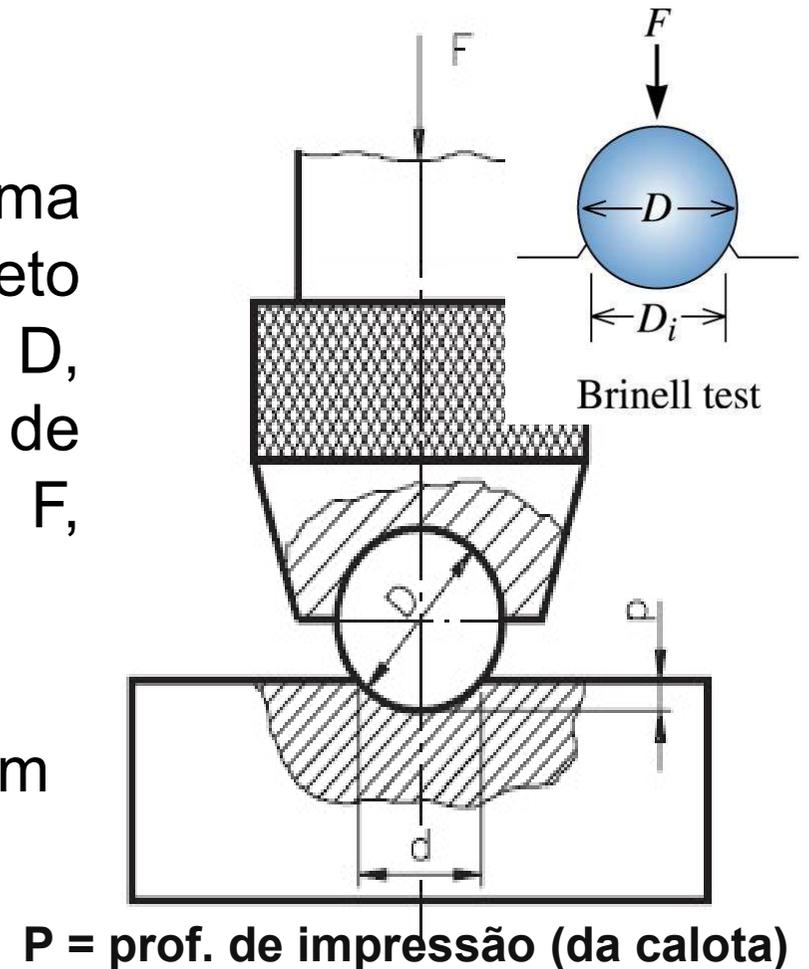
Penetrador esférico ϕ : 1,2 ,5 ou 10 mm

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





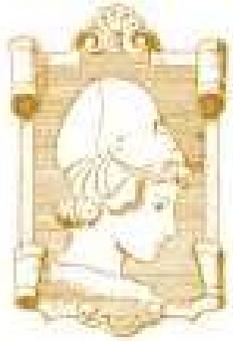
Relação carga (F) – diâmetro do penetrador (D)

A relação carga aplicada e diâmetro do penetrador é dada por:

$$\frac{F}{D^2} = K = Cte. \quad \text{(Fator de carga)}$$

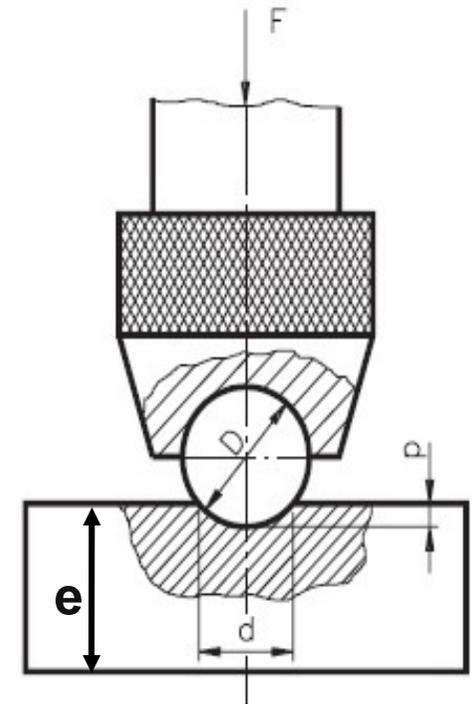
$\frac{F}{D^2}$	DUREZA	MATERIAIS
30	90 a 415 HB	Aços e ferros fundidos
10	30 a 140 HB	Cobre, alumínio e suas ligas mais duras
5	15 a 70 HB	Ligas antifricção, cobre, alumínio e suas ligas mais moles
2,5	até 30 HB	Chumbo, estanho, antimônio e metais-patente

Dureza Brinell



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 (kgf) = $30 D^2$	F (kgf) = $10 D^2$	F (kgf) = $5 D^2$	F (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

Dureza Brinell

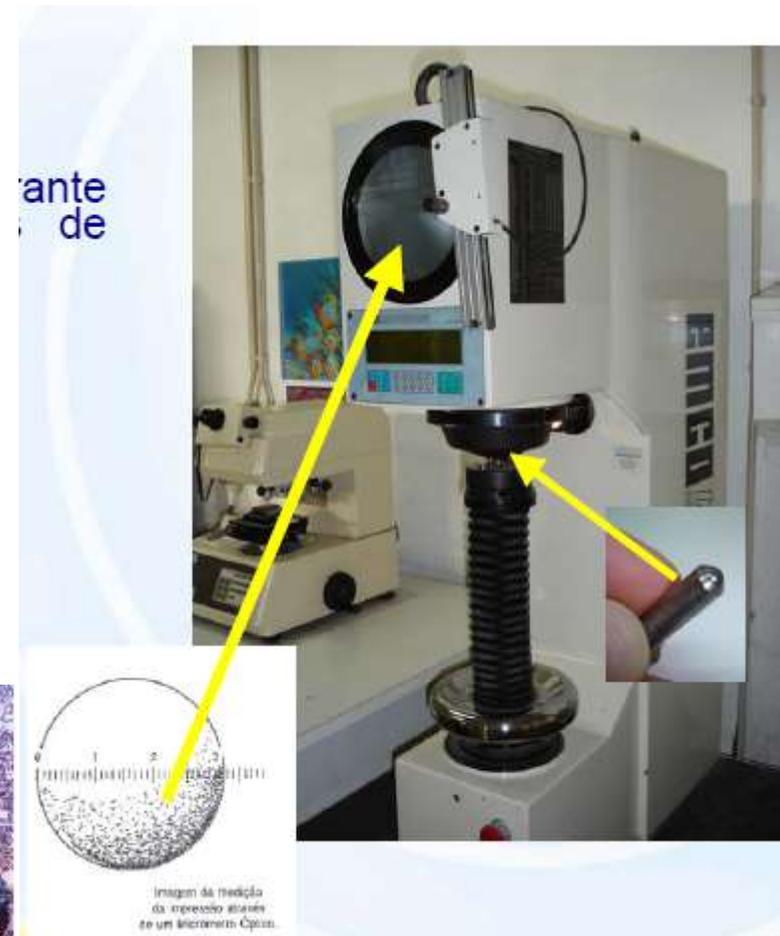
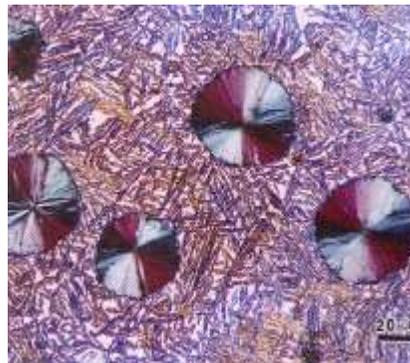


Mecanismo de Medição Brinell

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

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

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



Dureza Brinell



Relação entre dureza Brinell e limite de resistência

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, 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.



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:

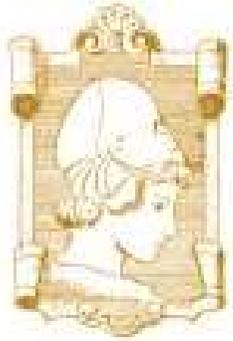
- Não é aplicável em peças muito finas e em materiais muito duros;
- Método relativamente lento para a produção industrial;
- A impressão obtida é muito grande para peças acabadas.



Dureza Rockwell (HR) - 1922

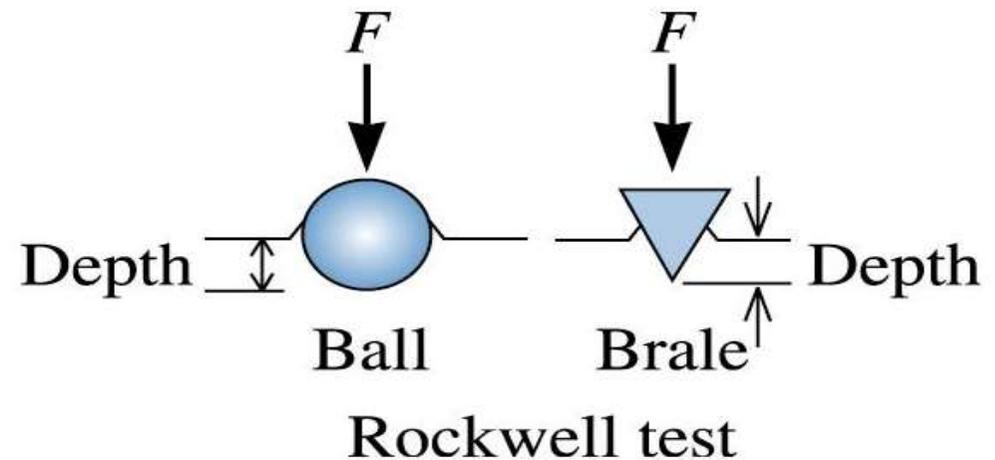
- Método mais utilizado para se medir dureza
- Elimina o tempo necessário para a medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado é diretamente lido na máquina de ensaio, sendo portanto rápido e livre de erros humanos;
- Fácil execução, facilidade em detectar pequenas diferenças de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





Método de Medição Rockwell

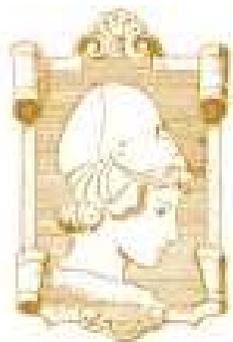
- Índice (HR) é determinado pela diferença na profundidade de penetração de uma carga inicial (pré-carga) seguida de uma carga principal.



