



PMT EP USP

Processamento de materiais metálicos: o caso dos aços para fins eletromagnéticos

Prof. Fernando JG Landgraf

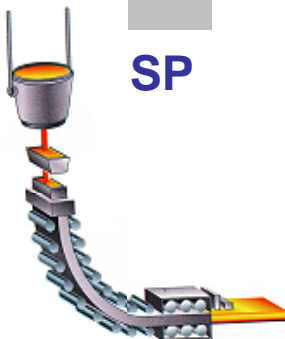


Processamento de aços elétricos
PMT 2200



Fluxo de Produção numa siderúrgica

PMT SP



Aciaria



Laminação a quente



Decapagem



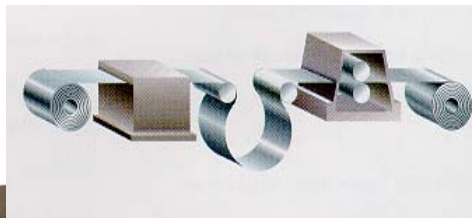
Laminação a frio



Recozimento Contínuo



Laminação de encruamento



Linha de inspeção e acabamento



**Processamento de aços elétricos
PMT 2200**

CSN

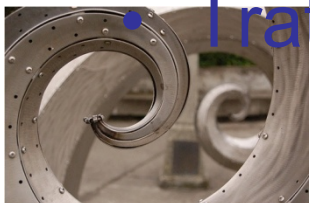




PMT EP USP

Técnicas de processamento de materiais metálicos

- Extração dos metais (físico-química)
 - Obter os metais a partir dos compostos naturais
- Fusão e refino da composição química (fis-quim)
 - Química: no metal líquido, eliminar impurezas e adicionar elementos de liga
- Solidificação (Transmissão de calor e metalurgia física)
 - : Forma final (fundição), intermediária (lingotamento)
- Conformação mecânica (mecânica e metalurgia física)
 - Laminação, forjamento, extrusão, sinterização
- Tratamento térmico (metalurgia física)



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Qual processo usar? Depende do produto

Exemplo: MOTORES ELÉTRICOS

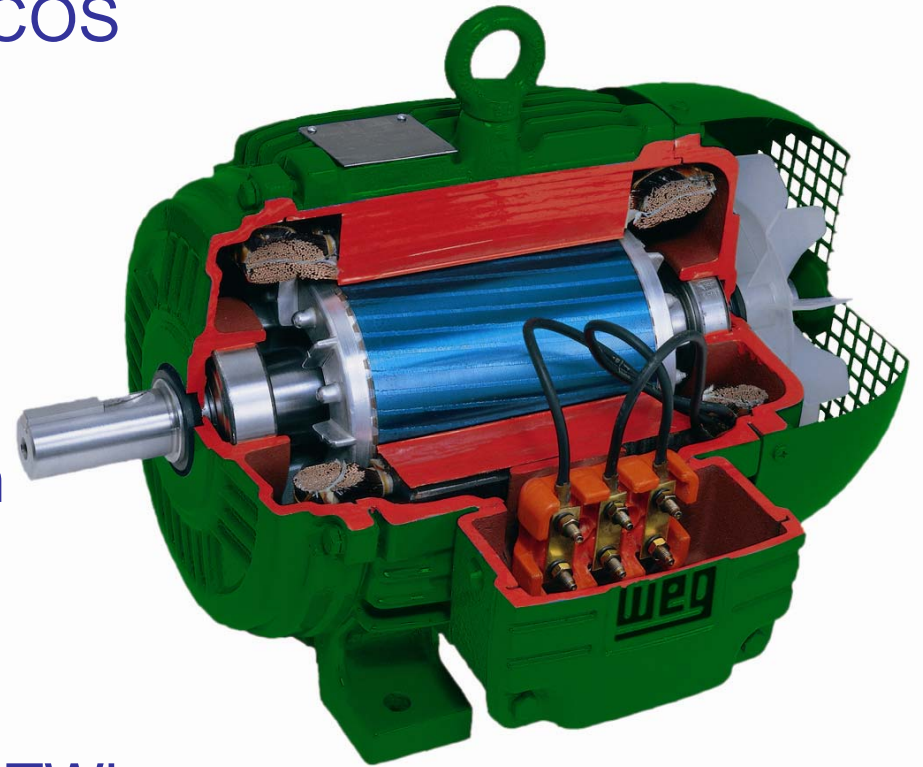
Anualmente, no Brasil:
50 milhões de
novos motores elétricos
(US 4 bilhões)

Consumo de energia: 150TWh

Referência: em 2006

PIB brasileiro: US 800 bilhões

Consumo energia elétrica 350 TWh



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

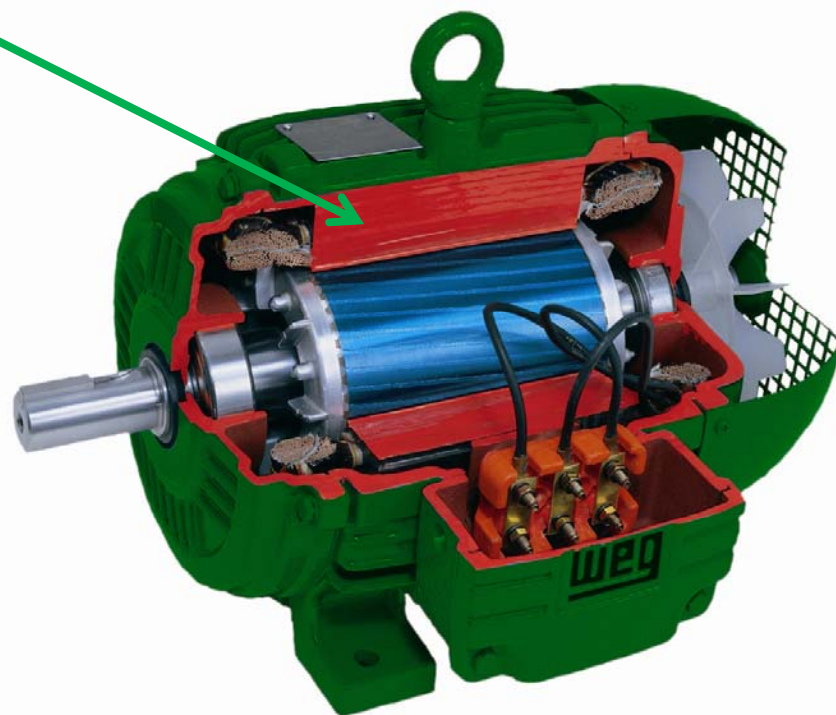
Aços para fins eletromagnéticos

Nicho de mercado:

- 1% do aço é consumido em motores.
- Apenas 0,1% do PIB

350.000 toneladas de aços
Por ano

Negócio de US 1 bilhão,
Cadeia produtiva de dezenas de empresas:
Siderúrgicas, corte, tratamento térmico, fabricantes de motores



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



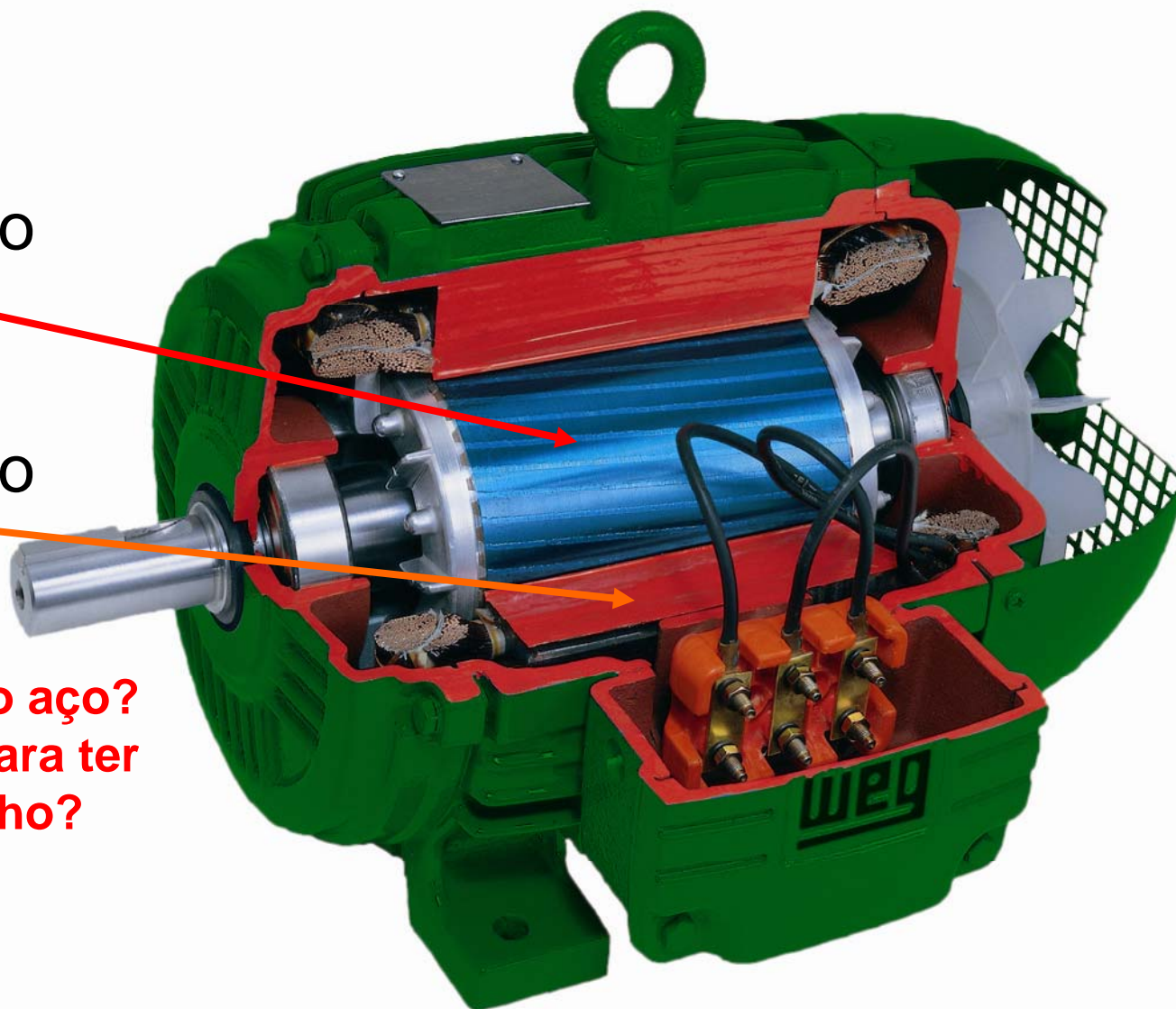
PMT EP USP

Aços para fins eletromagnéticos

Chapas de aço
No rotor

Chapas de aço
no estator

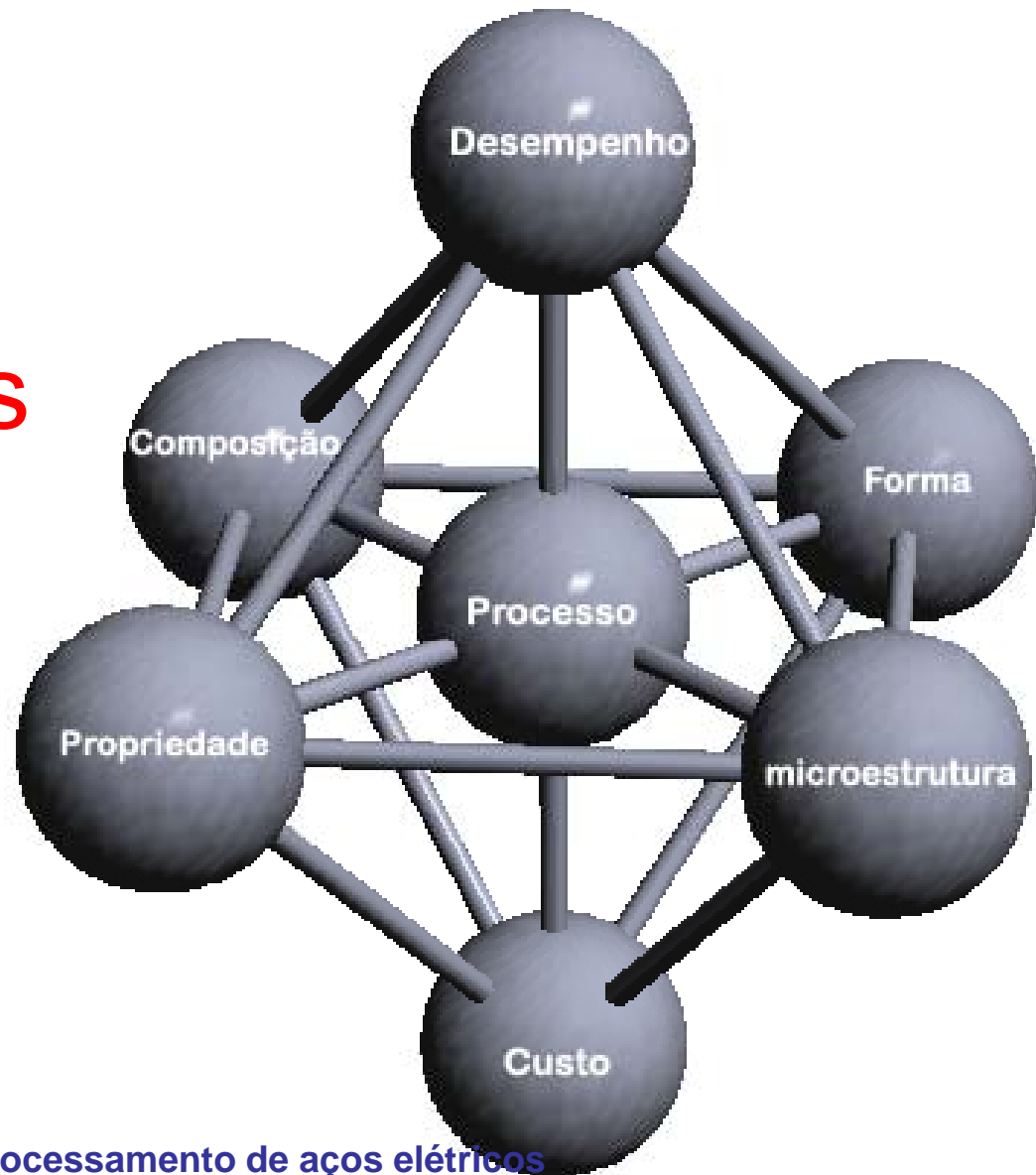
**Como selecionar o aço?
Como fabricá-lo para ter
melhor desempenho?**





