



Ensaio de Impacto

Helder Atassis de Carvalho

PPGEM: Materiais convencionais e avançados

Soldagem a laser em ligas de Ta-2,5W

Orientador: Prof Dr. Carlos Baptista

Coorientadora: Prof Dra. Maria Ismênia

PAE – Programa de Aperfeiçoamento de Ensino

Considerações Iniciais: Os Navios da classe Liberty (2ª Guerra Mundial)

- **Construídos para substituir os navios torpedeados pelos submarinos U-Boat nazistas, foram montados rapidamente (pouco mais de três meses) para garantir a uma linha de suprimentos para Inglaterra.**



Considerações Iniciais: Os Navios da classe Liberty (2ª Guerra Mundial)

Deslocamento: 14.245 toneladas bruta (14.474 t)

Comprimento: 135 m (441 pés 6)

Propulsão: Duas caldeiras a óleo, expansão tripla motor a vapor, eixo único, 2.500 cavalos de potência (1.864 kW)

Velocidade: 11-11,5 nós (20 a 21 km / h)

Autonomia: 23.000 milhas (37.000 km)

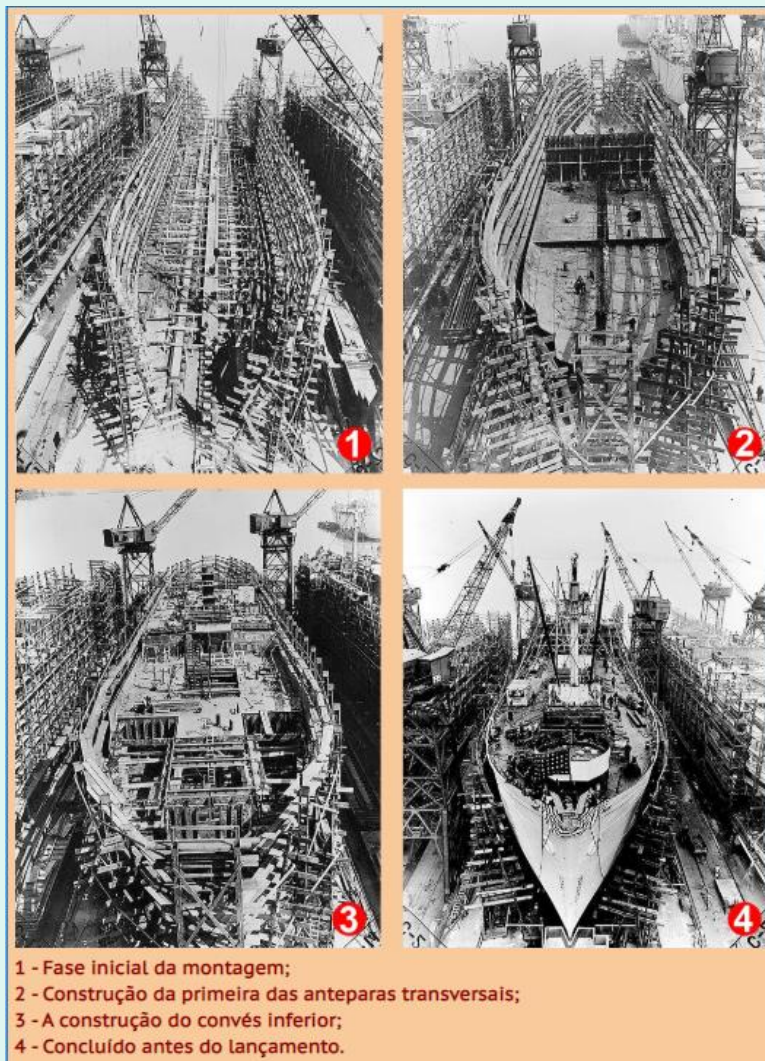
Capacidade de carga: 10.856 toneladas de porte bruto (TPB)

Tripulação: 40 - 60 homens

Armamento: 1 canhão Stern de 102 mm montado no deck para utilização contra os submarinos. Metralhadoras anti-aérea.



Considerações Iniciais: Os Navios da classe Liberty (2ª Guerra Mundial)



Considerações Iniciais: Os Navios da classe Liberty (2ª Guerra Mundial)

- Esforço de guerra exigiu que o tempo de fabricação dos navios fosse dramaticamente reduzido, para isso os navios foram SOLDADOS ao invés de rebitados.
- No ápice da construção o navio *Robert E. Peary* construído pelos estaleiros Oregon Shipbuilding Corporation de Portland / Oregon, iniciou sua construção em 08/11/1942 e foi lançado ao mar dia 15/11/1942 (uma semana). CONTROLE DE QUALIDADE INEXISTENTE.

Ou vai ou racha!!!

Considerações Iniciais: Os Navios da classe Liberty (2ª Guerra Mundial)



4694 foram construídos
1289 sofreram fratura frágil
233 fraturas catastróficas
19 navios partiram ao meio

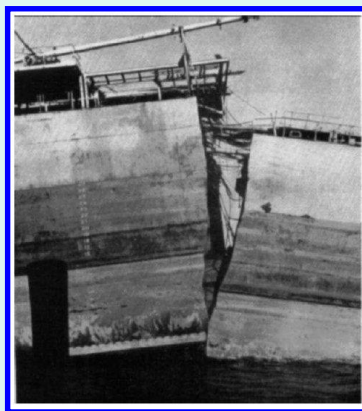
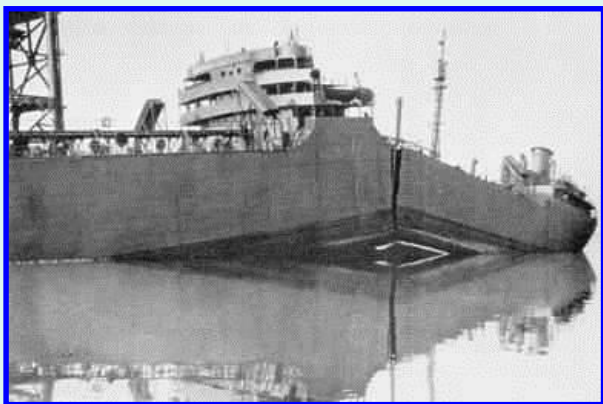
Considerações Iniciais: Os Navios da classe Liberty (2ª Guerra Mundial)

- Casco do navio eram de chapas de aço doce (normalmente dúctil), no entanto apresentou fratura frágil;
- Fraturas localizadas na solda;
- Condição climática: Inverno;
- Localização dos navios que sofreram falha: Ancorados no cais ou em mares turbulentos;
- Fatores: Baixa soldabilidade do aço e treinamento deficiente de soldadores (defeitos em juntas soldadas), Projeto deficiente (caminho preferencial para as trincas), Tensões residuais (contribuíram para a progressão da fratura).



Considerações Iniciais: Os Navios da classe Liberty (2ª Guerra Mundial)

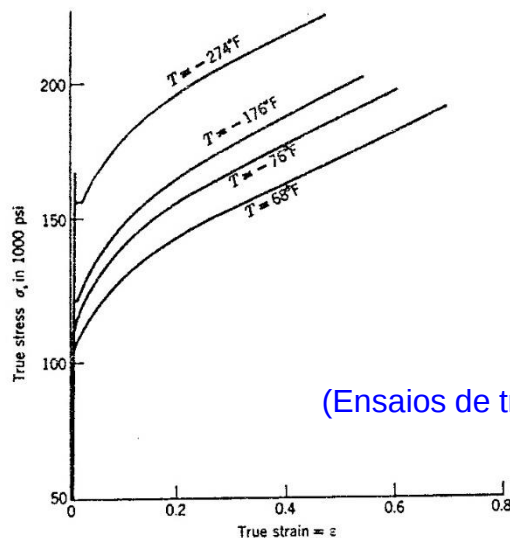
- O problema foi tão grave que a Marinha dos Estados Unidos instalou um Comitê de Investigação para determinar suas causas e formas de corrigi-lo.
- **Nunca houve o registro de um número tão grande de falhas em um mesmo tipo de estrutura na história da engenharia.**
- Para o conhecimento da época, as causas eram um mistério. Investigou-se o papel da soldagem, do projeto, dos materiais, etc. Desenvolveu-se um critério de qualidade baseado na energia absorvida pela amostra em um ensaio de impacto.



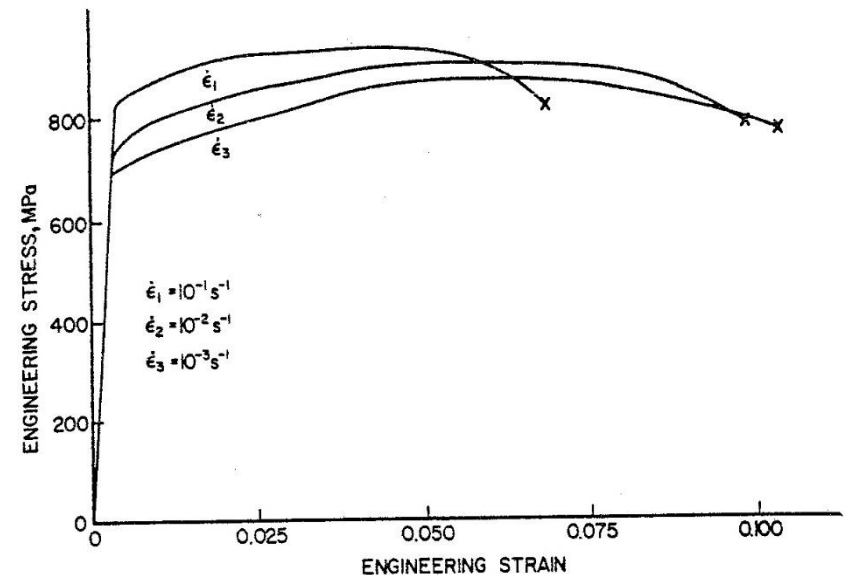
Considerações Iniciais:

- Condições que reduzem a capacidade do material se deformar plasticamente:
 - Temperatura suficientemente baixa
 - Alta taxa de carregamento
 - Estado de tensão triaxial
- Essas condições podem ser obtidas em Ensaio de Impacto de amostras entalhadas

Efeitos da Temperatura e Taxa de Deformação:



