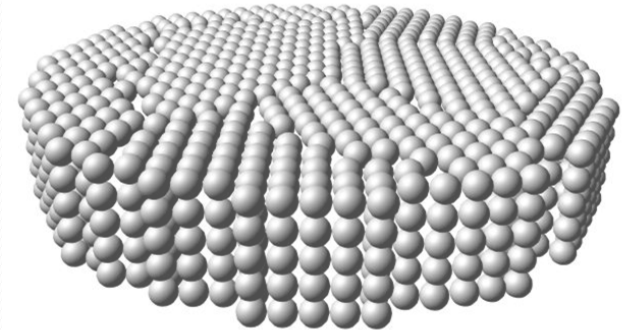


Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de Lorena

Departamento de Engenharia de Materiais



# LOM 3080 – PROCESSOS DA INDÚSTRIA METALÚRGICA E SIDERÚRGICA

- **Engenharia Mecânica** (Unesp-1997);
- **Mestrado** em Ciência e Engenharia de Materiais: Materiais, Processos e Propriedades, área de concentração: Metalurgia Física, Fadiga e Mecânica de Fratura (USP/EESC-2001);
- **Doutorado** em Ciência e Engenharia de Materiais : Materiais, Processos e Propriedades, área de concentração: Metalurgia Física, Fadiga e Mecânica de Fratura (USP/EESC-2007);
- **Pós Doutorado** em Engenharia de Materiais na área de Fadiga e Fratura (USP/EESC-2012)
- **Pós Doutorado** em Engenharia de Materiais na área de Fadiga e Fratura em altas Temperaturas (University of Birmingham- Inglaterra-2014)
- **Livre Docência** em Engenharia de Materiais (USP/EESC-2014)
- **Experiência industrial:** 10 anos em indústrias de segmentos da área metalúrgica: Mangels S/A (Fabricação de Rodas automotivas e Botijões de gás); Jacto Máquinas Agrícolas (Controle de Qualidade e Assistência Técnica e análise de falhas)
- Atuando principalmente nos seguintes temas: Mecânica da Fratura, Fadiga de Amplitude Constante e Variável, Análise de Falhas, Fluência, Fluência/Fadiga, Fadiga/Corrosão, Fadiga Alta Temperatura.

## Aço:

Introdução

Fundamentos sobre aço

Histórico da Siderurgia

Alto Forno e a Produção de Gusa;

Produção de Aços em Conversor;

Produção de Aços em Fornos Elétricos;

Lingotamento Convencional e Lingotamento Contínuo;

Metalurgia do pó, tratamentos térmicos.

Ensaio não destrutivos (END)

## Fundição:

Moldes e machos;

Processos de fundição: areia verde, shell molding, microfusão (cera perdida), sob pressão, molde permanente, reofundição e Tixoconformação.

## REFERÊNCIAS:

- **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos** – Claudio Shyinti Kiminami / Walman Benício de Castro / Marcelo Falcão de Oliveira, Editora Blücher, 2013.
- **Introdução à Siderurgia**, Marcelo Breda Mourão et al., ABM, São Paulo, 2007;
- **ASM Handbook Vol. 15 Casting - 1988**, Foundry Technology P.R. Beeley, 1972;
- **Aços e Ligas Especiais**, André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva e Paulo Roberto Mei, Edgard Blücher-Villares Metals, segunda edição, 2006.
- **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, Hubertus Colpaert, 4<sup>a</sup>. Edição revisada e atualizada por André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva, Editora Blücher – Villares Metals, 2008;
- Aulas do Prof. Dr. Guilherme Ourique Verran-UDESC



# **INTRODUÇÃO**

## O QUE É METALURGIA?

**Metalurgia** é o ramo da Engenharia dos Materiais que estuda os fenômenos físico-químicos associados com o beneficiamento e o processamento dos materiais metálicos, bem como os aspectos fundamentais envolvidos nos diferentes ciclos de processamento destes materiais.

É o ramo mais antigo do conhecimento na área da Ciência e Engenharia dos Materiais: pedaços de ferro foram encontradas nas tumbas de El-Gezirah (Egito), datando de 4.000 A.C.

# Divisão Clássica da Metalurgia

- Metalurgia Extrativa → **Extração e beneficiamento**
- Metalurgia Física → **Fundamentos dos fenômenos metalúrgicos**
- Metalurgia de Transformação → **Processos de Fabricação de Produtos/Componentes Metálicos**

## **Metalurgia Extrativa**

- **Processos Pré-Extrativos**
  - **Extração e beneficiamento de minérios**
- **Processos Extrativos**
  - **Obtenção de materiais metálicos (elementares) a partir dos seus respectivos minérios**
- **Processos de Refino**
  - **Obtenção de ligas com composições definidas**



# Metalurgia Extrativa

Extração e beneficiamento de minérios



## Processos Pré-Extrativos

Processos que embora envolvam reações químicas, **não isolam o metal de interesse do minério** beneficiado.

Visam o **aumento e a otimização da concentração do composto metálico** no minério.

# Metalurgia Extrativa

## Processos Extrativos:

Objetivos:

- Extração de um metal **M**, a partir do seu minério primário, constituído por um composto **MX**



Princípio da maior ou menor tendência do composto deixar-se reduzir ao metal por meio de reações químicas.

# Metalurgia Extrativa

## Processos de Refino

Objetivos:

- Obtenção de metais e/ou ligas com grau de pureza comercial a partir dos metais brutos obtidos por processos extrativos
- Ex.: Fabricação de aços

## Metalurgia Extrativa

Extrativa dos  
Metais Ferrosos



Processos  
Siderúrgicos

Extrativa dos  
Metais Não  
Ferrosos



Al - Cu - Mg - Ni - Ti  
Cr - Zn - Mn - Sn - Pb  
Nb - W - V - Mo  
Ag - Au

## **Metalurgia Extrativa**

### **Exemplo de Aplicação de Processos de Extração e Refino: **Processos Siderúrgicos****

**1ª Etapa - **Extração**: redução dos minérios de Fe em Alto Forno**

**Produto: Ferro Gusa ( $\approx 90\%$  de Fe contido)**

**2ª Etapa - **Refino**: fabricação de aço em conversores**

**Produto: Aços Comerciais (ligas Fe- C com até  $2\%$  C).**

# Ciência dos Materiais vs. Metalurgia



**Abordagem + Genérica**

Aços, Fofos, Metais Não Ferrosos,  
Polímeros, Cerâmicas, Compósitos



**Abordagem + Específica**

Aços, Fofos, Metais não ferrosos

## Ciclo Básico dos Materiais no Segmento Industrial

Material

Processamento

Produto



# Metalurgia Física

**Transformações  
de Fases**



**Alterações nas  
Estruturas dos  
Metais/Ligas**



**Relações Estruturas vs. Propriedades**



**Desempenho e Aplicação dos Materiais  
Metálicos**

# Metalurgia Física

## Transformações de Fases

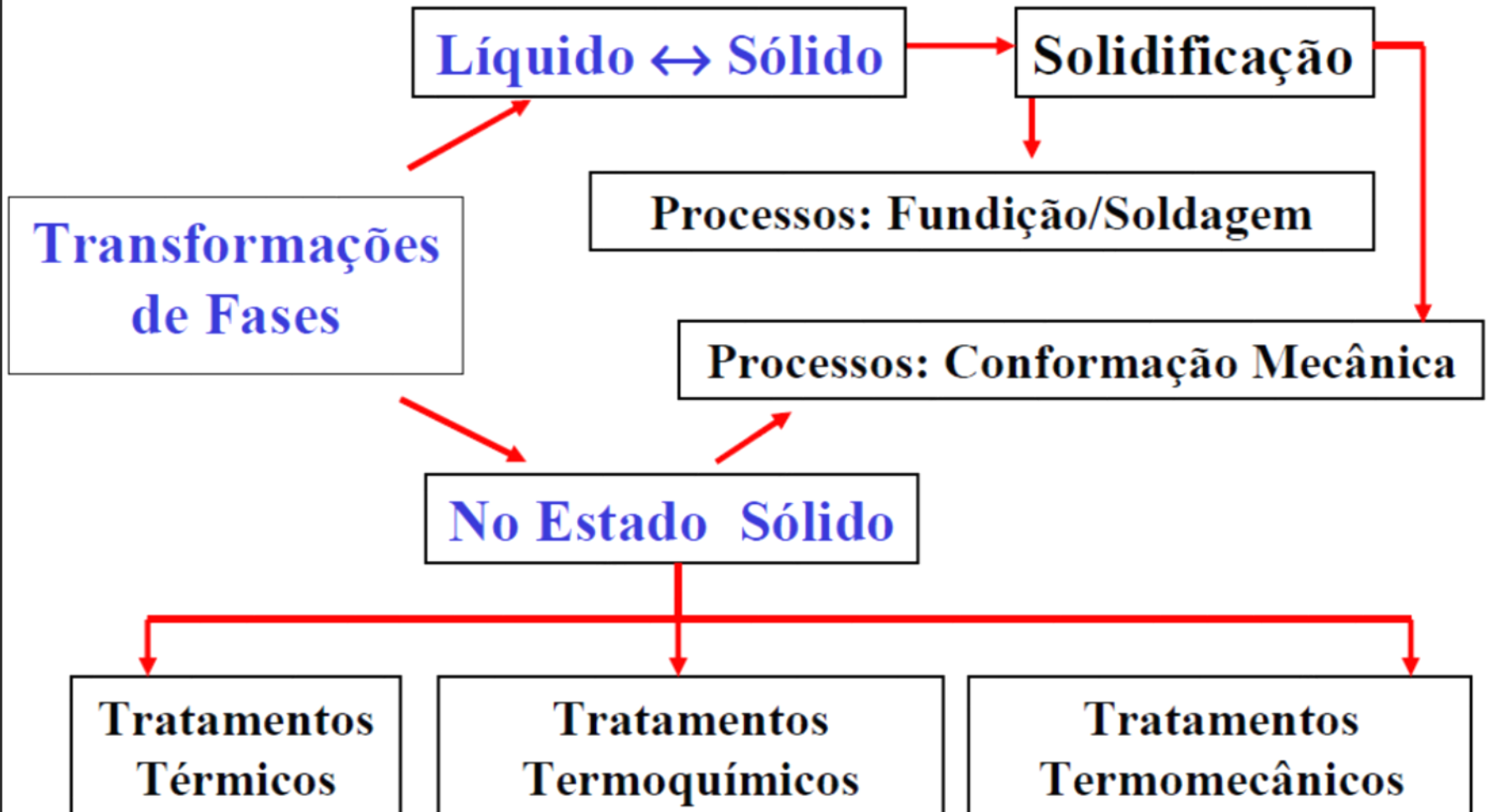
- Como ocorrem as transformações de fases sob o ponto de vista termodinâmico (equilíbrio/estabilidade)
- Quais as fases em equilíbrio sob determinadas condições (temperatura, pressão e composição química)



Previsões através dos **Diagramas de Equilíbrio**



# Metalurgia Física



# Metalurgia de Transformação

Estuda os Processos **MECÂNICOS** e **METALÚRGICOS** de Fabricação

Processos **MECÂNICOS** de Fabricação :

- Utilizam **TENSÕES** para as transformações de forma necessárias para a obtenção de um determinado produto
- São classificados em função da magnitude das tensões utilizadas.

