



SMM 0342 - INTRODUÇÃO AO ENSAIO MECÂNICO DOS MATERIAIS

Prof. Dr. José Benedito Marcomini

Referências

- **ASM Metals HandBook V08 - Mechanical Testing and Evaluation;**
- **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos teóricos e práticos. Souza, Sergio Augusto. Editora Blucher. 5º. Edição;**
- **Mechanical Behavior of Materials, M.A. Meyers, K.K. Chawla, Cambridge 2009;**
- **Mechanical Metallurgy, George E. Dieter, McGraw-Hill , 1989.**
- **Garcia, Amauri; Spim, Jaime Alvares; Santos, Carlos Alexandre “Ensaio dos Materiais”**
- **Canevarolo, Sebastião V. “Técnicas de Caracterização de Polímeros” – Editora Artliber**
- **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue Norman E. Dowling.**
- **Normas de Ensaio Mecânicos**

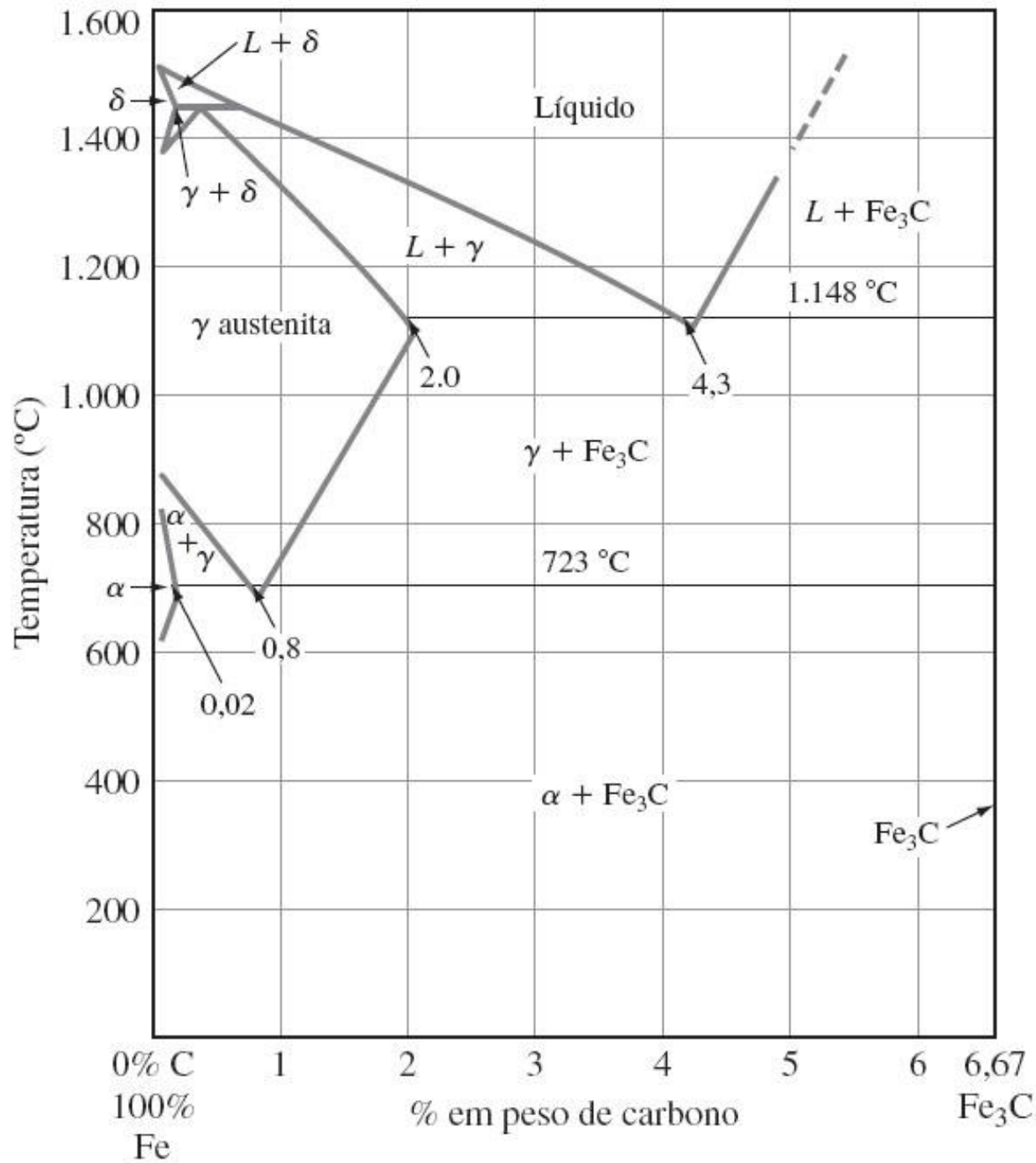
- **Produção mundial de aço (World Steel Association) em 2019:**

1,68 bilhões de toneladas

- **Produção mundial de plástico (ABIPLAST):
350 milhões por ano**

O QUE É AÇO?

**É UMA LIGA DE FERRO E CARBONO COM
ELEMENTOS RESIDUAIS: P, S, Mn, Si**



(Smith)

FASES E CONSTITUINTES

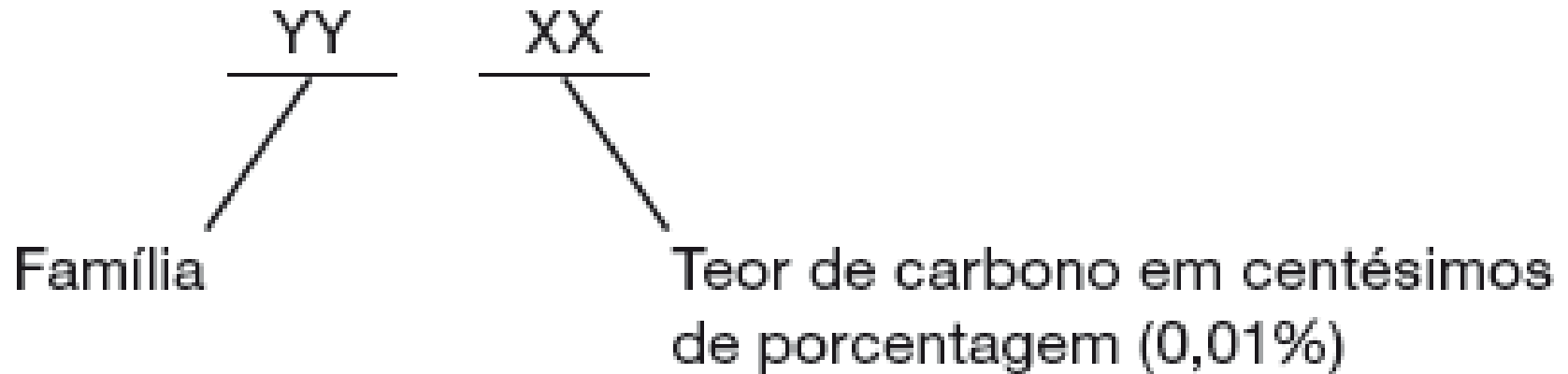
- ***Ferrita (δ)***: Solução sólida de C em Fe CCC – 1.394°C a 1.538°C. Solubilidade máxima de 0,09% de C em 1.495°C ($a=2,91\text{\AA}$)
- ***Austenita (γ)***: Solução sólida de C no Fe CFC- 727°C a 1.495°C. Solubilidade máxima de C-2,11 % a 2,14%, em 1148°;
- ***Ferrita (α)***: Solução sólida de C no Fe CCC – até 912°. Solubilidade máxima 0,020% de C em 723°C a 727°C ($a=2,88\text{\AA}$);
- ***Cementita (Fe_3C)***: ortorrômbico, alta dureza;
- ***Perlita: microconstituente*** formado por α e Fe_3C .

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

(Nomenclatura)

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

SAE, AISI, ABNT(NM), ASTM, ASME



Exemplo:

- Aço SAE 1045

10- aço carbono, sem elemento de liga, apesar de conter Mn (0,60 a 0,90%p), Si (0,15 a 0,35%p), P <0,05%p, S<0,05%p;

45 – Significa que o teor nominal é 0,45% de C.

- AISI4140
- 41- Aço ligado ao Cr e Mo;
- 40 – Teor nominal é 0,40%C.

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

COMPOSIÇÃO QUÍMICA:

- NORMA ABNT NM87
- NORMA SAE J 403 E J 404

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E

DUREZA:

- NORMA SAE J 1268

ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES

MECÂNICAS:

- NORMA SAE J 1397

NORMAS ASTM E DIN:

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES MECÂNICAS

CÓDIGO ASME: PETROQUÍMICA- SOLDAGEM-MATERIAIS- ENSAIOS

Tabela 10.1

Principais famílias de aços conforme a classificação ABNT (similar a AISI e SAE)

Aços carbonos	10xx	Aço carbono
	11xx	Aço carbono resulfurado (corte fácil)
	12xx	Aço carbono resulfurado e refosforado (corte fácil)
Aços de baixa liga (construção mecânica)	13xx	Mn 1,75%
	23xx	NI 3,5%
	25xx	NI 5,0%
	31xx	NI 1,25%, Cr 0,65%
	33xx	NI 3,50%, Cr 1,55%
	40xx	Mo 0,25%
	41xx	Cr 0,50% ou 0,95%, Mo 1,12% ou 0,20%
	43xx	NI 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25%
	46xx	NI 1,55% ou 1,80%, Mo 0,20% ou 0,25%
	47xx	NI 1,05%, Cr 0,45%, Mo 0,20%
	48xx	NI 3,50%, Mo 0,25%
	50xx	Cr 0,80% ou 0,40%
	51xx	Cr 0,80% a 1,05%
	5xxxx	Cr 0,50% ou 1,00% ou 1,45%, C 1,00%
	61xx	Cr 0,80% ou 0,95%, V 0,10% ou 0,15% mínimo
	86xx	NI 0,55%, Cr 0,50% ou 0,65%, Mo 0,20%
87xx	NI 0,55%, Cr 0,50%, Mo 0,25%	
92xx	Mn 0,85%, Si 2,00%	
93xx	NI 3,25%, Cr 1,20%, Mo 0,12%	
98xx	NI 1,00%, Cr 0,80%, Mo 0,25%	

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

N-034.004.001



ABNT-Associação
Brasileira de
Normas Técnicas

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treze de Maio, 13 - 28º andar
CEP 20003-900 - Caixa Postal 1680
Rio de Janeiro - RJ
Tel.: PABX (021) 210-3122
Fax: (021) 220-1762/220-6436
Endereço Telegráfico:
NORMATÉCNICA

Copyright © 2000,
ABNT-Associação Brasileira
de Normas Técnicas
Printed in Brazil/
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

OUT 2000

NBR NM 87

Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química

Origem: NM 87:1996
ABNT/CB-28 - Comitê Brasileiro de Siderurgia
NBR NM 87 - Carbon steel and alloy steel for general engineering purpose -
Designation and chemical composition
Descriptors: Steel, Chemical composition
Esta Norma cancela e substitui a NBR 6006:1994
Válida a partir de 30.11.2000

Palavras-chave: Aço, Composição

19 páginas

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

COMPOSIÇÃO QUÍMICA NORMA ABNT NM87

Designação COPANT del acero/ Designação COPANT do aço	Composición química de colada (%) (1) / Composição química de corrida (%) (1)						
	Carbono (C)	Manganeso/ Manganês (Mn)	Silício (Si)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdeno/ Molibdênio (Mo)	Vanádio/ Vanádio (V)
1330	0,28-0,33	1,60-1,90	0,15-0,35	-	-	-	-
1345	0,43-0,48	1,60-1,90	0,15-0,35	-	-	-	-
3015	0,12-0,17	0,40-0,60	0,15-0,40	1,40-1,70	1,40-1,70	-	-
3115	0,13-0,18	0,40-0,50	0,15-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	-	-
3519	0,15-0,20	0,40-0,60	0,15-0,40	1,80-2,10	1,80-2,10	-	-
4015	0,12-0,20	0,40-0,80	0,10-0,35	-	-	0,25-0,35	-
4113	0,10-0,18	0,40-0,70	0,10-0,35	-	0,70-1,10	0,45-0,65	-
4117	0,15-0,22	0,60-0,90	0,10-0,40	-	0,85-1-15	0,10-0,40	-
4118	0,18-0,23	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,40-0,60	0,08-0,15	-
4120	0,17-0,22	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,30-0,50	0,40-0,50	-
4122	0,17-0,22	0,70-1,00	0,15-0,40	-	0,30-0,60	0,40-0,50	-
4125	0,23-0,28	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,40-0,60	0,20-0,30	-
4126	0,22-0,29	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4127	0,23-0,29	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,40-0,60	0,40-0,50	-
4130	0,28-0,33	0,40-0,60	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-
4133 ^A	0,29-0,35	0,60-0,85	0,15-0,35	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4135	0,33-0,38	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15,0,25	-
4136	0,30-0,37	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4137	0,35-0,40	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15,0,25	-
4141	0,38-0,45	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4142	0,40-0,45	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-
4145	0,43-0,48	0,75-1,00	0,15-0,30	-	0,80-1,10	0,15,0,25	-
4150	0,48-0,53	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15,0,25	-
4151	0,46-0,54	0,50-0,80	0,15-0,40	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4161	0,56-0,64	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,70-0,90	0,25-0,35	-
4210	0,08-0,15	0,40-0,70	0,50 max.	-	2,00-2,50	0,90-1,20	-
4320	0,17-0,22	0,45-0,65	0,15-0,35	1,65-2,00	0,40-0,60	0,20-0,30	-
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,15-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30	-
4517	0,15-0,20	0,40-0,60	0,15-0,40	1,40-1,70	1,50-1,80	0,25-0,35	-
4534	0,30-0,38	0,40-0,70	0,15-0,40	1,40-1,70	1,40-1,70	0,15-0,30	-
4620	0,17-0,22	0,45-0,65	0,15-0,35	1,65-2,00	-	0,20-0,30	-
4720	0,17-0,22	0,50-0,70	0,15-0,35	0,90-1,20	0,35-0,55	0,15-0,25	-
4815	0,13-0,18	0,40-0,60	0,15-0,35	3,25-3,75	-	0,20-0,30	-
4820	0,18-0,23	0,50-0,70	0,15-0,35	3,25-3,75	-	0,20-0,30	-
5016	0,12-0,18	0,40-0,60	0,15-0,40	-	0,40-0,70	-	-
5046	0,43-0,48	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,20-0,35	-	-
5060	0,56-0,64	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,40-0,60	-	-
5115	0,13-0,18	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,70-0,90	-	-
5116	0,14-0,19	1,00-1,30	0,15-0,35	-	0,80-1,10	-	-
5120	0,17-0,22	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,70-0,90	-	-
5121 ^B	0,17-0,22	1,10-1,40	0,15-0,35	-	1,00-1,30	-	-
5123 ^C	0,20-0,25	0,60-0,80	0,12 max	-	0,80-1,00	-	-
5125 ^C	0,23-0,28	0,60-0,80	0,12 max	-	0,80-1,00	-	-
5130	0,28-0,33	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,80-1,10	-	-
5132	0,30-0,35	0,60-0,80	0,15-0,35	-	0,75-1,00	-	-

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

COMO INTERPRETAR A NOMENCLATURA DE AÇOS NA NORMA DIN

AÇOS CARBONO

Podem ser classificados de duas formas: **pelo limite de resistência à tração** ou **pela composição química**.

