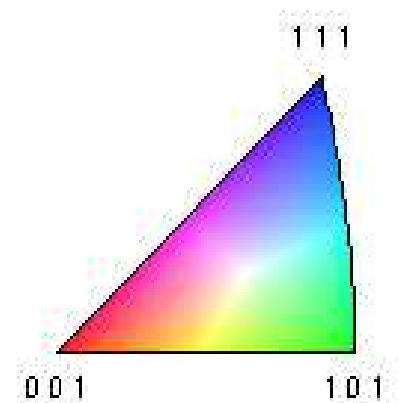


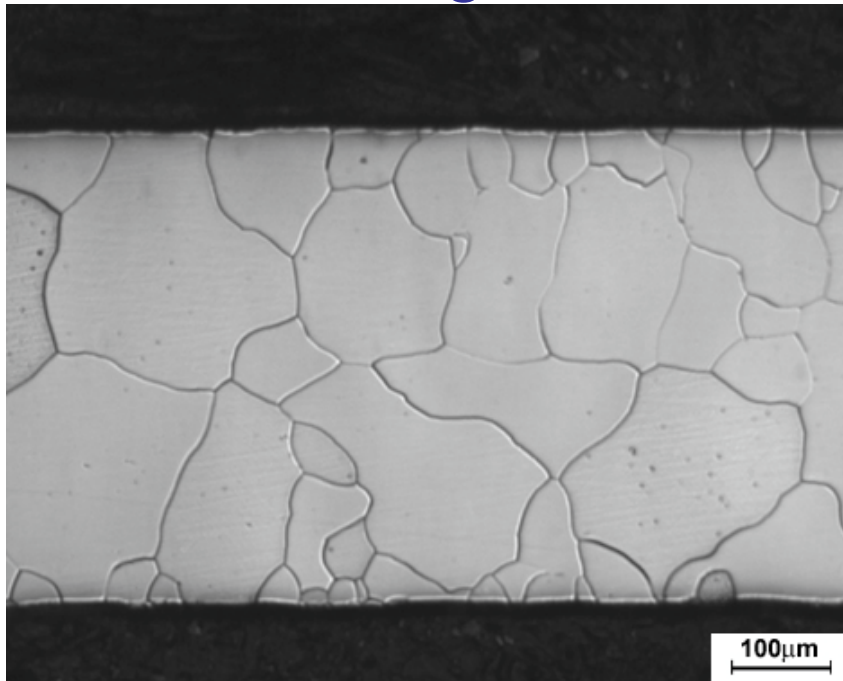
Microestructura

Fernando JG Landgraf



Materiais são policristalinos

- A grande maioria dos materiais são policristalinos: contém muitos cristais (“grãos”).
- Alguns são amorfos, outros monocristalinos.
- Tamanho médio de grão entre $10\mu\text{m}$ e 1mm .



Chapa de aço usada
em motores elétricos

Materiais são policristalinos

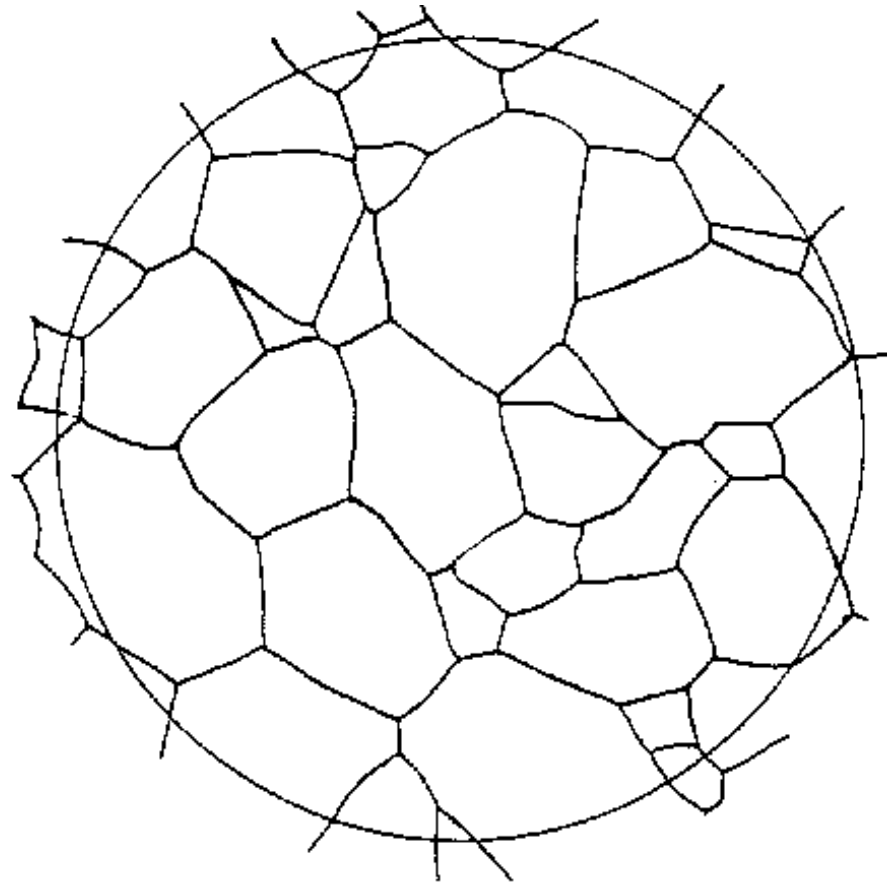
- Nanomateriais são aqueles com tamanho médio de grão abaixo de $0,1 \mu\text{m}$
- Um C.P. de tração pode ter 10^{10} grãos.
- Propriedades dependem de características dos grãos:
 - Tamanho
 - Forma
 - Orientação

Determinação de tamanho de grão

- O tamanho pode ser definido como um diâmetro médio, definido de diferentes formas:
 - Número de grãos por unidade de área
 - Intercepto médio
- Intercepto médio
 - Círculos de perímetro conhecido
 - Linhas retas de comprimento conhecido

Exemplo de número de grãos por área

$$N_A = (N_{\text{dentro}} + N_{\text{cortado}} / 2) / \text{área}$$



Existem normas internacionais para a metodologia da medida; por exemplo, a norma ASTM E112.