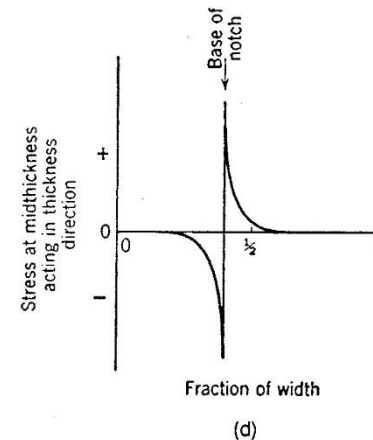
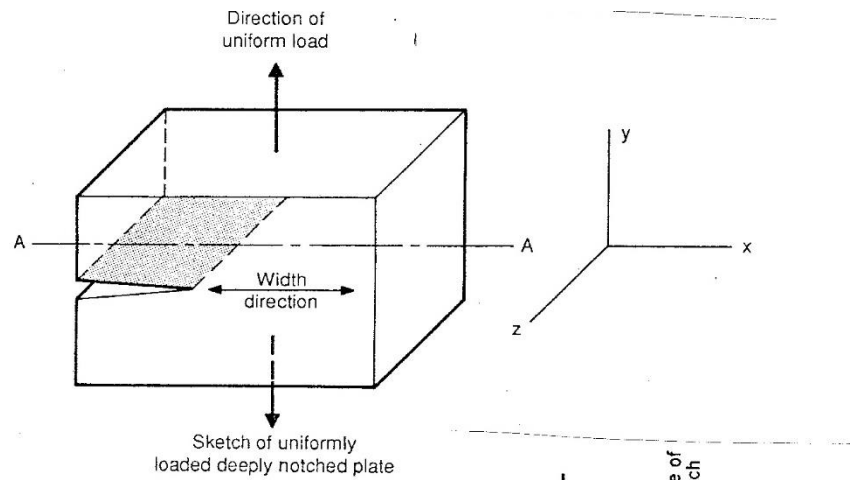
(Ensaio de tração em aço-carbono)



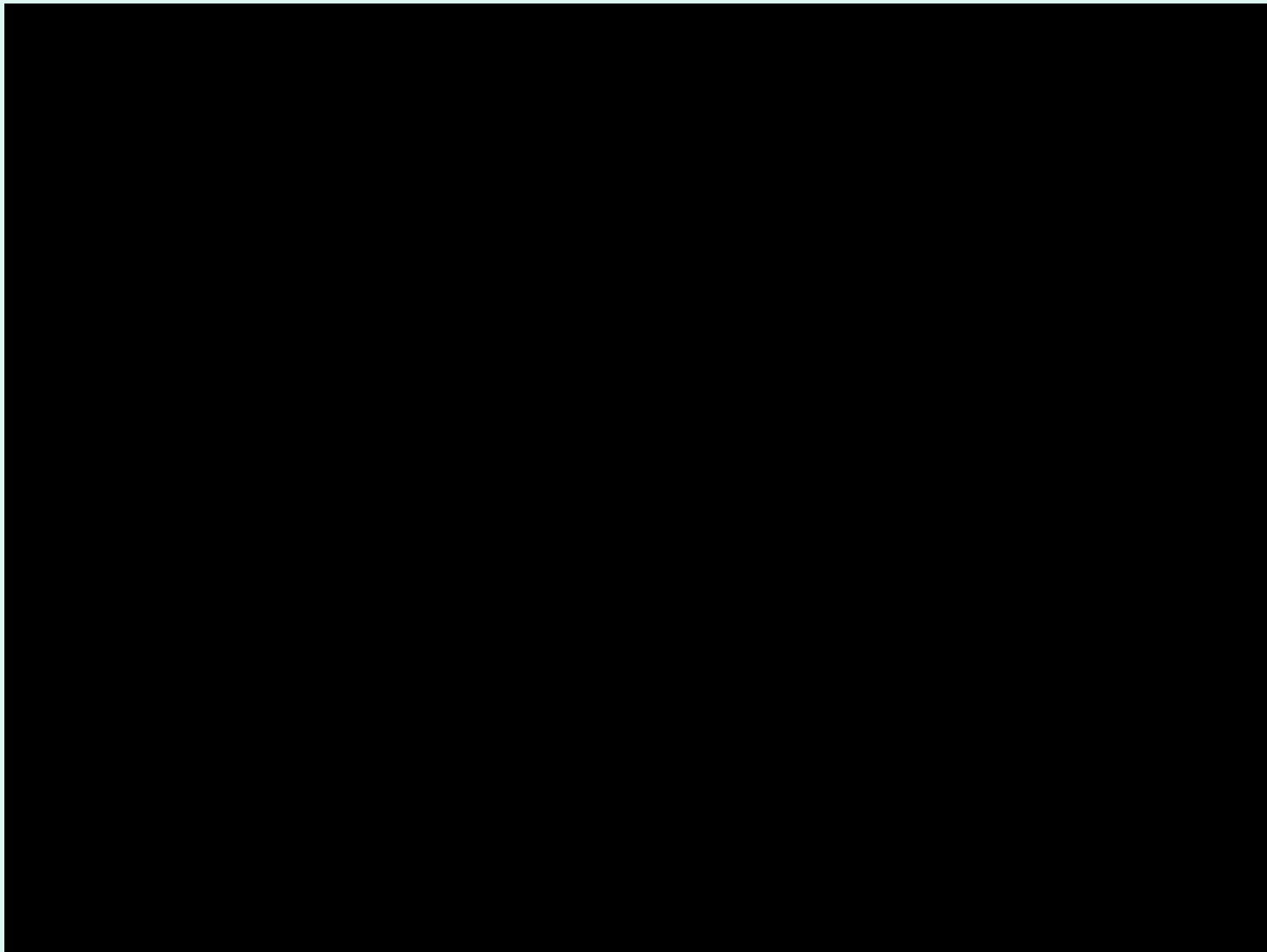
Estado Triaxial de Tensão devido a um Entalhe:

(x = direção da largura; y = direção carga axial; z = direção da espessura)

- Na base do entalhe, a tensão axial em y é alta e a amostra tenta encolher nas direções x e z . Há tensão de flexão (direção x) devido à ação de viga do entalhe. Mas imediatamente fora da raiz não há tensão axial aplicada nas superfícies livres: o material não tenta encolher nestas direções. Como há continuidade de material, haverá resistência à contração dentro do entalhe.

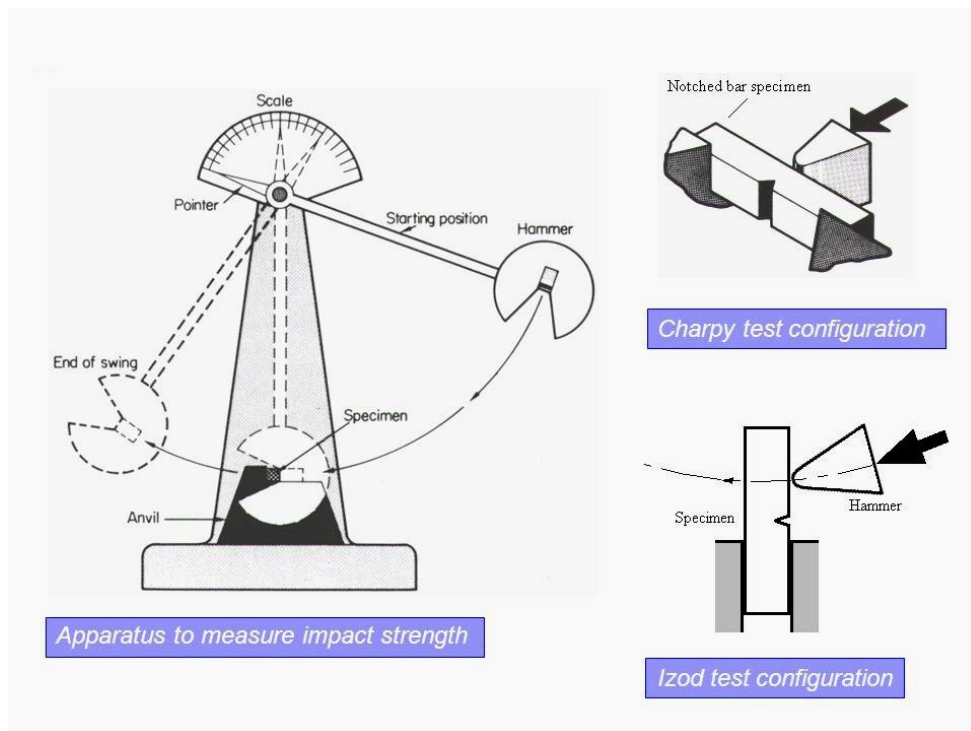


Estado Triaxial de Tensão devido a um Entalhe:



Ensaio com Pêndulo Circular:

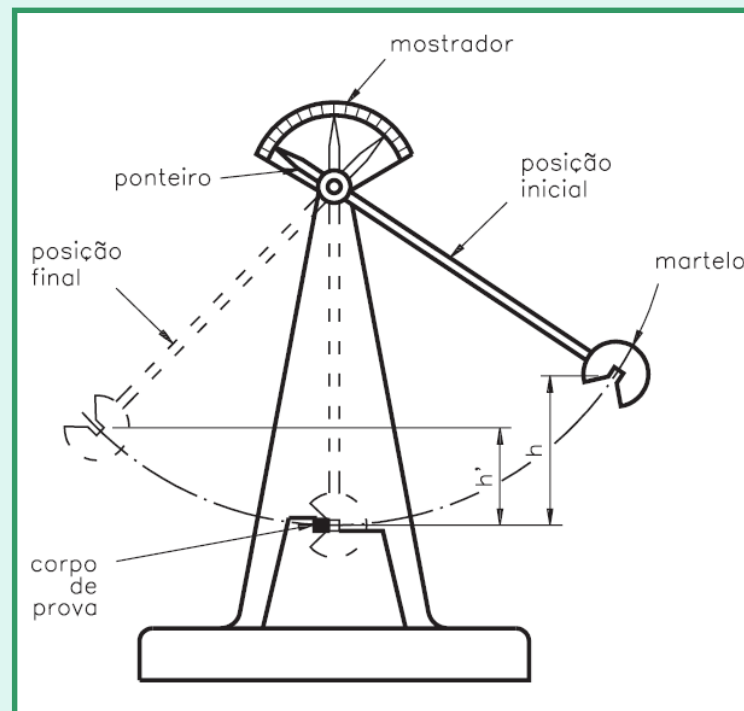
- Dentre os vários ensaios dinâmicos para estudar a fratura frágil, os ensaios de impacto com pêndulo são mais empregados.
- Dois principais tipos: Charpy com entalhe em V e Izod (Norma ASTM E23).
- Augustin Charpy sugeriu o ensaio de impacto (em formato próximo ao que é empregado atualmente) em junho de 1901, na França. O inglês Edwin Izod apresentou sua proposta para ensaio de impacto com pêndulo em 1903.



Augustin Charpy (1865 - 1945)

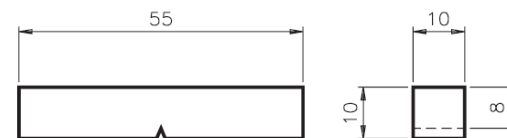
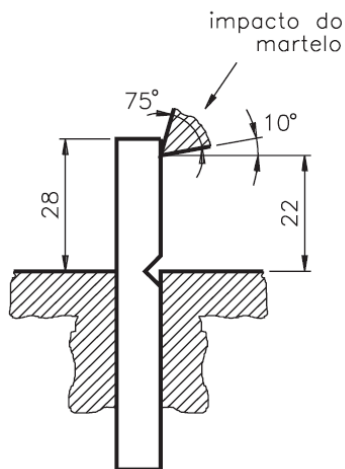
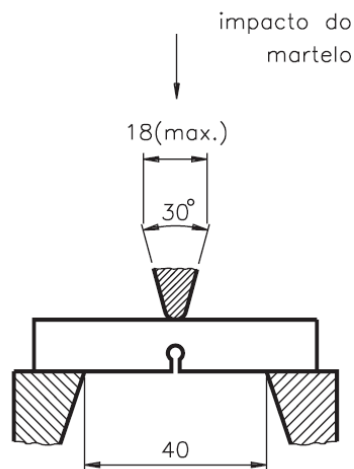
Ensaio com Pêndulo Circular:

- A energia absorvida pelo corpo de prova ao receber o impacto do martelo é igual à diferença entre a energia potencial antes do impacto e a energia potencial do martelo após o impacto: $E = m \cdot g \cdot (h - h')$
- No instante do impacto, a velocidade do martelo é dada por: $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$.
- Para uma altura de 1,0 m tem-se $v \approx 4,5 \text{ m/s}$ e, assumindo que um comprimento médio de 5 mm é deformado no ensaio, estima-se taxa de deformação de 10^3 s^{-1} .