Pelo **limite de resistência à tração**, utiliza-se o símbolo St (de stahl, que significa aço em alemão), seguido do limite de resistência à tração mínimo.

Ex: **St 42** – aço com limite de resistência à tração mínimo de **42 kgf/mm²**.

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

Pela **composição química**, emprega-se a letra C seguida do teor de carbono multiplicado por 100.

Ex: **C 45** - aço com teor médio de carbono de **0,45%**. Equivalente ao **SAE/ABNT 1045**

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

AÇOS LIGADOS

No caso de **aços baixa liga**, estes são representados de acordo com o seguinte exemplo:

Aço DIN 42 Cr Mo 4, da norma DIN EN 10083-3 (equivalente ao **SAE4140**) :

- **42** é o teor de **carbono** multiplicado por 100 (ou seja **0,42%**);
- **Cr e Mo** são símbolos dos elementos de liga;
- **4** é o multiplicador do teor do elemento de liga em maior quantidade .

EQUIVALÊNCIA

5.1.3 - AÇOS LIGADOS PARA BENEFICIAMENTO

QUAL. GERDAU	ABNT/SAE AISI/ASTM	DIN	UNI	JIS	BS	AFNOR
1330	1330	(30Mn5)	-	(SMn 2H)	(120M36)	-
4037	4037	-	-	-	(605A37)	-
41 Cr 4	5140	41Cr4	41Cr4	SCr 4H	(530H40)	42C4
4130	4130	(30CrMo4)	(30CrMo4)	SCM 3H	(708A30)	(30CD4)
4140	4140	(42CrMo4)	(42CrMo4)	(SCM 4H)	(708M40)	(42CD4)
4142	4142	41CrMo4	41CrMo4	(SCM 4H)	(708A42)	(42CD4)
4150	4150	(50CrMo4)	-	(SCM 5H)	(708A47)	-
42CrMo4	(4140)	42CrMo4	42CrMo4	(SCM 24H)	708M40	42CD4
4340	4340	(40CrNiMo6)	-	(SNM 21H)	(817M40)	(35NCD6)

NOMENCLATURA QUANTO AO TEOR DE CARBONO

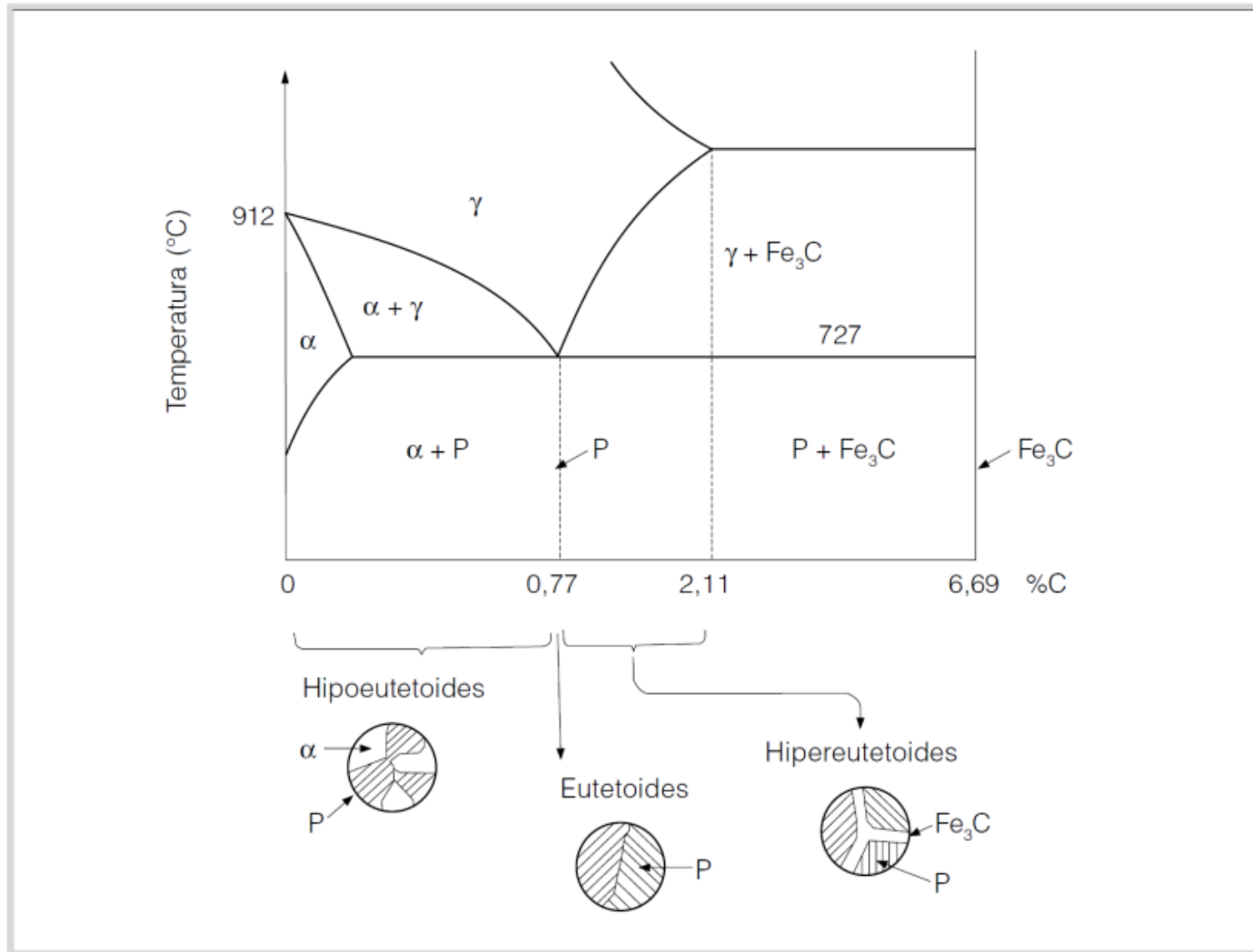
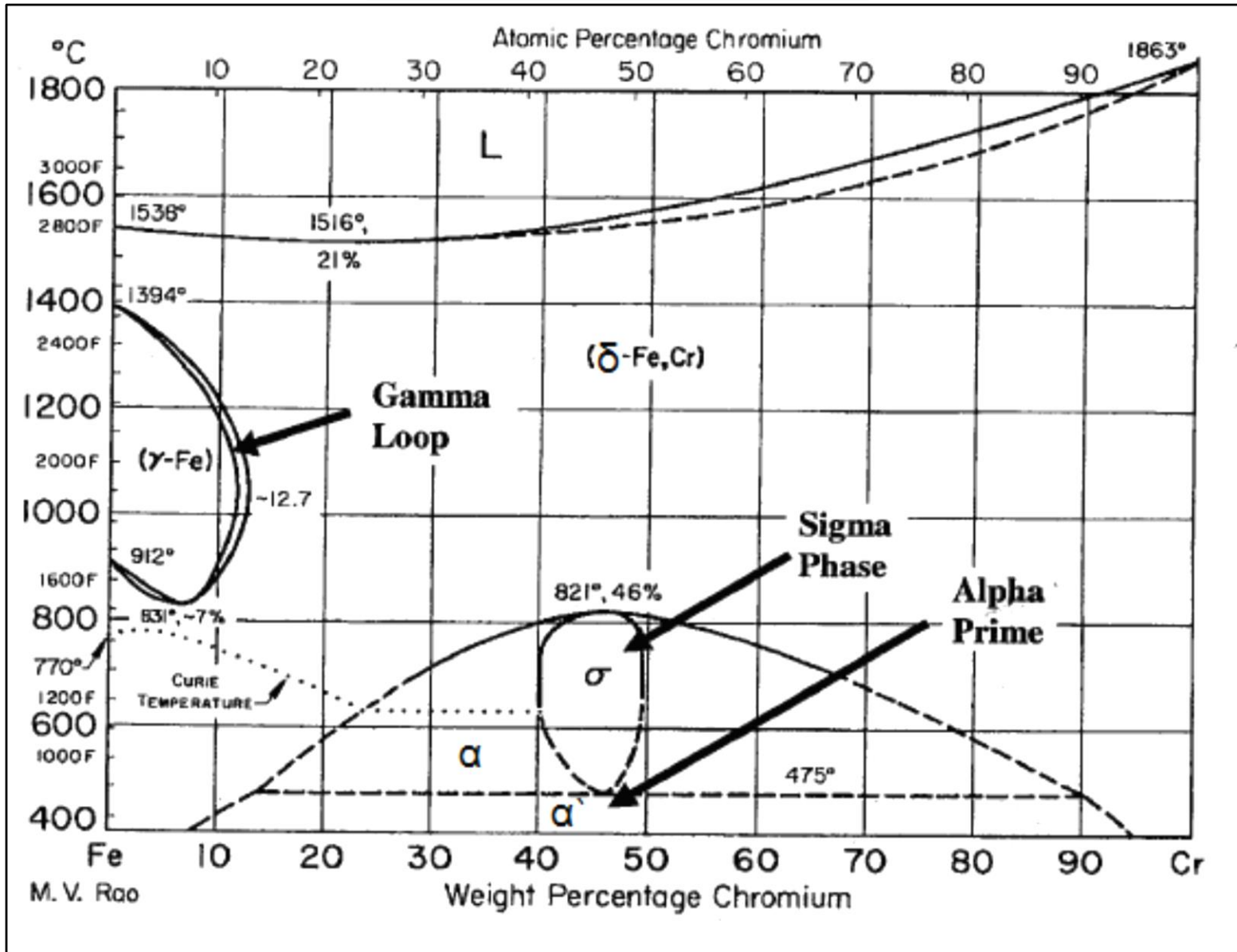


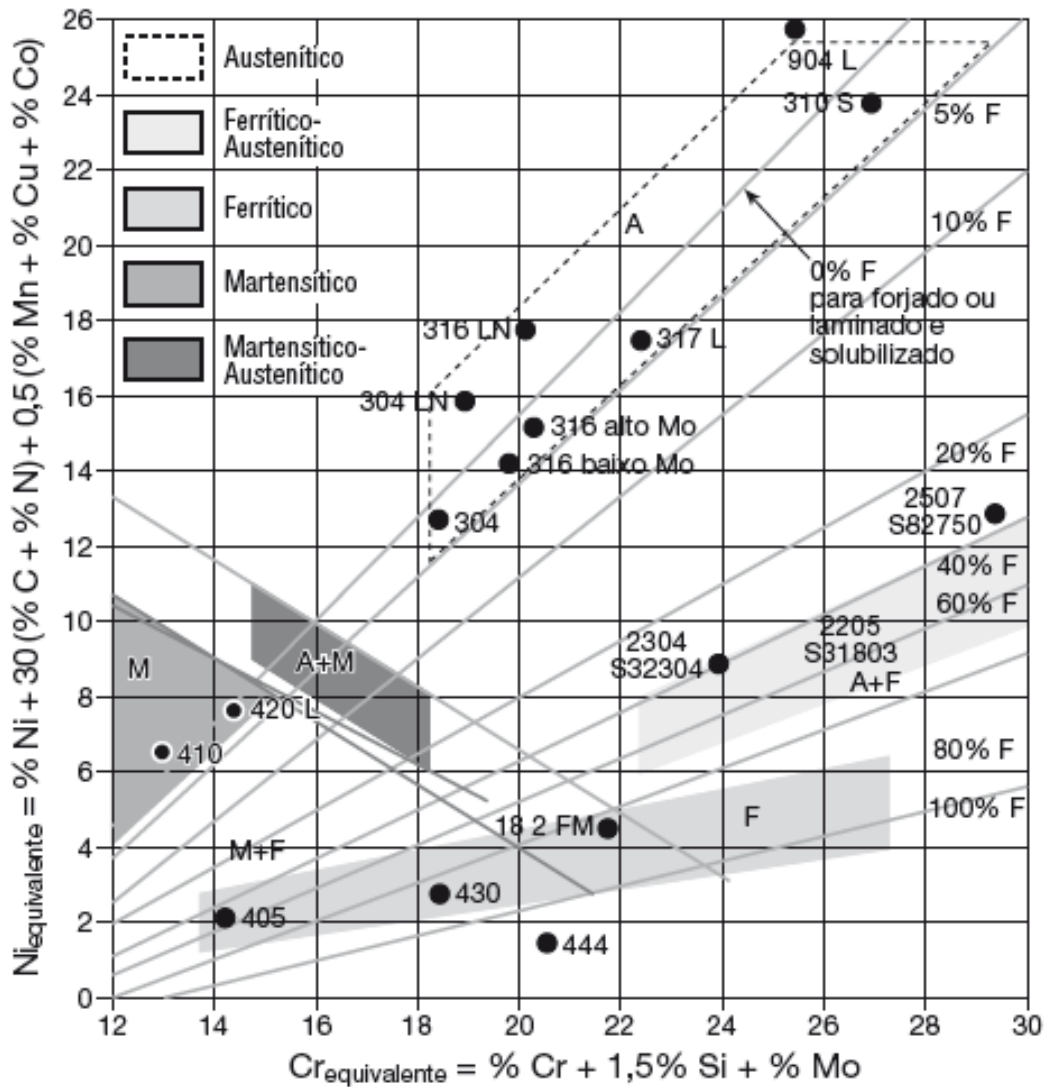
Figura 1.14 Diagrama de “fases” Fe-Perlita. (ADAPTADO: AÇOS E LIGAS ESPECIAIS-Costa & Silva e Mei)

AÇOS INOXIDÁVEIS

(ADAPTADO: COLPAERT)



