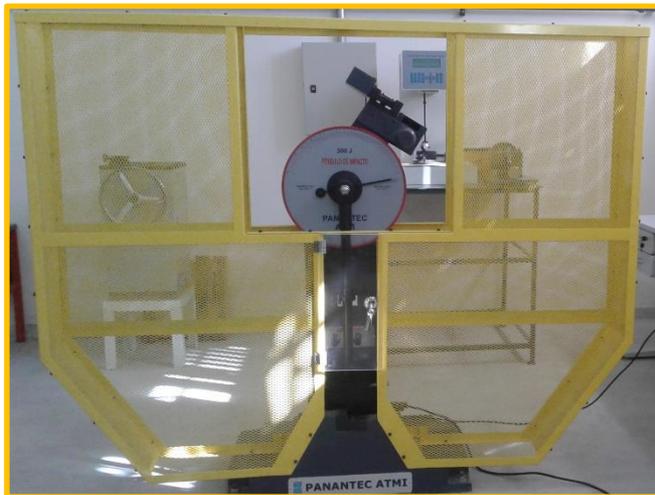
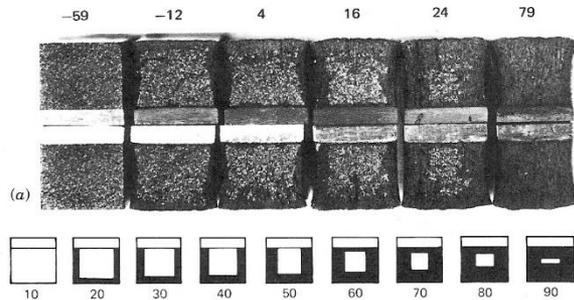
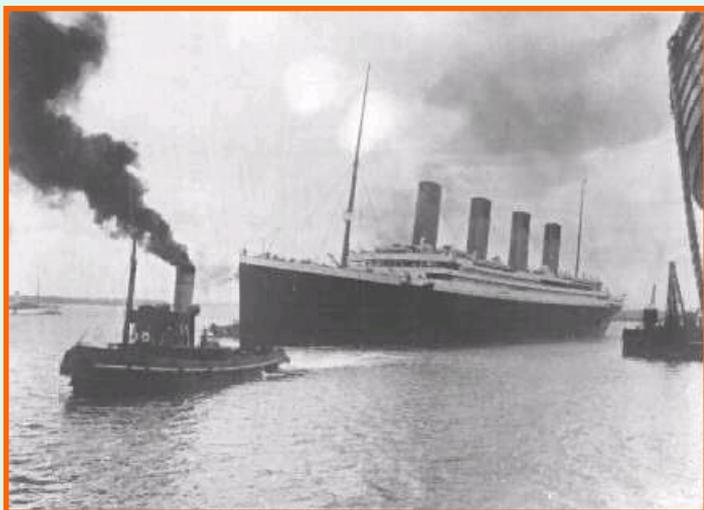
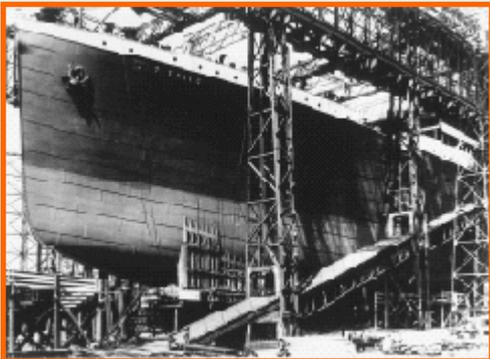


6 – ENSAIO DE IMPACTO E TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL

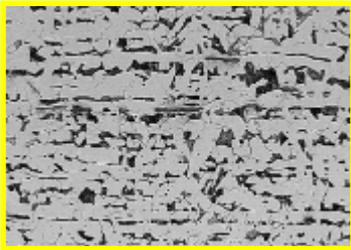


Considerações Iniciais: O Titanic



Considerações Iniciais:

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



Micrografia: aço recolhido do casco do Titanic



Superfície de fratura de amostra ensaiada ao impacto a 0°C (MEV)



Ilustração: Titanic no fundo do mar

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

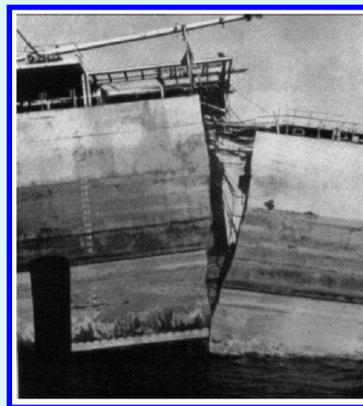
Considerações Iniciais: Os Navios da classe Liberty (2ª Guerra Mundial)

- O ensaio de impacto já existia antes da 2ª Guerra Mundial, mas não foi considerado um requisito de especificação de materiais até o reconhecimento de sua capacidade de detectar a transição dúctil-frágil em aços.
- O principal fato que impulsionou a adoção do ensaio de impacto em normas de fabricação e especificação de materiais foi o grande número de falhas ocorridas em navios mercantes (cargueiros Liberty e petroleiros T2) durante a Guerra.
- Esforço de guerra exigiu que o tempo de fabricação dos navios fosse dramaticamente reduzido. Uso intensivo de processo de soldagem.
- 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)