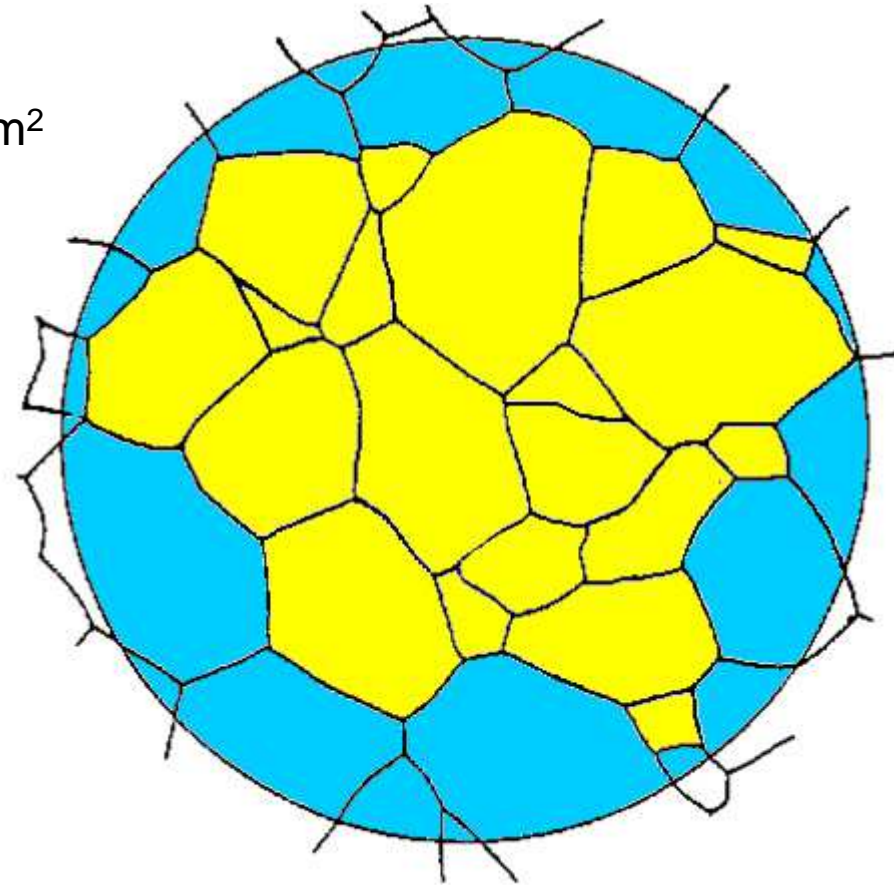
Círculo de área 0,5mm²

Exemplo de número de grãos por área

$$N_A = (N_{\text{dentro}} + N_{\text{cortado}} / 2) / \text{área}$$

$$N_A = (20 + 21/2) / 0,5 = 61 \text{ grãos/mm}^2$$

$$d = \sqrt{1/N_A}$$



Existem normas internacionais para a metodologia da medida; por exemplo, a norma ASTM E112.