# **Metalurgia de Transformação**

## **Processos METALÚRGICOS DE FABRICAÇÃO**

- Utilizam **CALOR (ENERGIA TÉRMICA)** para as transformações de **ESTADO FÍSICO** e de **FORMA** necessárias para a obtenção de um determinado produto
- São classificados em função da **TEMPERATURA DE TRABALHO.**

# Metalurgia de Transformação

## CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS METALÚRGICOS DE FABRICAÇÃO

Temperatura de Trabalho

> Temperatura de Fusão  
do Metal/Liga



Fundição

Lingotamento

Soldagem

Temperatura de Trabalho

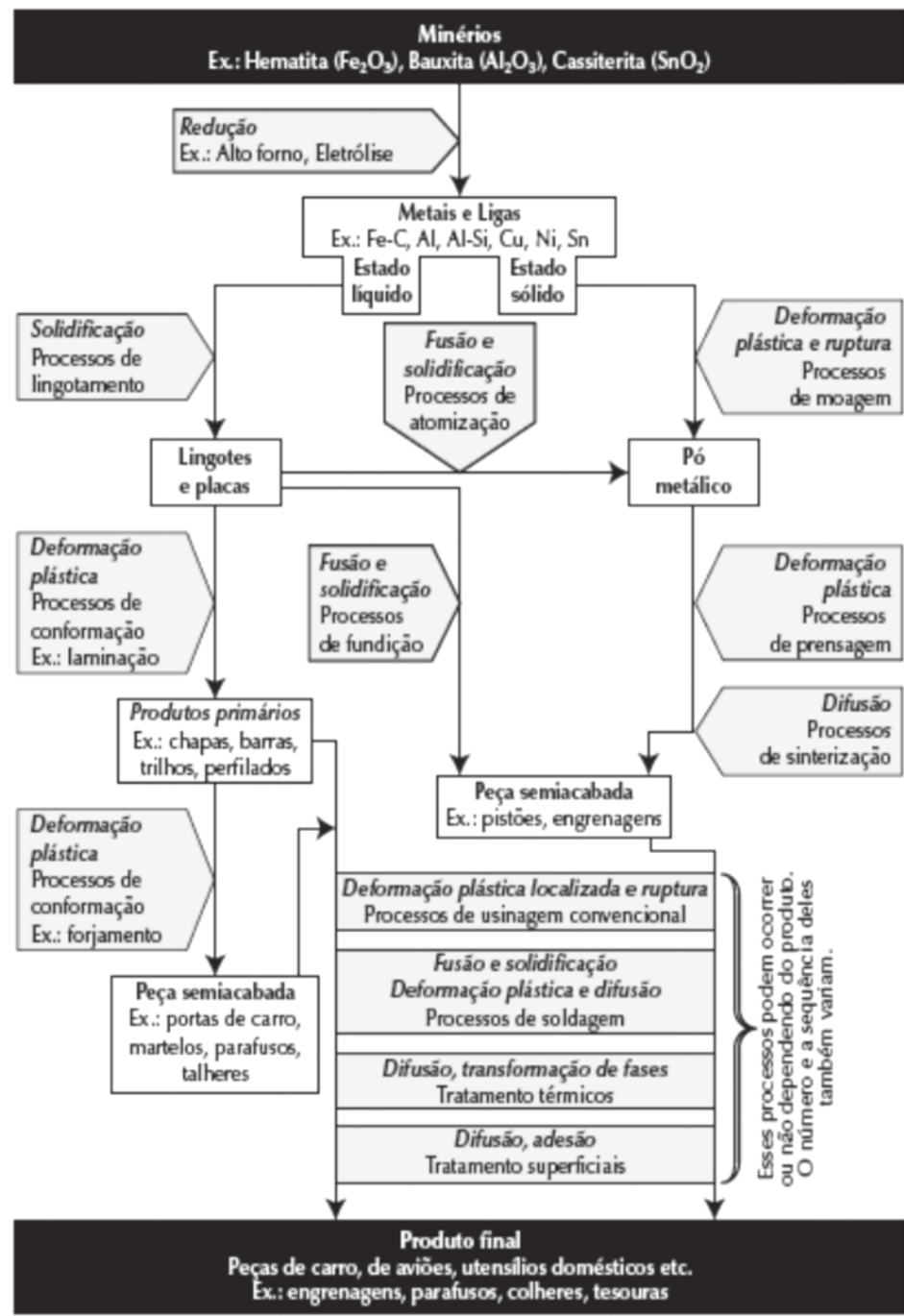
< Temperatura de Fusão  
do Metal/Liga



Sinterização

Metalurgia do Pó

**Figura 1.1**  
Fluxograma de rotas para fabricação de produtos metálicos. Os fenômenos metalúrgicos estão indicados pelos quadros em tom cinza.



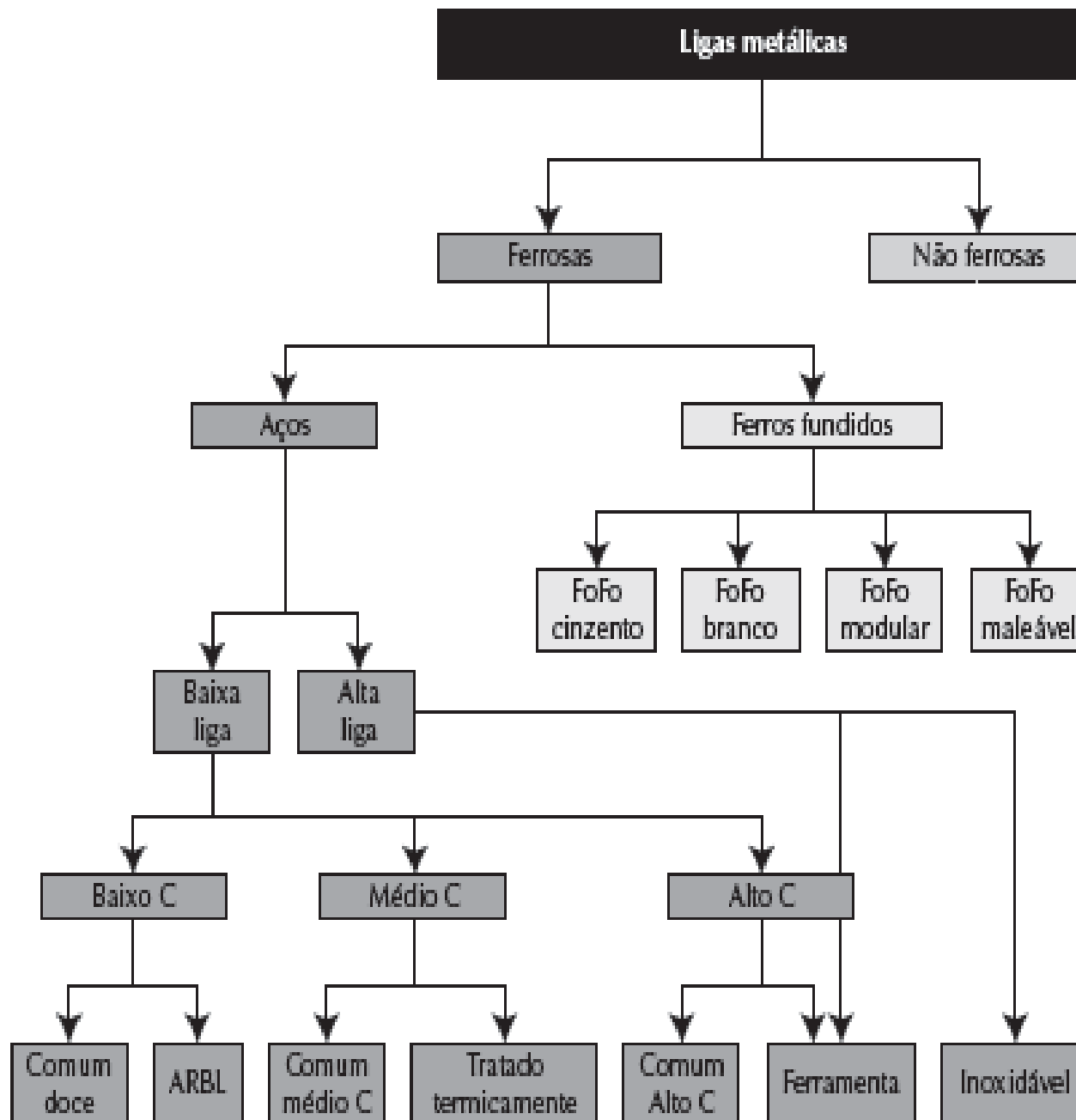
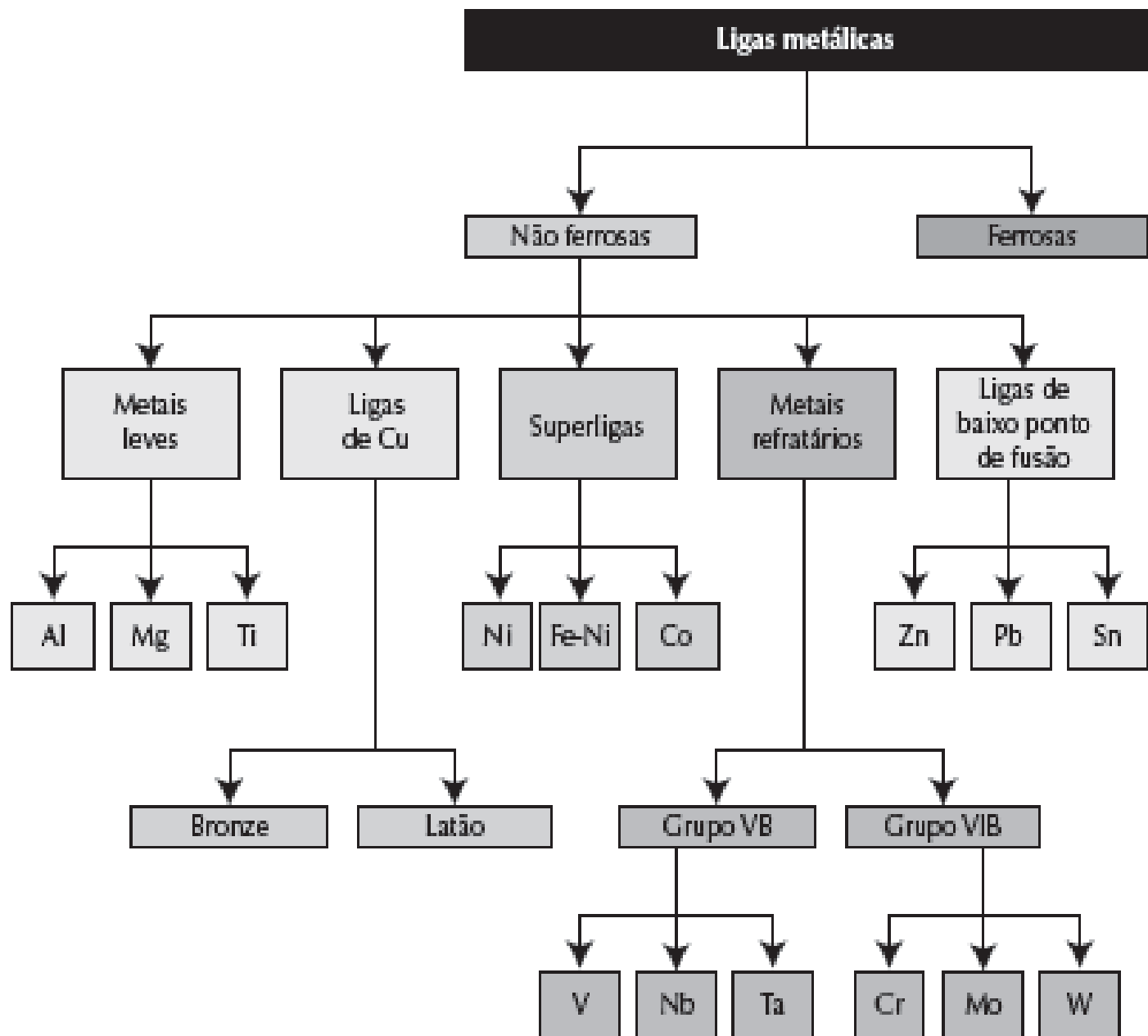


