



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Textura cristalográfica

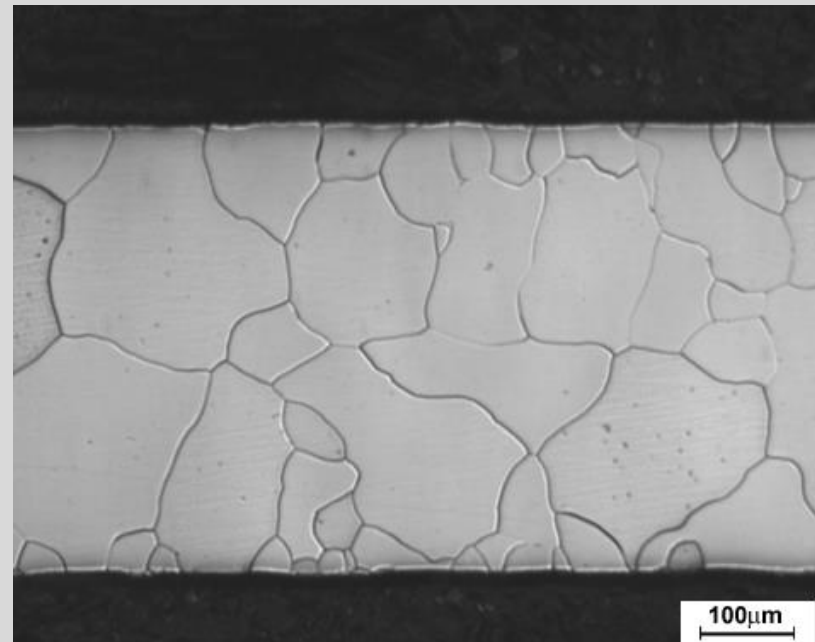
PMT 3301 – Fundamentos de Cristalografia e Difração;



Análise de textura

Materiais policristalinos

- A grande maioria dos materiais são policristalinos: contém muitos cristais (“grãos”);
- Tamanho médio de grão entre $10\mu\text{m}$ e 1mm ;
- Todas as propriedades dependem das características dos grãos:
 - Tamanho;
 - Forma;
 - Orientação.



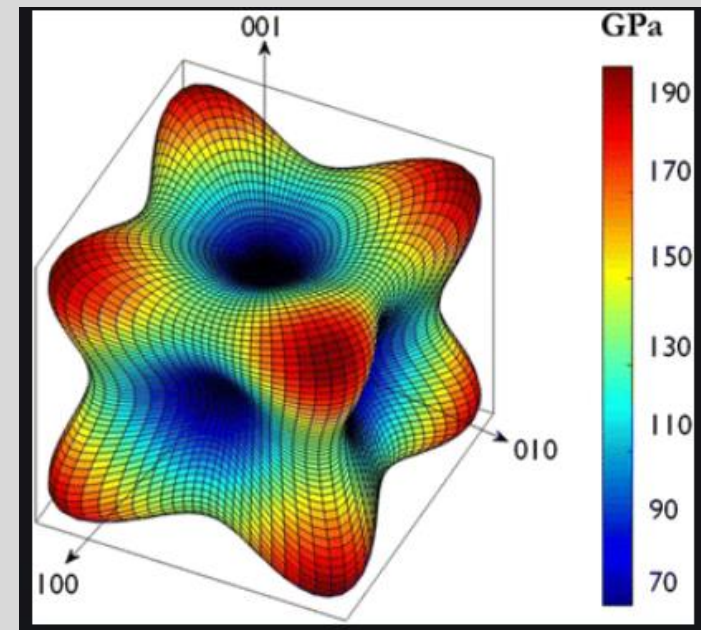
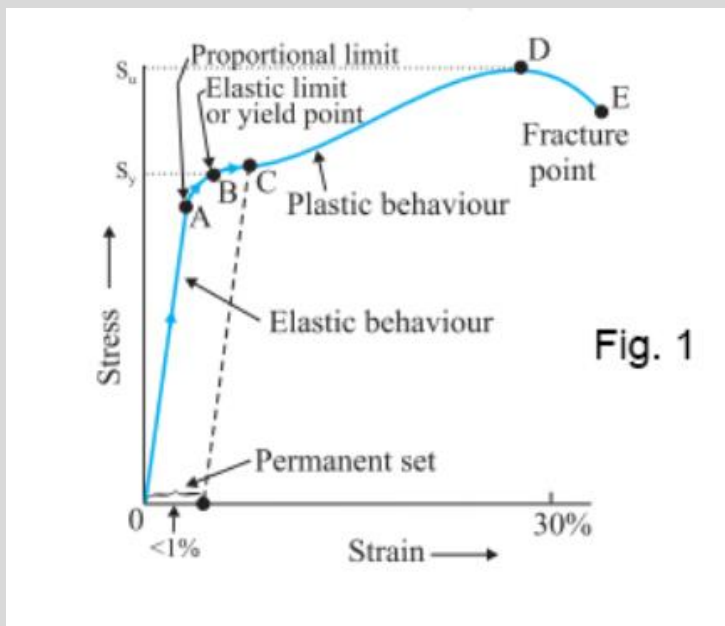


Análise de textura

Textura

- O valor do módulo de elasticidade ($E = \sigma/\epsilon$) de um monocristal varia com a direção cristalina.

Direção		$\langle 100 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 111 \rangle$
E_{Ferro}	GPa	125	210	273





Análise de textura

Textura

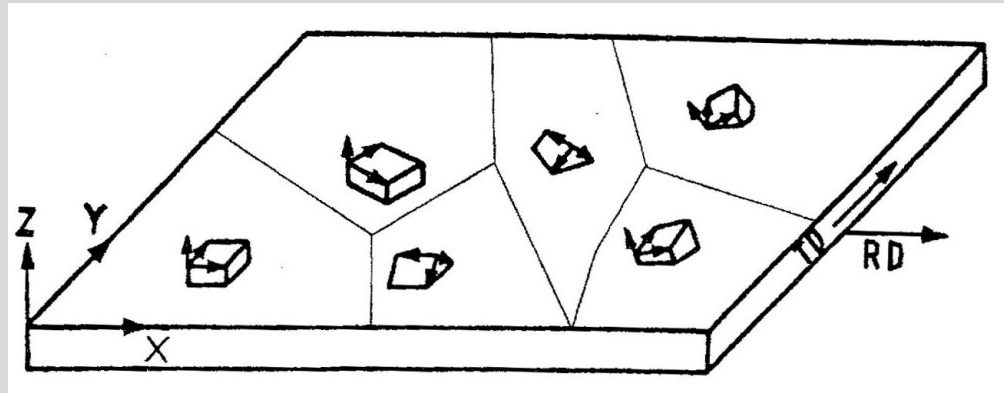
- Frequentemente, desejamos saber a orientação cristalográfica dos grãos que estão espalhados no material;
- Se os grãos estiverem distribuídos de forma aleatoriamente, podemos falar que os grãos estão com formato “aleatório” (propriedades isotrópicas);
- Se os grãos estiverem direcionados, podemos falar que os grãos estão “texturizados” (propriedades anisotrópicas).



Análise de textura

Textura

- **Definição:** a descrição da distribuição de orientações cristalográficas dos cristais em relação a um sistema de referência;
- **Textura cristalográfica não é nem a forma dos cristais e nem a rugosidade da superfície do material;**



- Dizemos que uma chapa apresenta as direções de Laminação DN (DL ou RD), a direção transversal (DT ou TD), a direção normal (DN ou ND).



Análise de textura

Textura

- 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 $(hkl)[uvw]$, no qual:

$(hkl) // \text{superf. e } [uvw] // \text{DL}$



Análise de textura

Textura

- Orientação genérica é $(hkl)[uvw]$, no qual:
 $(hkl) // \text{superf.}$ e $[uvw] // \text{DL}$

Grão 2

$(001) // \text{superf}$

$\langle 110 \rangle // \text{DL}$

Orientação é $(001)\langle 110 \rangle$

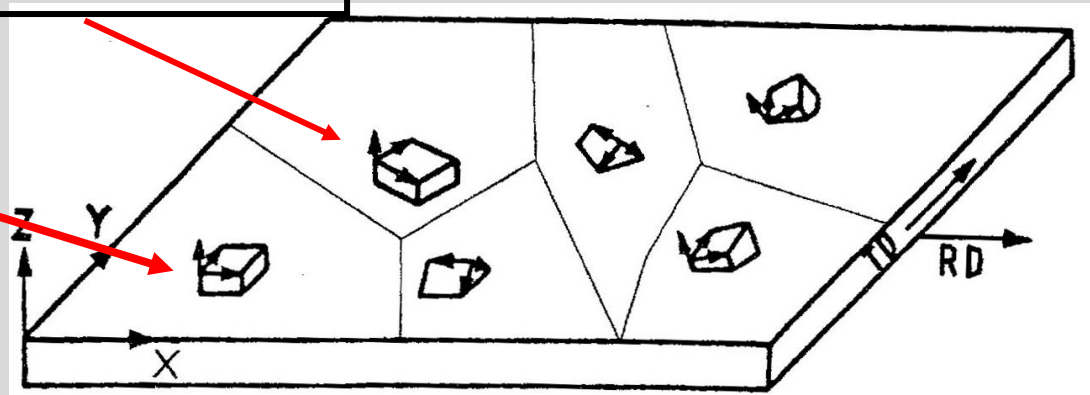
Grão 1:

$(001) // \text{superf}$

$[100] // \text{DL}$

Orientação é

$(001)[100]$

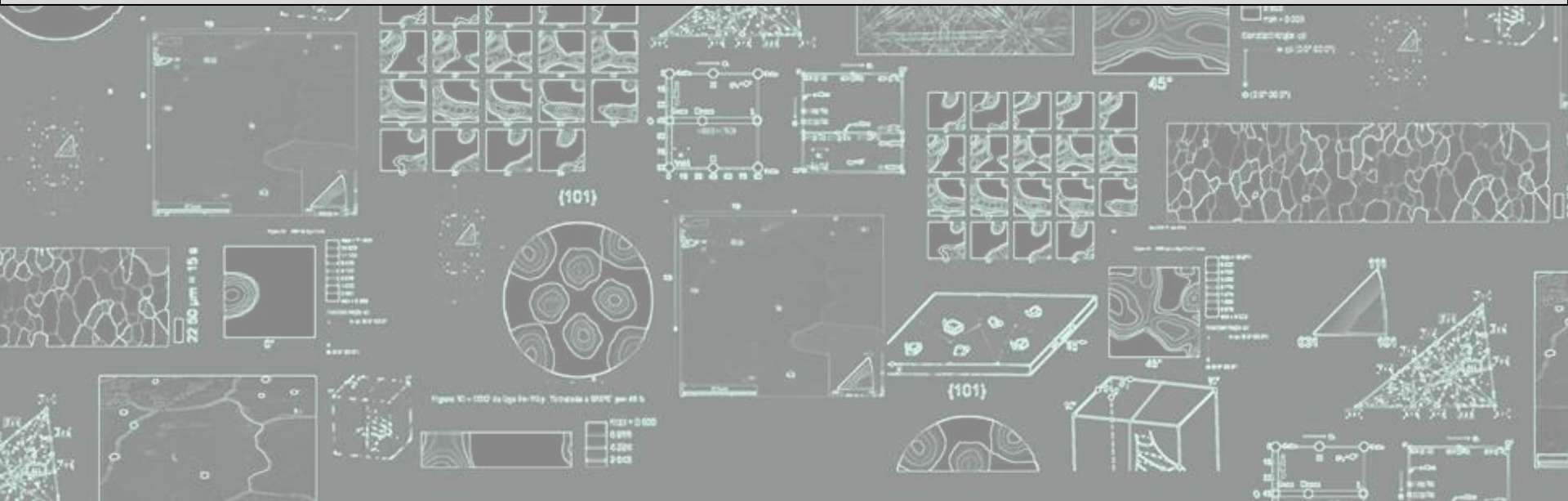




Análise de textura

Procedimentos que geram textura cristalográfica?

