

INTRODUÇÃO A CRISTALOGRAFIA APLICADA À DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS PARA MATERIAIS SÓLIDOS

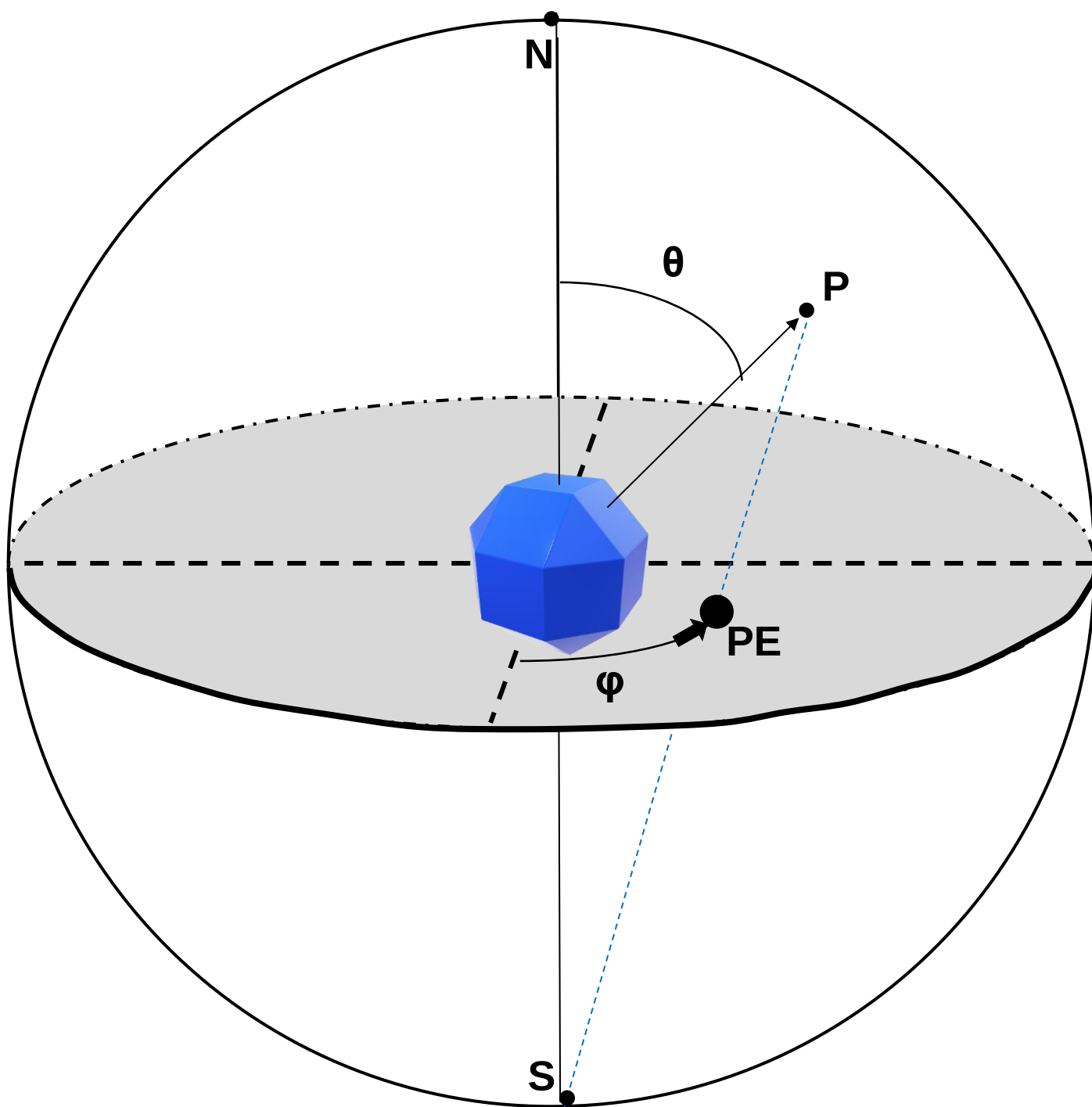
Aula 3 – “Espaço Recíproco e Projeção
Estereográfica”

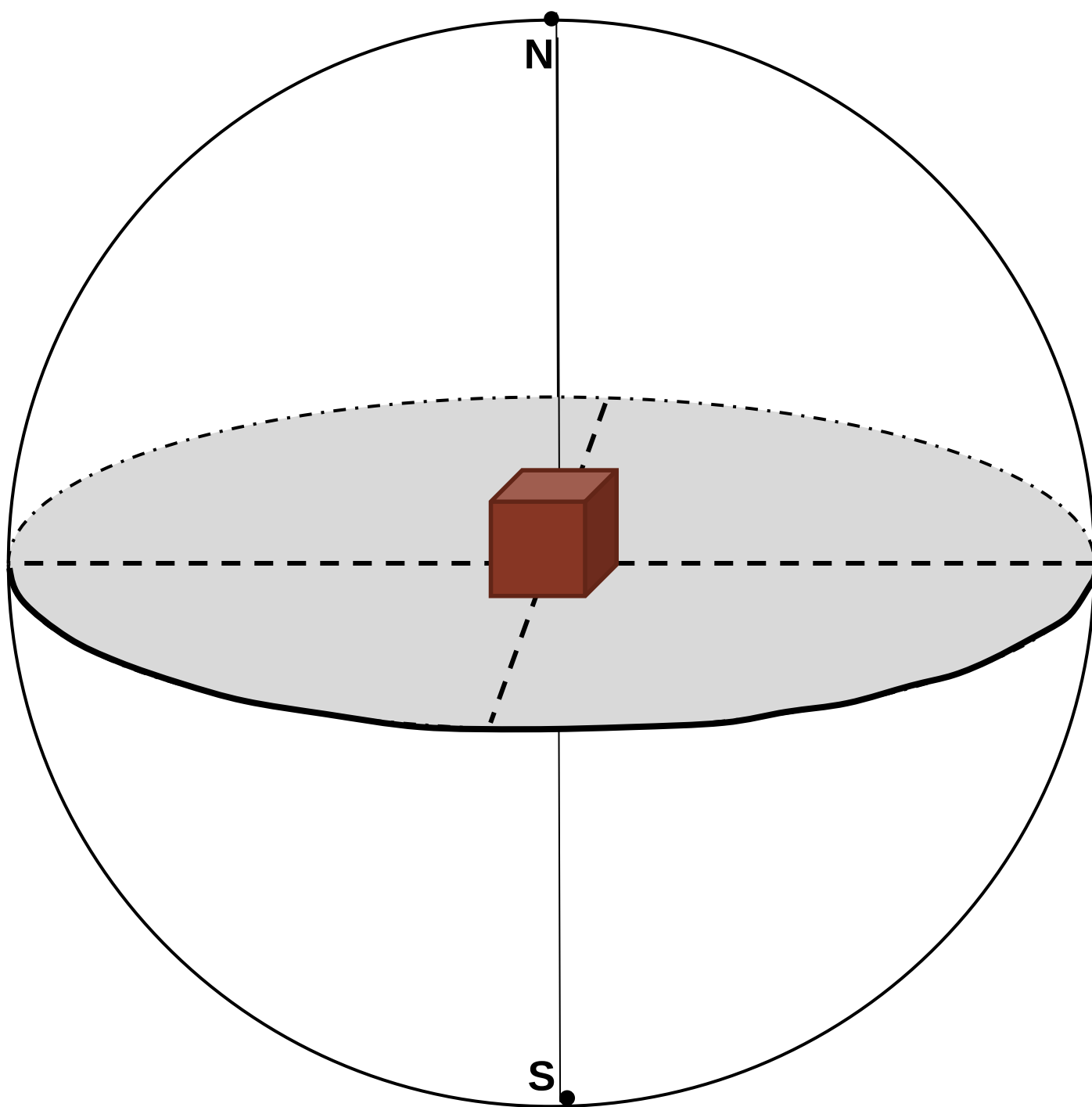
Rede Recíproca

- Aula no quadro

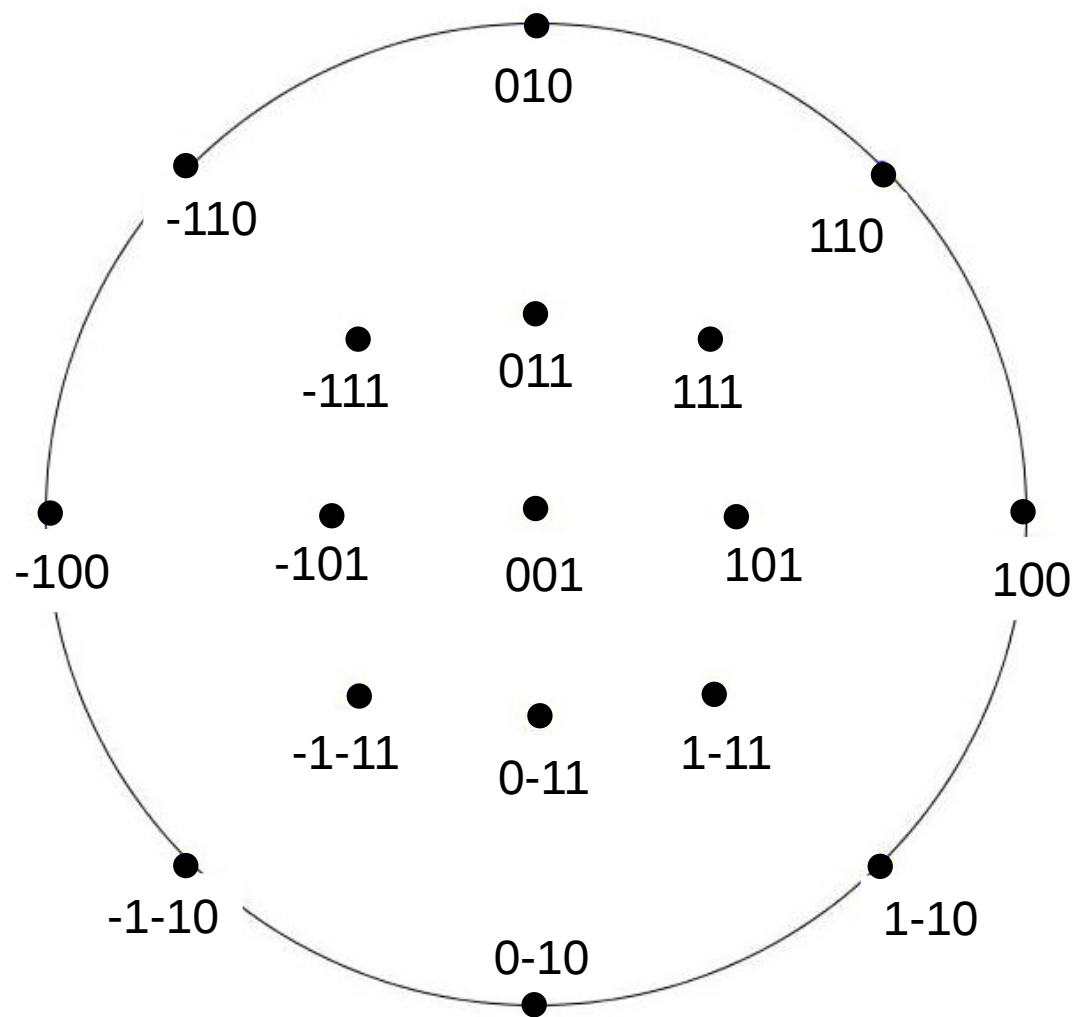
Projeção Estereográfica

- Ferramenta gráfica para simplificar a representação de objetos tridimensionais.
- É uma representação em 2D de um objeto tridimensional localizado no centro de uma esfera.