Figura 1.2  
 Família de ligas  
 ferrosas existentes para  
 fabricação de produtos  
 metálicos.  
 (FoFo = ferro fundido;  
 ARBL = liga de alta  
 resistência e baixa  
 liga).

**Figura 1.3**

Família de ligas não ferrosas existentes para fabricação de produtos metálicos.

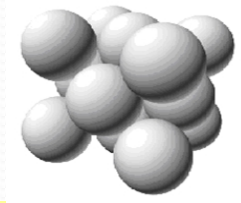
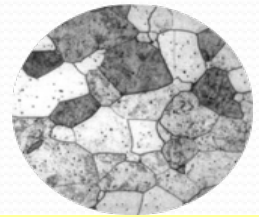
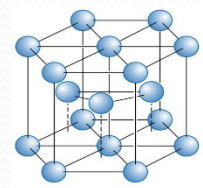
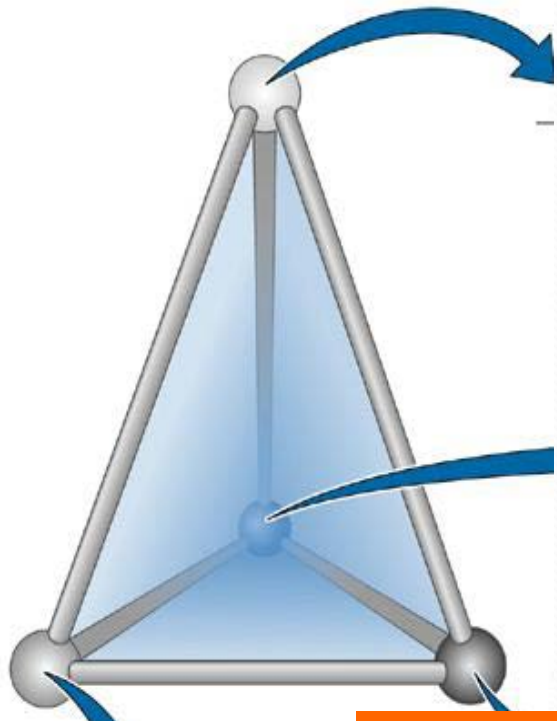


# Ilustração da inter-relação existente entre a composição química e microestrutura:

- Processamento
- Propriedades
- Aplicação e desempenho de um produto metálico



**Aplicação/Desempenho**



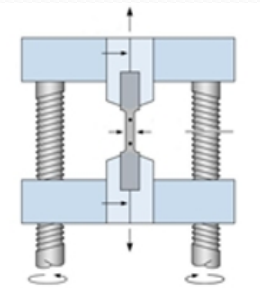
**Estrutura e Composição química**

**Processamento:**

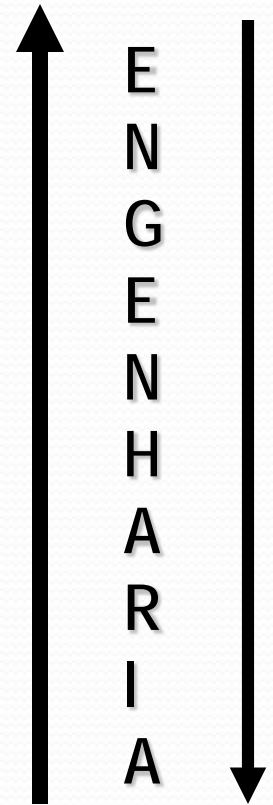
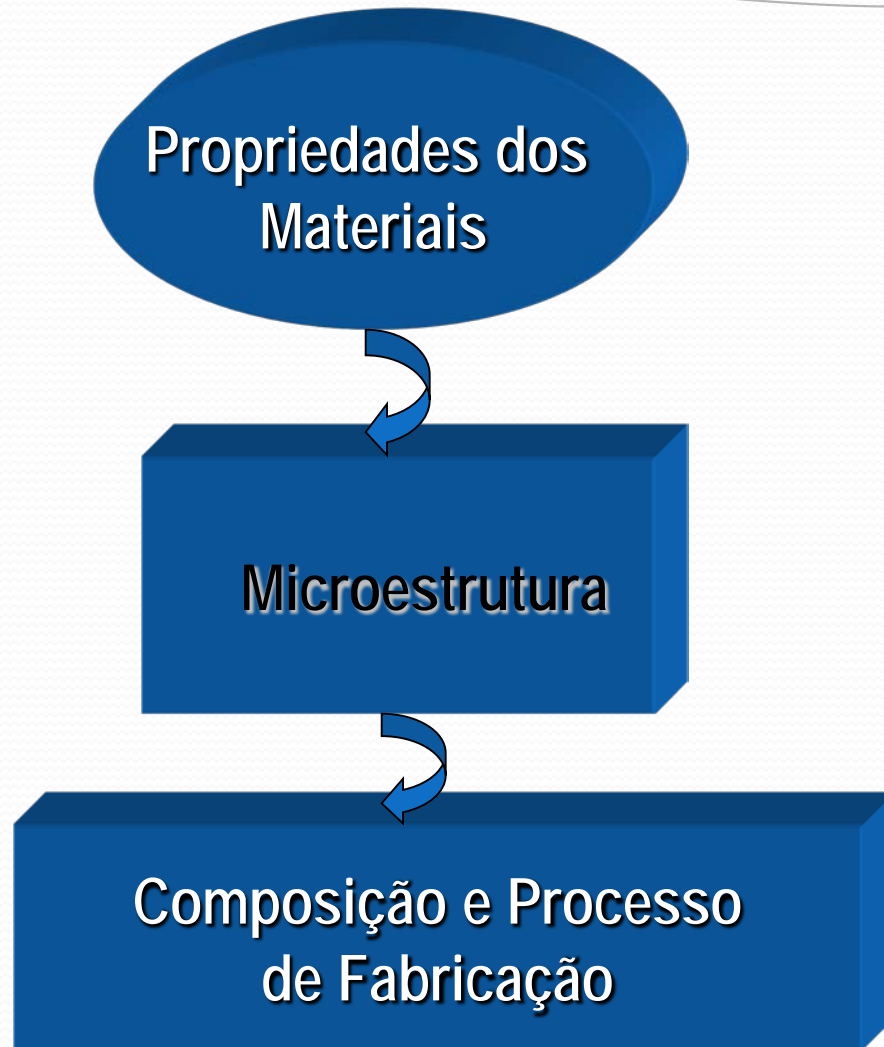
- Forjamento
- Laminação
- Extrusão
- Trefilação
- Fundição