Corpos-de-Prova Charpy e Izod:

Diferença entre os tipos de ensaio:



charpy tipo A



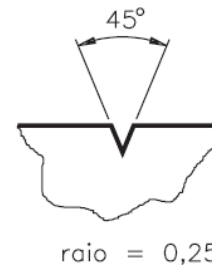
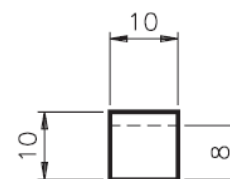
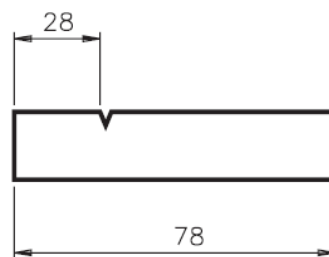
charpy tipo B



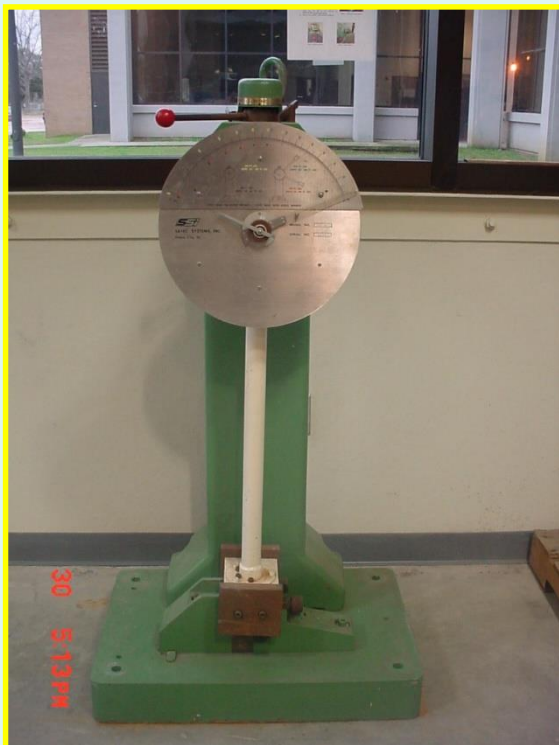
charpy tipo C



izod tipo D



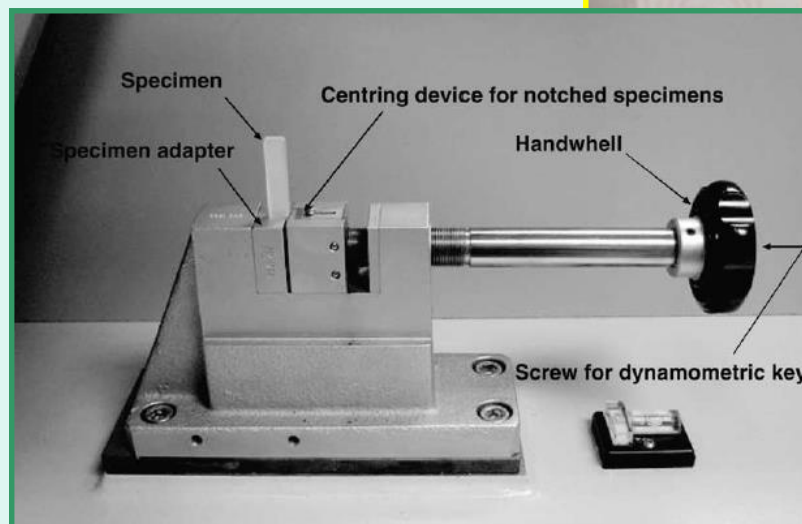
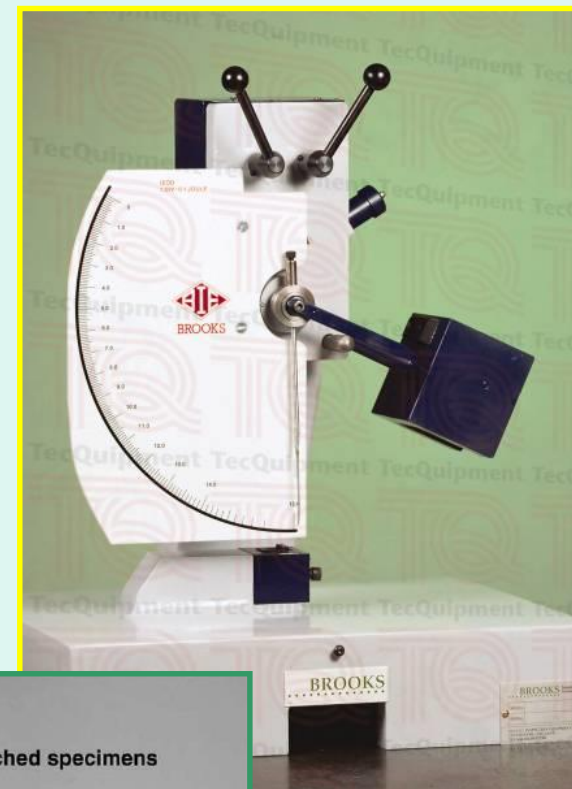
Máquinas de Ensaio:



← Charpy

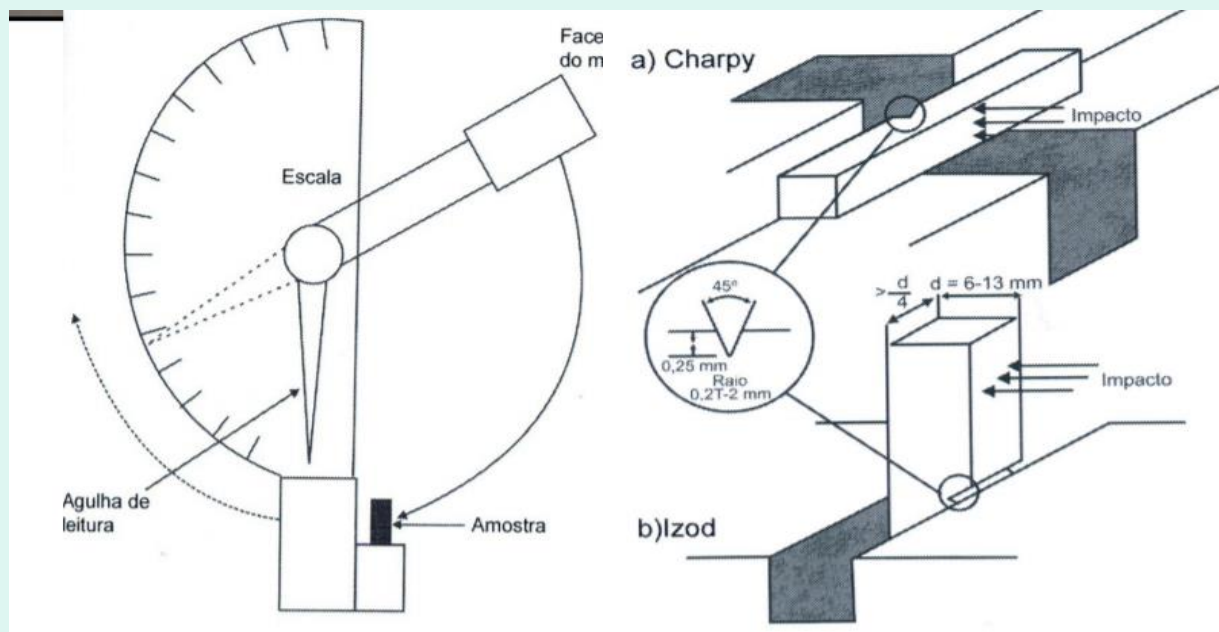
Izod →

Fixador para
corpo-de-prova
Izod

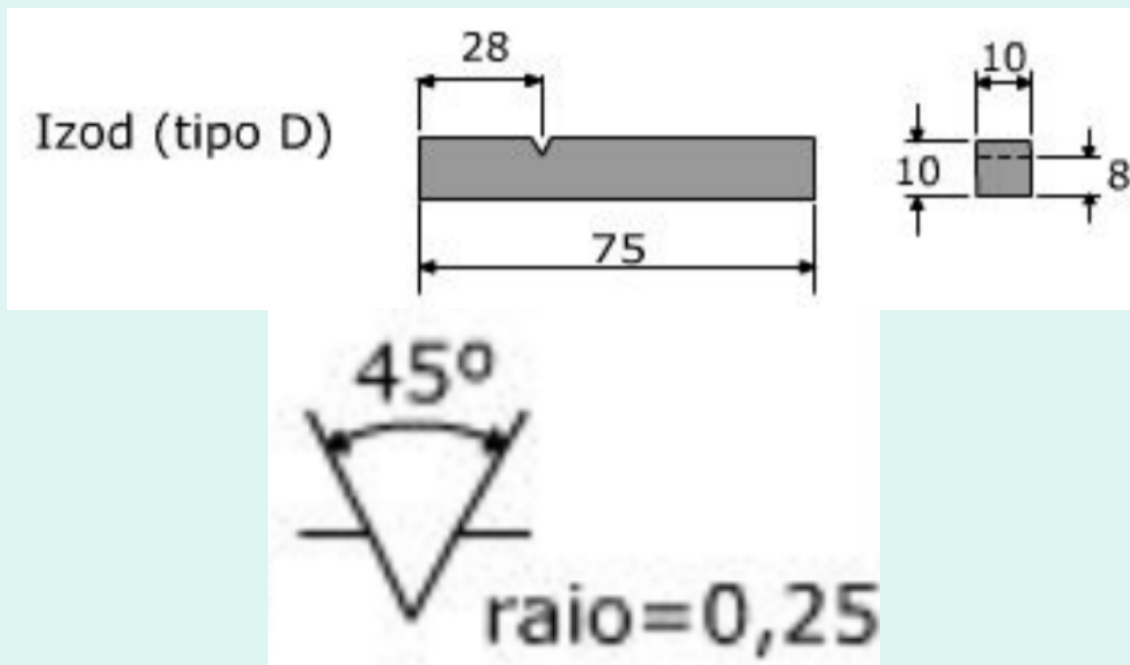
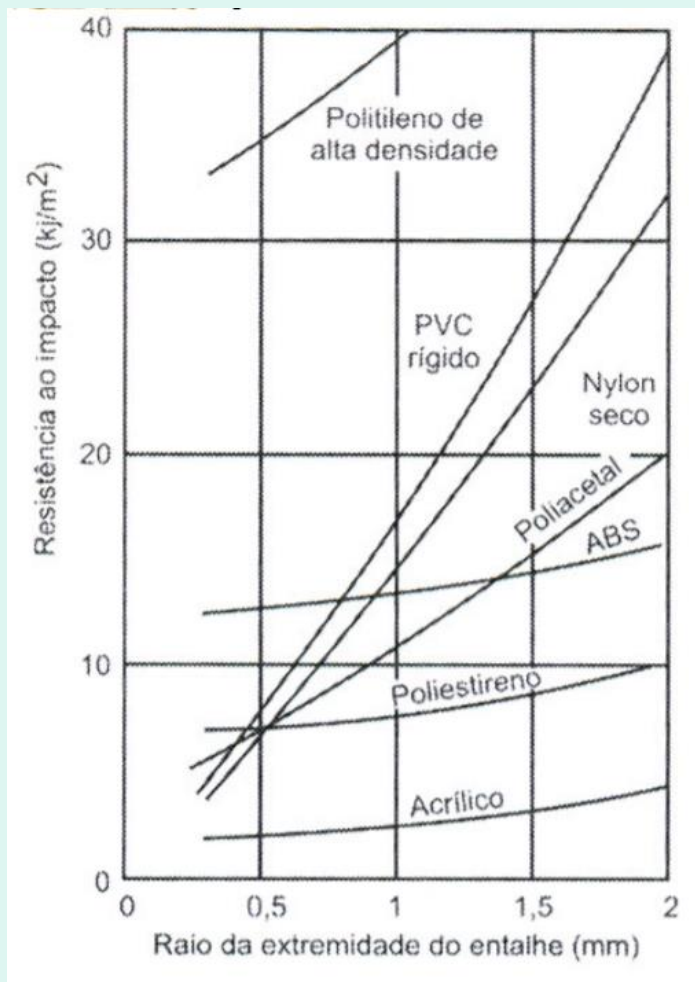