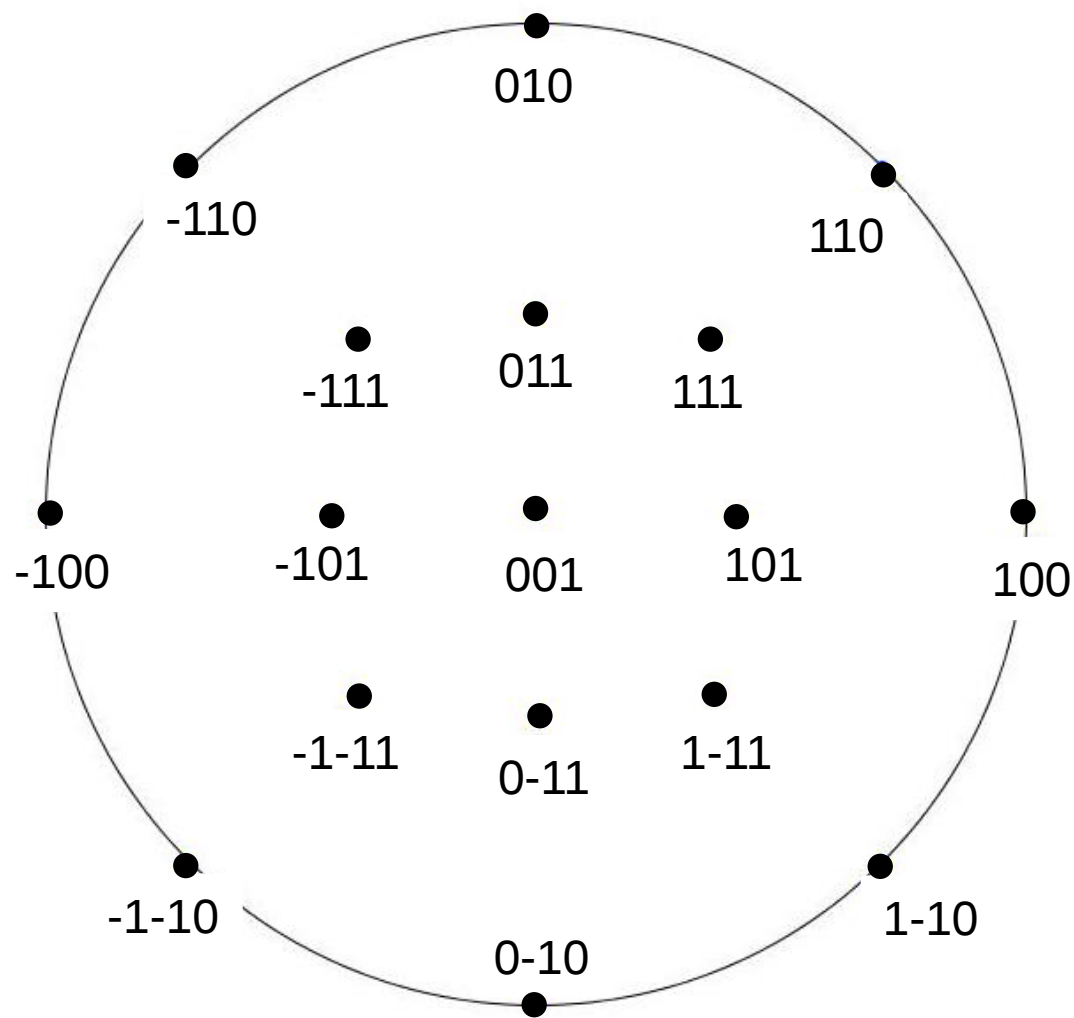


Projeção Estereográfica de uma rede cúbica



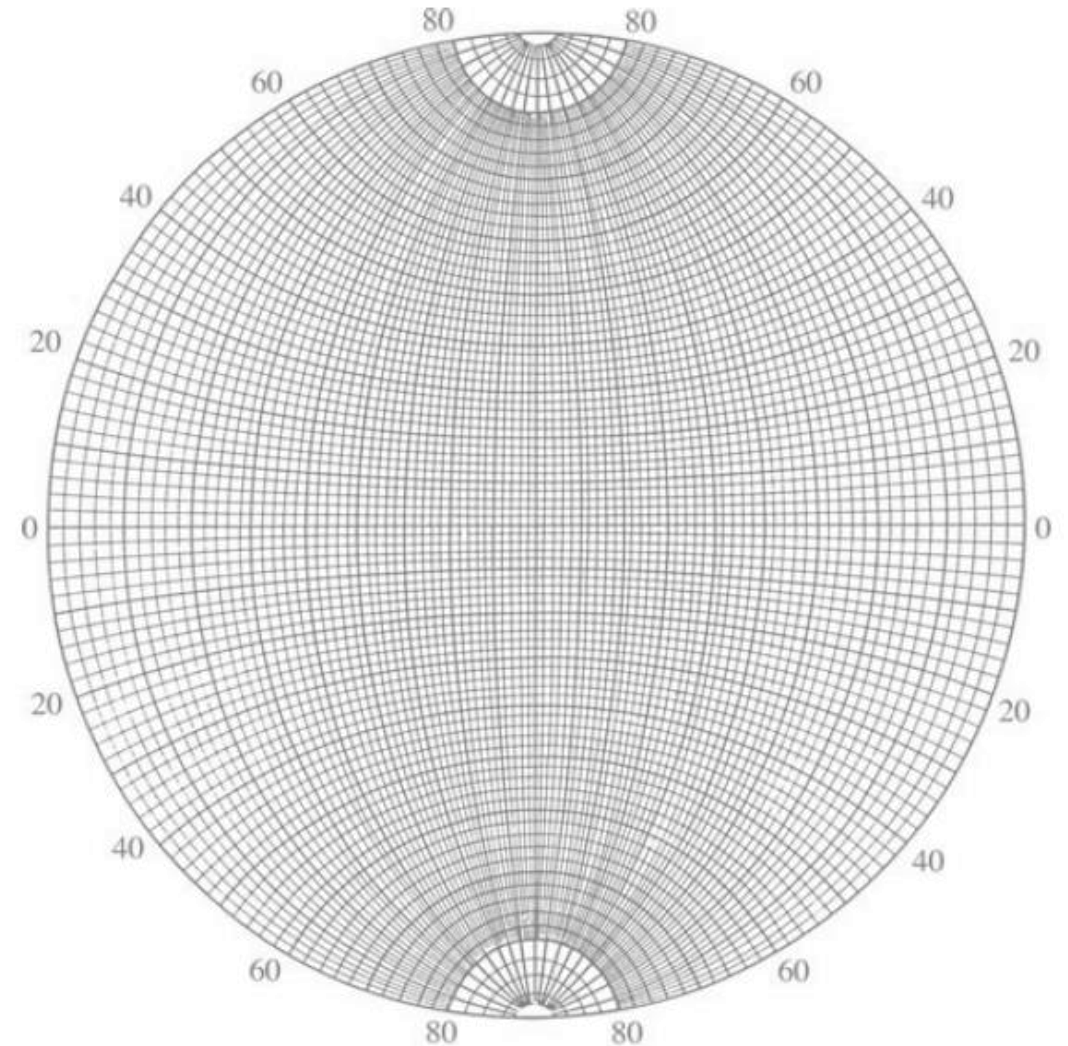
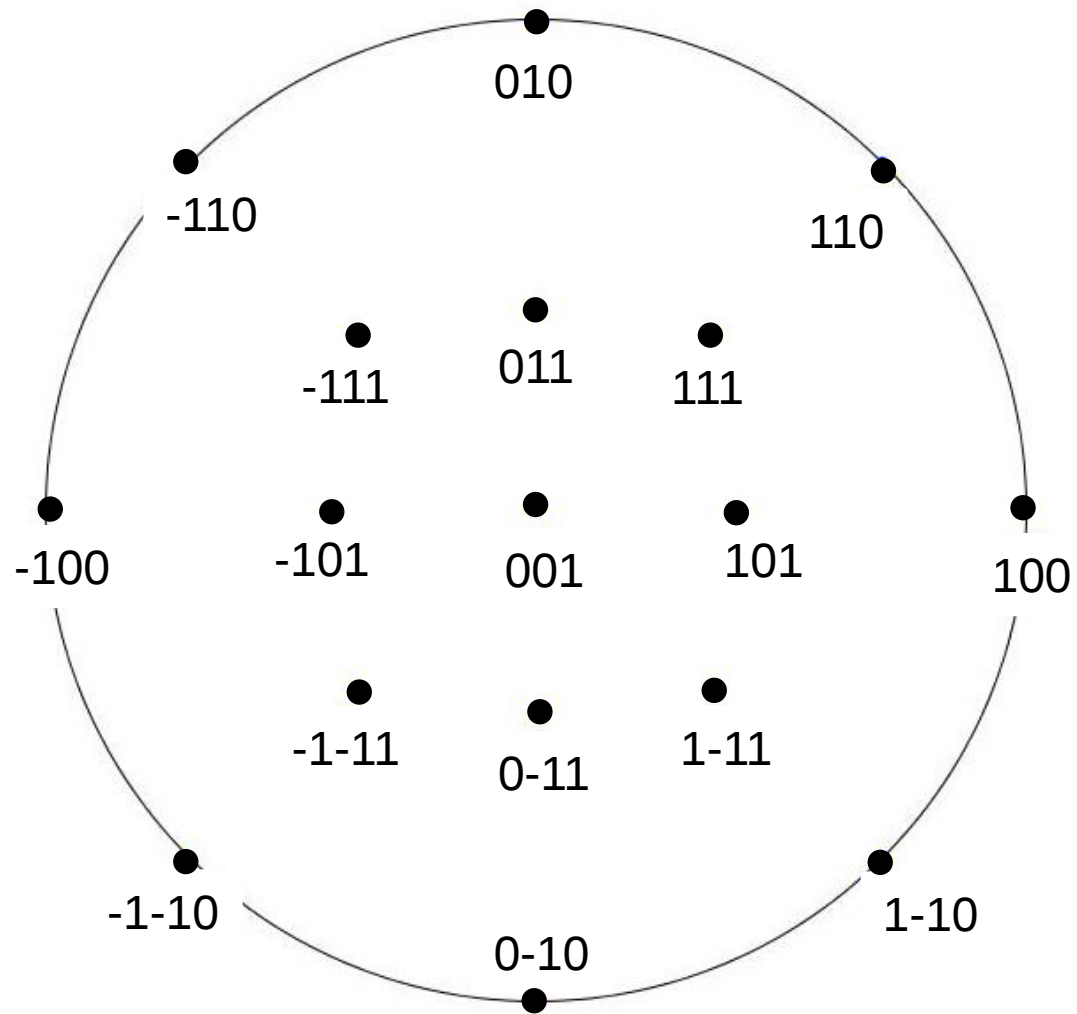
- Os pontos das projeções estereográficas podem representar: direções normais aos planos cristalinos ou direções cristalinas.
- Cuidado: A projeção de planos (hkl) nem sempre é igual a projeção de direções [uvw]. Isso só ocorre no sistema cúbico.
- A projeção ao lado foi feita colocando o eixo [001] da célula cúbica, paralela ao pólo norte.

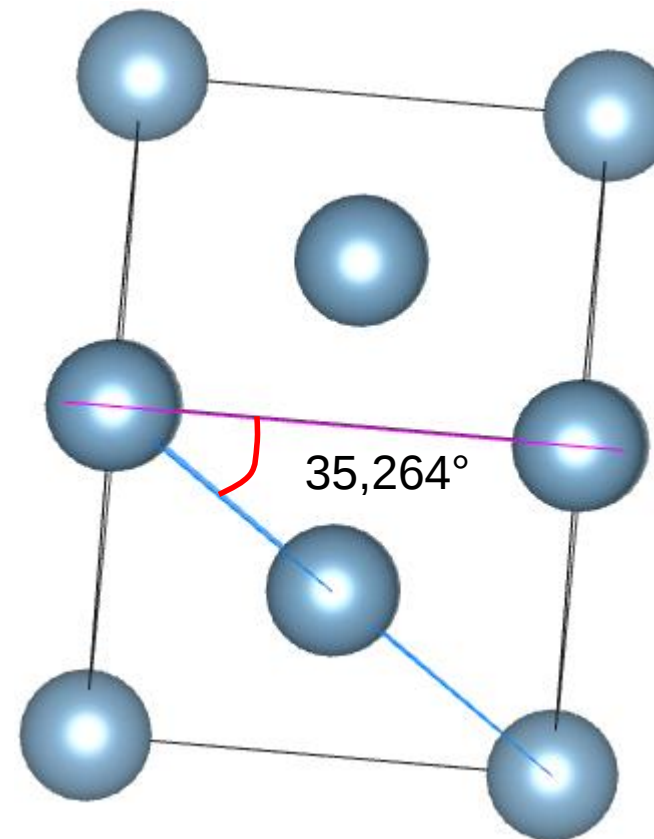
Projeção Estereográfica de uma rede cúbica



- O ângulo entre dois planos é o ângulo entre seus vetores normais.
- A projeção estereográfica conserva esses ângulos, ie, podemos medir ângulos entre planos diretamente da projeção.

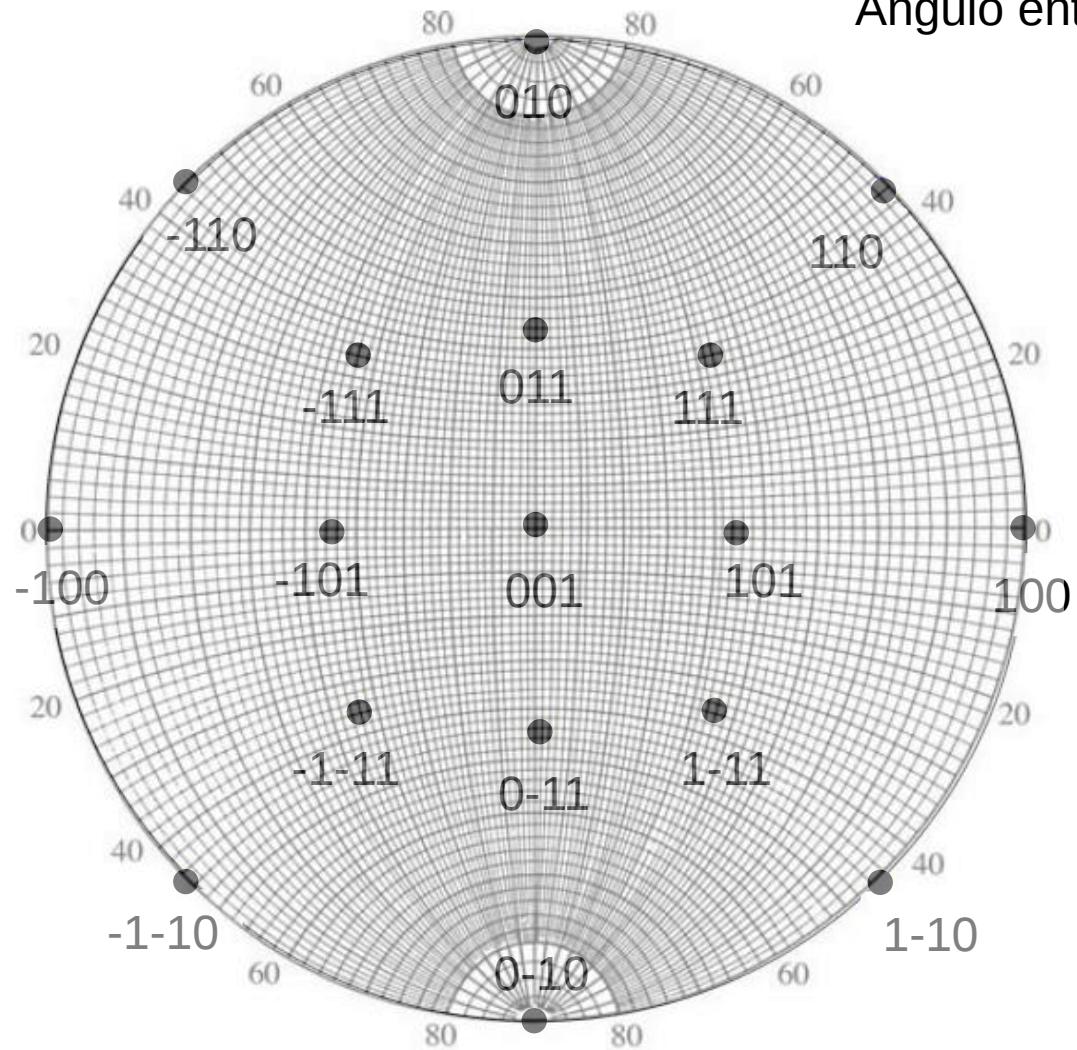
Projeção Estereográfica de uma rede cúbica





