

SMM0572-INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AÇOS E FERROS FUNDIDOS (SIDERURGIA)

Prof. Marcomini

- **Engenharia de Materiais** (UFSCar-1988);
- **Mestrado** em Engenharia Mecânica: Materiais e Processos, área de concentração: **Transformação de fases, Fragilização e Fratura (Unicamp-2008)**;
- **Doutorado** em Engenharia Metalúrgica e de Materiais: área de concentração: **Transformação de Fases, Fragilização e Fratura (Poli-USP-2012)**;
- **Pós-doutorado**: **Propagação de trincas, por fadiga, em aço microligado, em ambientes agressivos (UFSCar-2017)**;
- **Experiência industrial**: 22 anos em indústrias em vários segmentos: automotiva, equipamentos de óleo & gás, movimentação, mineração, eólica, siderurgia e hidromecânicos;
- Qualificado em ultrassom Nível 2- e Supervisor de Proteção Radiológica em Medidores Nucleares pela CNEN
- Atua na área de aços há 30 anos;
- USP- desde 2013;
- Áreas de atuação: Metalurgia Física/Transformação de fases, Comportamento Mecânico e Análise de Falhas.

Referências

- Gorni et al, **Siderurgia, uma visão geral**, coord. **José Roberto Bolota**, Edgar Blücher Ltda. (coleção **ABM**), 2024;
- André Luiz Vasconcelos da **Costa e Silva**, Paulo Roberto Mei, **Aços e ligas especiais**, Blucher/Villares Metals, 4a ed. Revisada, 2021;
- André Luiz Vasconcelos da **Costa e Silva**, **Refino dos aços: fundamentos e aplicações**, Blucher/CBMM, 1a ed., 2023;
- **Hubertus Colpaert**, **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, Blucher/Villares Metals, 4a ed. Revista e atualizada por André Luiz Vasconcelos da **Costa e Silva**, 2008;
- **Ernandes Marcos da Silveira Rizzo (coleção)**, **Processo de fabricação de ferro gusa em alto forno**, ABM, 2009;

Referências

- Marcelo Breda Mourão et al. Introdução à Siderurgia, ABM, São Paulo, 2007;
- Fathi Habashi. *Extractive Metallurgy*, Gordon and Breach Science Publishers, 1986;
- Luiz Antônio de Araújo. **Manual de siderurgia** - produção, Editora Arte & Ciência, São Paulo, 1997.

Metodologia

Aulas expositivas. Os slides, em pdf, serão disponibilizados no moodle (e-disciplinas).

Avaliação

Prova ao final do curso

Frequência

A lista de **frequência** deve estar assinada! Se o nome **não** estiver na lista, **escrever** embaixo e assinar. **O cálculo da frequência será feito com base nas assinaturas da lista de frequência.** Se o aluno **não** tiver a **frequência mínima (70%), será reprovado!**

Programa

1. Introdução
2. Fundamentos dos aços e ferros fundidos;
3. Histórico da metalurgia e siderurgia;
4. Minérios, produção de sínter, redução direta, coqueificação, produção de gusa, conversores;
5. Aciaria elétrica, ferro-ligas;
6. Inclusões, refino primário, refino secundário;
7. Lingotamento, conformação;
8. Fabricação de ferros fundidos;
9. Fabricação de aço inoxidável;
10. Arqueometalurgia.

INTRODUÇÃO

O QUE É METALURGIA?

Metalurgia é o ramo da Engenharia dos Materiais que estuda os fenômenos **físico-químicos** associados ao **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**: **contas de ferro foram encontradas nas tumbas de El-Gezilah (Egito), datando de 4.000 A.C.**

ORIGEM DO TERMO SIDERURGIA

- Do Latim: **SIDEREUS**, “relativo aos astros”, de **SIDUS**, “estrela, constelação”- primeira observação de ligas de ferro: meteoritos;
- Os Gregos: **SIDEROS**, “ferro”, mais **ERGON**, “trabalho”: ferro trabalhado= aço ou ferro fundido;
- **AÇO**: Do latim **ACIES**- agudo, afiado.

SIDERURGIA: FABRICAÇÃO DO AÇO E FERRO
METALURGIA: ENVOLVE TAMBÉM OS METAIS NÃO FERROSOS

10.000 a.C.	1400 a.C	1500 d.C.	~1800	~1930	1990 - hoje
Cobre Bronze Prata Estanho Vidro Papiro Cerâmica Madeira	Ferro Ferro fundido Papel Colas Cimento Aço (Hititas)	Aço industrial Platina Zinco Níquel Latão Borracha Fibra de vidro Baquelite Refratários	Aço inox Tungstênio Zinco Magnésio Alumínio Silício Nióbio Borracha vulcanizada	Superligas metálicas Aços microligados Plutônio Fibra de carbono Polímeros Alumina cerâmica	Aços ULSAB Polímeros de engenharia Supercondutores Silício (chip) Nanomateriais Grafeno

DIVISÃO CLÁSSICA DA METALURGIA

- **Metalurgia Extrativa:** extração e beneficiamento do metal/minério;
- **Metalurgia Física:** Termodinâmica, cinética e mecanismos dos fenômenos metalúrgicos;
- **Metalurgia de Transformação:** Processos de fabricação de produtos e componentes metálicos.