PMT EP USP

Octaedro da engenharia dos materiais



Processamento de aços elétricos
PMT 2200

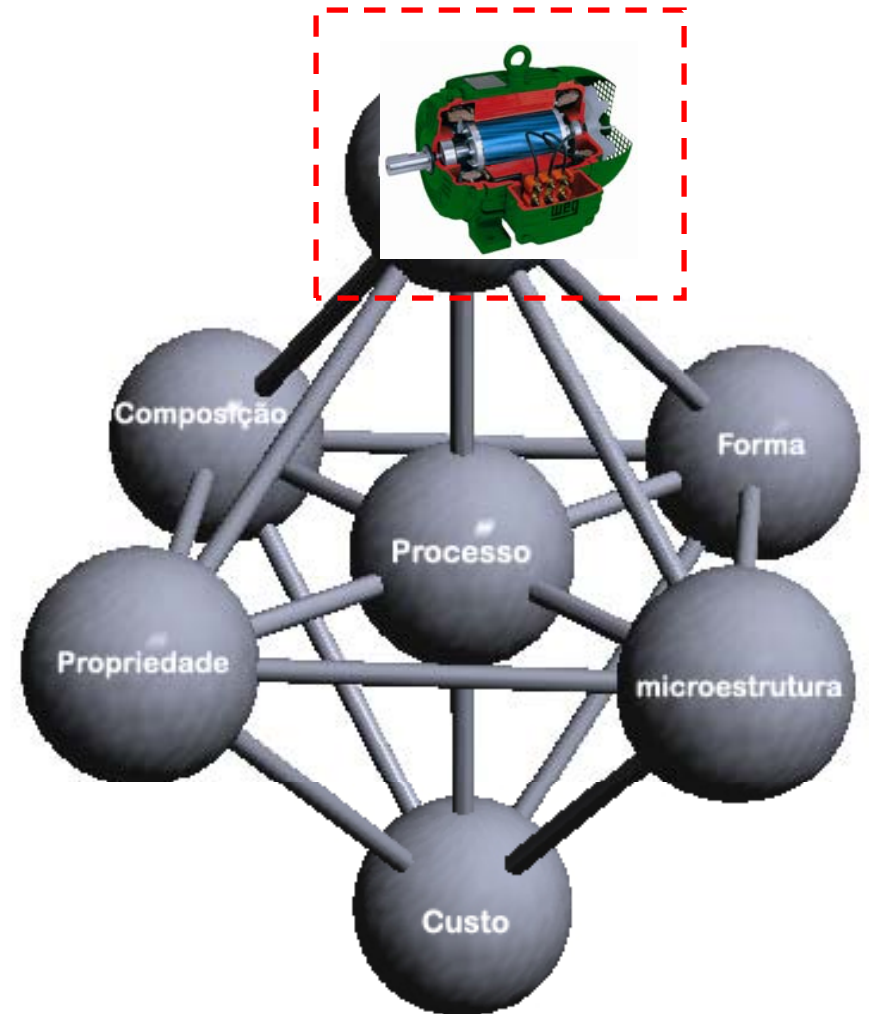


PMT EP USP

Desempenho

Definir o que é o desempenho desejado do motor:

- Produzir torque com o menor tamanho possível
(hoje 20 kNm/m^3)
- Consumir a menor energia possível
(rendimento energético entre 80 e 95%)



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Propriedades

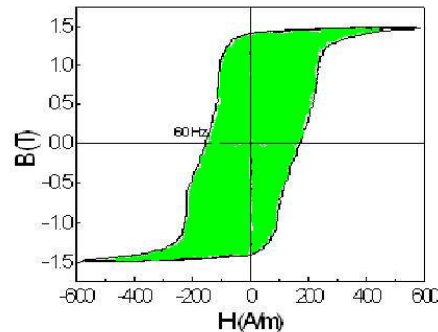
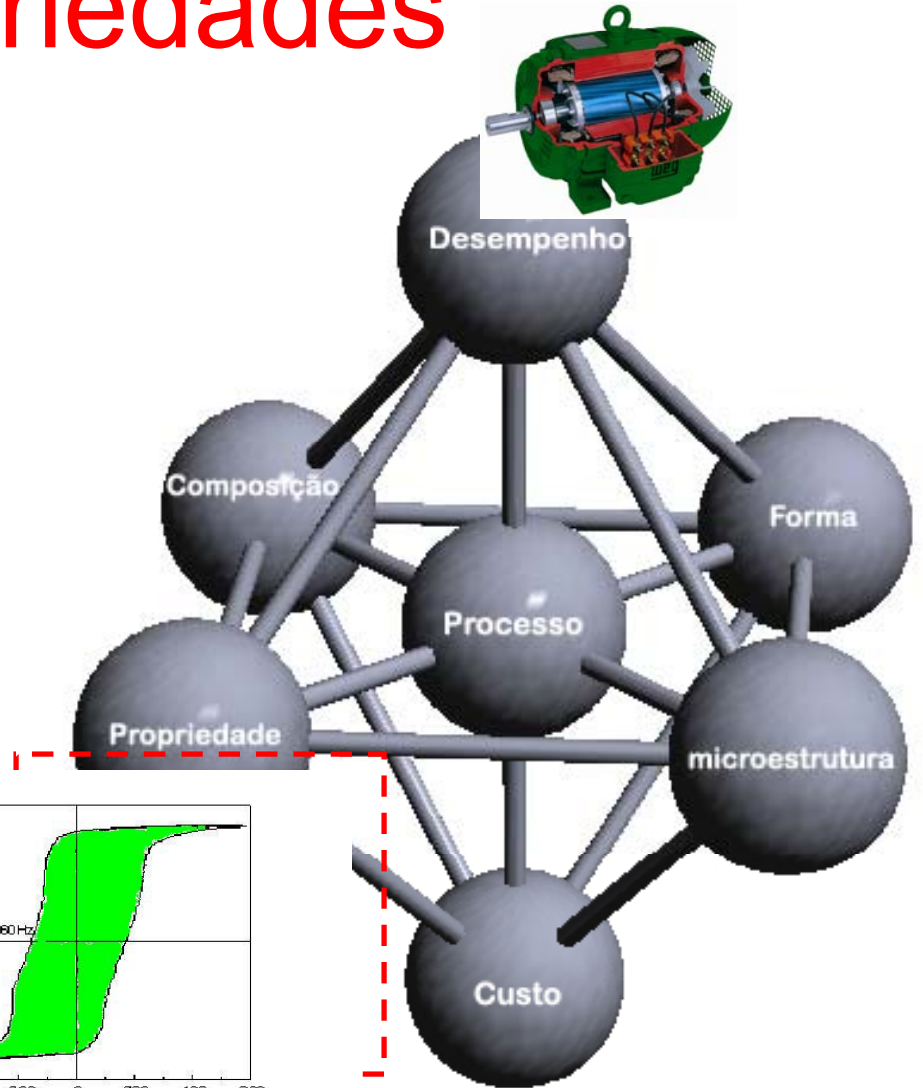
Propriedades:

Torque depende do fluxo magnético no entreferro,
Que depende da permeabilidade magnética do aço

$$(\mu_r^{1,5T} > 2000)$$

• Energia é dissipada na histerese magnética.

$$(P_T^{1,5T} < 5W/kg)$$



Processamento de aços elétricos
PMT 2200

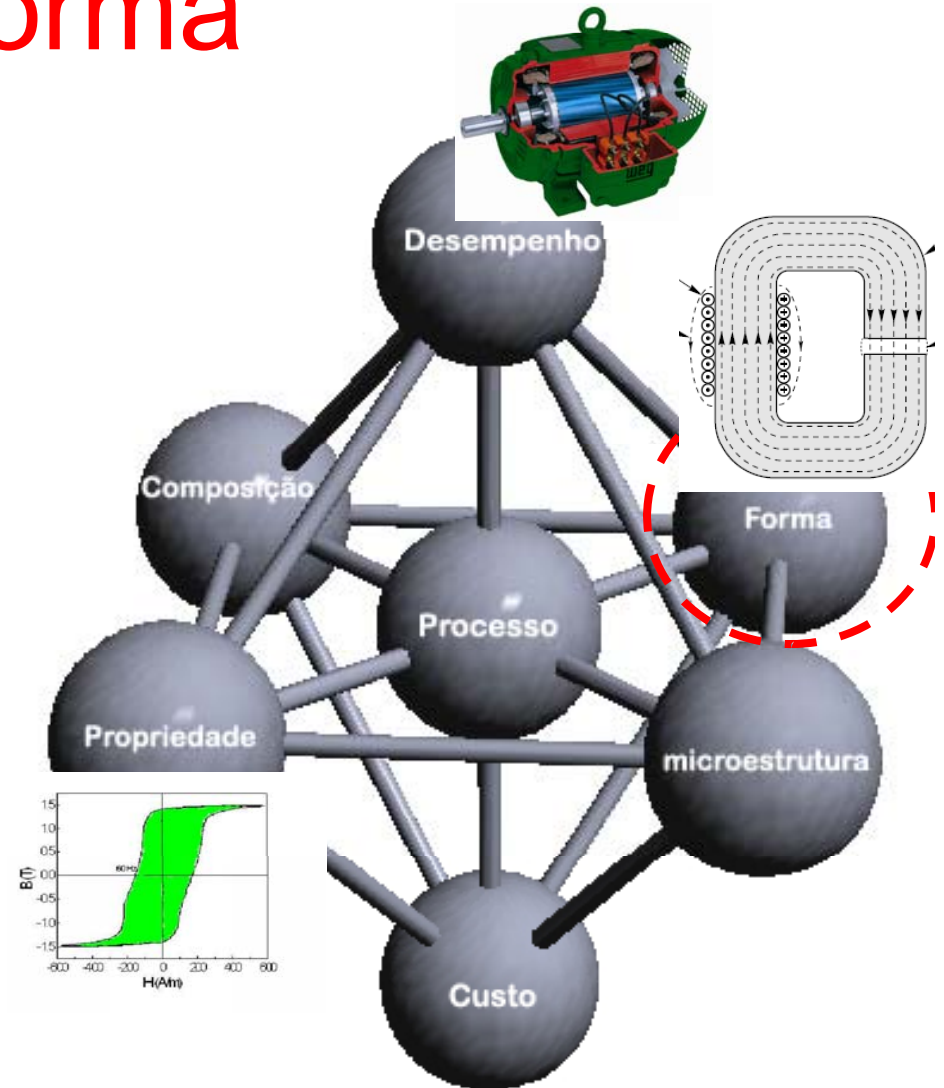


PMT EP USP

Forma:

O campo necessário para magnetização depende dos entreferros existentes no circuito magnético

Forma



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



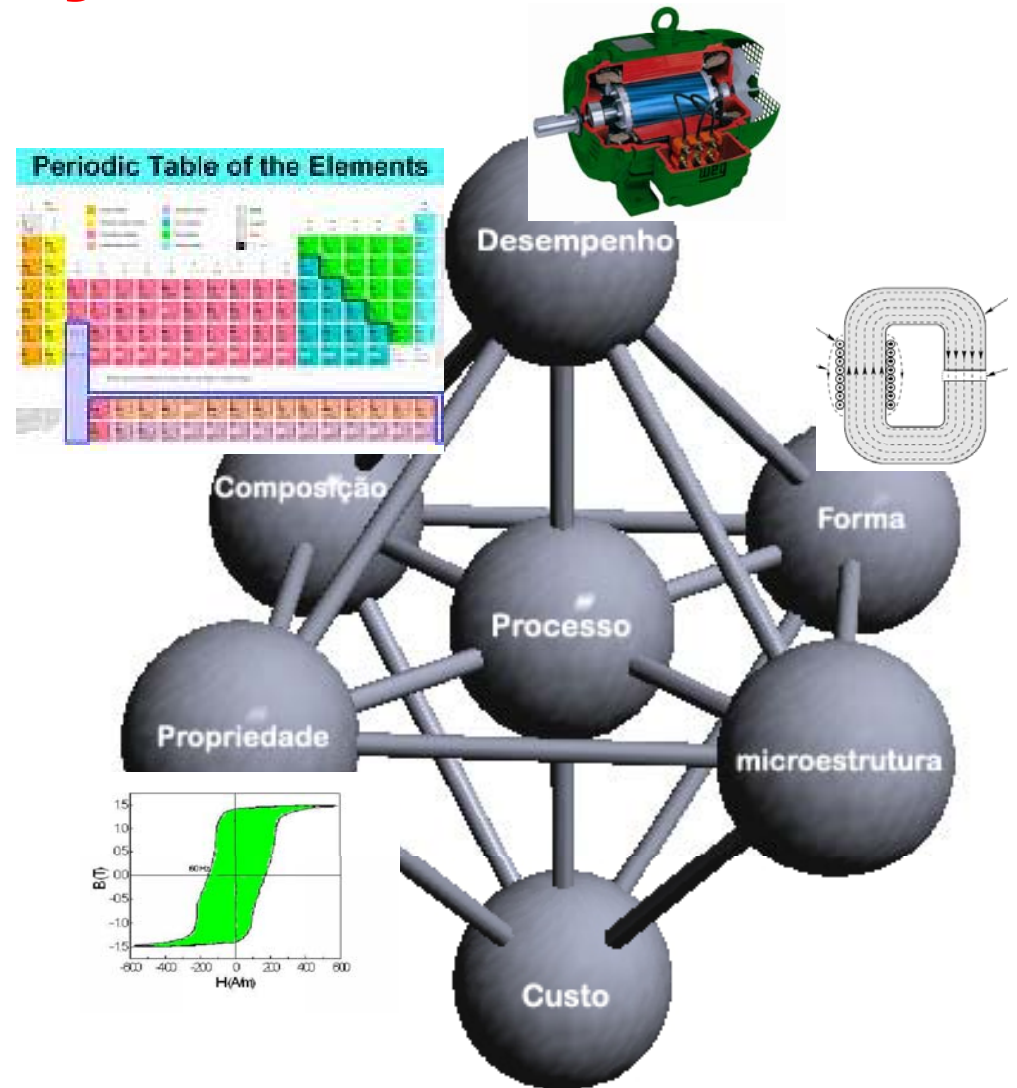
PMT EP USP

Composição Química

Tem que ter ferro, para ser ferromagnético

Não pode ter carbono, nem S, nem N, que aumentam a histerese

Deve ter silício, que reduz a histerese a 60Hz



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Microestrutura

Microestrutura ideal:

Monofásica

só grãos CCC

Tamanho de grão grande

TG \approx 150 μ m

“limpo”

reduzir sulfetos e óxidos

S<0,001% O<0,002%

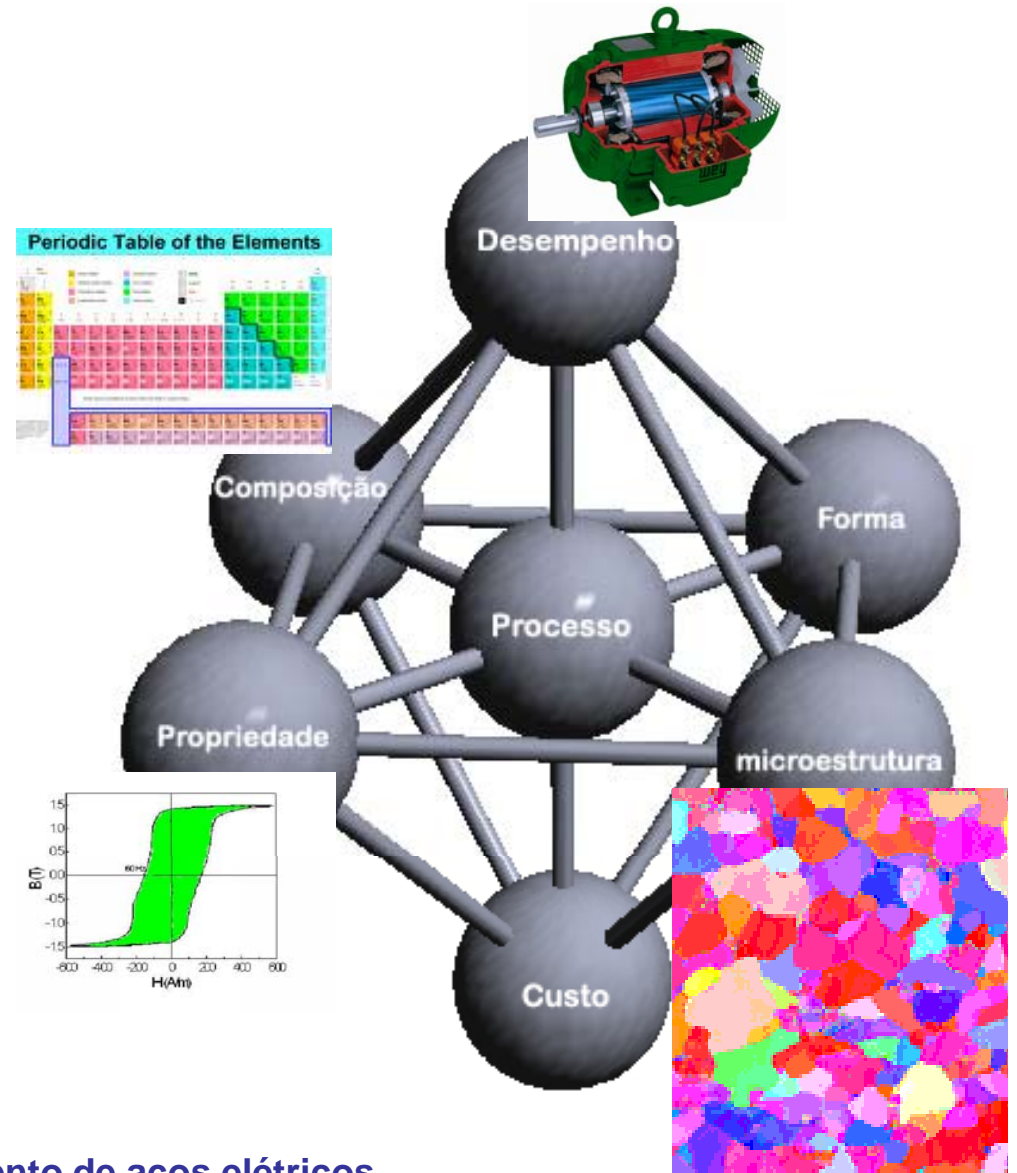
Sem tensões mecânicas

discordâncias < 10⁸cm/cm³

Controle da orientação dos cristais



Ideal (001)<uvw>



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Processamento

Refino do metal líquido

remoção do S e O

Lingotamento

produz placa de 250 x 1200 x Z mm

Laminação a quente

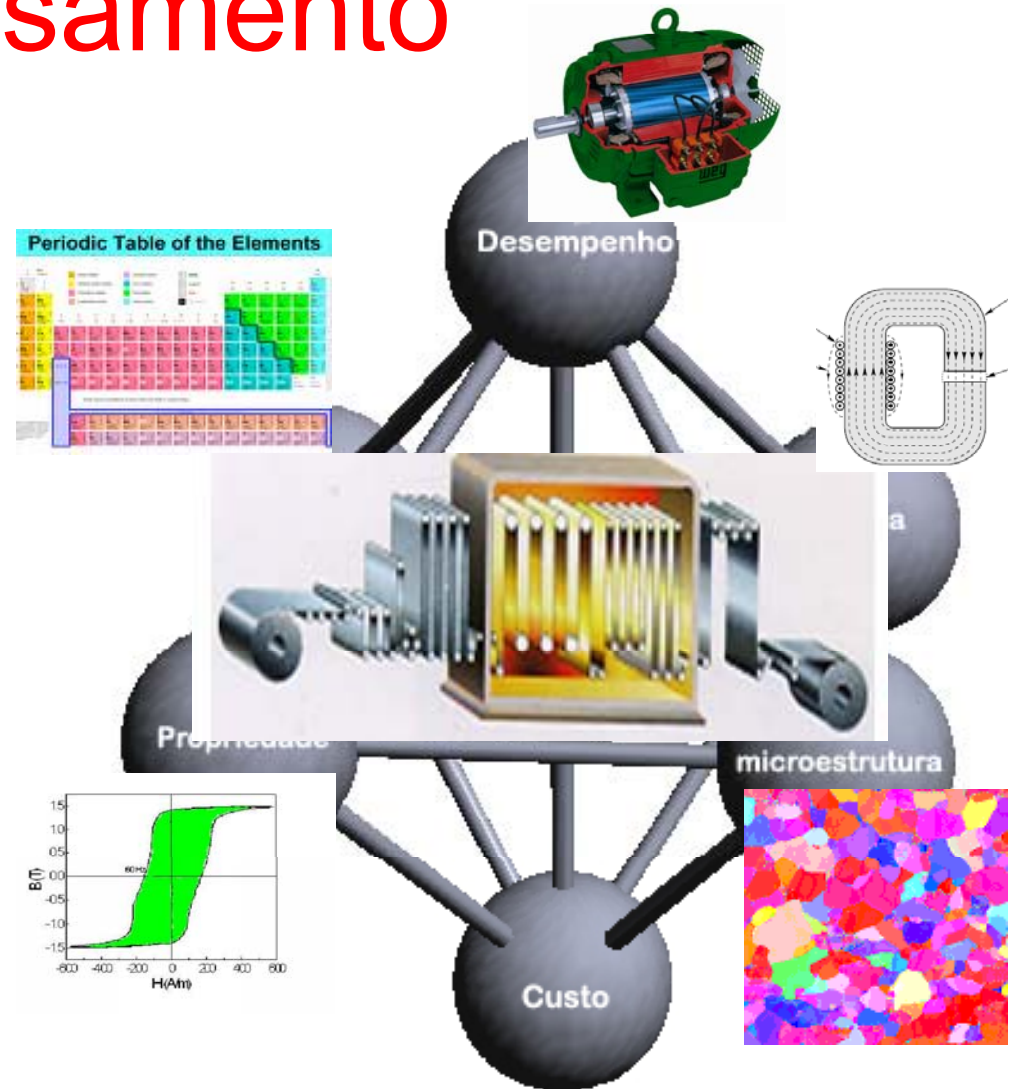
diminui espessura para 2mm

Laminação a frio

diminui espessura para 0,5mm

Recozimento final

TG de 150 μ m



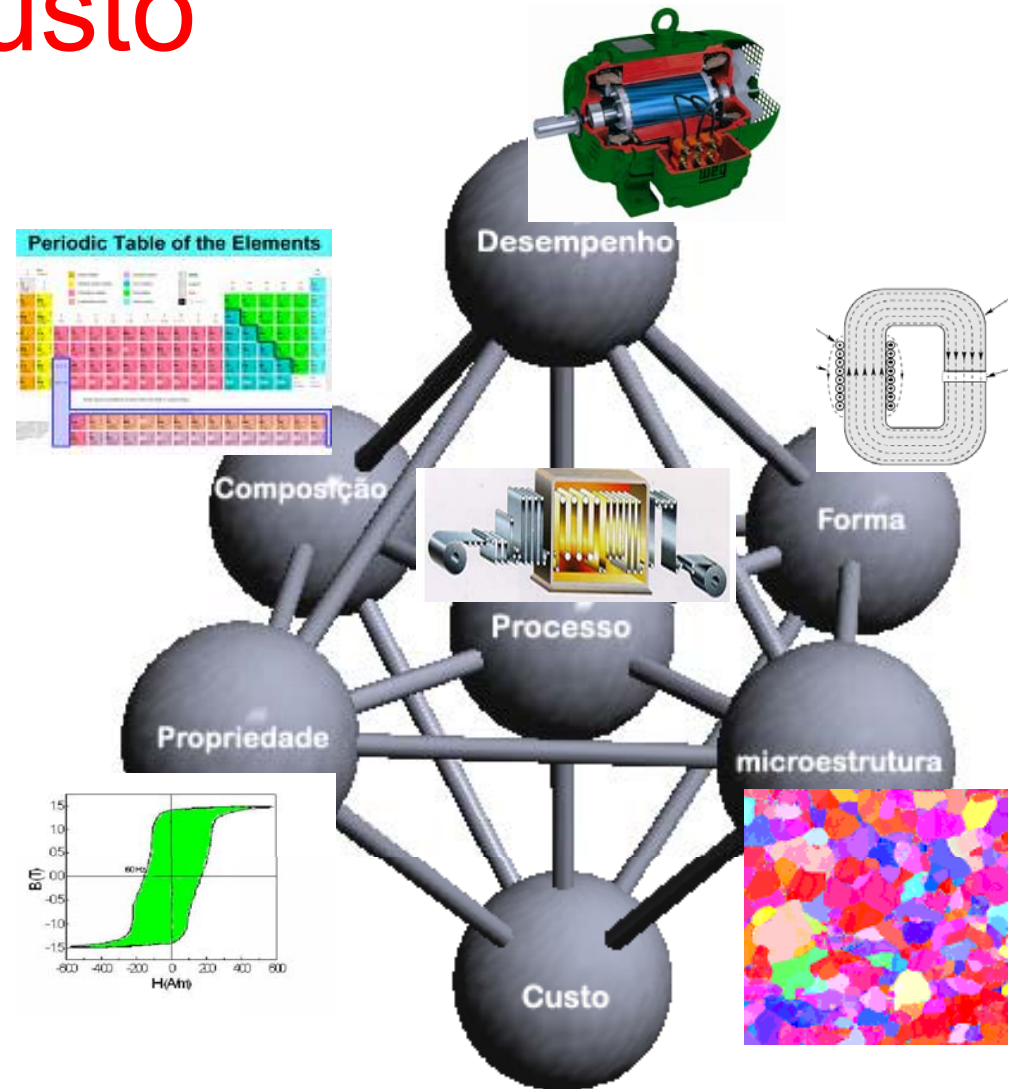
Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

- Custo do aço chega a 30% do custo do motor.
- Custo dos aços elétricos é mais alto.
- Fios de cobre também são importantes itens de custo.
- Por exemplo, é possível obter mesmo desempenho variando aço e cobre, para reduzir custo

