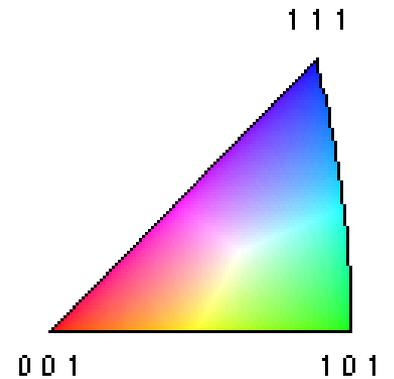


# Microestrutura

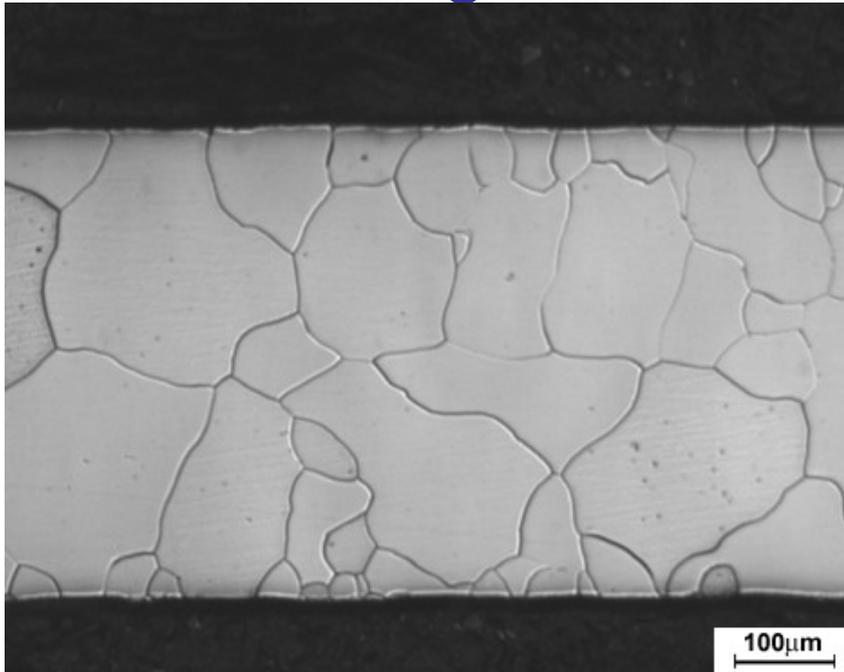
Fernando JG Landgraf



PMT 2200 em 2010

# 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  $1\text{mm}$ .



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 carac. dos grãos:**
  - Tamanho
  - Forma
  - Orientação

# Determinação de tamanho de grão

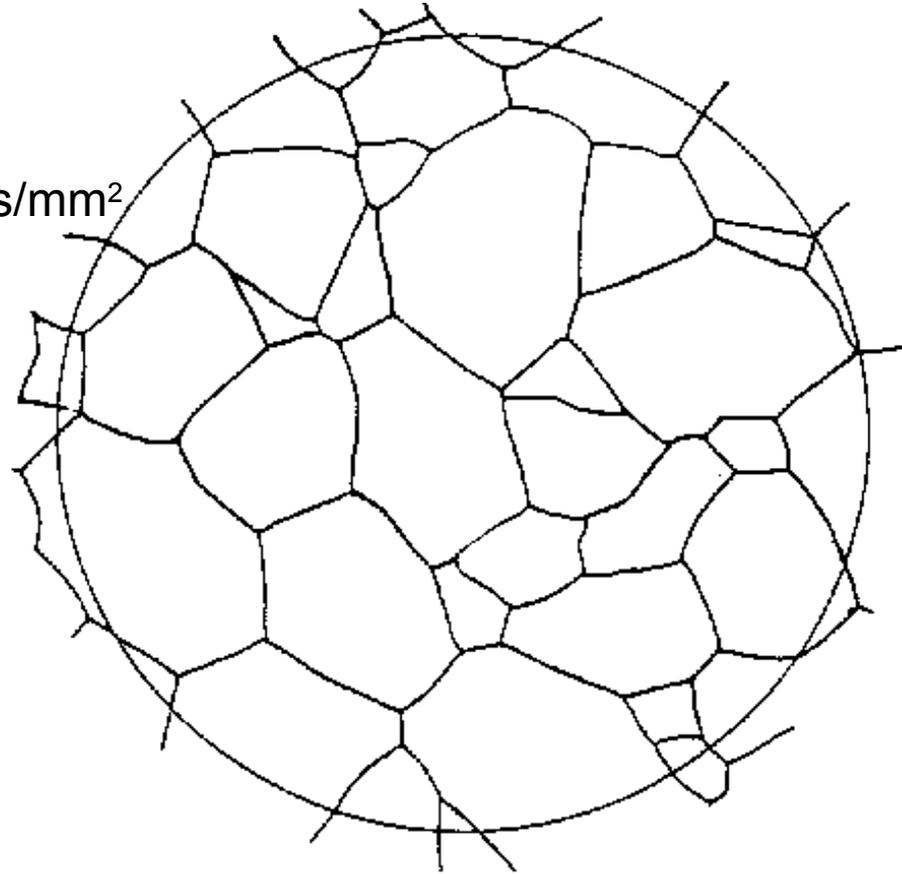
- O tamanho pode ser definido como
  - diâmetro médio, definido de diferentes formas
  - o número de grãos por unidade de área
  - Intercepto médio
- Intercepto médio
  - Círculos de perímetro conhecido
  - Linhas retas de comprimento conhecido