Círculo de área 0,5mm²

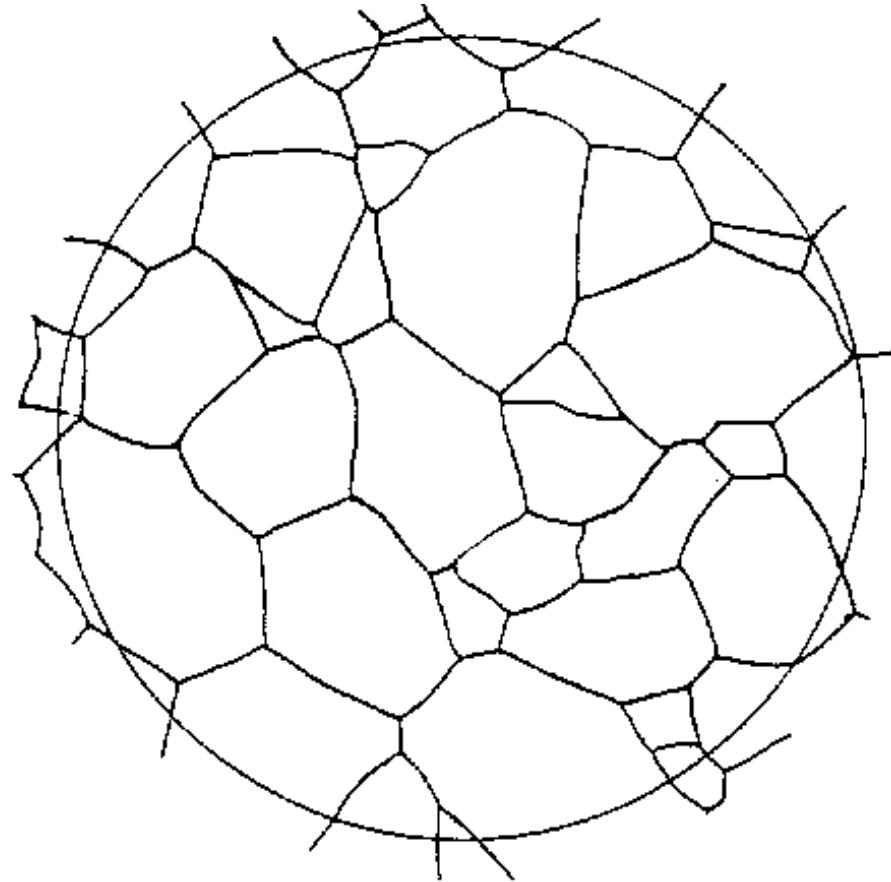
Exemplo de contagem de intercepto

Intercepto é onde a linha cruza o contorno de grão
 $N_L = n^\circ$ de interceptos/perímetro

$$P = 2,51 \text{ mm}$$

$$N_L = \text{ / } P = \text{ / } 2,51 = \text{ mm}^{-1}$$

$$d = 1/N_L = \text{ mm}$$



Exercício: Sabendo que a área deste círculo mede $0,5 \text{ mm}^2$, calcular o tamanho de grão pelo método do intercepto

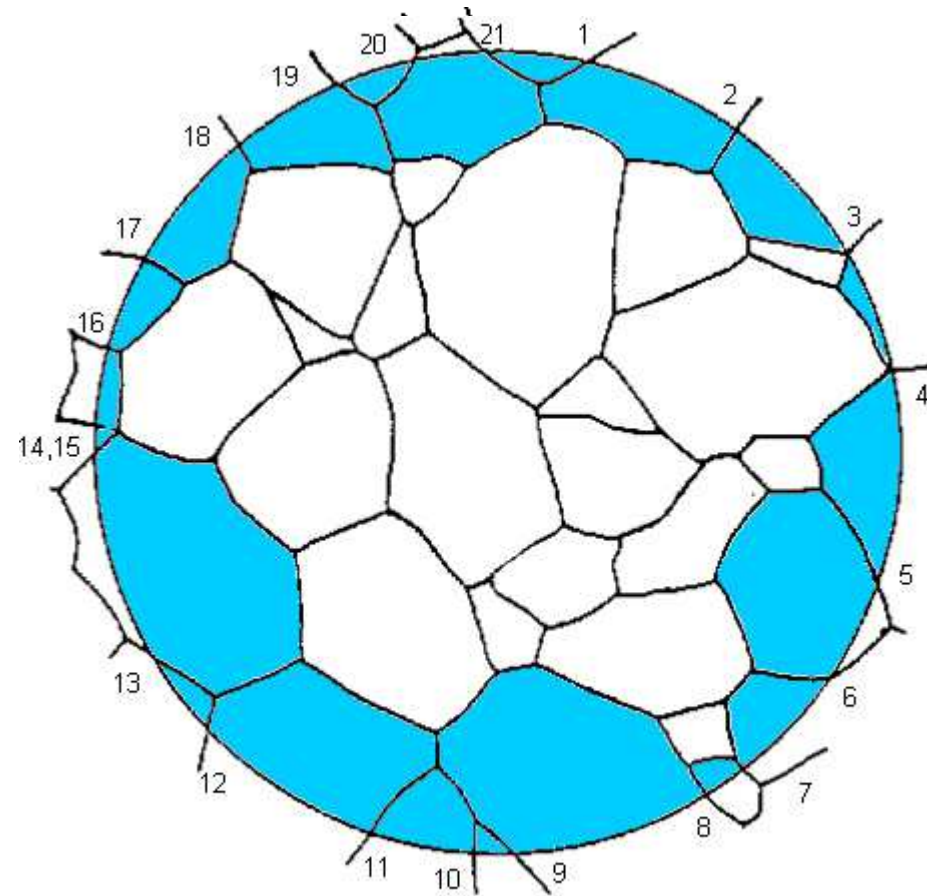
Exemplo de contagem de intercepto

Intercepto é onde a linha cruza o contorno de grão
 $N_L = n^\circ$ de interceptos/perímetro

$$P = 2,51 \text{ mm}$$

$$N_L = 21/P = 21/2,51 = 8,4 \text{ mm}^{-1}$$

$$d = 1/N_L = 0,119 \text{ mm}$$



Exercício

- Determinar o tamanho de grão da micrografia pelo método do intercepto linear e pelo método do diâmetro equivalente (segundo a norma ASTM E112, $d = \sqrt{1/N_A}$).

Materiais podem ser polifásicos

- Como vimos na aula de materiais compósitos, as propriedades dependem da fração volumétrica das fases presentes.
- V_v = Fração volumétrica = volume da fase/volume total .
- Numa imagem bidimensional só podemos determinar a fração de área (A_A) .
- *A estereologia* nos garante que $A_A = V_v$.