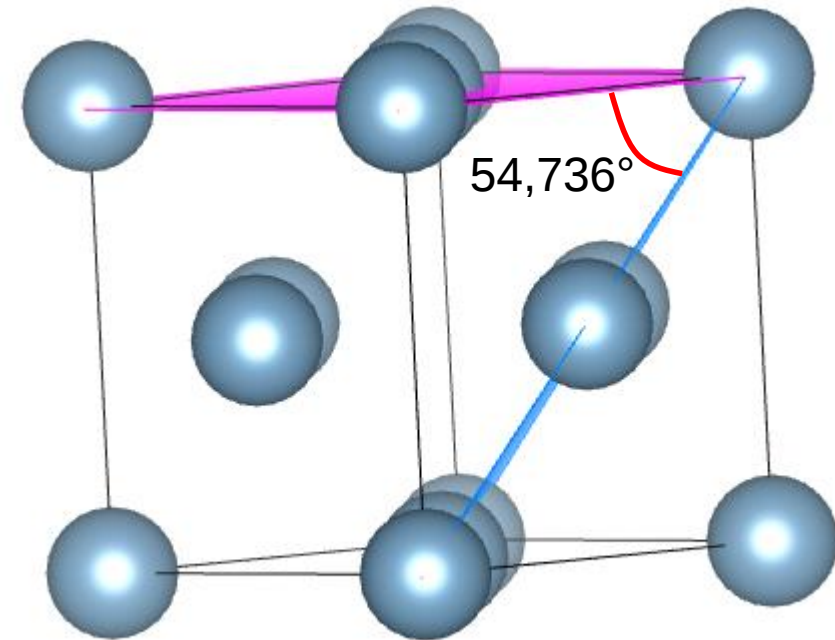
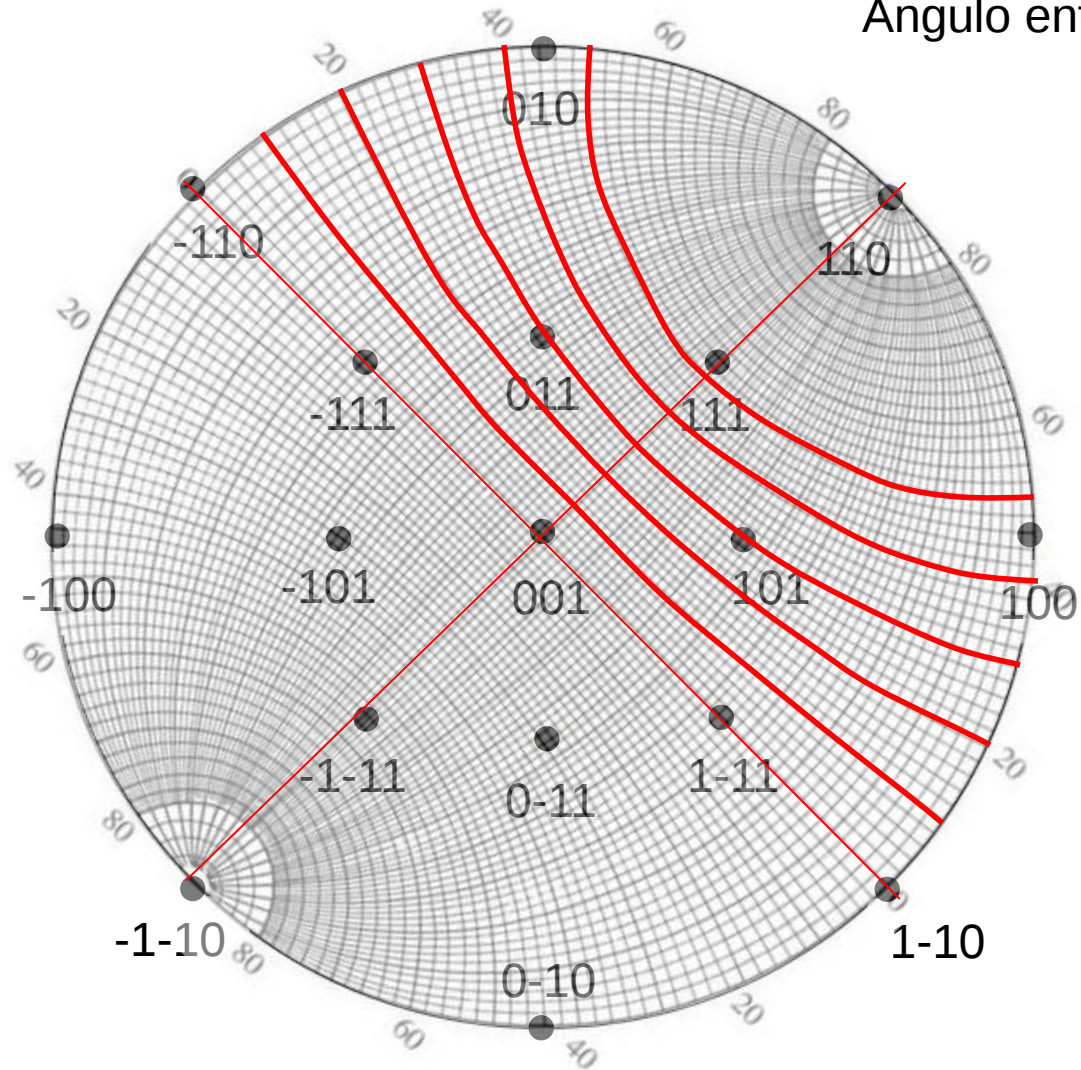
Projeção Estereográfica de uma rede cúbica

Ângulo entre (001) e (111)?

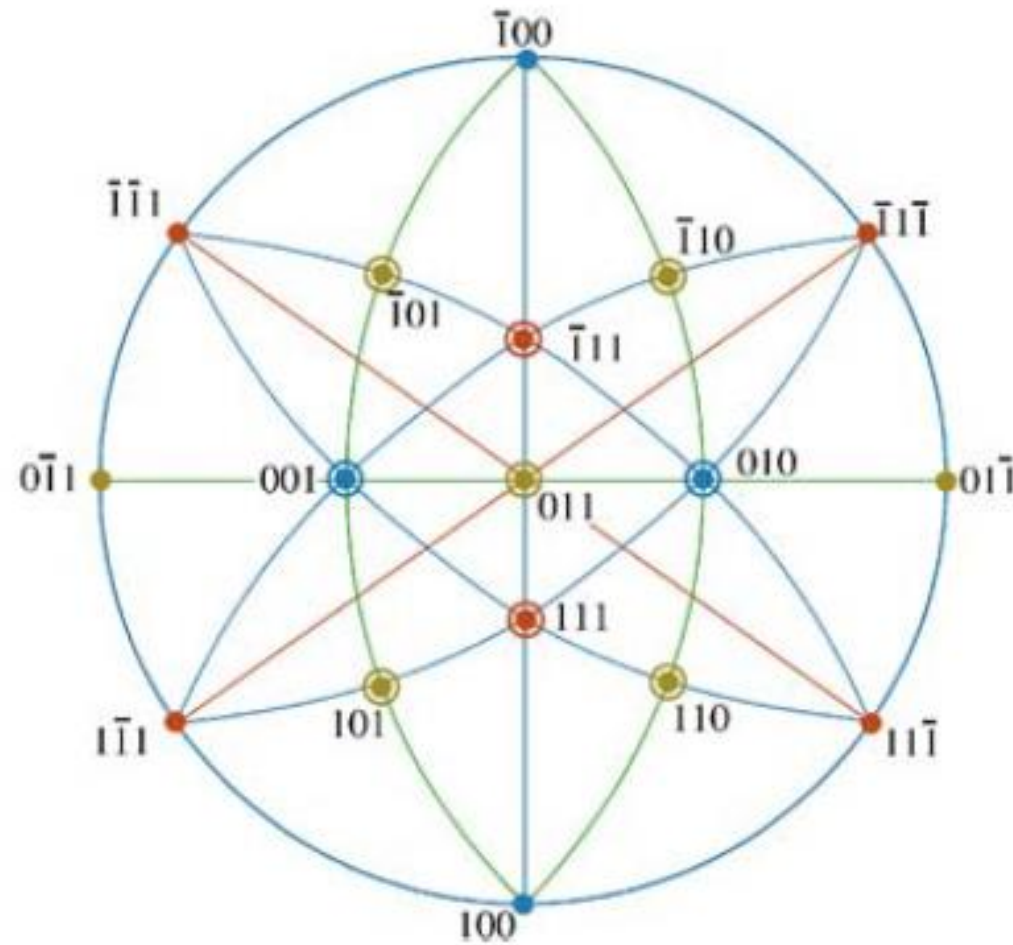


Projeção Estereográfica de uma rede cúbica

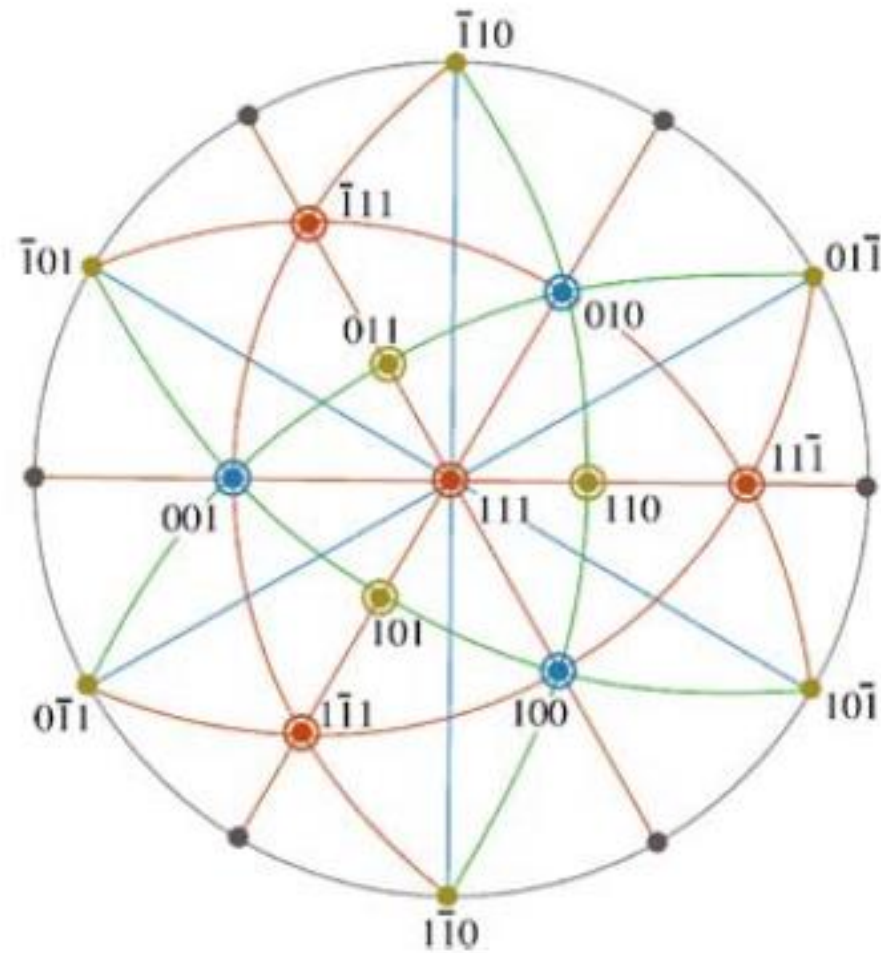
Ângulo entre (001) e (111)?