**Propriedades Mecânicas:**

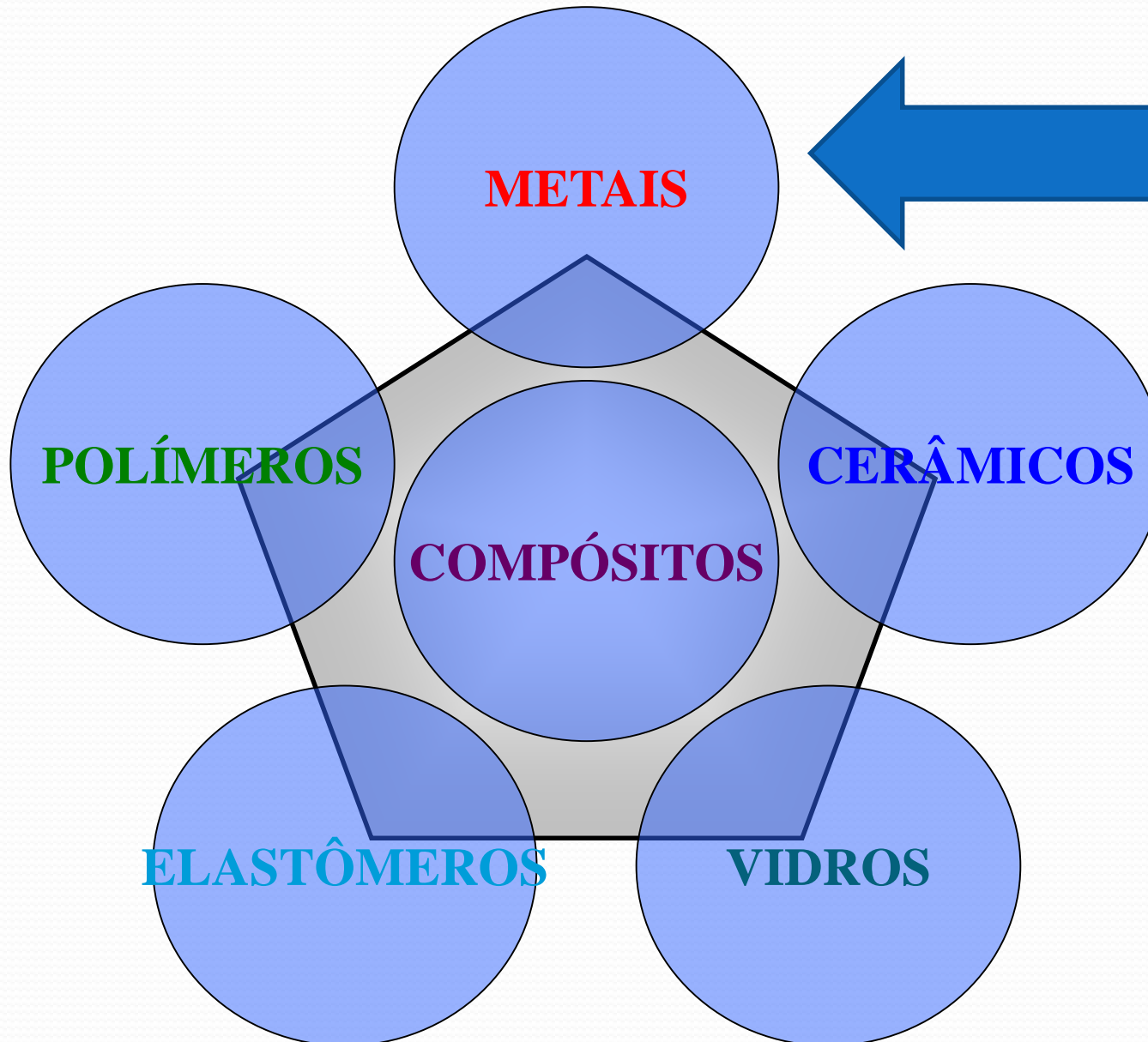
- Fadiga
- Fluência (Resist. Altas Temperaturas)
- Fratura (Tenacidade)
- Resistência (Tração, Compressão, Torção, Flexão, Flambagem)







# FAMÍLIAS DE MATERIAIS DE ENGENHARIA



**Tabela 1.1 – Influência da alteração da composição química e processamento nas propriedades e aplicações do cobre**

Composição química	Processamento	Limite de escoamento aproximado (MPa) (*)	Aplicação típica
Cu com 99,99% pureza	Tratado termicamente por recozimento, tamanho de grão em torno de 10 $\mu\text{m}$	50	Condutores elétricos em geral
Cu com 99,99% pureza	Deformado a frio, encruado	300	Contatos elétricos
75%Cu-25%Ni	Tratado termicamente por recozimento	150	Tubos para trocador de calor
75%Cu-25%Ni	Deformado a frio, encruado	400	Fabricação de moedas

(\*) Expressa a resistência mecânica da liga, a qual a resistência ao desgaste está diretamente relacionada.

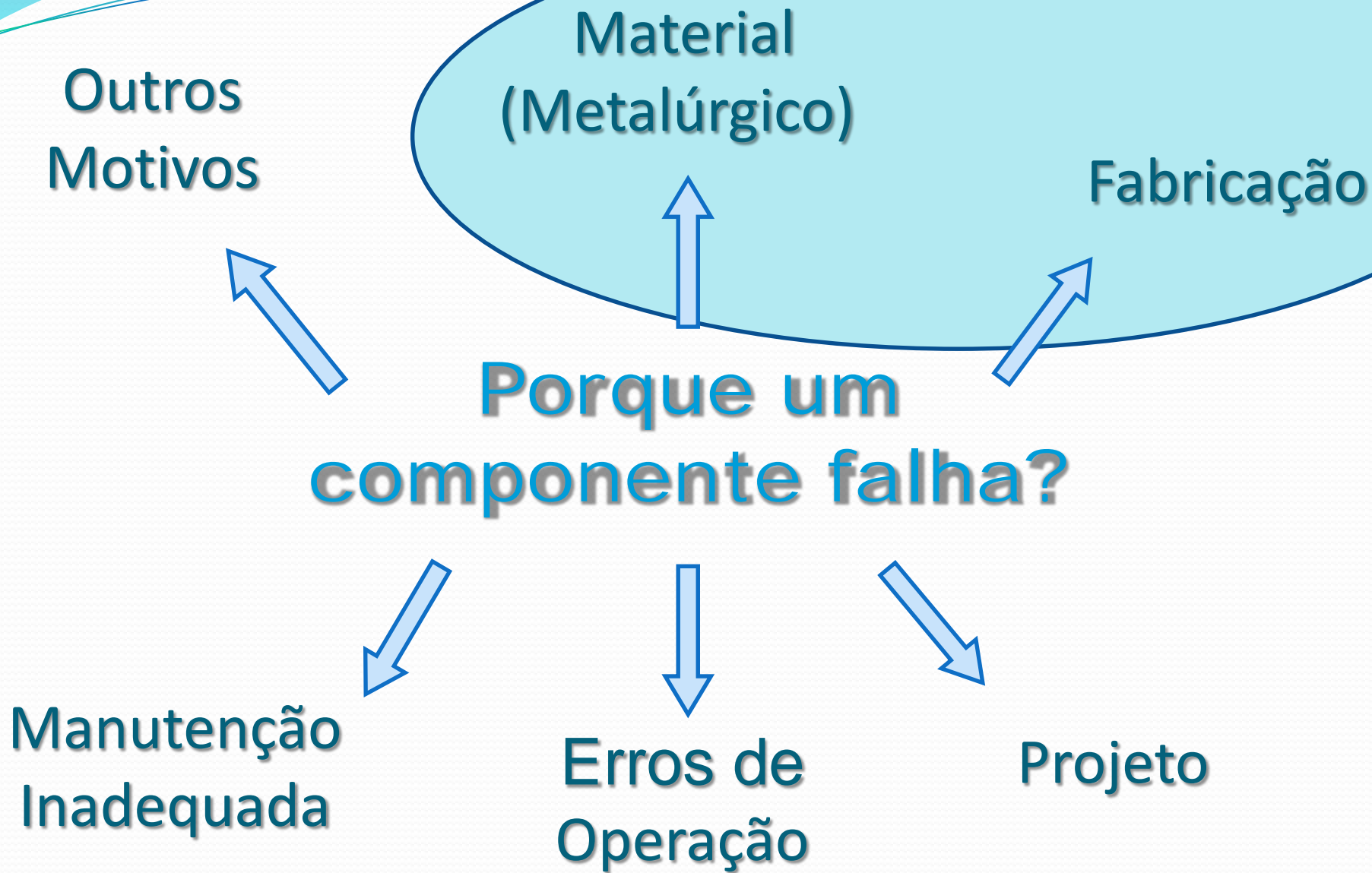
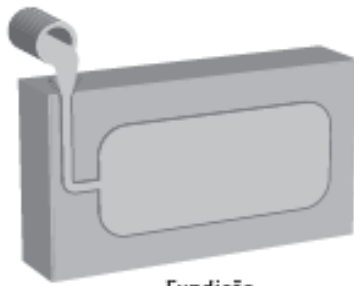


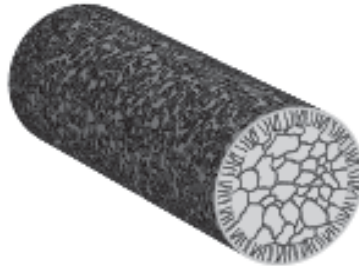
Figura 1.6  
Ilustração de peça  
cilíndrica fundida e  
extrudada e  
as diferenças  
microestruturais  
resultantes.



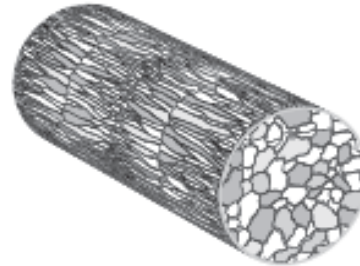
Fundição



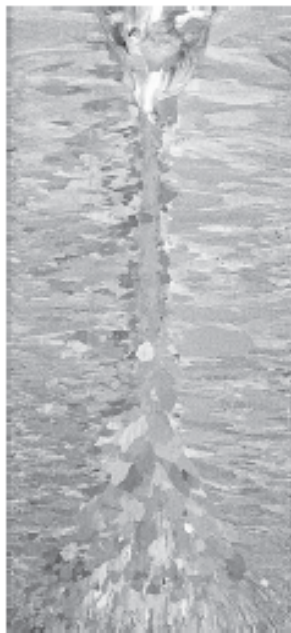
Extrusão



Peça fundida



Peça extrudada



Macrografia da peça fundida  
(seção longitudinal)



Macrografia da peça extrudada  
(seção longitudinal)