- A laminação de chapas a frio: grãos sofrem rotação durante deformação, alterando a textura para alguns padrões;
- A recristalização no recozimento tende a aleatorizar, mas mantém certos padrões;
- Solidificação direcional: grãos crescem mais rápido em certas direções.

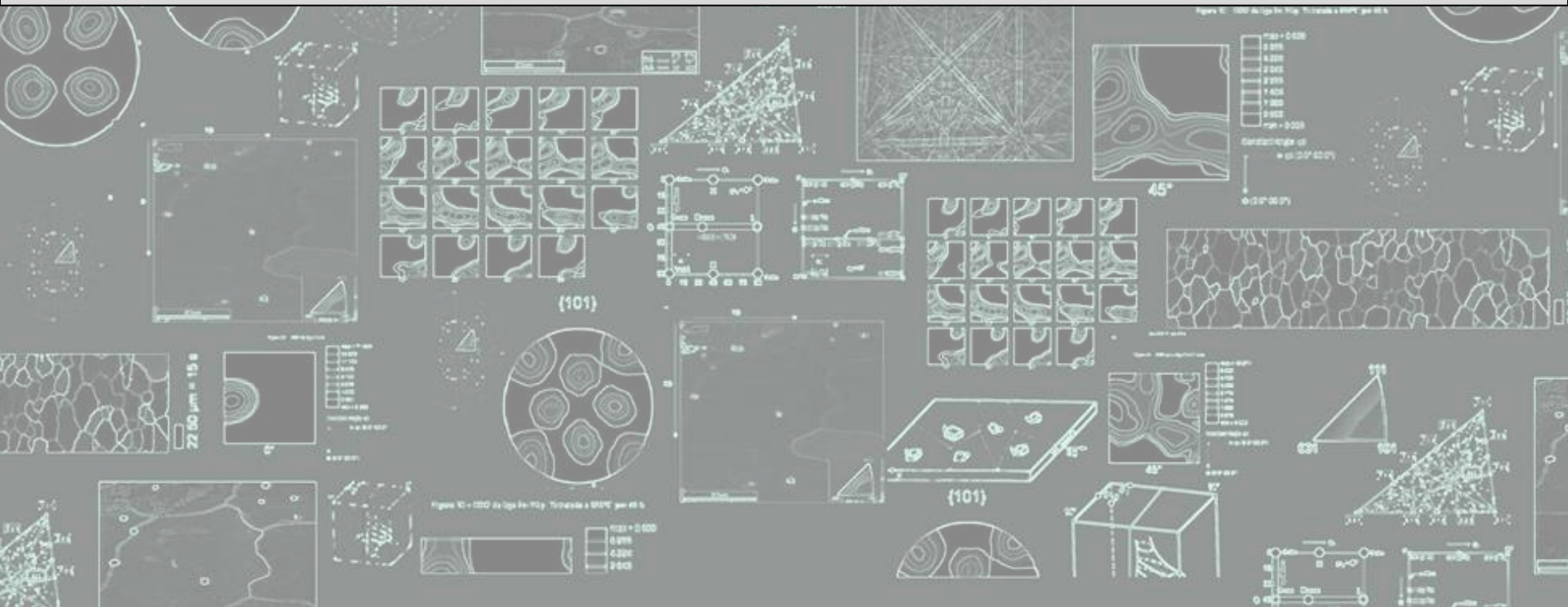




Análise de textura

Métodos para determinar a orientação dos cristais

- Difração de raios X;
- Difração de elétrons;
- Difração de nêutrons.

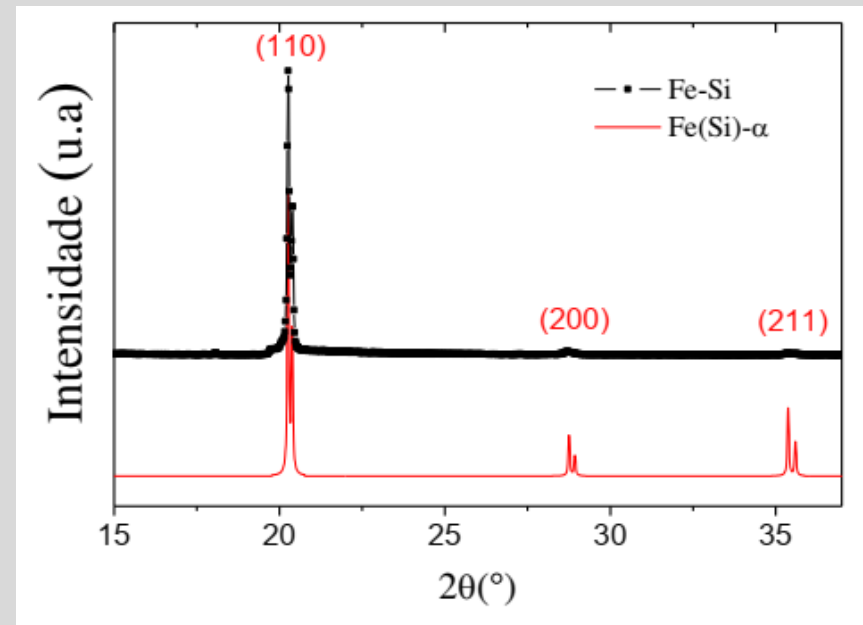
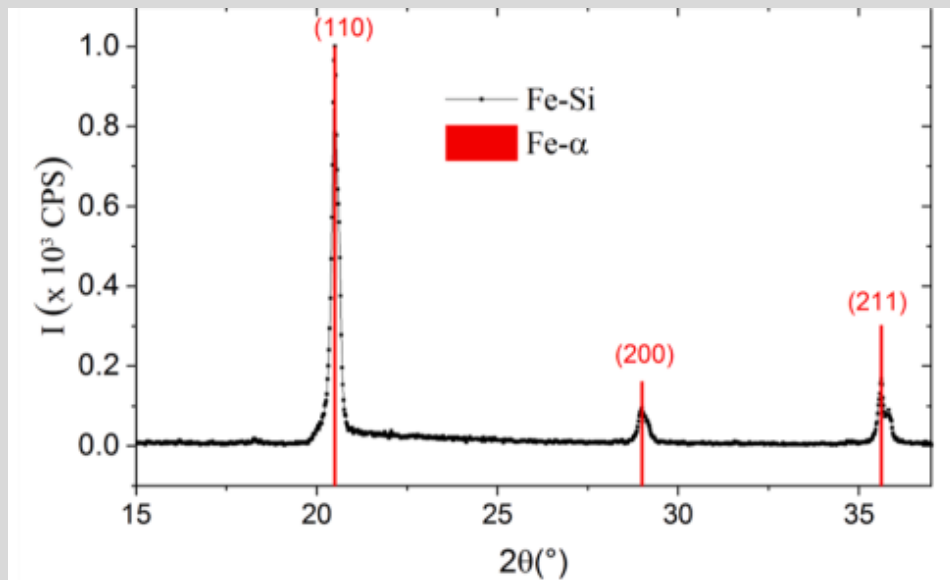




Análise de textura

Difração de raios x

- Na geometria mais comum, (com DN no mesmo plano que feixe incidente e refletido) só é possível detectar a presença dos grãos que tem os planos paralelos à superfície.

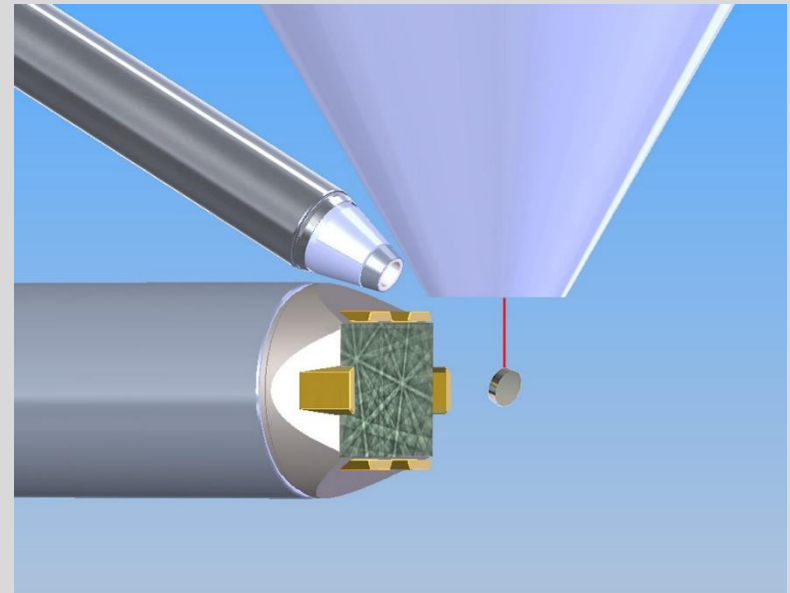




Análise de textura

Difração de elétrons (EBSD)

- A difração de elétrons é chamada de EBSD (*Electron backscatter diffraction*);
- A amostra é inserida em um microscópio eletrônico de varredura;
- E bombardeada com elétrons.



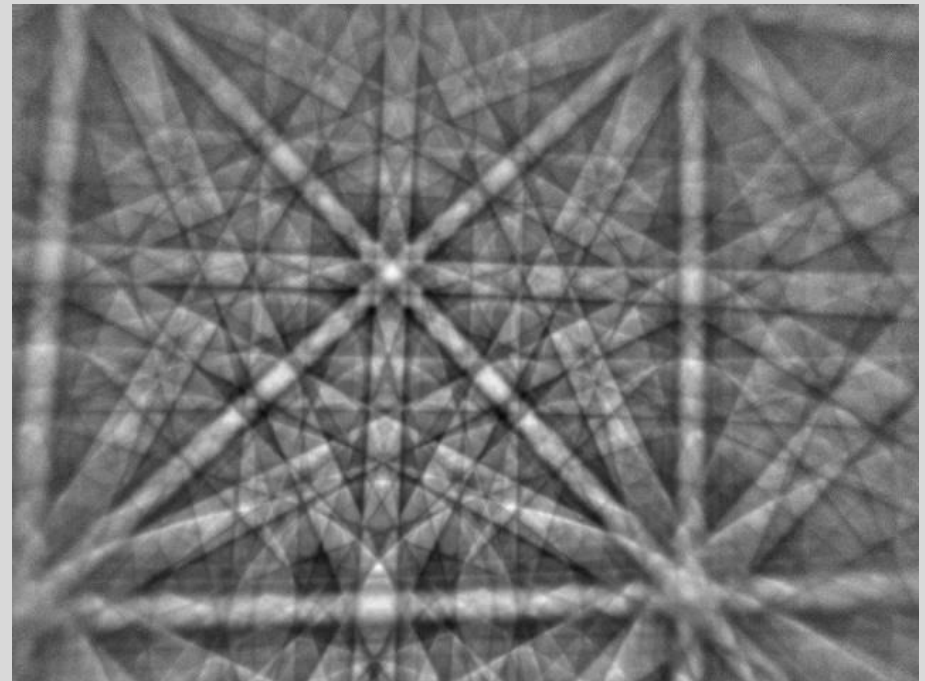
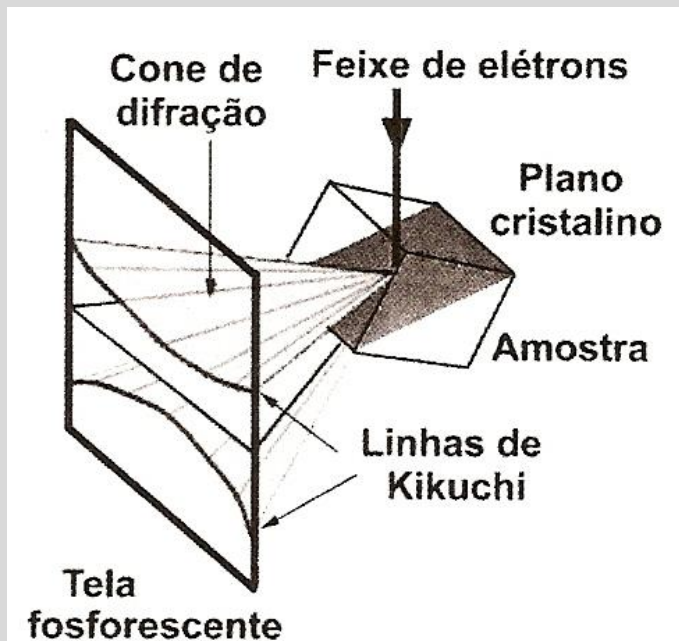
Fonte: <http://www.ebsd.com/ebsd-explained/principle-components-of-an-ebsd-system>



Análise de textura

Difração de elétrons (EBSD)

- A análise a partir desse ponto é igual a discutida quando a radiação X incide no material;
- Dependendo do ângulo de incidência do elétron e da estrutura cristalina, a Lei de Bragg pode ser satisfeita e o fenômeno da difração pode ocorrer.