AÇOS INOXIDÁVEIS



**ÁÇOS
INOXIDÁVEIS: ALTO
Cr > 12% CARBONO
ABAIXO DE 0,10%.**

**AUSTENÍTICOS:
SÉRIE 300 – Cr (16-30%) E Ni (8-35%)
EX: 316, 304.**

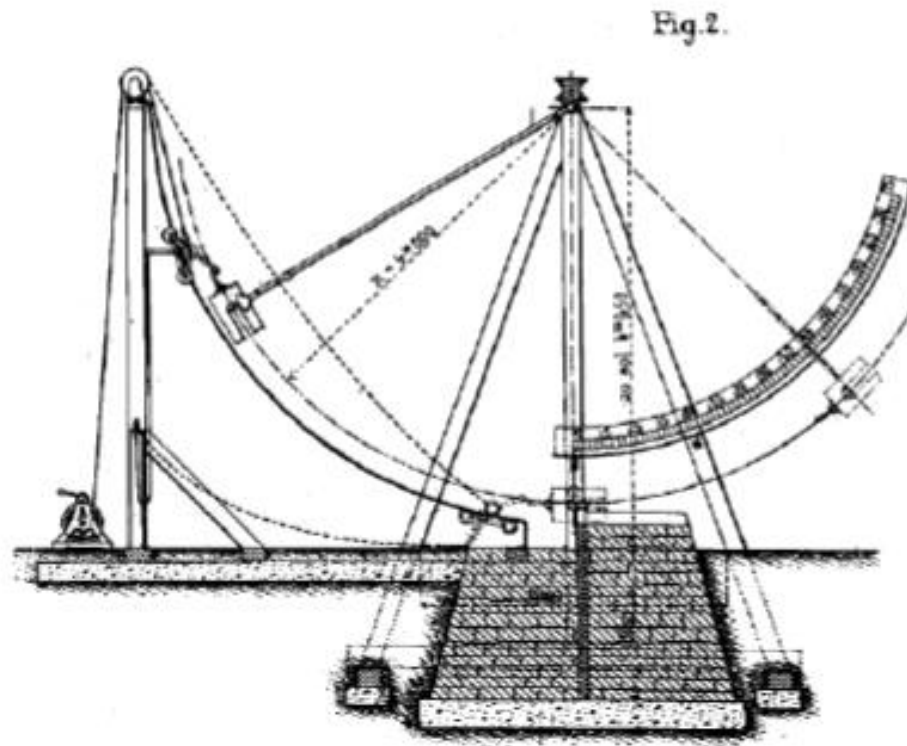
**MARTENSÍTICOS:
SÉRIE 400- Cr(11-18%) EX: 410, 420.**

DUPLEX: Cr(18-27%), Ni(4-7%) E Mo(1-4%). EX: 2205.

(ADAPTADO: COLPAERT)

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.



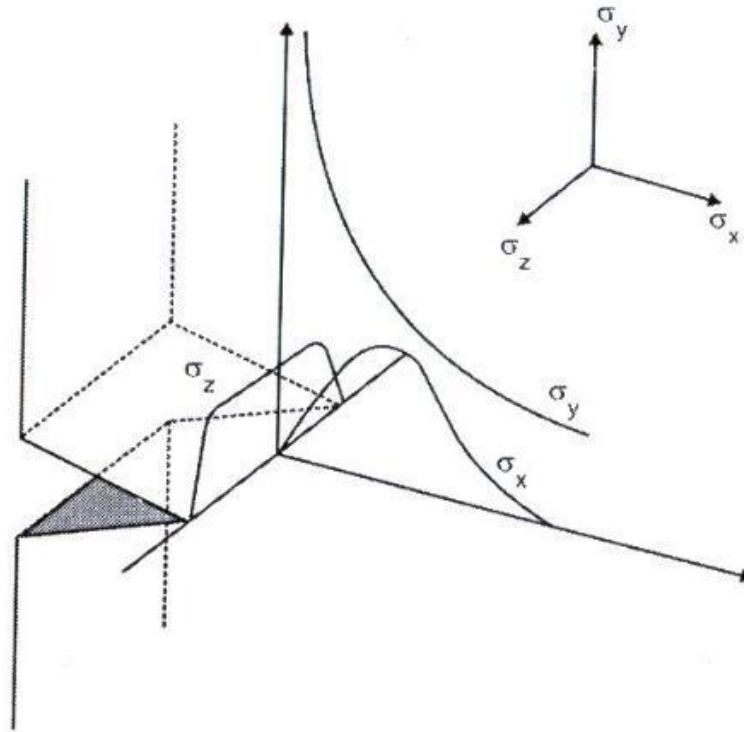
Desenho da máquina para ensaio de impacto proposta por Charpy.

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:
- w é ângulo interior do entalhe.

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

Efeito Geometria do Entalhe



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

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**.

- 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).

Velocidade de Impacto

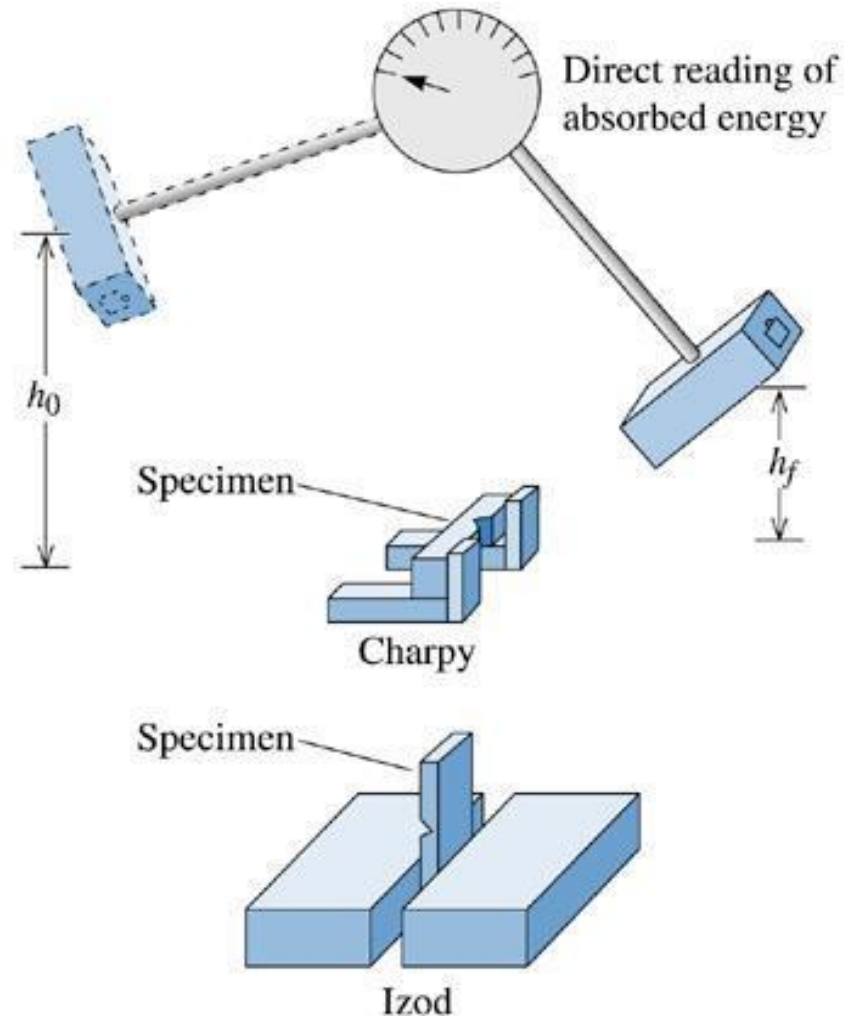
A **velocidade de impacto** têm um efeito significativo no comportamento do material **metálico ou polimérico**. Em baixa velocidade de impacto o material pode apresentar um comportamento de **fratura dúctil** e em **altas velocidades, comportamento frágil**. Existe uma **velocidade de impacto crítica**,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

Máquina de Ensaio Charpy



Técnicas de Ensaio de Impacto: Charpy e Izod

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



ENSAIO DE IMPACTO

Para os ensaios com o pêndulo (Charpy e Izod) a E_{pot} da elevação do martelo se transforma em E_{cin} na descida. Parte desta energia é transferida para o CP, provocando sua ruptura.

$$E_{abs} = WR (\cos \beta - \cos \alpha)$$

E_{abs} é a energia absorvida pelo CP; $W=mg$

Esquema do Pêndulo de Impacto

ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

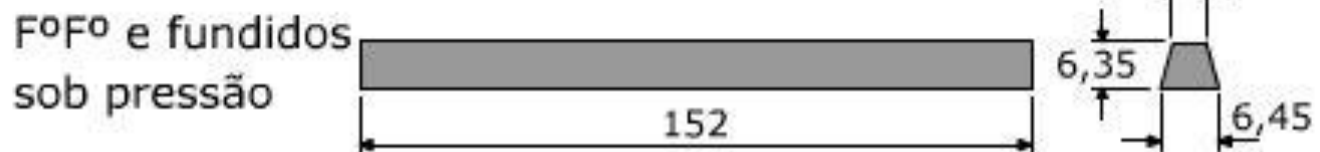
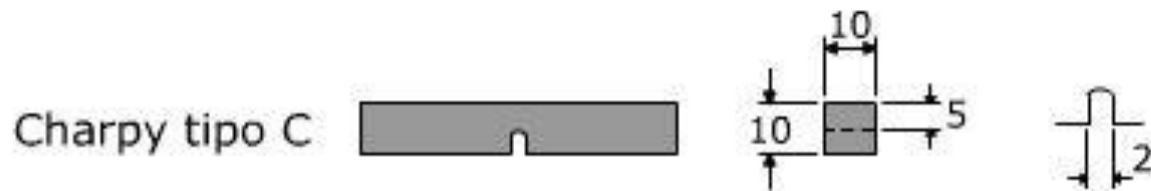
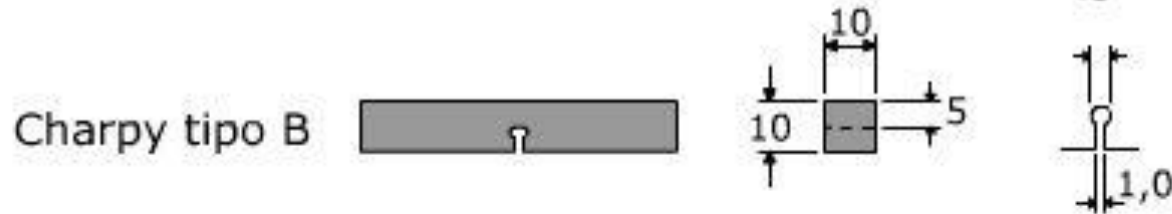
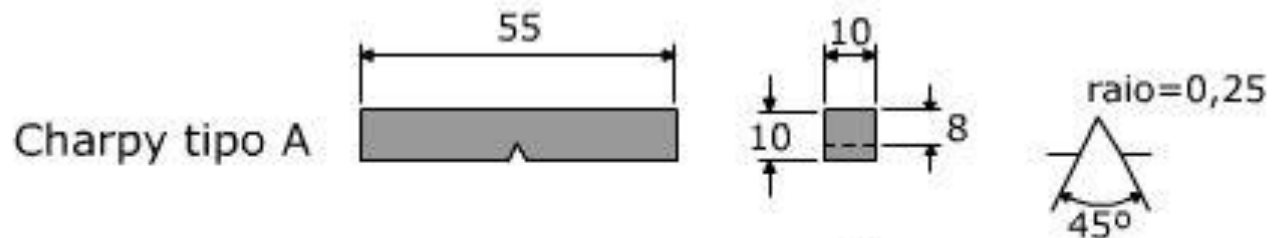
Pêndulo e Configuração do
Teste Charpy

ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Posição de impacto sobre o corpo de prova
Charpy

Principais Configuração CPs Charpy

Todas as dimensões em mm



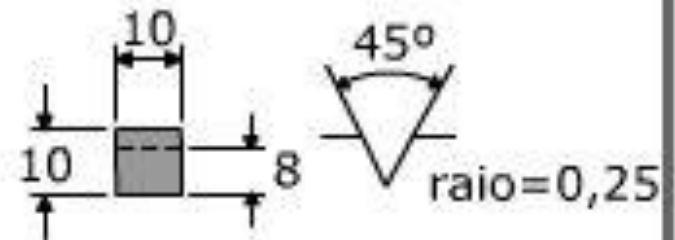
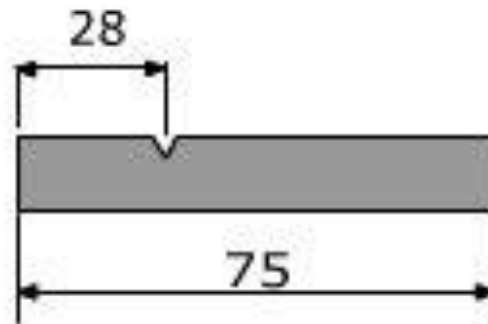
Ensaio Impacto IZOD

Posição de impacto sobre o corpo de prova
Izod

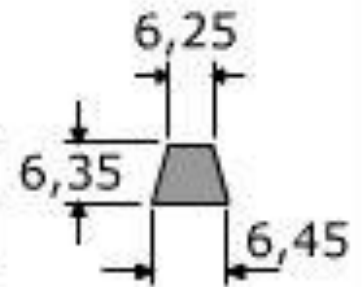
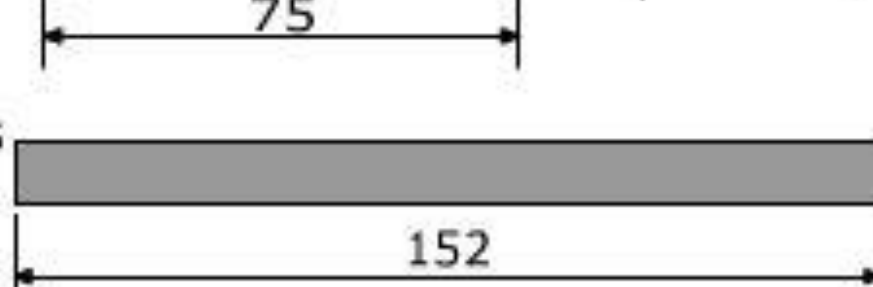
Principais Configuração CPs IZOD