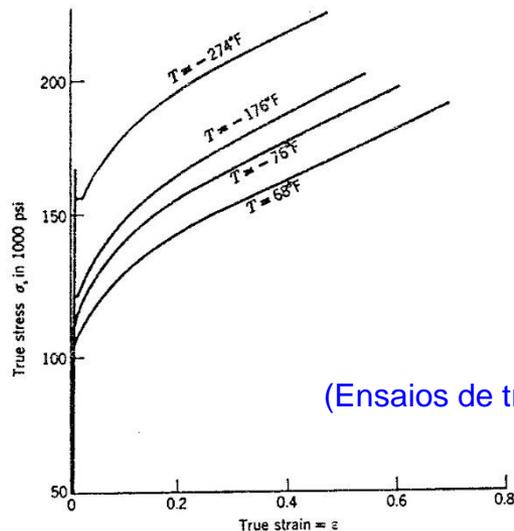
- O problema foi tão grave que a Marinha dos Estados Unidos instalou um Comitê de Investigação para determinar suas causas e formas de corrigi-lo. No relatório final desta comissão consta que, de 4.694 navios avaliados de fevereiro/1942 a março/1946, houve 1.441 casos de dano reportados em 970 navios (mais de 20%), que exigiram reparos ou resultaram na perda do navio. Alguns sofreram falha repentina no inverno, mesmo estando descarregados e em águas calmas.
- **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.



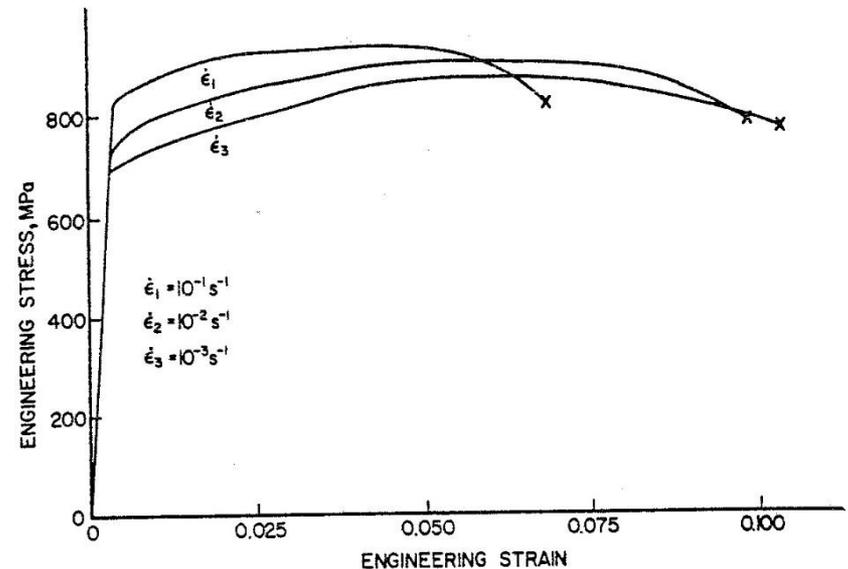
Considerações Iniciais:

- 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:



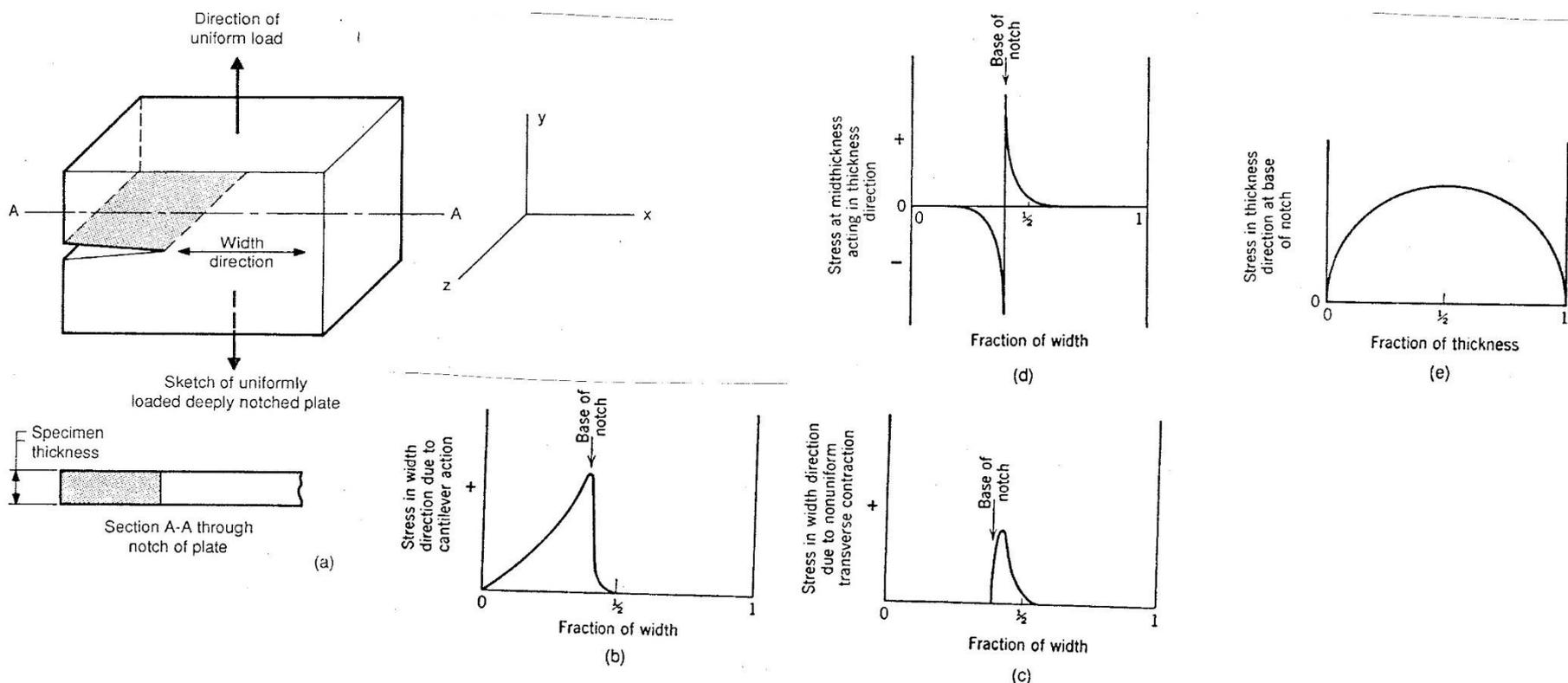
(Ensaio de tração em aço-carbono)