# Exemplo de número/área

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

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

Existem normas internacionais  
Para a metodologia da medida  
p.ex. ASTM E112



Círculo de área  $0,5\text{mm}^2$

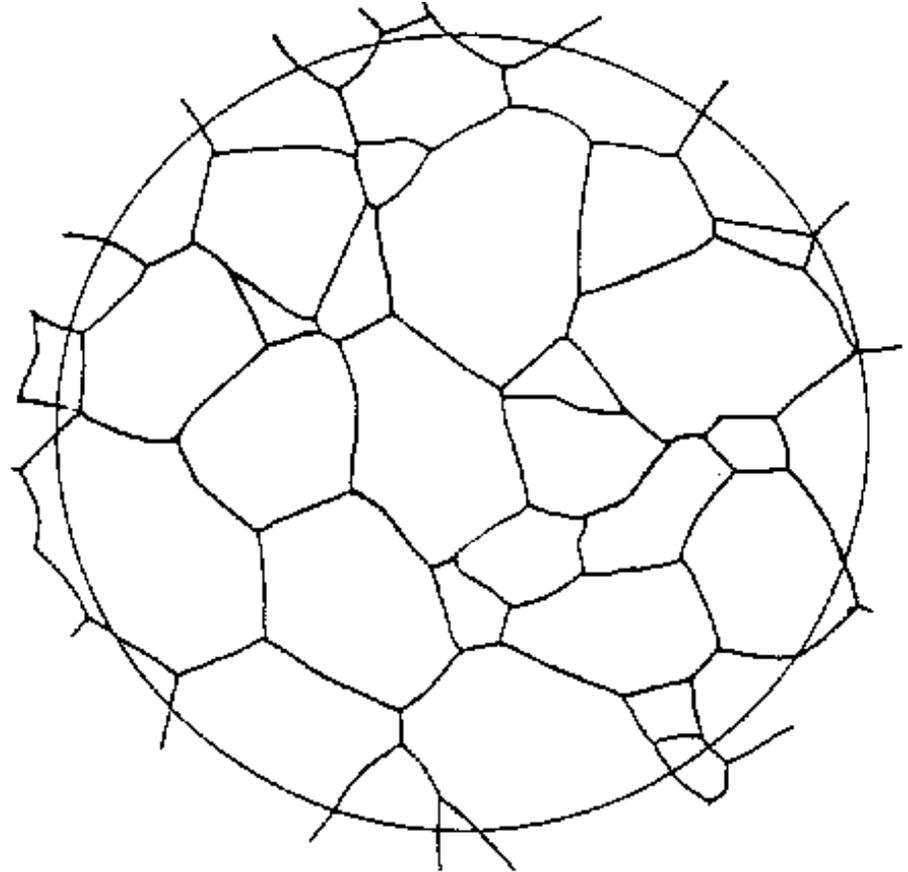
# Exemplo de contagem de intercepto

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

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

$$N_L = 21/P = 21/2.51 = 8,4 \text{ mm}^{-1}$$

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



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

# 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 $V_V$

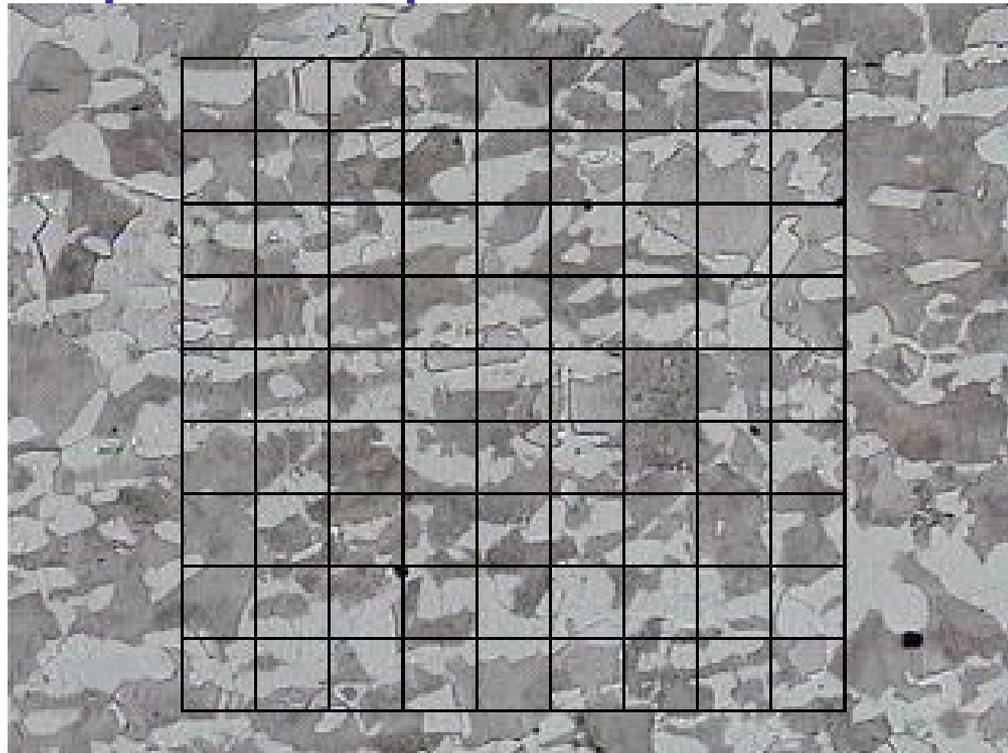
- Para determinar  $V_V$ , usamos a mesma lei da estereologia que diz que
- $V_V = A_A = L_L = P_P$

Calcular a fração de perlita, nesse aço ferrítico-perlítico:  
Ferrita é branca  
Perlita é cinza  
(se cai na interface conta 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            |     | $\langle 100 \rangle$ | $\langle 110 \rangle$ | $\langle 111 \rangle$ |
|--------------------|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $E_{\text{Ferro}}$ | GPa | 125                   | 210                   | 273                   |

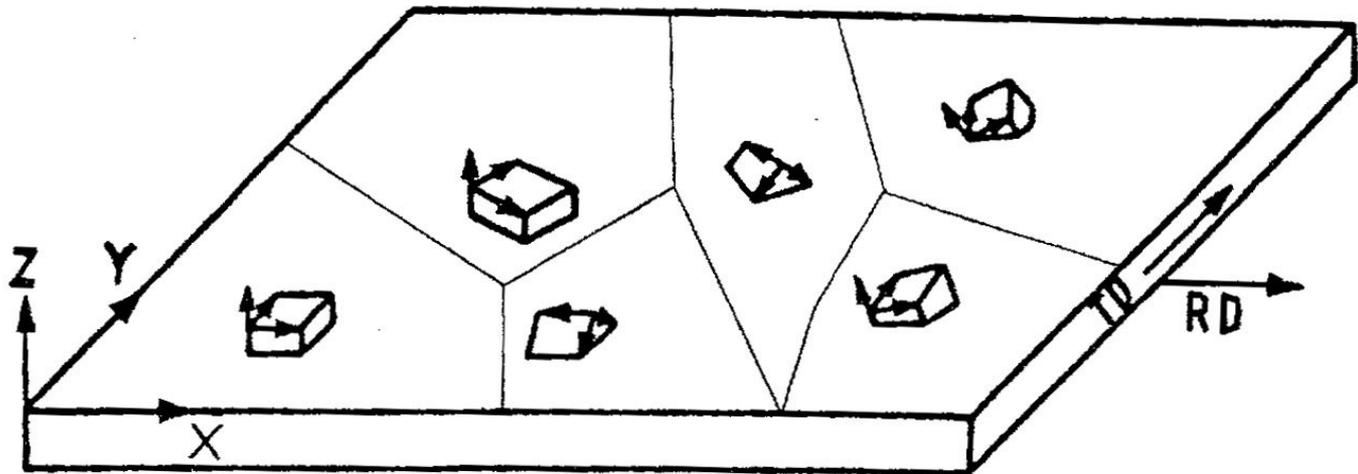
- Num corpo policristalino  
o valor do módulo numa certa direção do corpo dependerá da distribuição das orientações dos cristais no interior do mesmo (chamada de textura cristalográfica).

# Textura cristalográfica

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

Como descrever a orientação?

p.ex. Sistema  
De referência  
Da chapa



# 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 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, a direção longitudinal, que é a Direção de Laminação (DL ou RD-rolling direction), a direção transversal (DT ou TD), a direção normal (DN ou ND).
- Num fio, a referência é a direção longitudinal do fio

# Como descrever a orientação de um grão numa chapa

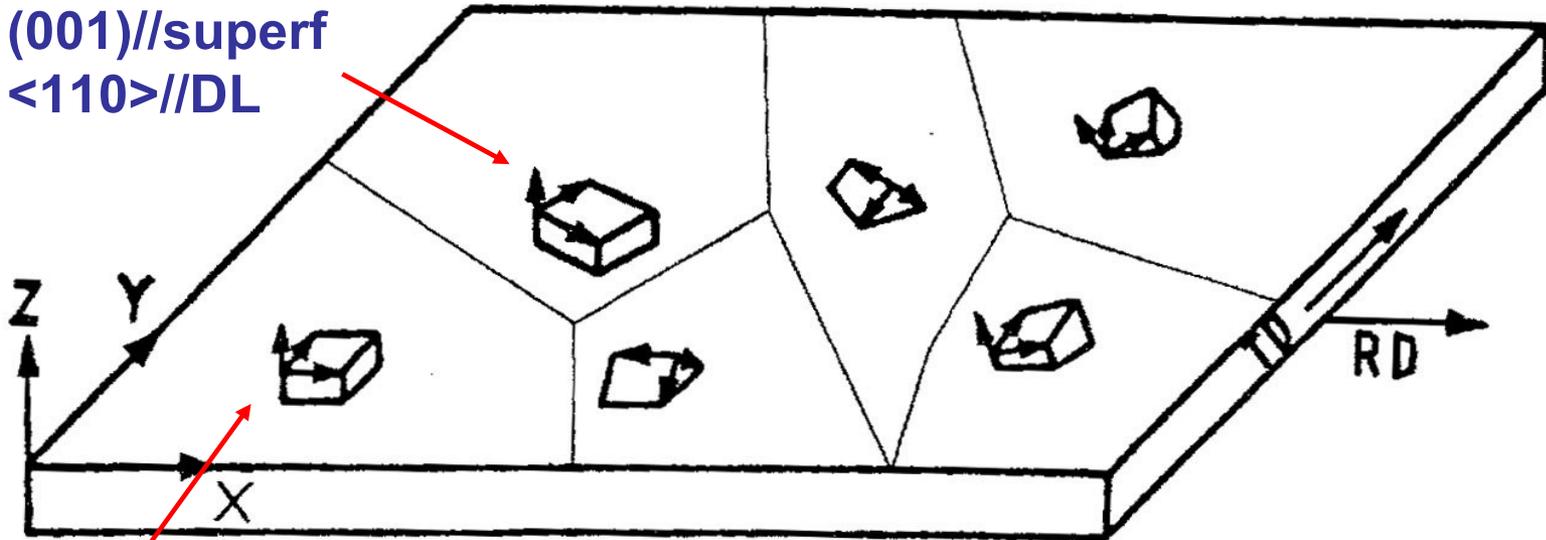
- as direções DN, DT e DL são ortogonais, mas não são equivalentes.
- Poderíamos descrever a orientação de um cristal em relação às direções DN, DL e DT da chapa, mas o padrão é usar o plano da superfície da chapa e a DL.
- A orientação de um cristal pode ser descrita pelo índice de Miller do plano cristalino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

# Exercício sobre índice de Miller

- Desenhar direção  $[123]$
- Desenhar plano  $(11\bar{1})$
- Provar que numa orientação genérica  $(hkl)[uvw]$  necessariamente  $(hu+kv+lw)=0$