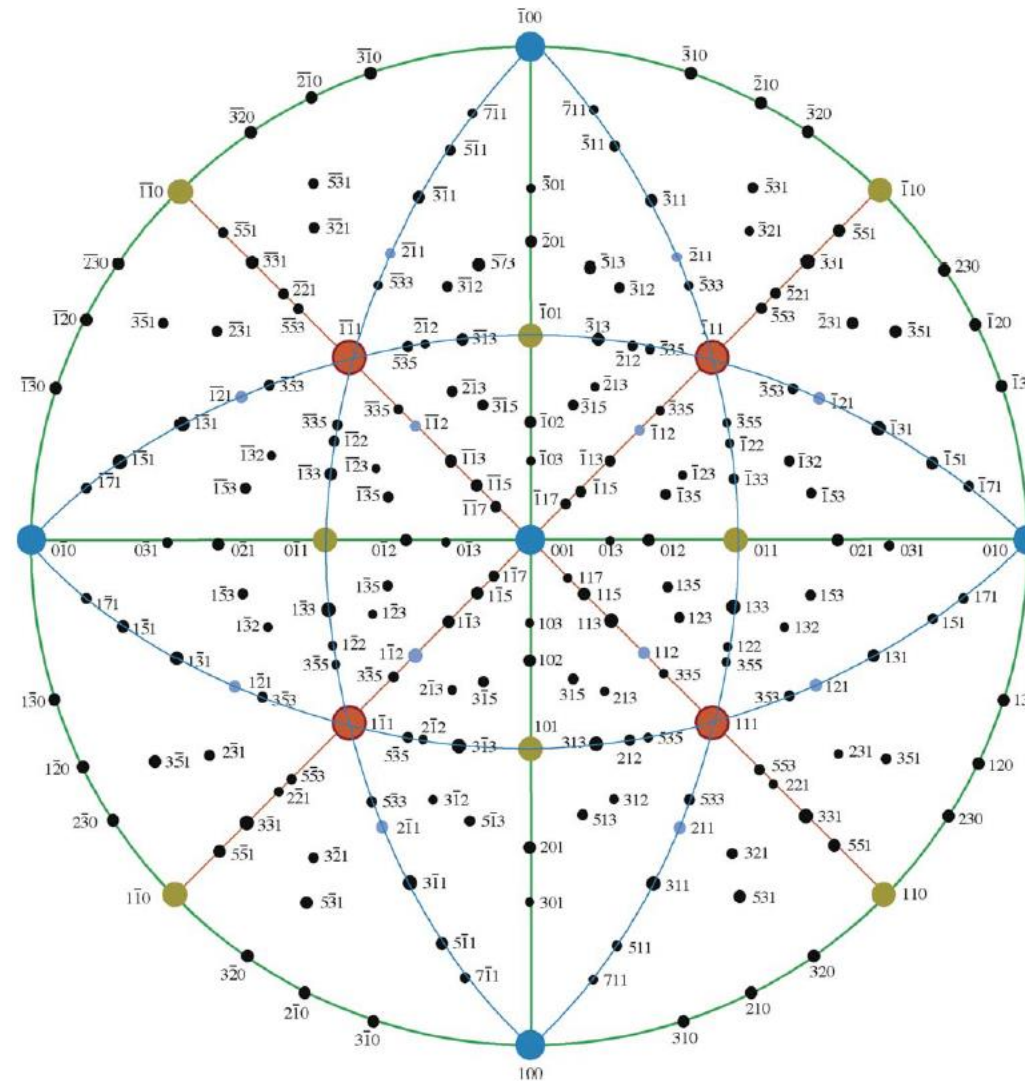
Projeção estereográfica cúbica [011]



Projeção estereográfica cúbica [111]

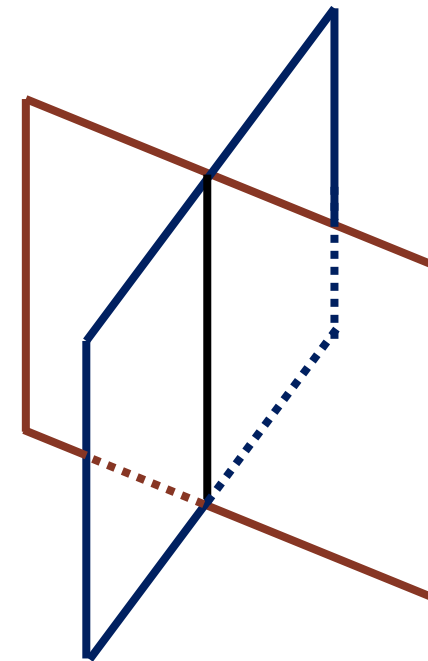
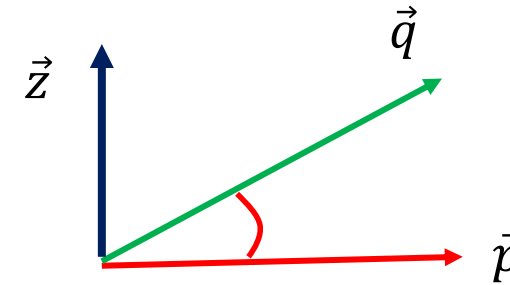


Projeção estereográfica



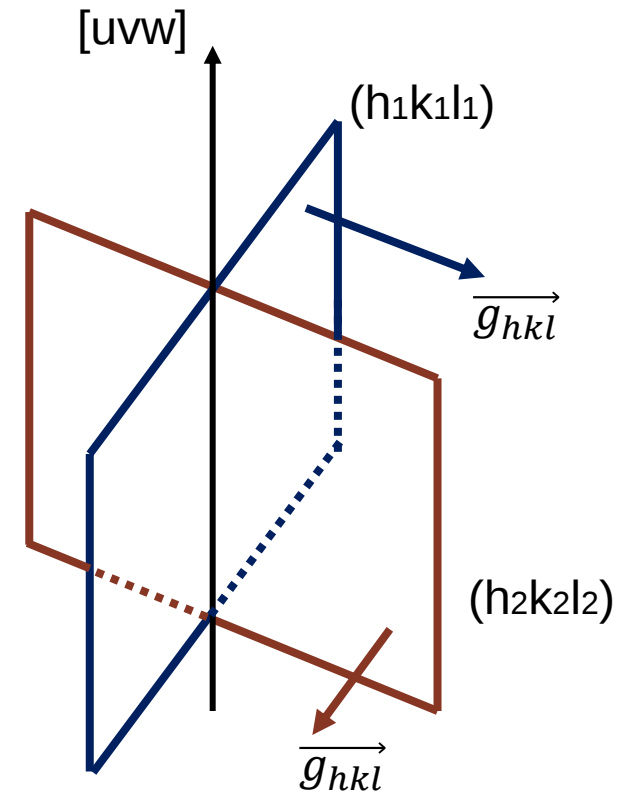
Zona e Eixo de Zona

- Sabemos que o produto vetorial entre dois vetores, $\vec{p}$ e $\vec{q}$ tem como produto um terceiro vetor $\vec{z}$.
- O vetor gerado é perpendicular ao plano formado por $\vec{p}$ e $\vec{q}$.
- Podemos usar o cálculo de produto vetorial para definir uma direção comum a dois planos.



Zona e Eixo de Zona

- Lembrando que podemos representar a normal de cada plano pelo seu vetor $\overrightarrow{g_{hkl}}$.
- Dessa forma se fizermos o produto vetorial entre os vetores $\overrightarrow{g_{hkl}}$ associados a cada um dos planos ao lado, obtemos a direção $\overrightarrow{t_{uvw}}$ que é comum à eles.



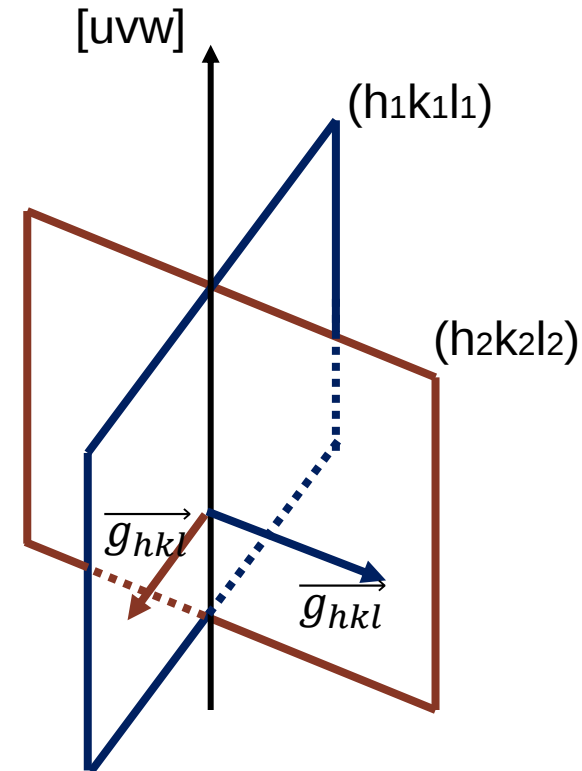
Zona e Eixo de Zona

$$\overrightarrow{g_{h_1k_1l_1}} \times \overrightarrow{g_{h_2k_2l_2}} = V^* \begin{vmatrix} a & b & c \\ h_1 & k_1 & l_1 \\ h_2 & k_2 & l_2 \end{vmatrix}$$

- Exemplo: A direção comum aos planos (111) e (120) é:

$$\vec{t} = -2\vec{a} + 1\vec{b} + 1\vec{c}$$

ou $[\bar{2}11]$

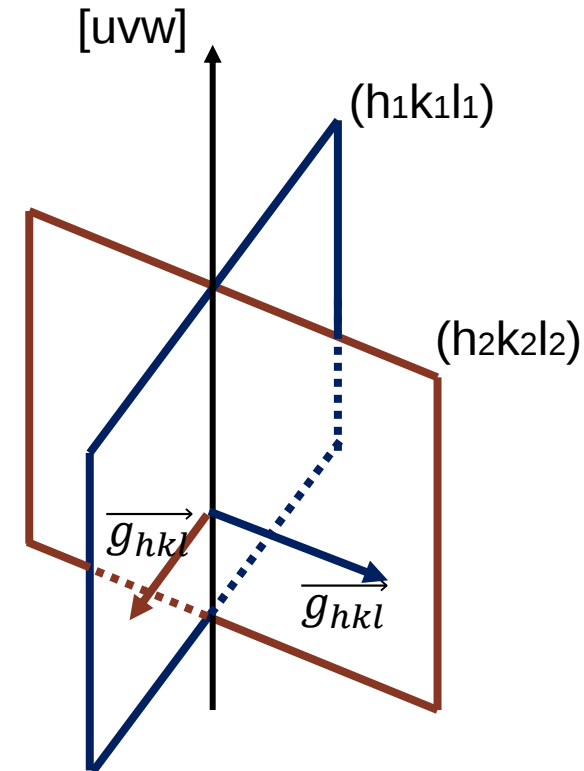


Essa equação funciona em qualquer sistema cristalino!

Zona e Eixo de Zona

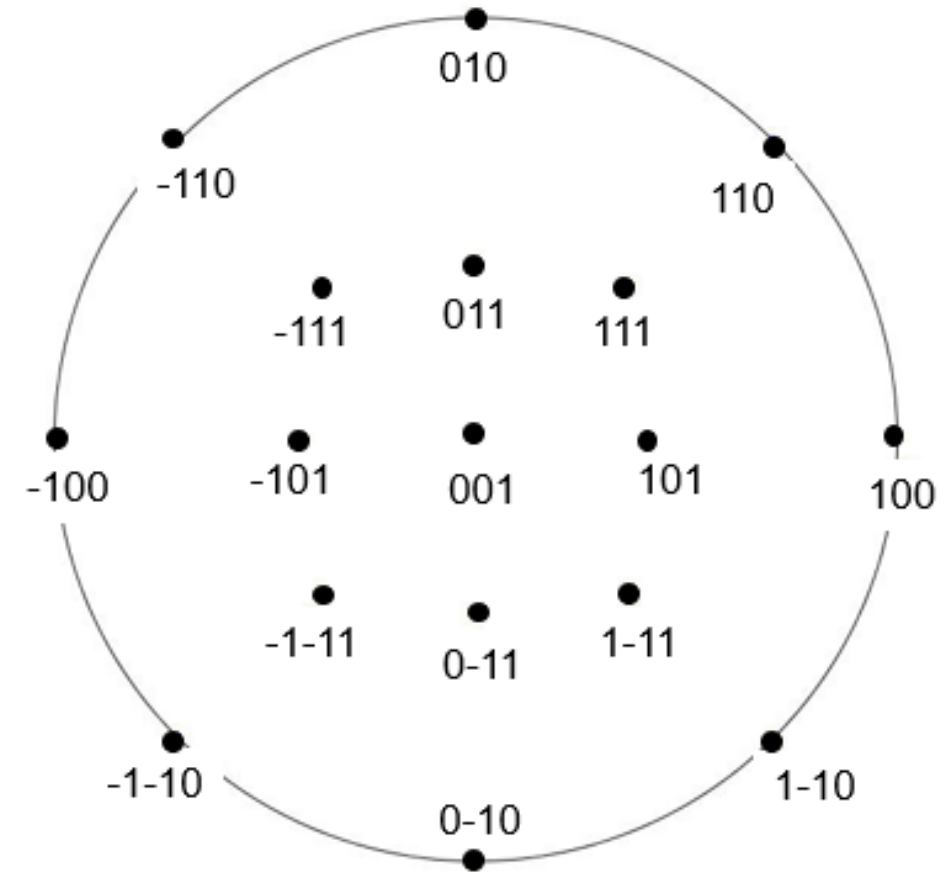
- Os planos comuns a uma direção $[uvw]$ são definidos como pertencentes a zona de $[uvw]$. E a direção $[uvw]$ é definida como eixo de zona.
- Um determinado plano (hkl) vai pertencer à zona de $[uvw]$ quando sua normal for perpendicular ao eixo de zona. Essa condição é obedecida quando:

$$hu + kv + lw = 0 \quad (\text{Equação de zona})$$

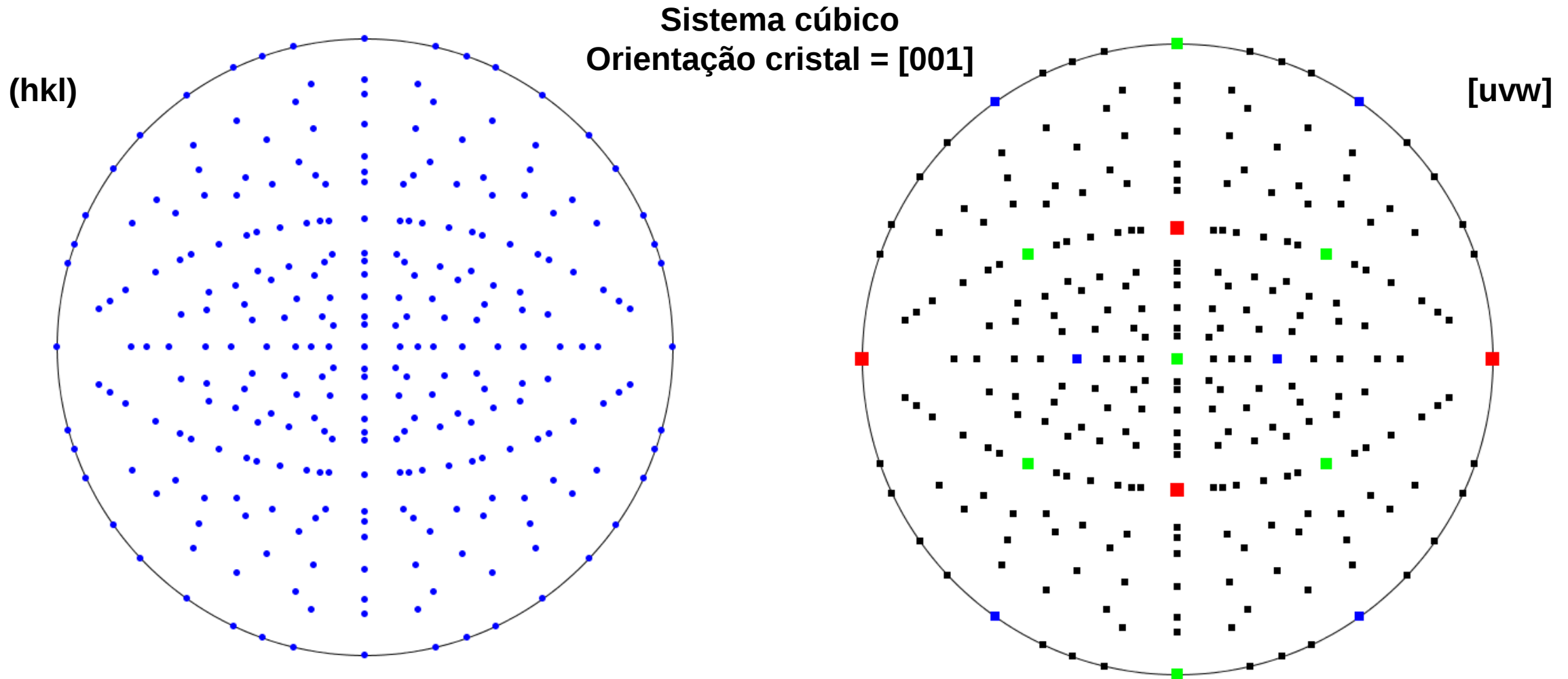


Zona e Eixo de Zona e a Projeção Estereográfica

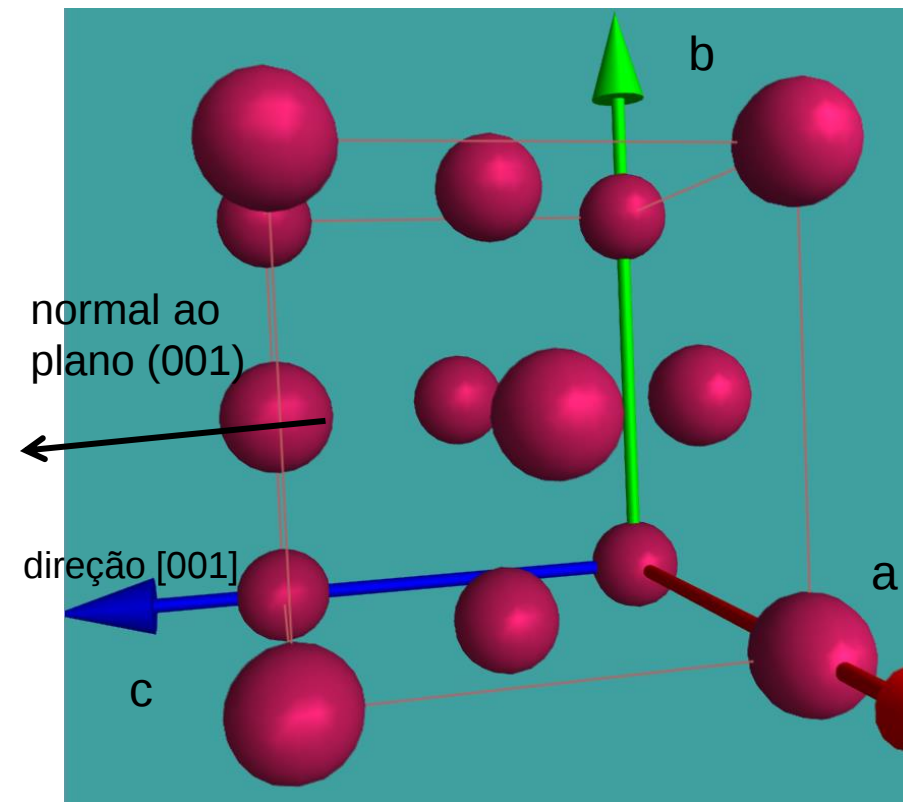
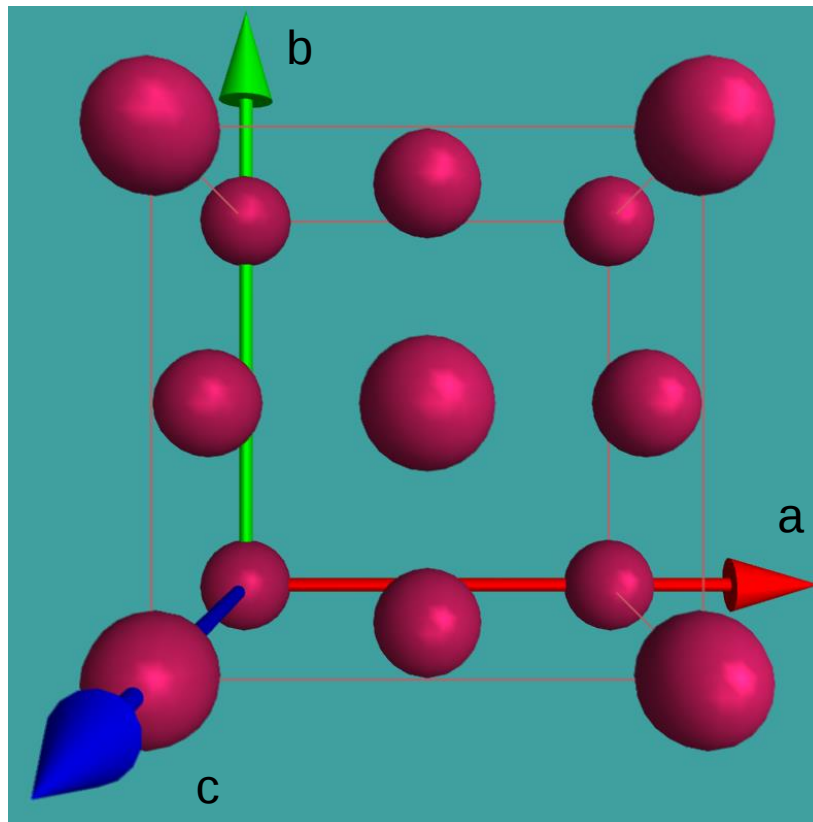
- Os planos que pertencem a uma determinada zona, vão estar posicionados em cima de um grande círculo na projeção estereográfica.
- A projeção estereográfica de um eixo de zona será um ponto. Lembrando que existem dois tipos de projeção: dos planos (hkl) e das direções [uvw]



Zona e Eixo de Zona e a Projeção Estereográfica

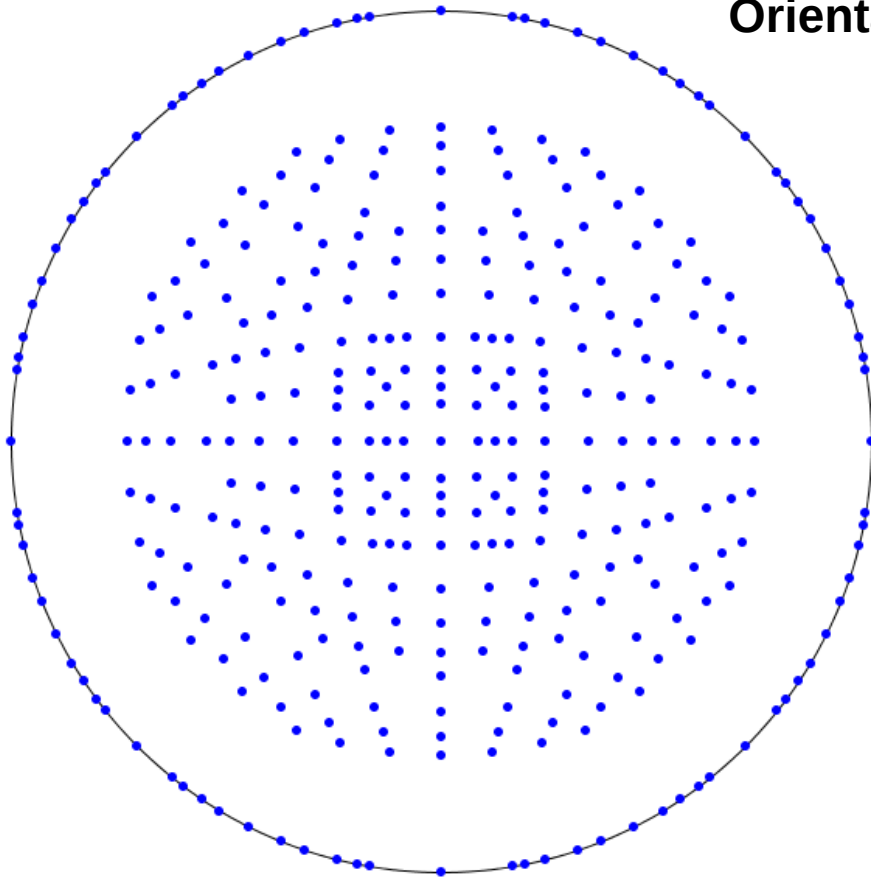


Zona e Eixo de Zona e a Projeção Estereográfica



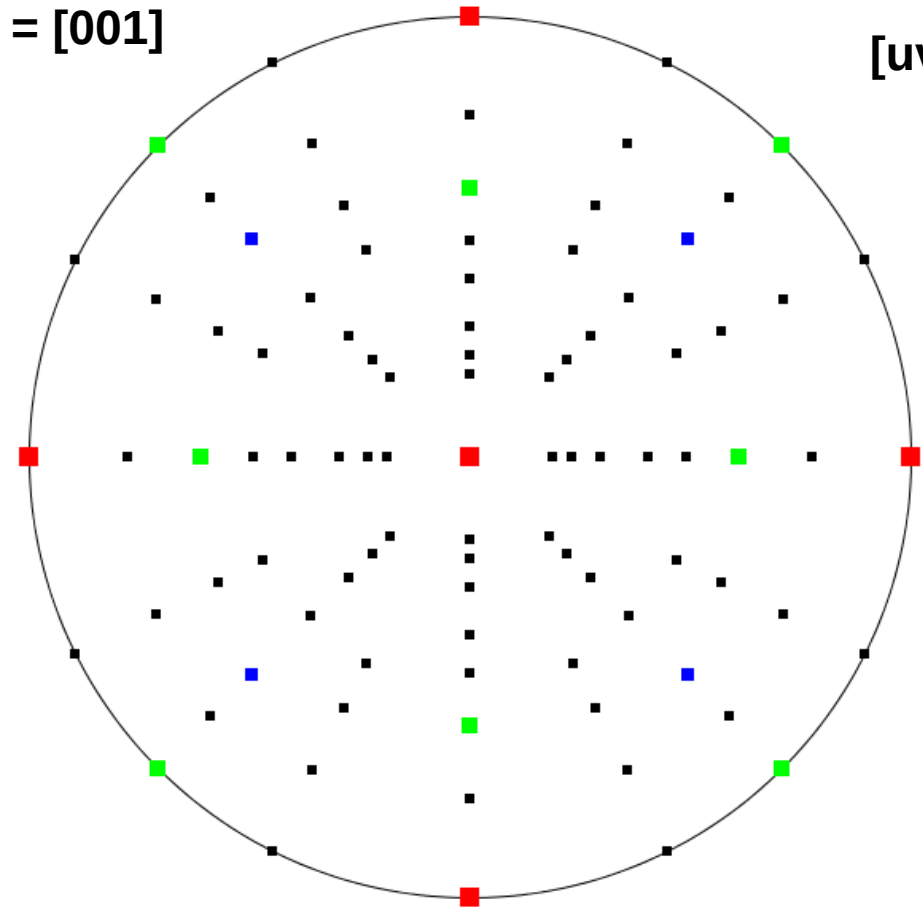
Zona e Eixo de Zona e a Projeção Estereográfica

(hkl)



Sistema tetragonal
Orientação cristal = [001]

[uvw]