Todas as dimensões em mm

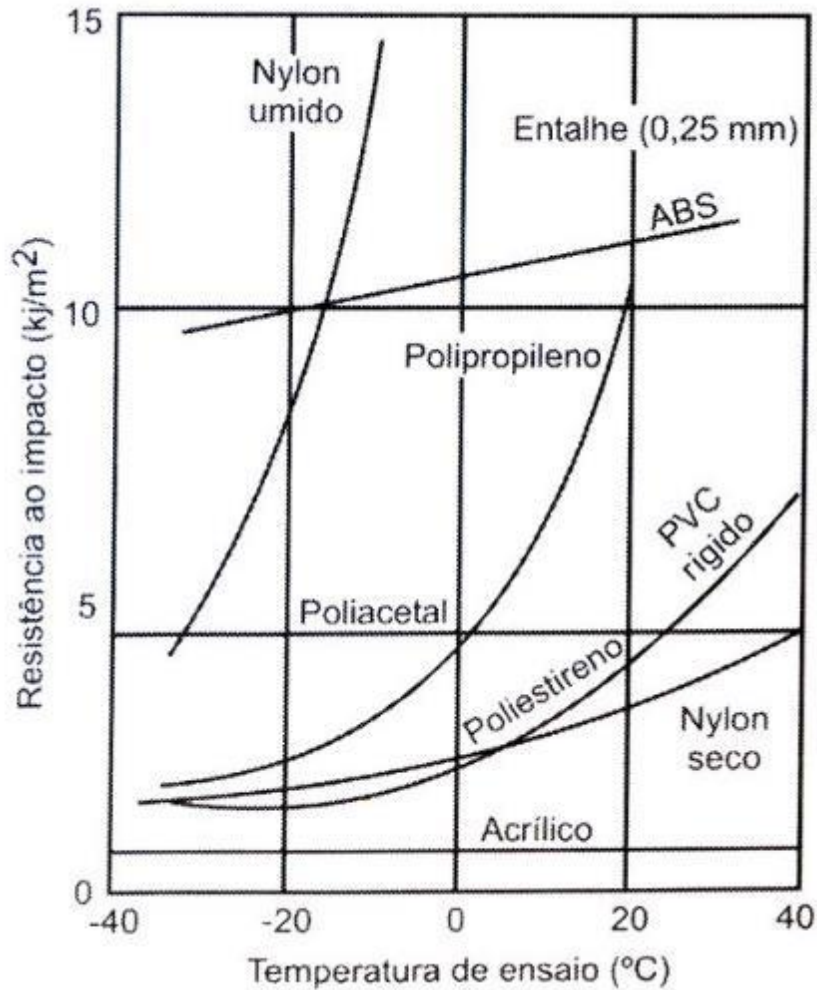
Izod (tipo D)



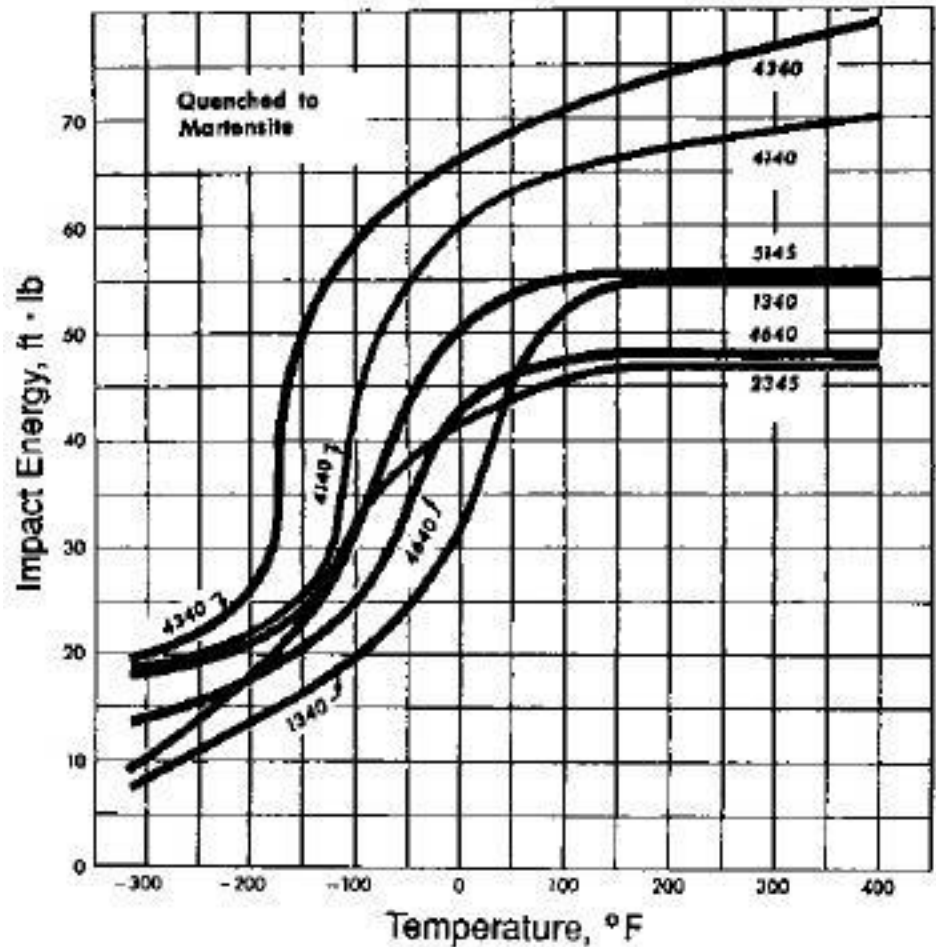
F^oF^o e fundidos sob pressão



Efeito Temperatura na Res. Impacto

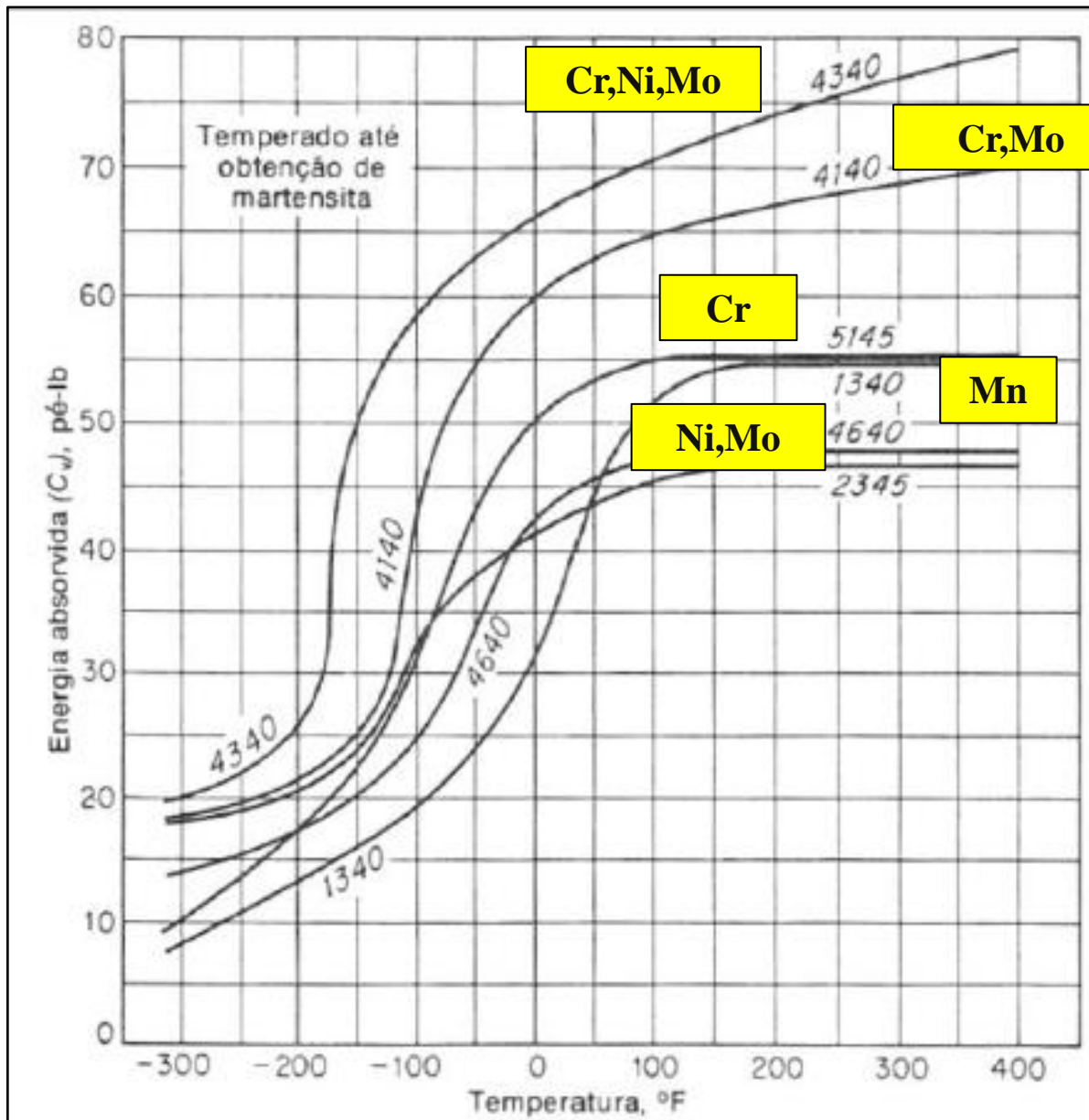


Polímeros



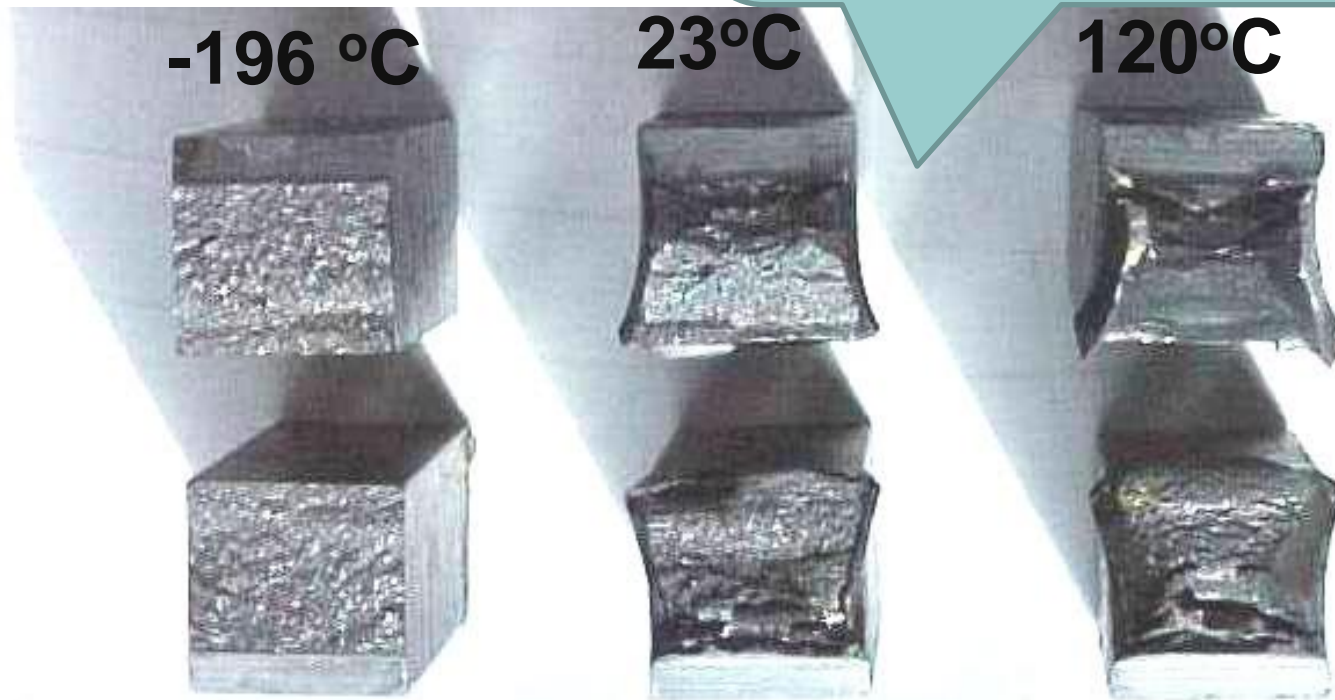
Metais

Efeito Temperatura X Elementos liga



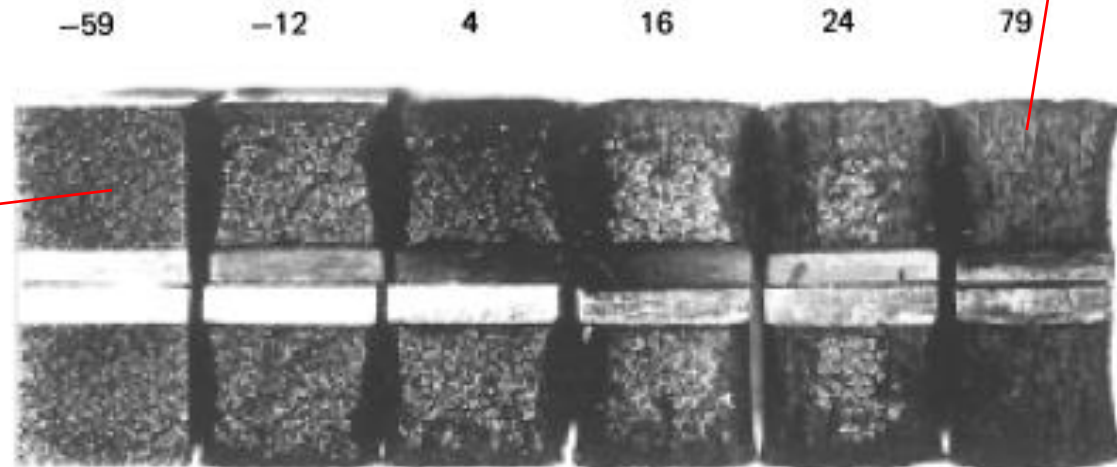
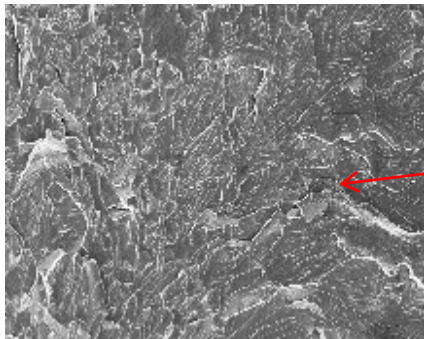
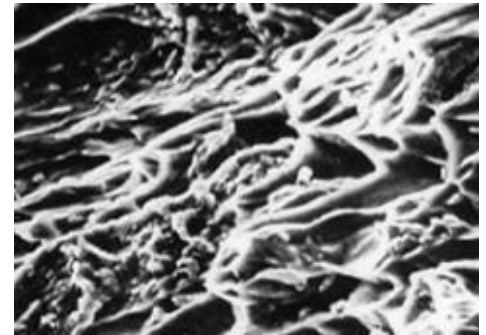
Efeito Temperatura na Res. Impacto