- 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 ϕ : 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 pol.
- Penetradores cônicos de diamante (brale) usado para materiais mais duros



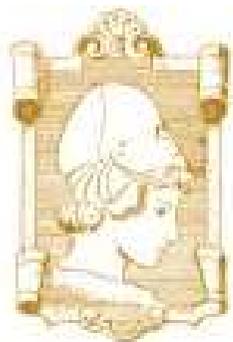
Indicações de aplicação do Ensaio de Dureza Rockwell

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

$$F = F_0 + F_1$$

Metais macios e outros materiais finos muito moles, inclusive plásticos.

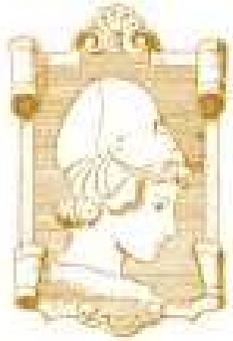
pré-carga F_0 de 10 kgf.



Indicações de aplicação do Ensaio de Dureza Superficial Rockwell

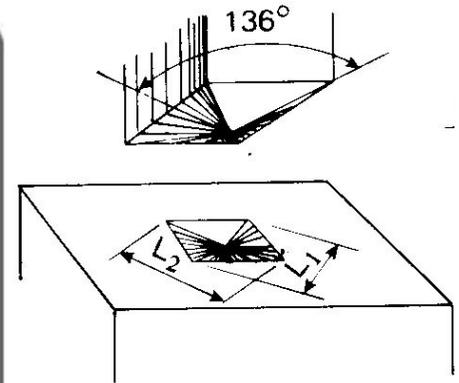
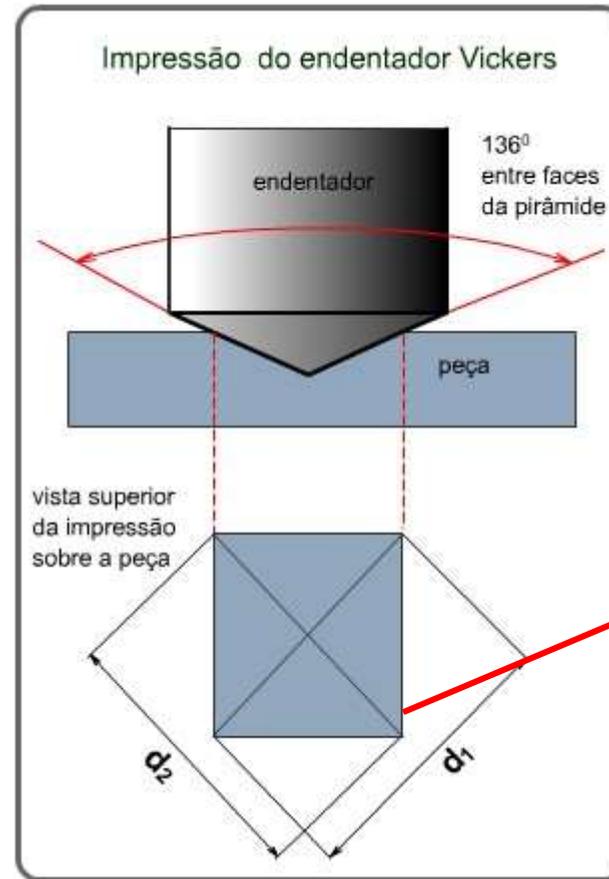
Escala	Tipo de Endentador	Carga Maior F_1 (kgf)	Aplicação
HR 15 N	Cone Diamante 120°	12	Metal duro, aços com pouca espessura, aços com endurecimento superficial
HR 30 N	Cone Diamante 120°	27	Aço, ferro fundido duro, ferro fund maleável, titânio, aço com endurecimento profundo, outros materiais mais duros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

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° feita de diamante;
- Adequado para regiões pequenas e selecionadas do corpo de prova;
- Impressão é observada em um microscópio e medida.



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

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



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.

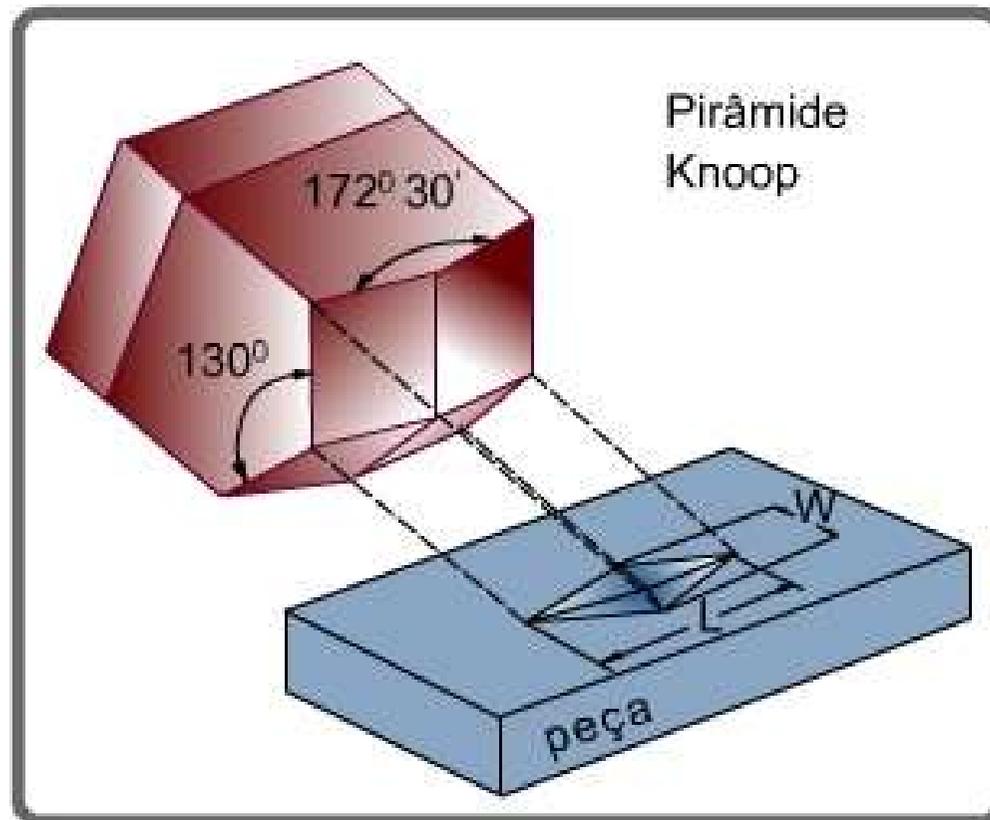
Limitações:

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

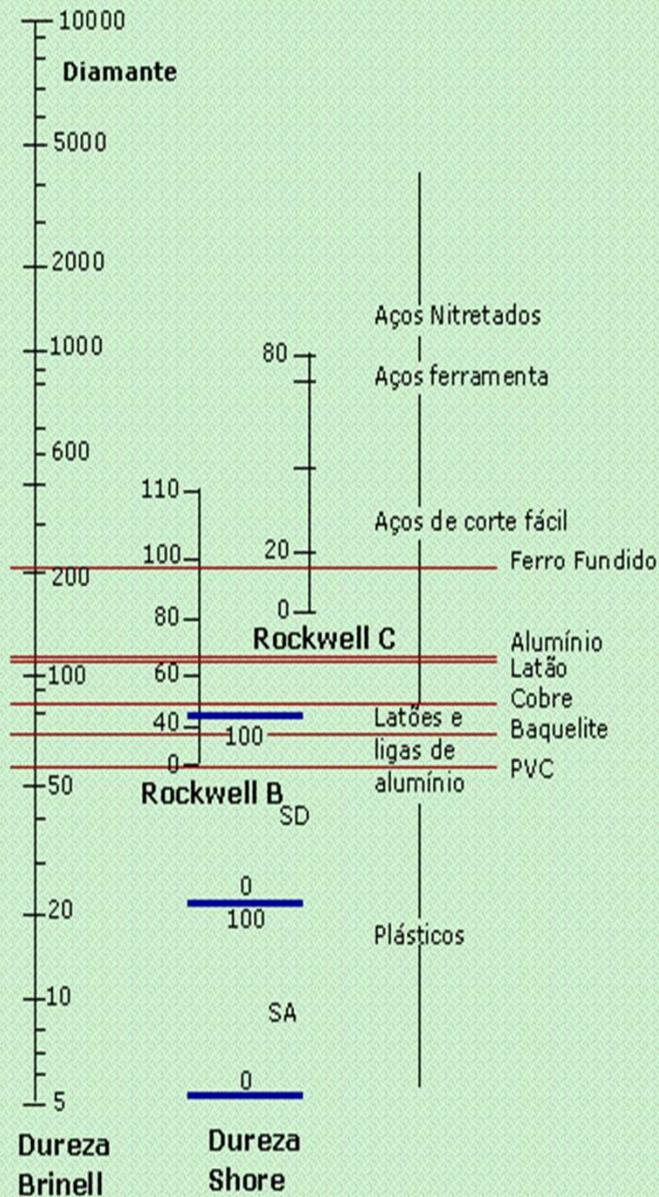


Ensaaios de dureza Knoop

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



Comparação aproximada de escalas de dureza



Menu

Sair Vickers Shore Brinell Rockwell Resistência a Tração
Creditos

Conversão de Dureza

Norma SAE J-417 para aços

Combustol

<http://www.combustol.com.br>

Rua Estrada Turística do Jaraguá, 358 - (Km 15,5 da Via Anhanguera)
CEP: 05159-900 - São Paulo - SP Brasil
Tel: 55 (11) 3906-3000 / 3906-3052 / 3906-3002