Ensaio Izod em polímeros (ASTM D256, ISO 180 e NBR 8425)

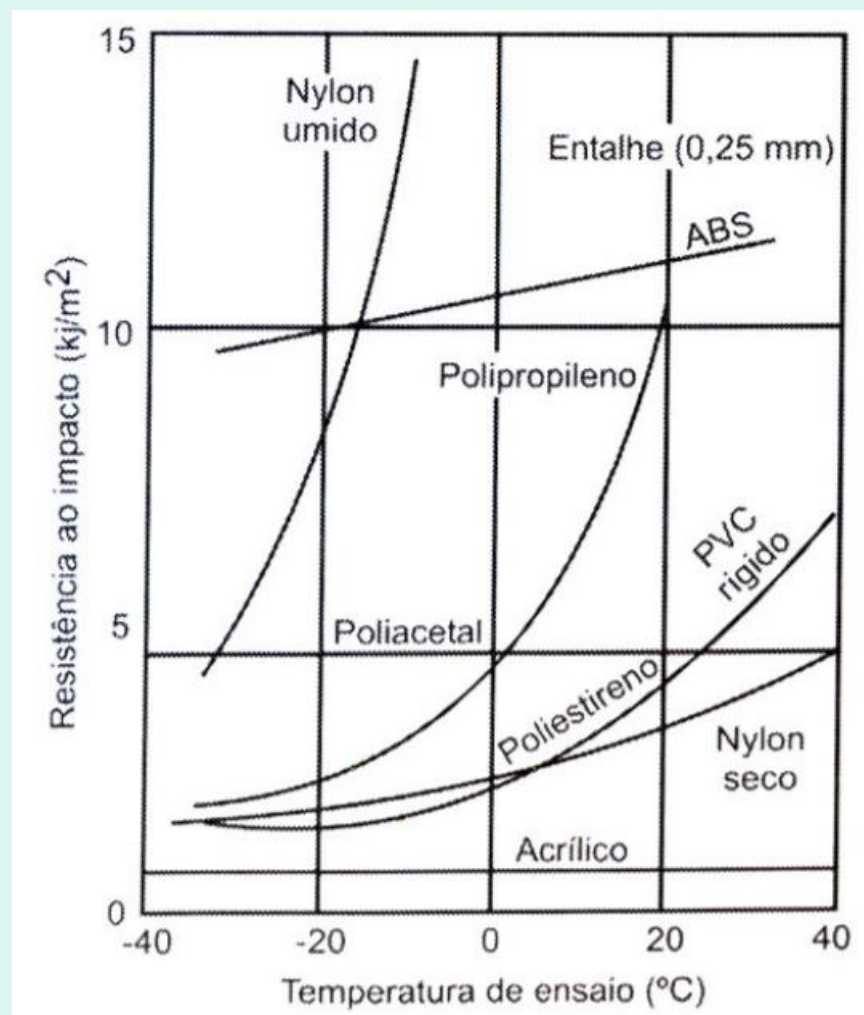
- O peso do martelo deve ser adequado de forma que a energia registrada durante o impacto fique entre 10% e 85% da capacidade máxima do martelo.
- Cálculo da resistência ao impacto: Energia absorvida J / espessura do corpo de prova (m) ou Energia absorvida J / área do corpo de prova (m^2).



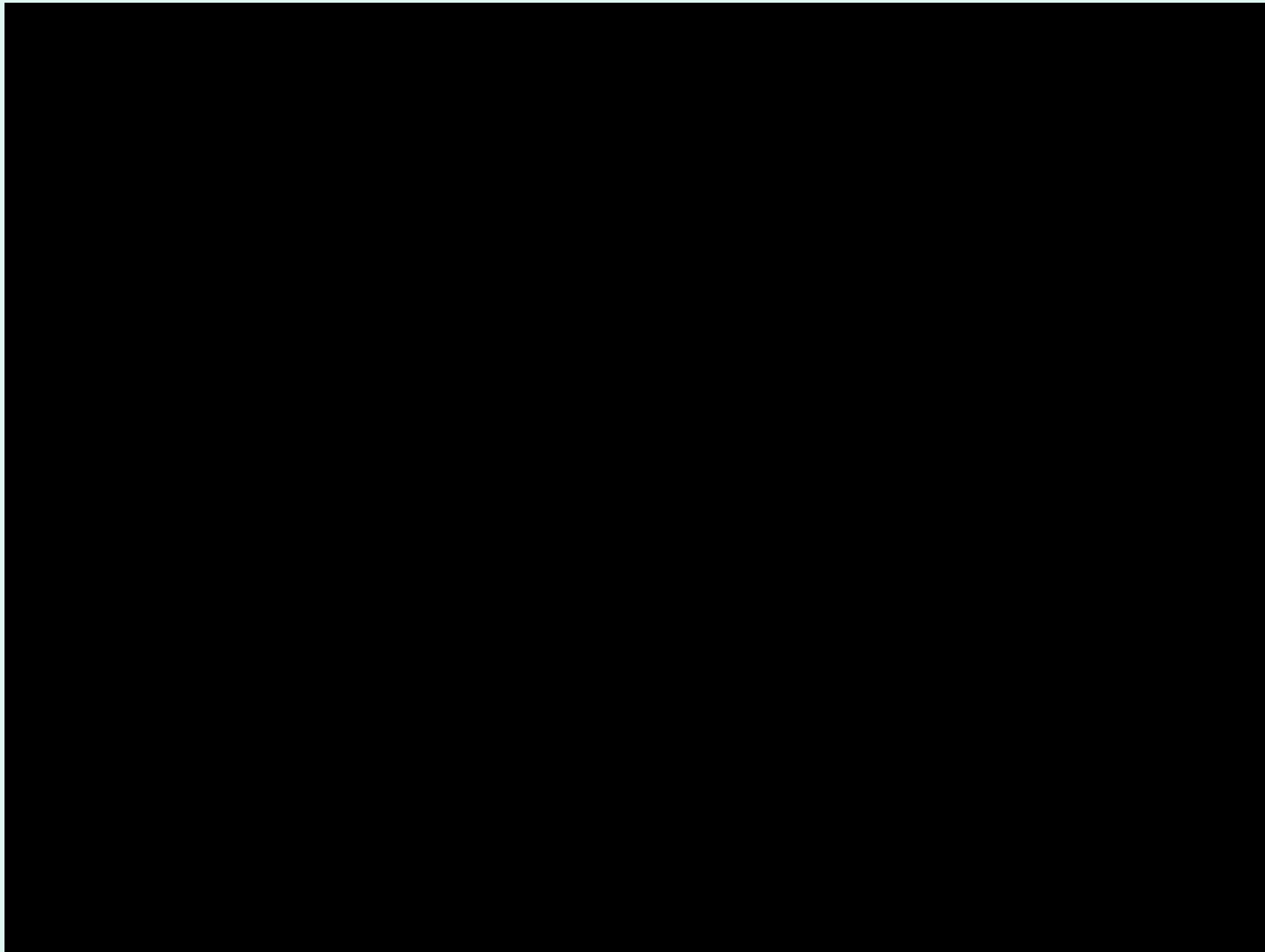
Sensibilidade ao entalhe (polímeros):



Sensibilidade a temperatura (polímeros):

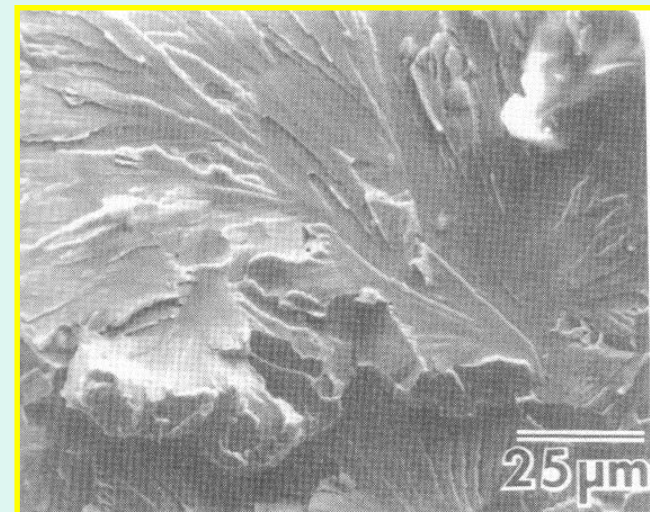
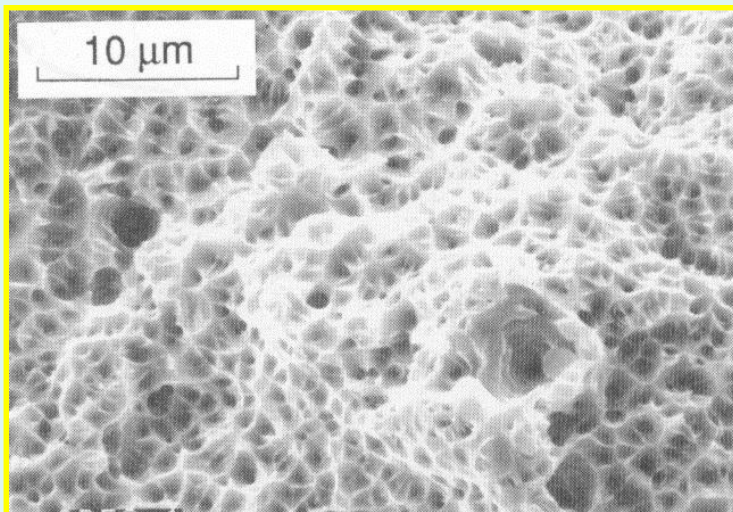
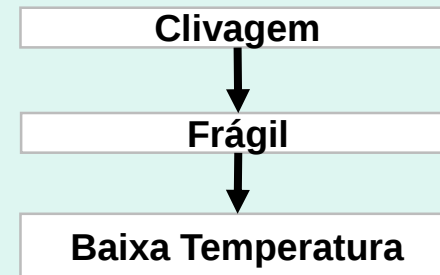
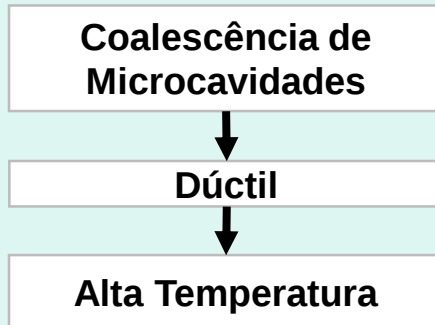