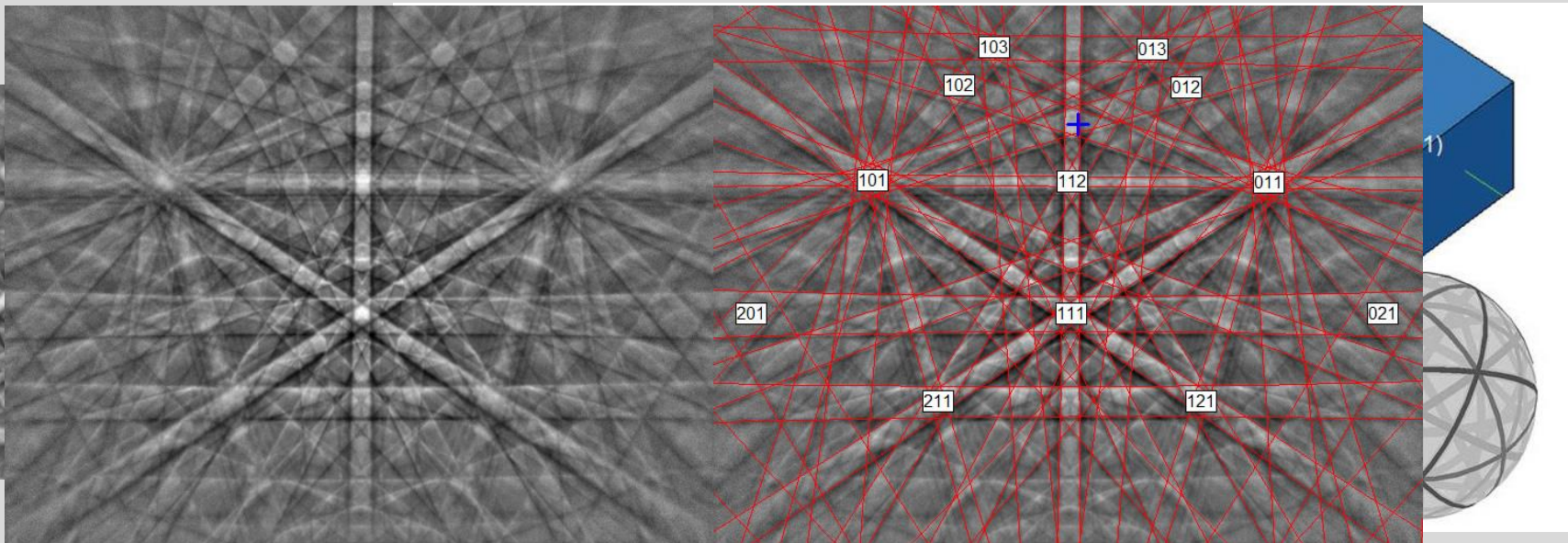




Análise de textura

Difração de elétrons (EBSD)

- Na difração por elétrons, há a formação das linhas de Kikuchi;
- Essas linhas de Kikuchi formam padrões para cada posição cristalográfica;
- Logo, é possível determinar qual é a posição da estrutura cristalina dos grão presentes na superfície do material.

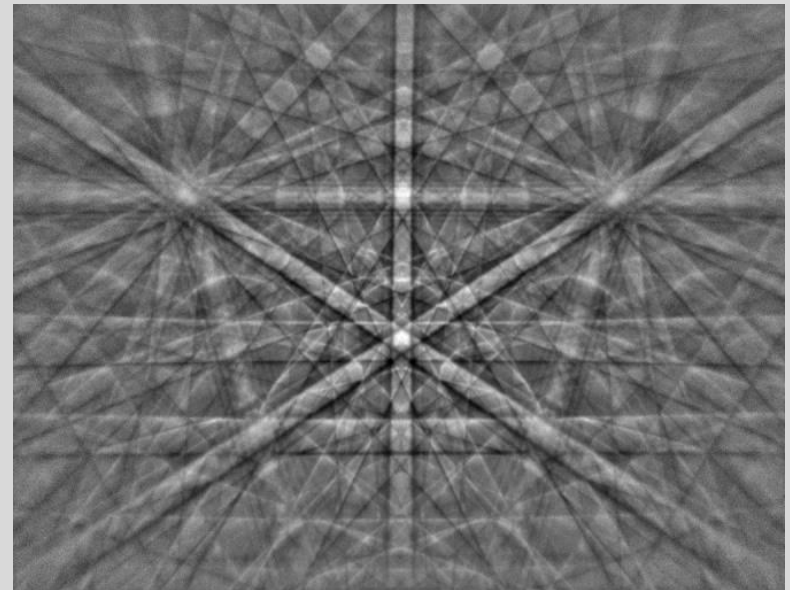




Análise de textura

Difração de elétrons (EBSD)

- Para facilitar na interpretação das linhas de Kikuchi, os resultados podem ser apresentado como:
- Figura de polo direta;
- Figura de polo inversa;
- Espaço de Euler (ODF).

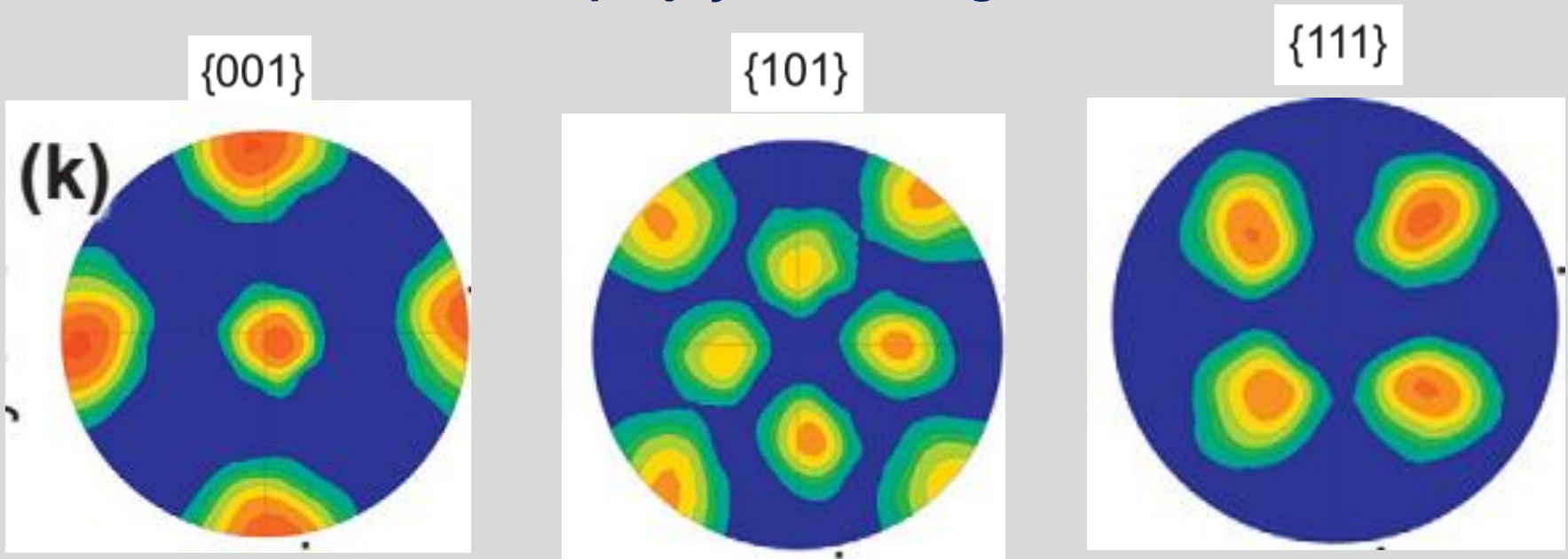




Análise de textura

Figura de polo direta

- Essa será a base para análise da textura por EBSD;
- A orientação de qualquer plano de um cristal;
- Pode se representada em uma figura em 2-D (figura de polo);
- Primeiro ponto é entender o que é um “polo”;
- Para isso, devemos fazer a projeção estereográfica.





Análise de textura

Projeção estereográfica

- Qualquer plano pode ser representado por uma projeção;
- O ponto de partida deve partir do centro do cristal;
- Passando perpendicularmente ao plano;
- Agora, se fizermos uma esfera ao redor do cristal;
- O ponto de intersecção dessa projeção com a esfera será chamada de polo.

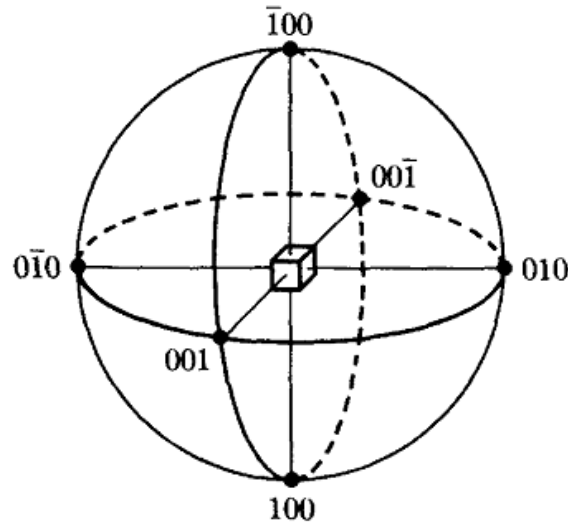
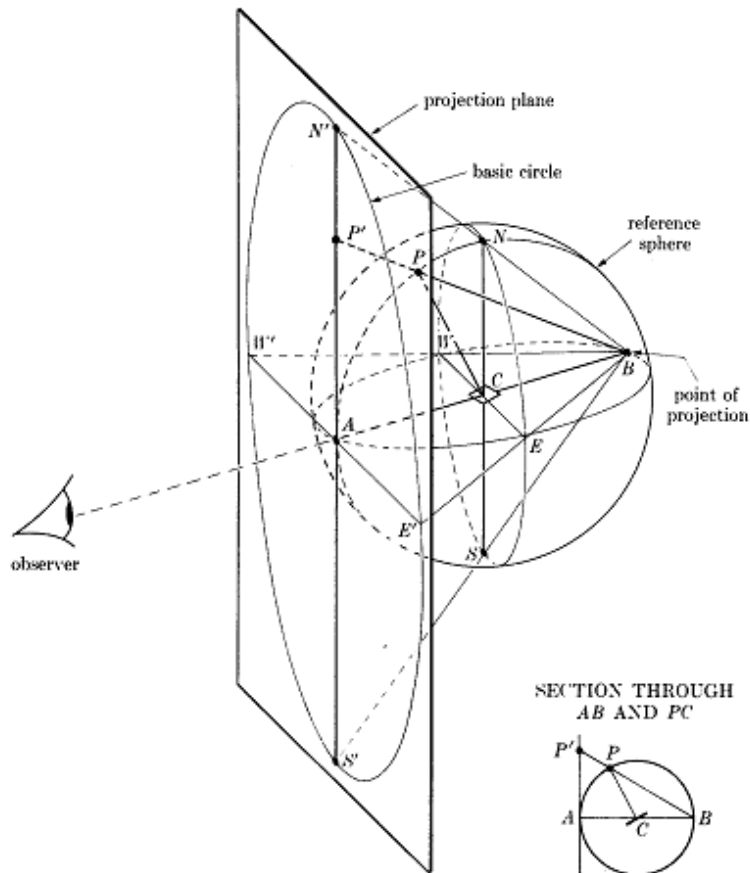


Fig. 2-25 {100} poles of a cubic crystal.