Brinell - Esfera de Aço - 3000 kg/10mm

Dureza Brinell Esfera de aço Transformar

Carga de 3000 kg esfera de 10mm

Dureza Rockwell	Escala A	63,8
	Escala B	
	Escala C	27,1
	Escala 15N	73,4
Superficial	Escala 30N	47,8
	Escala 45N	27,9
Dureza Vickers		280
Dureza Brinell	Esfera de tungstênio	265
Dureza shore		40
Resistencia a tração	KSI	129
	Kg/mm2	90,7



Fratura

- Fratura consiste na separação de um corpo em dois em resposta a uma tensão imposta.
- São possíveis dois modos de fratura: **dúctil** e **frágil** baseado na habilidade de um material em experimentar uma deformação plástica

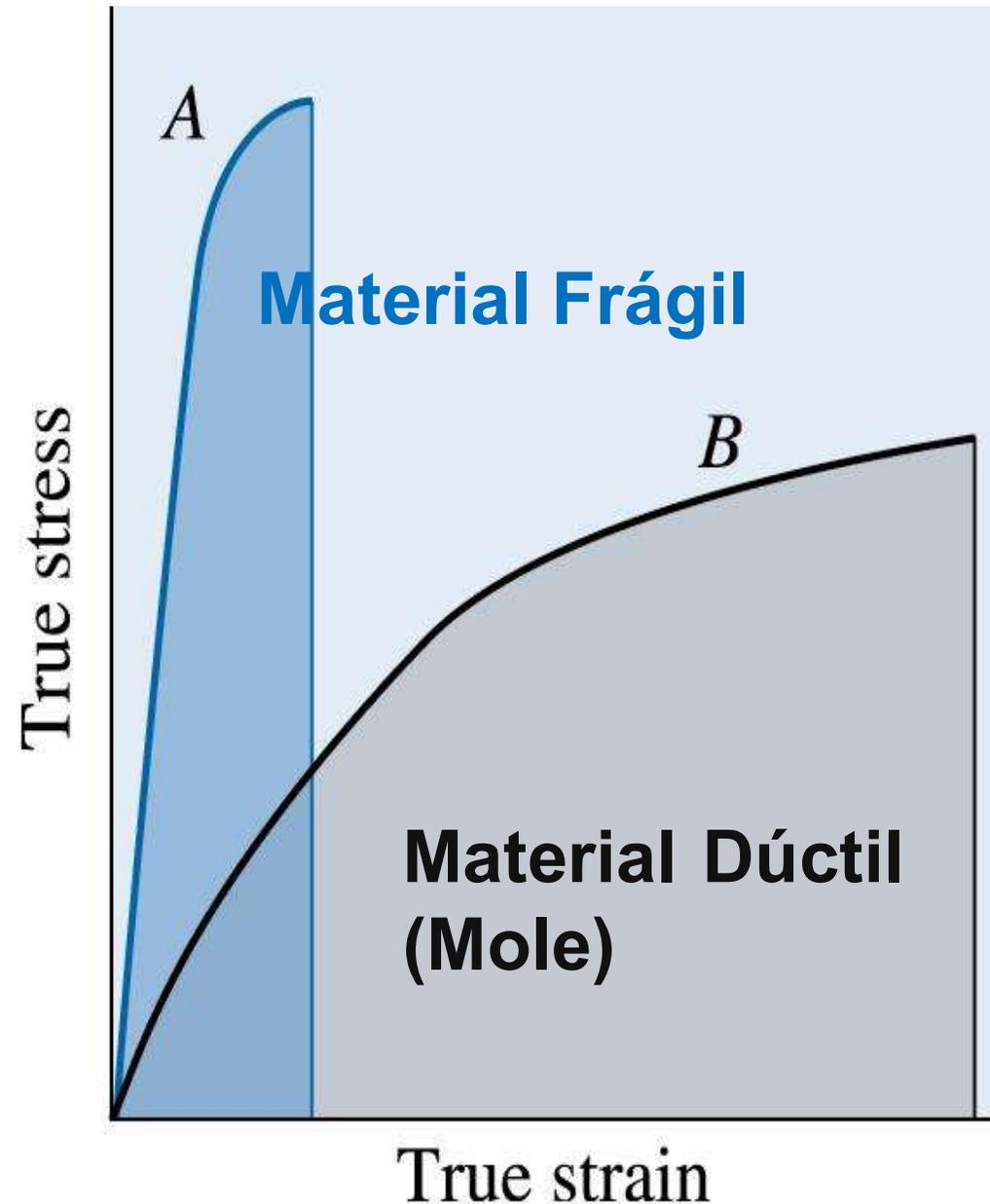


Navio petroleiro rompido catastroficamente no porto de Nova York em 1975.



Ductilidade

- Indicação de quanto uma estrutura irá se deformar antes da fratura
- Especifica o grau de deformação permissível durante operações de fabricação (extrus, Lam. etc..)
- Materiais que apresentam deformação antes da fratura inferior a 5% são chamados **frágeis**.





Fratura dúctil e frágil

O processo de fratura envolve duas etapas: formação e propagação das trincas. A modalidade da fratura é dependente do mecanismo de propagação das trincas

○ Fratura dúctil

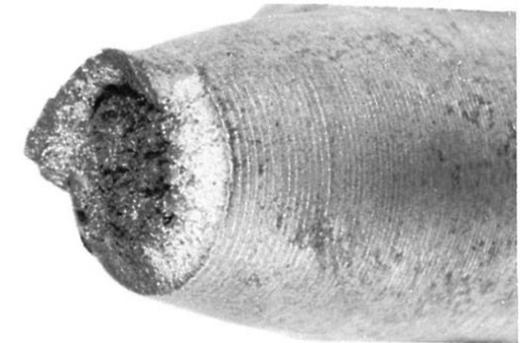
- Extensa deformação plástica na vizinhança da trinca. Processo prossegue de maneira lenta (trinca estável)
- Presença de deformação plástica dá um alerta de que uma fratura é iminente
- Mais energia de deformação é necessária pois geralmente são mais tenazes

○ Fratura frágil

- Trincas se espalham de maneira extremamente rápida com muito pouca deformação plástica (trinca instável)
- Ocorre repentinamente e catastroficamente, conseqüência da espontânea e rápida propagação de trincas