Máquina de ensaio:



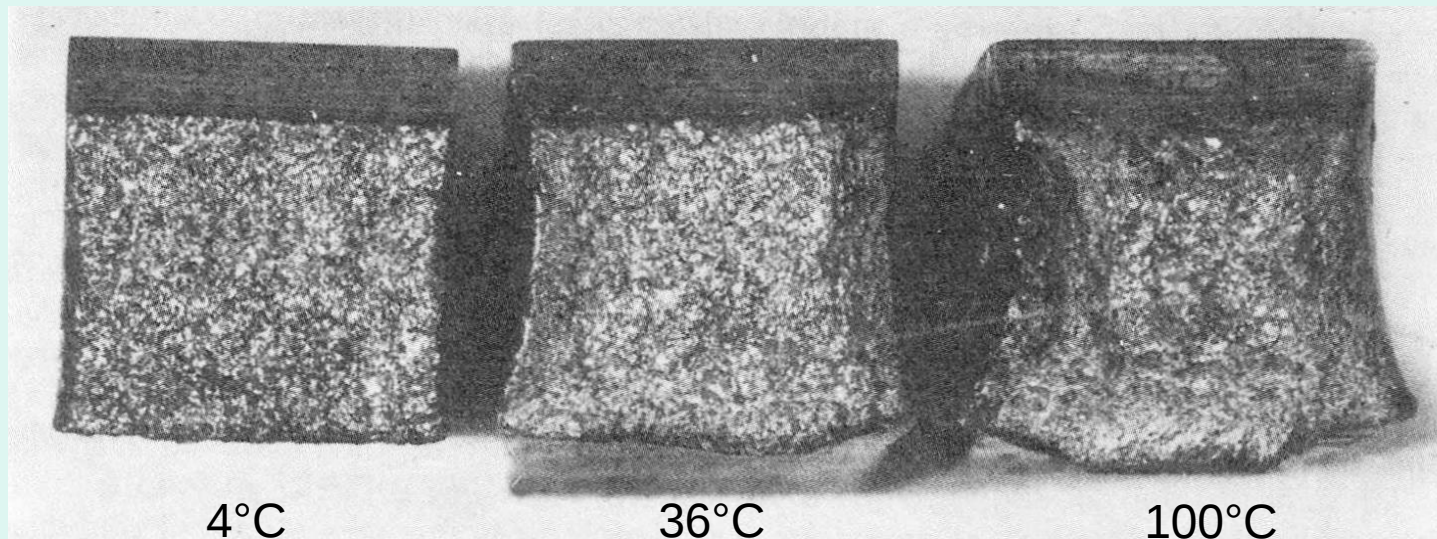
Medidas do ensaio de impacto

- Observação da superfície de fratura:



Medidas do ensaio de impacto

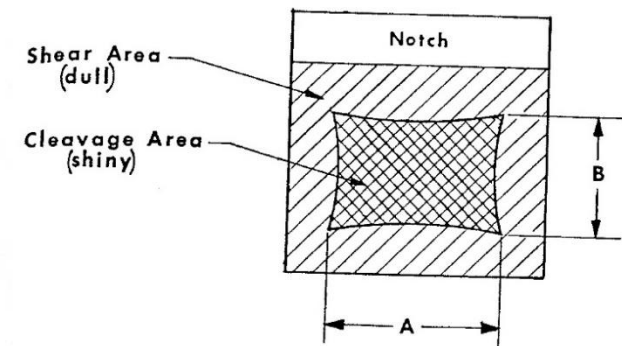
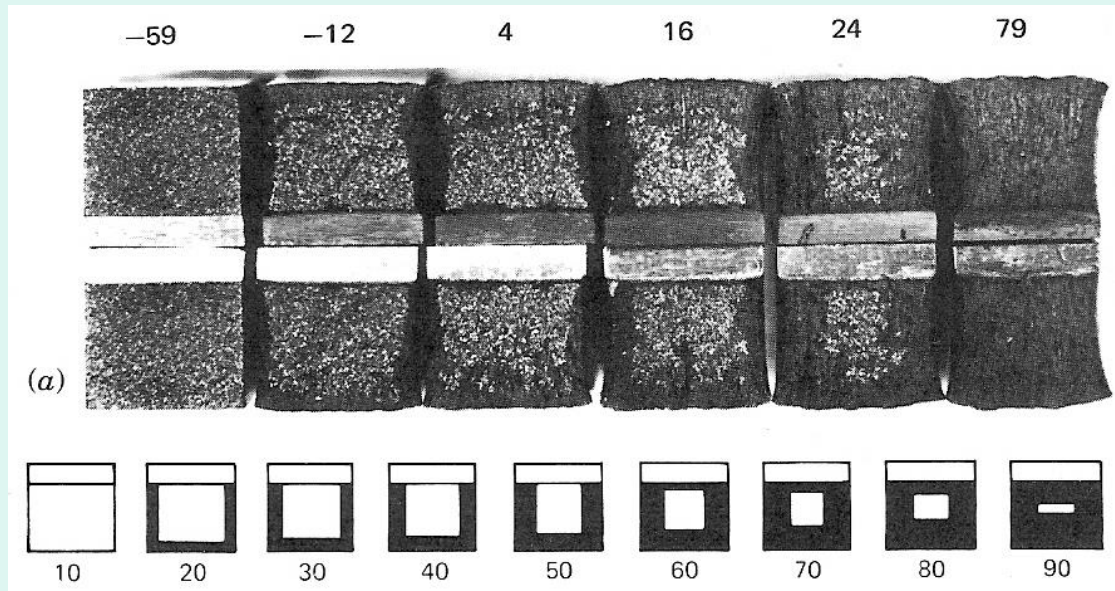
- **Observação da superfície de fratura (Macroestrutura):**
 1. Fratura frágil: Facetada, reflete a luz, CLARA;
 2. Fratura dúctil: Fibrosa, pequenas cavidades que absorvem a luz, ESCURA.



Medidas do ensaio de impacto

- **Observação da superfície de fratura (Macroestrutura):**

1. Fratura frágil: Facetada, reflete a luz, CLARA;
2. Fratura dúctil: Fibrosa, pequenas cavidades que absorvem a luz, ESCURA.

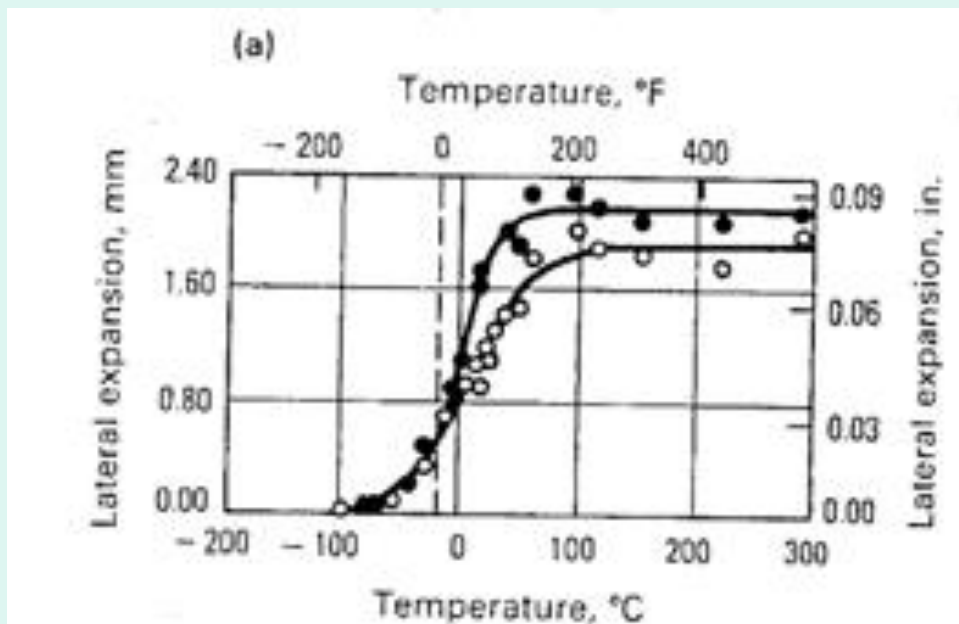


Aparência da Fratura (critério subjetivo e portanto não recomendável para especificações). Parte frágil expande-se a partir do centro.

Medidas do ensaio de impacto:

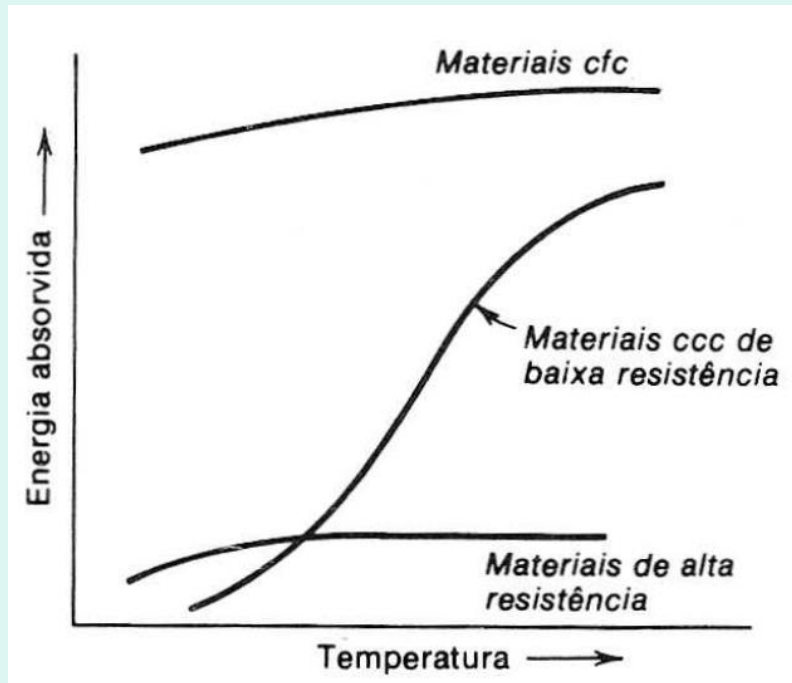
- **Expansão Lateral:** Deve-se medir as duas metades da amostra fraturada (uma metade do corpo-de-prova fraturado pode incluir a expansão máxima para ambos os lados, para um dos lados, ou para nenhum deles).