**A ESTRUTURA  
OBTIDA NO  
PROCESSO DEVE  
SER ADEQUADA À  
APLICAÇÃO, CASO  
CONTRÁRIO:  
FALHA!**

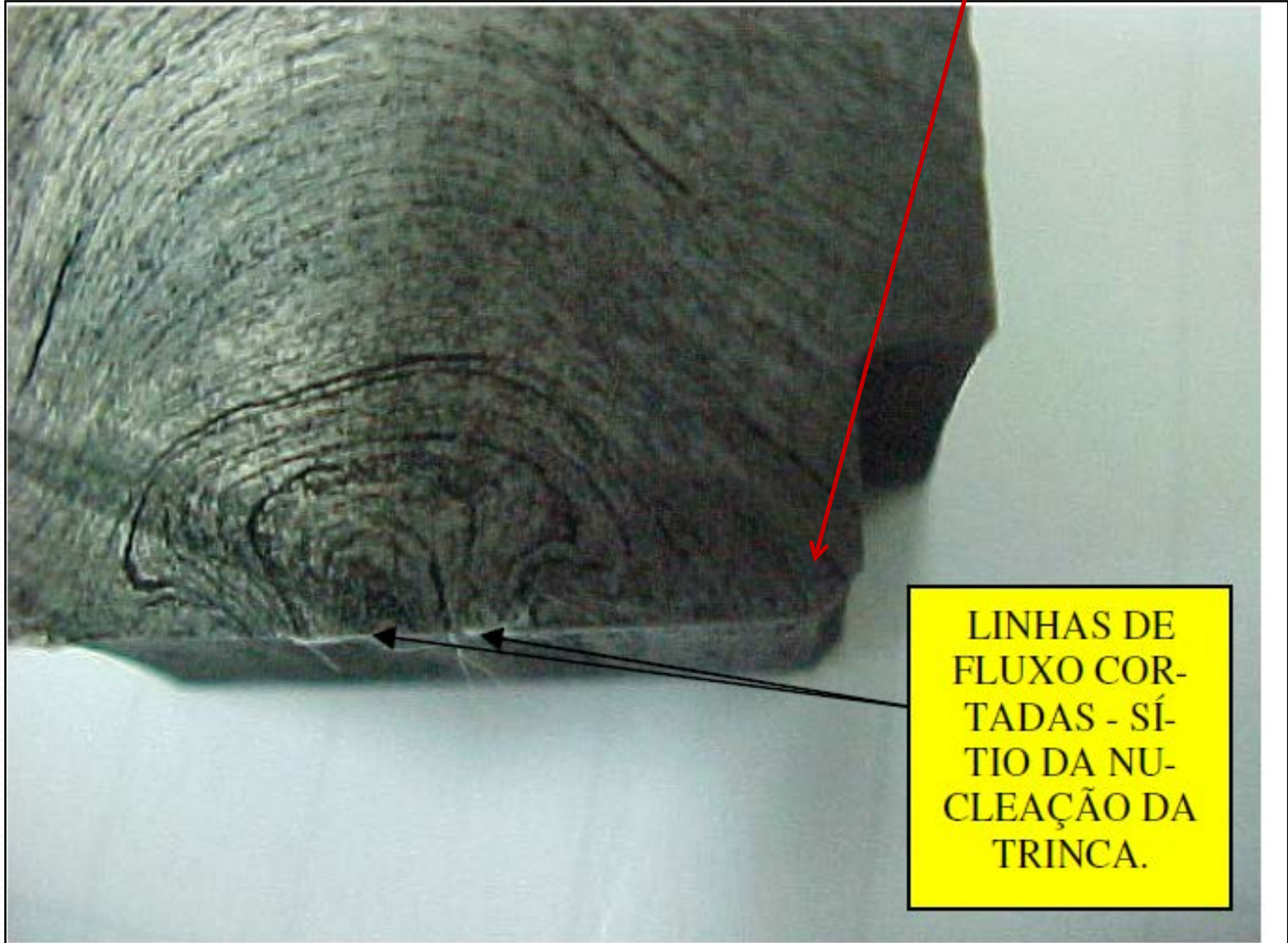
**O PROCESSO DE FABRICAÇÃO TAMBÉM INFLUENCIA A TOLERÂNCIA DIMENSIONAL (EX: DIÂMETRO, OVALIZAÇÃO, RUGOSIDADE = PARÂMETROS DA METROLOGIA) – CASO CONTRÁRIO FALHA !!!!!**





**EXEMPLOS DE FALHAS DE  
PROCESSO**

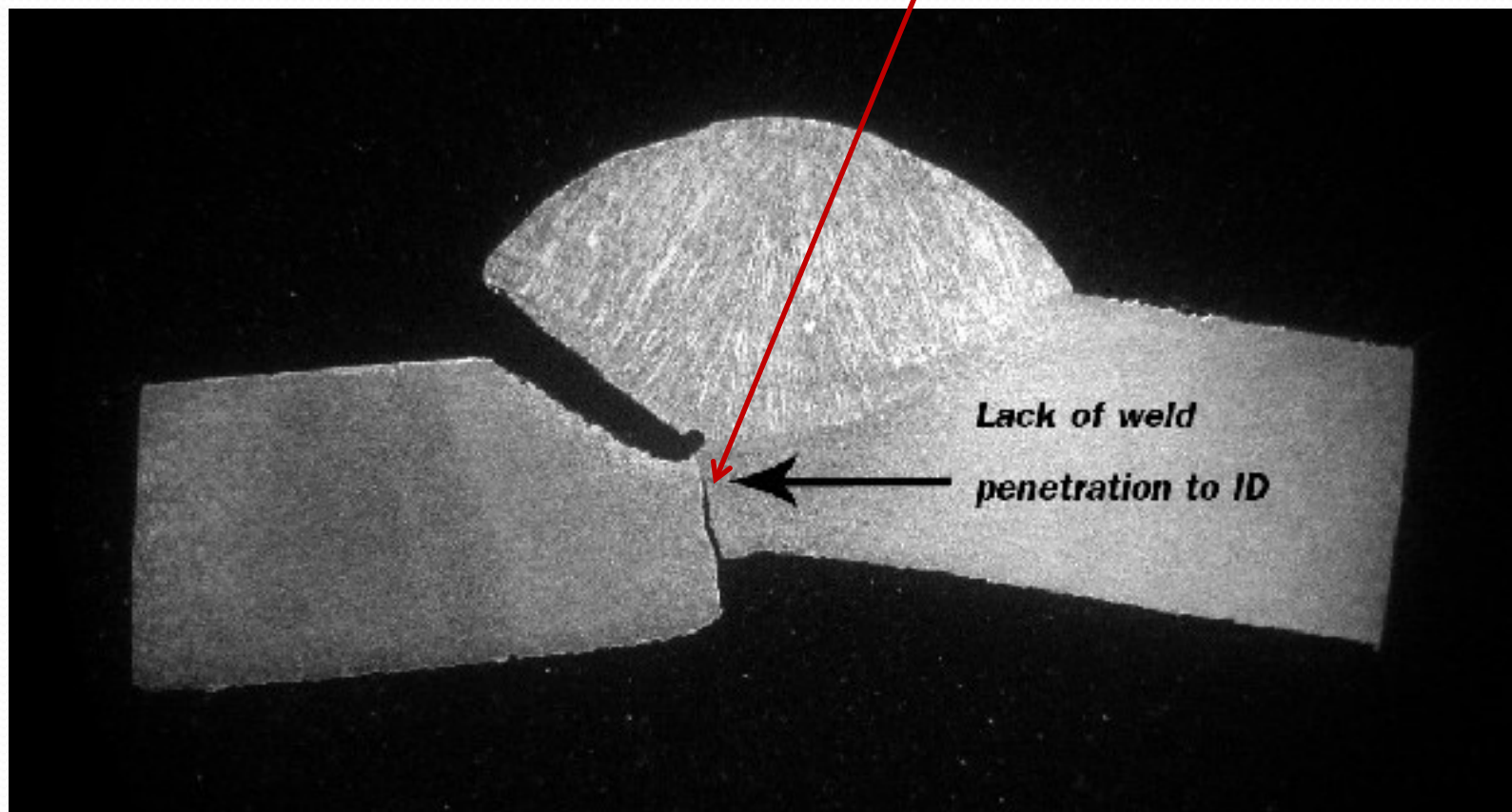
# DOBRAS DE FORJAMENTO



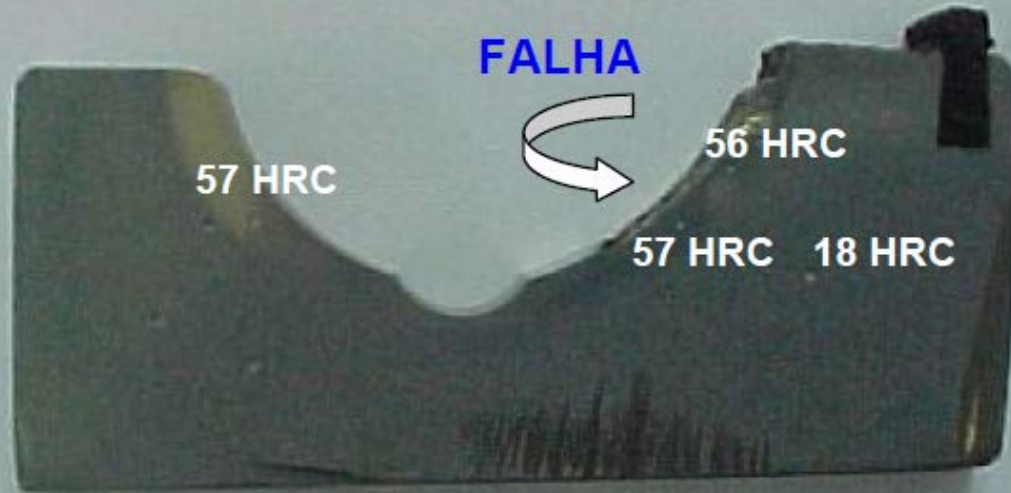
LINHAS DE  
FLUXO COR-  
TADAS - SÍ-  
TIO DA NU-  
CLEAÇÃO DA  
TRINCA.