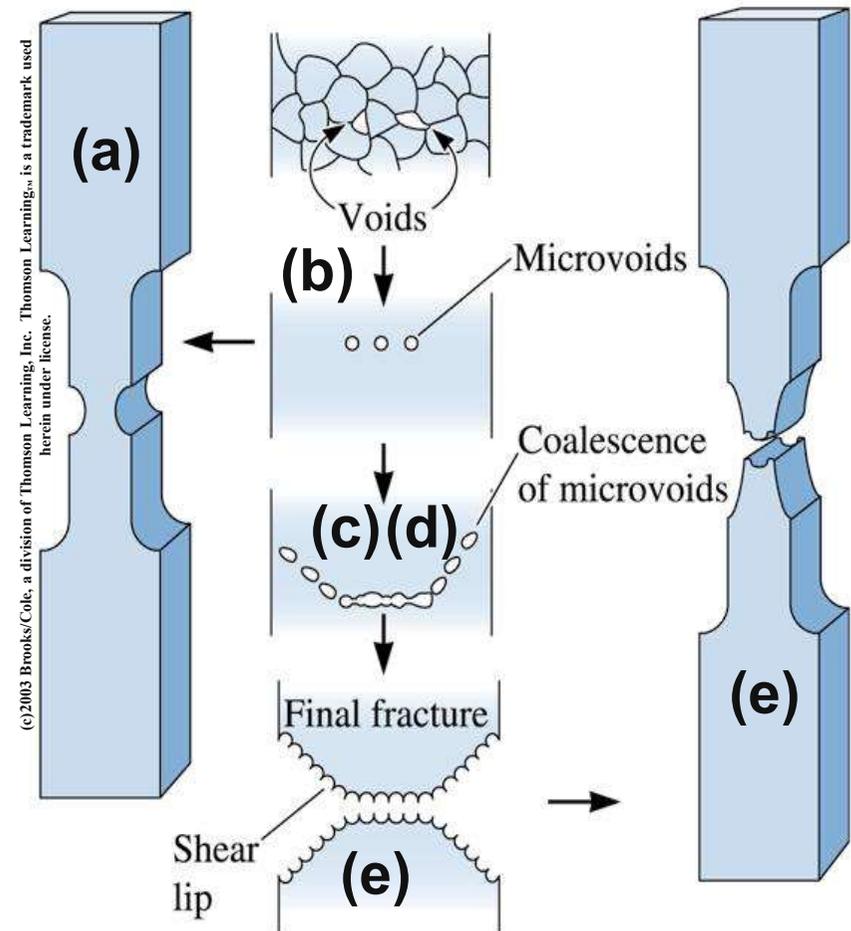


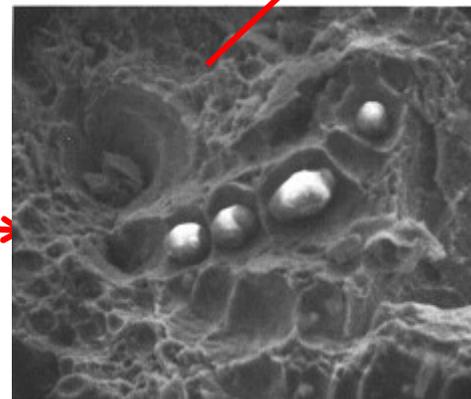
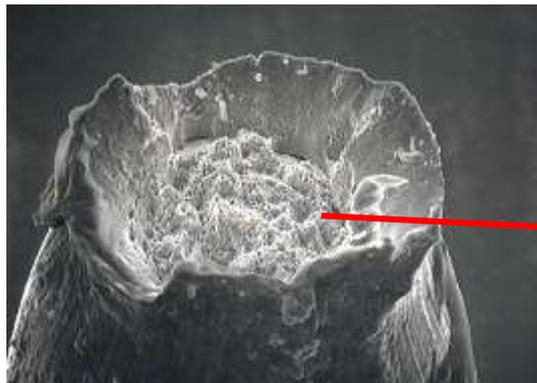
Fratura dúctil



O processo de fratura dúctil ocorre normalmente em vários estágios

- **(a)** Empescoçamento inicial
- **(b)** Pequenas cavidades ou microvazios se formam
- **(c)** Microvazios aumentam, se unem e coalescem para formar uma trinca elíptica
- **(d)** Rápida propagação da trinca
- **(e)** Fratura final por cisalhamento em um ângulo de 45° em relação à direção de tração





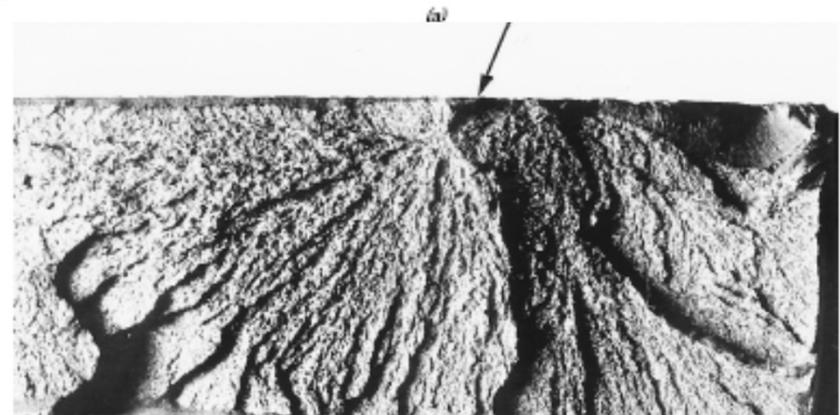
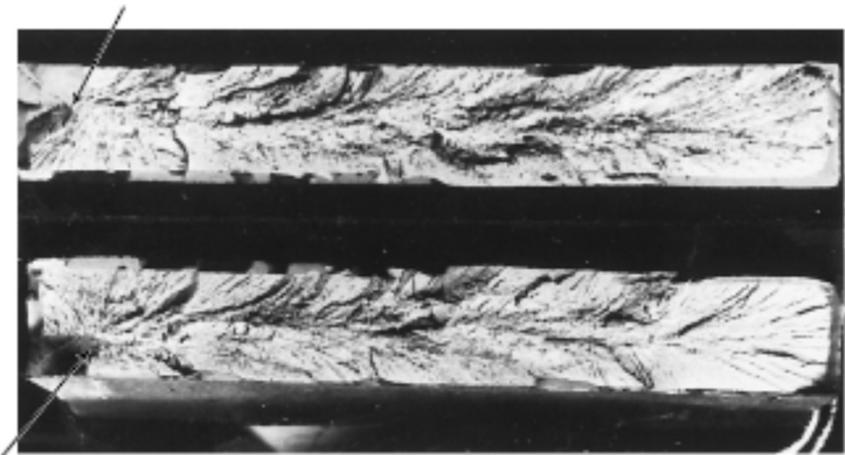


Fratura frágil



Fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e através de uma rápida propagação de trincas

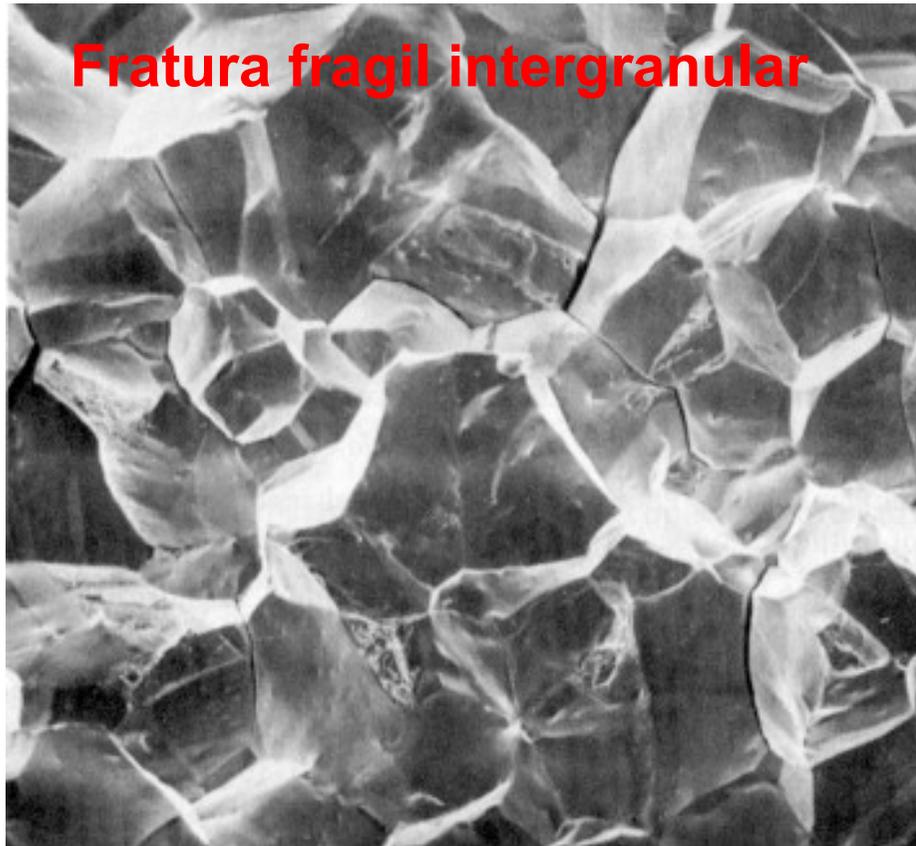
- (a) algumas peças de aço apresentam uma série de “marcas de sargento” com formato em “V” apontando para trás em direção ao ponto de iniciação de trinca
- (b) outras superfícies apresentam linhas ou nervuras que se irradiam a partir da origem da trinca em forma de leque





**Fratura fragil
transgranular (clivagem)**

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



Fratura fragil intergranular



Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto, pela sua facilidade de ensaio e baixo custo de confecção dos CPs fez dele um dos primeiros e mais empregados para o estudo de fratura frágil nos metais. Pode-se determinar a tendência de um material a se comportar de maneira frágil.