Metalurgia Física

**Transformações
de Fases**



**Alterações nas
Estruturas dos
Metais/Ligas**



Relações Estruturas vs. Propriedades



**Desempenho e Aplicação dos Materiais
Metálicos**

Metalurgia Física

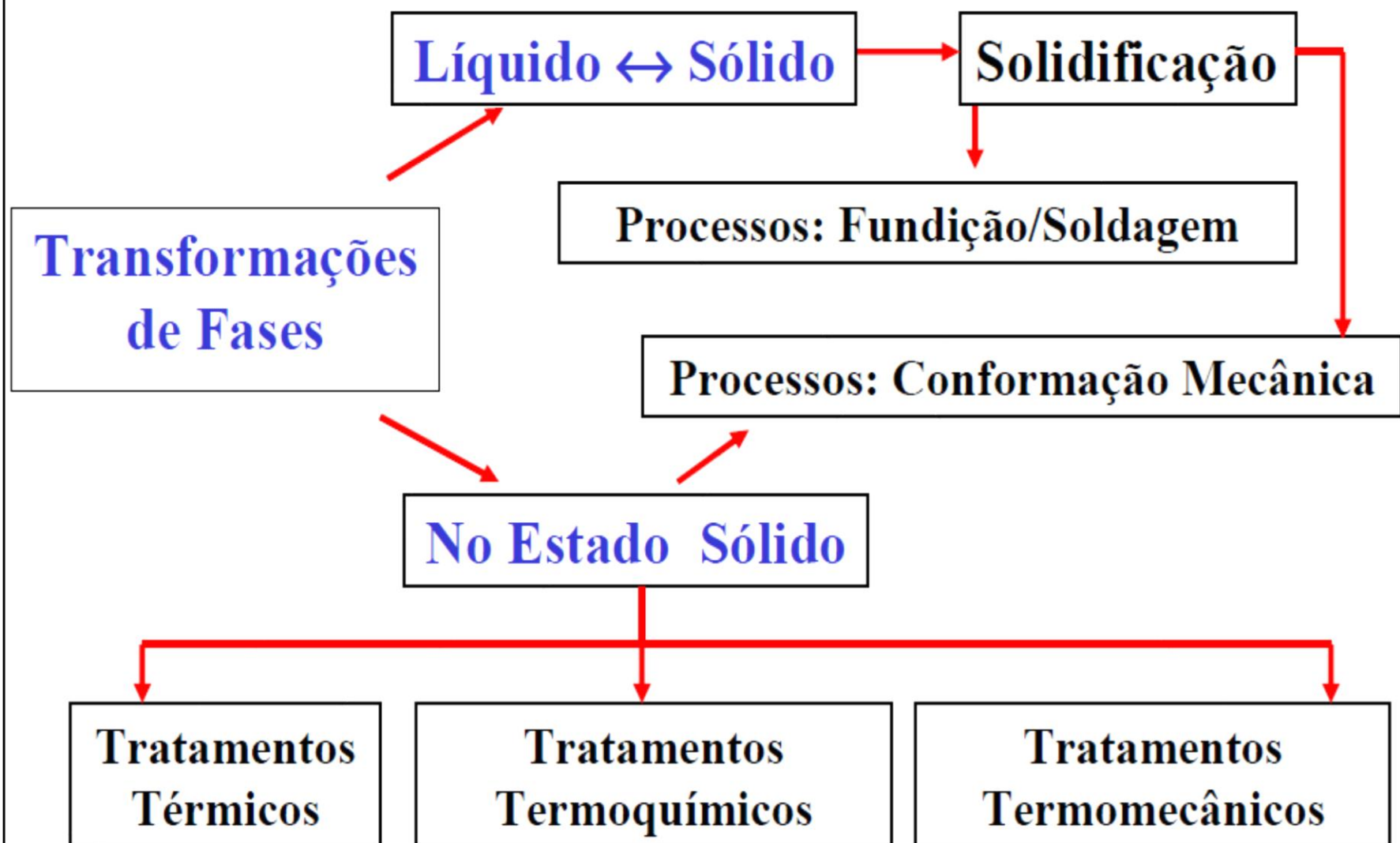
Transformações de Fases

- **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

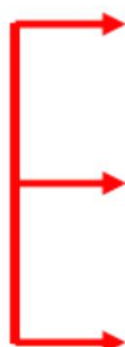
- Utilizam **CALOR (ENERGIA TÉRMICA)** para as transformações de **ESTADO FÍSICO** e de **FORMA** necessárias para a obtenção de um determinado produto
- São classificados em função da **TEMPERATURA DE TRABALHO**.

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

METALURGIA EXTRATIVA

- **Processos pré-extrativos:** **extração** e beneficiamento do **minério**. Aumentam a concentração do composto metálico, por meio de reações químicas, mas não o isolam do minério;
- **Processos extrativos:** **extração** do **metal** a partir do minério;
- **Processos de Refino:** Obtenção de ligas com composição definida, grau de pureza comercial. Ex: fabricação do aço;

METALURGIA EXTRATIVA

- **Metais ferrosos: Siderurgia (fabricação de aço e ferro fundido);**
- **Metais não ferrosos: Al, Cu, Ti, Nb, Mg, Ni, Cr, Zn, Mn, Sn, Sb, Pb, W, V, Mo, Au, Ag.**

SIDERURGIA

Processos de extração e refino aplicados aos metais ferrosos.

- **1ª Etapa: extração do Fe** a partir da **redução** do minério de Fe, em **Alto Forno (*Blast Furnace*)**. Produto: **Ferro Gusa (*Pig Iron*)**, com 90% Fe;
- **2ª Etapa: Refino:** Obtenção do **aço** em conversores: Bessemer ou **LD** (Nos EUA e alguns países da Europa: ***BOF- Basic Oxygen Furnace***) ou de **Ferros Fundidos FoFo (Cast Iron)** em fornos **Cubilô**.
- **Produtos:** **Aços** (ligas de Fe-C, com $\sim 2,0\%C$) ou **FoFo**, com $C > 2,0\%C$.

ALTO-FORNO

COQUE



HEMATITA $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$



MAGNETITA (Fe_3O_4)

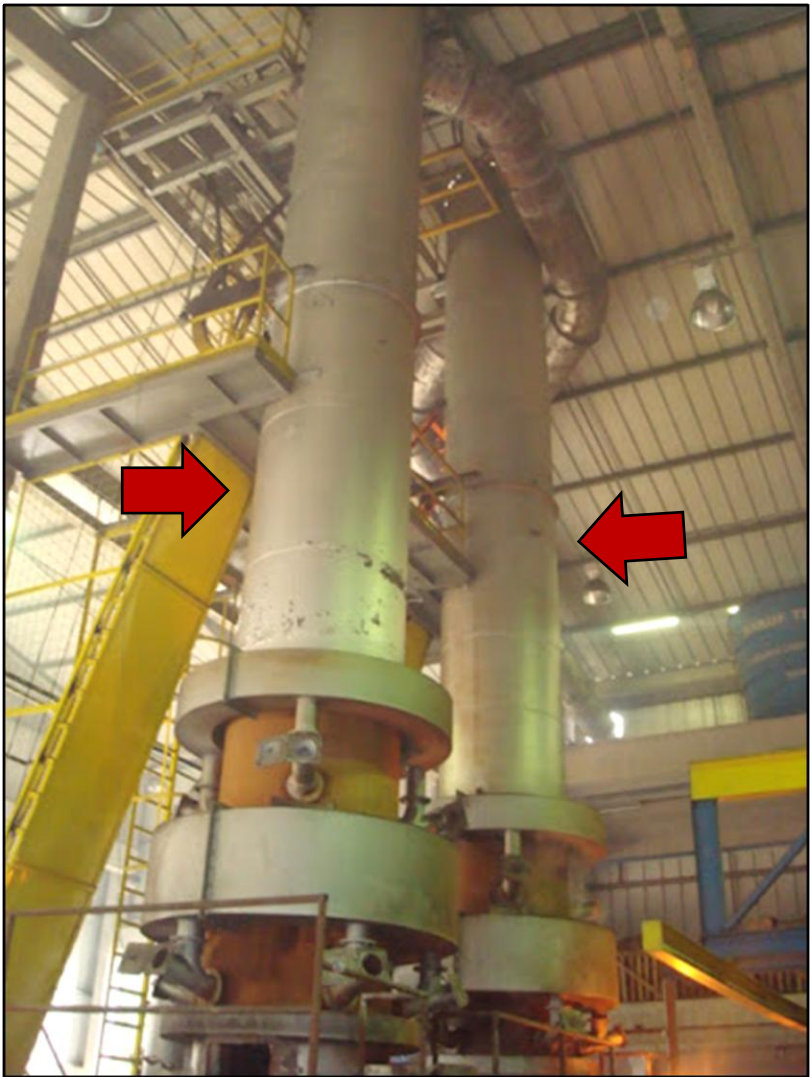
WUSTITA (FeO)





XXXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO “Os desafios da engenharia de produção para uma gestão inovadora da Logística e Operações” Santos, São Paulo, Brasil, 15 a 18 de outubro de 2019.

FORNO CUBILÔ (CUBILOT)





FORNO CUBILÔ (CUBILOT) – POLI-USP



O forno usado na primeira fundição didática do Brasil (ao lado) e a placa feita há 122 anos (acima), hoje expostos na Poli: intuição de Paula Souza

Em **1903**, sob a chefia de um mestre suíço, os alunos trabalhavam no laboratório dotado de um forno cubilô para a produção de **350 quilos por hora de ferro fundido**.