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



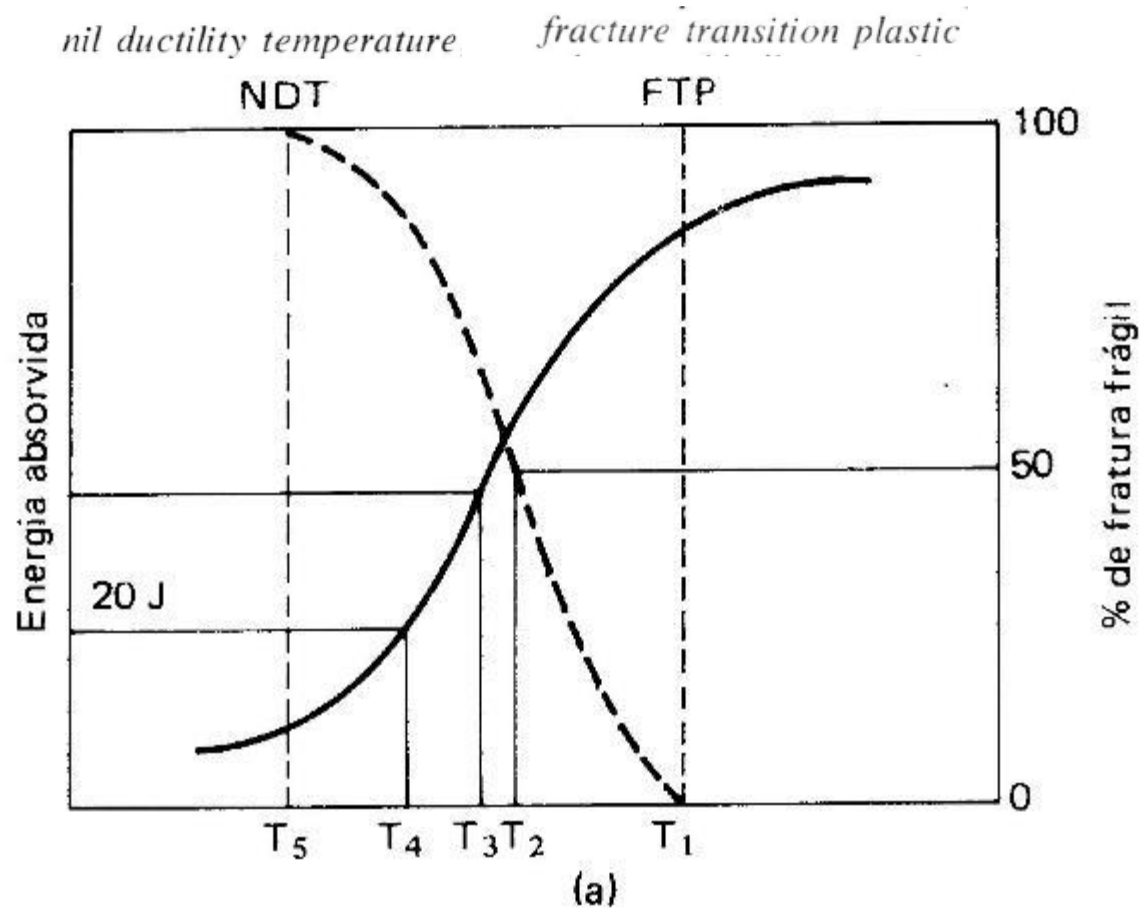
Transição Dúctil - Frágil

- ✓ **transição dúctil – frágil: comportamento frágil com a diminuição da temperatura.**
- ✓ **Uma análise da superfície de fratura de CPs testados em diferentes temperaturas indicam a transição dúctil-frágil pelo % de fratura dúctil e frágil em cada temperatura.**

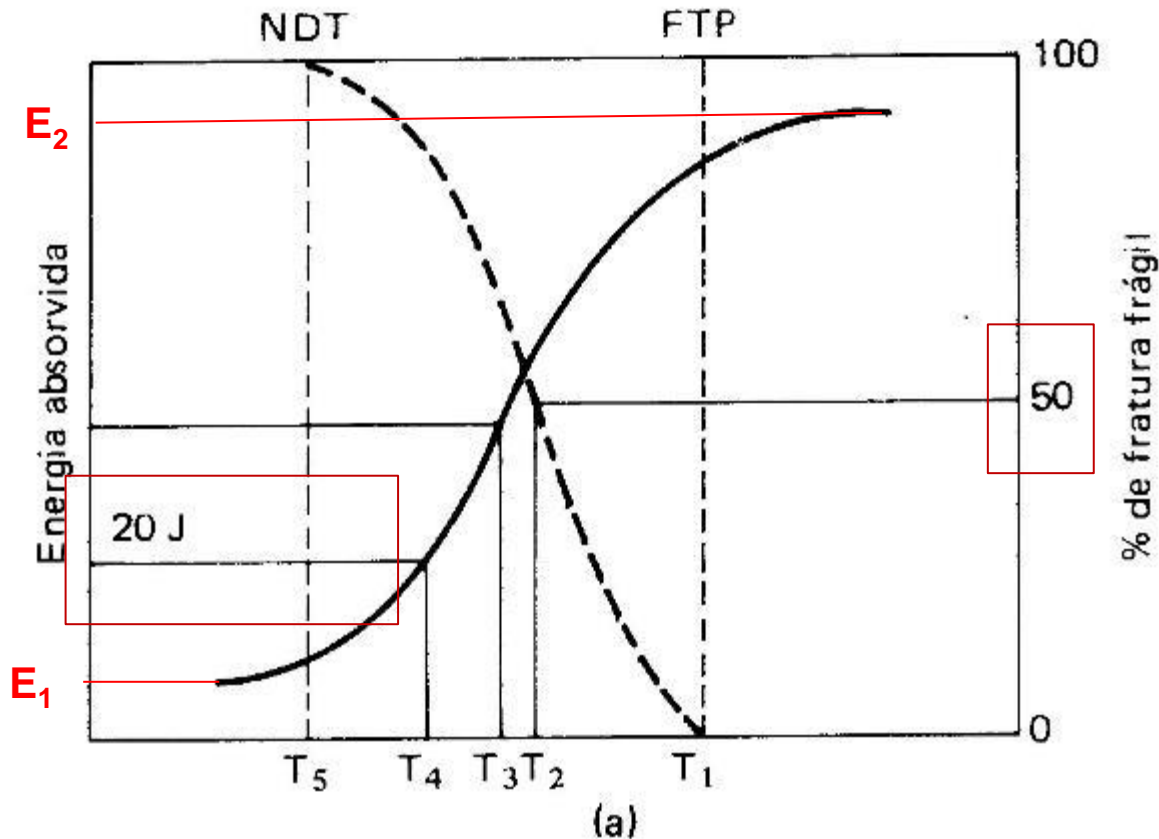


O ensaio é realizado em, **por pelo menos 5 temperaturas**, iniciando de uma **temperatura negativa** para se detectar a temperatura de transição quando a fratura passa de dútil para frágil. Podem ser adotados **alguns critérios** para a determinação da temperatura de transição.

- A temperatura de transição é sensível à composição e à microestrutura da liga
- ↓ Tamanho de grão
- ↓ Temperatura de transição
- ↓ Teor de carbono
- ↓ Temperatura de transição



Temperatura de Transição Dúctil – Frágil (TTDF)-critério de energia



Temperatura de transição (Média das energias)

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

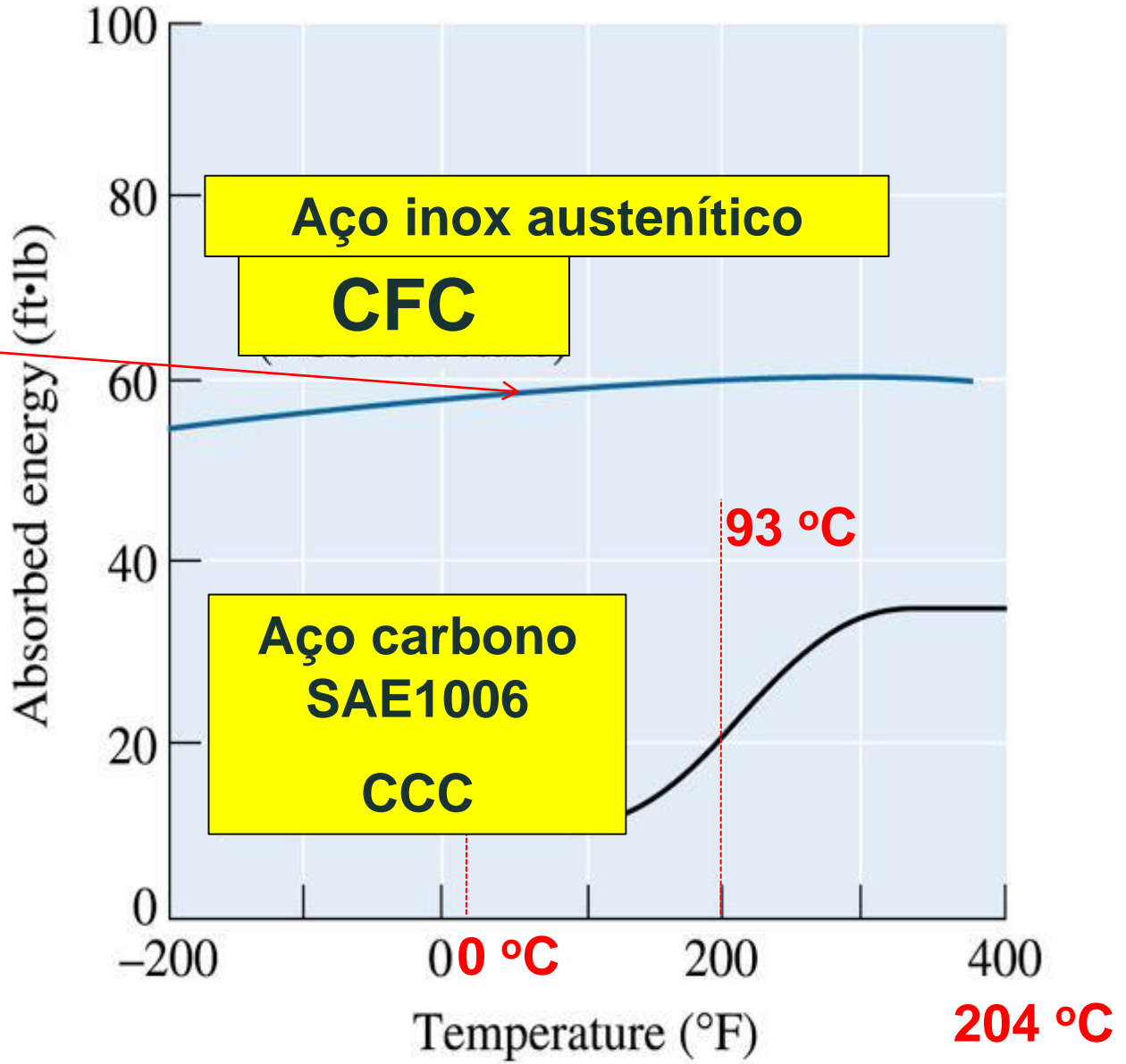
Será que todos os metais apresentam temperatura de transição dútil – frágil?