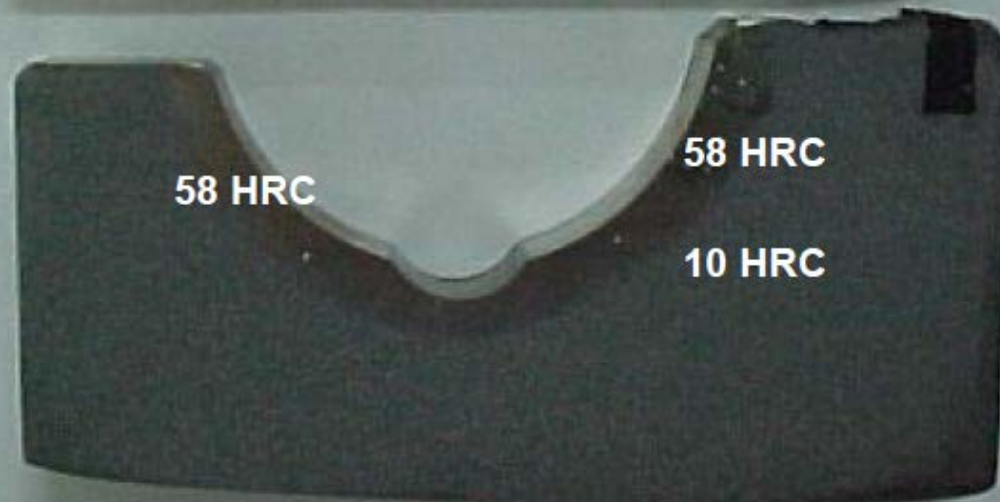
## FALTA DE PENETRAÇÃO NA SOLDA

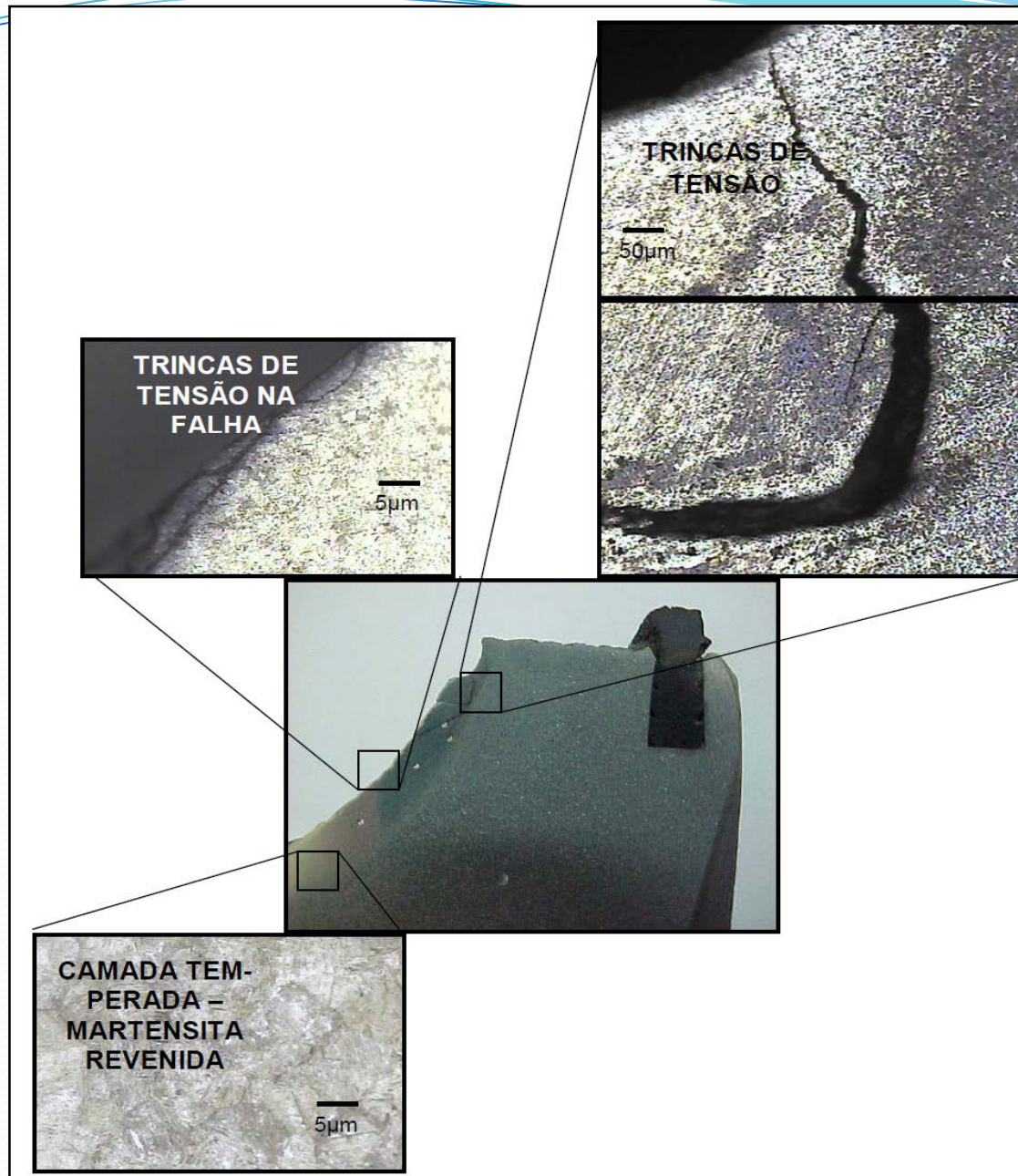


PEÇA COM  
FALHA



PEÇA SEM  
FALHA



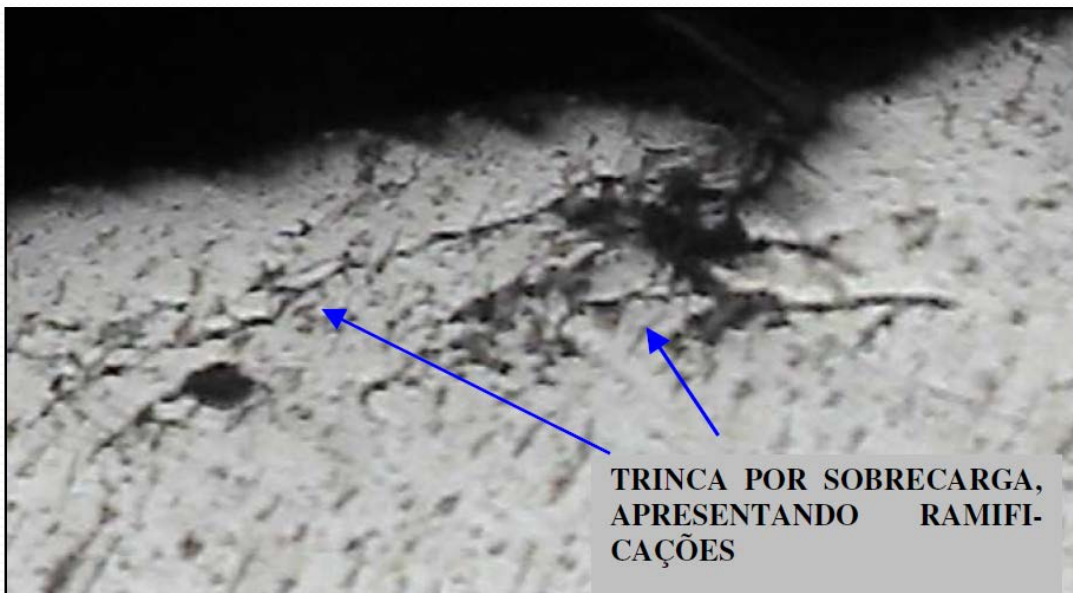


# FALHAS DE PROCESSO

Material ABNT 1213/ DIN 9SMn28 Rd.  
22,22mm trefilado



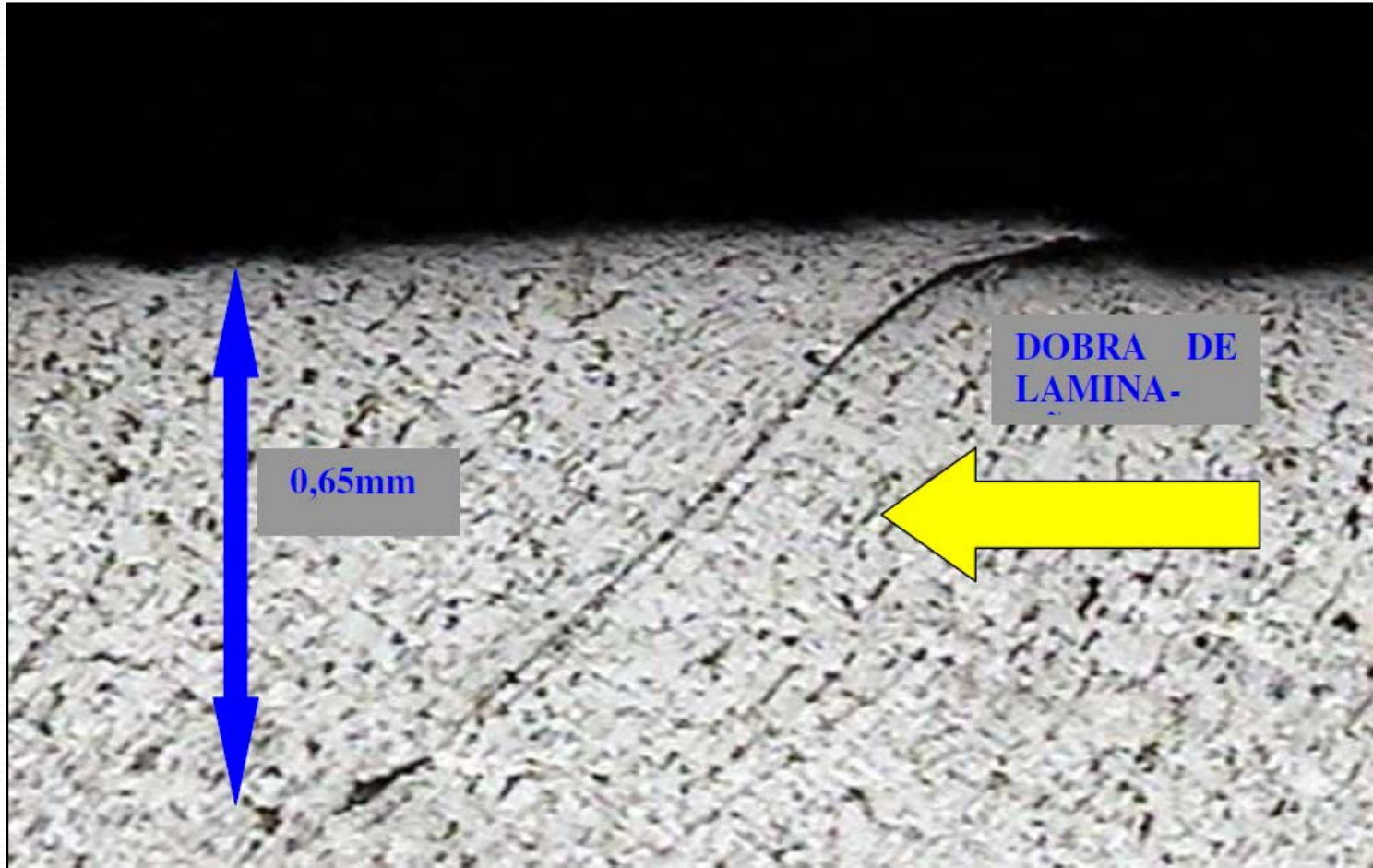
- A. química-OK;
- Microestrutura-OK;
- Inclusões – Não OK;
- Dureza-OK;



**GRANDE DISTRIBUIÇÃO E  
FORMA DE SULFETOS PARA UM  
AÇO RESSULFURADO.**

# FALHAS DE PROCESSO

CASO III Material ABNT 1213/ DIN 9SMn28  
Rd. 22,22mm trefilado



**DOBRA DE LAMINAÇÃO – NÃO SE VISUALIZA A DESCARBONETAÇÃO  
POIS O AÇO É DE BAIXO CARBONO E QUASE TODO FORMADO DE  
FERRITA.**