Produção mundial de aço em 2023
1,89 bilhão de tons

Produção mundial de aço em 2024
1,84 bilhão de tons

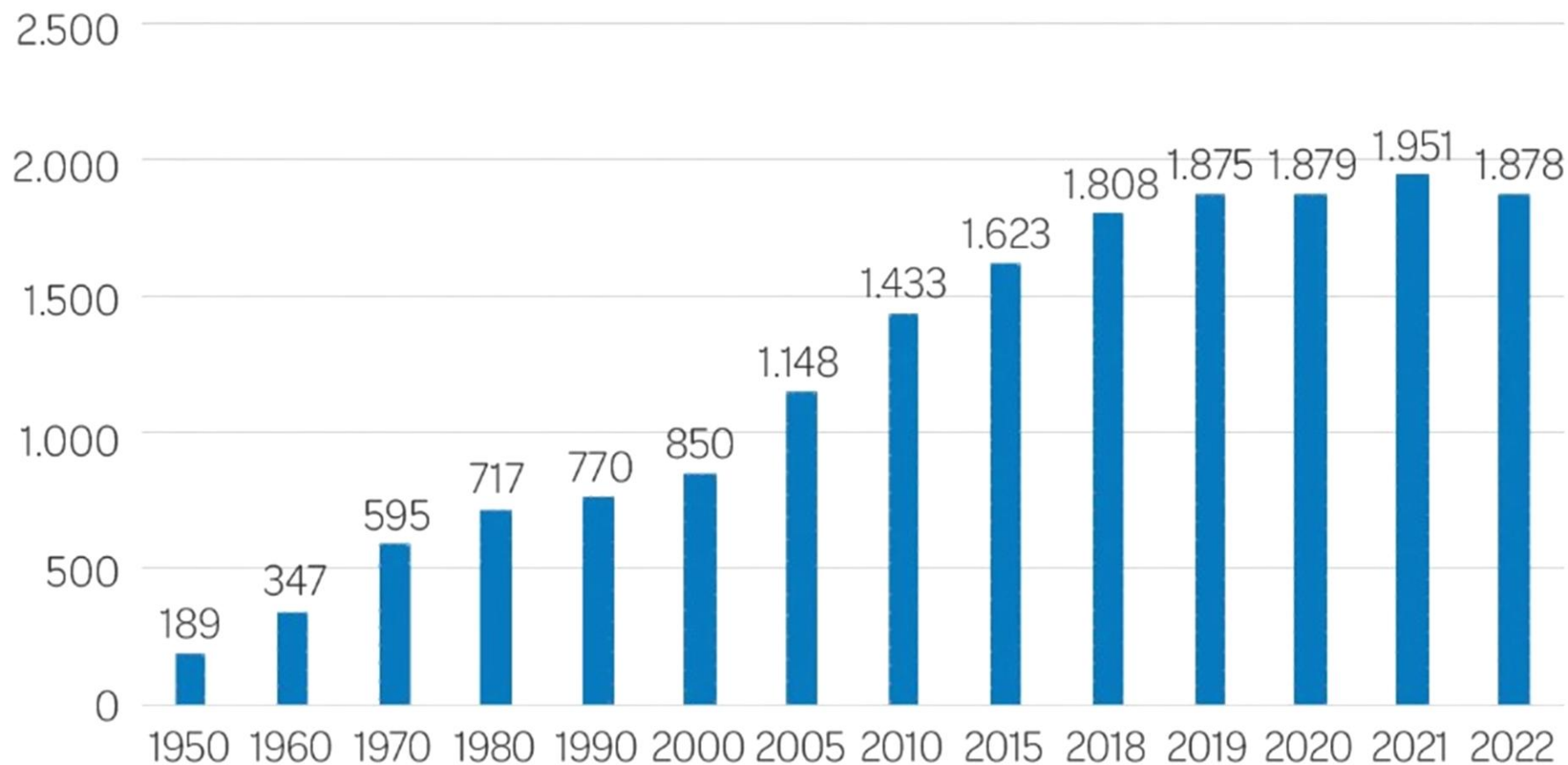
Curiosidades

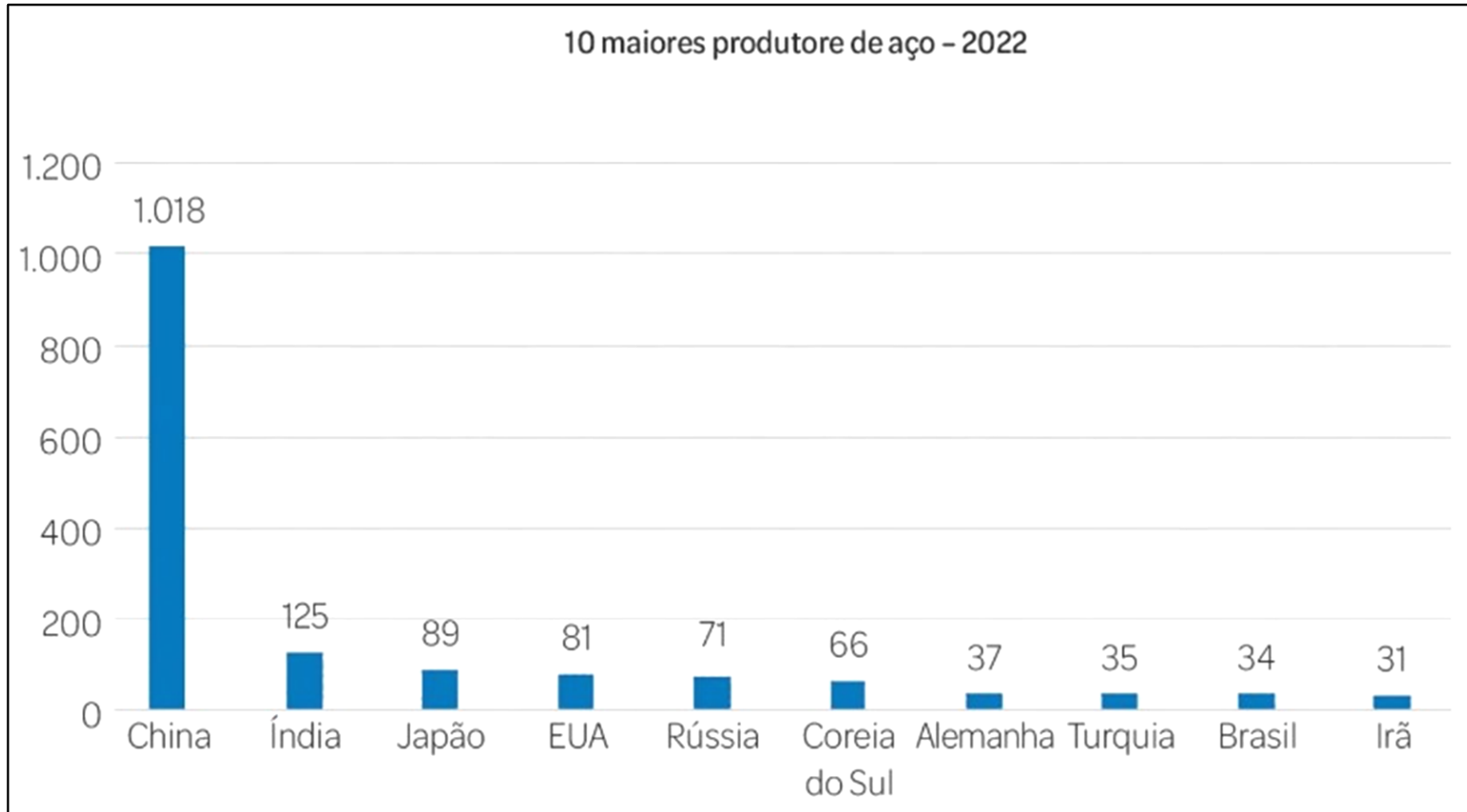
- **1 pneu caminhão** fora de estrada (lavras de minério): **1 ton de aço** (*Tire Cord Steel*);
- **70% a 90%** escória da fabricação de aço é reaproveitada: cimentos, correção de solo (agricultura-minerais), isolantes (lãs).