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

Transição Dúctil - Frágil

Não apresenta transição dúctil/frágil

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

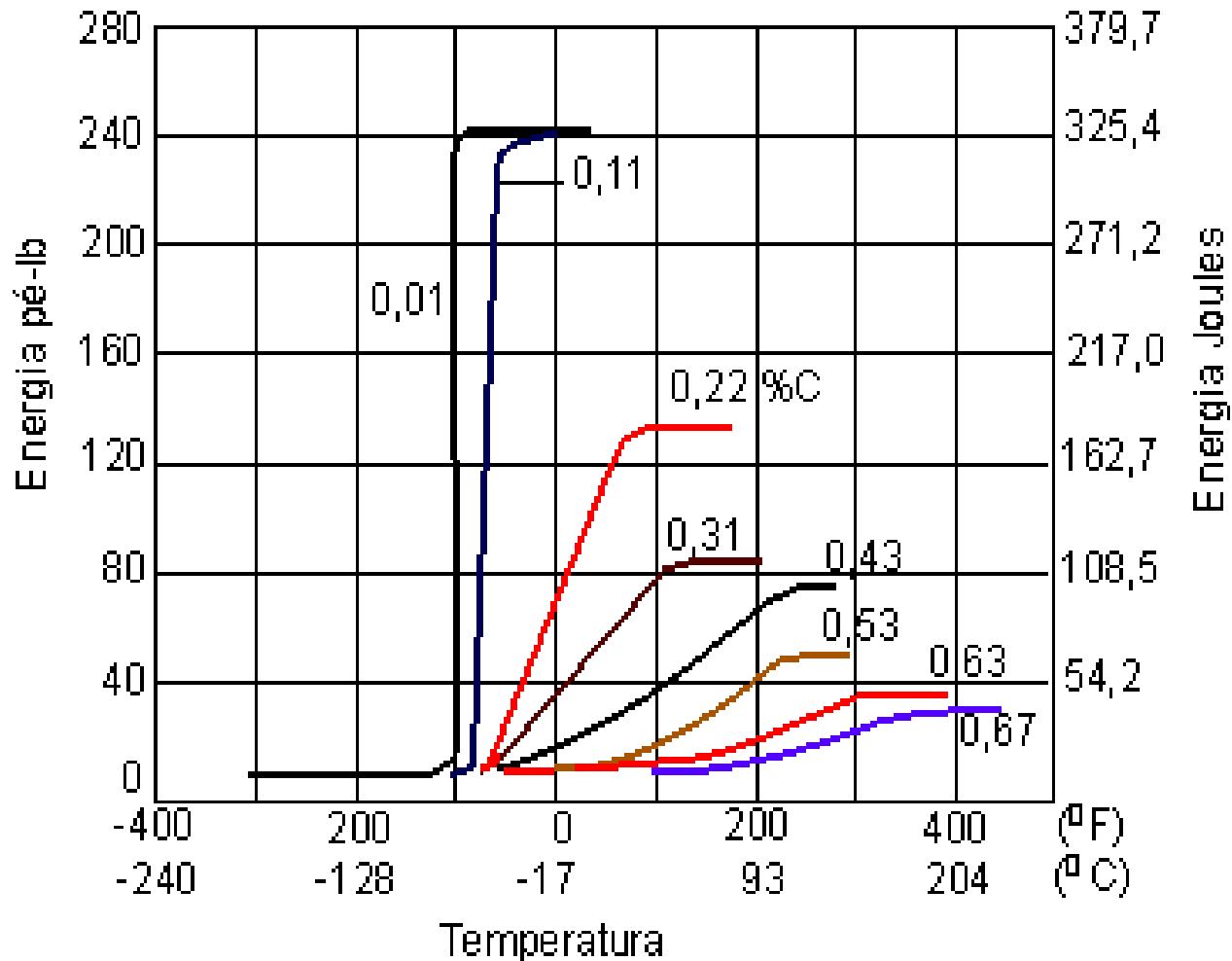


Transição Dúctil - Frágil

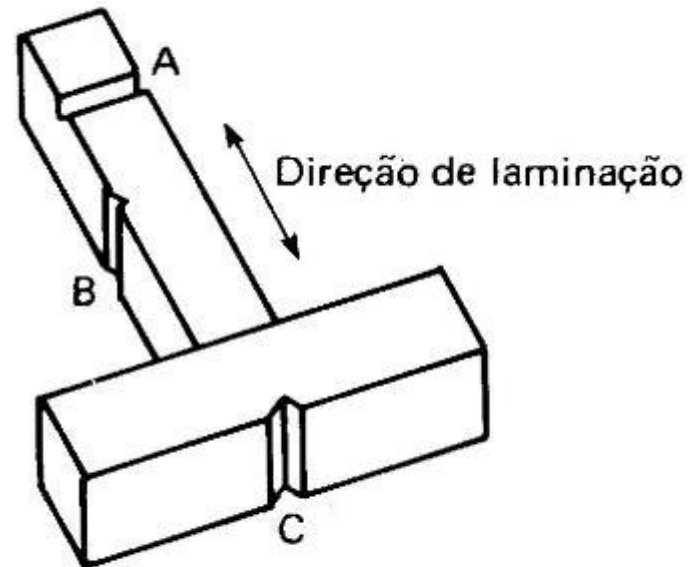
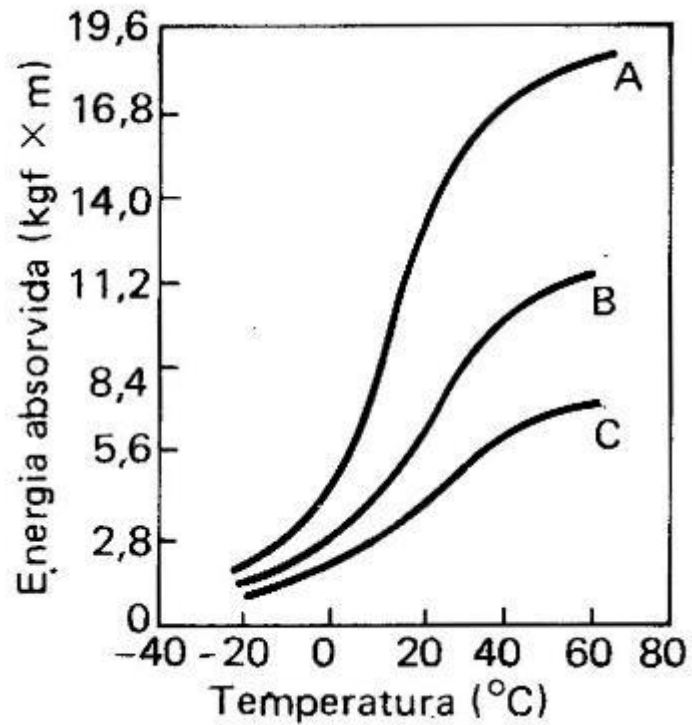
Materiais que apresentam temperatura de **transição frágil-dútil** devem ser **usados** **somente** em temperaturas **acima da** **temperatura de transição** para evitar fraturas frágeis catastróficas

- ↓ Teor de carbono
- ↓ Temperatura de transição

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



Transição Dúctil - Frágil



Normas

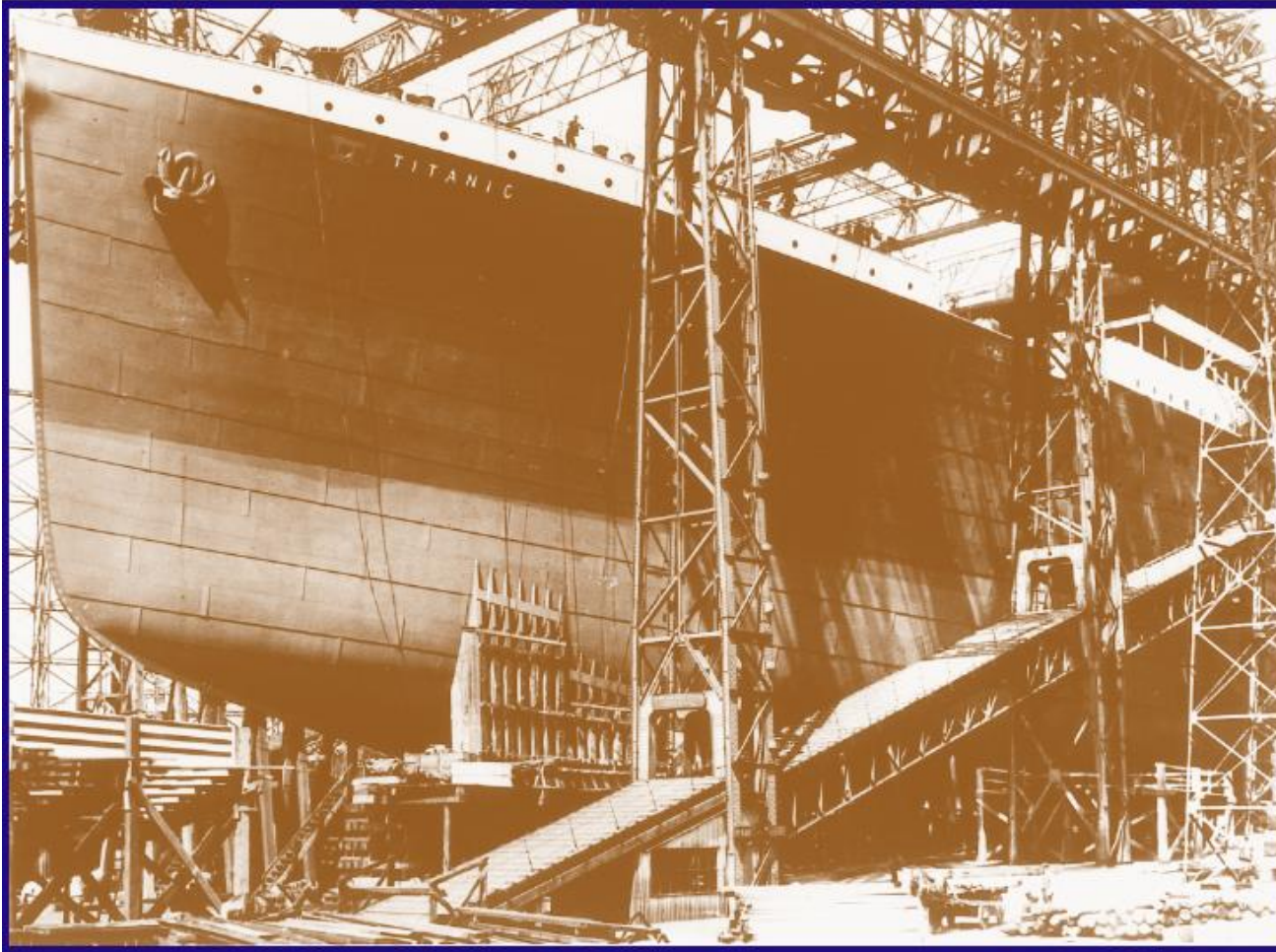
- **ASTM A 370;**
- **ASTM E23-18 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials;**
- **DIN EN ISO 148-1 (05/2017)- antiga DIN50115;**
- **NBR ISO 148-1:2013.**

TITANIC- ABRIL, 1912



VER SIMULAÇÃO

TITANIC- ABRIL, 1912



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

TITANIC- ABRIL, 1912

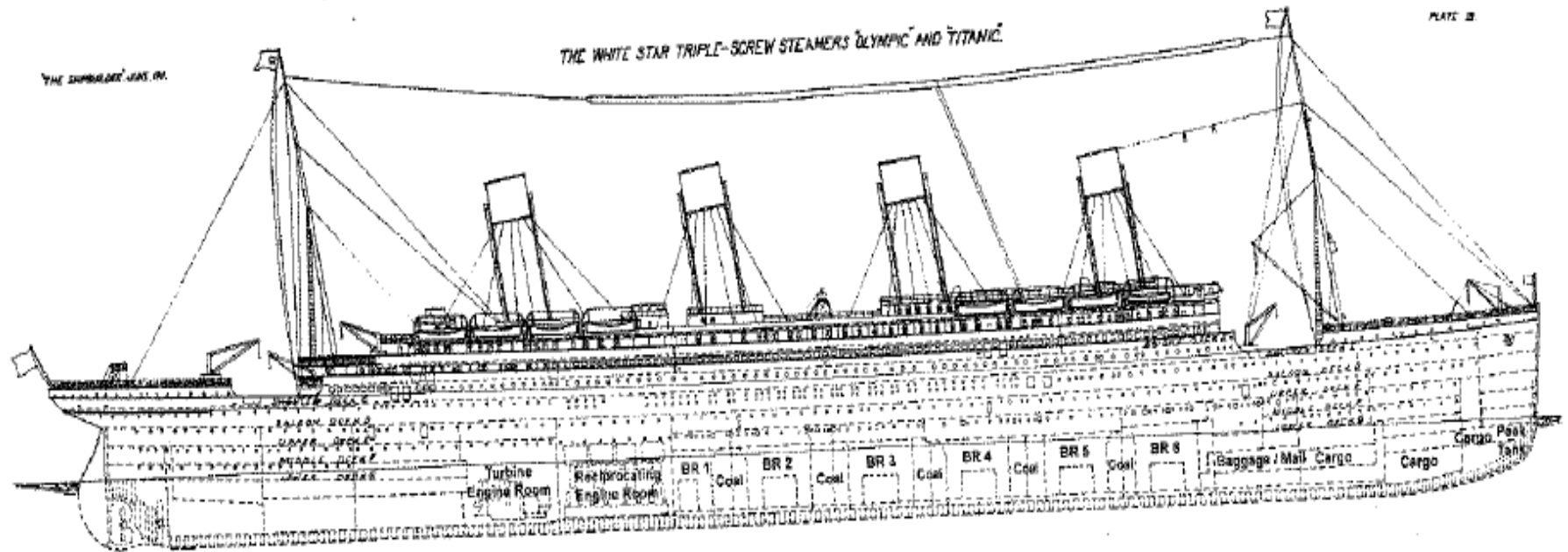
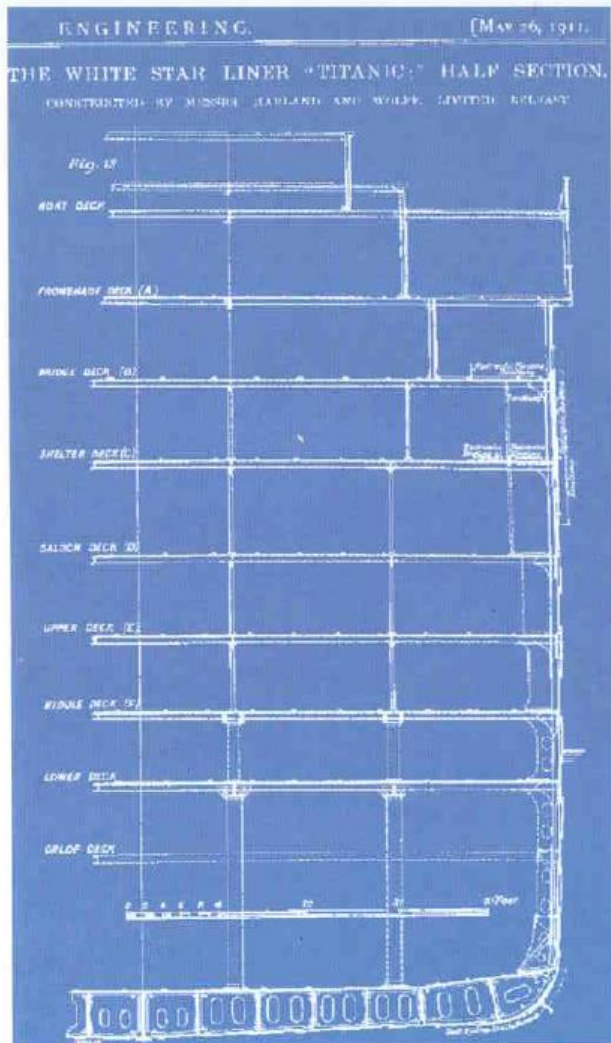


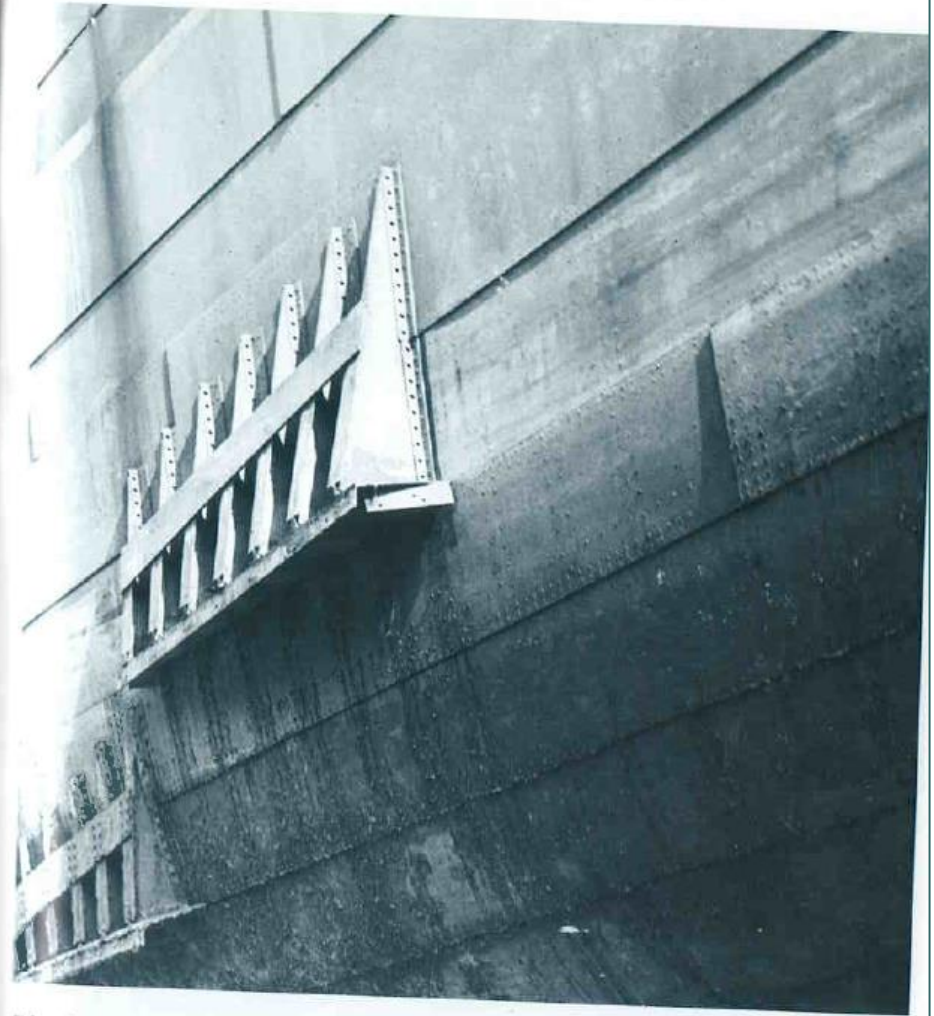
Figure 1.