Método para determinar V_V

- Para determinar V_V , usamos a mesma lei da *estereologia* que diz que: $V_V = A_A = L_L = P_P$

Calcular a fração de perlita, nesse aço ferrítico-perlítico:

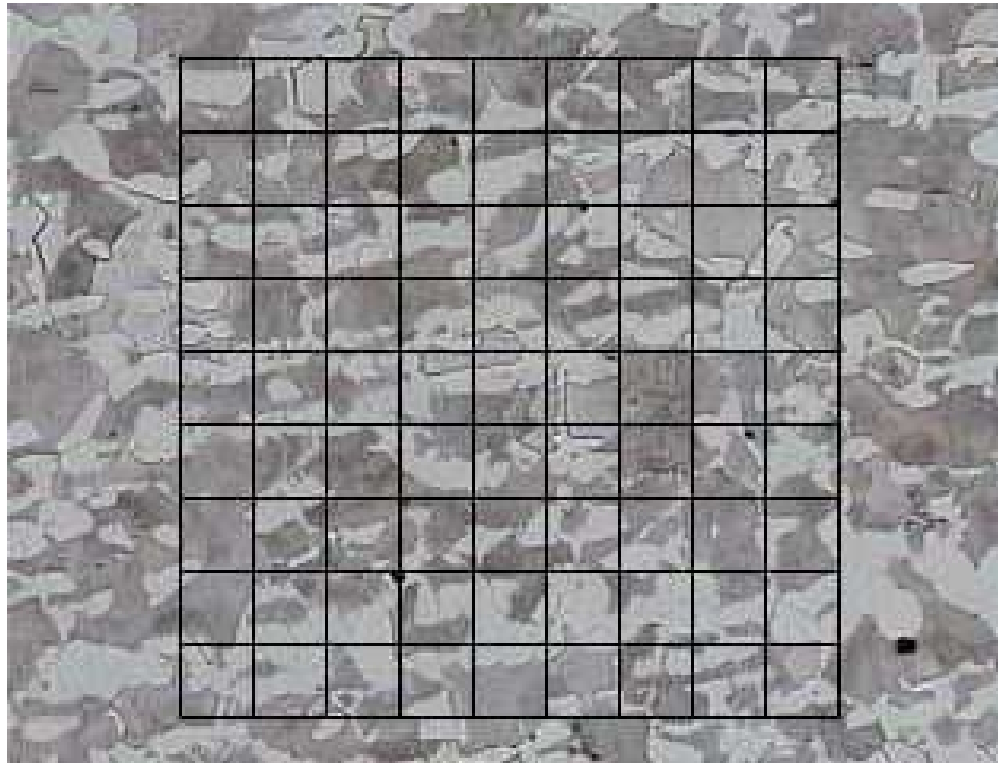
⇒ Ferrita é branca

⇒ Perlita é cinza escura
(se cai na interface conta $\frac{1}{2}$)

Solução:

$P_p =$

$V_v = 51\%$



Propriedades dependem de características dos grãos:

- Tamanho
- Forma
- **Orientação**

Anisotropia de propriedades

- O valor do módulo de elasticidade de um monocristal varia com a direção cristalina:

Direção	$\langle 100 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 111 \rangle$
E_{ferro} (GPa)	125	210	273

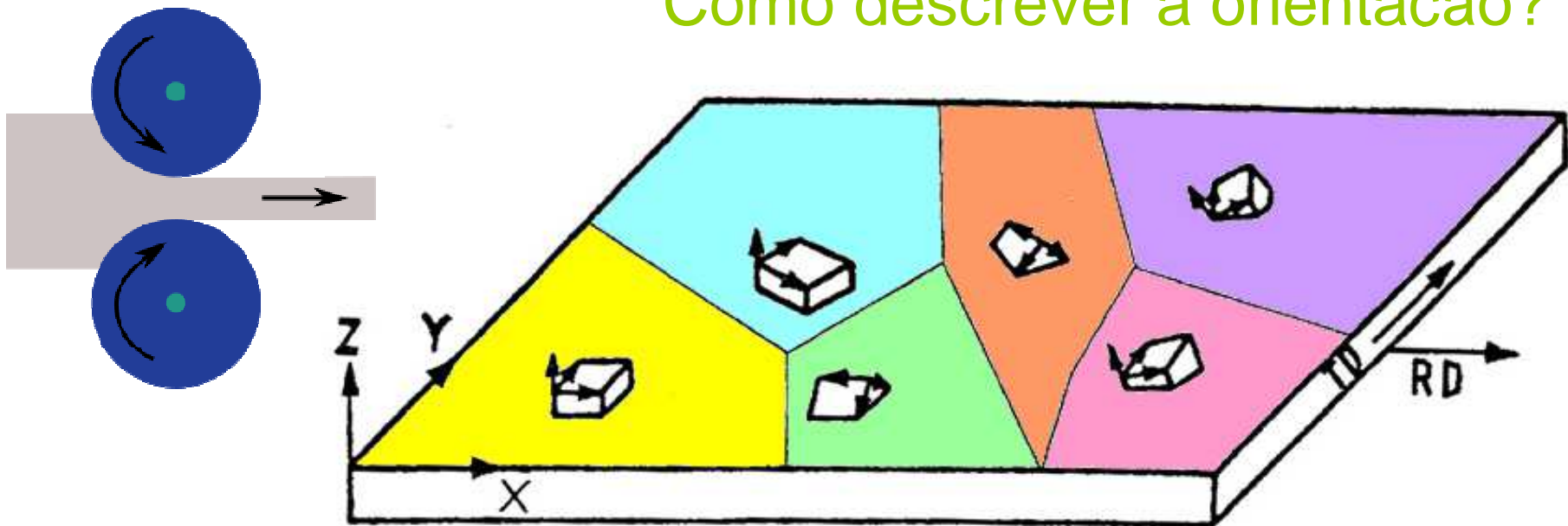
- Num corpo policristalino :
o valor do módulo numa certa direção do corpo dependerá da distribuição das orientações dos cristais no interior do mesmo (chamada de *textura cristalográfica*).