<https://www.hunterseguros.com.br/caminhao-fora-de-estrada-para-mineracao-veja-os-5-maiores/>

Produção mundial de aço – 1950-2022 (MTon)



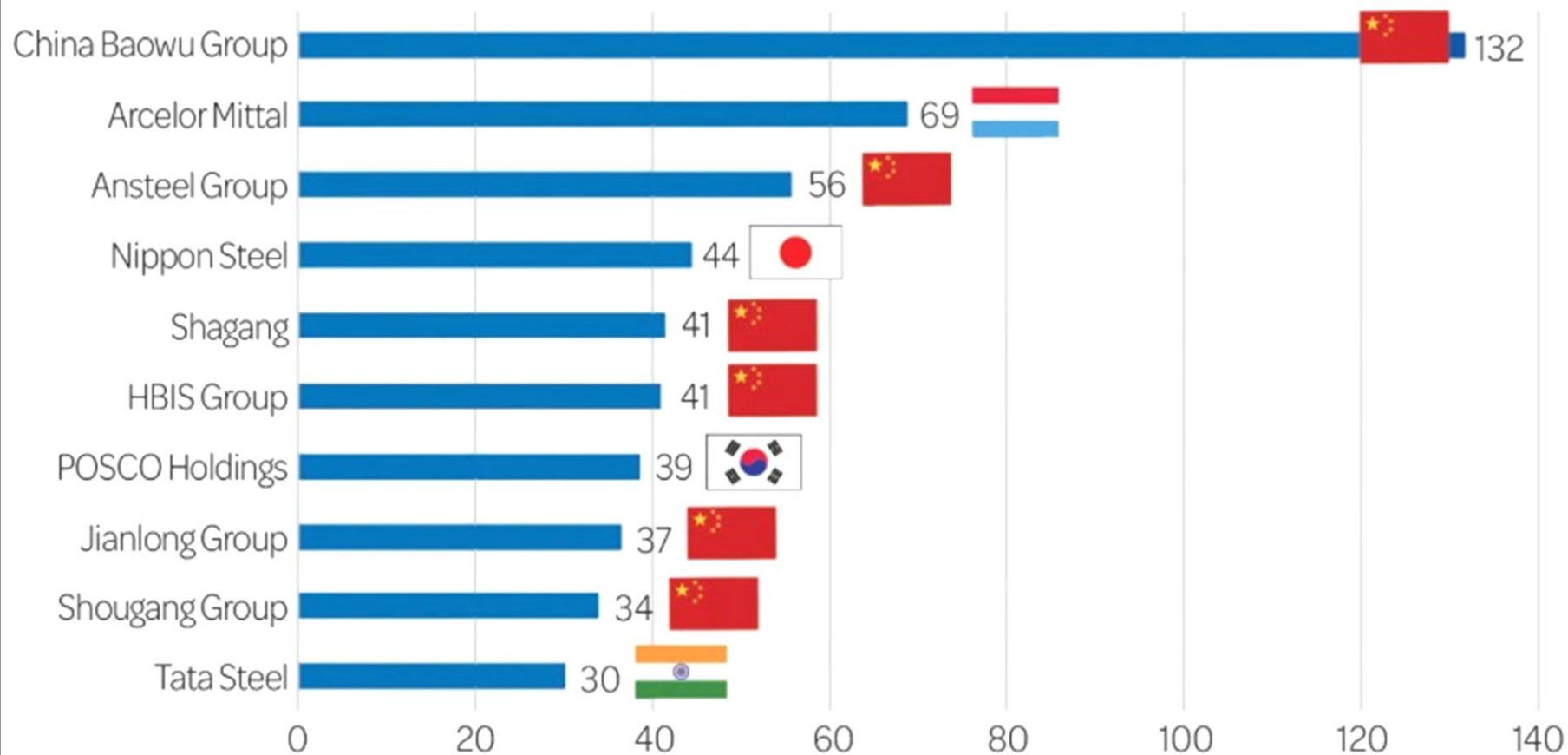




EESC • USP



10 maiores empresas produtoras mundiais de aço - 2022 (MTon)



Pará

Cidade	Usina	Produtos
Marabá	Sinobras	Longos

Ceará

Cidade	Usina	Produtos
Pecém	Arcelor Mittal	Placas
Maracanaú	Gerdau	Longos

Pernambuco

Cidade	Usina	Produtos
Recife	Gerdau	Longos

Bahia

Cidade	Usina	Produtos
Simões Filho	Gerdau	Longos

Espírito Santo

Cidade	Usina	Produtos
Cariacica	Simec	Longos - Constr. mecânica
Tubarão	Arcelor Mittal	Planos

Rio de Janeiro

Cidade	Usina	Produtos
Barra Mansa	Arcelor Mittal	Longos
Resende	Arcelor Mittal	Longos
Volta Redonda	CSN	Planos
Santa Cruz	Gerdau	Longos

São Paulo

Cidade	Usina	Produtos
Piracicaba	Arcelor Mittal	Longos
Mogi das Cruzes	Gerdau	Longos - Constr. mecânica
Pindamonhangaba	Gerdau	Longos - Constr. mecânica
Araçatuba	Gerdau	Longos
Cubatão	Usiminas	Planos
Sumaré	Villares Metals	Longos - Alta liga/inox
Pindamonhangaba	Simec	Longos

Minas Gerais

Cidade	Usina	Produtos
Timóteo	Aperam	Planos/Longos (Inox - Elétrico)
Monlevade	Arcelor Mittal	Longos
Juiz de Fora	Arcelor Mittal	Longos
Barão de Cocais	Gerdau	Longos
Divinópolis	Gerdau	Longos
Ouro Branco	Gerdau	Planos/Longos
Ipatinga	Usiminas	Planos
Barreiro	Vallourec	Tubos
Jacuba	Vallourec	Tubos