Estado Triaxial de Tensão devido a um Entalhe:

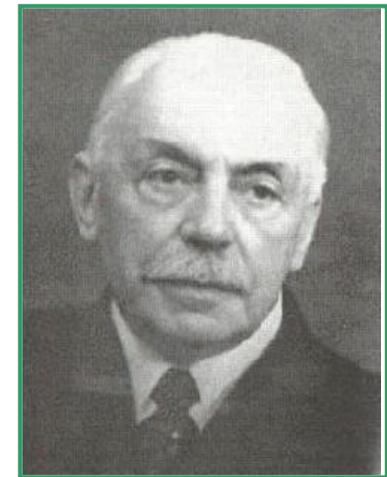
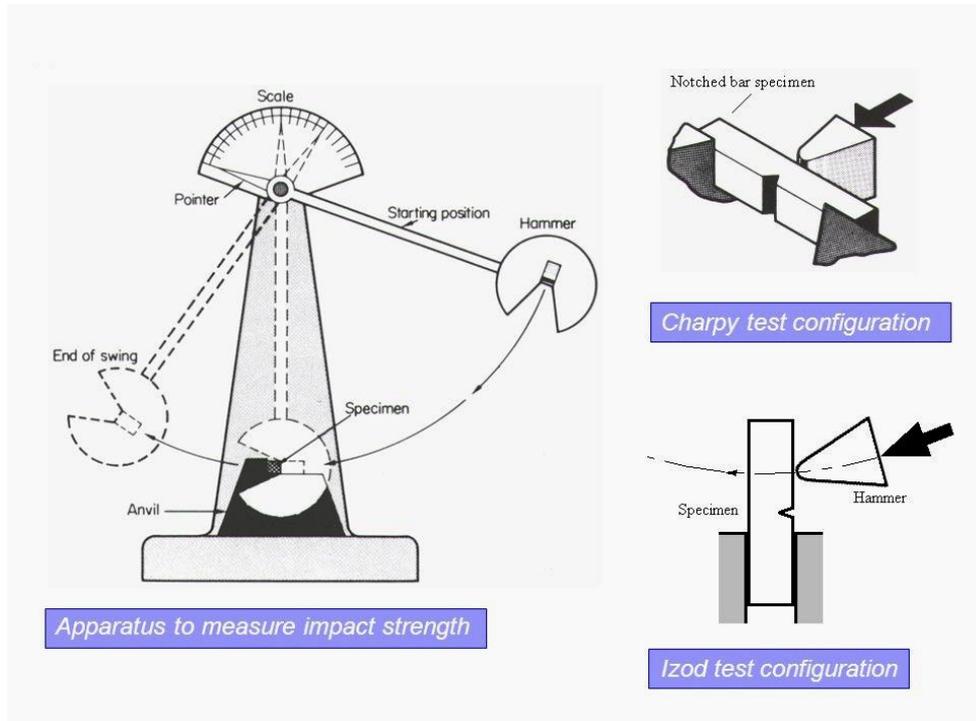
(x = direção da largura; y = direção carga axial; z = direção da espessura)

- 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.



Ensaio com Pêndulo Circular:

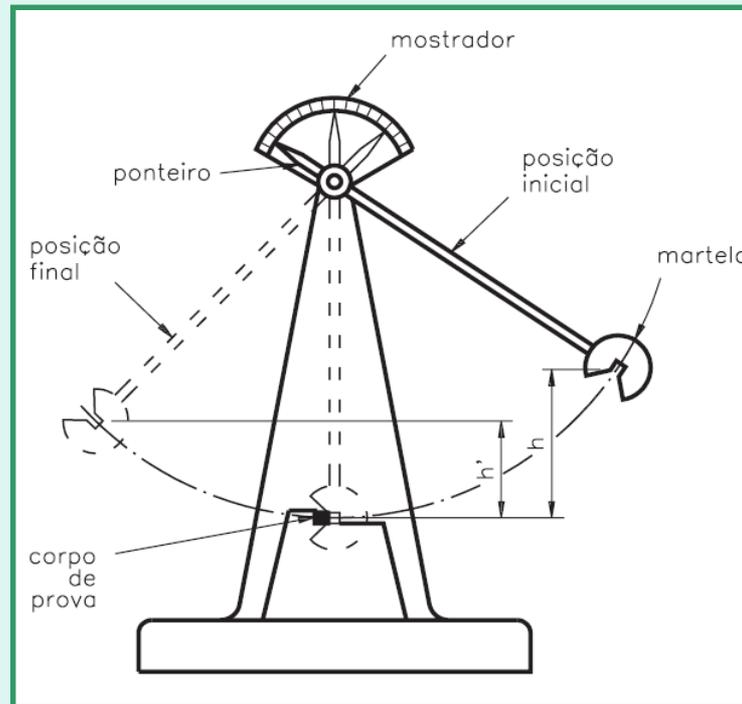
- Dentre os vários ensaios dinâmicos para estudar a fratura frágil, os ensaios de impacto com pêndulo são mais empregados.
- Dois principais tipos: Charpy com entalhe em V e Izod (Norma ASTM E23).
- Augustin Charpy sugeriu o ensaio de impacto (em formato próximo ao que é empregado atualmente) em junho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