Custo



Processamento de aços elétricos
PMT 2200

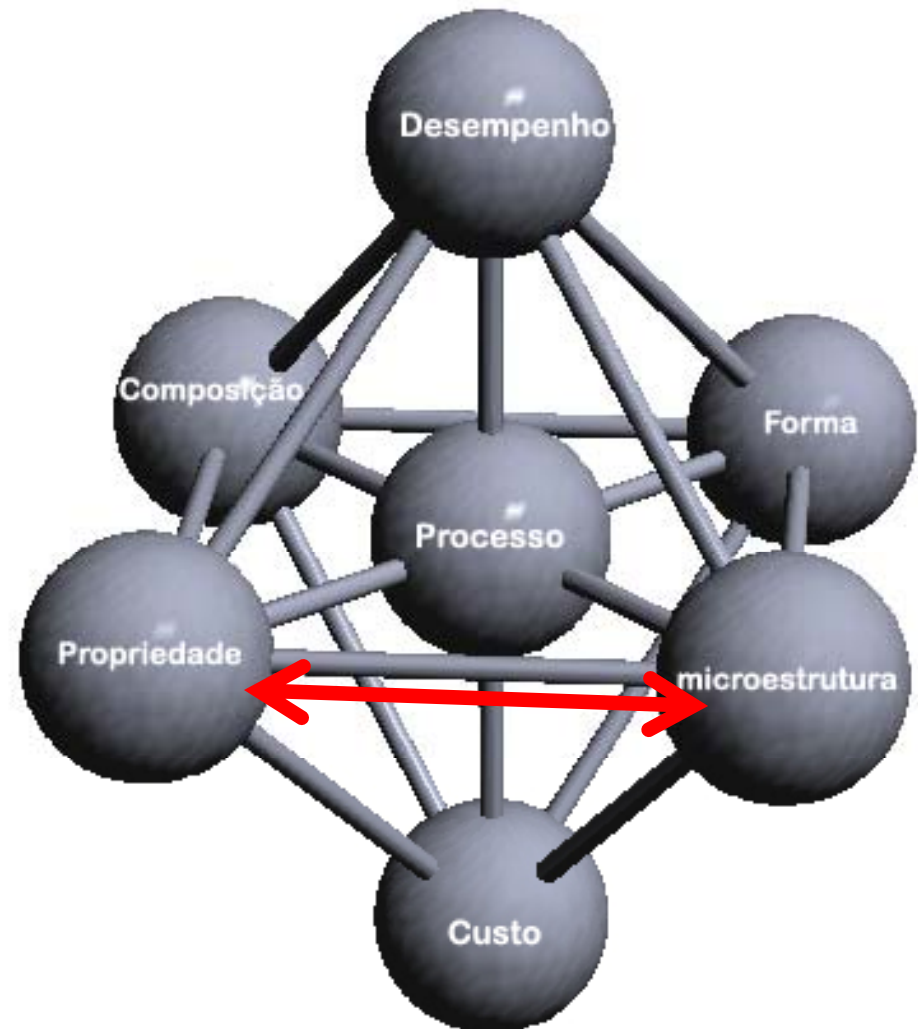


PMT EP USP

Relação estrutura propriedade

Focalizaremos a relação
entre

- Permeabilidade magnética
- e
- textura cristalográfica



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



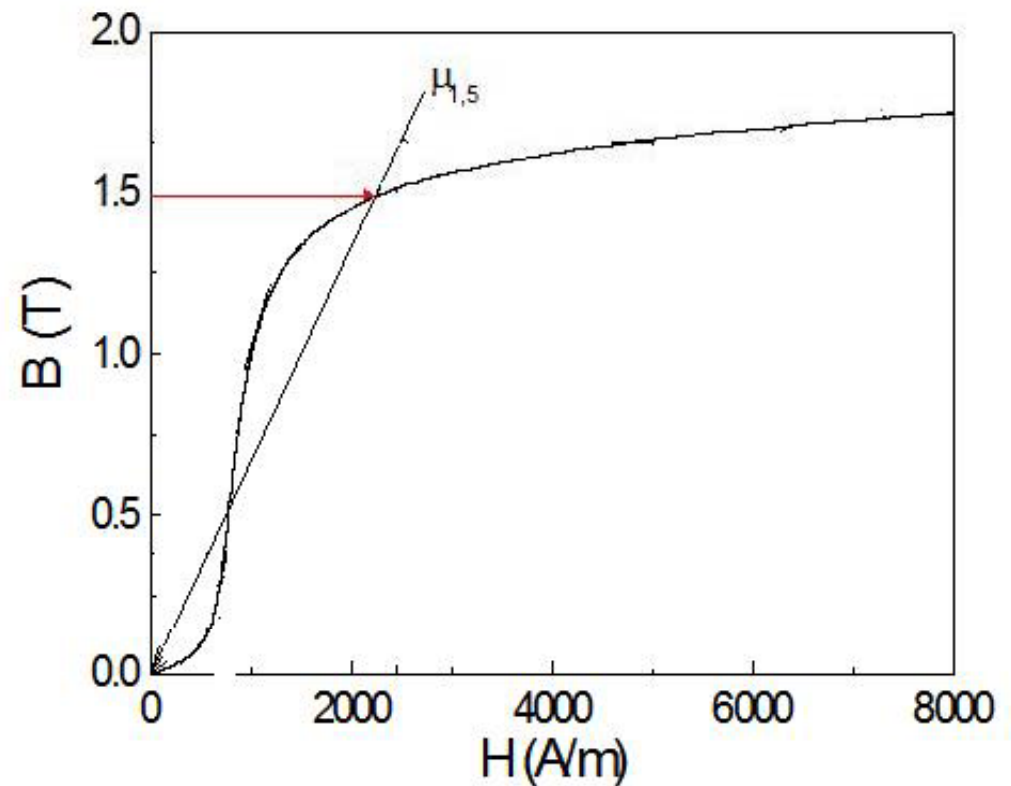
PMT EP USP

Permeabilidade magnética

Quantifica o formato da curva
Mede o poder do material
Para amplificar
o campo

$$\mu_r \equiv \frac{B}{\mu_o H}$$

$\mu_{1,5}$ perm. a 1,5T

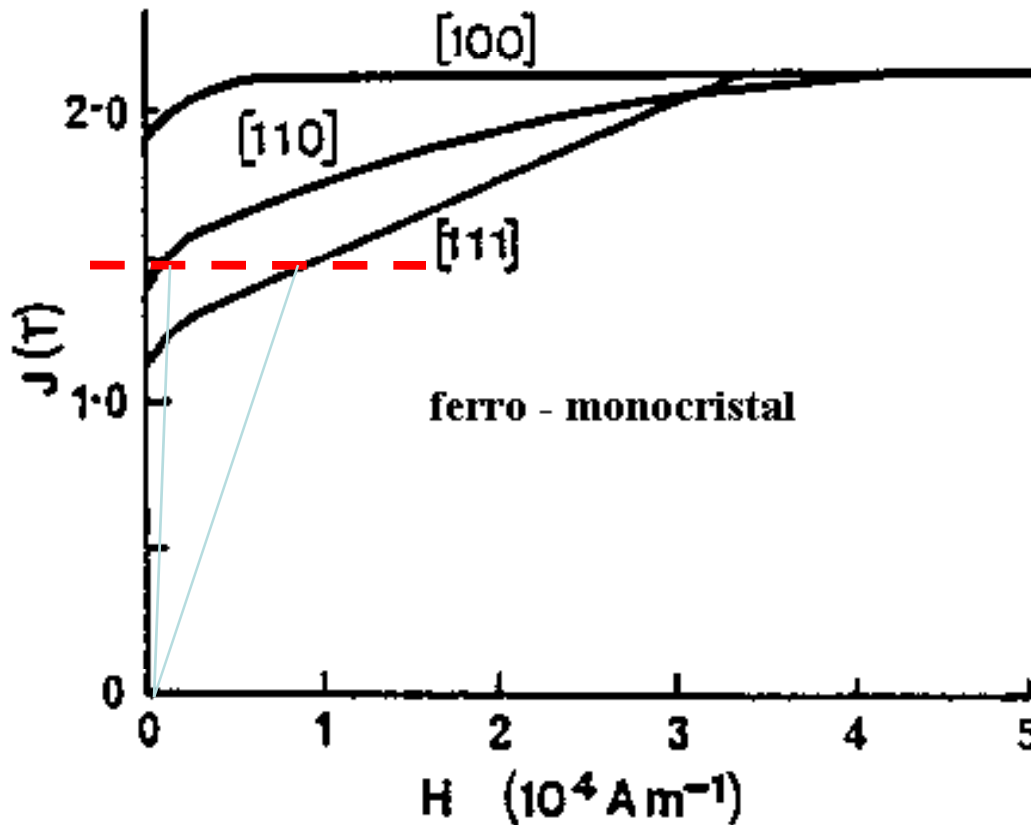


Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Anisotropia Magnética



Permabilidade a 1,5T
Será maior na direção [100]
Do que nas outras



No Fe, é muito mais fácil magnetizar nas direções $\langle 100 \rangle$

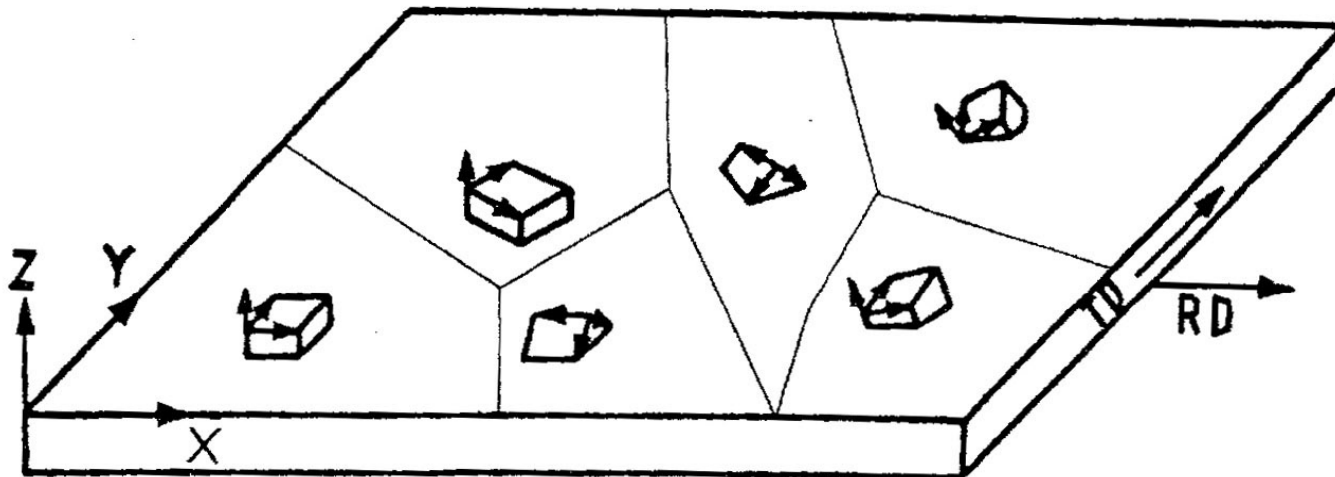
Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Aço é policristalino e tem textura

- Cada grão tem uma orientação, cada grão terá permeabilidade diferente.
- Permeabilidade média será a média das permeabilidades dos grãos
- Dependerá de quantos grãos tem direção $\langle 100 \rangle //$ direção de aplicação do campo.



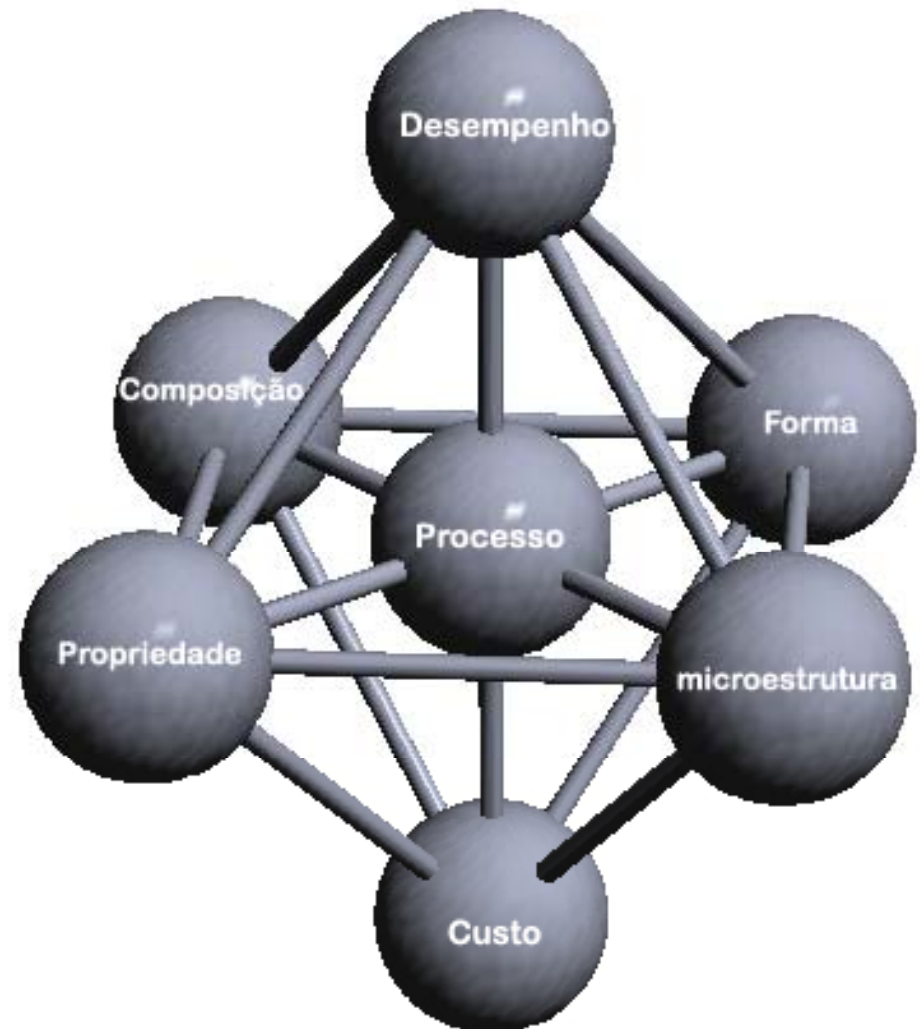


PMT EP USP

Relação estrutura propriedade

Se quero alta
Permeabilidade magnética
Preciso de
textura cristalográfica
Com muitos grãos com
direção $\langle 100 \rangle //$ campo