Paraná

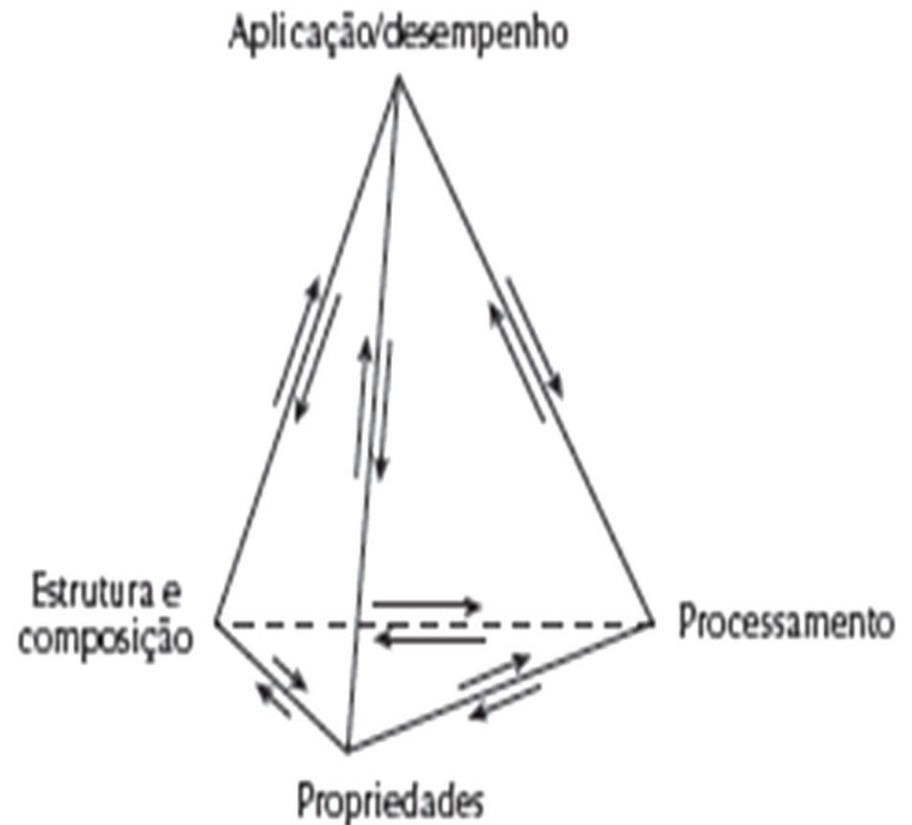
Cidade	Usina	Produtos
Araucária	Gerdau	Longos

Rio Grande do Sul

Cidade	Usina	Produtos
Charqueadas	Gerdau	Longos - Constr. mecânica
Sapucaia do Sul	Gerdau	Longos

Figura 1.4

Ilustração da inter-relação existente entre a composição química e microestrutura – processamento – propriedades – aplicação/desempenho de um produto metálico.



- Resistência mecânica
- Limite de escoamento
- Dureza
- Alongamento
- Resistência a impacto



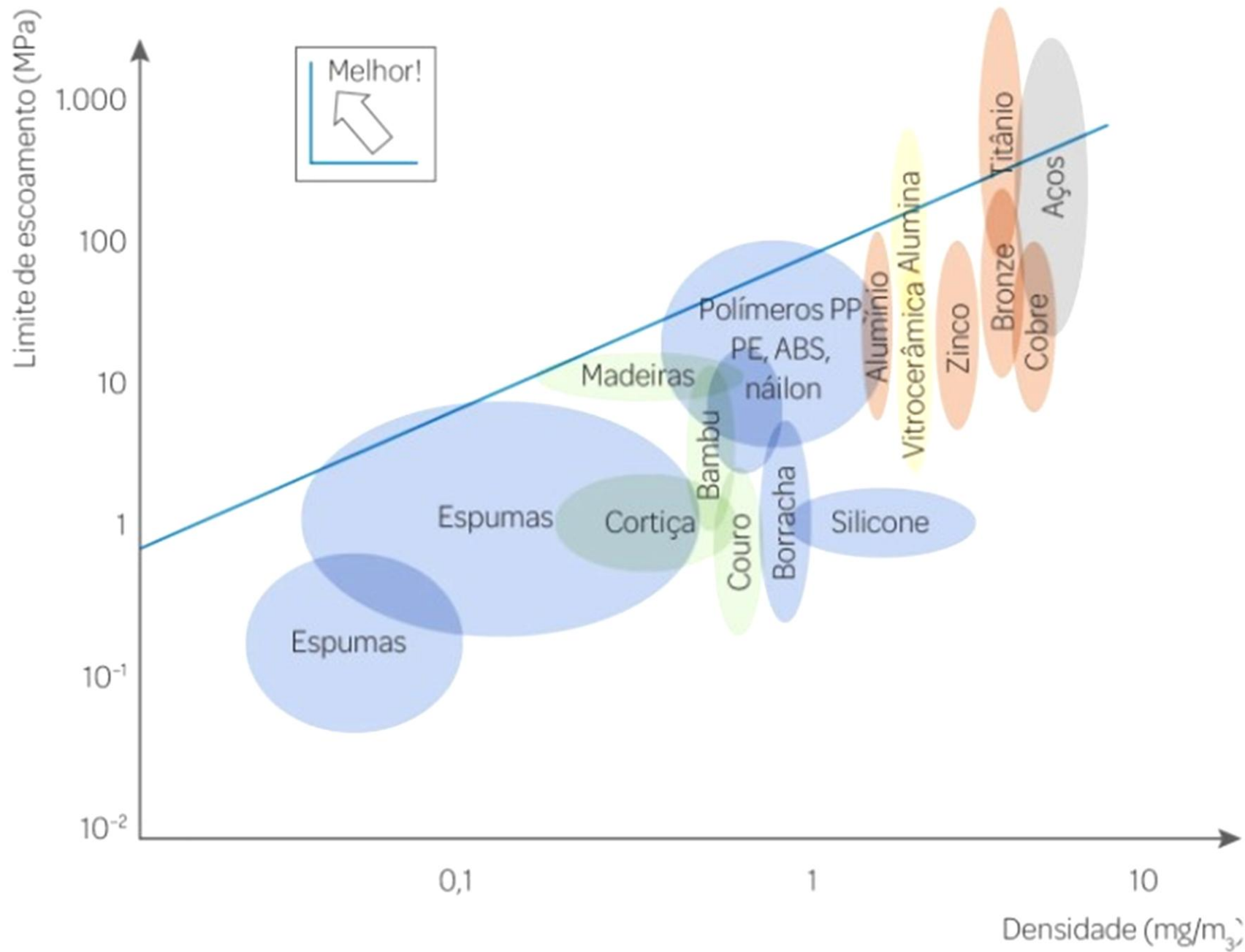
- Fácil de encontrar
- Fácil de projetar
- Baixo custo
- *"Near net shape"*