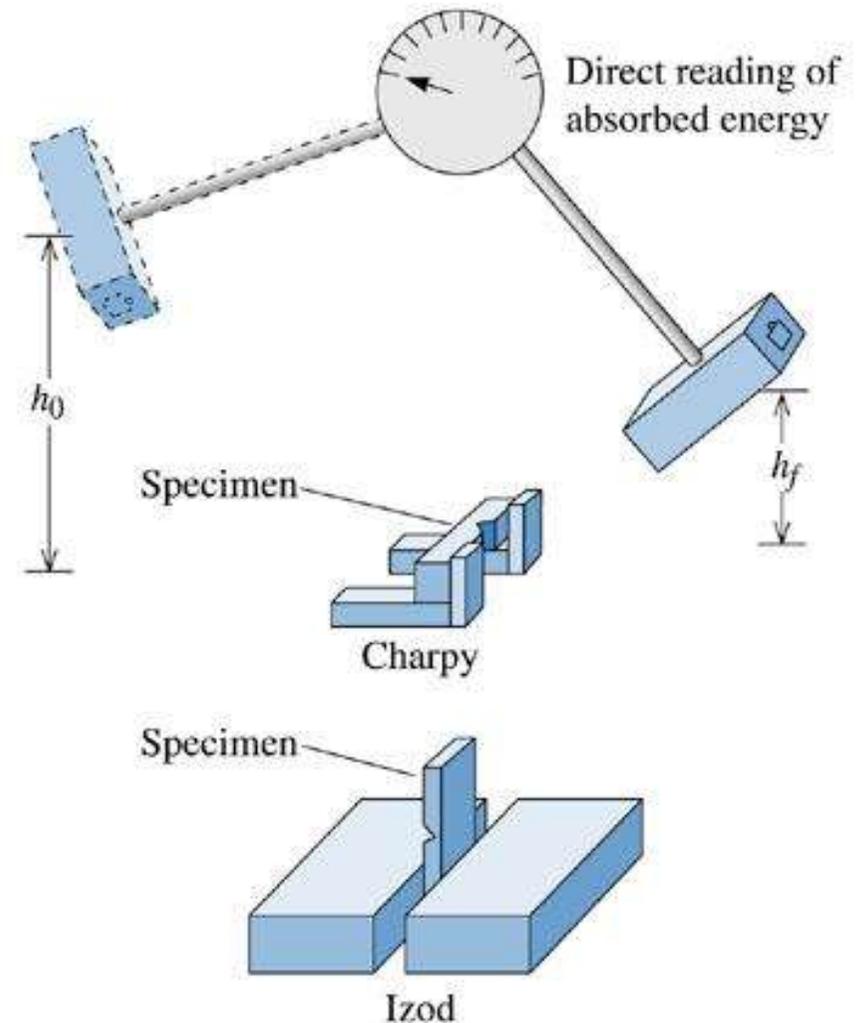
As condições escolhidas para o ensaio são as mais severas em relação ao potencial de ocorrência de uma fratura (agravam tenac)

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



Técnicas de Ensaio de Impacto: Charpy e Izod

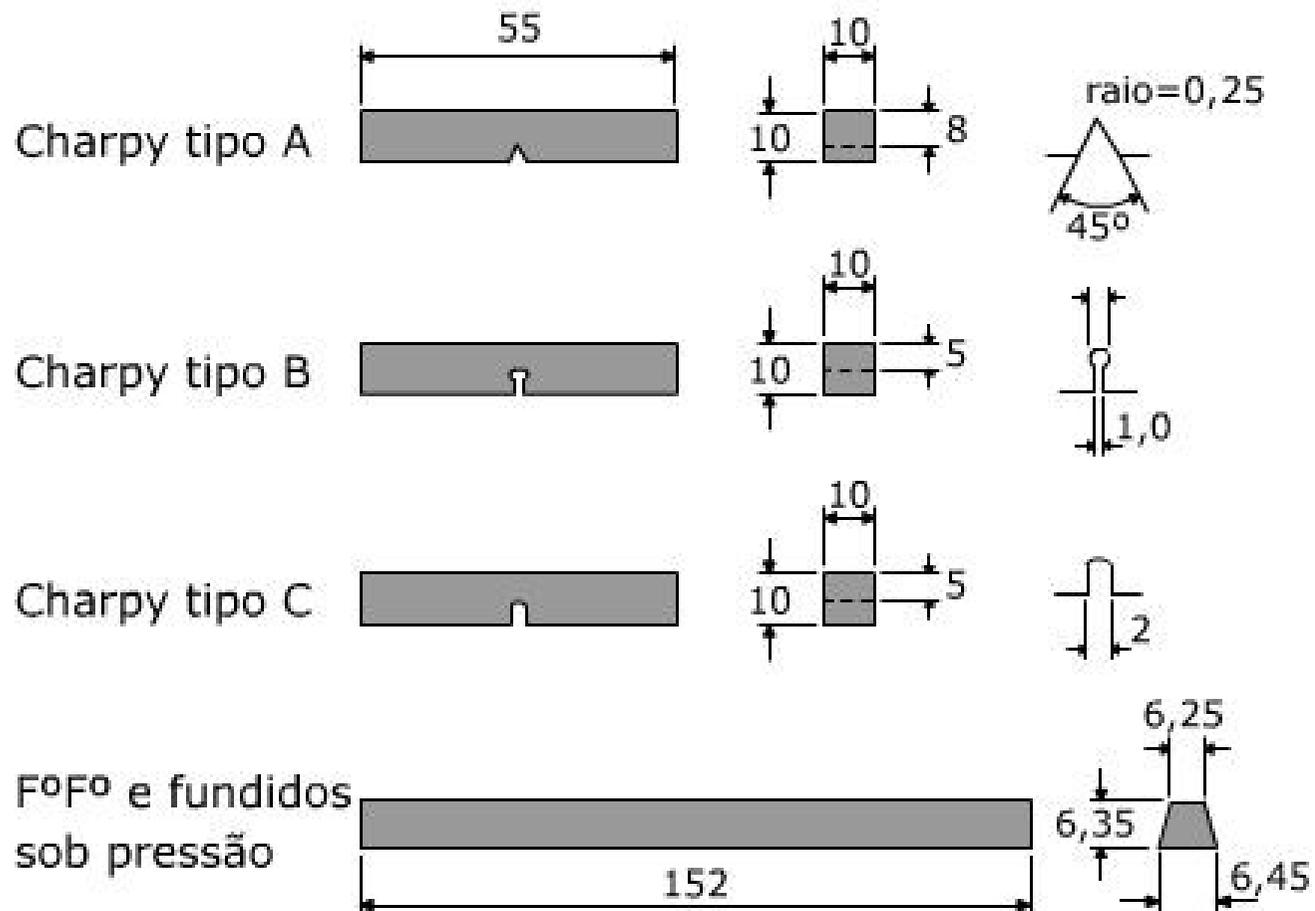
- As técnicas Charpy e Izod são utilizadas para medir a energia de impacto.
- O corpo de prova possui o formato de uma seção quadrada com um entalhe em “V”
- Diferença entre as técnicas Charpy e Izod é como o corpo de prova é sustentado
- A energia absorvida é medida através da diferença entre h e h' e corresponde à energia de impacto





Principais Configuração CPs Charpy

Todas as dimensões em mm

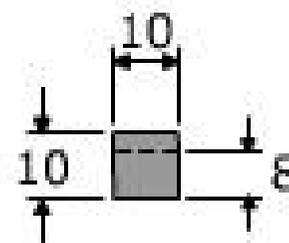
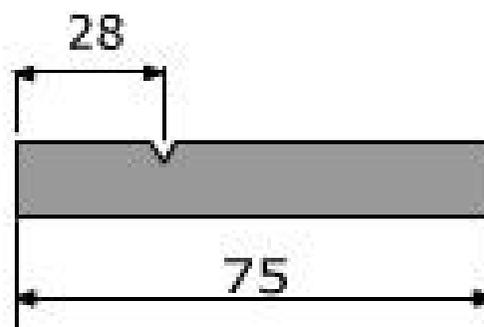




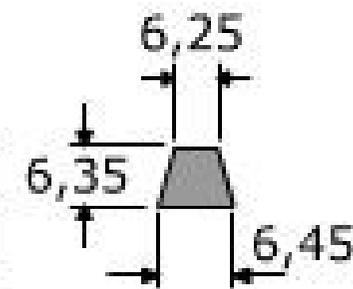
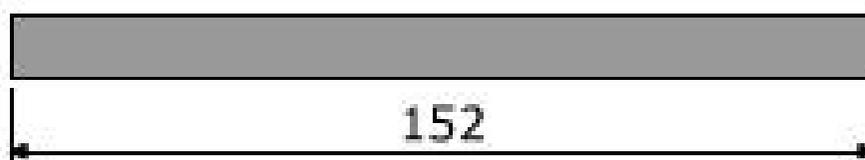
Principais Configuração CPs IZOD

Todas as dimensões em mm

Izod (tipo D)



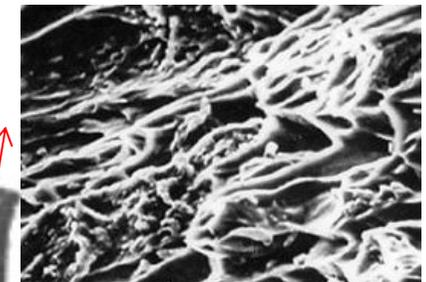
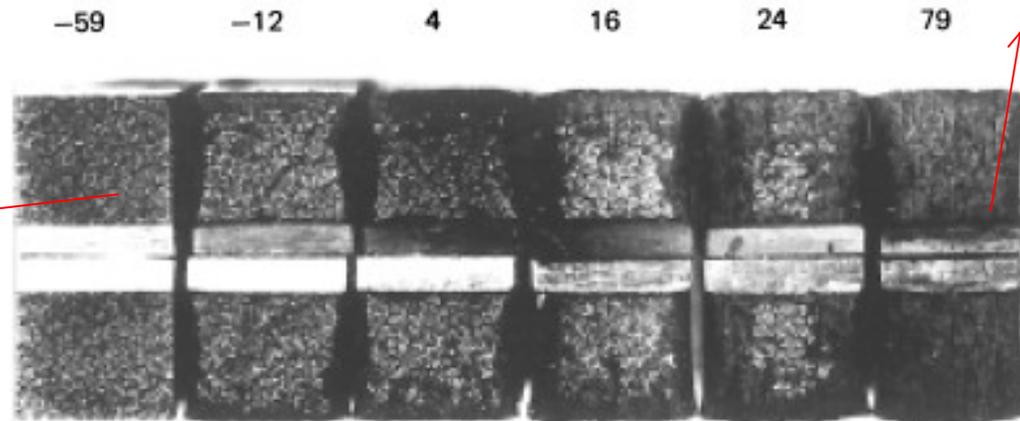
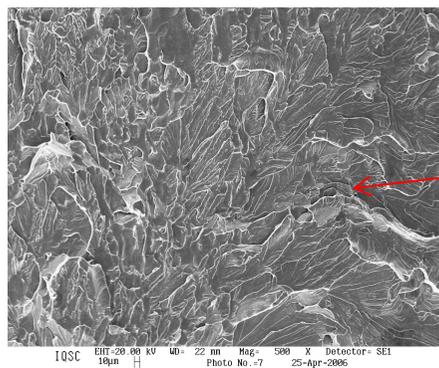
F^oF^o e fundidos sob pressão





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.