É comum ter campo $//$
direção de laminação

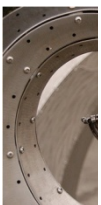
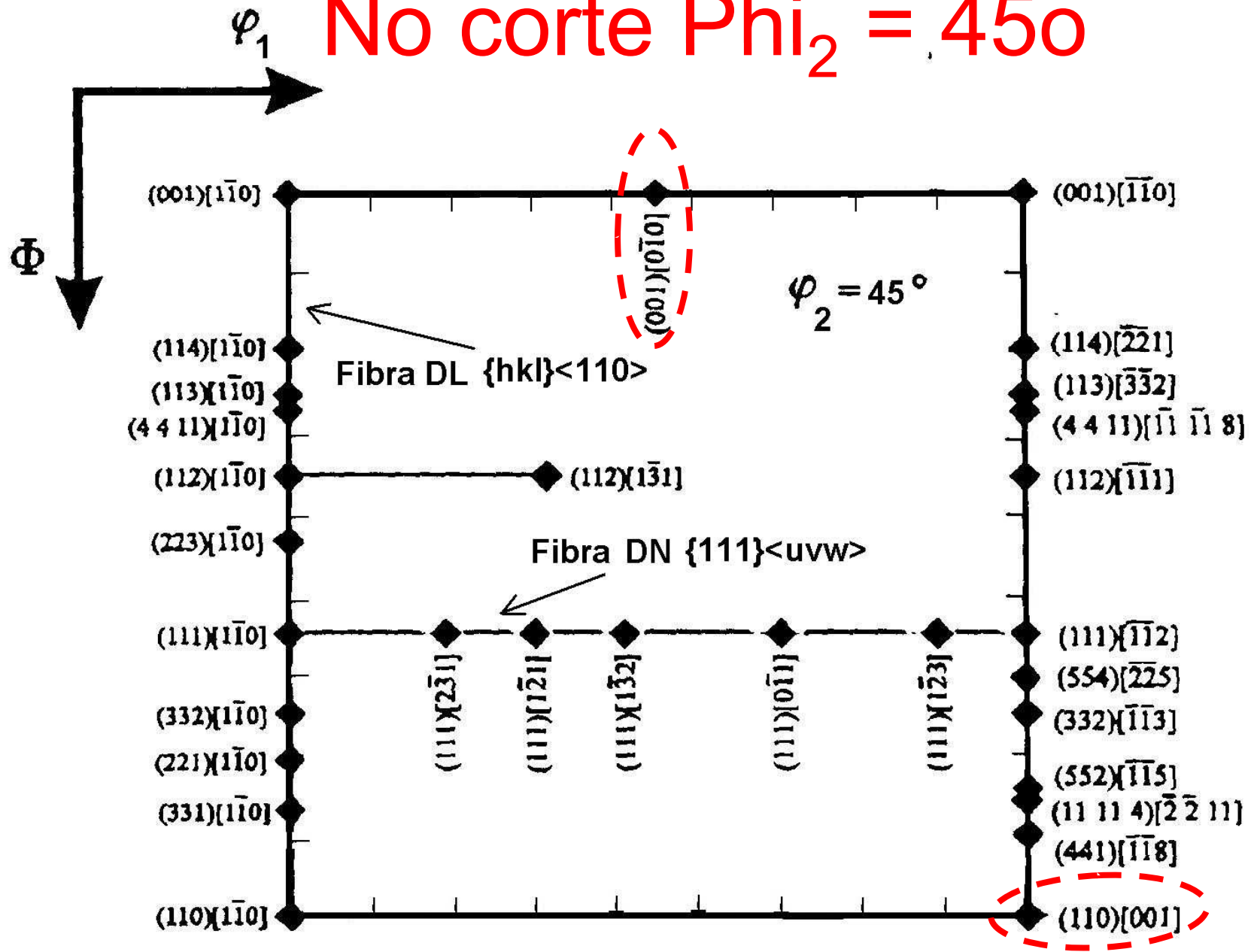


Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PM

No corte $\Phi_2 = 45^\circ$

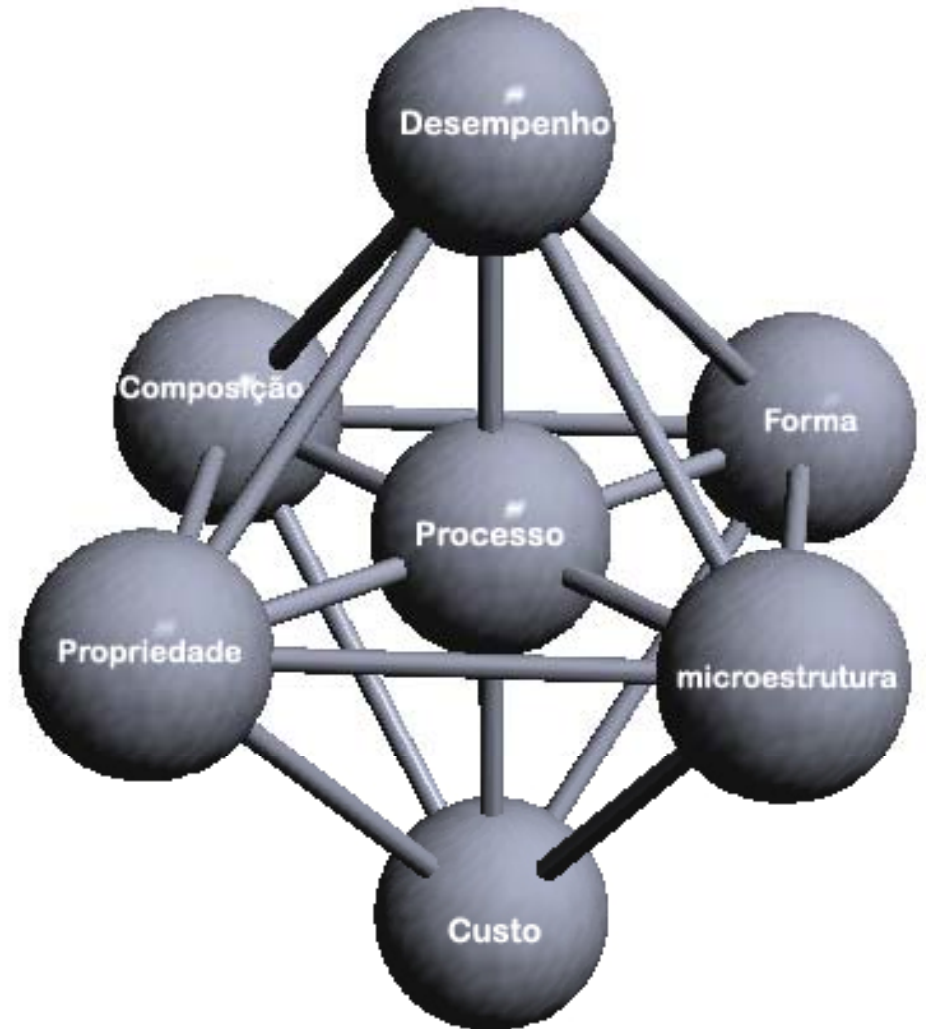




PMT EP USP

Relação processo-estrutura

Como fazer para ter
muitos grãos com
Direção [100]//DL?

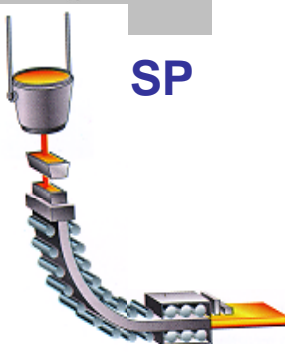


Processamento de aços elétricos
PMT 2200

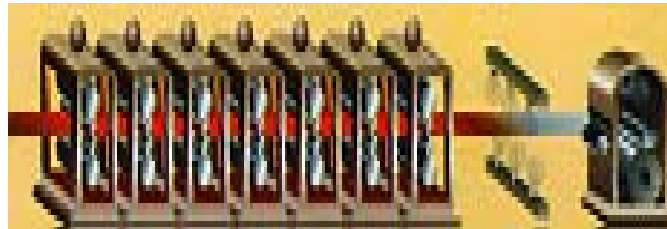


Controlando a laminação e a recristalização

PMT SP



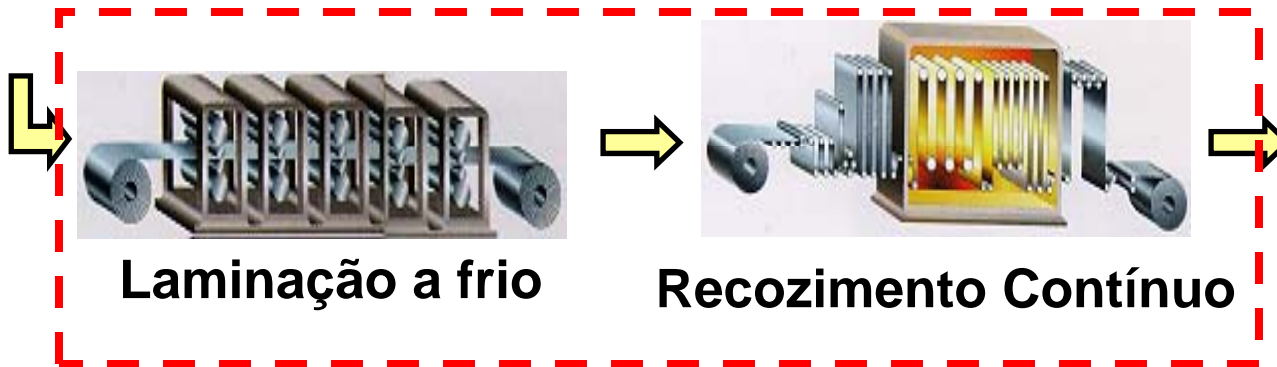
Aciação



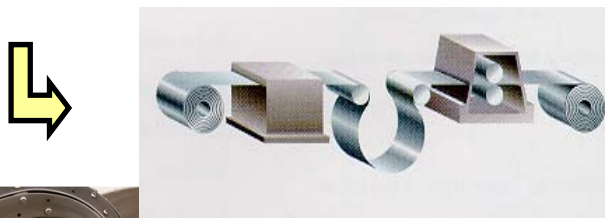
Laminação a quente



Decapagem



Laminação de encruamento



Linha de inspeção e acabamento



Processamento de aços elétricos
PMT 2200

CSN





PMT EP USP

Laminação



Laminação a frio

Aço entra com 2mm de espessura e sai com 0,5mm,
após passar em cinco cadeiras de laminação.

É necessário planejar a redução de espessura em cada “passe”,
Para não forçar excessivamente as “cadeiras”



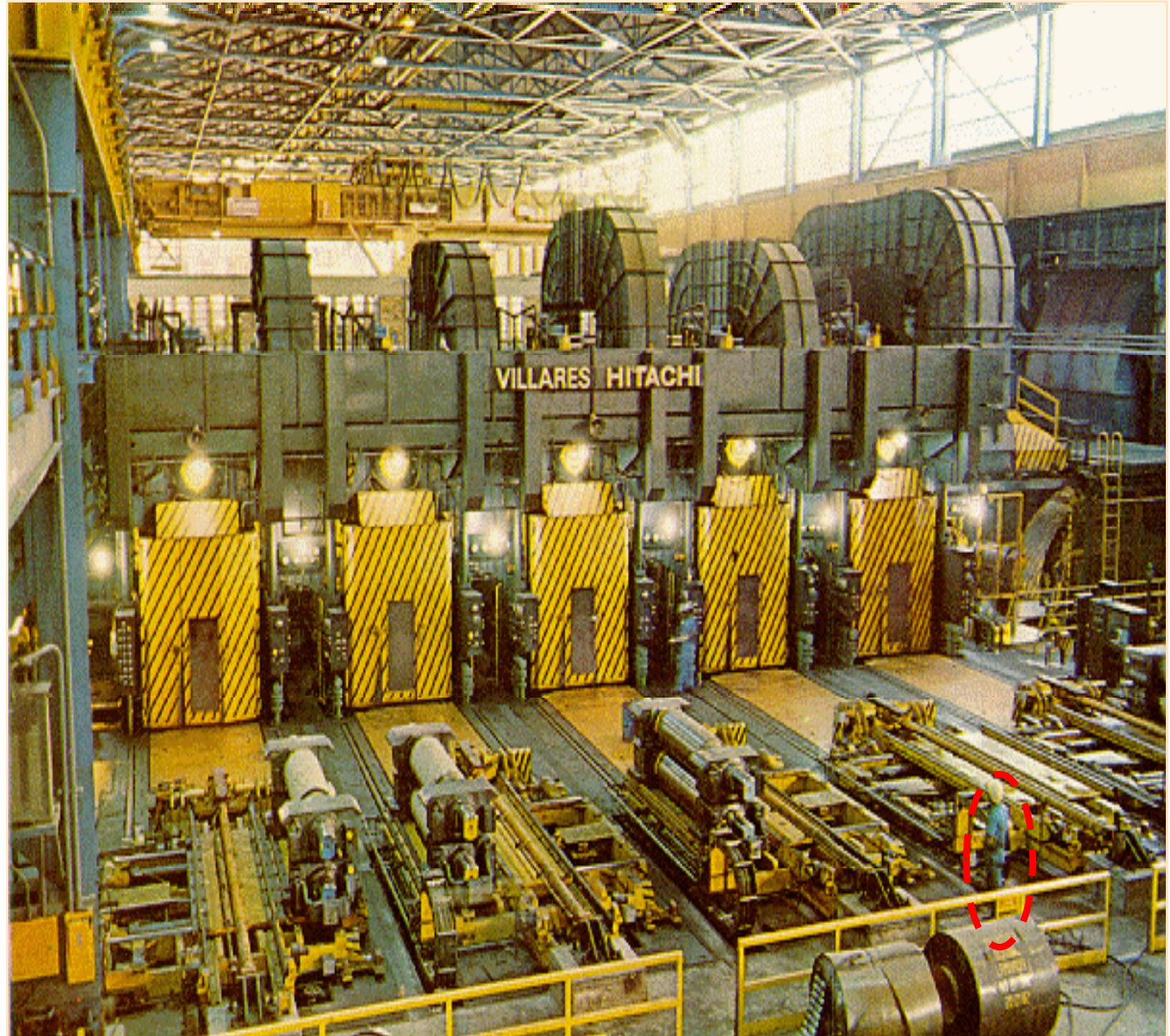
Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