Augustin Charpy (1865 - 1945)

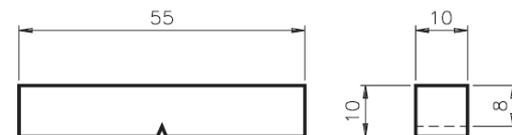
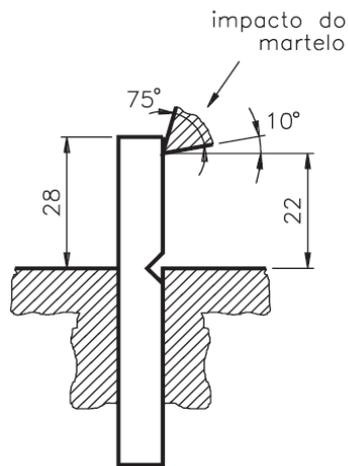
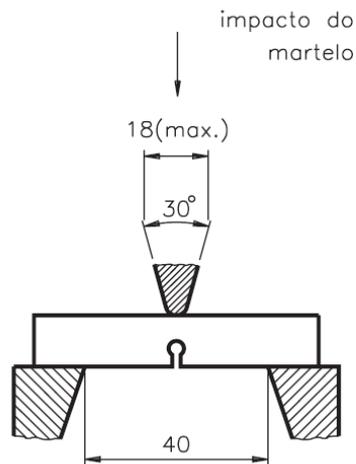
Ensaio com Pêndulo Circular:

- 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: $v = (2 \cdot g \cdot h)^{1/2}$.
- 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

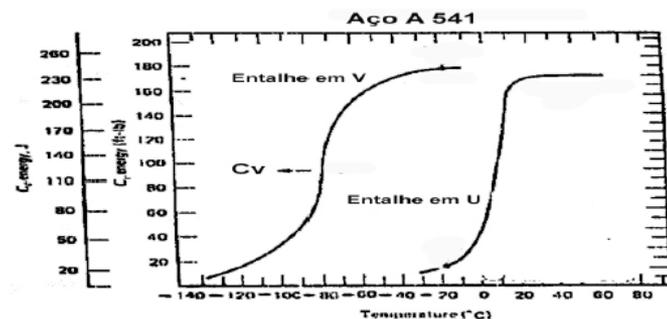
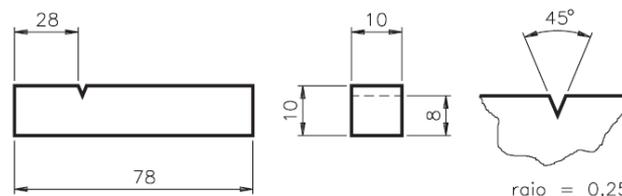


charpy tipo B



charpy tipo C

izod tipo D



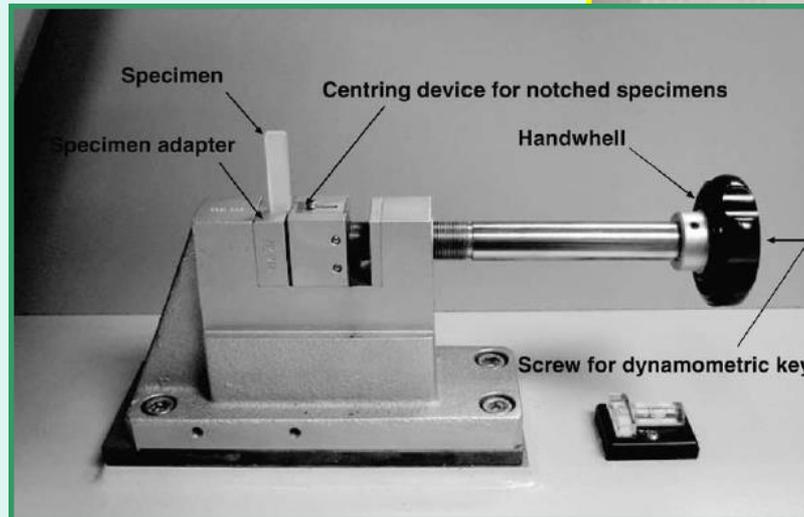
Máquinas de Ensaio:



← Charpy

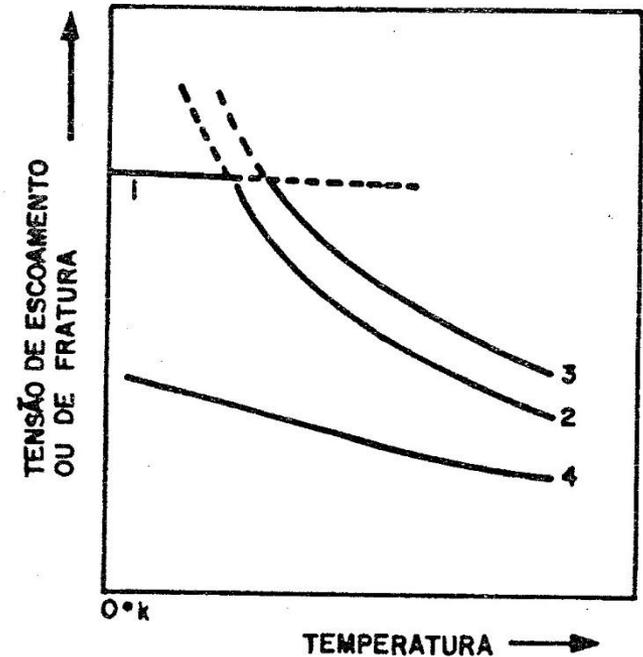
Izod →

Fixador para
corpo-de-prova
Izod



Transição Dúctil-Frágil:

- Metais CFC são menos influenciados pela temperatura que os metais CCC.
- Metais CFC têm elevado número (12) de sistemas de escorregamento: facilita o deslizamento cruzado (escorregamento com desvio).
- Resistência ao movimento de discordância: tensão de Peierls-Nabarro (sensível à temperatura), que influi muito mais na tensão de escoamento dos metais CCC do que nos CFC.
- À medida que a temperatura cai, a tensão de escoamento tende para a tensão coesiva e o material se romperá sem deformação plástica.
- Nos Metais CCC a velocidade de aplicação dos esforços também é crítica: aumento do limite de escoamento com a velocidade e também porque o tempo disponível para ativar as fontes de discordâncias (para aliviar tensões) será reduzido.



1. *Variação da tensão coesiva com a temperatura;*
2. *Variação do limite de escoamento com a temperatura;*
3. *Idem a 2, para taxa de deformação maior;*
4. *Variação do limite de escoamento para metal CFC que não apresenta transição.*

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).
- Transição no Modo de Fratura:

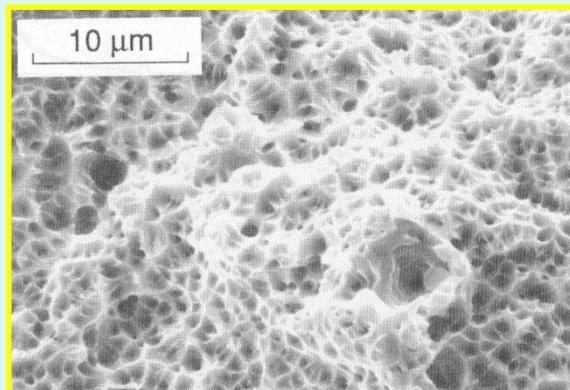
Coalescência de Microcavidades



Dúctil



Alta Temperatura



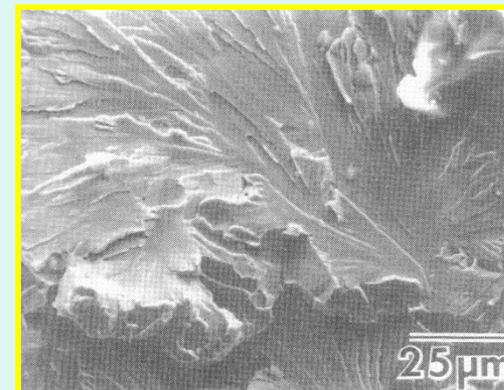
Clivagem



Frágil

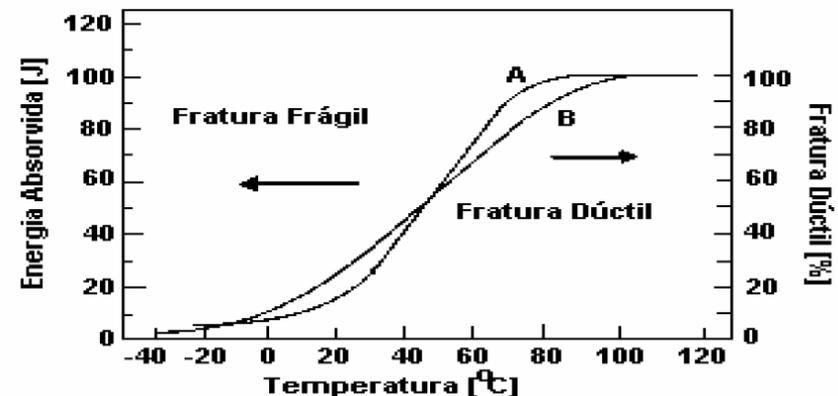
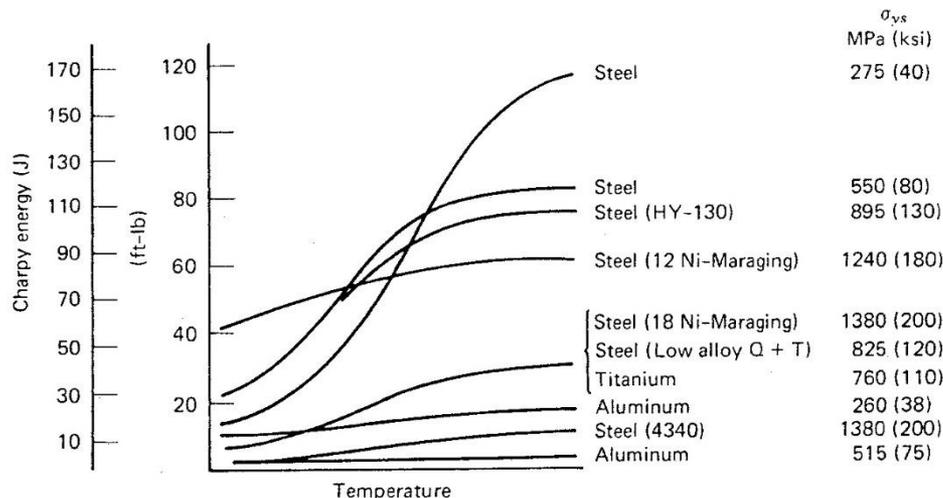