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

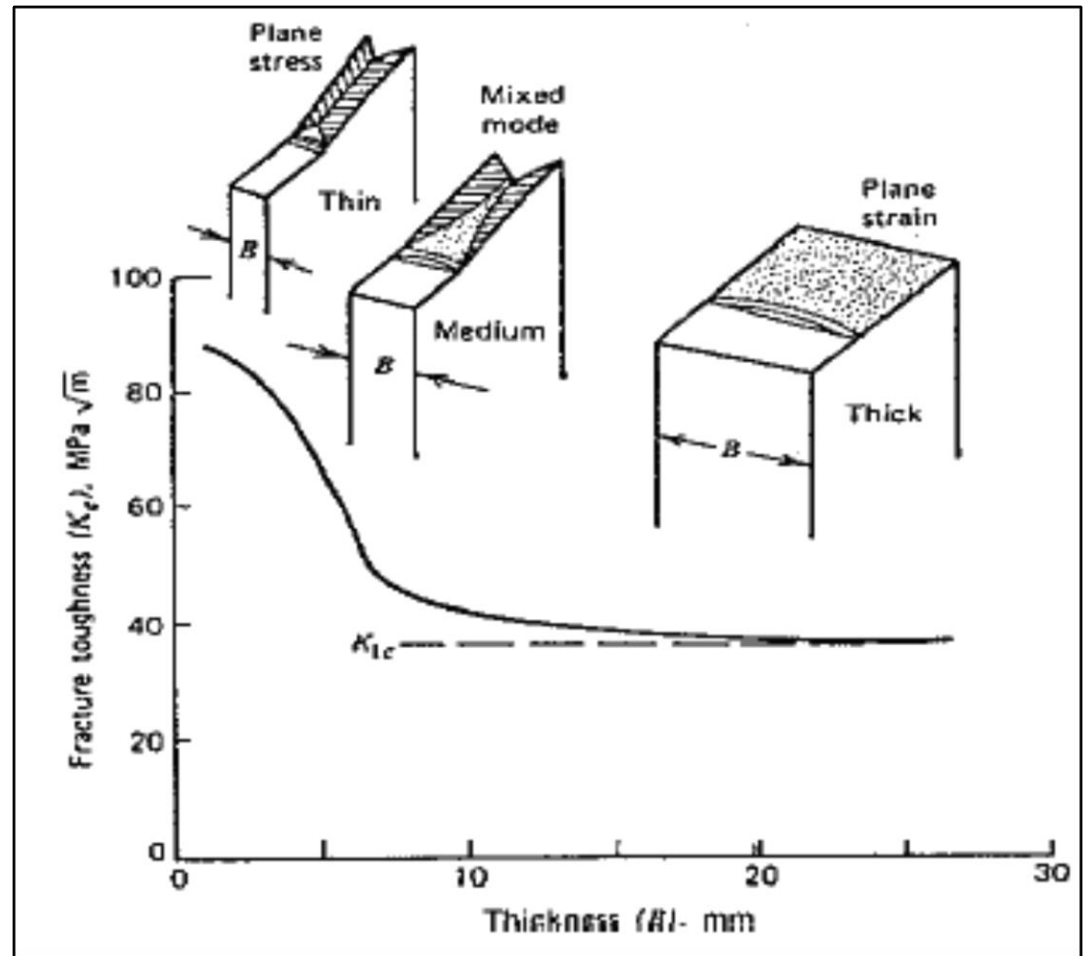
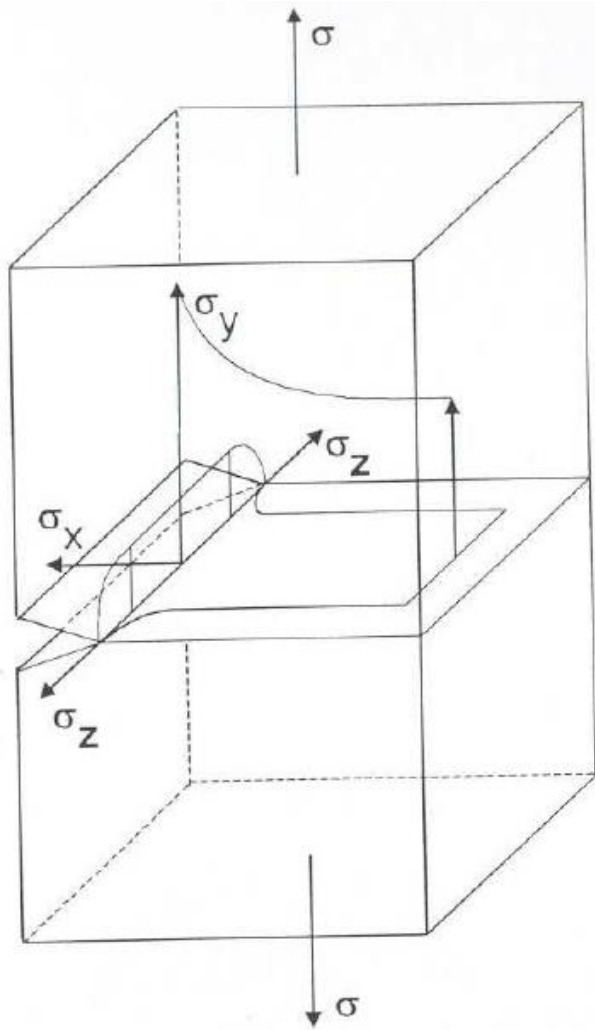
Remains of the *Titanic*



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} .**

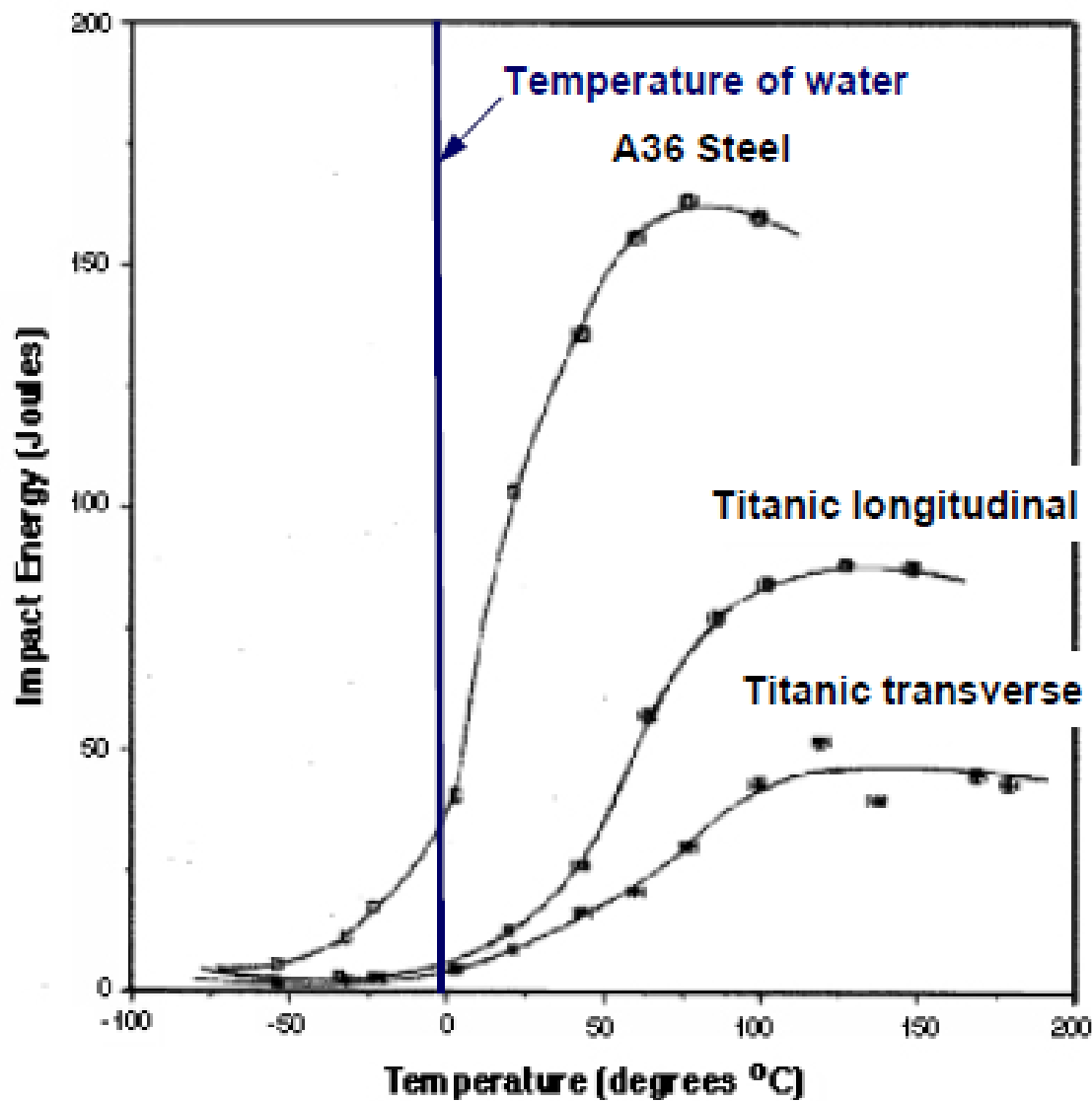
ESTADO TRIAXIAL



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

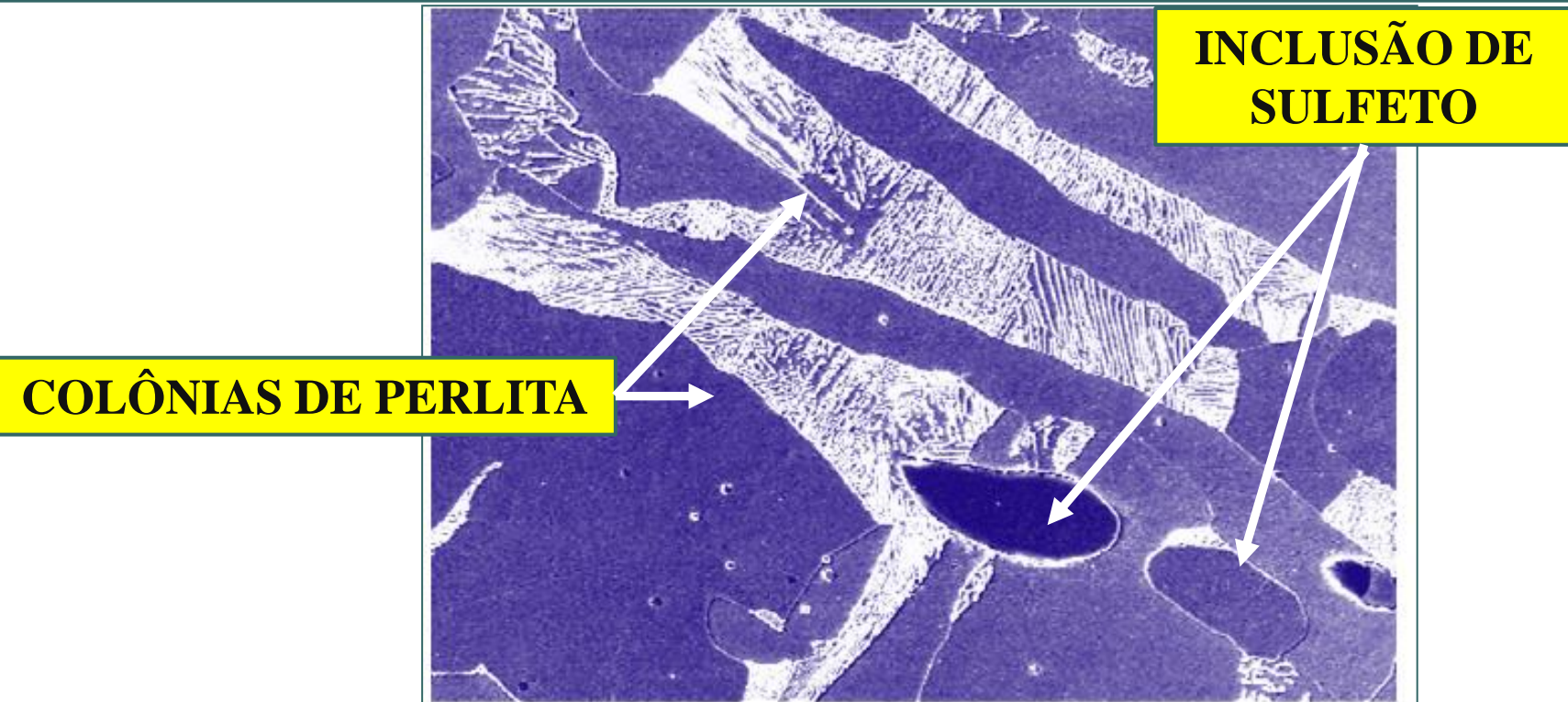


Temperature of the water was -2°C !!