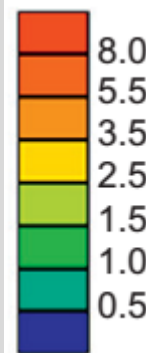


Análise de textura

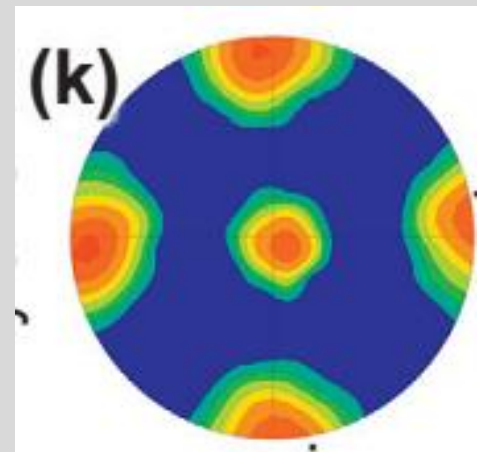
Projeção estereográfica



- Para fazer a projeção em 2-D é necessário escolher um ponto de referência na nossa esfera;
- **E criar uma direção que se ligue com o polo criado na esfera até um plano;**
- Essa projeção pode ser realizada para qualquer plano.



{001}

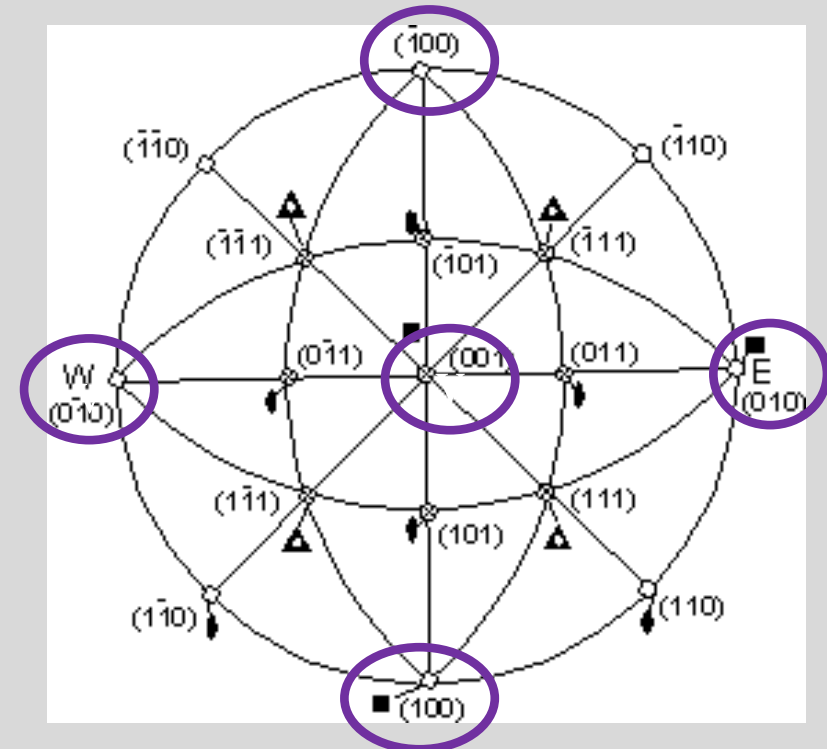
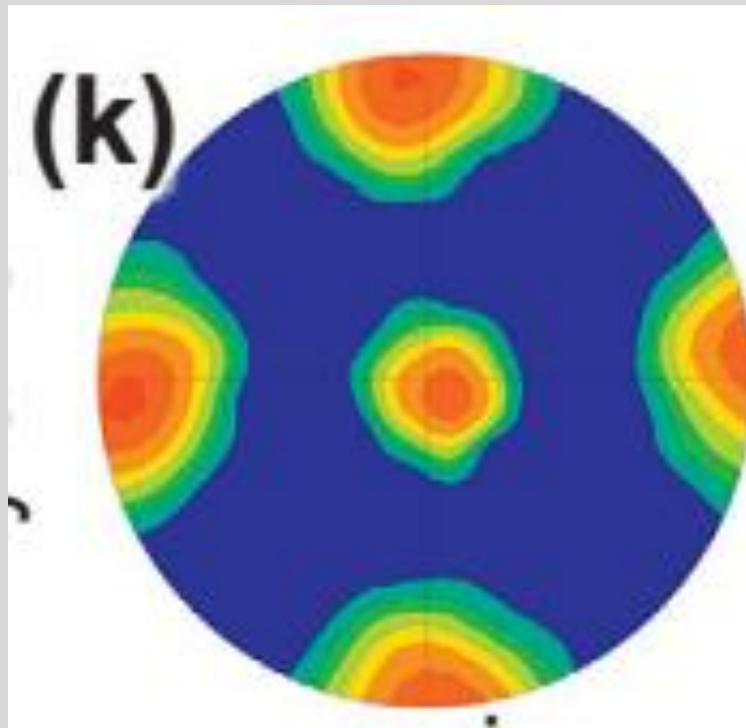




Análise de textura

Projeção estereográfica

- Para facilitar na interpretação da textura, deve-se usar um gabarito;
- Vemos 5 direções da família $\langle 100 \rangle$.



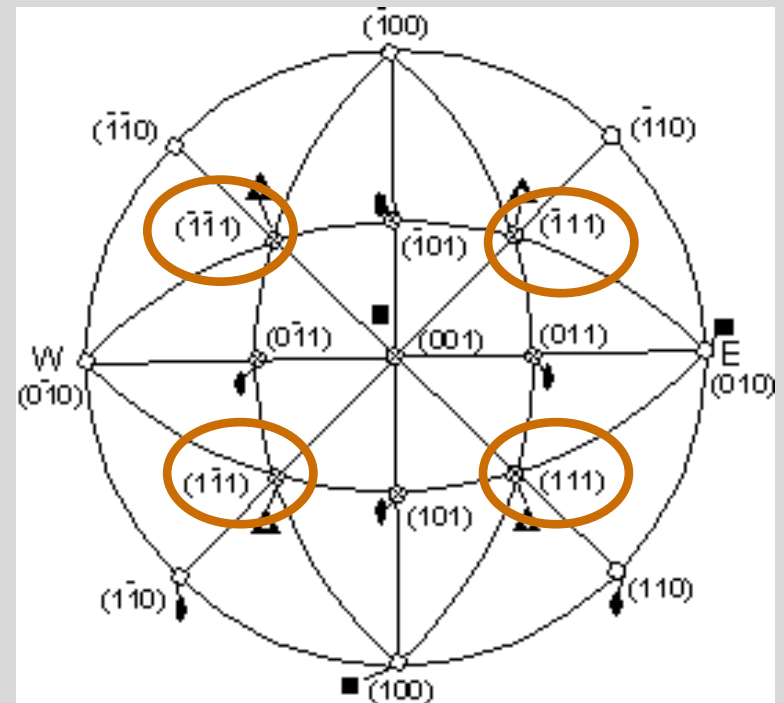
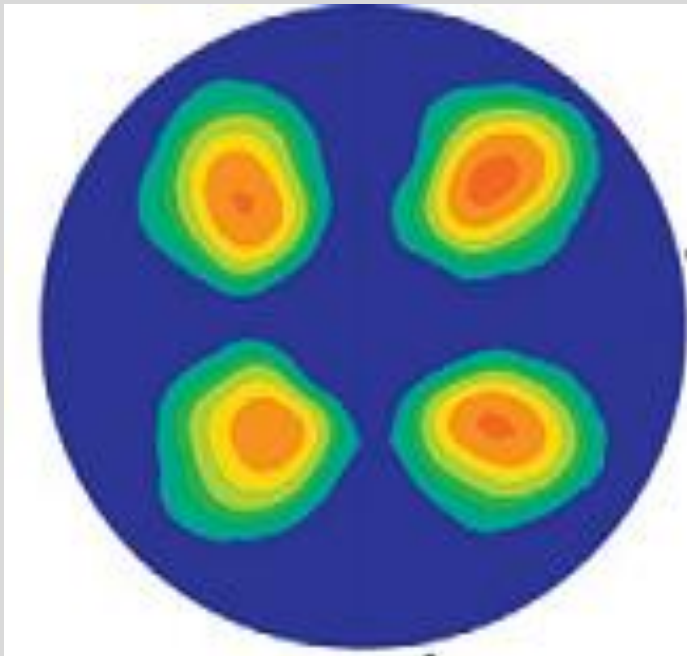


Análise de textura

Projeção estereográfica

- Para facilitar na interpretação da textura, deve-se usar um gabarito;
- Vemos 4 direções da família $\langle 111 \rangle$.