Baixa Temperatura



Resultados dos Ensaio de Impacto:

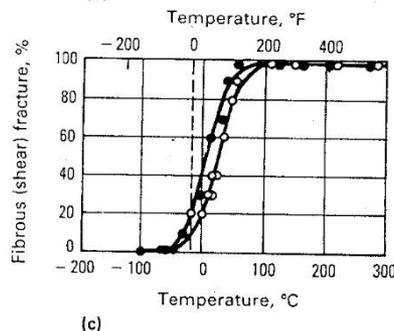
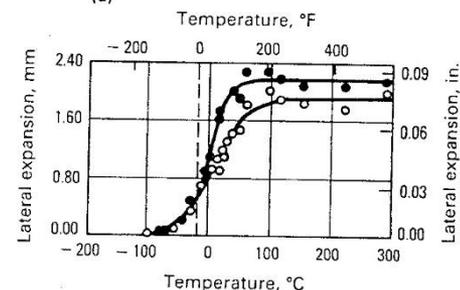
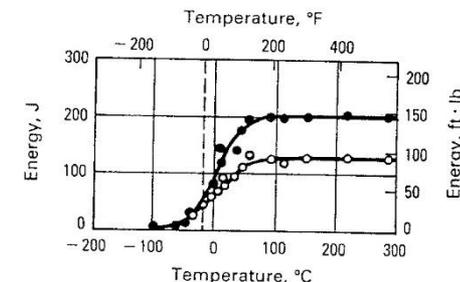
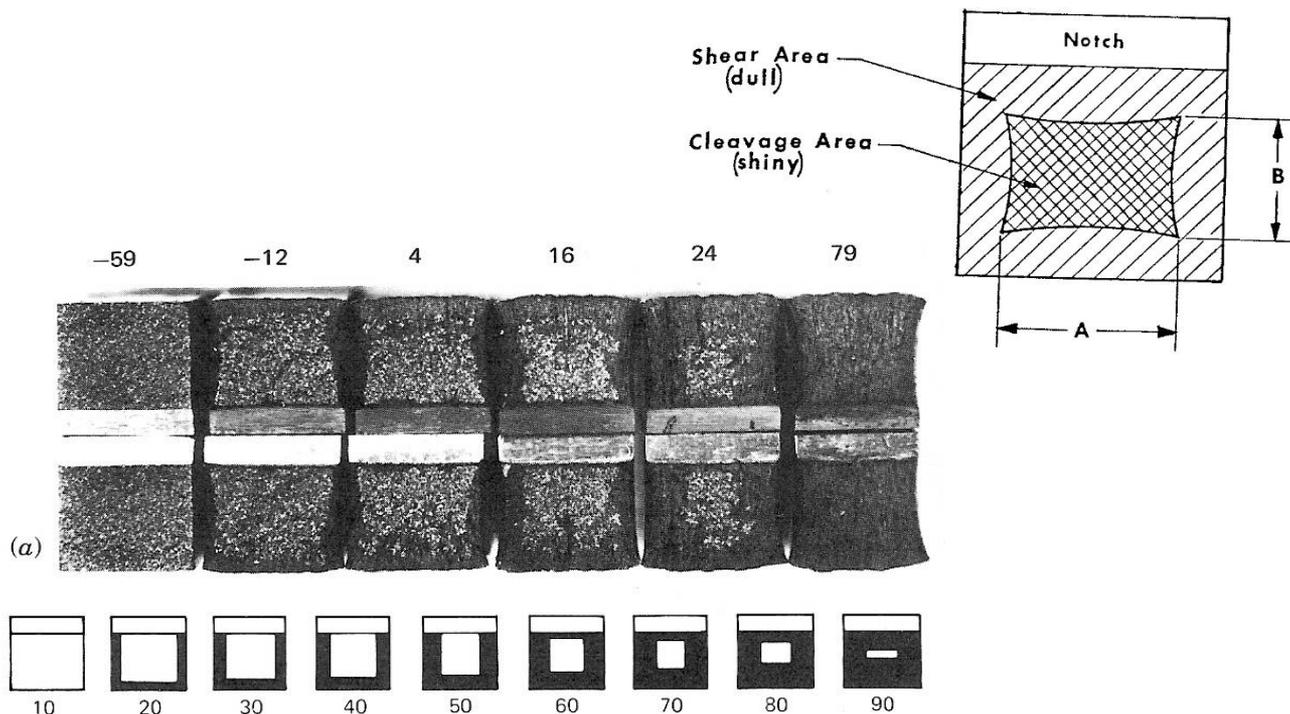
- Realizam-se ensaios a diferentes temperaturas.
- Avalia-se:
 - i) Energia Absorvida na Fratura;
 - ii) Aparência da Fratura;
 - iii) Deformação (expansão lateral ou contração da raiz do entalhe).
- A transição usualmente é gradual: Dificuldade de definir com precisão uma temperatura de transição dúctil-frágil. Critérios arbitrários.