# 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

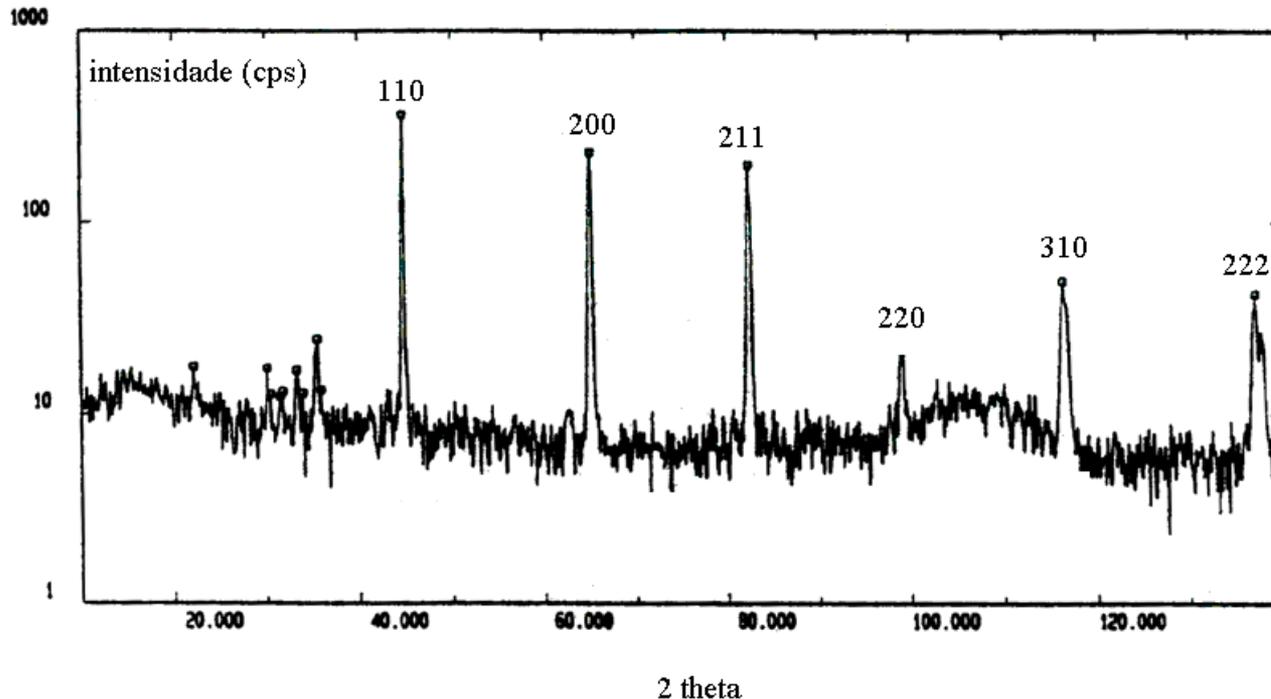
- Difração de raios X
- Difração de elétrons
- Difração de neutrons

# 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



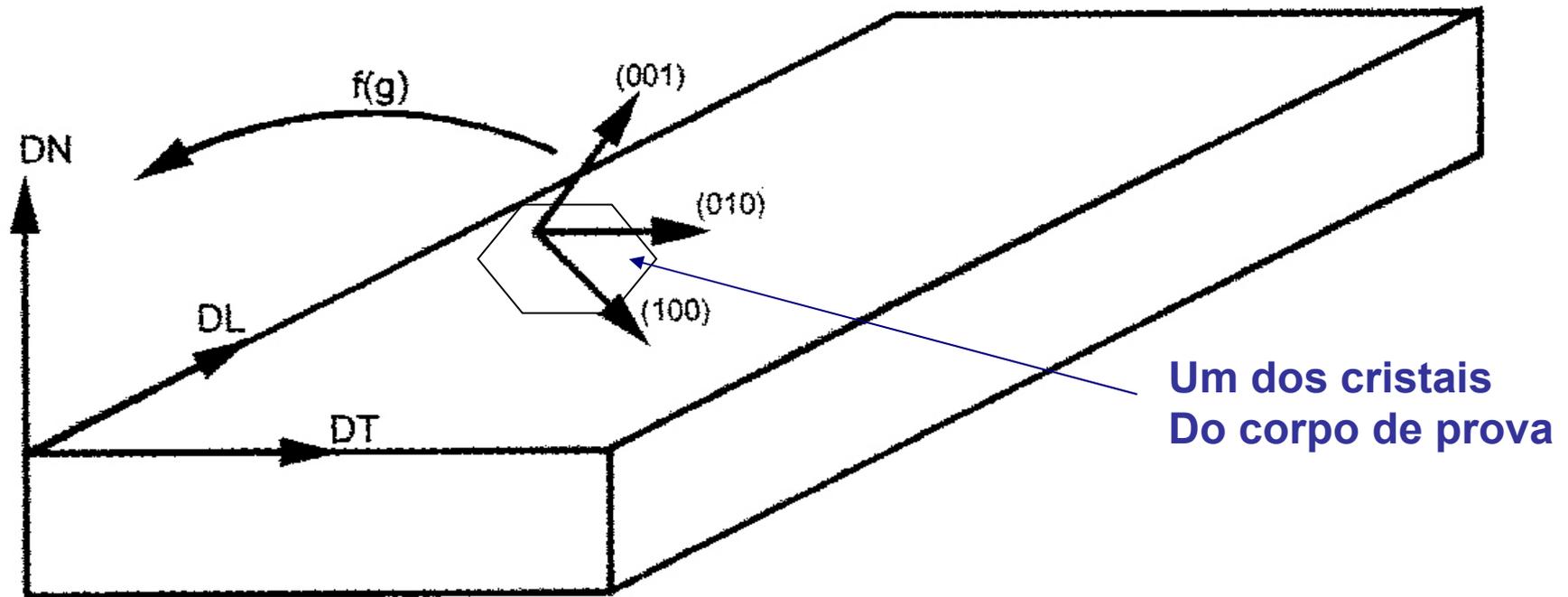
# Fim da primeira parte

# Métodos de representação

- Figura de pólo inversa
- Figura de pólo direta
- Espaço de Euler

Neste curso, vamos nos concentrar no Espaço de Euler.

# Como representar a orientação

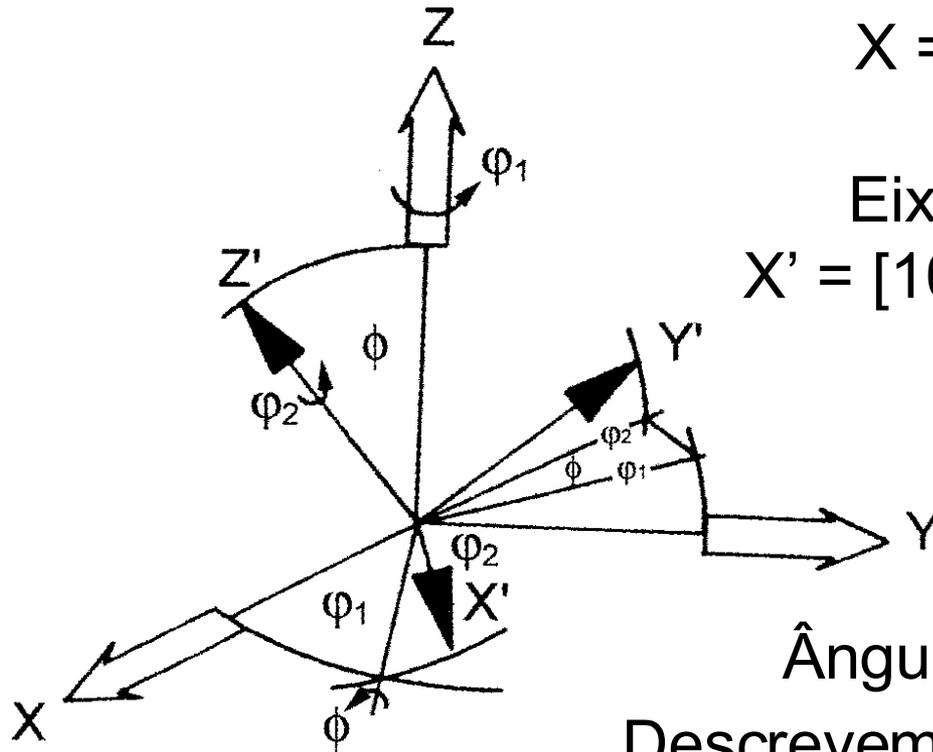


O problema é estabelecer uma relação entre a orientação dos eixos cristalográficos de cada cristal e o sistema de referência do corpo de prova, no caso, uma chapa. Euler propôs que três ângulos de rotação descrevem qualquer orientação.