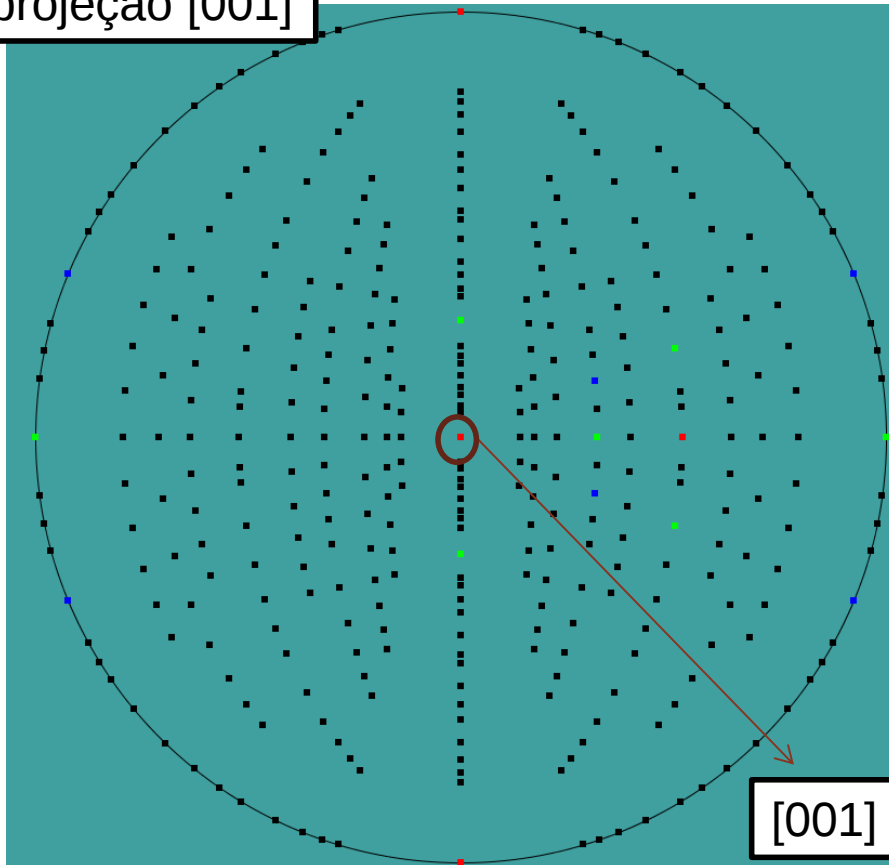


Zona e Eixos de zona

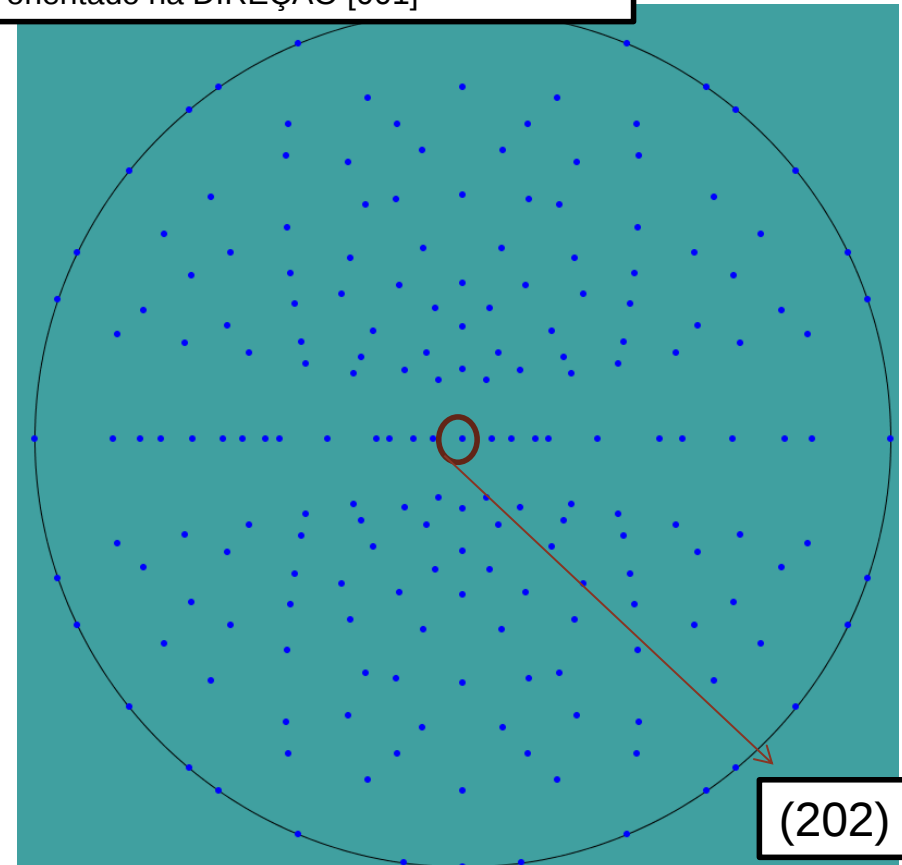
- Ex: Projeções de direção e de planos (suas normais).

Sistema monoclinico.

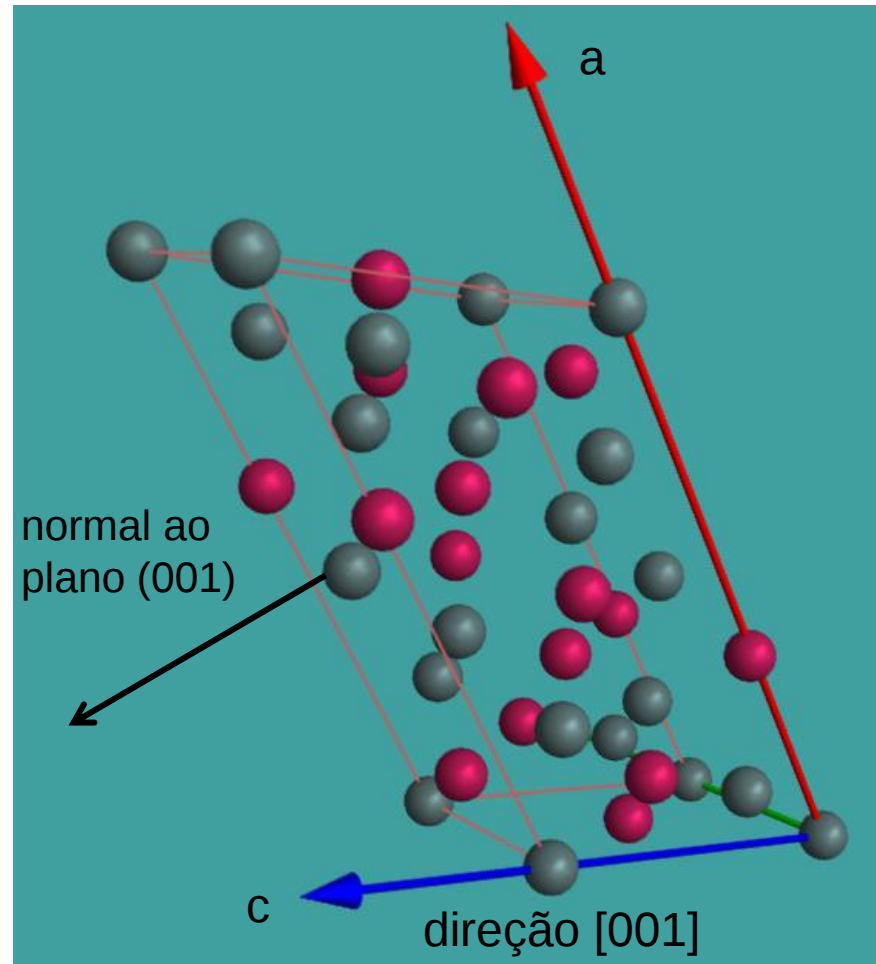
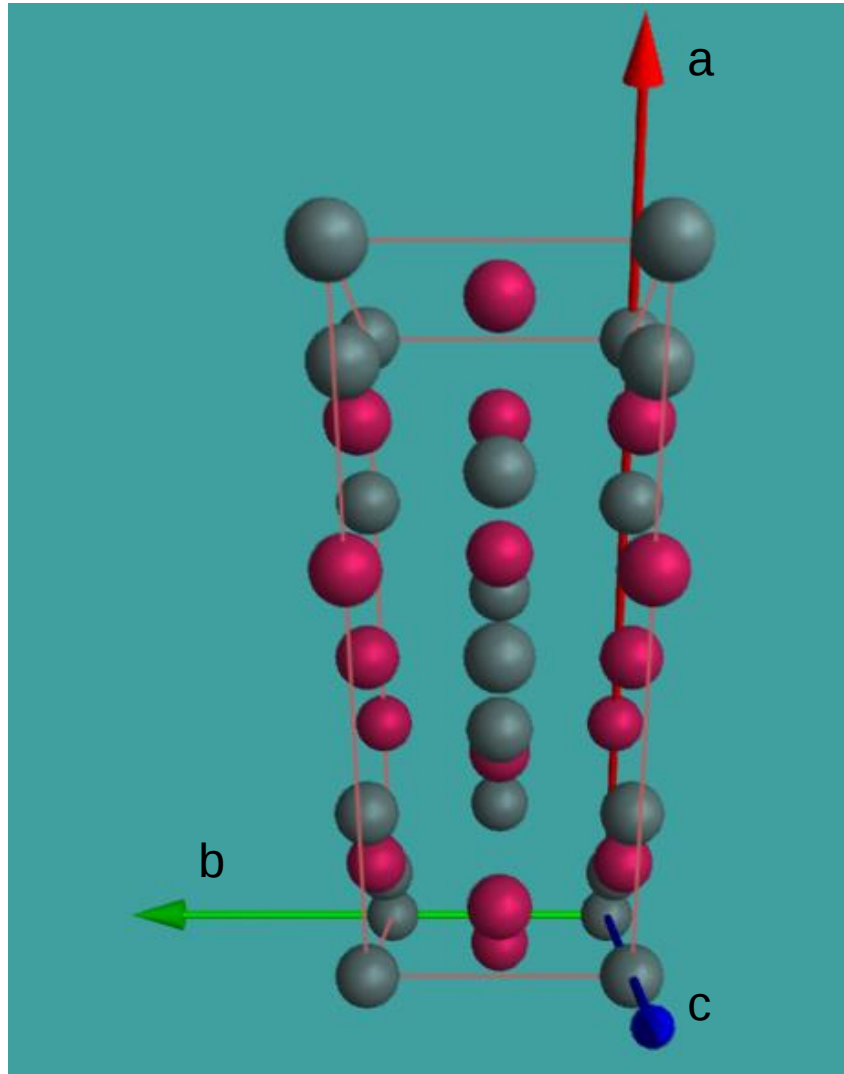
projeção [001]



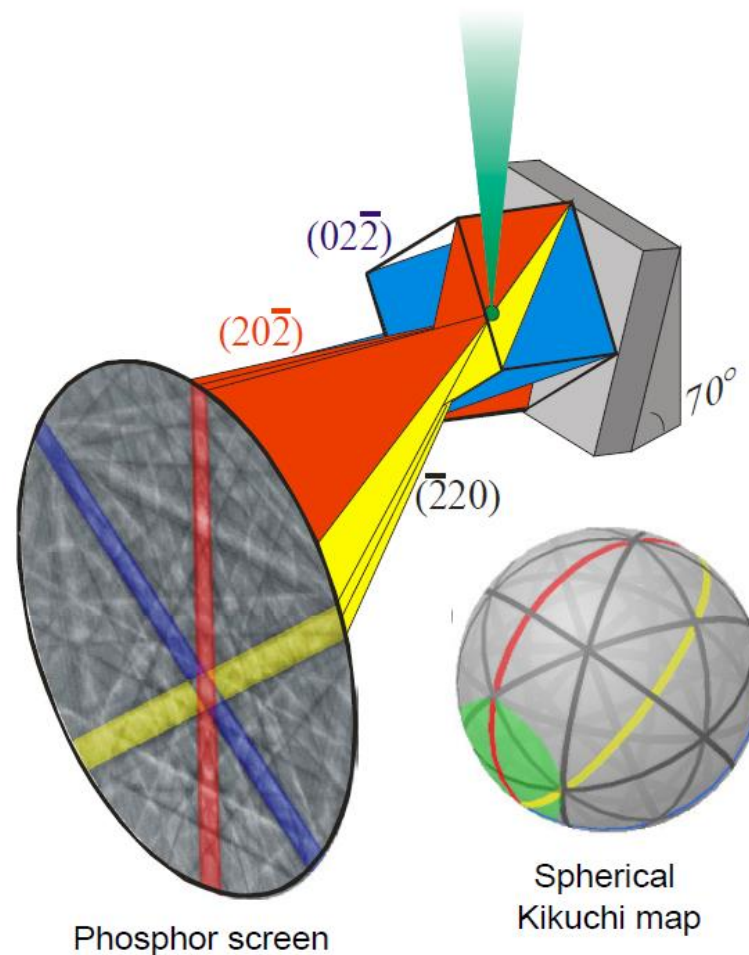
projeção “normais de planos” com o cristal orientado na DIREÇÃO [001]