Resultados dos Ensaio:

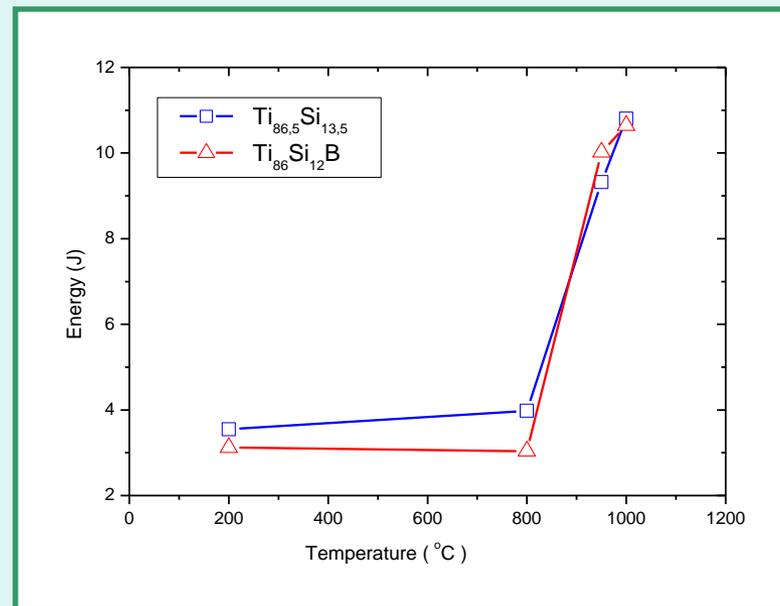
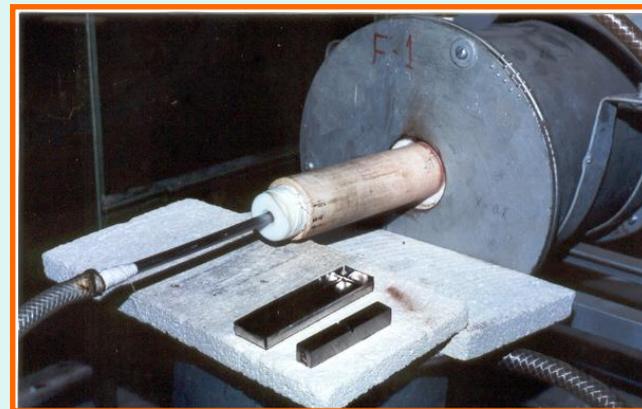
- Aparência da Fratura (critério subjetivo e portanto não recomendável para especificações). Parte frágil expande-se a partir do centro.
- Expansão Lateral: Deve-se medir as duas metades da amostra fraturada (uma metade do corpo-de-prova fraturado pode incluir a expansão máxima para ambos os lados, para um dos lados, ou para nenhum deles).

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



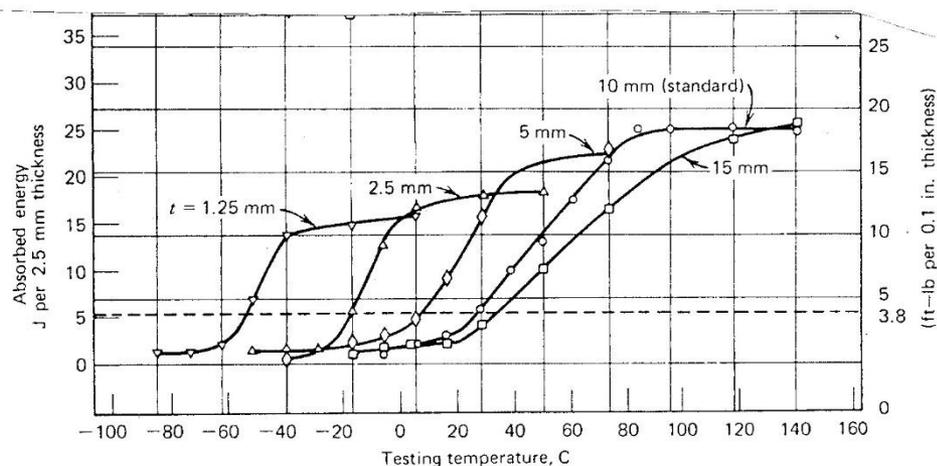
Ensaio de Impacto em altas temperaturas realizados na EEL/USP:

(Máquina cedida pela AMR/IAE/CTA)



Aplicações e Limitações do Ensaio Convencional:

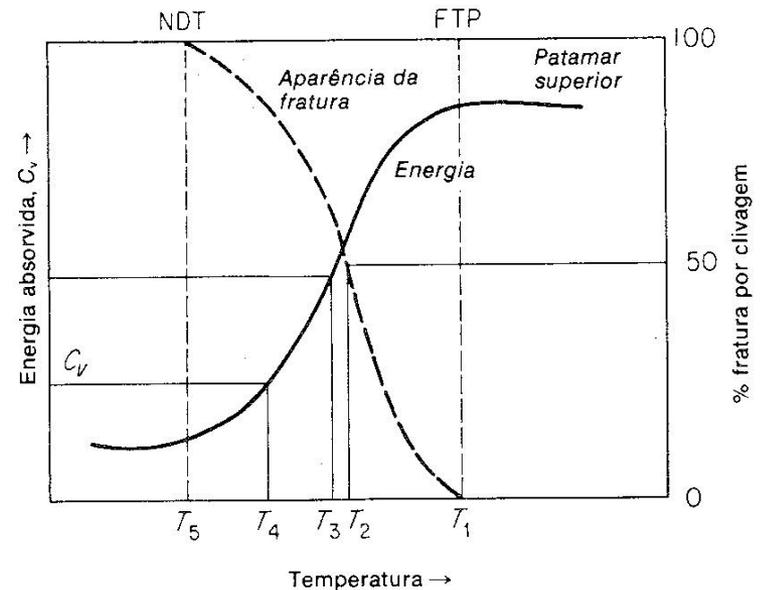
- A medida de uma temperatura de transição pelo ensaio Charpy fornece uma forma de controle de qualidade com respeito à fratura frágil, permitindo diferenciar aços com diferentes composições ou diferentes tratamentos térmicos. O tamanho de grão também afeta a temperatura de transição.
- O ensaio é muito 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.