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.**

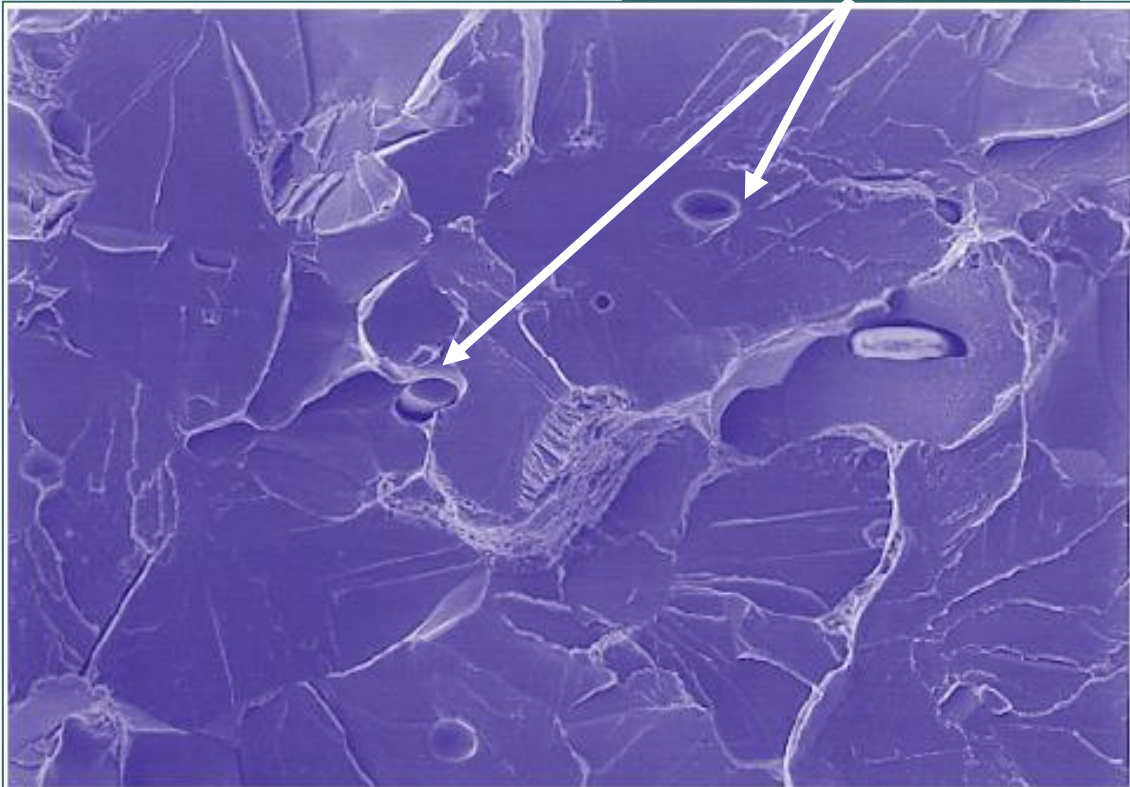
IMAGEM DE MEV, DA MICROESTRUTURA DO AÇO DO CASCO DO TITANIC



10 μm

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.

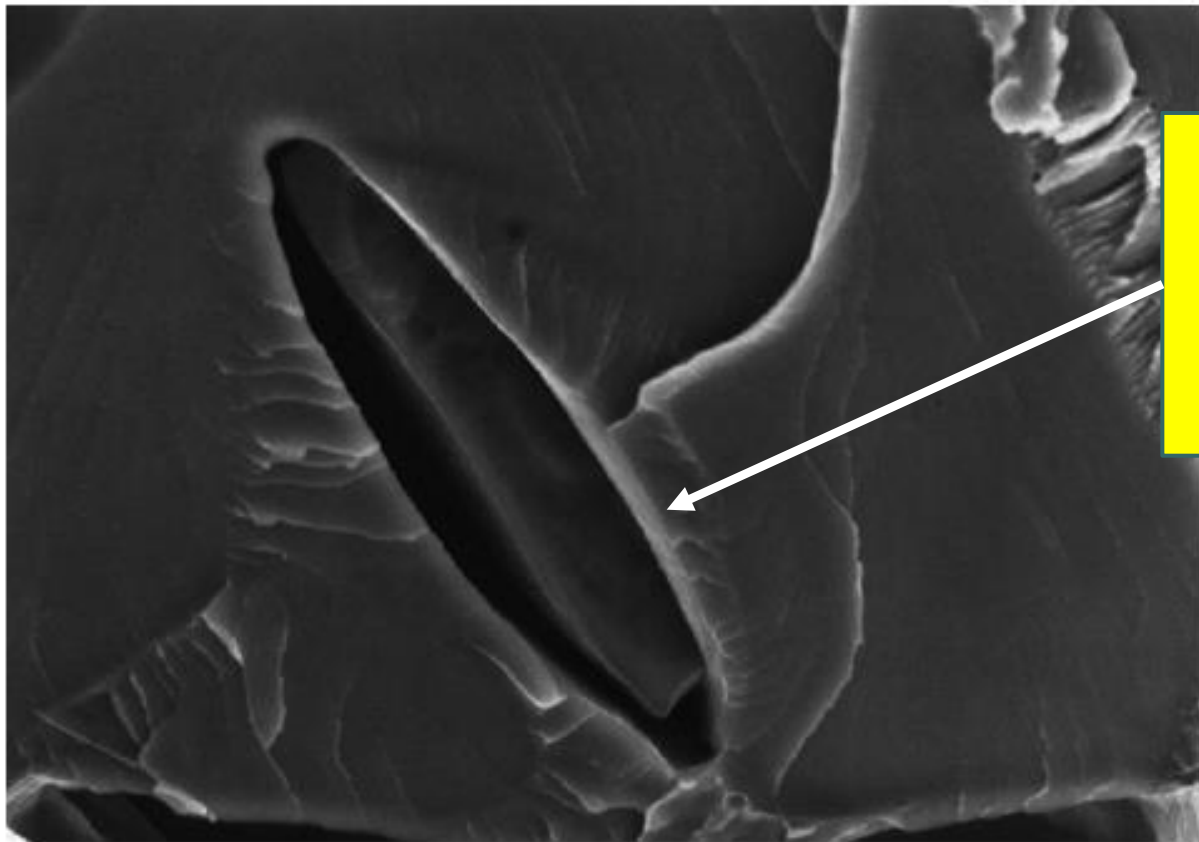
**INCLUSÃO DE
SULFETO**



20 μm

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.

**IMAGEM DE MEV DA
SUPERFÍCIE DE
FRATURA DE CP DE
IMPACTO A 0°C.
MICROMECHANISMO DE
FRATURA POR QUASE-
CLIVAGEM
DEMONSTRAM QUE O
SULFETO NÃO FOI O
CAUSADOR DA
FRATURA. FOSSE ESTE
O CASO HAVERIA A
OCORRÊNCIA DE
DIMPLES.**



**IMAGEM DE MEV.
INCLUSÃO DE
SULFETO E
FRATURA POR
QUASE-CLIVAGEM**



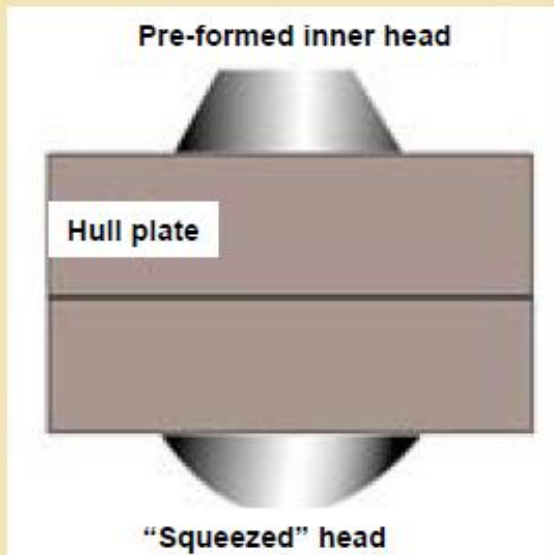
5 μm

Figure 6. A scanning electron micrograph showing a fractured MnS particle protruding edge-on from the fracture surface.¹³

TITANIC- ABRIL, 1912

- **A primeira conclusão** apresentada no livro é que a **teoria do aço frágil** estava **errada: a amostra** do casco retirada para o **ensaio de impacto, em 1991**, era de uma região **já fraturada em três pontos**, tratando-se, portanto, de uma **chapa particularmente frágil**;
- **O ensaio de impacto não** seria o **melhor** método para **avaliação** da fragilidade do aço pois a **taxa de deformação** envolvida é **muito maior** do que a que **ocorreu de fato**.

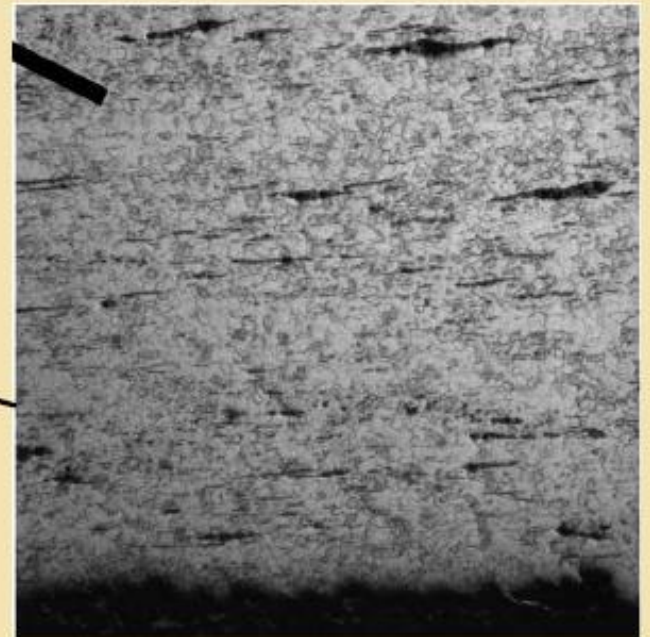
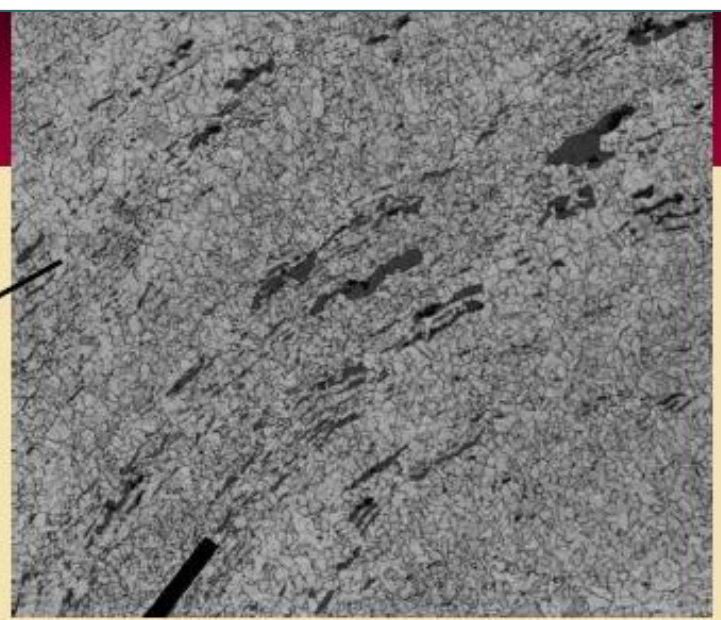
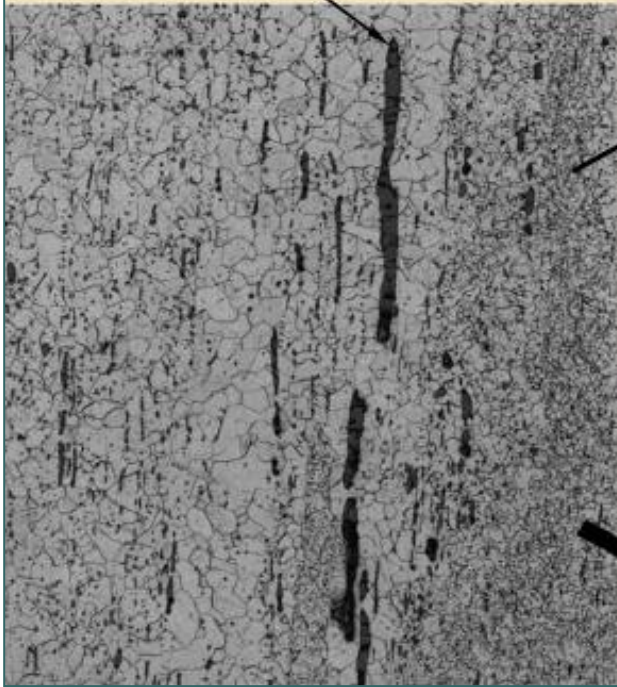
TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES



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

Microstructure of Titanic Rivet

Fe-silicate "stringers"



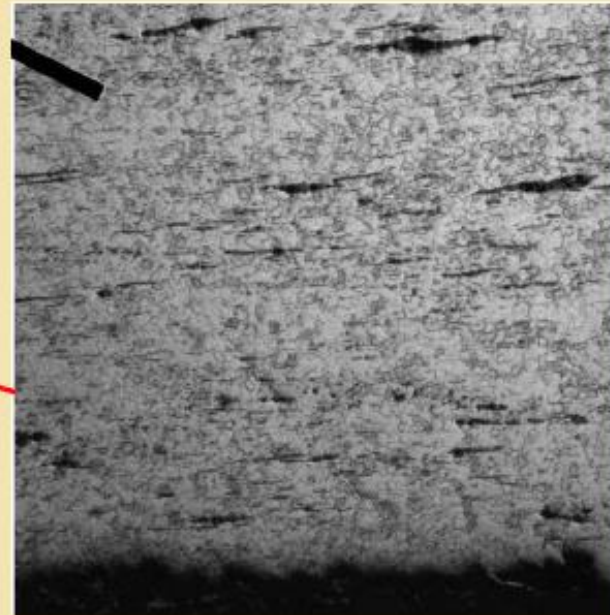
TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES

Microstructure of Titanic Rivet

- Orientation of Fe-silicate stringers is perpendicular to loading axis at the end of the rivet
 - Much lower strength and inferior resistance to crack propagation

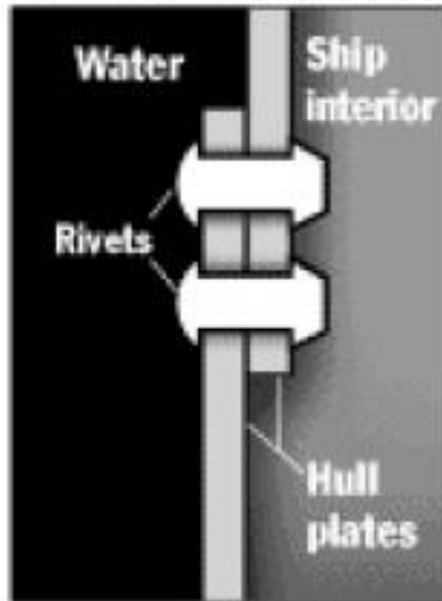


Pulling force



TITANIC- ABRIL, 1912-ANÁLISE DOS REBITES

HOW THE RIVETS MAY HAVE CONTRIBUTED TO DISASTER



1. The rivets were used to seal the hull plates together, with the hammered end on the exterior.



2. Pressure from the iceberg collision may have caused the rivets to pop along some hull plates, causing the seams to open.



3. The total area open to the sea may have been no bigger than a closet door, through which 34,000 tons of water seeped.

A conclusão final indica que ocorreu uma combinação de fatores que levaram à falha 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