Textura cristalográfica

- **Definição**: a distribuição de orientações cristalográficas dos cristais de um policristal em relação a um sistema de referência.

Sistema de referência: por exemplo, o sistema de referência da chapa (eixos X, Y e Z)

Como descrever a orientação?



Atenção: textura cristalográfica não é ...

- Nem a forma dos cristais .
- Nem a rugosidade da superfície do material .

Motivos para ocorrer textura

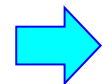
- Solidificação direcional: grãos crescem mais rápido em certas direções.
- Epitaxia: grãos crescem de acordo com a orientação do substrato.
- Deformação plástica: grãos sofrem rotação durante deformação (tópico 3).
- Recristalização: novos grãos surgem com novas orientações
- Transformações de fase: idem

Como descrever a orientação de um grão

- A orientação é sempre descrita em relação ao sistema de referência.
- Por exemplo, numa chapa laminada, as referências naturais são o plano da superfície da chapa, formado pela direção longitudinal, que é a **Direção de Laminação** (DL ou RD-rolling direction) e pela **Direção Transversal** (DT ou TD), e a **Direção Normal** (DN ou ND) à superfície da chapa.
- Num fio, a referência é a direção longitudinal do fio.

Como descrever a orientação de um grão numa chapa

- As direções DN, DT e DL são ortogonais, mas não são equivalentes.
- Poderíamos descrever a orientação de um cristal em relação às direções DN, DL e DT da chapa, mas o padrão é usar o plano da superfície da chapa e a DL.
- A orientação de um cristal pode ser descrita:
 - pelo índice de Miller do plano cristalino do cristal que é paralelo à superfície,
 - e pelo índice de Miller da direção cristalina que é paralela à DL.
- Orientação genérica é $(hkl)[uvw]$:
 - ⇒ plano (hkl) // superfície da chapa
 - ⇒ direção $[uvw]$ // DL



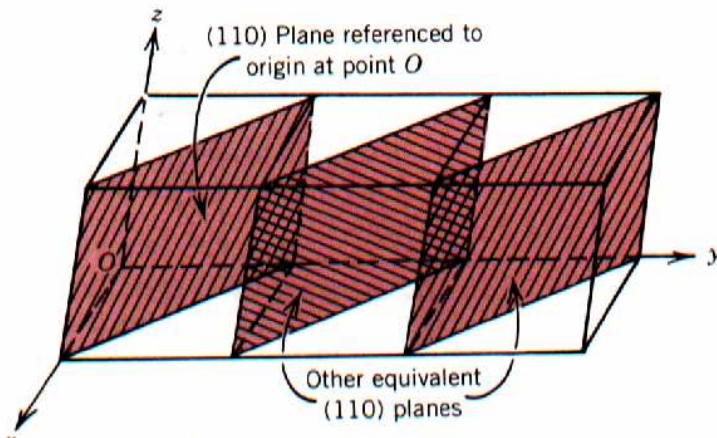
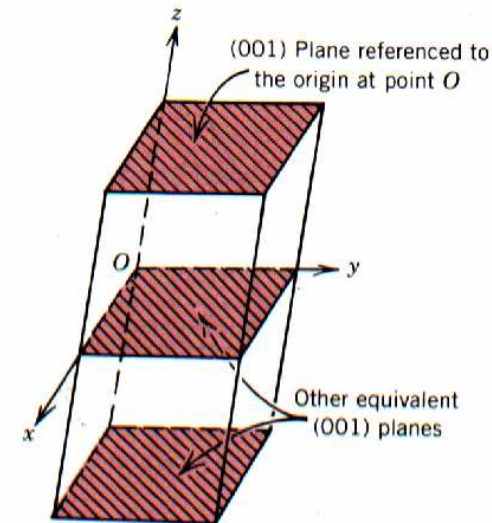
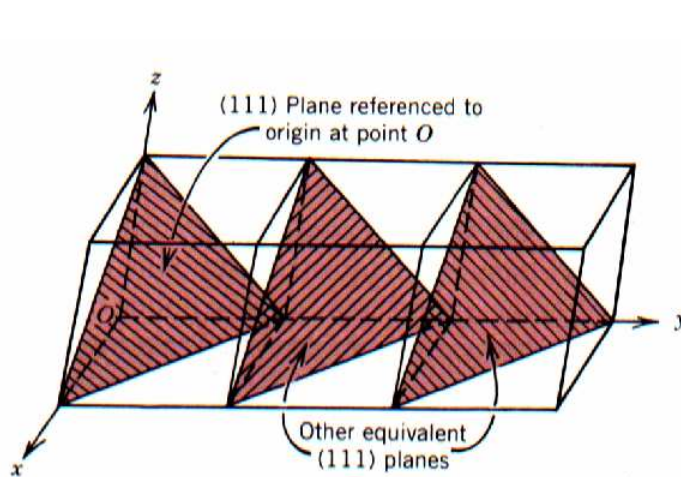
Índices de Miller: planos cristalográficos

Determinação dos índices de Miller de um plano cristalográfico:

- determinar os interceptos do plano com os eixos do sistema de coordenadas em termos dos parâmetros de rede a , b e c . Se o plano passar pela origem, transladar o plano para uma nova posição no sistema de coordenadas.
- obter os recíprocos desses três interceptos. Se o plano for paralelo a um dos eixos, considera-se o intercepto infinito e o seu recíproco zero.
- representar na forma $(h k l)$

Nota: às vezes é necessário multiplicar os três números resultantes por um fator comum para assim obter três índices inteiros.