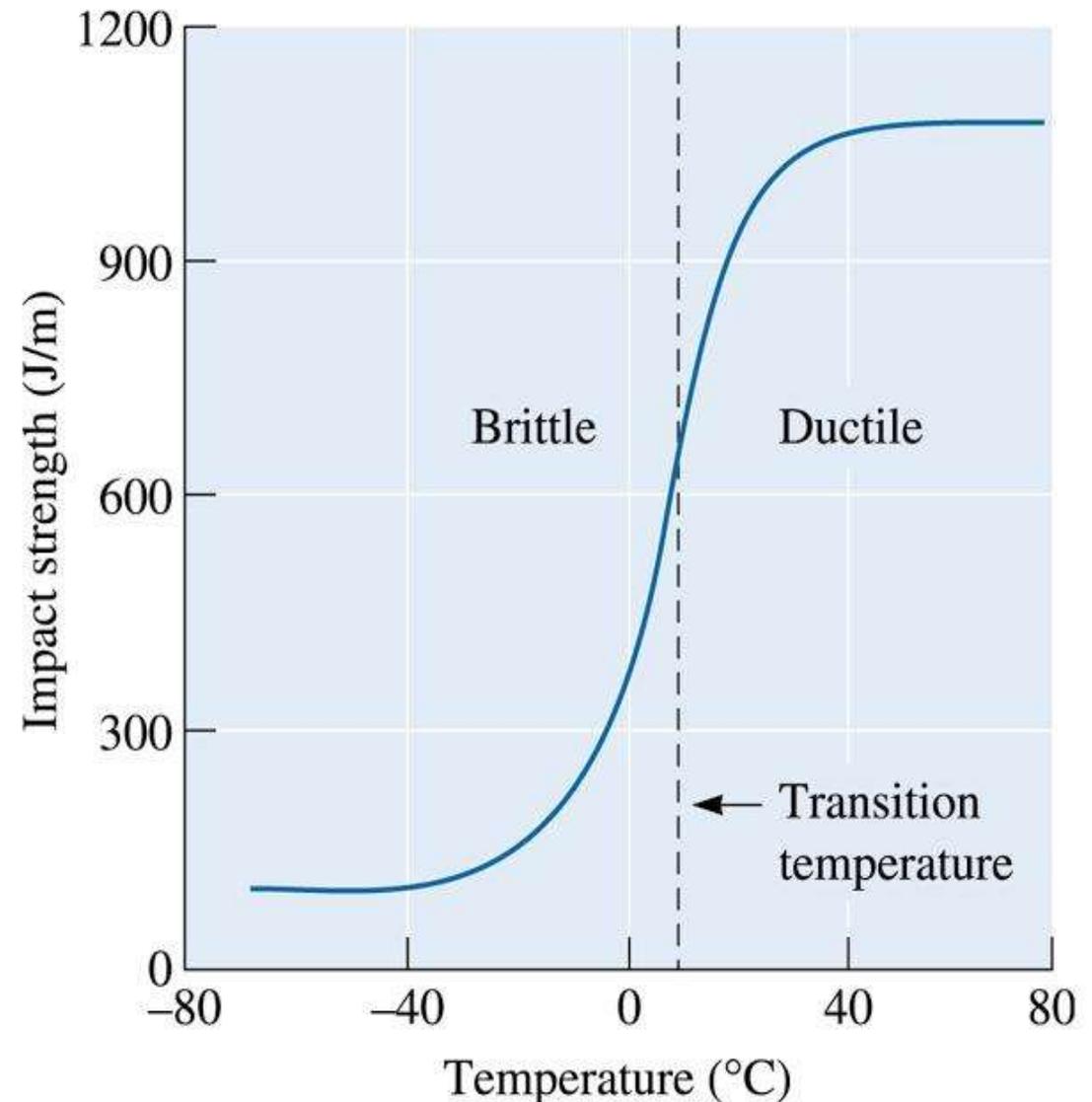


105C EHT-20.00 kV X22.00k 22mm Mag. 500X Detector-SE1
10µm Photo No.:7 25-Apr-2006



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.