Zona e Eixos de zona



Aplicações da projeção: EBSD

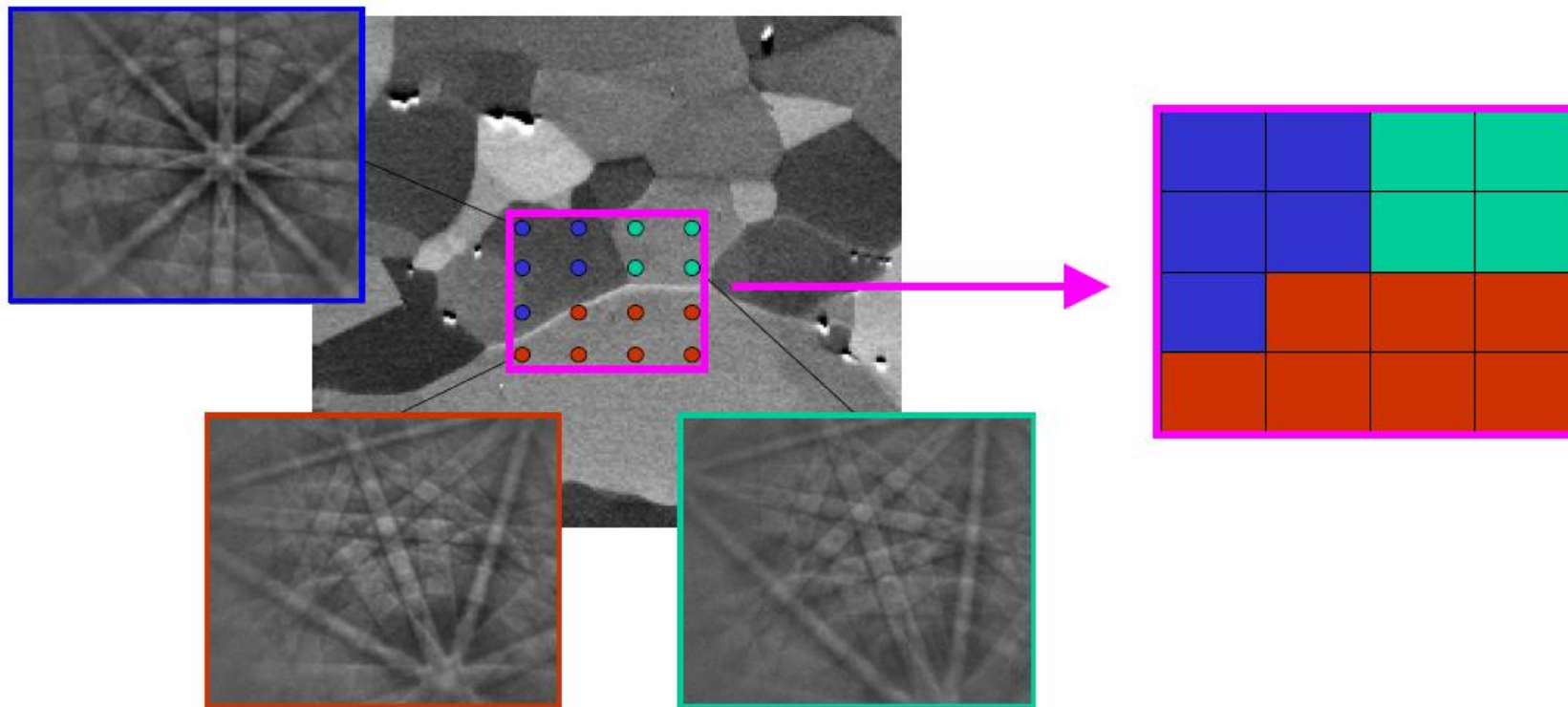


As linhas de kikuchi obtidas por EBSD são planos que estão difracting elétrons.

As regiões onde essas linhas se encontram são:

Eixos de Zona (i.e., direções $[uvw]$)

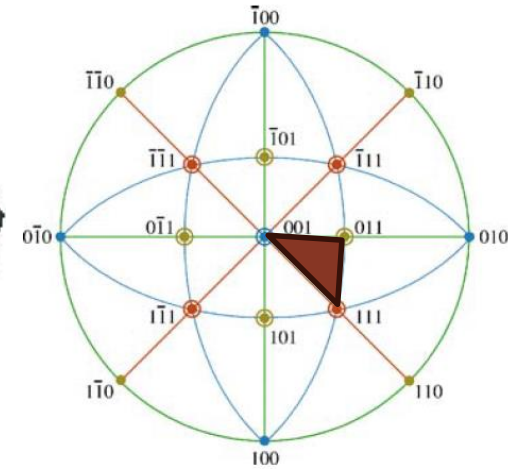
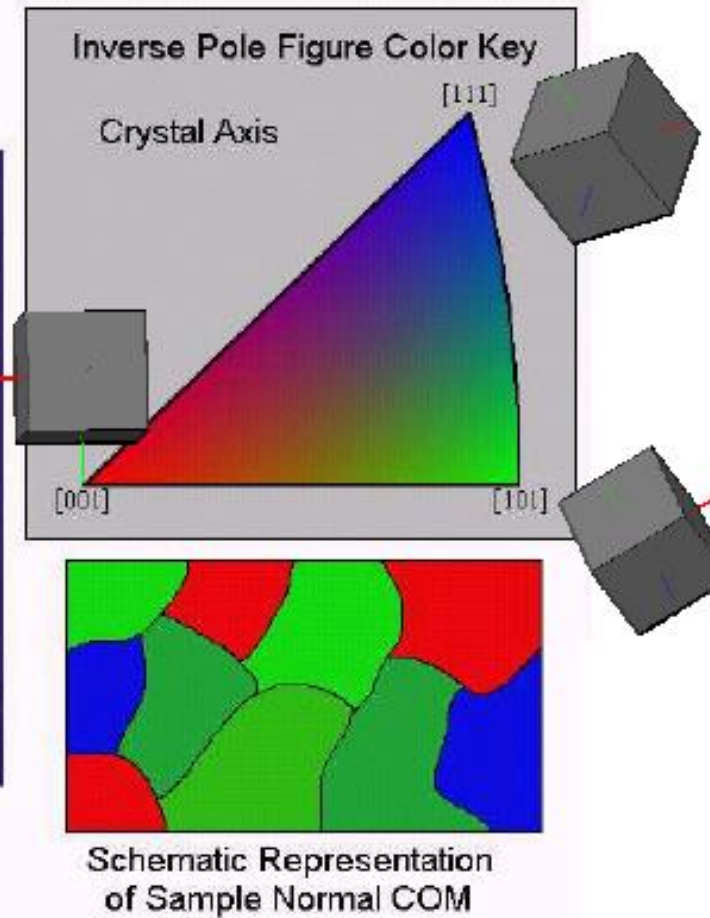
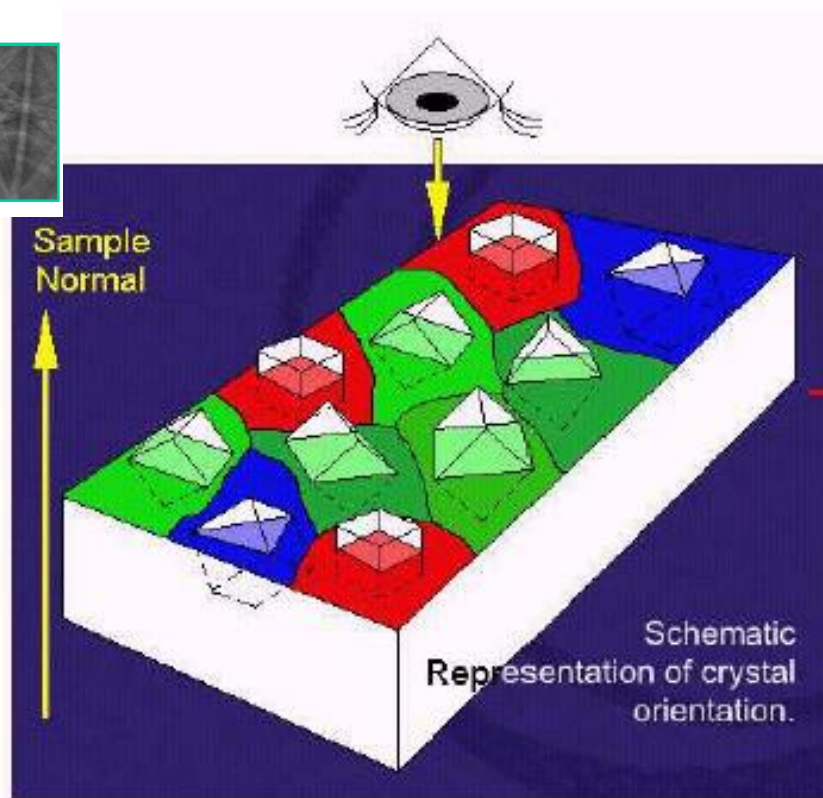
Aplicações da projeção: EBSD



As linhas de kikuchi podem ser indexadas e atribuídas a uma fase.

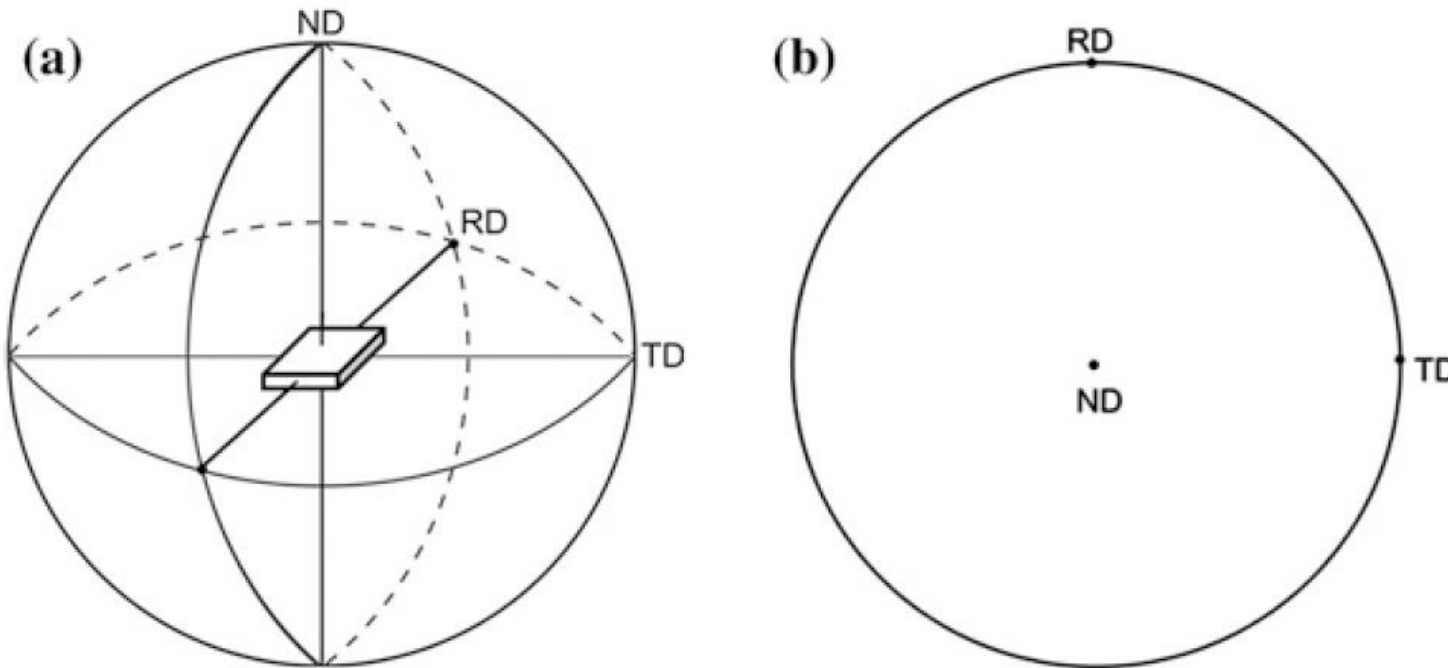
Aplicações da projeção: EBSD

Figura de pólo Inversa



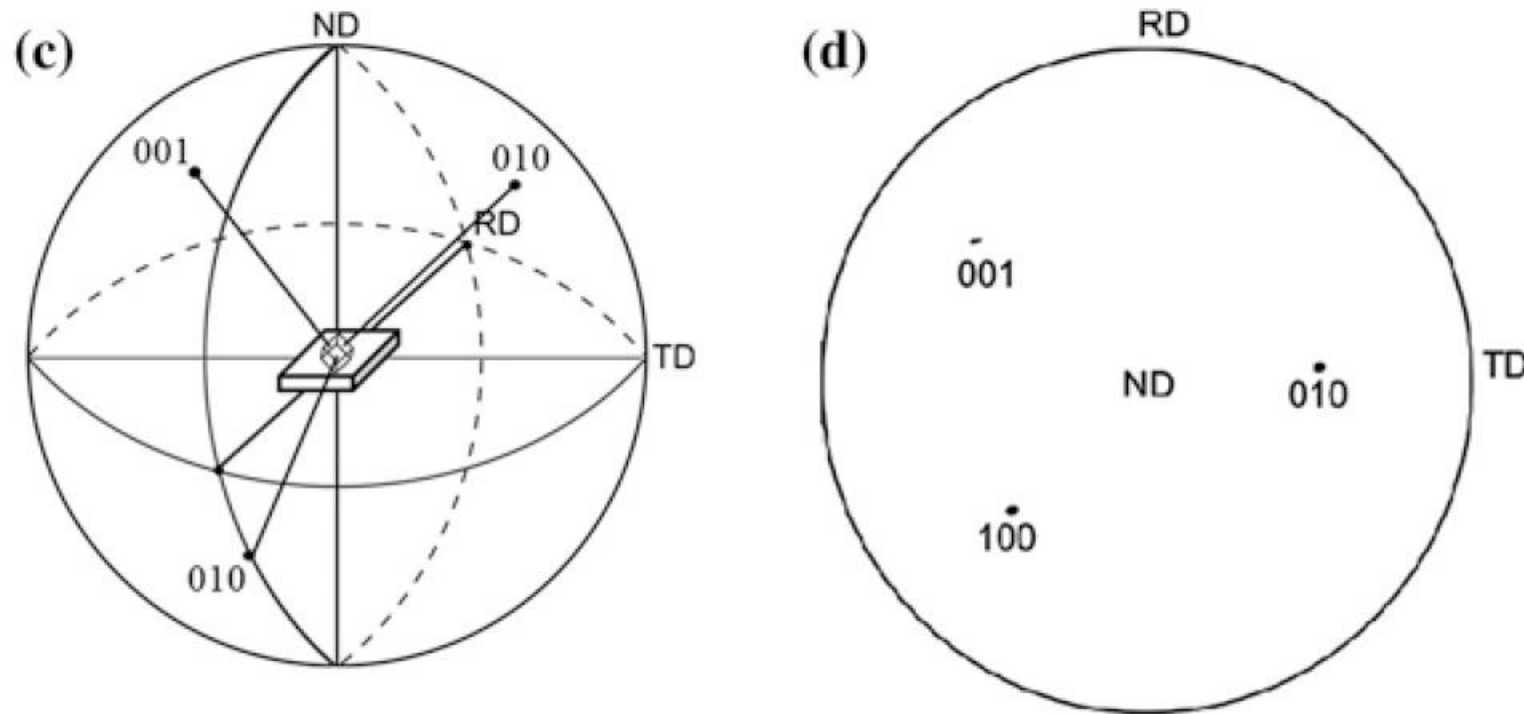
As linhas de kikuchi também nos dizem qual direção cristalográfica os grãos possuem. O eixo de zona que é indexado em cada grão, nos diz qual a direção $[uvw]$ do cristal que está perpendicular a superfície da amostra.