{111}



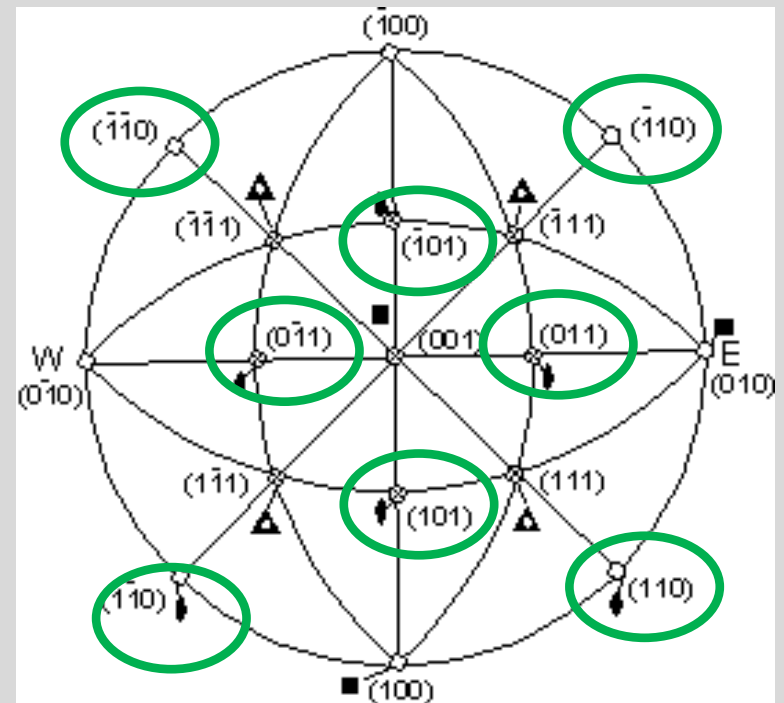
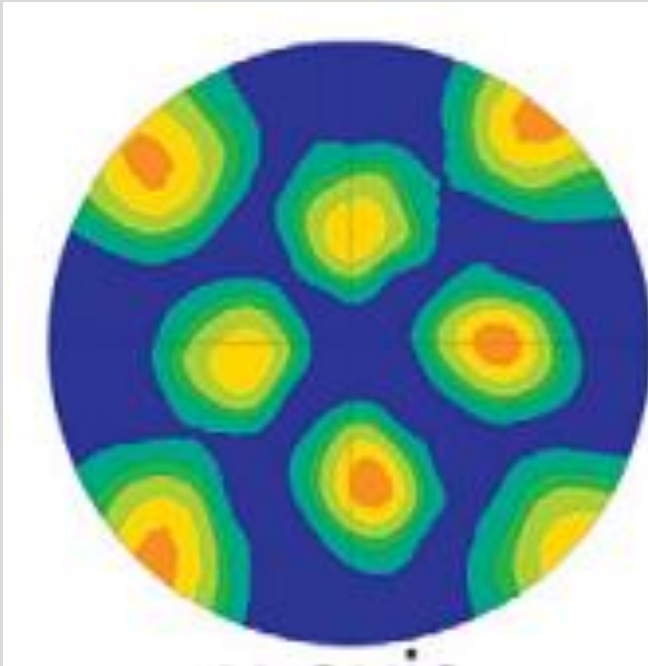


Análise de textura

Projeção estereográfica

- Para facilitar na interpretação da textura, deve-se usar um gabarito;
- Vemos 8 direções da família $\langle 110 \rangle$.

{101}



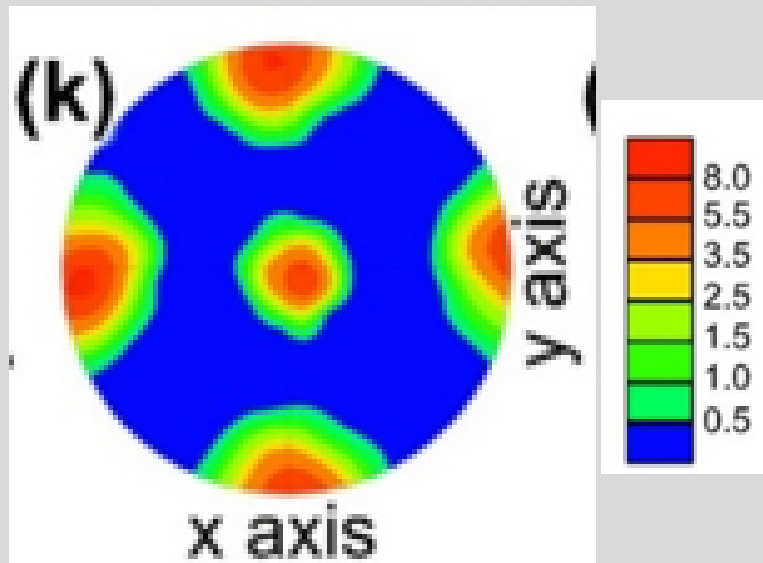


Análise de textura

Figura de polo direta

- As cores representam as intensidades relativas do plano cristalino ou direção cristalina na amostra em análise;
- Intensidade é relativa. Se distribuição de orientações fosse totalmente ao acaso, o círculo seria todo verde, correspondendo a intensidade 1 para todas as direções. Se, ocorrem muitos em certas direções;

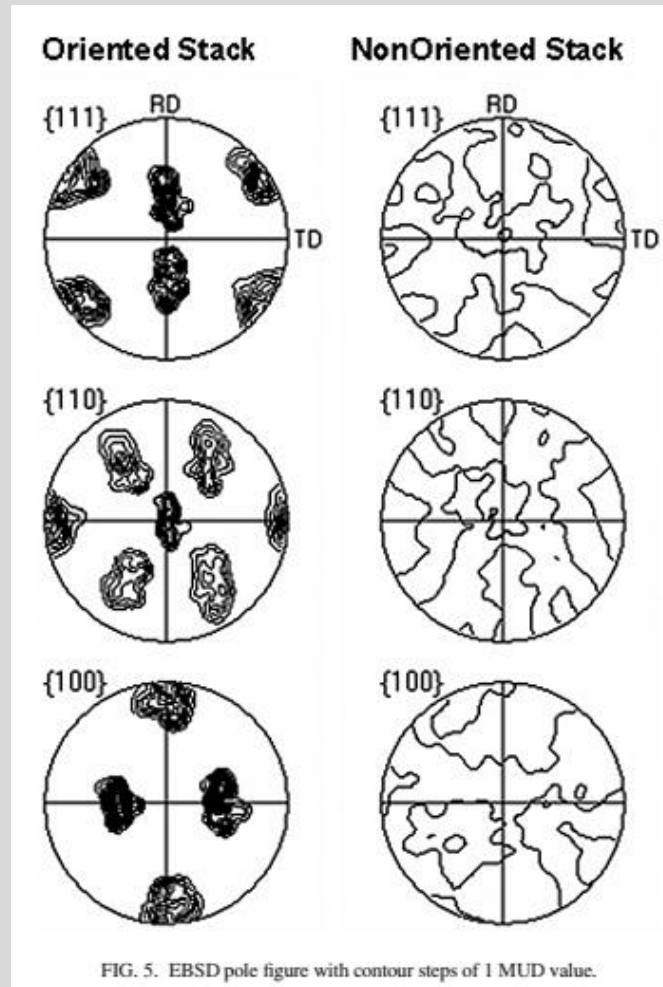
{100}





Análise de textura

Projeção estereográfica – figura de polo direta

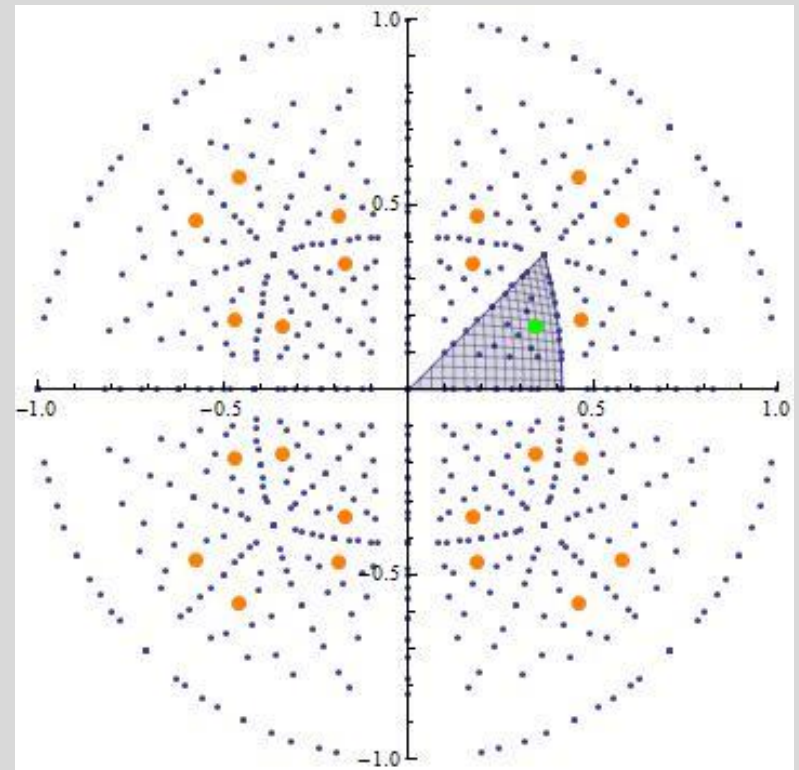
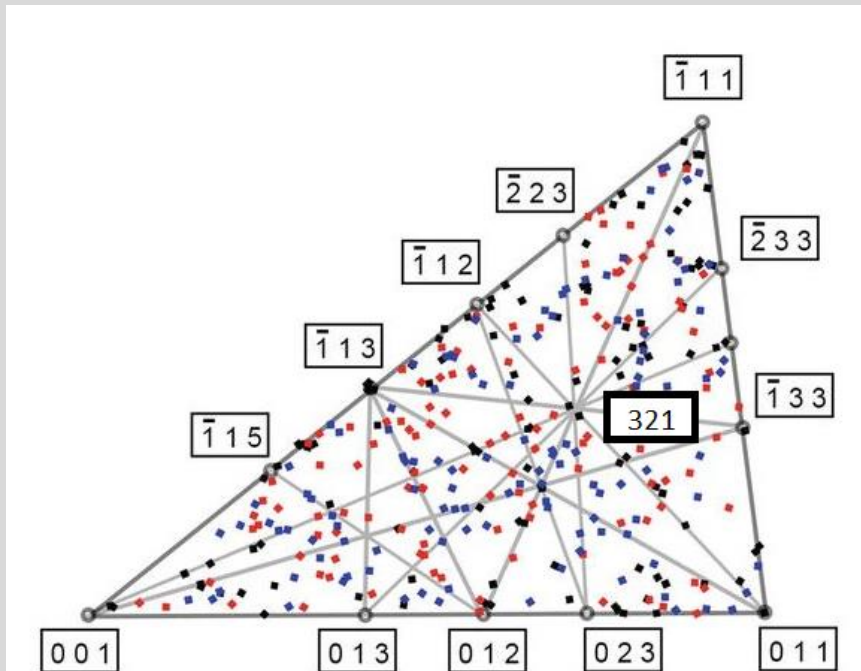




Análise de textura

Figura de polo inversa

- Todos os planos podem ser encontrados em uma única região da figura de polo.

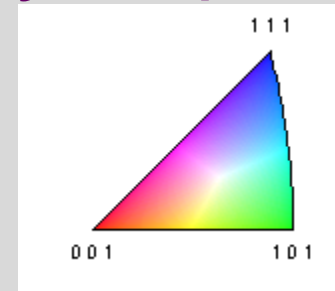




Análise de textura

Figura de polo inversa

- **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.