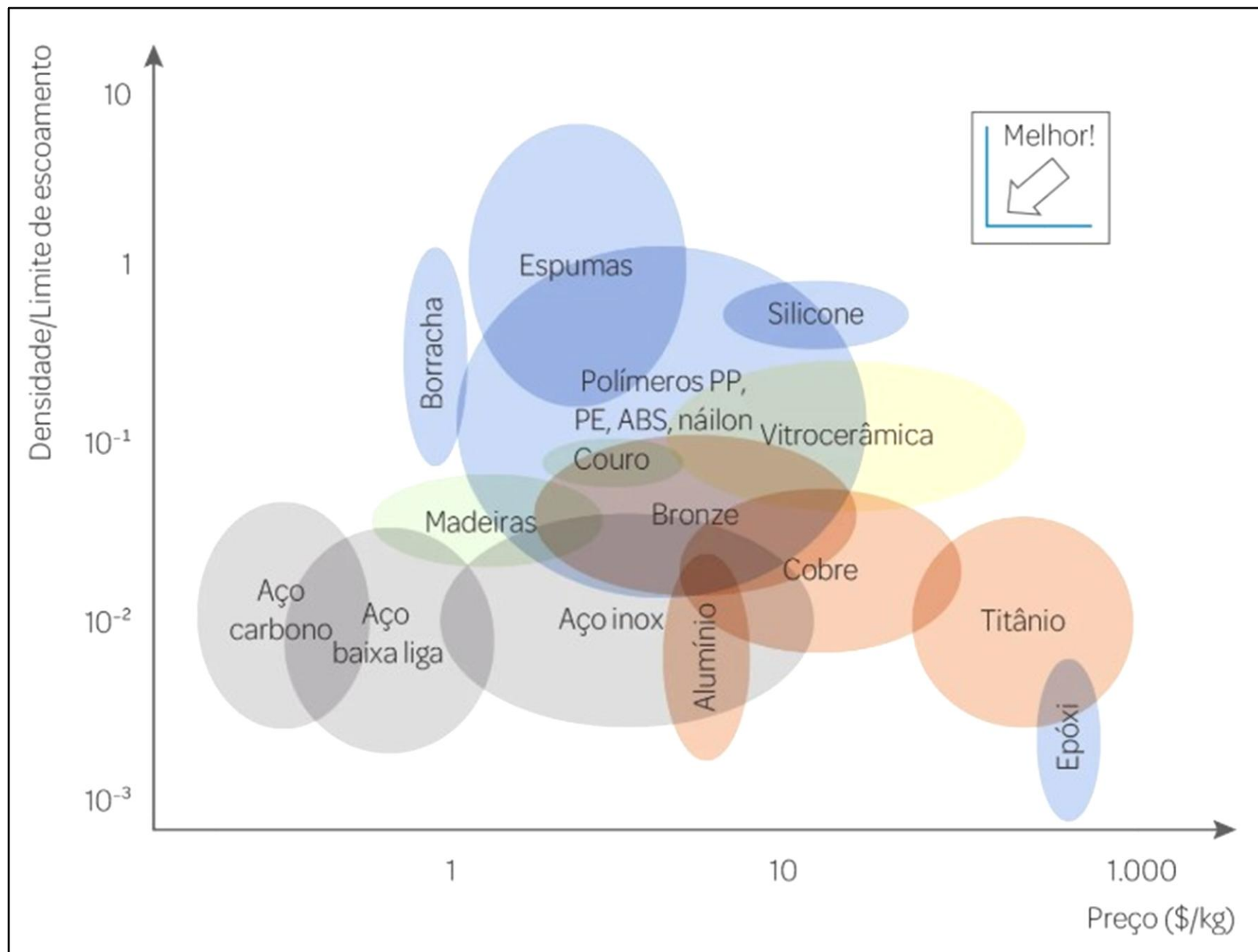
- Corrosão
- Fadiga
- Defeito de fabricação
- Erro de projeto
- Sobrecarga

- Nova tecnologia
- *Lean manufacturing*
- Inovação
- Automação

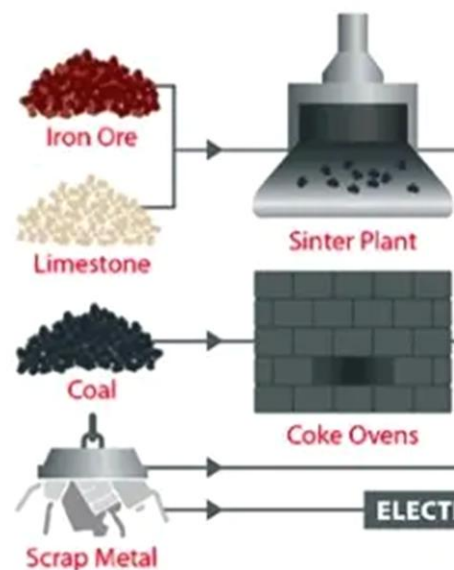
- Reciclabilidade
- Vida útil longa
- Pouco peso
- Baixo impacto ambiental

- Atendimento de vida útil
- Manutenção mínima
- Resistência a desgaste e corrosão