Planos cristalográficos



FAMÍLIA DE PLANOS: conjunto de planos cristalograficamente equivalentes, ou seja, planos com o mesmo empacotamento atômico. Famílias de direções são representadas por $\{hkl\}$.

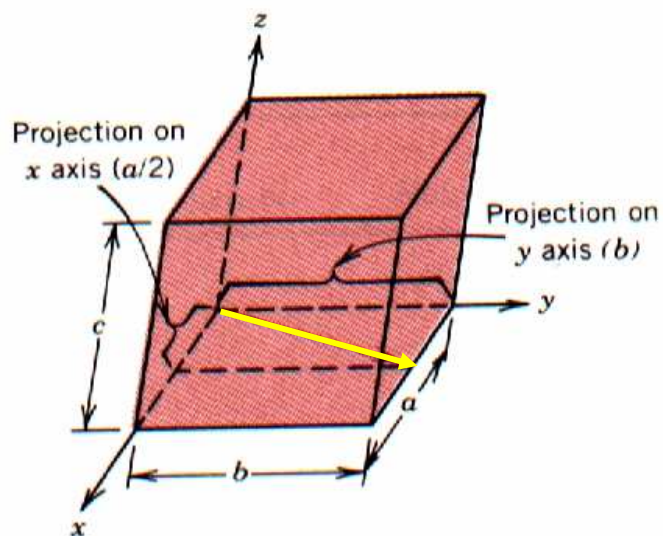
Por exemplo, a família $\{111\}$ é composta pelos planos:

$$(111), (\bar{1}11), (1\bar{1}1), (11\bar{1})$$

Índices de Miller: direções cristalográficas

- **DIREÇÃO CRISTALOGRÁFICA:** vetor que une dois pontos da rede cristalina.
- Procedimento para determinação dos índices de Miller de uma direção cristalográfica:
 - transladar o “vetor direção” de maneira que ele passe pela origem do sistema de coordenadas.
 - determinar a projeção do vetor em cada um dos três eixos de coordenadas. Essas projeções devem ser medidas em termos dos parâmetros de rede (a,b,c)
 - multiplicar ou dividir esses três números por um fator comum, tal que os três números resultantes sejam os menores inteiros possíveis.
 - representar a direção escrevendo os três números entre colchetes: [u v w].

Direções cristalográficas : exemplo



	x	y	z
projeções	$\frac{1}{2}a$	$1b$	$0c$
projeções em termos de a,b e c	$\frac{1}{2}$	1	0
redução a mínimos inteiros	1	2	0
notação	$[120]$		

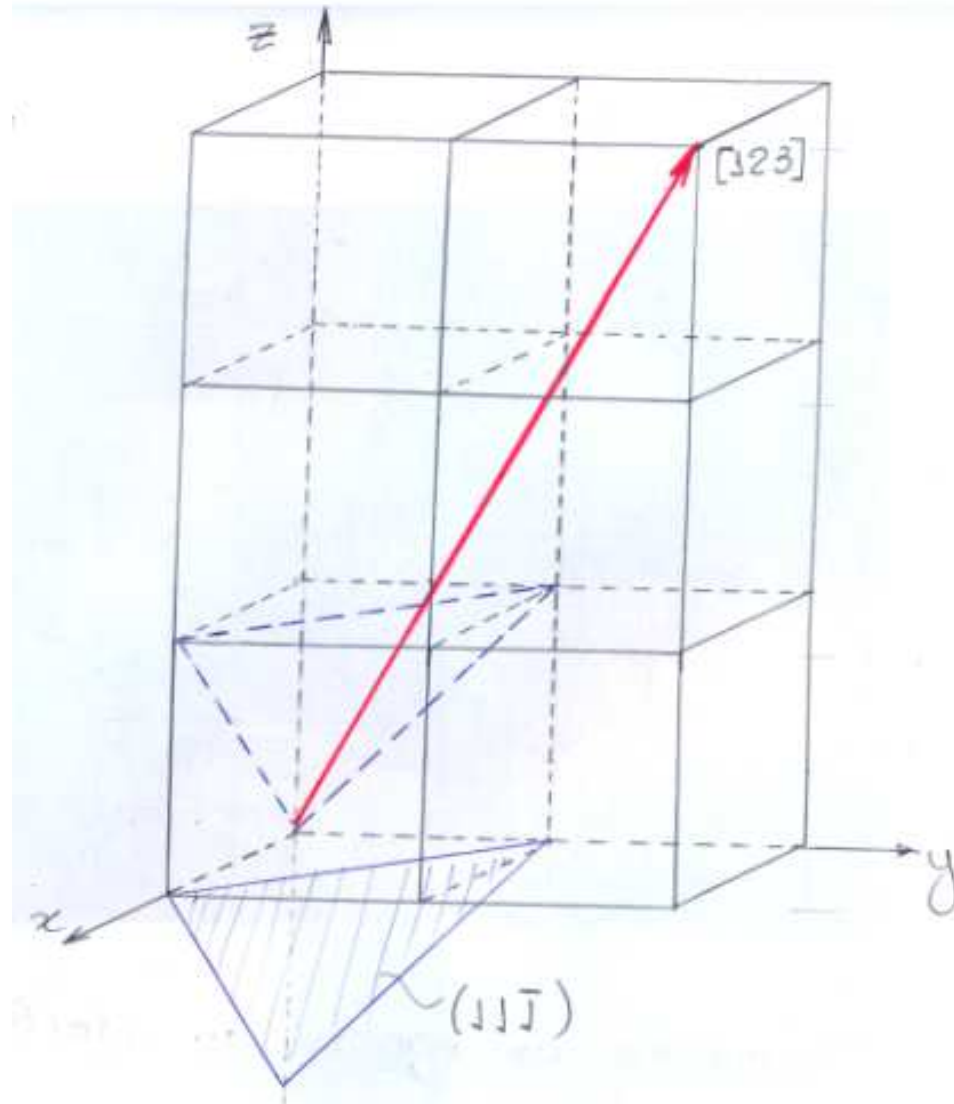
FAMÍLIA DE DIREÇÕES: conjunto de direções equivalentes, ou seja, conjunto de direções que possuem o mesmo espaçamento atômico. Famílias de direções são representadas por $\langle hkl \rangle$.