# Trincamento por Corrosão sob Tensão em um aço Inoxidável

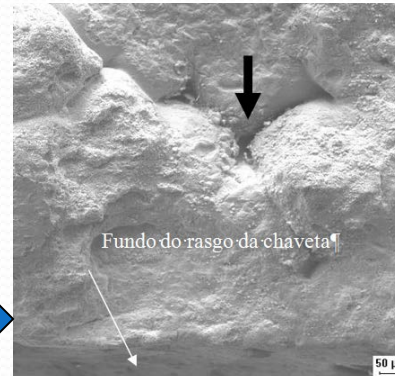
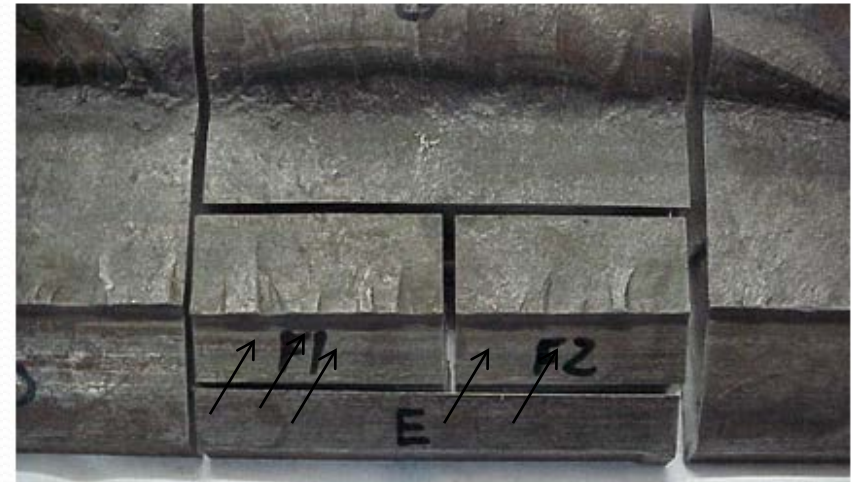
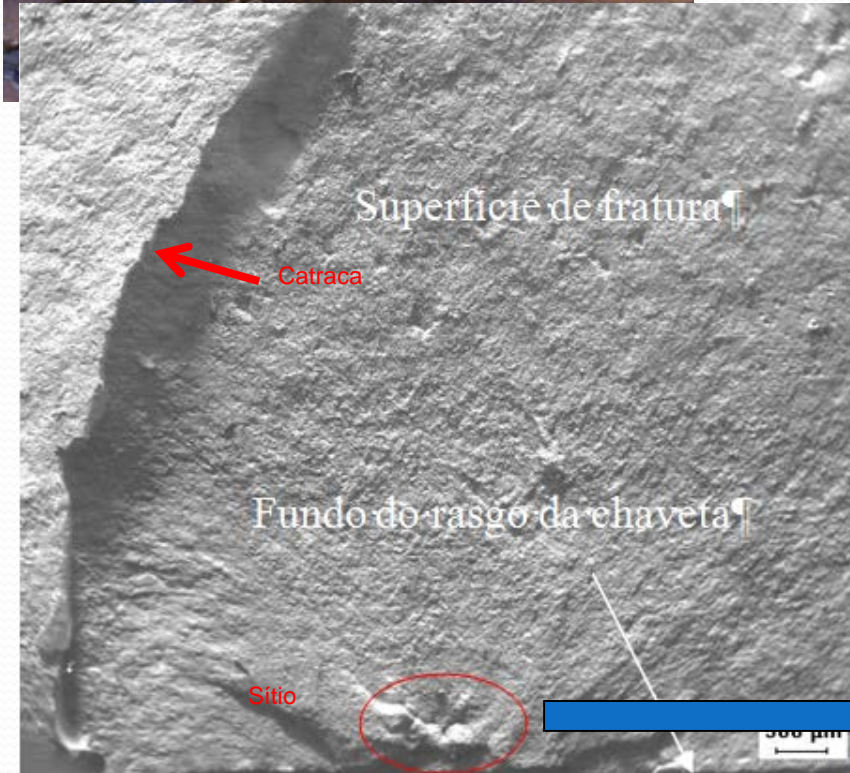
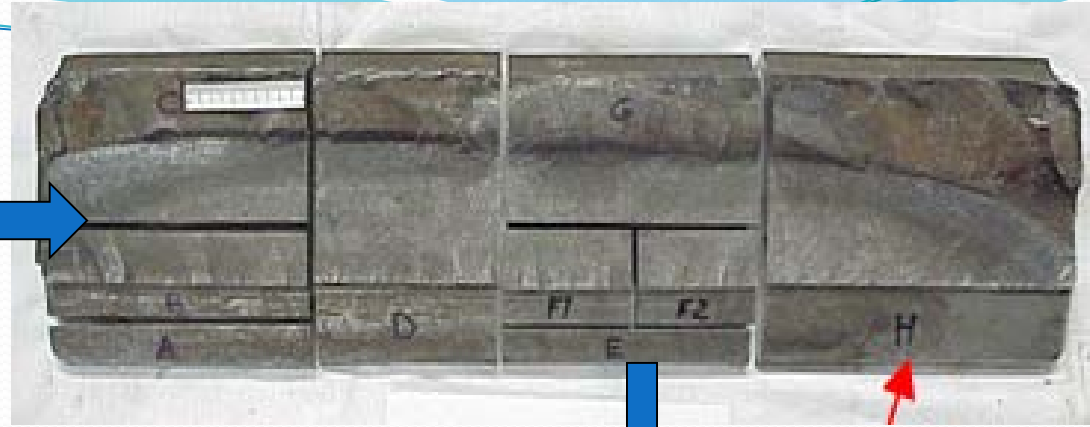


Modo Transgranular de Fratura



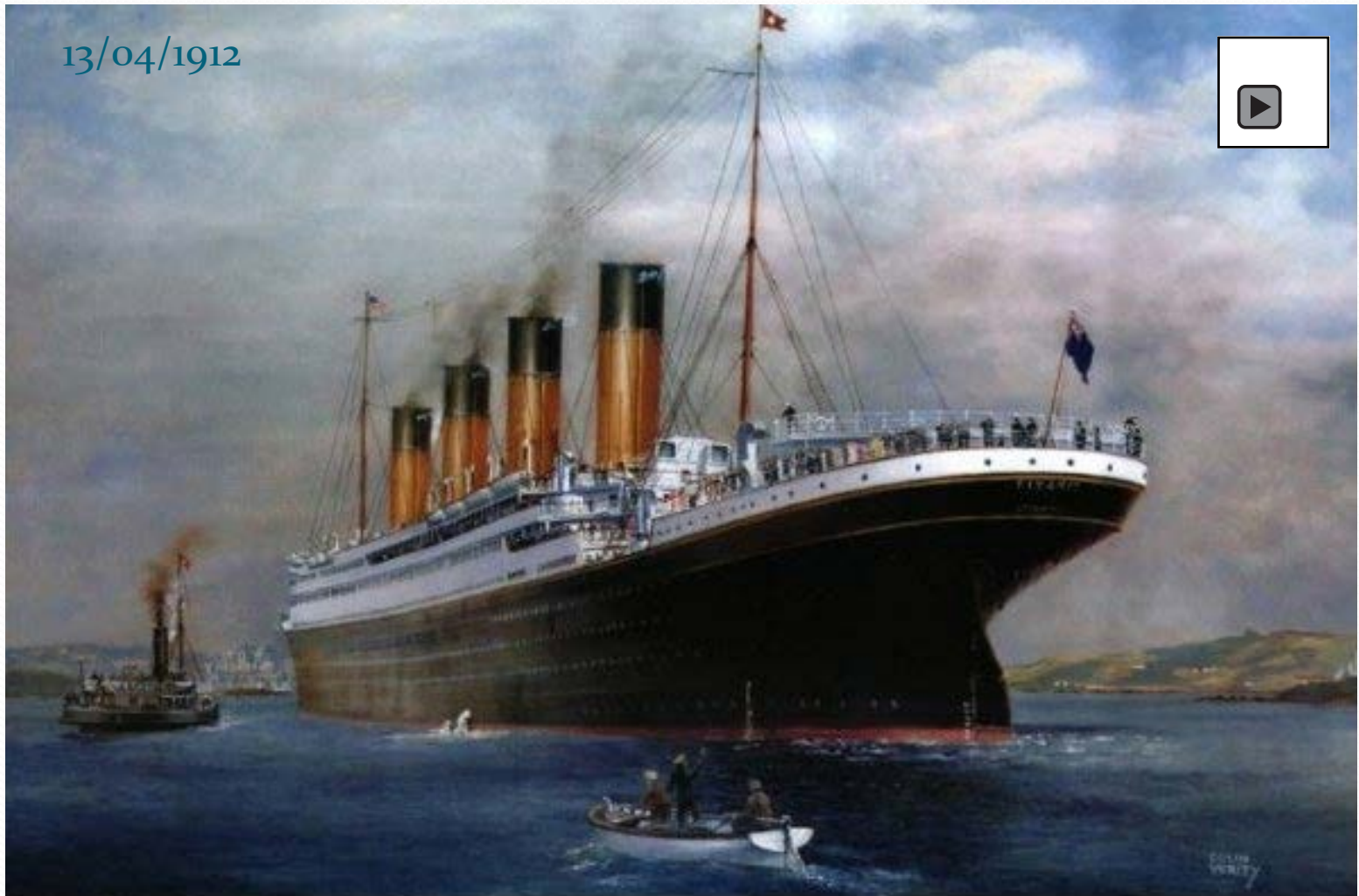
Modo intergranular de fratura

# Falha de um Rodete de Engrenagem (catracas de fadiga)



# Estudo de caso: TITANIC

13/04/1912



Survivor: *Millvina Dean*

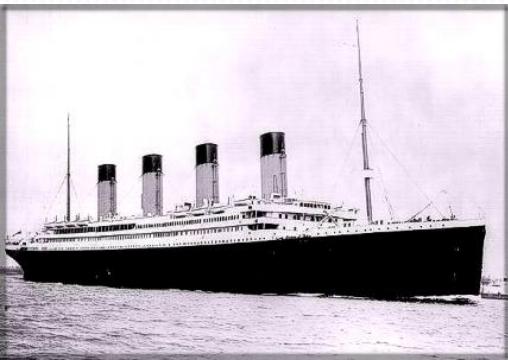
R.M.S. TITANIC *Departure from Queenstown*

Colin Verity B.S.M.A.