CSN

LAMINAÇÃO A FRIO

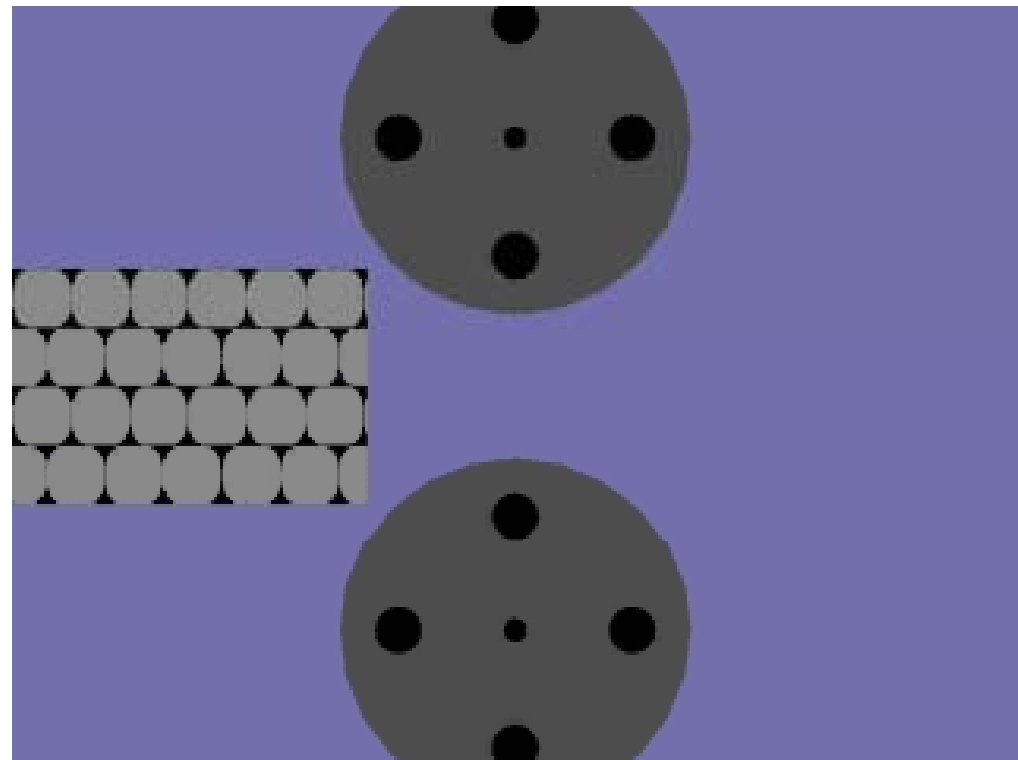




PMT EP USP

A laminação deforma os grãos

- O que acontece dentro do material quando se deforma?



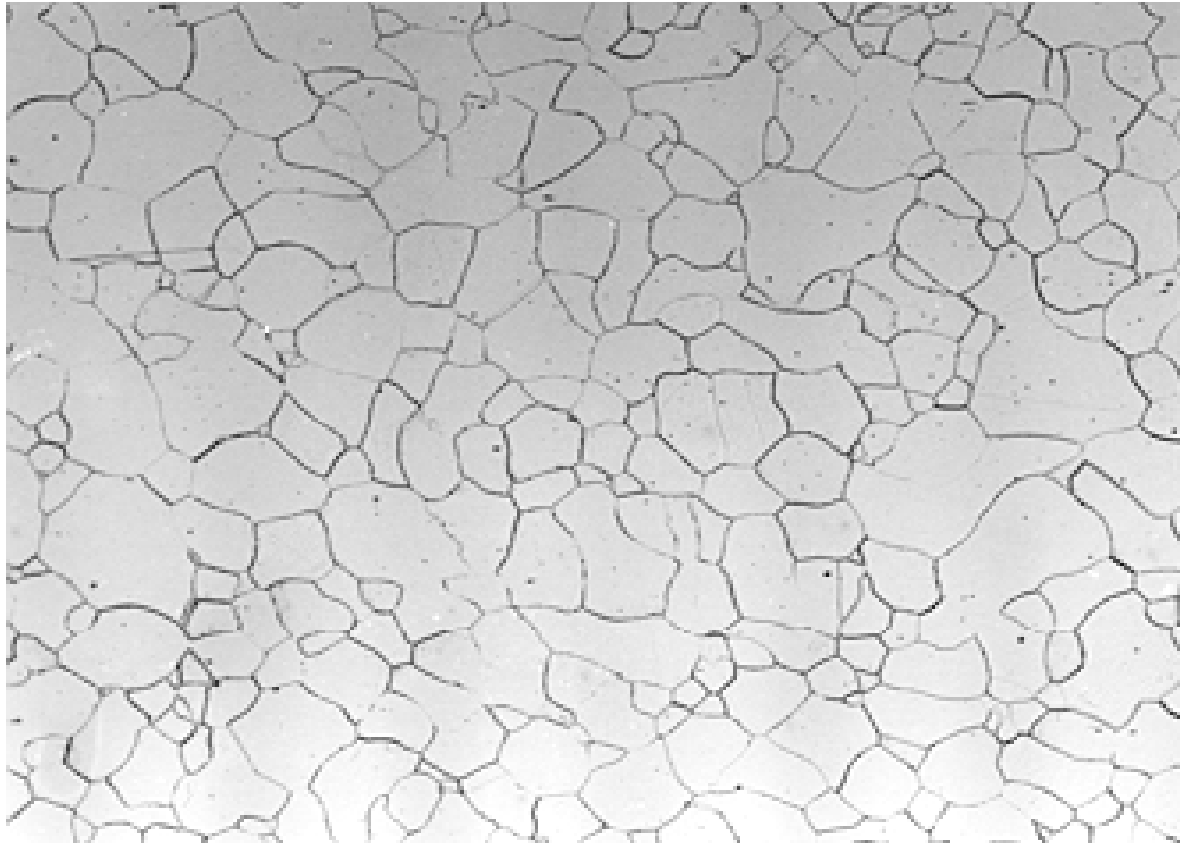
Processamento de aços elétricos
PMT 2200



Deformação plástica e microestrutura

PMT EP USP

10 % de alongamento



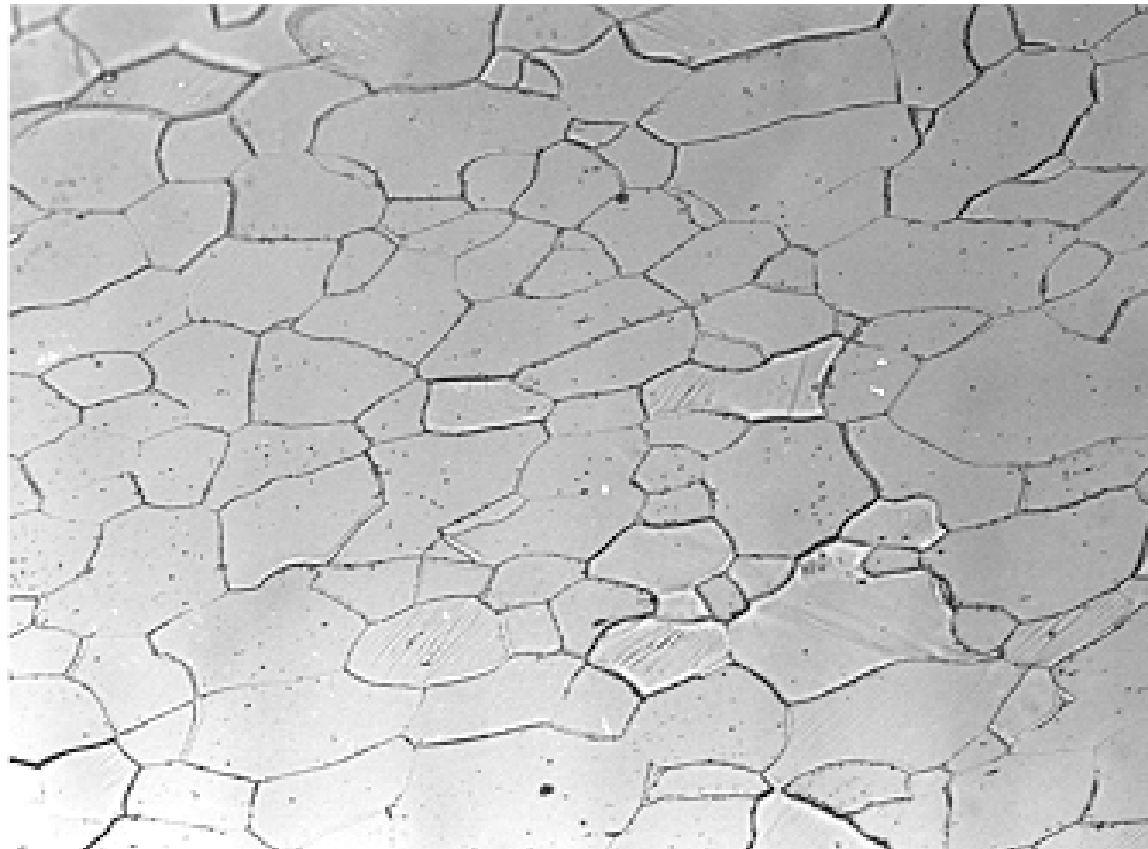
Processamento de aços elétricos
PMT 2200



Deformação plástica e microestrutura

PMT EP USP

20 % de alongamento



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



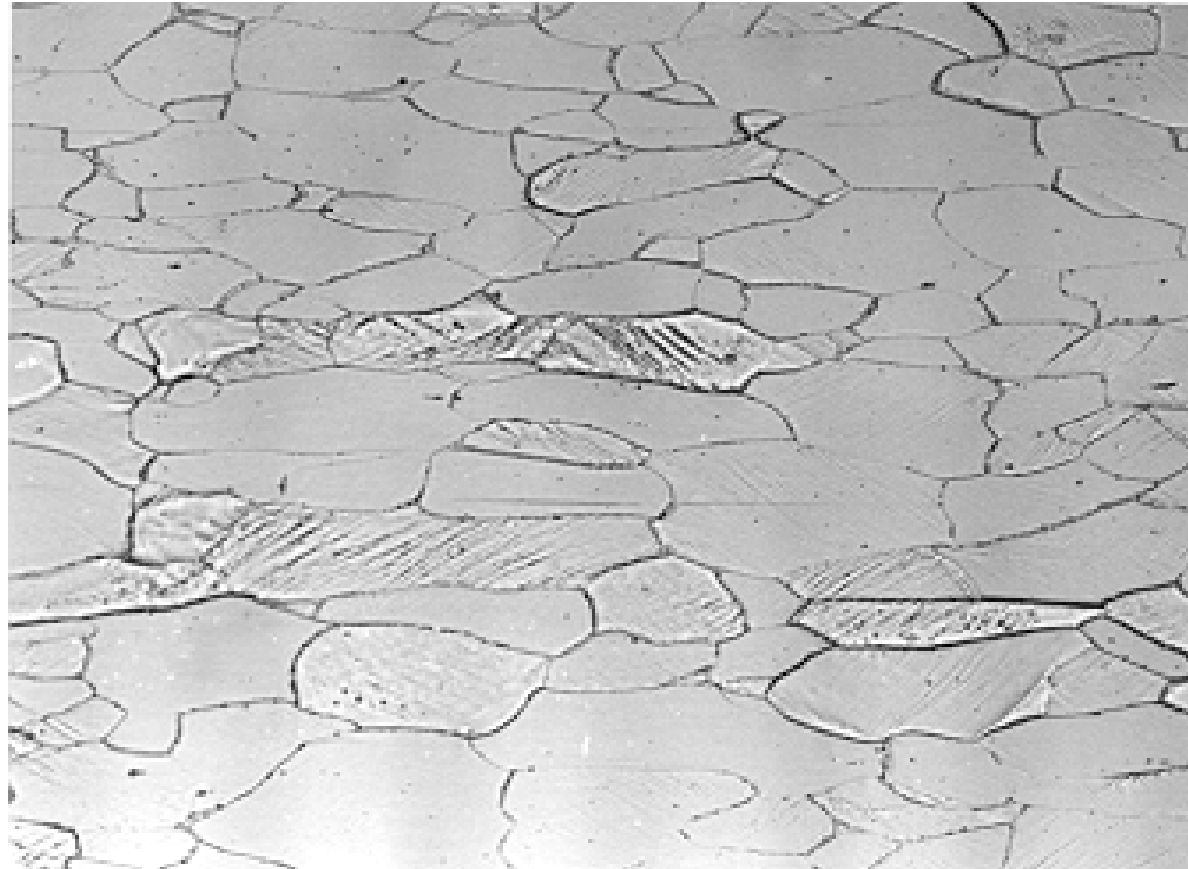
Deformação plástica e microestrutura

PMT EP USP

50 % de alongamento

Muitas discordâncias (é necessário "recozer")