Critérios para determinação da transição frágil-dúctil:

- Critérios para determinar a Temperatura de Transição: NDT, FTP, 50%D-50%F, $(E_{\text{máx}} + E_{\text{mín}})/2$, E arbitrário (ex. 20 J).
- O desenvolvimento do critério “15-ft-lb” (20 J):

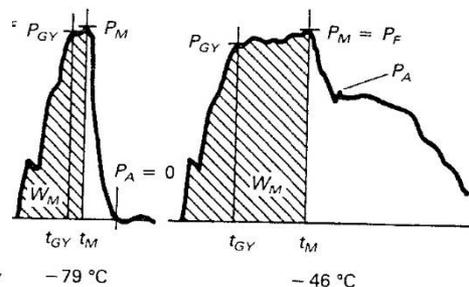
- Amostras de aço foram coletadas de aproximadamente 100 navios fraturados e submetidas a análises, incluindo ensaios de impacto.
- As chapas foram classificadas em 3 grupos: Source, Through, End.
- Ensaios de impacto evidenciaram diferenças nos resultados para esses grupos, quanto à transição para fratura frágil.
- Análises estatísticas indicaram que as diferenças entre os grupos, no que diz respeito à temperatura de transição e à energia absorvida em determinada temperatura não foram por mero acaso.
- Uma constatação foi que somente 10% das amostras Source absorveu mais de 10-ft-lb no ensaio CVN à temperatura de fratura frágil, enquanto que 73% das amostras End absorveu mais que 10-ft-lb. Concluiu-se que uma fratura frágil não é esperada ocorrer na estrutura do casco de navios se as chapas absorvem mais que 10-ft-lb no ensaio CVN realizado no limite inferior da temperatura de operação.
- Por razões de segurança, estabeleceu-se um nível maior, ou seja, o valor de 15-ft-lb (20J) como critério para determinação da temperatura de transição em aços para construção naval.



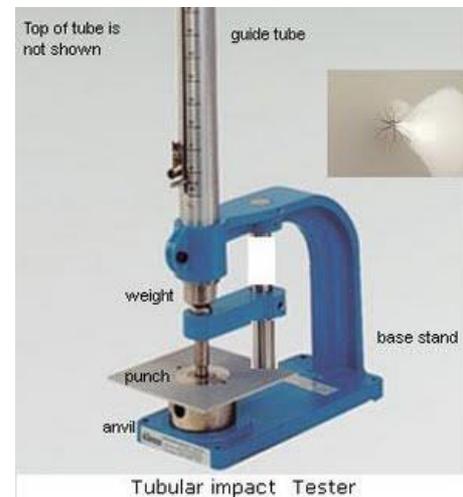
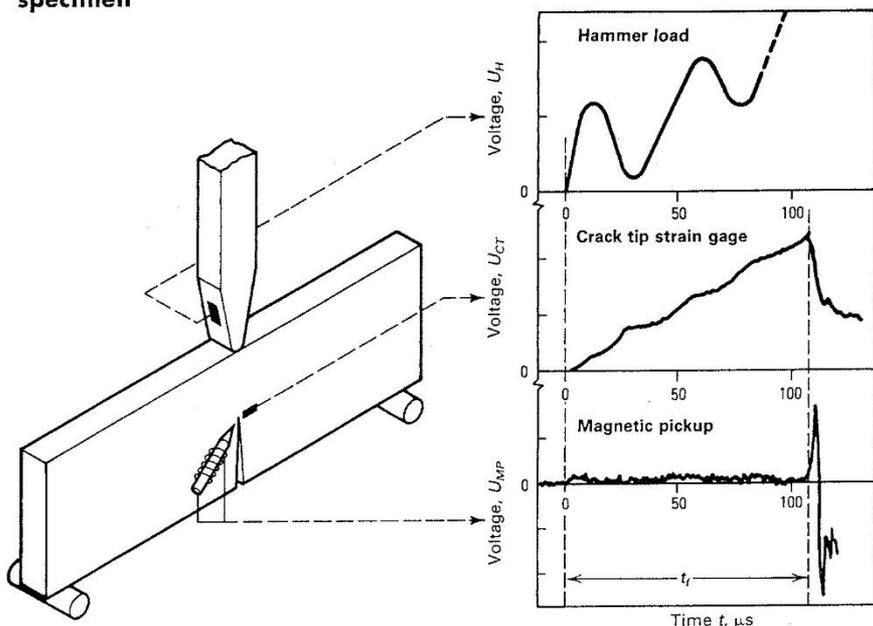
- T_1 – FTP
- T_2 – 50%D-50%F
- T_3 – $(E_{\text{máx}} + E_{\text{mín}})/2$
- T_4 – CV15
- T_5 – NDT

Melhorias e Critérios Adicionais:

- Ensaio de Impacto Instrumentado.
- Correlações CVN vs. K_{IC} .
- Teste da Queda do Peso (DWT) e outros.



Time-to-fracture measurement of a precracked Charpy specimen



Tubular impact Tester

CEAST 9340