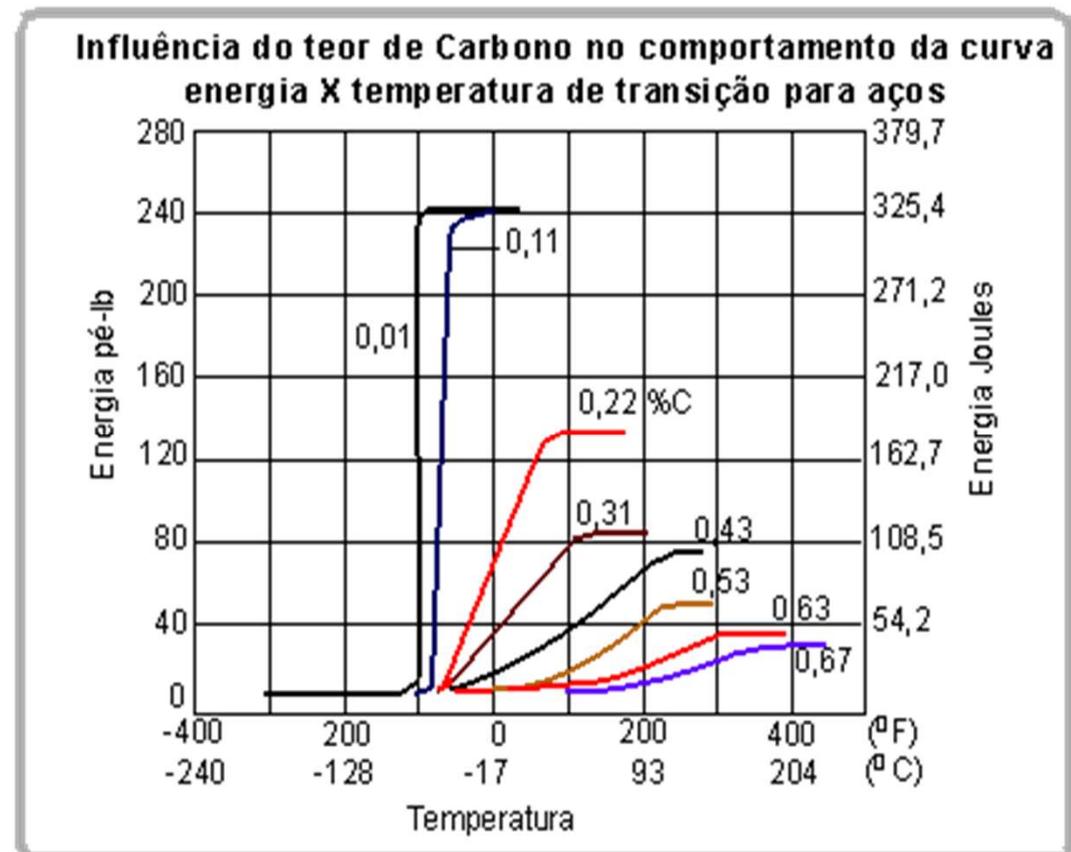




Transição Dúctil - Frágil

- 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

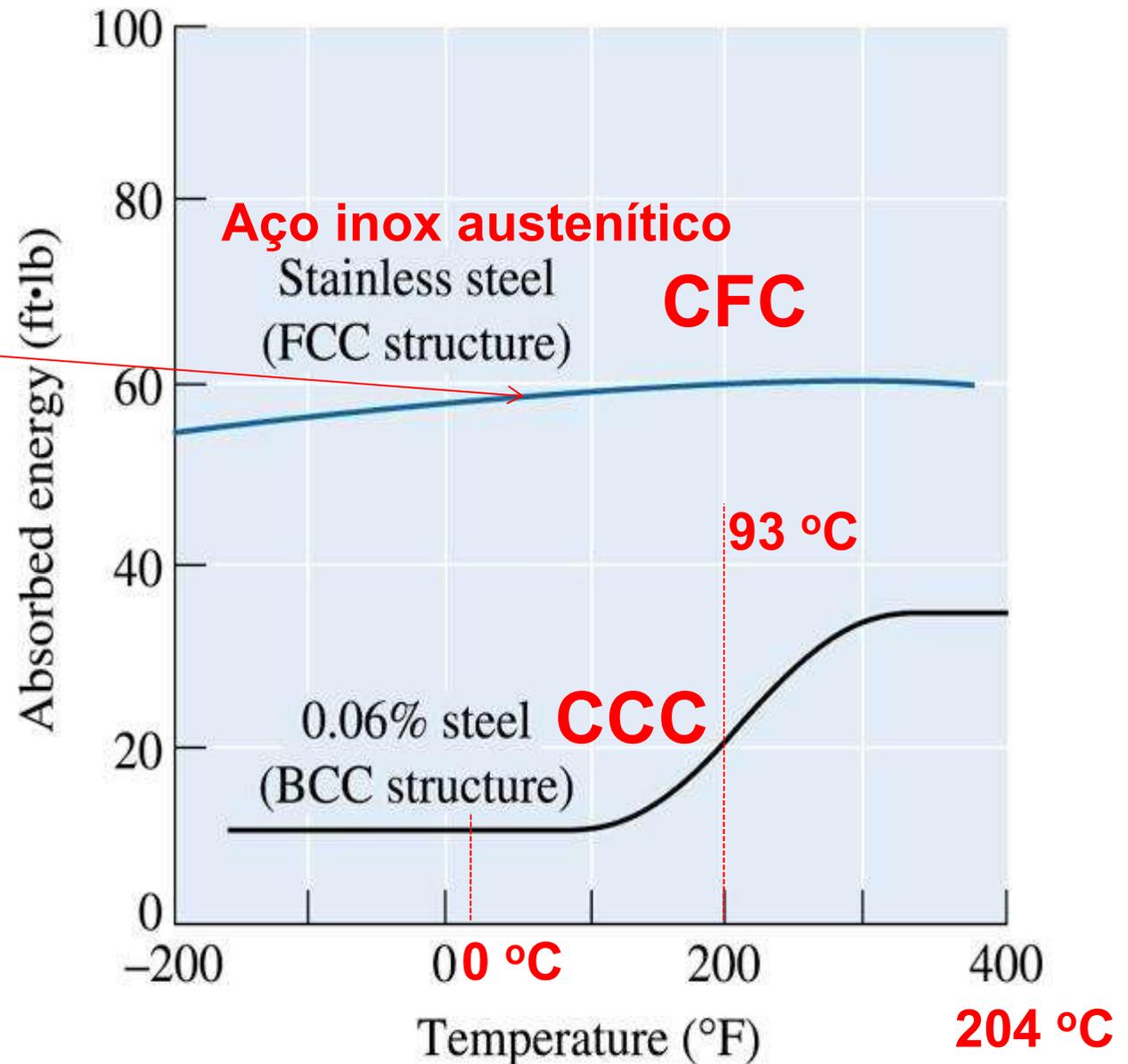




Transição Dúctil - Frágil

Não apresenta
transição
dúctil/frágil

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





Estudo de caso: TITANIC

13/04/1912



Survivor: *William Dean*

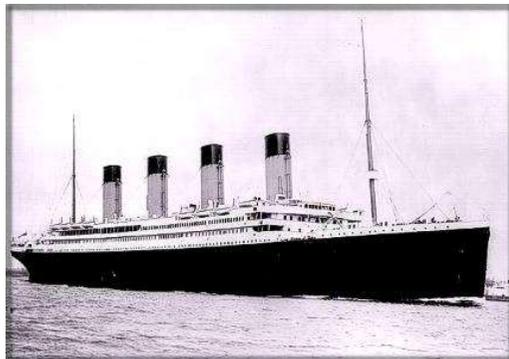
R.M.S. TITANIC *Departure from Queenstown*

Colin Verity R.S.M.A.



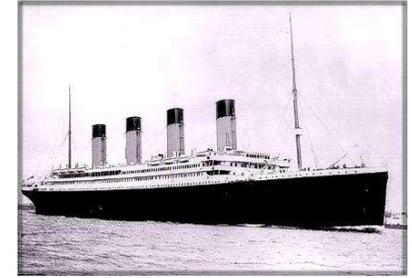
Obtenção das amostras

- Em 1996, pesquisadores utilizando submarinos robôs trouxeram pedaços de aço do casco do TITANIC para análise metalúrgica.





Composição Química

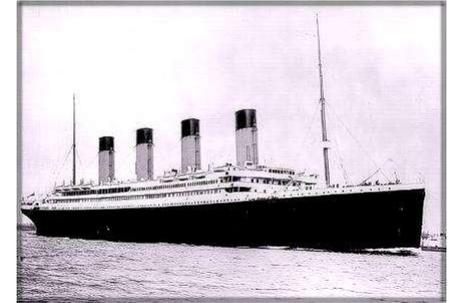


- No aço do casco do TITANIC constata-se teores elevados de P, S que associados ao baixo teor de Mn (baixa relação Mn/S) são responsáveis pela maior tendência ao comportamento frágil em baixas temperaturas .

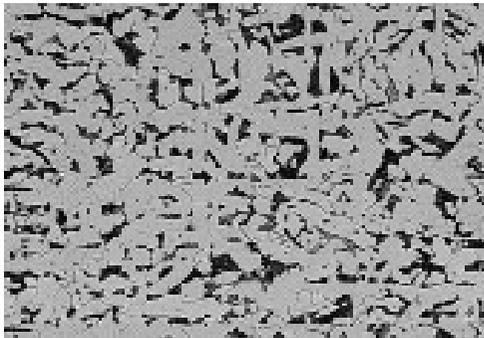
Composição do aço do <u>Titanic</u> e de aço ASTM A36									
	C	Mn	P	S	Si	Cu	O	N	<u>MnS:Ratio</u>
<u>Titanic</u> (*)	0,21	0,47	0,045	0,069	0,017	0,024	0,013	0,0035	<u>6,8:1</u>
ASTM A36	0,20	0,55	0,012	0,037	0,007	0,01	0,079	0,0032	<u>14,9:1</u>
(*) amostra extraída da placa do casco									



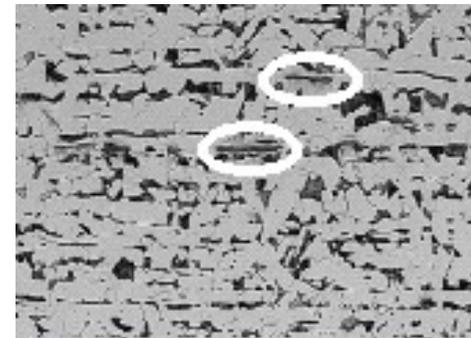
Microestrutura



- Através de análise metalográfica convencional pode-se notar severo bandeamento, principalmente na seção longitudinal.
- Na seção longitudinal constata-se também grandes quantidades de partículas de sulfeto de manganês (dentro das elipses).



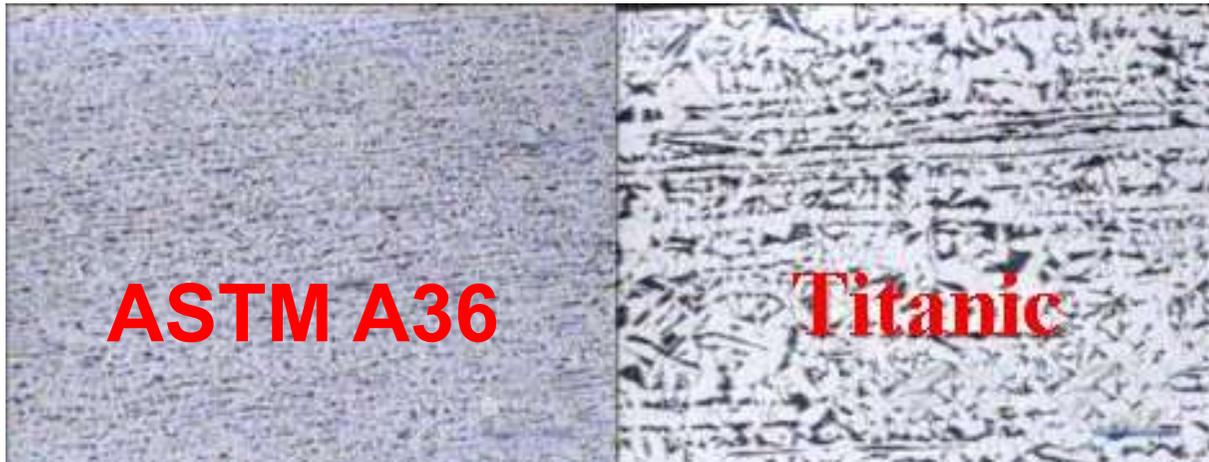
Seção transversal



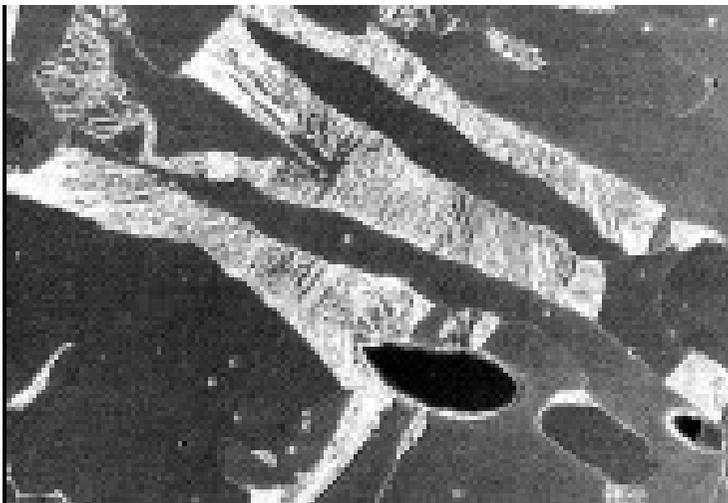
Seção longitudinal



Microestrutura (A36 x Titanic)



Na micrografia pode-se notar o tamanho de grão bem maior no aço do TITANIC em comparação ao aço A36.