Por exemplo, a família $\langle 100 \rangle$ é composta pelas direções $[100]$, $[010]$, $[001]$, $[\bar{1}00]$, $[0\bar{1}0]$ e $[00\bar{1}]$.



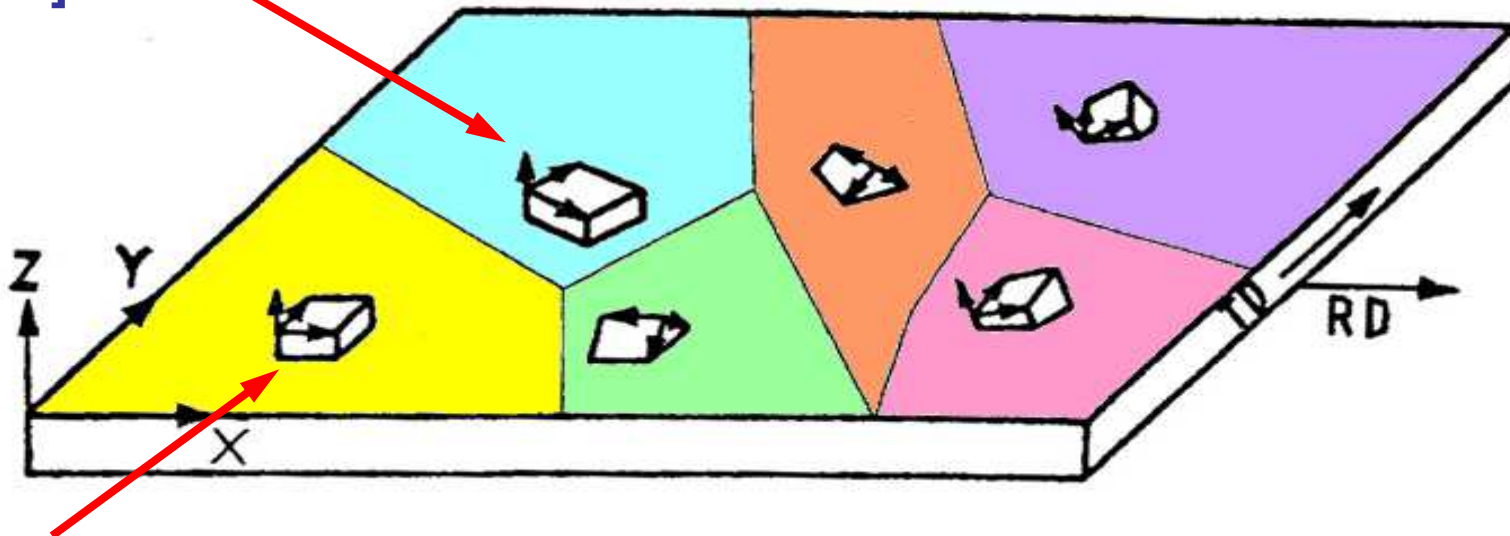
Exercício sobre índice de Miller

- Desenhar direção $[123]$
- Desenhar plano $(1\bar{1}1)$



Como descrever a orientação de um grão

Grão 2
(001)//superf
[110]//DL



Grão 1:
(001)//superf
[100] //DL

Orientação é
(001)[100]

Três problemas distintos:

- ⇒ Como determinar as orientações?
- ⇒ Como representar a distribuição das orientações?
- ⇒ Como quantificar a distribuição de orientações?