Regiões dos grãos
Giram para orientações diferentes:
textura muda

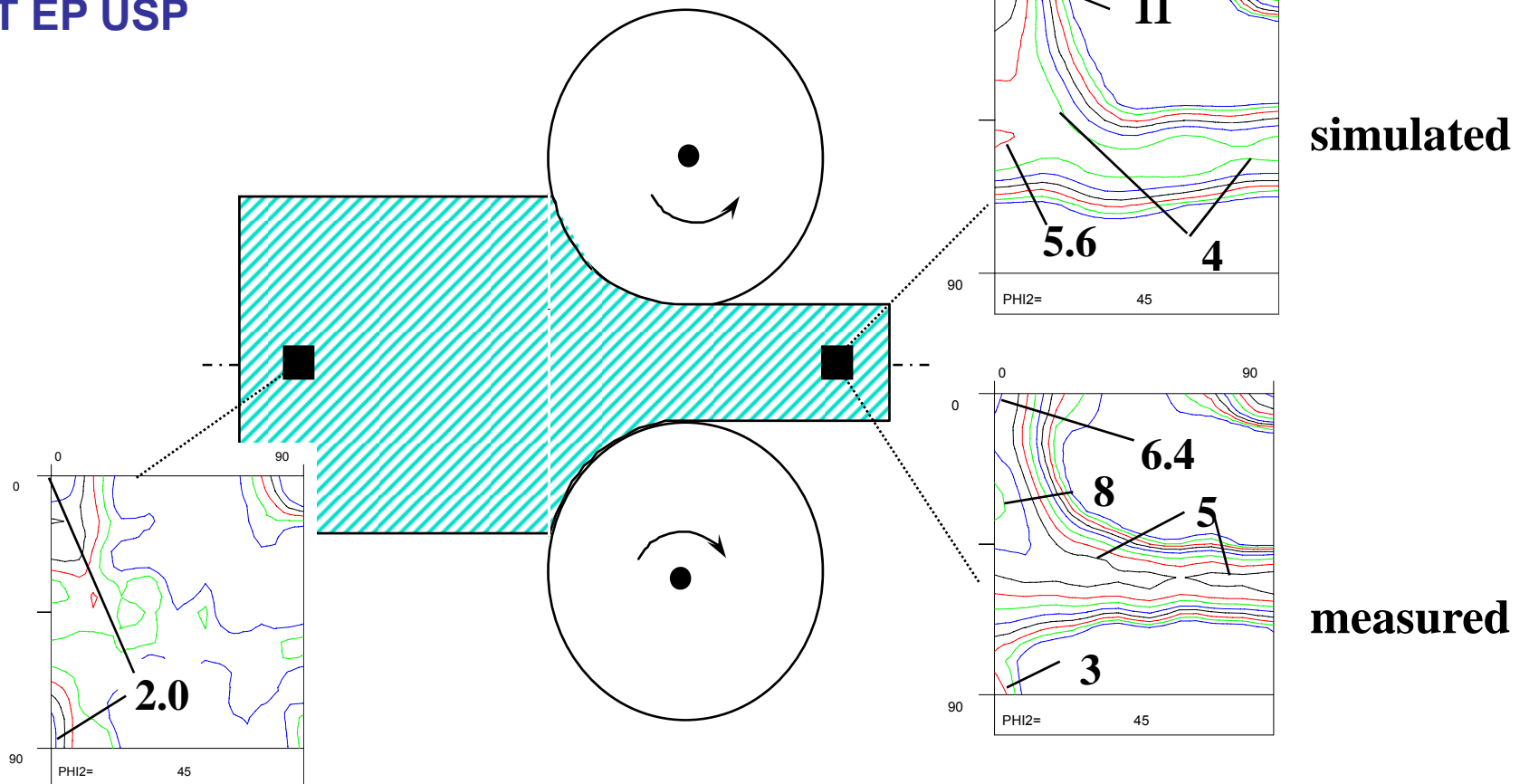


Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Simulação matemática descreve bem a textura do aço laminado



Textura antes da laminação

Textura do material laminado

Processamento de aços elétricos
PMT 2200

Leo Kestens,
Un. Gent, Bélgica

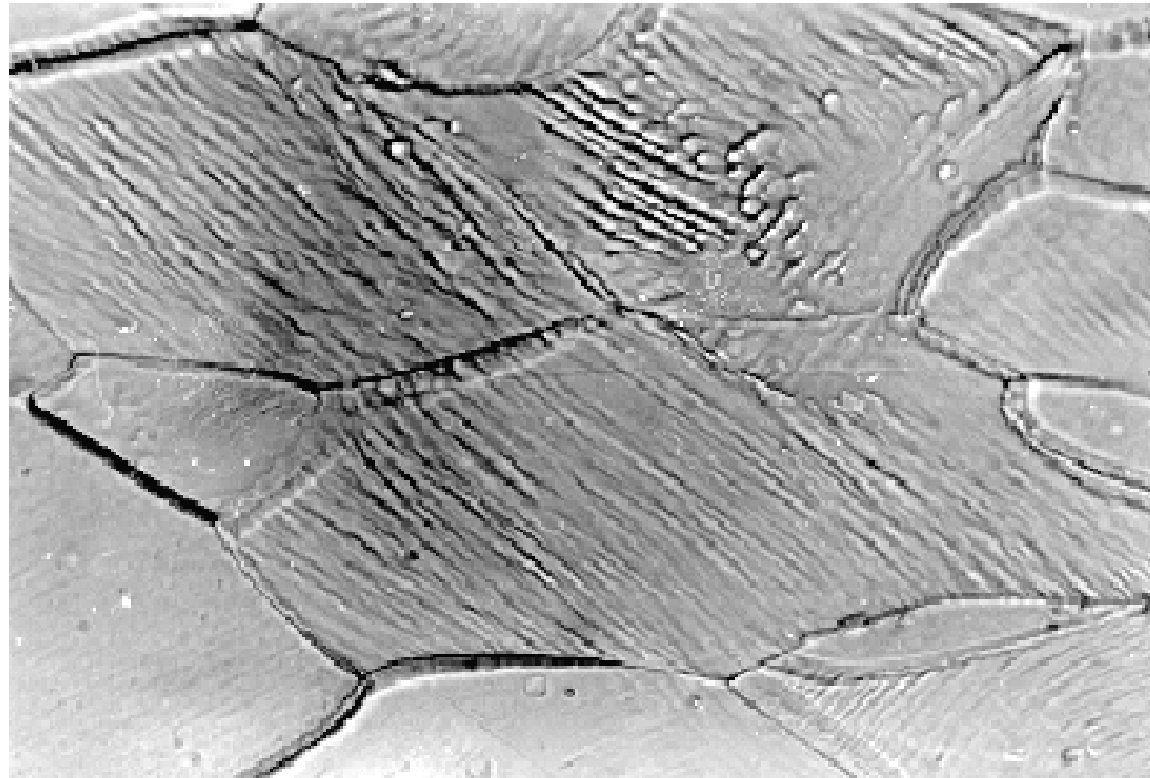




Deformação plástica e microestrutura

PMT EP USP

Surgem bandas de deformação

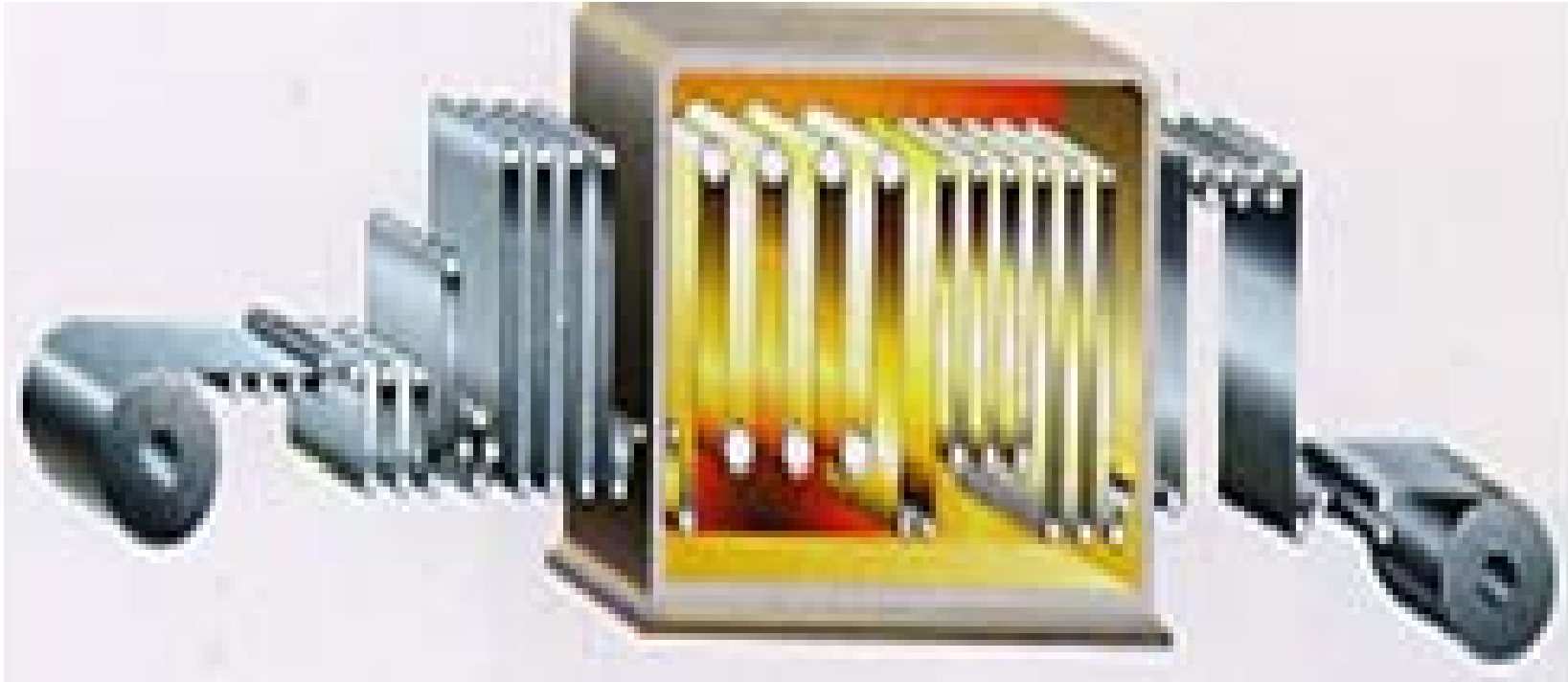


Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Recozimento



Chapa passa em alta velocidade por forno a 900° C
Fica 90 segundos lá dentro
Aquecimento leva à recristalização



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Recristalização

- O aquecimento do material deformado leva a “recristalização”, ou seja, formação de novos cristais isentos de discordâncias.
- O controle da orientação dos novos cristais ainda é empírico.
- Poucas coisas são conhecidas sobre esse fenômeno.