# Três ângulos de rotação na notação de Bunge

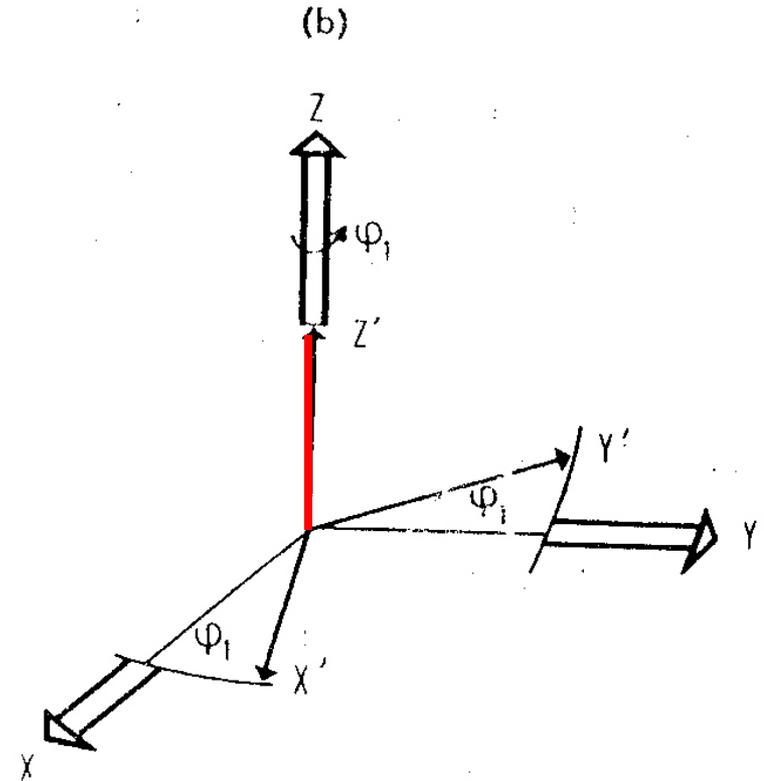
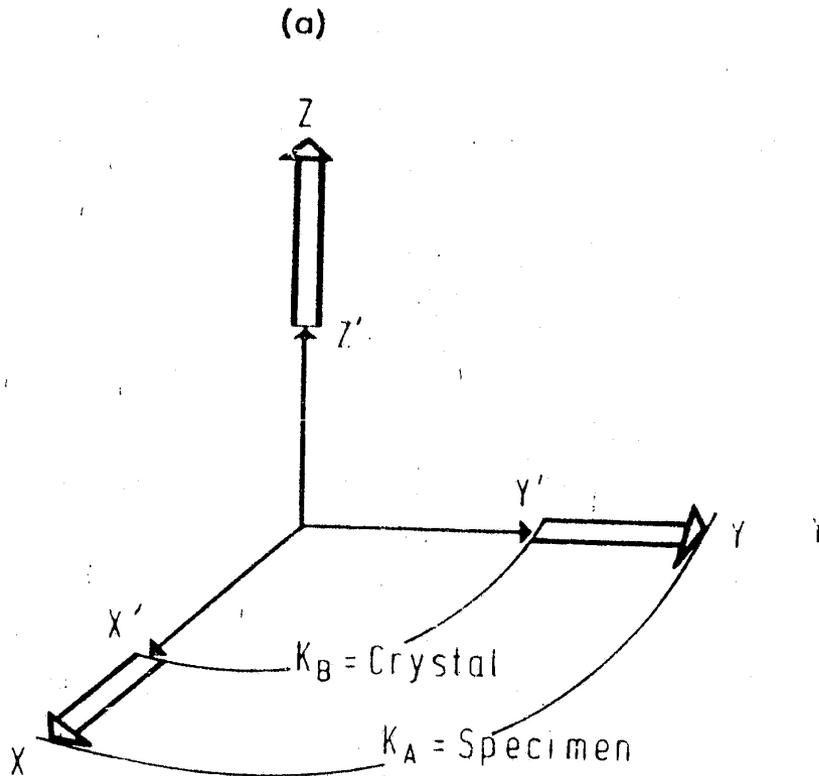
Eixos X, Y e Z do corpo de prova  
 $X = DL$ ,  $Y = DT$  e  $Z = DN$

Eixos X', Y' e Z' do cristal  
 $X' = [100]$ ,  $Y' = [010]$  e  $Z' = [001]$



Ângulos de rotação  $\phi_1$ ,  $\Phi$  e  $\phi_2$   
Descrevem orientação de qualquer cristal

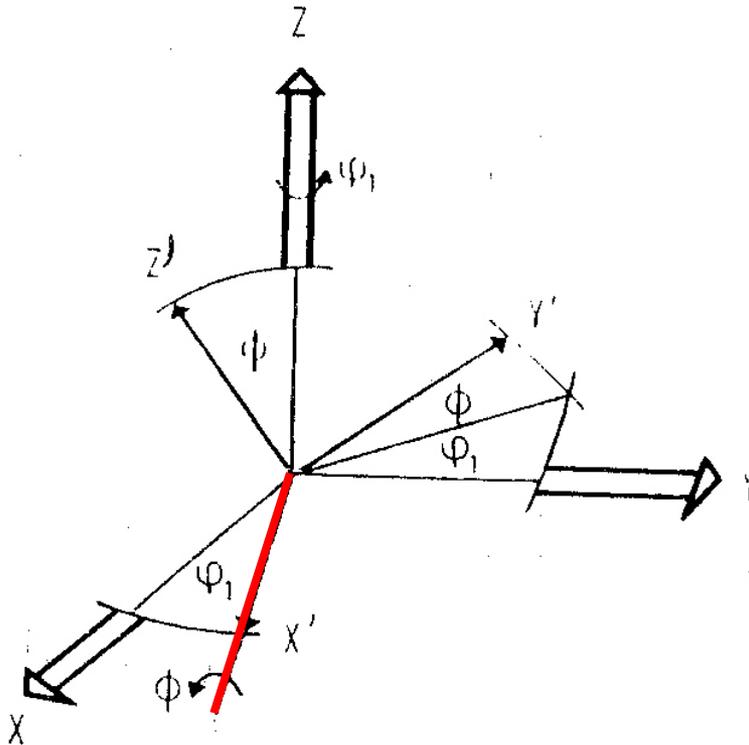
# Rotação $\varphi_1$



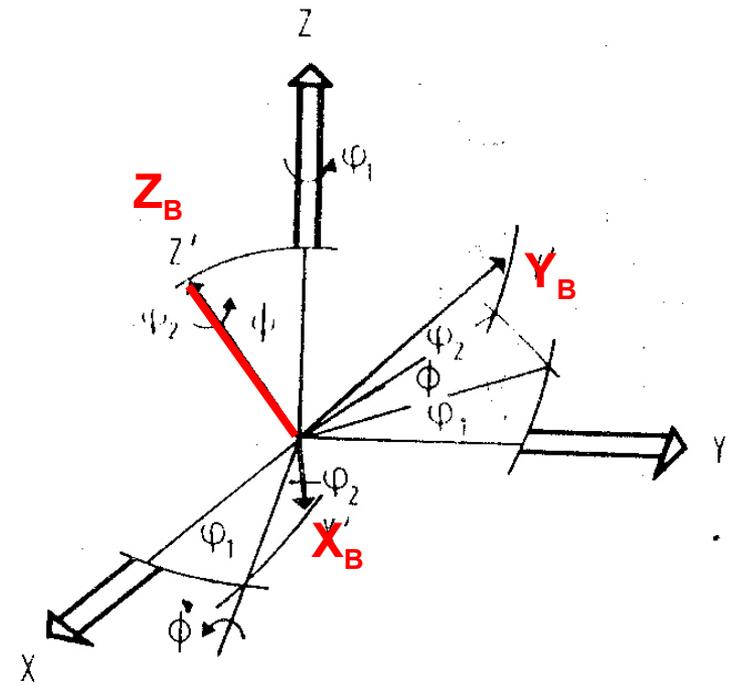
Parte-se de  $X', Y', Z'$  do cristal  
Coincidente com  $X, Y, Z$  da corpo de prova

Rotação 1. Aplica-se  $\varphi_1$ ,  
uma rotação em torno de  $Z$ .  
Chega-se a  $X', Y', Z'$  provisórios