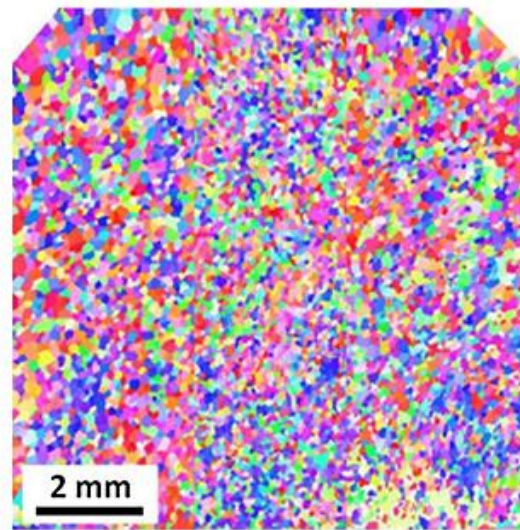




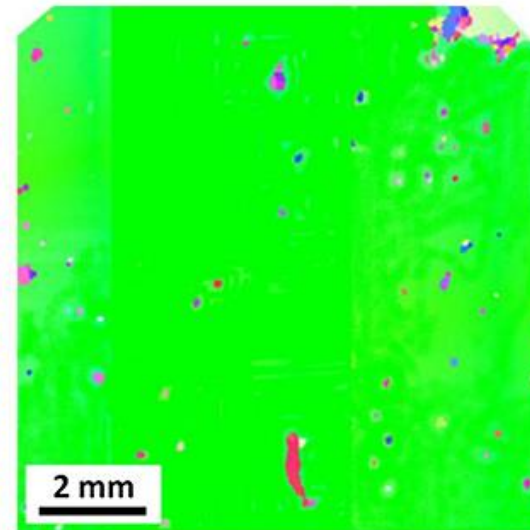
Análise de textura

Figura de polo inversa

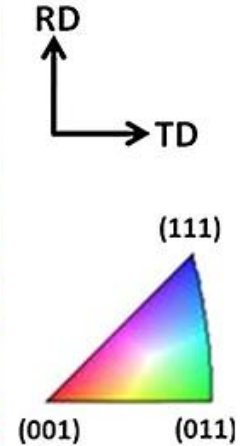
Fig. 3 Inverse pole figure (IPF) images along the normal direction (ND) of the sheet surface for 1200 °C-annealed $(\text{Fe}_{0.81}\text{Ga}_{0.19})_{99}(\text{NbC})_1$ under a sulfur atmosphere for **a** 1 h and **b** 4 h, where *red*, *green*, and *blue* colors indicate {001}, {011}, and {111} grains, respectively. The scan area is 12.0 mm \times 12.0 mm, which is equal to the whole area of sample surface



(a)



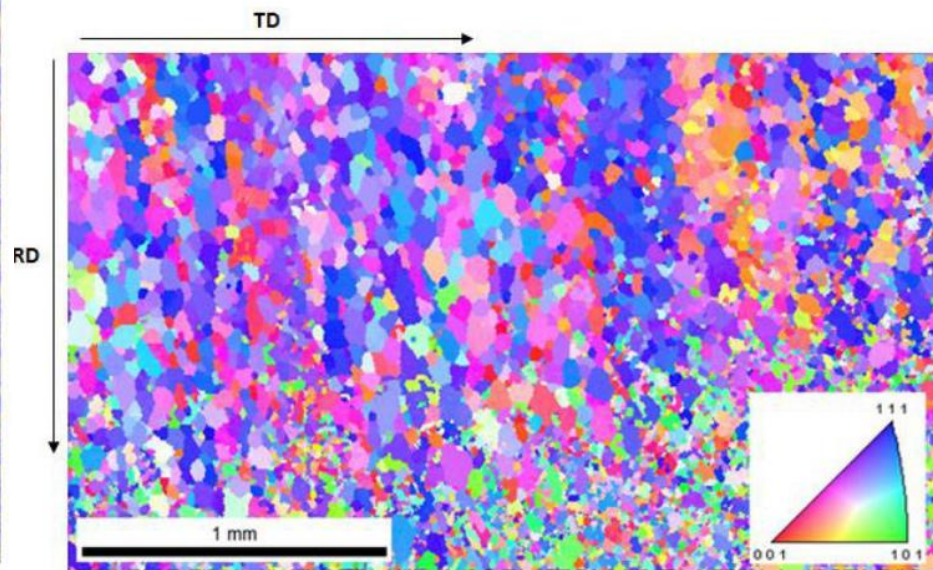
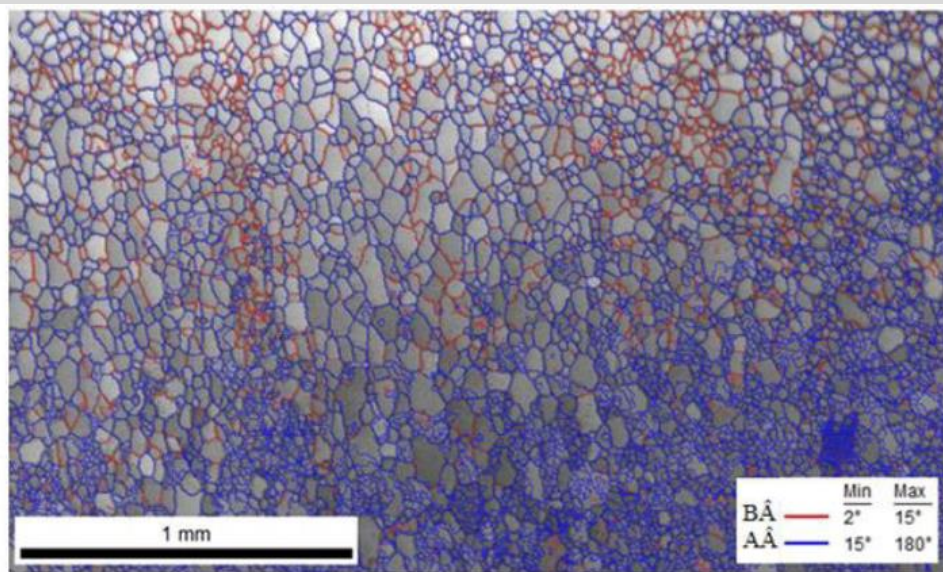
(b)





Análise de textura

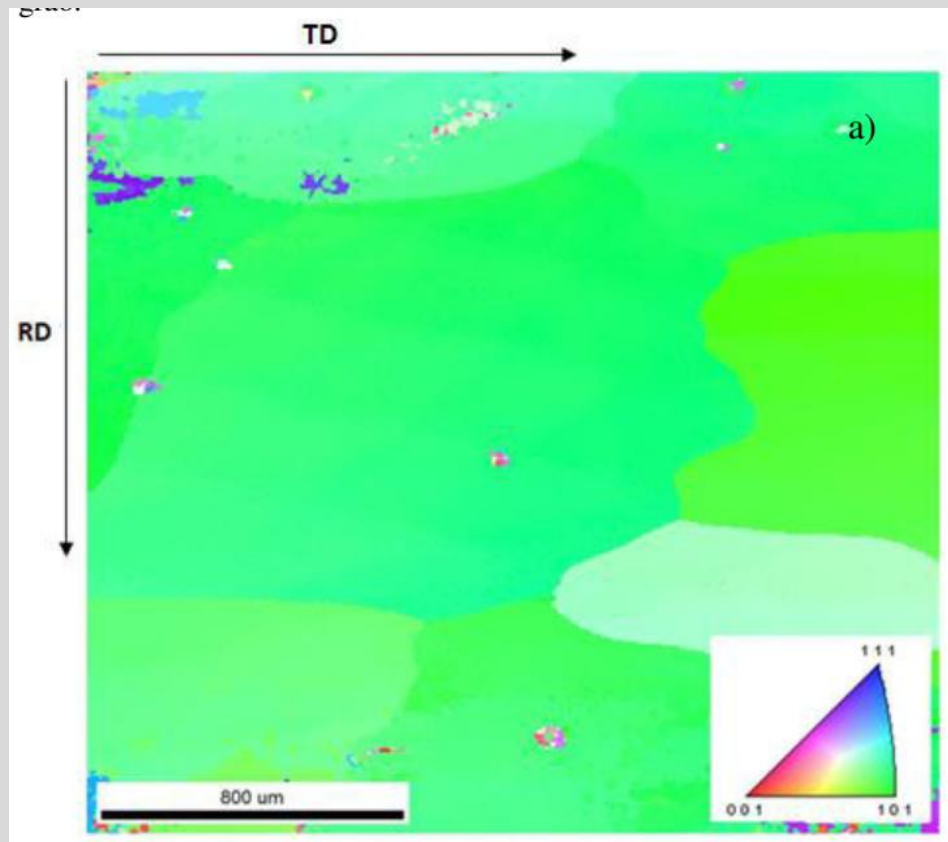
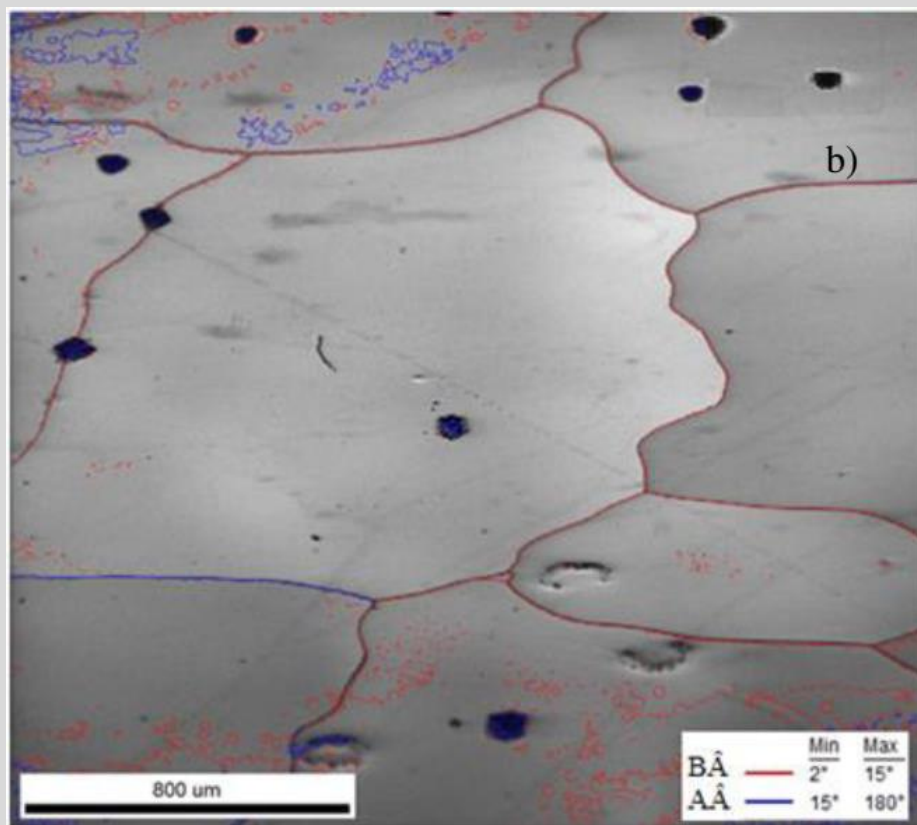
Figura de polo inversa





Análise de textura

Figura de polo inversa



(001)[100]

(001)[110]

(001)[010]

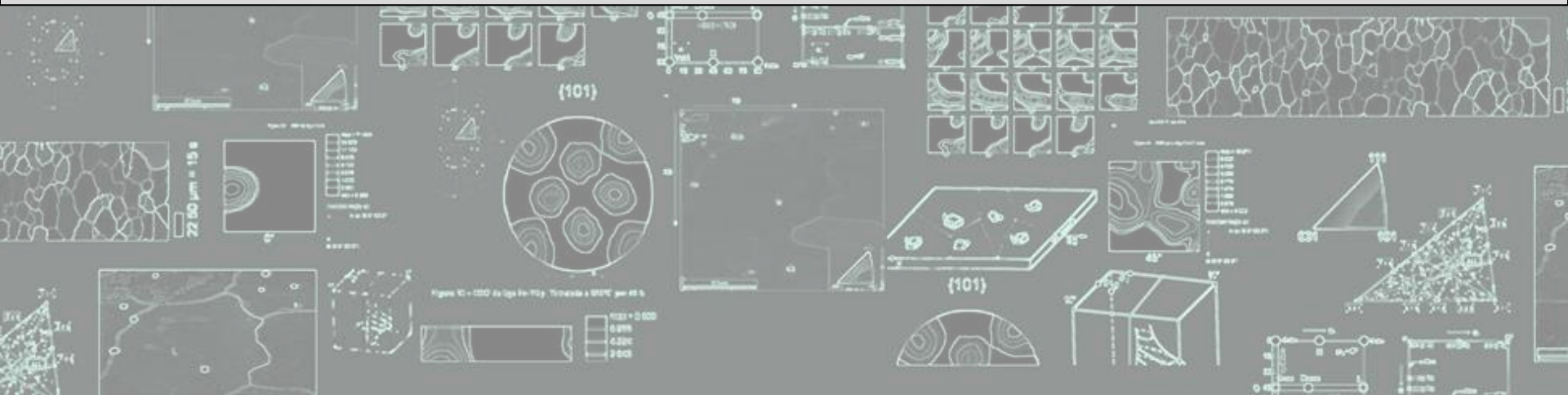




Análise de textura

Espaço de Euler (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.