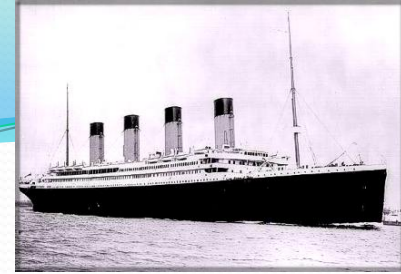


# Obtenção das amostras

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



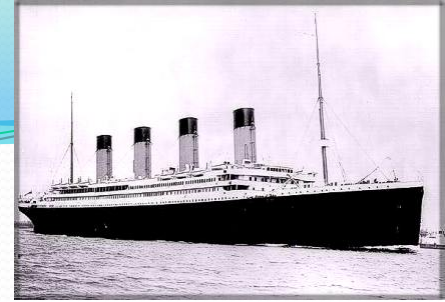
# Composição Química



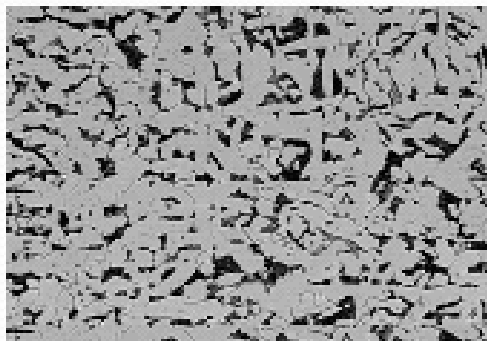
- No aço do casco do TITANIC constata-se teores elevados de P, S que associados ao baixo teor de Mn (baixa relação Mn/S) são responsáveis pela maior tendência ao comportamento frágil em baixas temperaturas .

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	6,8:1
<b>ASTM A36</b>	0,20	0,55	0,012	0,037	0,007	0,01	0,079	0,0032	14,9:1
(*) amostra extraída da placa do casco									

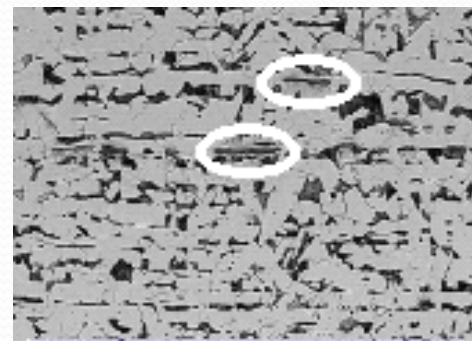
# Microestrutura



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

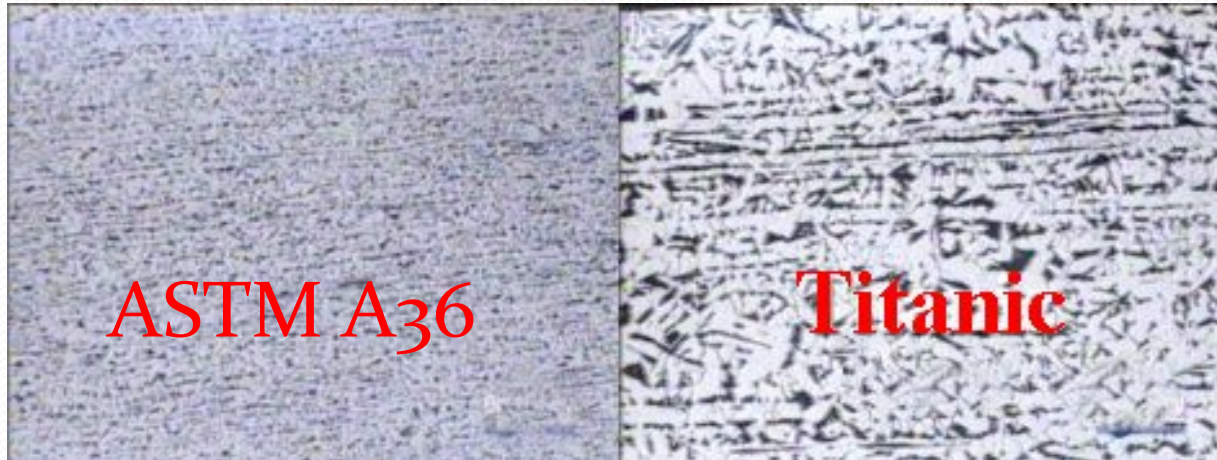


**Seção transversal**

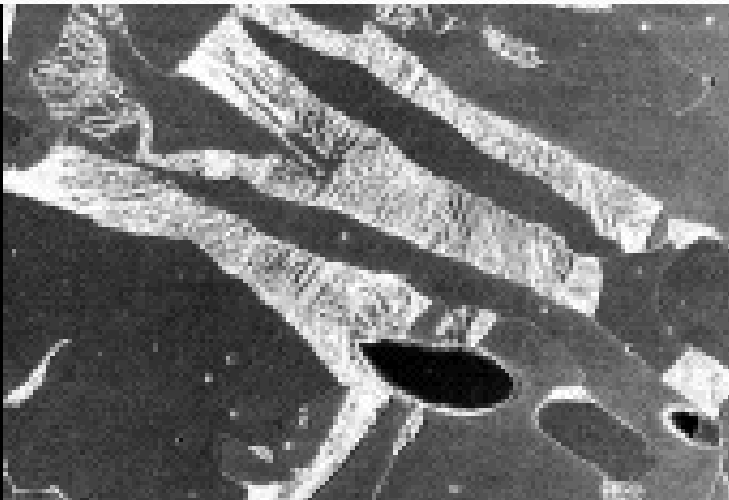


**Seção longitudinal**

# Microestrutura (A36 x Titanic)



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



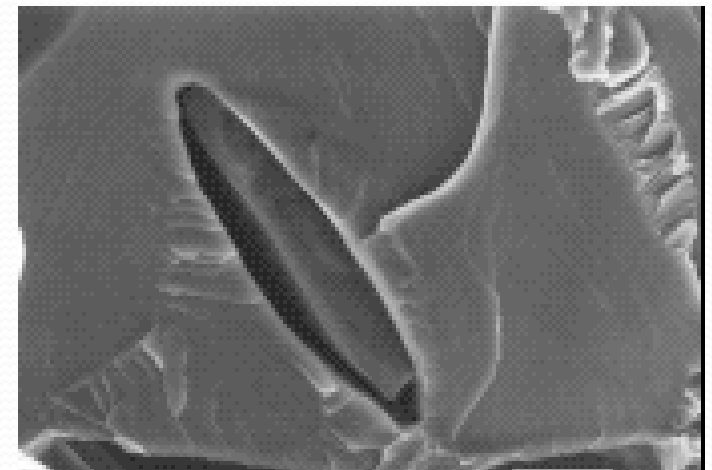
- Através da análise com um microscópio eletrônico de varredura pode-se observar partículas de MnS ( estruturas elípticas)

# Ensaio de impacto: Charpy

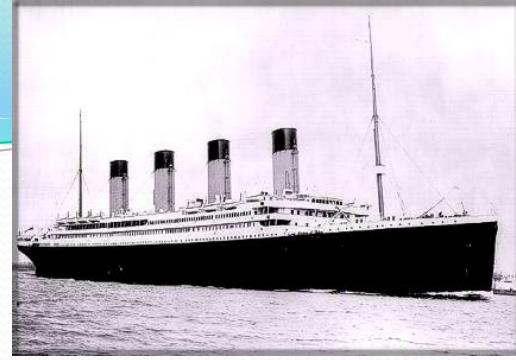
- Realizou-se ensaios Charpy em uma faixa de temperaturas entre  $-55^{\circ}\text{C}$  e  $179^{\circ}\text{C}$  em três séries de corpos de prova de dimensões padrão.

➤ A figura ilustra uma superfície Charpy recém fraturada a  $0^{\circ}\text{C}$ . Planos de clivagem na ferrita são bastante evidentes

➤ A figura ilustra uma região da superfície contendo MnS

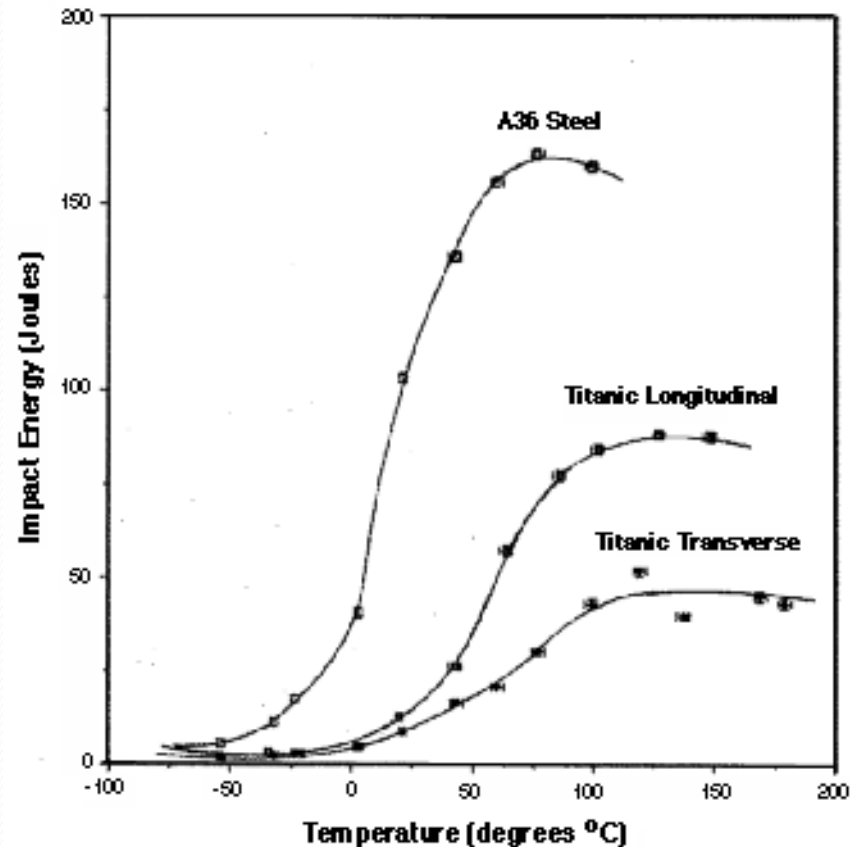


# Ensaio de impacto: Charpy



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  $-27^{\circ}\text{C}$  (ASTM A 36),  $32^{\circ}\text{C}$  (casco longitudinal) e  $56^{\circ}\text{C}$  (casco transversal).
- Durante a colisão, a temperatura da água do mar era de  $-2^{\circ}\text{C}$



# 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).



**FIM**