Aplicações da projeção: EBSD – Figura de pólo



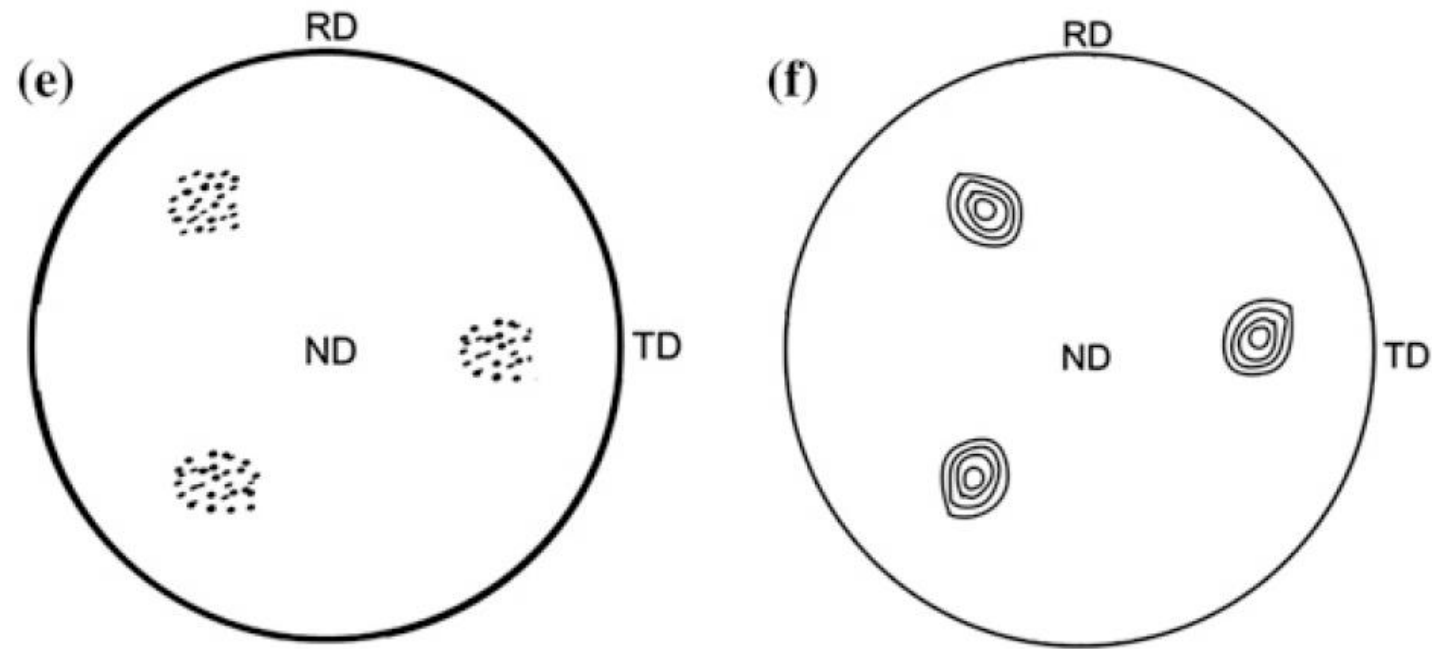
Princípio envolvendo a figura de pólo. Exemplo: Vamos considerar uma chapa laminada de um material com estrutura cúbica. A chapa é associada com três parâmetros mutuamente perpendiculares, chamadas: Direção normal (ND, perpendicular ao plano da chapa), a direção de laminação (RD, rolling direction) e a direção transversal (TD). Se imaginarmos que a chapa é muito pequena e pudermos colocá-la dentro de uma esfera grande, podemos desenhar a projeção estereográfica dos parâmetros (ND, TD e RD) da chapa.

Aplicações da projeção: EBSD – Figura de pólo



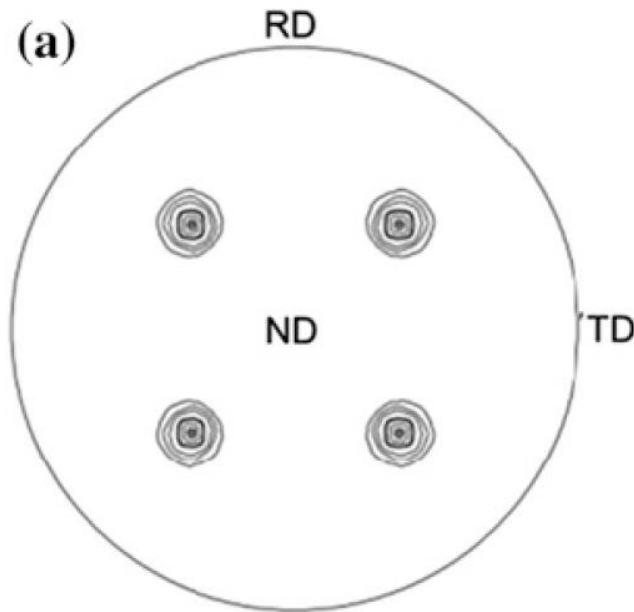
Agora, vamos considerar uma célula unitária de um grão do material dentro da chapa. Essa célula unitária vai ter uma orientação (em relação aos parâmetros da chapa, ND, TD e RD) que depende do histórico de fabricação da mesma. Vamos imaginar que em um determinado grão, a célula unitária está orientada da maneira como a figura (c) acima e vamos considerar os planos (100), (010) e (001) dessa célula unitária. Vamos sobrepor a projeção das normais desses planos com a projeção dos parâmetros da chapa. Os pontos marcados na figura (d) são chamados de pólos desses planos.

Aplicações da projeção: EBSD – Figura de pólo



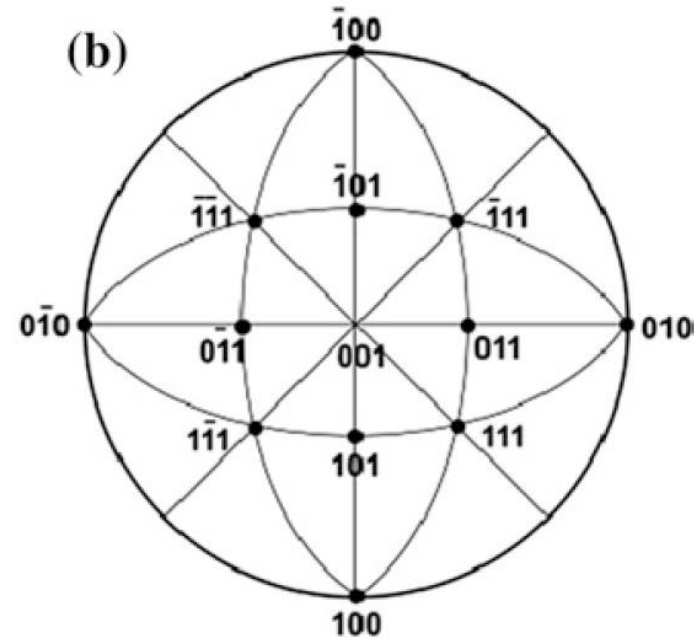
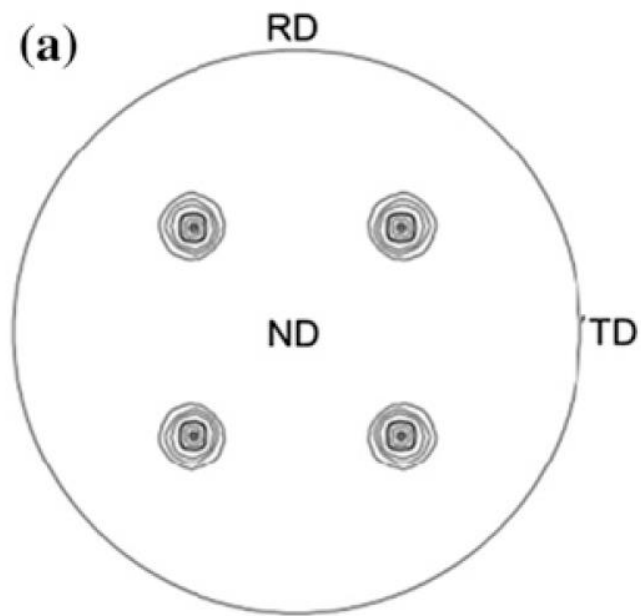
Podemos plotar, na projeção, os pólos (100), (010) e (001) de todos os grãos da chapa. Se por acaso a maior parte dos pólos ficarem concentrados juntos (fig e e f), será um indício de que o material possui textura. Caso os pólos estiverem distribuídos aleatoriamente na projeção, o material não deve ter textura.

Aplicações da projeção: EBSD – Figura de pólo - Interpretação



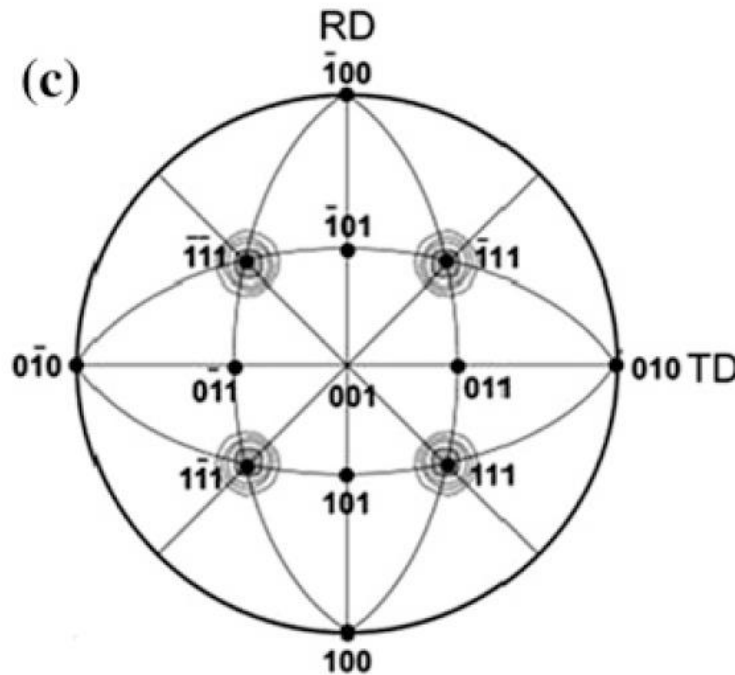
A figura acima mostra a densidade de pólos da família de planos $\{111\}$ em uma chapa de Ni após ser laminada e recristalizada. Primeiro: A figura indica que o material é fortemente texturizado. Agora a questão é, como podemos interpretar o tipo de textura que esse material possui, em termos dos parâmetros da chapa (RD, ND e TD)? Para isso, vamos sobrepor projeções estereográficas padrões de materiais cúbicos.

Aplicações da projeção: EBSD – Figura de pólo - Interpretação



Tomemos como exemplo a projeção estereográfica (001) padrão de materiais cúbicos (como acima).
Vamos sobrepor as projeções.

Aplicações da projeção: EBSD – Figura de pólo - Interpretação



Representação de textura em materiais laminados:

$\{hkl\}\langle uvw \rangle$

$\{hkl\}$ família de planos paralelos a superfície da chapa.

$\langle uvw \rangle$ família de direções paralelas a direção de laminação.

Podemos notar que para esse caso, usando a projeção padrão (001) conseguimos fazer com que os pólos $\{111\}$, do resultado experimental, coincidam com os planos da família $\{111\}$ da projeção padrão teórica.

Nesse caso, podemos ver que os planos do tipo (001) estão paralelos a superfície da chapa e os planos (-100) perpendiculares a direção de laminação (RD) que como consequência significa que as direções [-100] são paralelas a direção de laminação. Assim a textura desse material é: $\{100\}\langle 100 \rangle$.