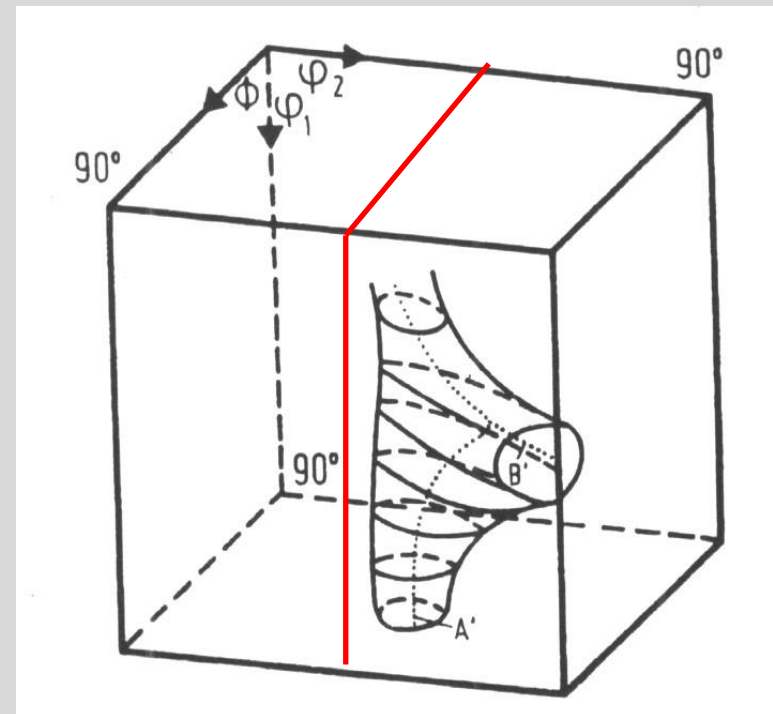
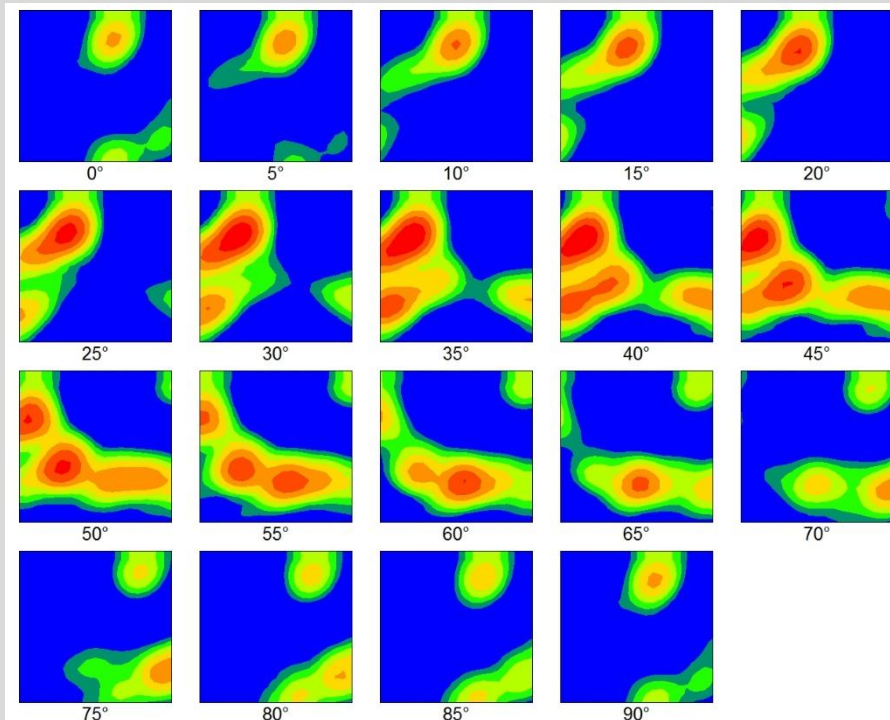




Análise de textura

Espaço de Euler (ODF)

- No Espaço de Euler só é possível representar graficamente uma superfície de isointensidade;
- Num corte do espaço de Euler posso representar várias isolinhas.





Análise de textura

Espaço de Euler (ODF)

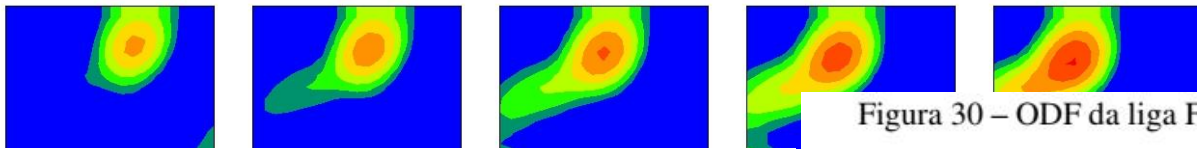
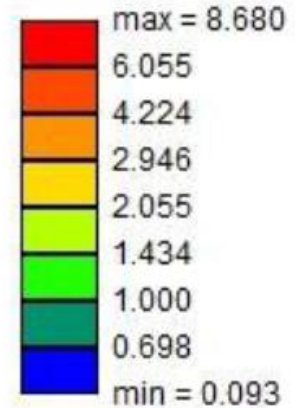
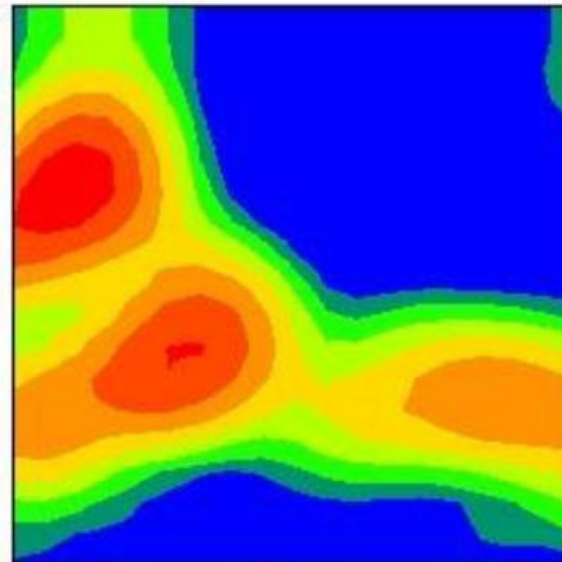
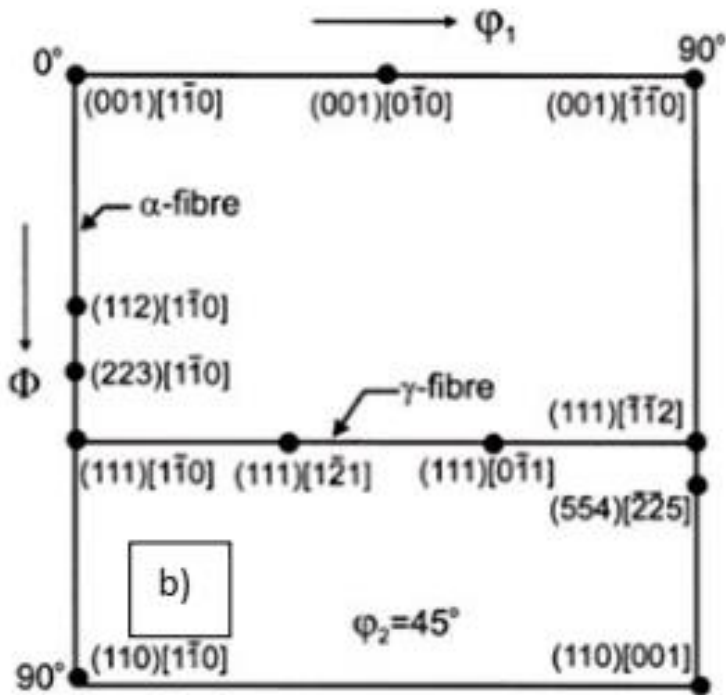


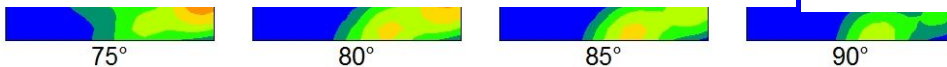
Figura 30 – ODF da liga Fe-3%p. Ti tratada a 850°C por 48 h.



Constant Angle: ϕ_2

ϕ_1 (0.0°-90.0°)

Φ (0.0°-90.0°)





Análise de textura

Espaço de Euler (ODF)

- Exemplo de uma textura “com nome”;
- Textura Cubo $(001)\langle 100 \rangle$;
- Textura Cubo rodado $(001)\langle 110 \rangle$;
- Textura Goss $(110)\langle 100 \rangle$;

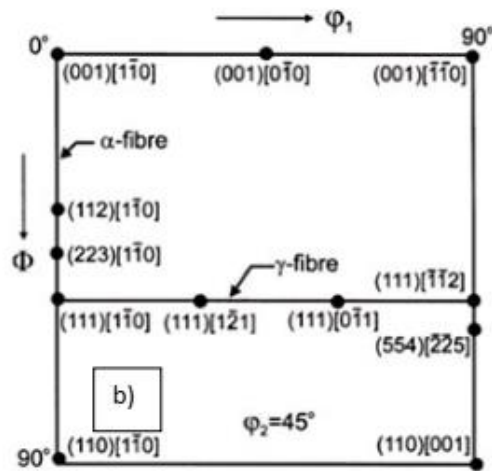
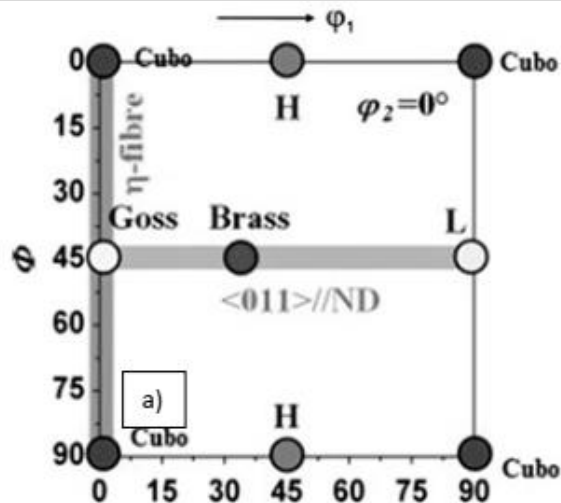
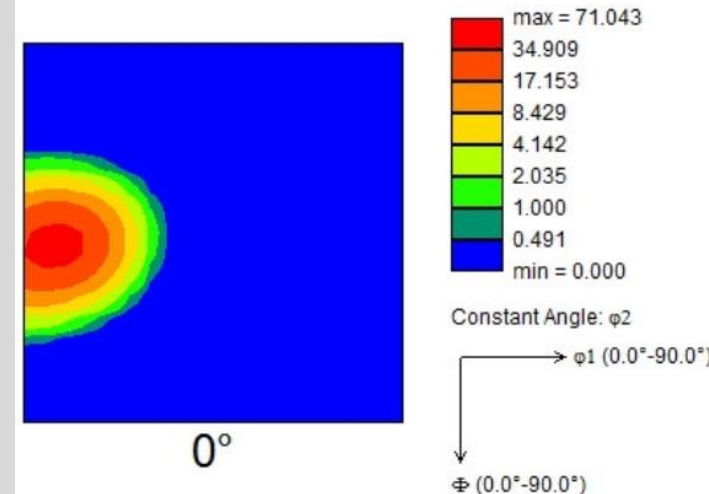


Figura 20 – ODF da liga Fe-Si.