Ensaio de impacto em placas de aço empregado em vasos de pressão (orientações TL e LT).



Medidas do ensaio de impacto

- Temperatura de transição dúctil-frágil
 1. Para diferentes materiais:

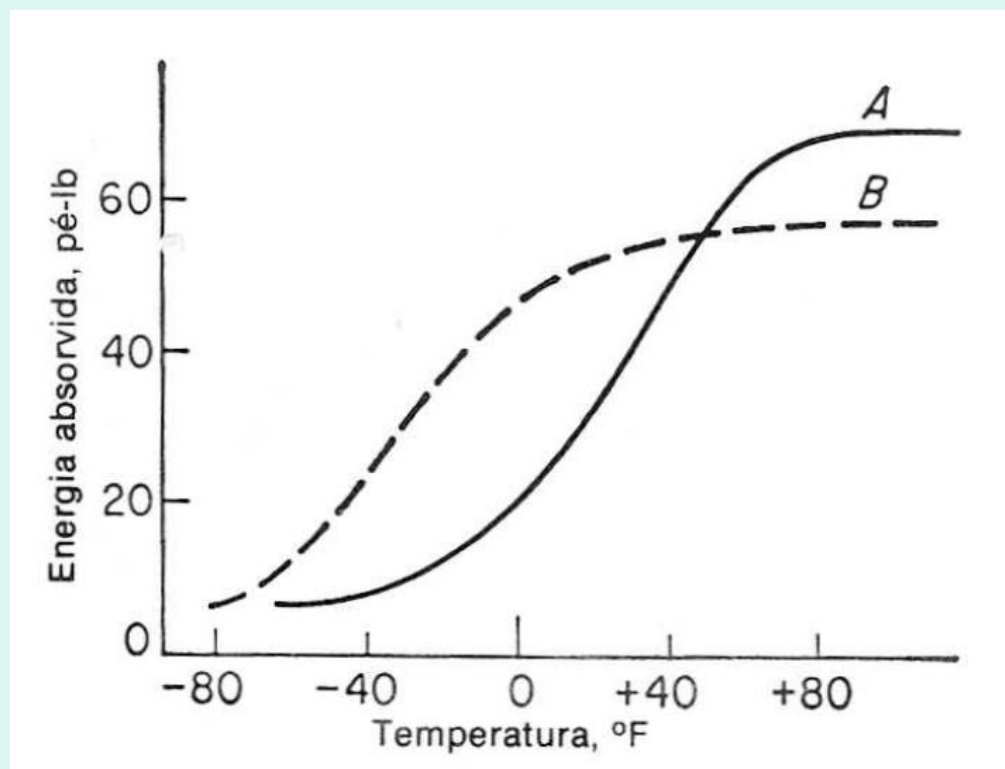


1. Materiais de alta resistência:
Ex: ligas de Alumínio e titânio
Possuem tenacidade ao impacto tão baixa que a fratura pode ocorrer para tensões nominais ainda no regime elástico a todas temperaturas e taxas de deformação, quando existem trincas na estrutura.

2. Materiais CFC e HC:
Tenacidade ao impacto é tão elevada que a fratura frágil não constitui um problema.

Medidas do ensaio de impacto

- Temperatura de transição dúctil-frágil
- Apresentam temperatura de transição bem definida: Aços ferríticos usados em aplicações estruturais como Navios, Vasos de pressão e Tubulações, Pontes. Além de outros metais CCC, como os metais refratários (Nb, Ta, Mo, W).

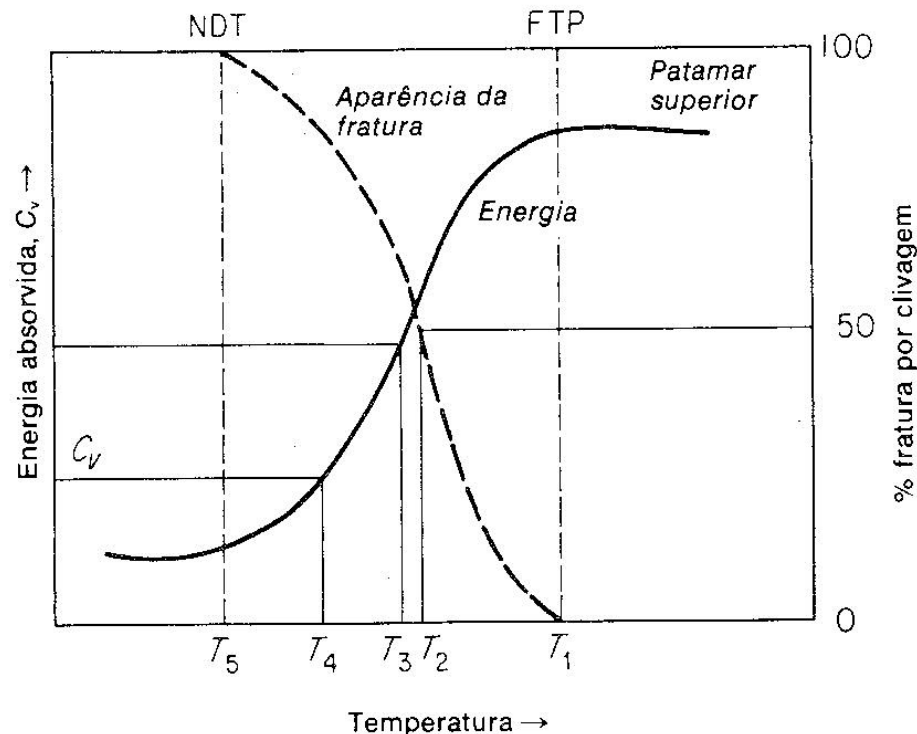


- Materiais CCC de média e baixa resistência:
 - Ex: Be, Zn;
 - Fortemente dependente da temperatura;
 - Quanto menor a temperatura menor é a tenacidade do material;
- **Determinar a temperatura onde ocorre fratura frágil.**

Critérios para determinação da transição frágil-dúctil:

NÃO existe critério único de definição da temperatura de transição.

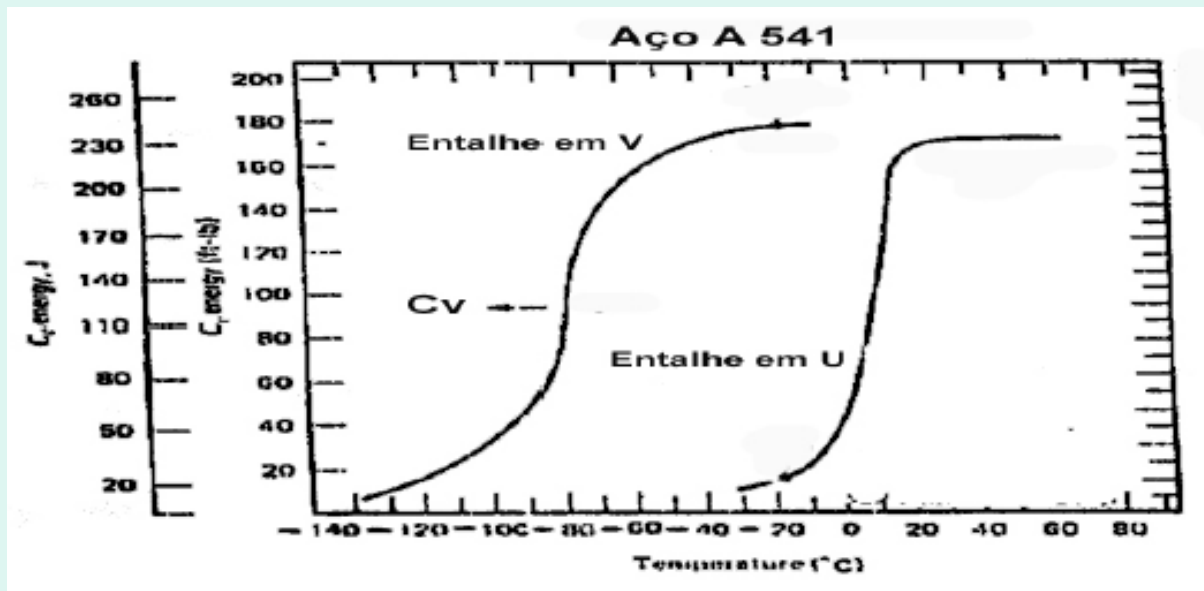
- Critérios para determinar a Temperatura de Transição: NDT, FTP, 50%D-50%F, $(E_{\max} + E_{\min})/2$, E arbitrário (ex. 20 J).



- T_1 – FTP
- T_2 – 50%D-50%F
- T_3 – $(E_{\max} + E_{\min})/2$
- T_4 – CV15
- T_5 – NDT

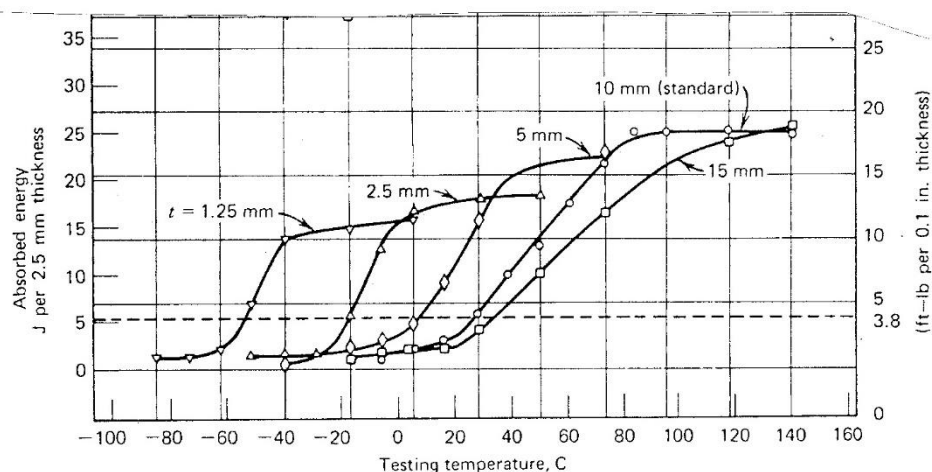
Medidas do ensaio de impacto

- Energia absorvida para a amostra fraturar (Cv):
 - i. Altura final do pendulo diminui com o aumento da energia absorvida;
 - ii. Energia absorvida por ensaios Charpy (Cv) é apenas uma medida relativa, não podendo ser utilizada diretamente em projetos.