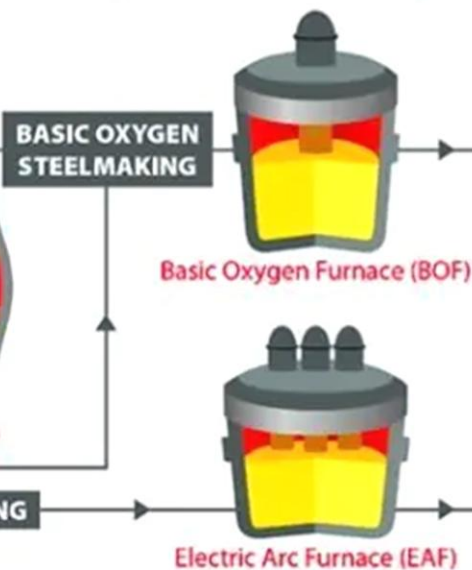
Raw Materials & Preparation



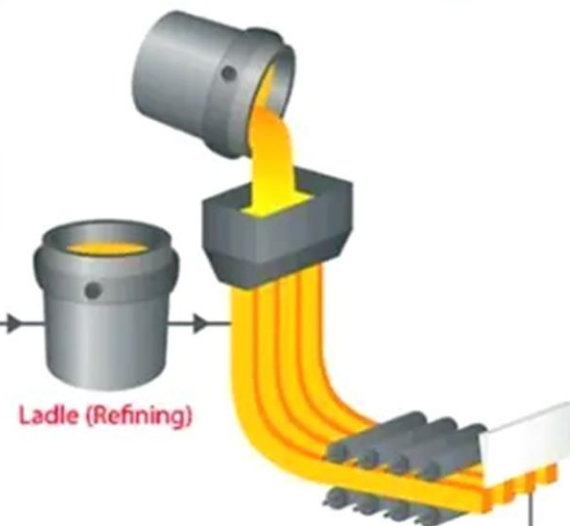
Ironmaking



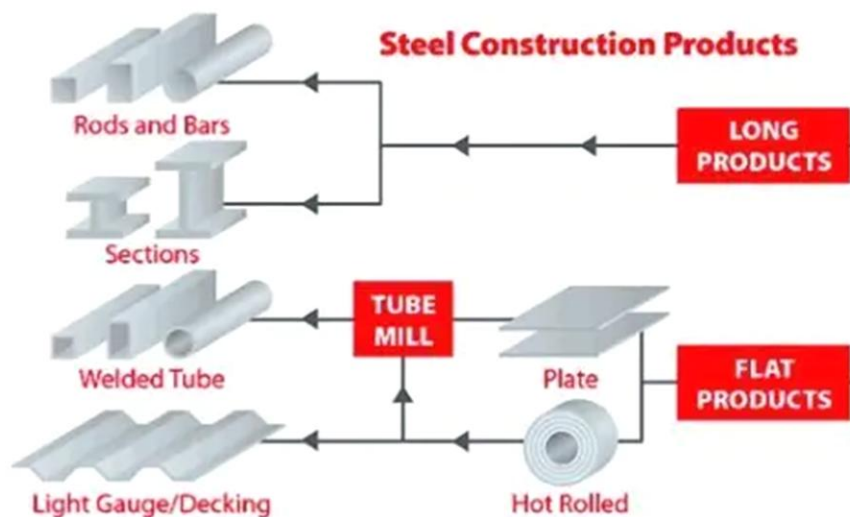
Steelmaking



Continuous Casting



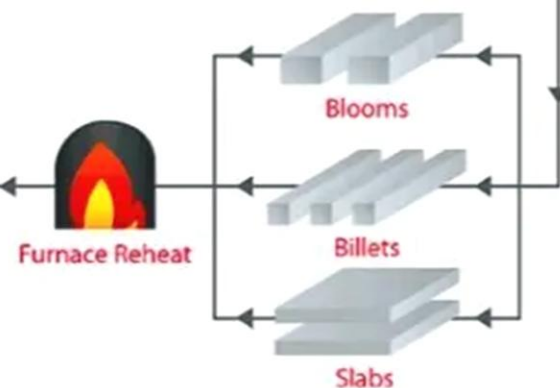
Steel Construction Products

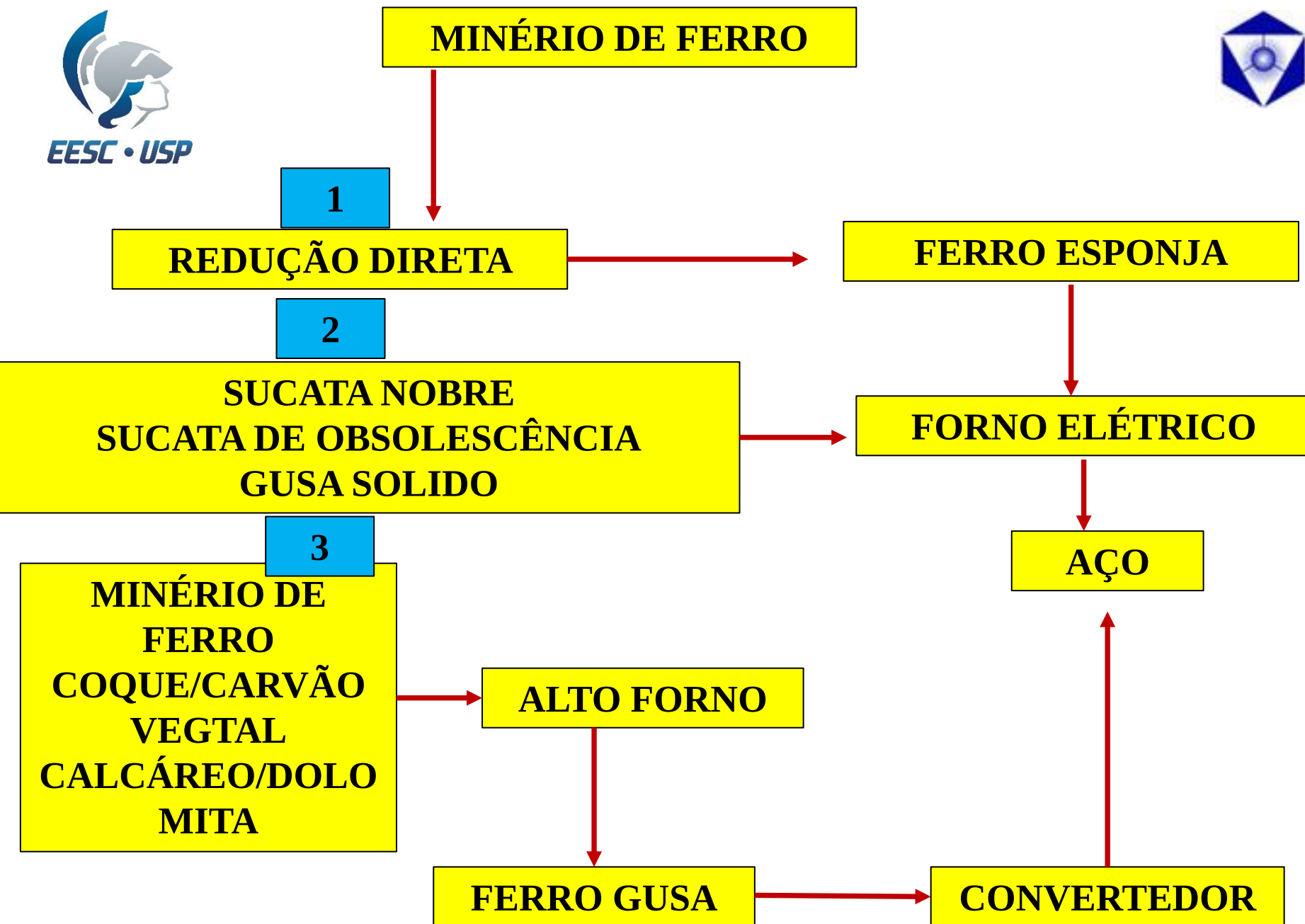


Rolling



Semi-finished Products





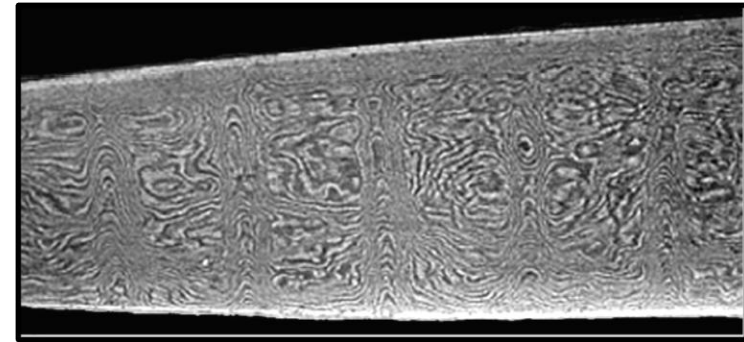
ARQUEOMETALURGIA

HISTÓRIA – PRIMEIRO MILÊNIO D.C. – AÇO DE DAMASCO

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
Damascus	1.41	<0.01	0.098	0.006	0.05	0.04	<0.01	<0.01	0.09

Journal of Materials Engineering and Performance 286—Volume 9(3) June 2000

John D. Verhoeven



J.D. Verhoeven, A.H. Pendray, and W.E. Dauksch 2004 September • JOM

Image source (http://www.flickr.com/photos/jasleen_kaur/4211340481/)



FABRICAÇÃO DO AÇO DE DAMASCO

Minas específicas da Índia

Minério com traços de V, Mn, Cr, Co E Ni.