Análise de textura

Espaço de Euler (ODF)

- Exemplo de uma textura “sem nome”.

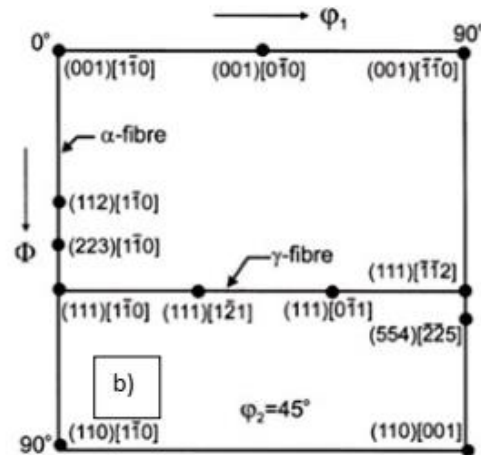
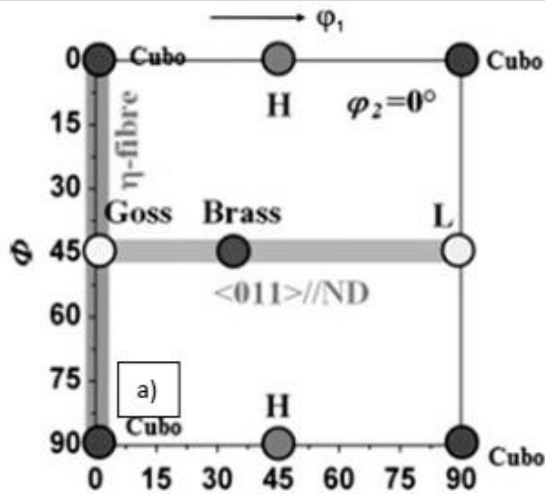
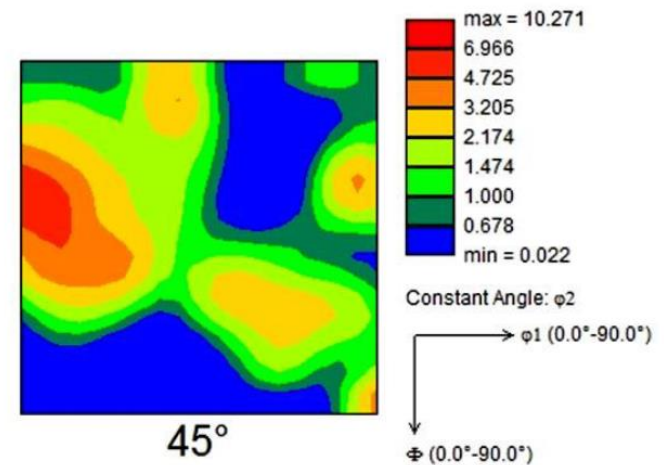


Figura 44 – ODF para a liga Fe-4Ti tratada a 850 °C por 48 h.





Análise de textura

Espaço de Euler (ODF)

- Exemplo de fibras (conjunto de algumas texturas específicas);
- Fibra alfa (α) e gama (γ) são típicas de materiais deformados a frio ou recristalizados após deformação

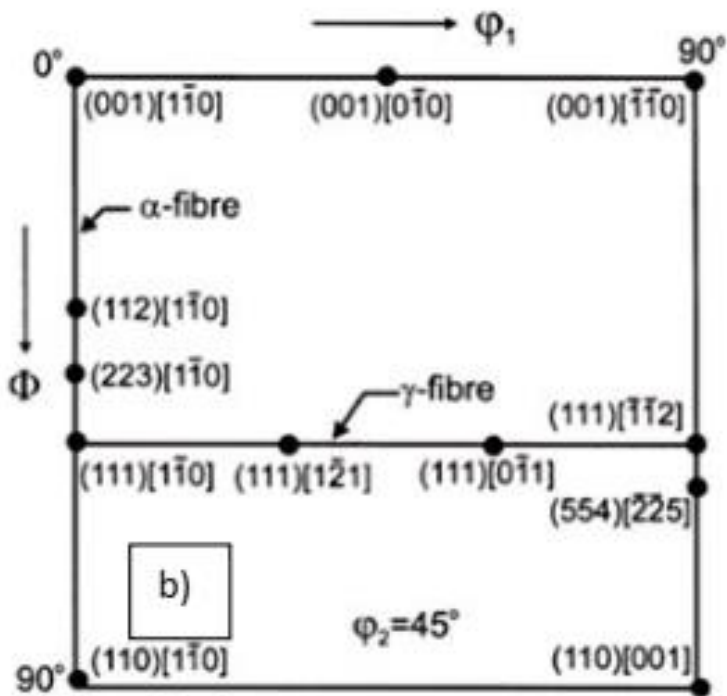
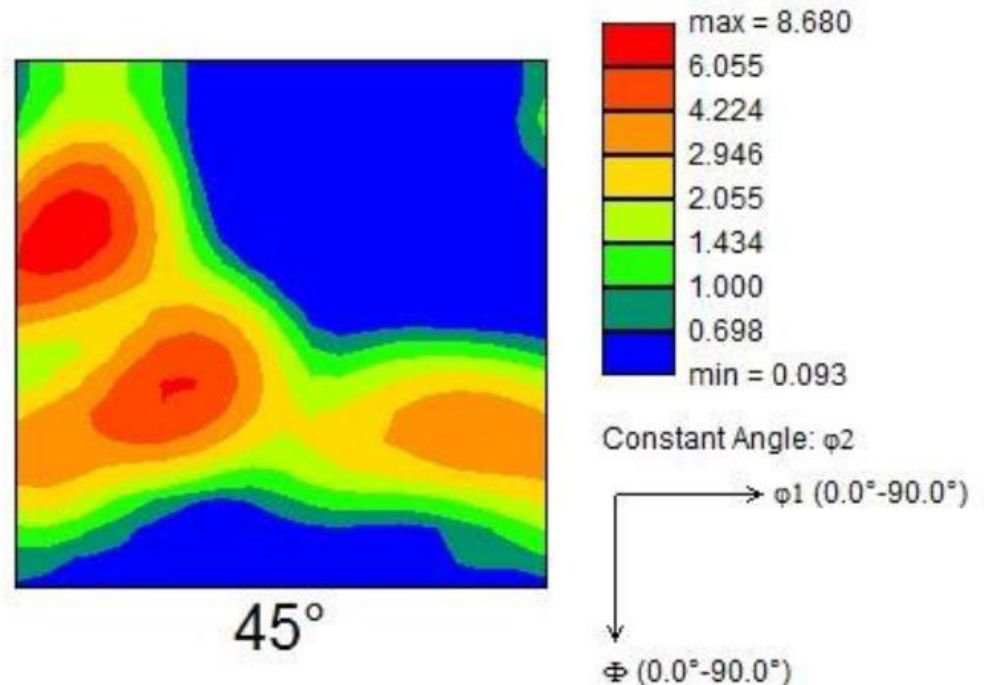


Figura 30 – ODF da liga Fe-3%p. Ti tratada a 850°C por 48 h.



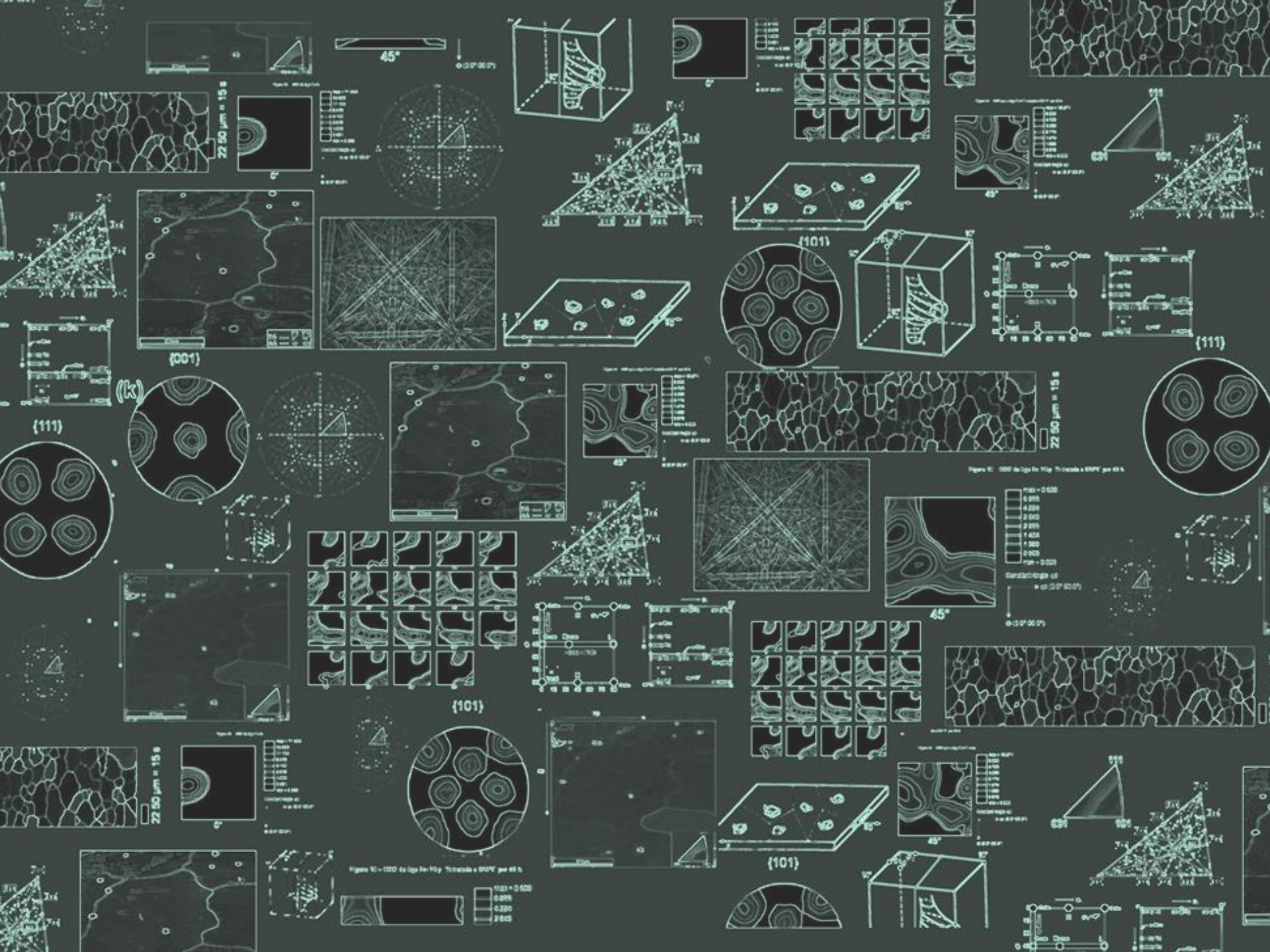


Figure 10 - (100) de Ti-6Al-4V Ti-6Al-4V Ti-6Al-4V a 650°C

Figure 10 - (110) de Ti-6Al-4V Ti-6Al-4V Ti-6Al-4V a 650°C

0.000
 0.000
 0.000
 0.000