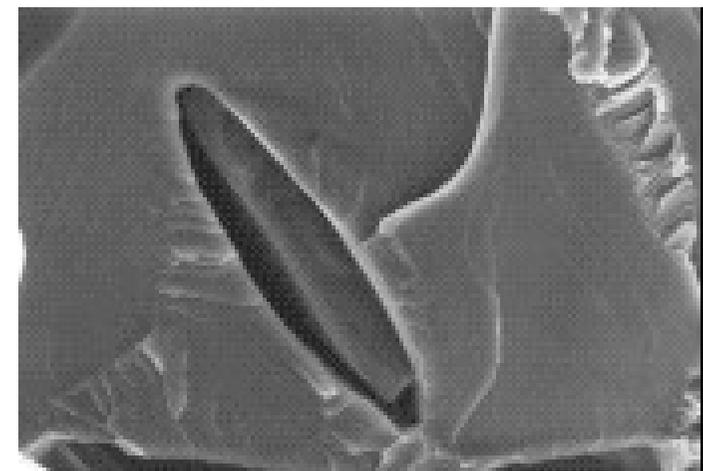


- Através da análise com um microscópio eletrônico de varredura pode-se observar partículas de MnS (estruturas elípticas)



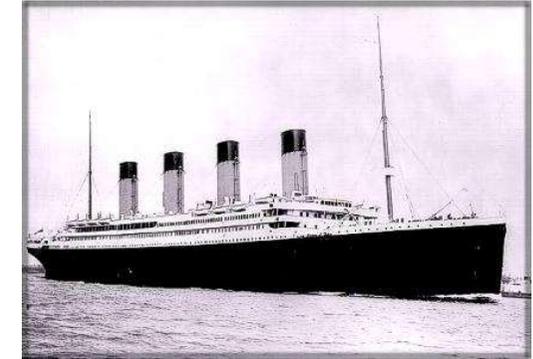
Ensaio de impacto: Charpy

- Realizou-se ensaios Charpy em uma faixa de temperaturas entre -55°C e 179°C em três séries de corpos de prova de dimensões padrão.
 - A figura ilustra uma superfície Charpy recém fraturada a 0°C . Planos de clivagem na ferrita são bastante evidentes
 - A figura ilustra uma região da superfície contendo MnS



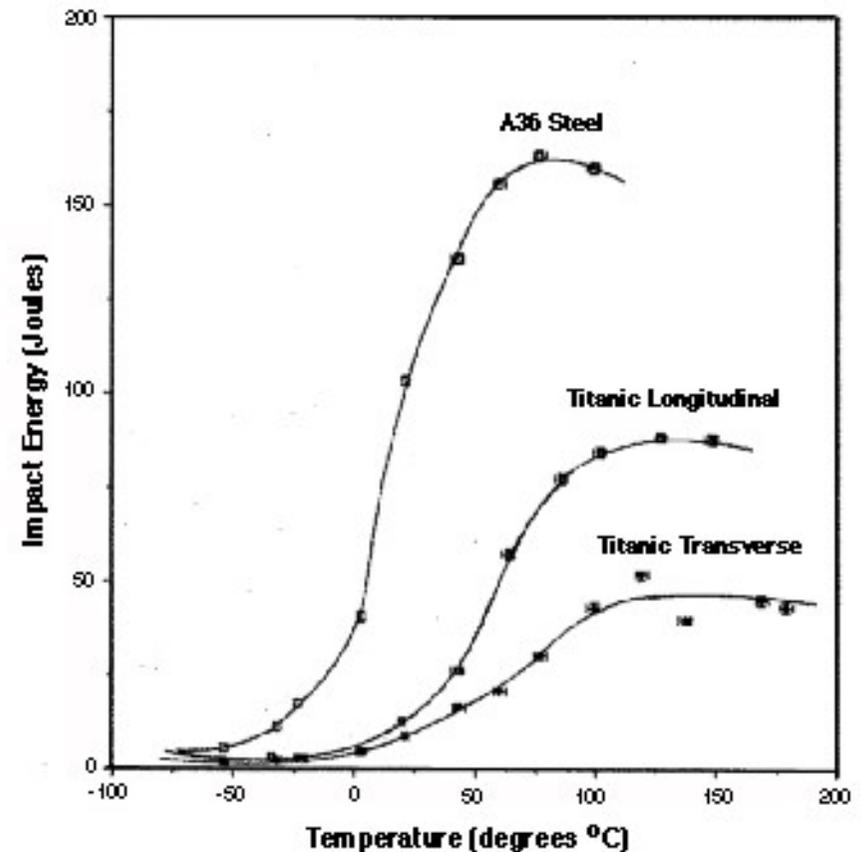


Ensaio de impacto: Charpy



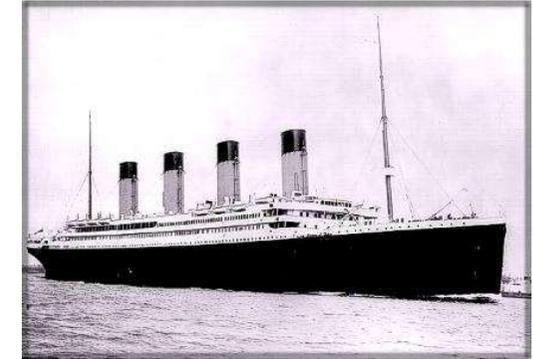
Os resultados de impacto das três séries de CPs :

- Em altas temperaturas, as amostras longitudinais do casco tem melhor propriedade que as transversais.
- Em baixa temperatura, as amostras longitudinais e transversais tem a mesma energia de impacto.
- A temperatura de transição dúctil frágil para energia de impacto de 20J é de -27°C (ASTM A 36), 32°C (casco longitudinal) e 56°C (casco transversal).
- Durante a colisão, a temperatura da água do mar era de -2°C



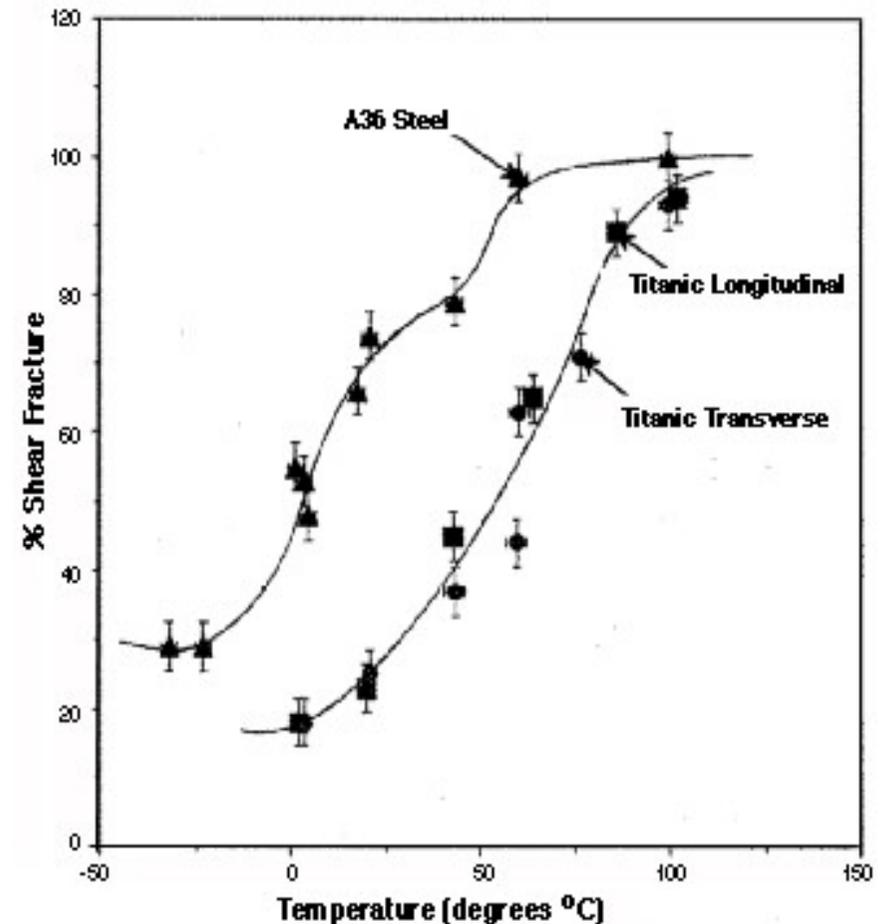


Ensaio de impacto: Charpy



Esta forma de mensurar as mudanças de tenacidade com a temperatura consiste em se avaliar o aspecto da fratura em termos de fração de área fibrosa (dúctil) em relação ao total da área transversal do corpo de prova.

Utilizando-se como referência o valor de 50 % de fratura fibrosa, as temperaturas de transição para cada amostra testada seriam de: -3°C (para ASTM A36), 49°C (casco longitudinal) e 59°C (casco transversal).





Conclusão

Fatores que contribuíram para o naufrágio do TITANIC:

- Detecção tardia da presença de iceberg (sem tempo para manobras evasivas);
- Velocidade de navegação elevada;
- Ângulo de impacto que propiciou aberturas em vários compartimentos;
- Aço com grande tendência ao comportamento frágil (porém o melhor da época).