# Rotações $\Phi$ e $\varphi_2$



**Rotação 2:** Aplica-se rotação  $\Phi$  em torno de  $X'$  provisório gerando  $Y'$  e  $Z'$  provisórios

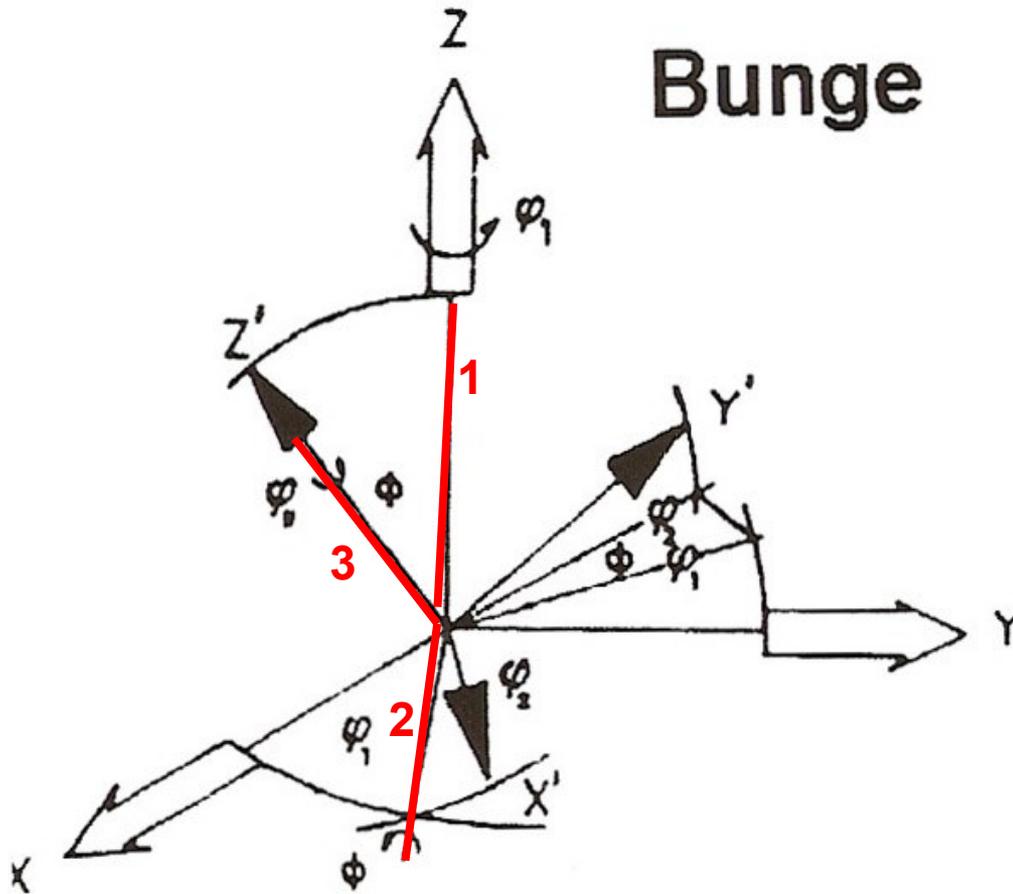


(d)

**Rotação 3:** Aplica-se rotação  $\varphi_2$  em torno de  $Z'$  provisório Chegando a  $X_B$ ,  $Y_B$  e  $Z_B$  do cristal

# Resumindo

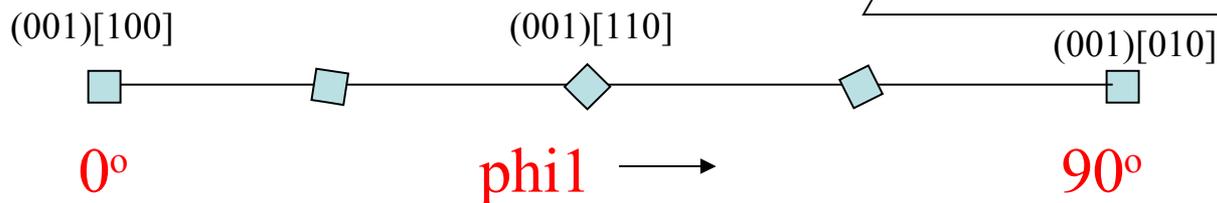
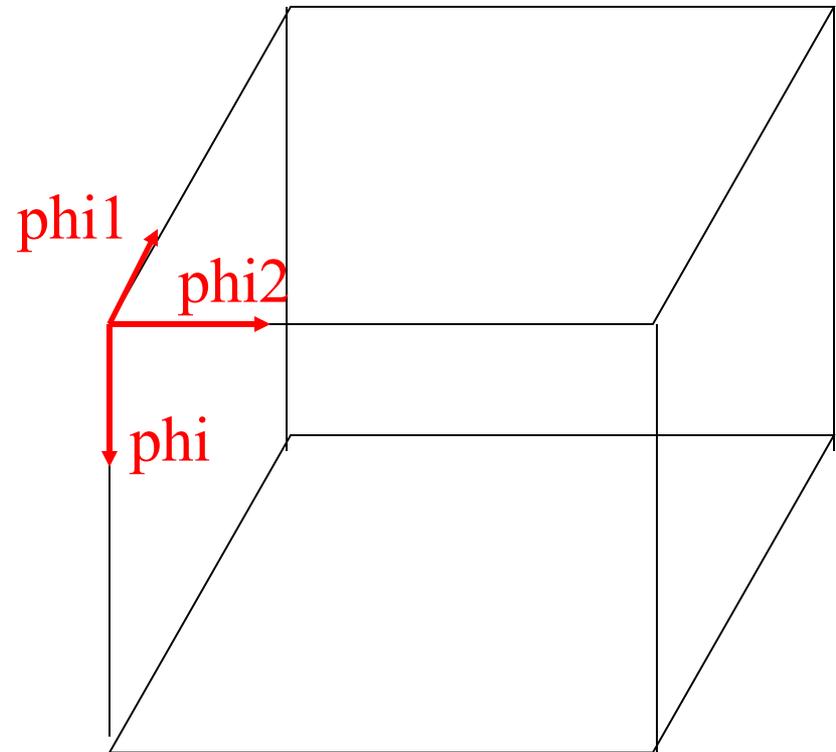
## Bunge



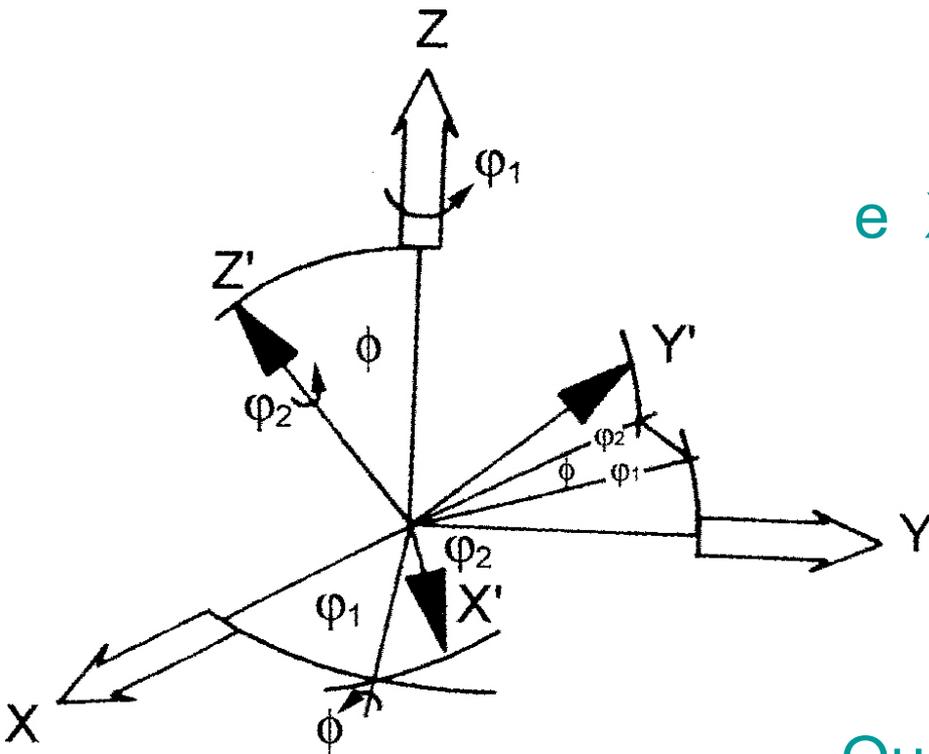
A ordem das rotações  
É relevante:  
 $\varphi_1$  em torno de  $Z$   
 $\Phi$  em torno de  $X'$   
E  $\varphi_2$  em torno de  $Z'$

# O espaço de Euler

- Todas as orientações possíveis estão descritas neste cubo.
- A origem é a orientação  $(001)[100]$  .
- Por exemplo, a linha  $\varphi_1$  de  $0$  a  $90^\circ$ , para  $\Phi=0$  e  $\varphi_2=0$  cobre as orientações:



# Caso simples, $\varphi_1=0$ , $\Phi=0$ e $\varphi_2=0$



Sabendo que

$X = DL$ ,  $Y = DT$  e  $Z = DN$

e  $X' = [100]$ ,  $Y' = [010]$  e  $Z' = [001]$

Quando  $\varphi_1=0$  ,  $\Phi=0$  e  $\varphi_2=0$   
 $X$  coincide com  $X'$ ,  $Y$  com  $Y'$   
e  $Z$  com  $Z'$