Processamento de aços elétricos
PMT 2200

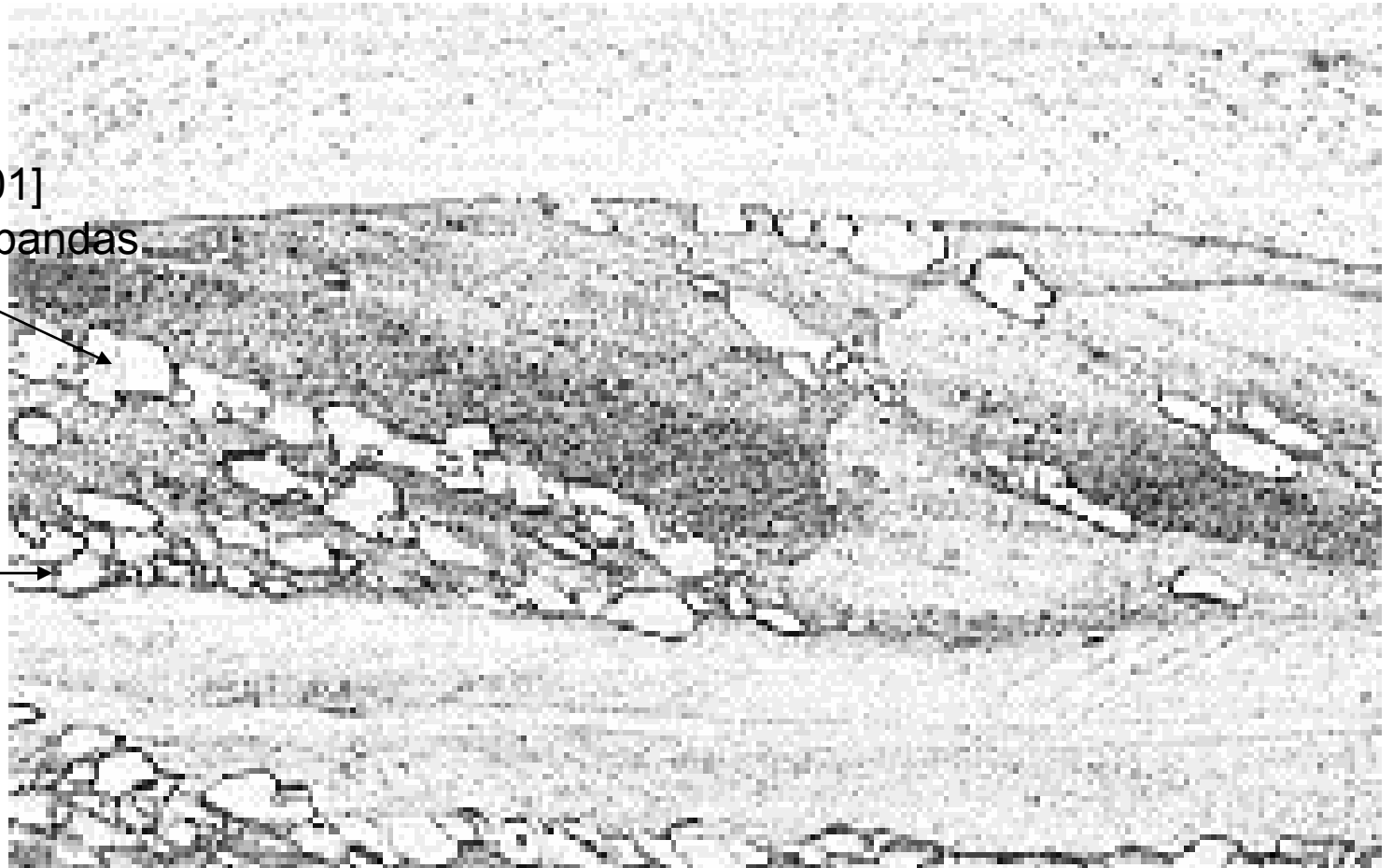


PMT EP USP

Início da recristalização

Grãos (110)[001]
Nucleiam nas bandas

Grãos (111)[112]
Nucleiam
nos contornos
de grão



Processamento de aços elétricos
PMT 2200

Cunha e Paolinelli,
Acesita

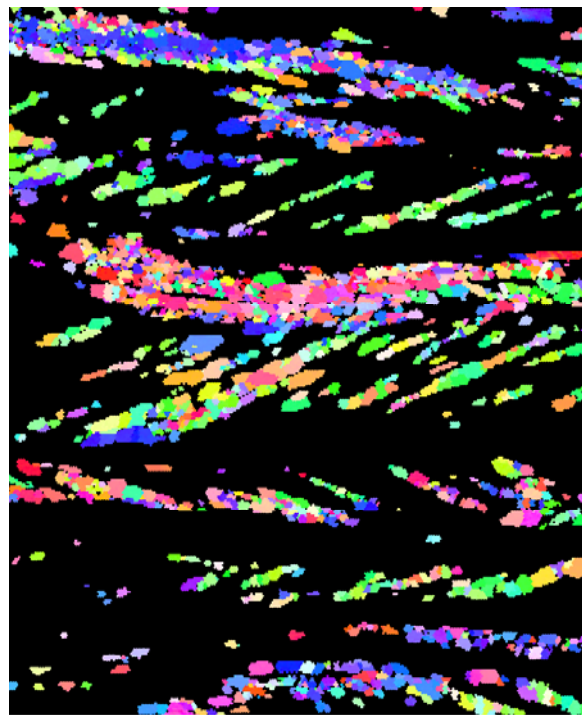


PMT EP USP

Observação por EBSD



96.00 μm = 60 steps IQ 80.9...956.7, Orientation

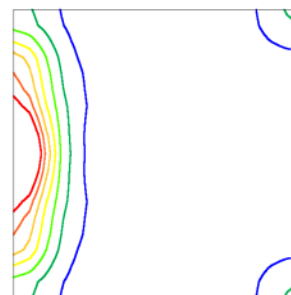


96.00 μm = 60 steps IPF [001]

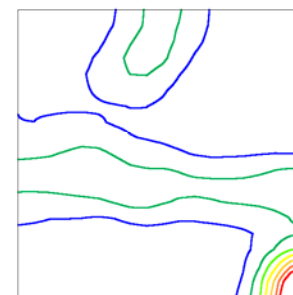
Grãos verdes são (101)[010]



(Dados de Paolinelli e Cunha, Acesita)



0°



45°

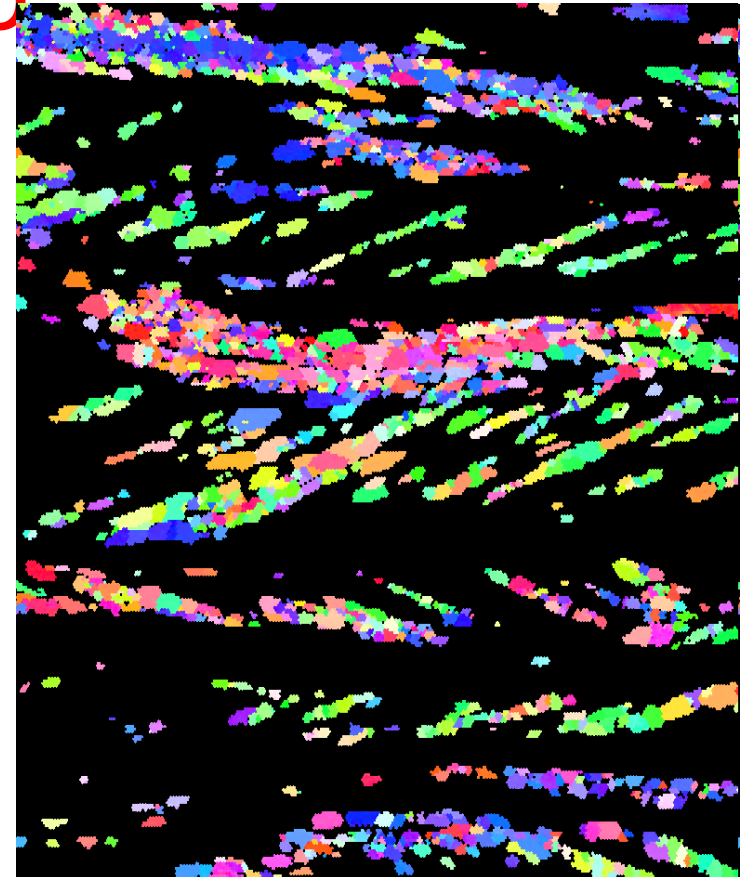


PMT EP USP

Sacada: aumentar o tamanho de grão antes da laminação a frio

Quanto maior TG do material com 2mm
Menos contornos de grão existirão,
Menos grãos (111) serão formados!

Introduzir a etapa de recozimento da BQ



96.00 μm = 60 steps IPF [001]



Processamento de aços elétricos
PMT 2200



PMT EP USP

Processamento

Refino do metal líquido

remoção do S e O

Lingotamento

produz placa de 250 x 1200 x Z mm

Laminação a quente

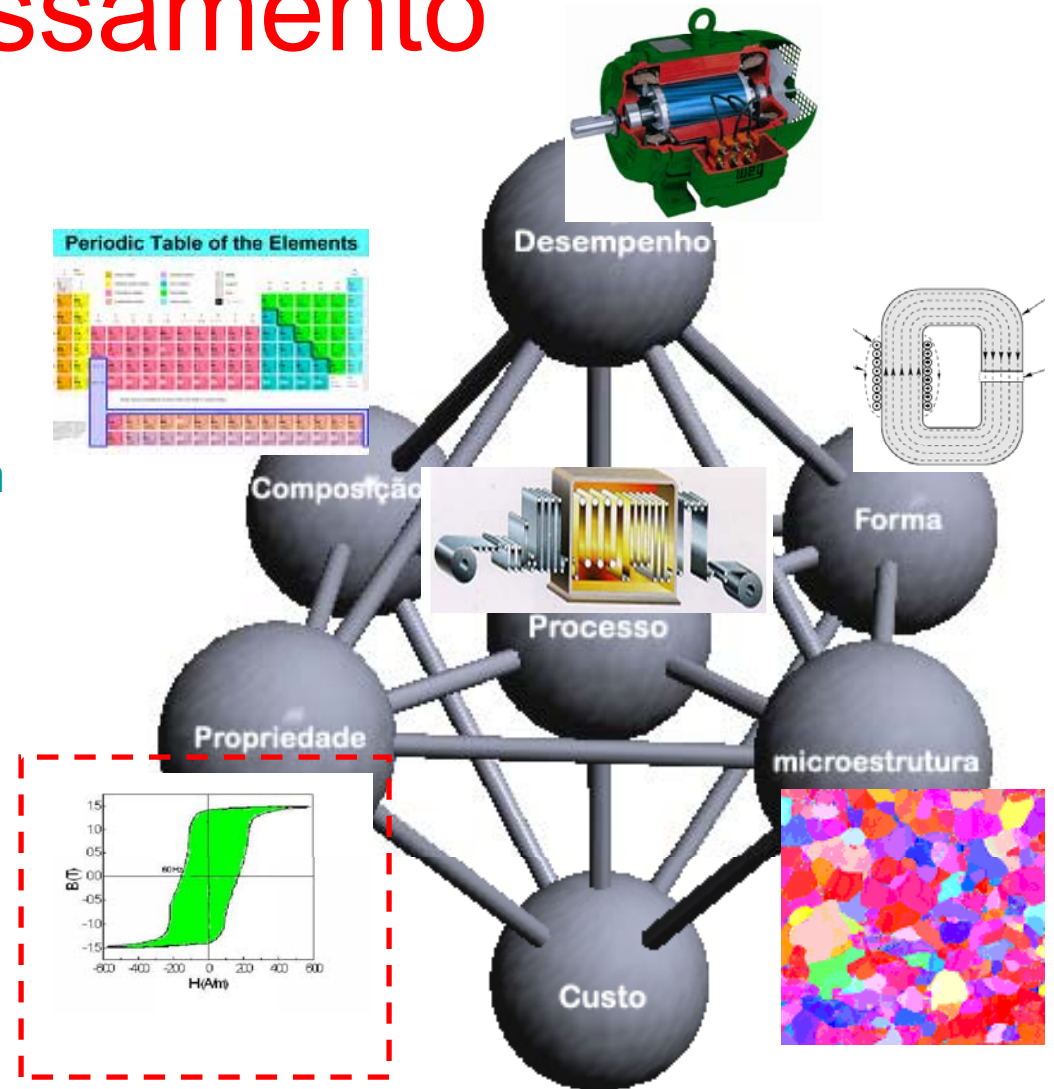
**diminui espessura para
2mm**

Laminação a frio

diminui espessura para 0,5mm

Recozimento final

TG de 150 μ m

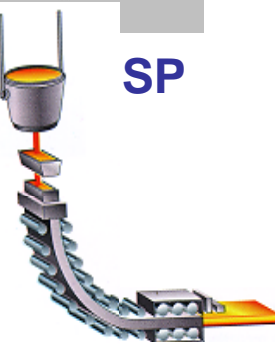


Processamento de aços elétricos
PMT 2200

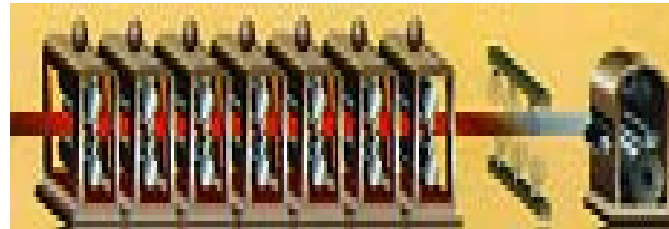
**Nem sempre é possível
introduzir essa etapa!**



PMT SP



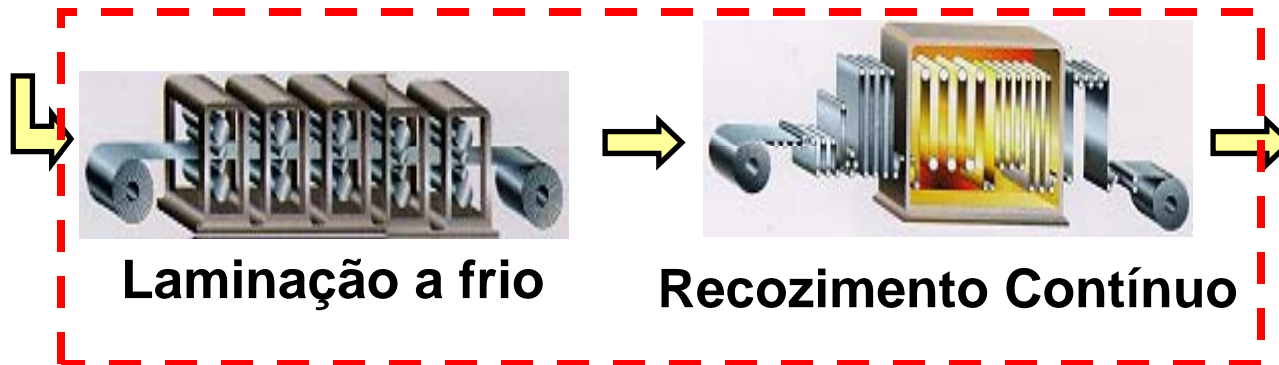
Aciaria



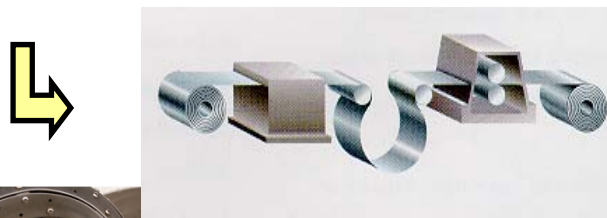
Laminação a quente



Decapagem



Laminação de encruamento



**Linha de inspeção
e acabamento**



**Processamento de aços elétricos
PMT 2200**

CSN





PMT EP USP

RESUMO

Este exemplo de aplicação busca enfatizar que
A obtenção de novos produtos, de melhores propriedades,
Depende do desenvolvimento de novos processos.

No exemplo específico, lembrar da importância da
Anisotropia magnetocristalina
para a qualidade magnética do material,
E como uma mudança no processo altera a textura
E melhora a propriedade.



Processamento de aços elétricos
PMT 2200