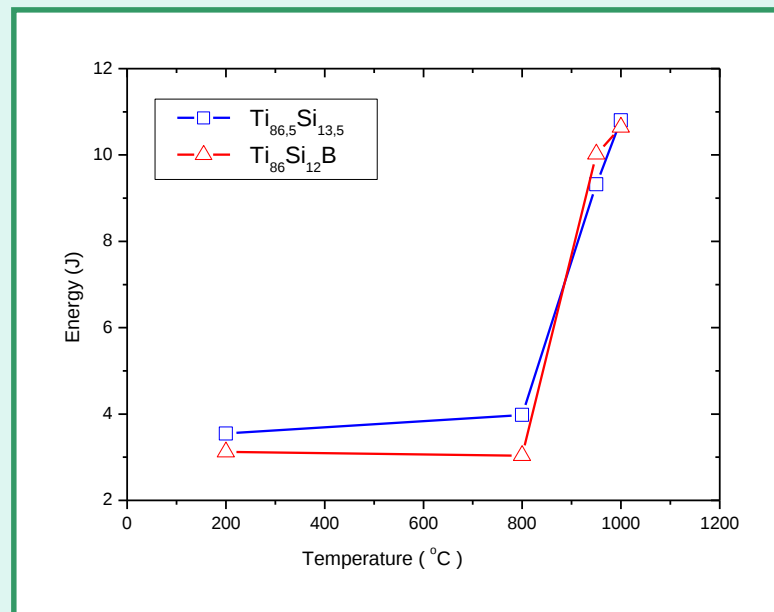
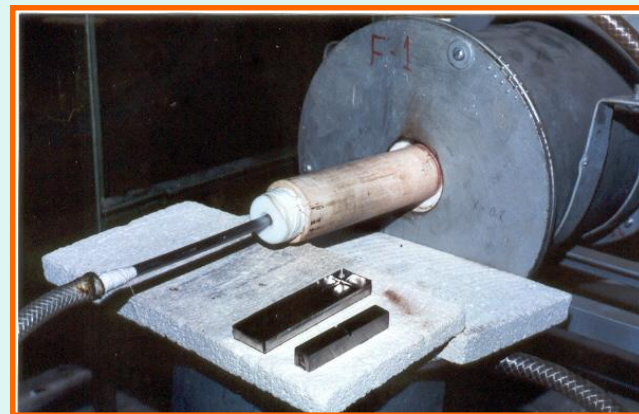
Aplicações e Limitações do Ensaio Convencional:

- A medida de uma temperatura de transição pelo ensaio Charpy fornece uma forma de controle de qualidade com respeito à fratura frágil, permitindo diferenciar aços com diferentes composições ou diferentes tratamentos térmicos. O tamanho de grão também afeta a temperatura de transição.
- O ensaio é muito usado por seu baixo custo, rapidez de realização e por empregar amostras pequenas.
- É empregado para avaliar a fragilização por tratamentos térmicos (fragilidade ao revenido), ou fragilização por hidrogênio (devido a processos de solda, galvanoplastia, decapagem, tratamentos térmicos, e outras situações em que o hidrogênio esteja presente).
- Apresenta limitações devido ao entalhe com raiz arredondada, pequeno tamanho da amostra e medida da energia TOTAL de fratura (não separa entre iniciação e propagação da fratura). Apresenta alta dispersão em seus resultados.
- A temperatura de transição depende não somente do critério de avaliação, mas também da espessura da amostra.

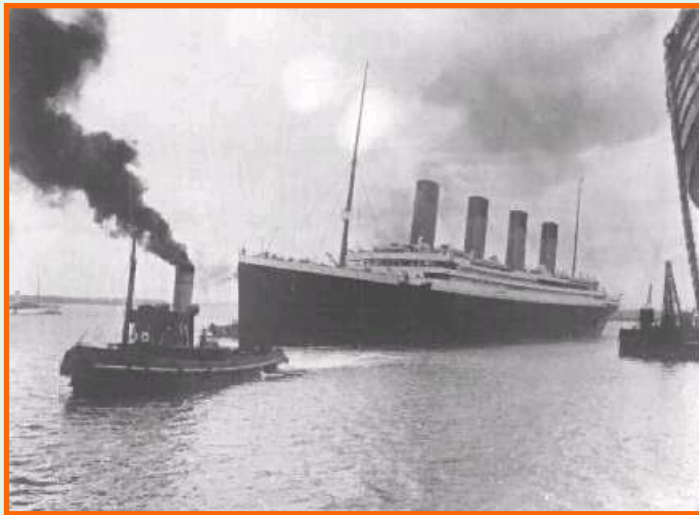
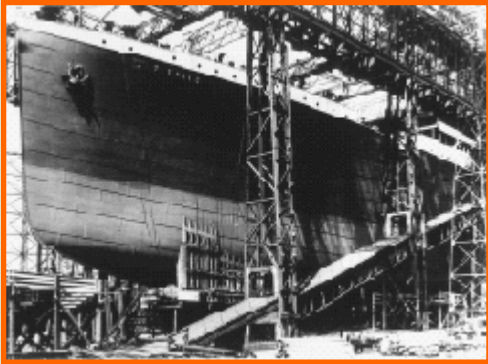


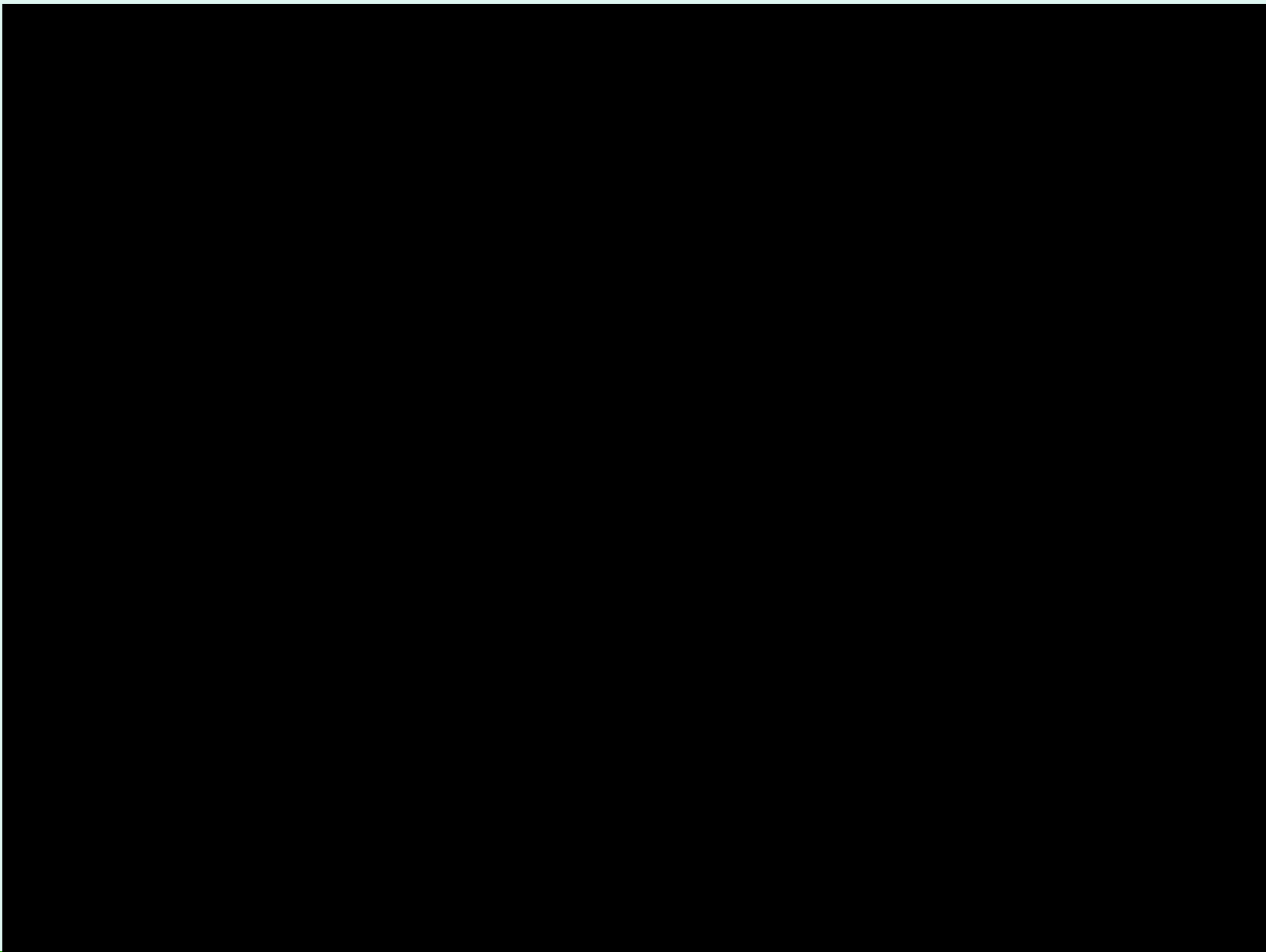
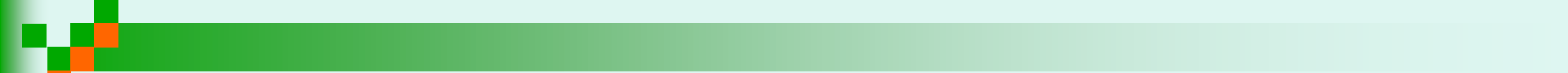
Ensaio de Impacto em altas temperaturas realizados na EEL/USP:

(Máquina cedida pela AMR/IAE/CTA)



Considerações Finais: O Titanic





Considerações Finais:

Nenhum outro naufrágio deixou uma marca tão forte na consciência pública como o do *RMS Titanic* em 1912.