Ou seja,

$DL$  é  $[100]$  e  $DN$  é  $[001]$

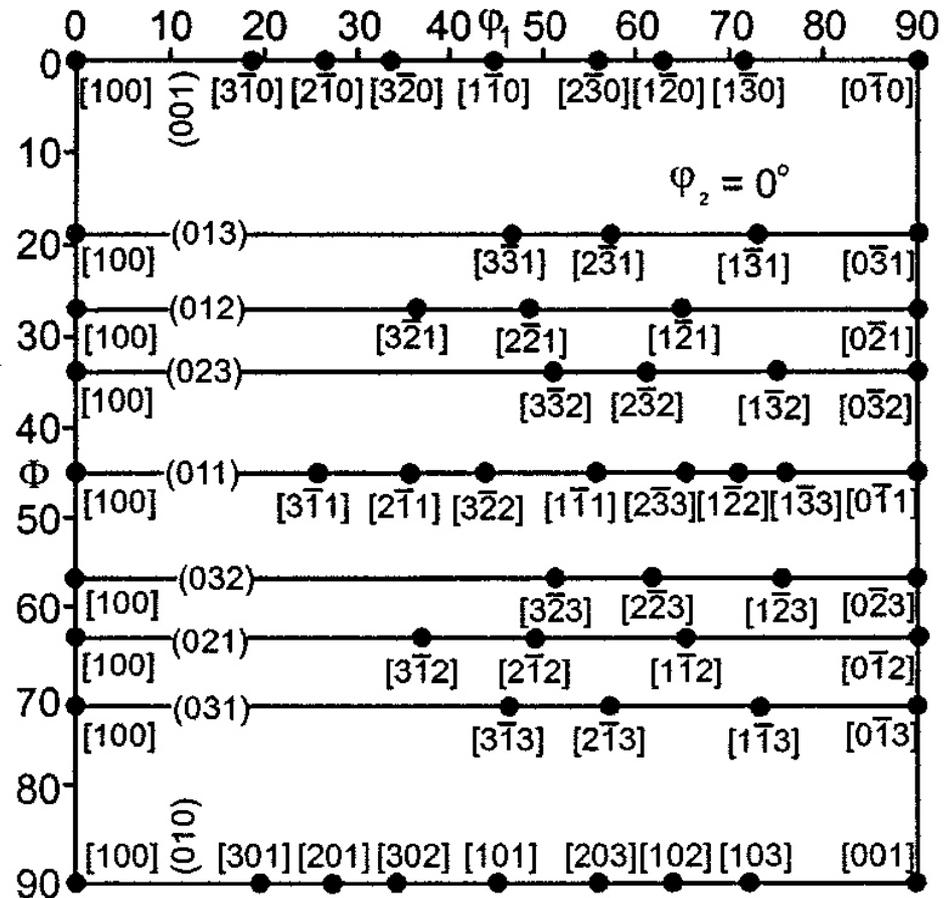
Ou seja,  $(001)$  é o plano // superfície

Orientação desse cristal é

$(001)[100]$

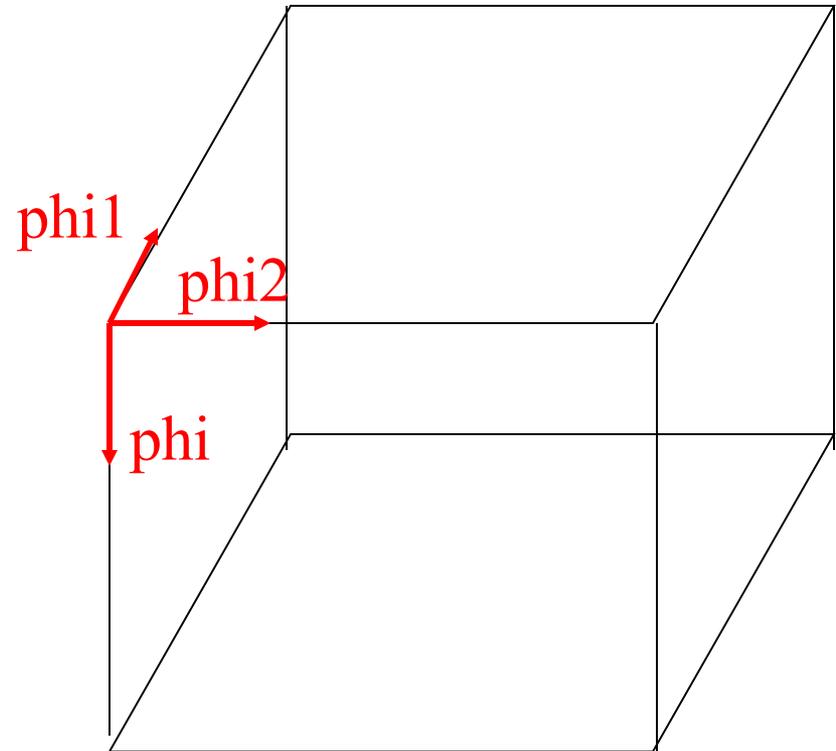
# O corte $\phi_2 = 0$

- as linhas horizontais representam planos paralelos a superfície.
- Em cada linha horizontal, a variação de  $\phi_1$  é a rotação desse plano em torno da sua normal. (lembrar que  $\phi_1$  é uma rotação em torno de z).
- Em geral, linhas verticais não correspondem a uma mesma direção de laminação.



# exercício

- Desenhar no cubo de Euler o corte  $\phi_2 = 45^\circ$



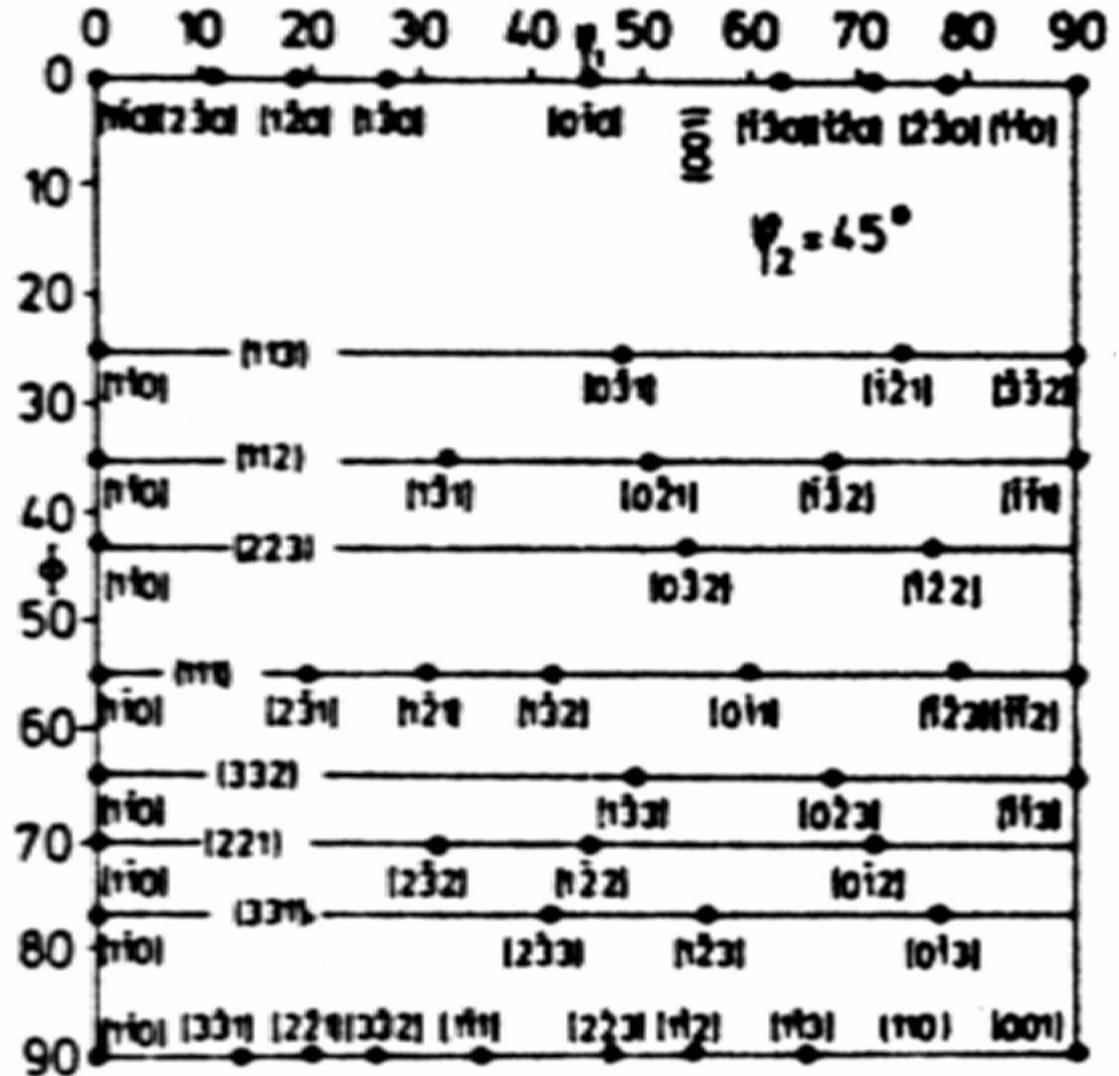
# O corte $\phi_2 = 45^\circ$

O plano  $\phi_2 = 45^\circ$  é muito usado nos aços por incluir vários componentes intensos da textura:

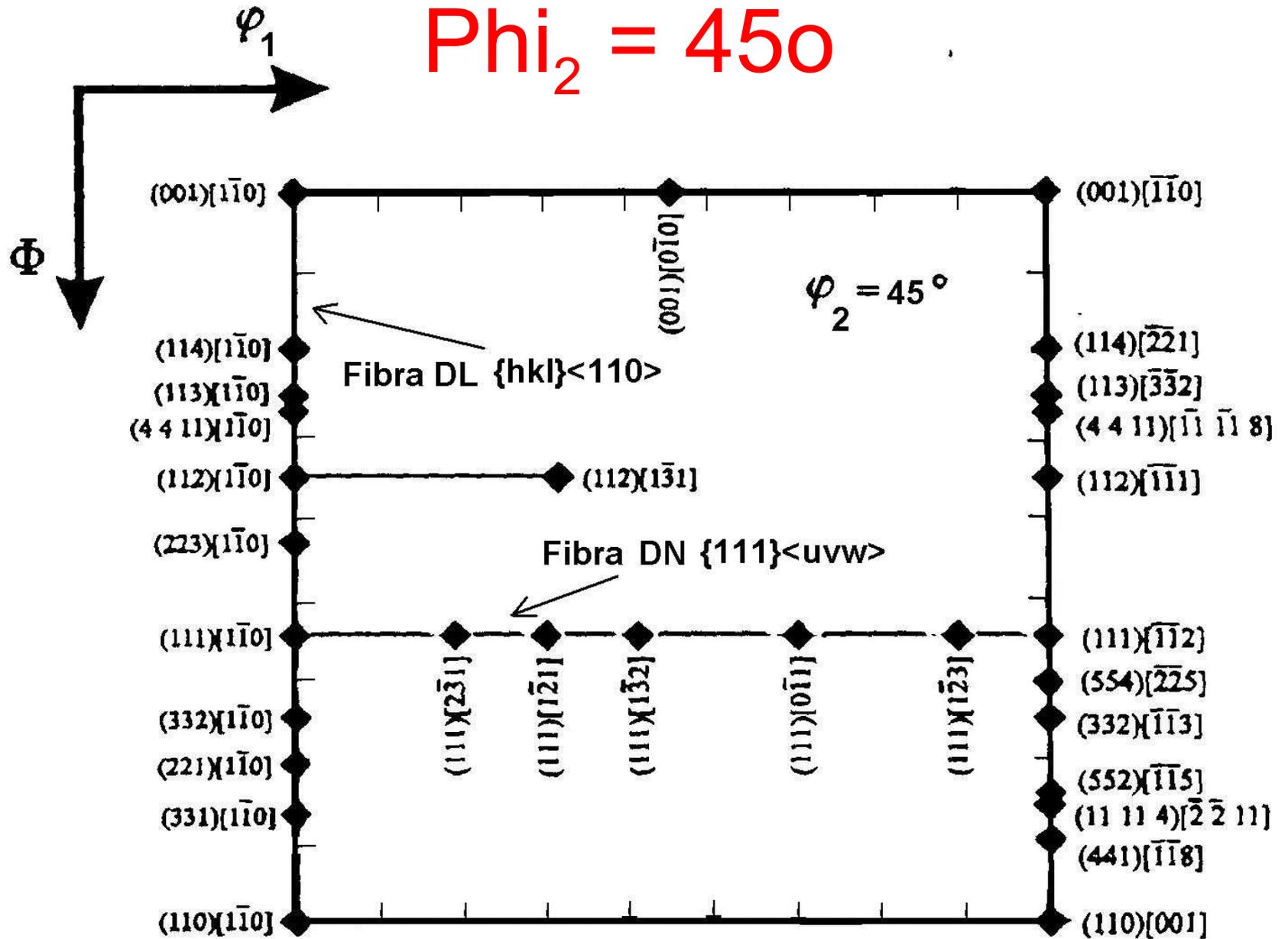
a linha  $\phi_1=0$  tb mostra o plano (100)//superf.

A linha  $\phi_1=0$  mostra [110]//DL.

A linha  $\phi_2=55^\circ$  mostra (111)//superf.



$\Phi_2 = 45^\circ$



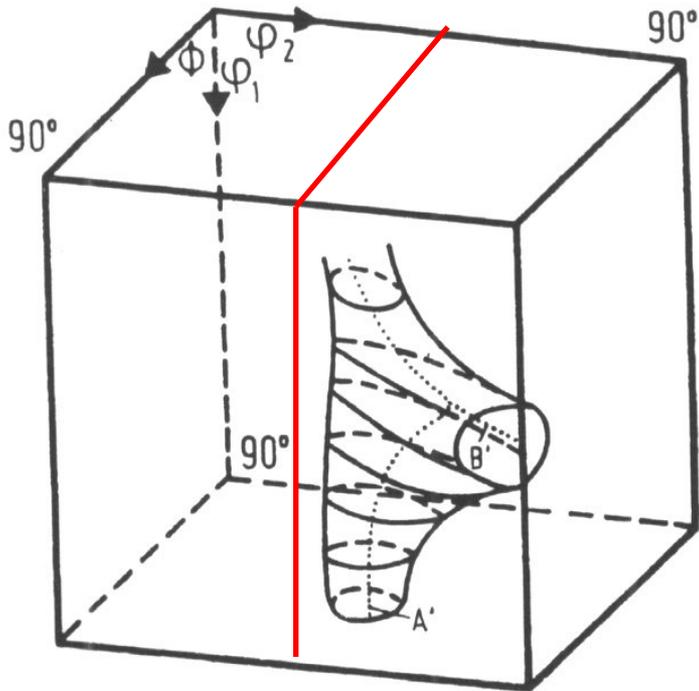
# Métodos de quantificação da distribuição de orientações

- Figura de pólo inversa
- Figura do pólo direta
- Função de distribuição de orientações cristalinas (FDOC, ou ODF: orientation distribution function).

# ODF

- ODF dá a frequência de ocorrência de cada orientação  $\{hkl\}\langle uvw \rangle$  de uma amostra.
- Numa amostra sem textura, ou seja, com cristais orientados ao acaso, todas as orientações são igualmente prováveis. A intensidade relativa de cada orientação é 1.
- Numa amostra com textura, cada orientação terá intensidade  $X$  vezes a aleatória