Métodos para determinar a orientação dos cristais

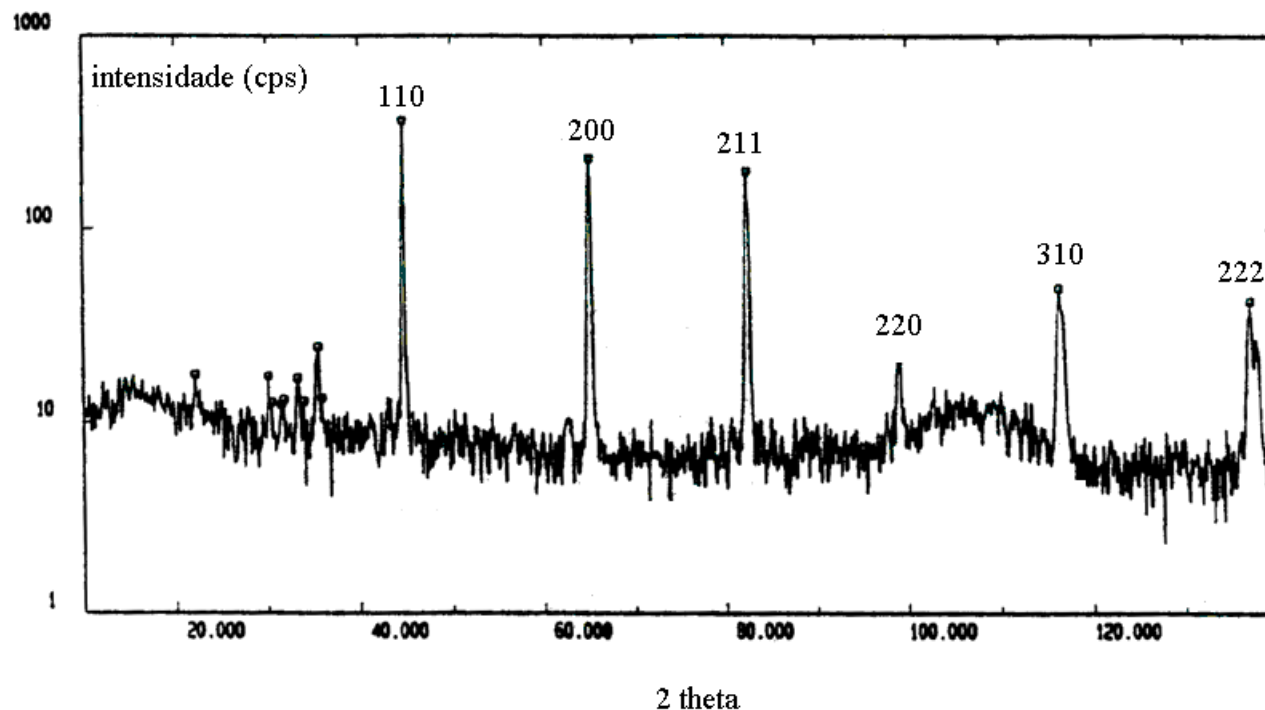
- Difração de raios X
- Difração de elétrons
- Difração de neutrons

Difração de raios x

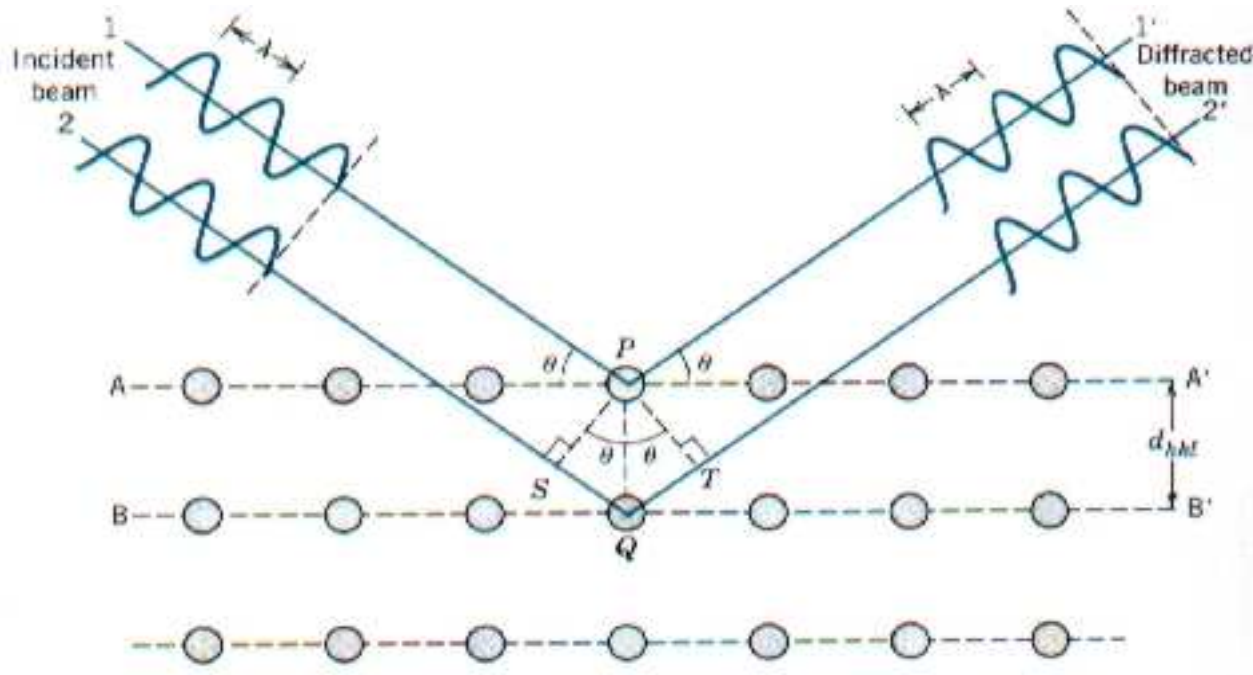
Os picos da difração de raios X se originam em grãos que possuem aqueles planos paralelos a superfície.

A intensidade do pico depende da quantidade de grãos com aquela orientação.

O exemplo abaixo refere-se a um material CCC, mostrando planos (110), (200), (211), (220), (310) e (222) paralelos à superfície



Difração de raios X



$$n\lambda = \overline{SQ} + \overline{QT}$$

$$n\lambda = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta = 2d_{hkl} \sin \theta$$

(Lei de Bragg)

Fim da primeira parte

Literatura

- “Capítulo 5: Fundamentos de Metalografia Quantitativa”, in Padilha, A.F.; Ambrozio Filho, F. Técnicas de Análise Microestrutural. Hemus Ed. São Paulo. cap.5.