Ilustração: Titanic no fundo do mar



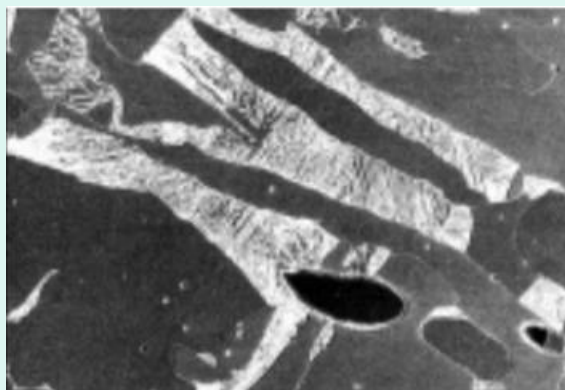
Amostra do casco do navio
retirada do fundo do mar

Considerações Finais:

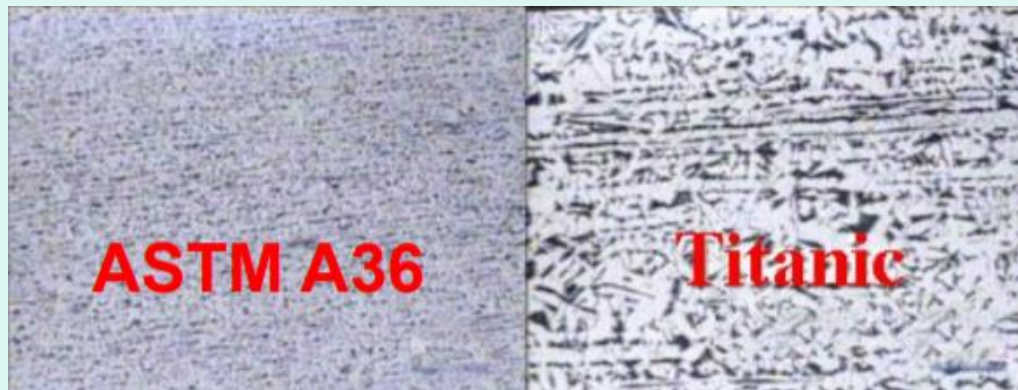
No aço do casco do TITANIC constata-se teores elevados de P, S que associados ao baixo teor de Mn (baixa relação Mn/S) são responsáveis pela maior tendência ao comportamento frágil em baixas temperaturas

Comparativo da Composição Química (% peso)

Material	C	Mn	P	S	Si	Cu	O	N
ASTM A36	0,20	0,55	0,012	0,037	0,007	0,01	0,079	0,003
Titanic	0,21	0,47	0,045	0,069	0,017	0,024	0,013	0,004

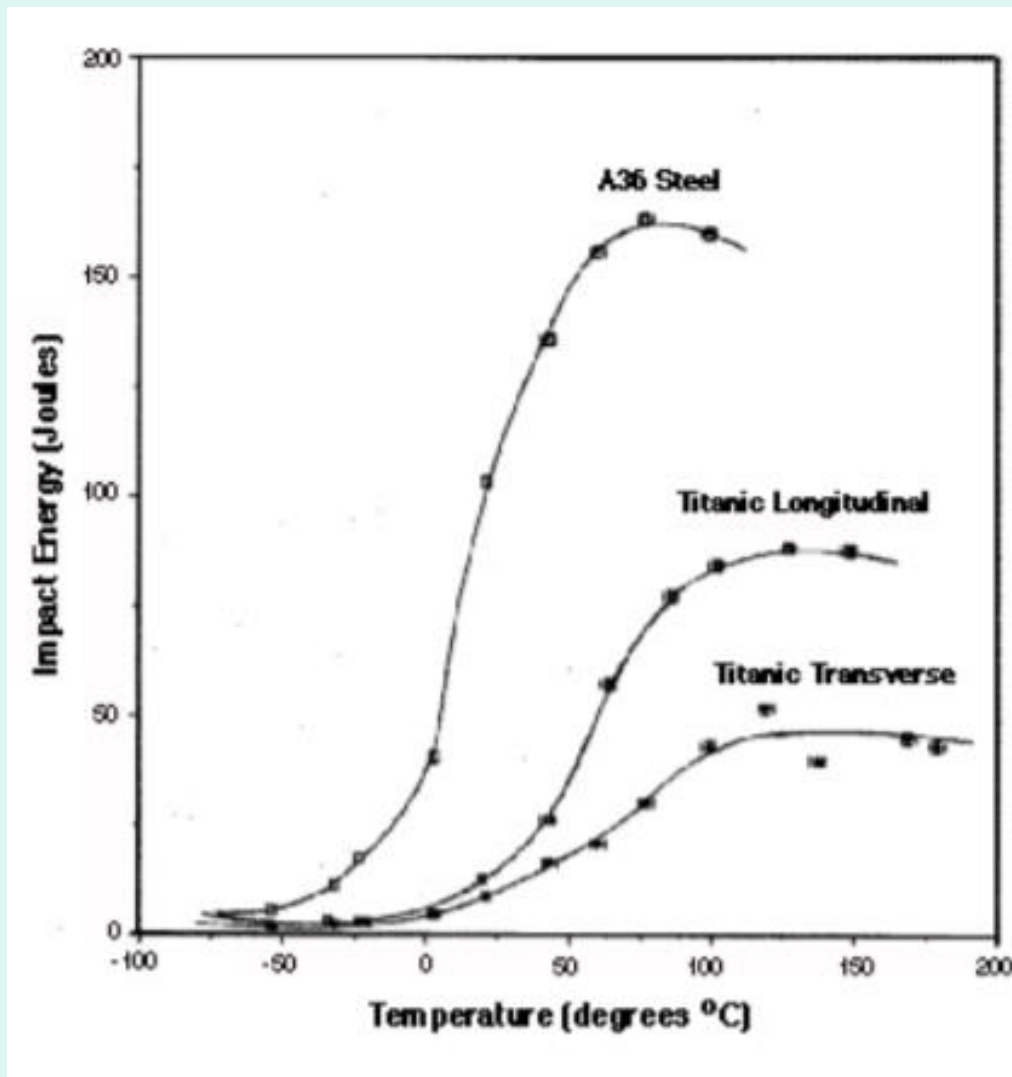


Elipses de MnS



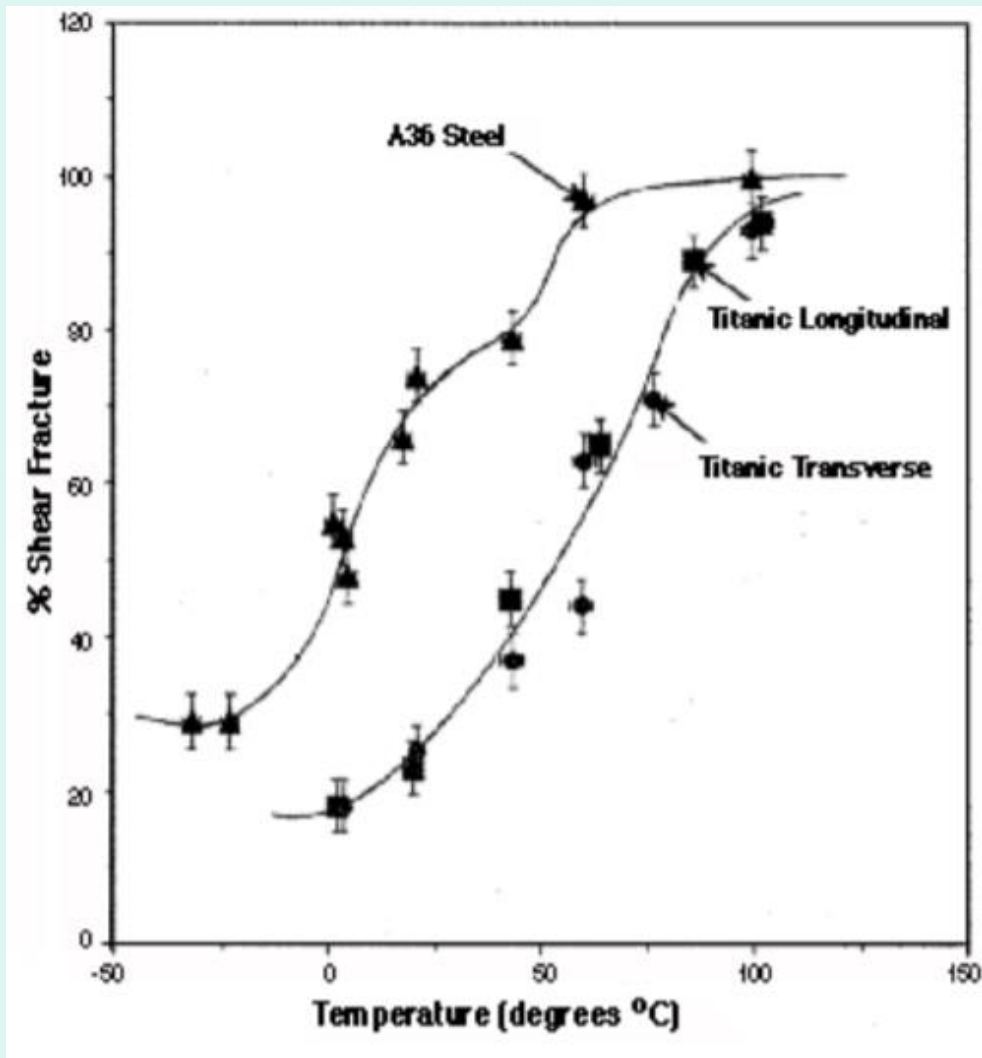
Tamanho de grão do ASTM A36 menor que do aço do Titanic

Considerações Finais:



- 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 do mar era de -2°C .

Considerações Finais:



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

Exercício

- Os dados da tabela abaixo foram obtidos a partir de uma série de ensaios de impacto realizados em quatro aços, com diferentes porcentagens de Si. Desenhe a curva de energia X temperatura de ensaio e determine:
- A) A temperatura de transição definida como a média das energias obtidas no início da região dúctil e início da região frágil e compare com a técnica de 20J energia. Coloque em gráfico este valor em função do teor de Si e comente.
- B) Qual seria o teor de Si máximo permitido se a peça destes aços tivesse que trabalhar a 0°C.

Temp. de teste, °C	Energia de Impacto, J			
	2,55 % Si	2,85 % Si	3,25 % Si	3,63 % Si
-50	2,5	2,5	2,0	2
-25	3,0	2,5	2,0	2
0	6,0	5,0	3,0	2,5
25	13,0	10,0	7,0	4,0
50	17,0	14,0	12,0	8,0
75	19,0	16,0	16,0	13,0
100	19,0	16,0	16,0	16,0
125	19,0	16,0	16,0	16,0

Principais Normas Referente ao Ensaio de Impacto (Metais, Polímeros e Compósitos)

- NBR NM 281-1 (11/2003) Materiais metálicos - Parte 1: Ensaio de impacto por pêndulo Charpy
- NBR NM281-2 (11/2003) Materiais metálicos - Parte 2: Calibração de máquinas de ensaios de impacto por pêndulo Charpy
- NBR6157 (12/1988) Materiais metálicos - Determinação da resistência ao impacto em corpos-de-prova entalhados simplesmente apoiados
- NBR8425_MB1694 – Plásticos Rígidos – Determinação da Resistência ao Impacto Izod & NBR9564_MB2440 – Plásticos Rígidos - Determinação da Resistência ao Impacto Charpy
- NBR 10437; NBR14262; NBR14289; NBR14470; NBR14689 etc...
- ASTM E23-05 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (2005) (cobre Charpy e Izod)
- ASTM E2248 - 09 Standard Test Method for Impact Testing of Miniaturized Charpy V-Notch Specimens
- D256 – Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics
- D1709 - Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic Film by the Free Falling Dart Method
- D1790 – Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastic Sheeting by Impact
- D1822 – Standard Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials
- D2444 - Standard Test Methods for Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tup (Falling Weight)
- D4812 - Standard Test Methods for Unnotched Cantilever Beam Impact Strength of Plastics
- F2231-02e1 Standard Test Method for CHARPY Impact Test on Thin Specimens of Polyethylene Used in Pressurized Pipes (2002)
- ASTM D880 - 92(2008) Standard Test Method for Impact Testing for Shipping Containers and Systems
- D2463, D3420, D3763, D4272, D4508, D5420, D6110, D2444, etc...
- ASTM D7136 / D7136M - 07 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event
- ASTM D3763 - Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics using Load and Displacement Sensors. Geometry: 3" diameter anvil/clamp; ½" hemispherical striker Geometry: Charpy & Izod