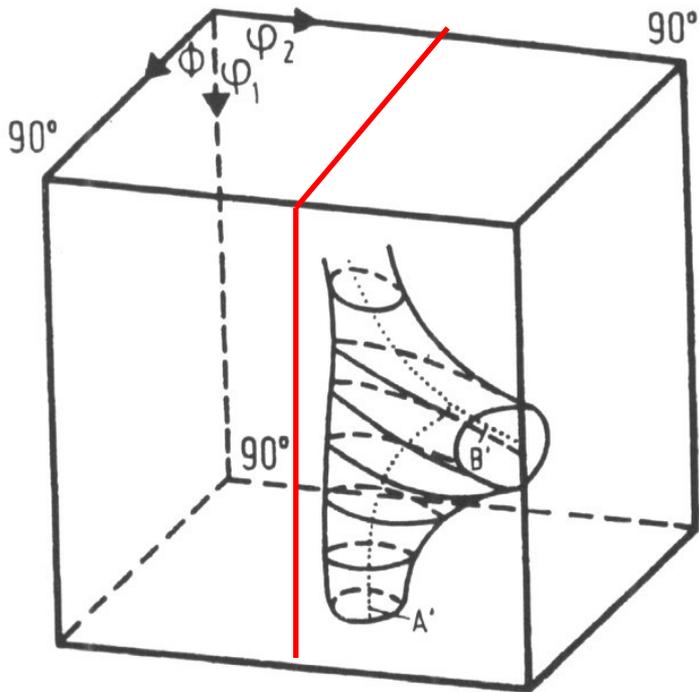
# Superfície de isointensidade



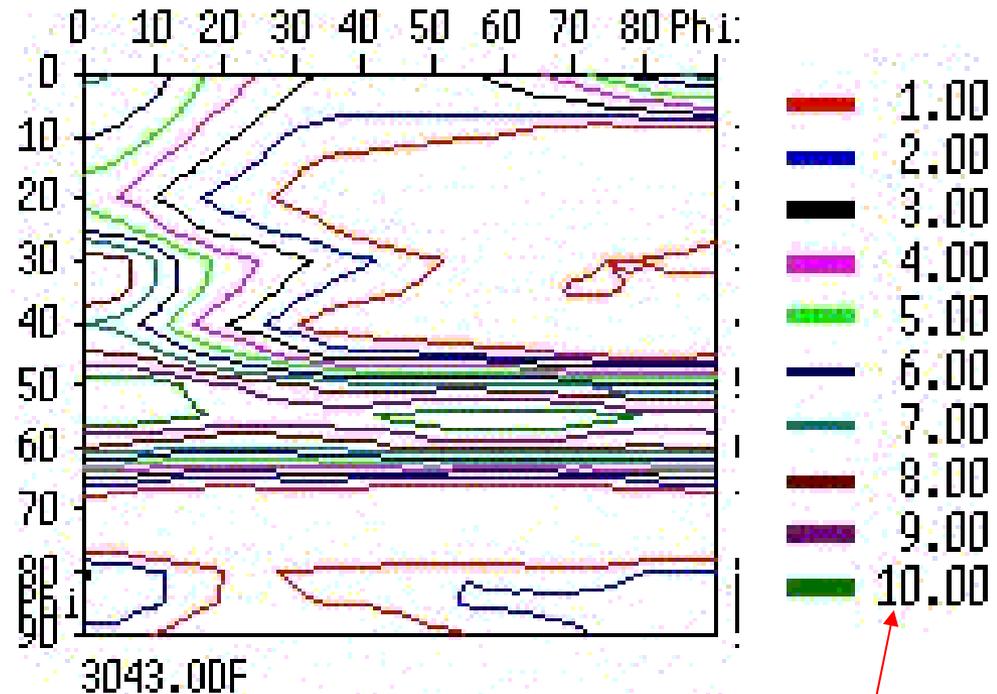
- Superfície que apresenta os pontos do espaço de Euler que tem a mesma intensidade.

No Espaço de Euler é inconveniente representar graficamente mais de uma superfície de isointensidade

# linhas de isointensidade



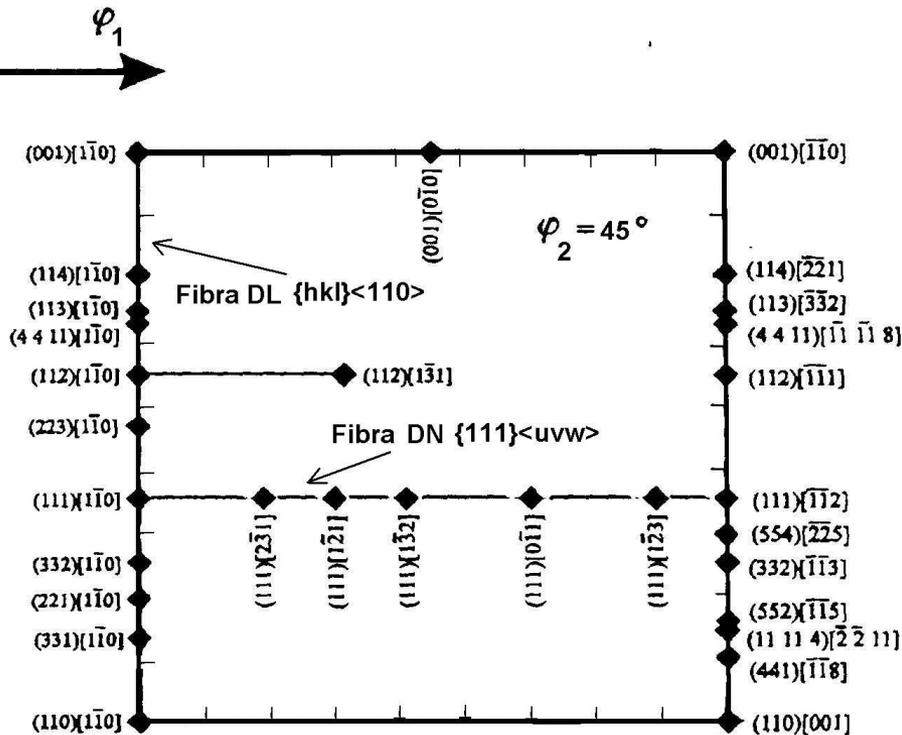
Quando corto uma superfície  
vejo linhas de isointensidade.  
Um plano do Espaço de Euler  
contem várias curvas de nível



Phi2: 15

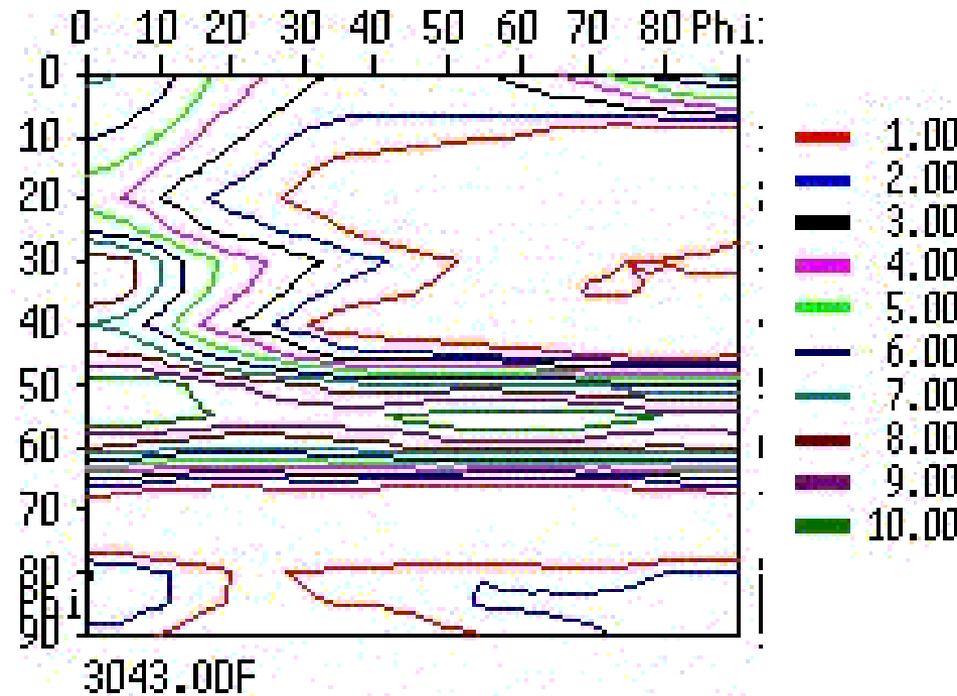
Num corte do espaço de Euler  
Posso representar várias isolinhas

# Isolinhas



Mapa das posições de algumas Orientações importantes no Corte do espaço de Euler

Um resultado experimental:



ODF mostra que essa amostra tem Forte componente de textura ( $I_R > 10$ ) Com orientação (111)[110]

# exercício

- Distribuir folha de exercícios sobre Textura.
- Gabarito estará no moodle.

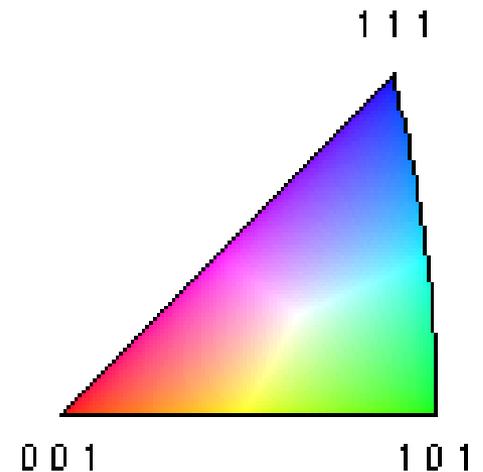
# Orientação de cada grão, por EBSD



Atribuo uma cor a cada orientação de plano, ou direção.

Neste caso, grãos com (111)// superf são azuis  
Grãos com (001)// superf são vermelhos, por exemplo.

Não é possível representar na mesma imagem a orientação do plano e direção, apesar da informação ser disponível.



# Literatura

- Capítulo “Fundamentos de metalografia quantitativa” do livro Técnicas de análise microestrutural, de A.F. Padilha e F. Ambrozio Filho.
- Capítulo “Textura Cristalográfica” da apostila “Deformação, Recristalização e Textura” do Prof. Carlos SC Viana, edição da ABM, 2001.
- Capítulo 12 “Textura Cristalográfica” do livro “Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura”...” de A.F.Padilha e F. Siciliano.

# Sites interessantes

- [http://www.texture.de/index\\_e.htm](http://www.texture.de/index_e.htm)