Fundição com madeira da “Cassia auriculata” e folhas da “Calotropis gigantean”



Cassia auriculata



Calotropis gigantean

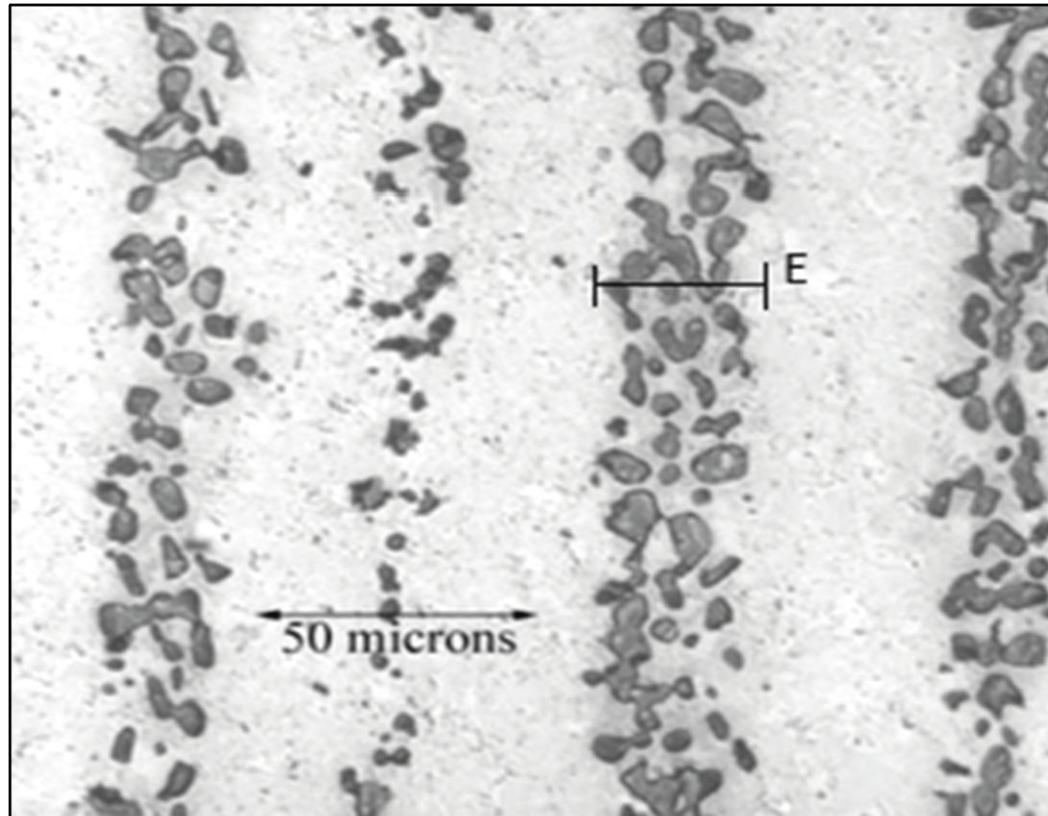
AÇO WOOTZ

DAMASCO-SÍRIA

Forjamento e tratamentos térmicos cíclicos

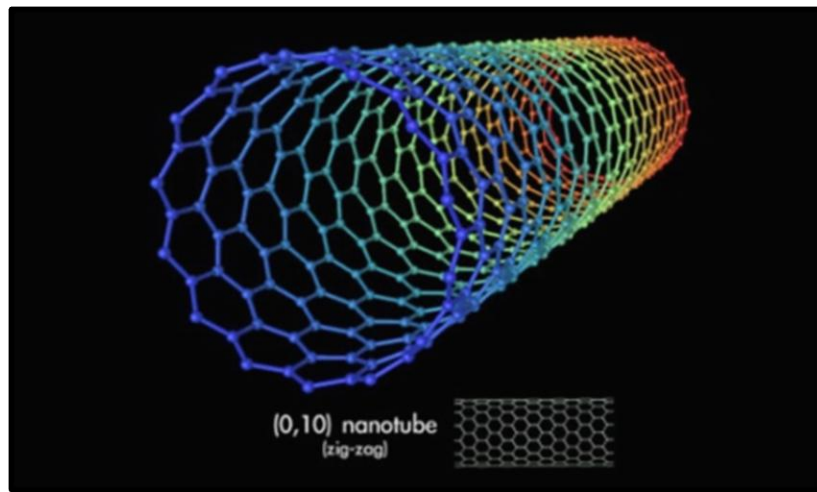


CONSEQUÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA ECM E MF - ARQUEOMETALURGIA



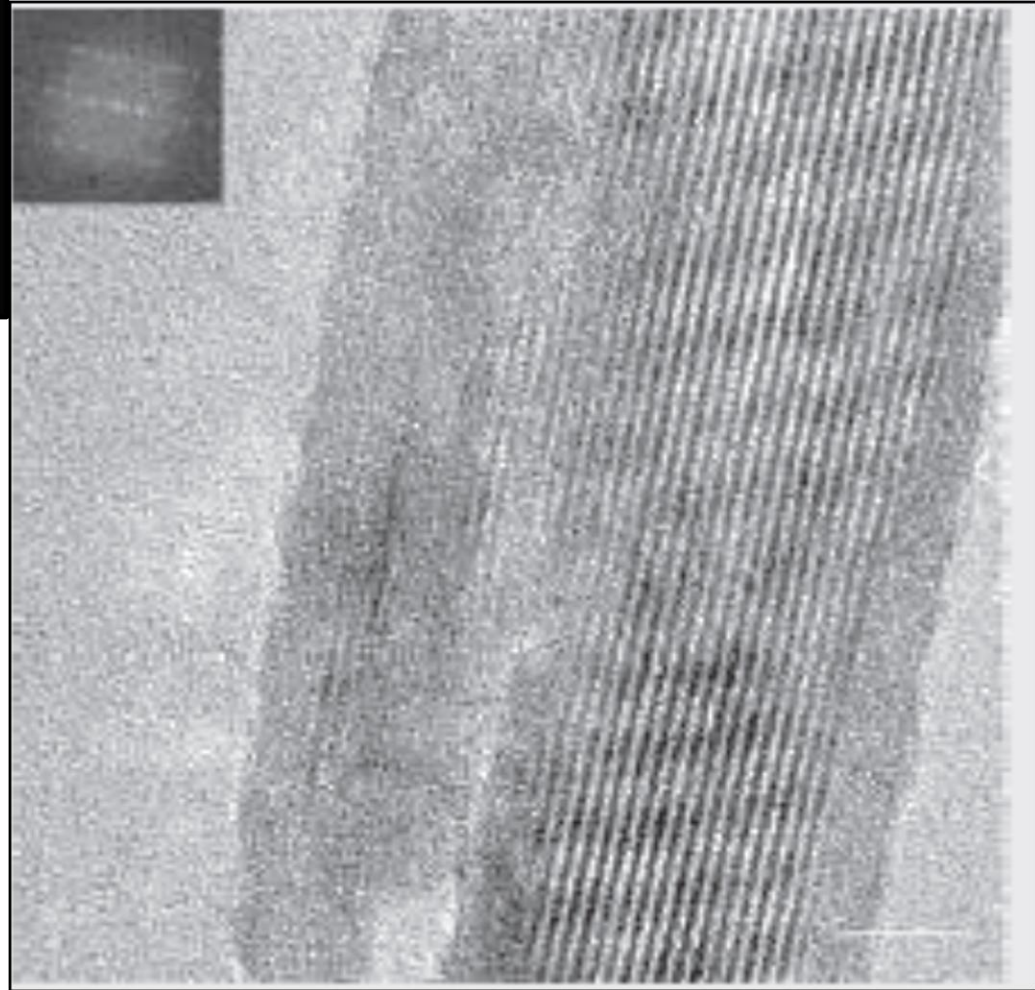
Figuras 4. Bandas de partículas de cementita (região escura) dentro de uma matriz ferrítica (região clara da figura).

CARBONETOS ALINHADOS EM MATRIZ PERLÍTICA.



CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**“Remnants of cementite
nanowires encapsulated
by carbon
Nanotubes”**



NATURE|Vol 444|16 November 2006

FIM