



## Comparação entre Diferentes Métodos de Cálculo da Função de Distribuição de Orientação Cristalográfica quando Aplicados em Aços Inoxidáveis Duplex

Souza Junior, C.M; Abreu, H.F.G; Teodósio, J.R

### **Resumo**

Vários métodos permitem o cálculo da Função de Distribuição de Orientação Cristalográfica (FDOC), cada um apresentando diferentes características. Pode-se destacar o método da expansão de séries ou método harmônico e os métodos discretos (entre eles o WIMV e ADC). Enquanto o método de expansão de séries requer a medida de três ou quatro figuras de pólos de cada fase analisada, com o método discreto, bons resultados são obtidos até mesmo com a utilização de duas e até uma figura de pólo.

Autores têm utilizado métodos discretos para obtenção da função de distribuição em materiais polifásicos devido a limitações na obtenção das figuras de pólo e a sobreposição de picos de difração de raios-X.

No presente trabalho, a textura cristalográfica de um aço inoxidável duplex UNS S31803 laminado a frio com redução de 60% em sua espessura foi analisada. Foram utilizados o método de expansão de séries, o método WIMV e o método ADC para a obtenção das FDOC's nas fases ferrítica e austenítica do material. Foi avaliada a precisão dos métodos de obtenção das funções de distribuição e em seguida esses resultados foram comparados com uma análise por Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD).

## Introdução

Uma descrição completa da textura pode ser obtida com auxílio da Função de Distribuição de Orientações Cristalinas (FDOC) [1],[2].

A FDOC especifica a frequência de ocorrência de (ou probabilidade de encontrar) determinadas orientações  $\{hkl\}\langle uvw \rangle$  em uma amostra do material. Esta probabilidade, numa amostra sem textura, é igual à unidade.

A FDOC não pode ser medida diretamente e sim calculada a partir de figuras de pólos. A equação integral a seguir representa a equação fundamental para o cálculo da FDOC:

$$P_h(y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(g) d\gamma \quad (1)$$

Na literatura alguns desenvolvimentos matemáticos foram propostos para a solução da Eq. (1) [2].

O método de séries que tem como premissa básica que tanto as figuras de pólos, lado esquerdo da equação, quanto a função  $f(g)$ , que representa a FDOC, podem ser aproximadas por uma expansão em séries.

A obtenção das FDOC's, para um sistema cúbico, é feita com 3 figuras de pólos [3].

Outros processos de cálculo da função  $f(g)$  são os chamados “métodos diretos” e dentre eles destacam-se os métodos WINV(Willians, Imhof, Matheus,Vinel) e ADC (Arbitrary Defined Cells) [4].

Estes processos se baseiam no fato que figuras de pólos diretas completas podem ser vistas como projeções em duas dimensões da FDOC. Nos métodos diretos, figuras de pólos e orientações de distribuição são função tridimensional representadas por valores discretos. As relações entre pontos da figura de pólos e células correspondentes no espaço de orientação tridimensional da FDOC são estabelecidas dependendo da geometria do cristal. A equação integral (1) é substituída por um somatório para cada célula de figura de pólos:

$$P_i = \sum_{j=1}^J \sigma_{ij} f_j \quad (2)$$

A equação 2 define um conjunto de equações lineares que pode ser resolvida dentro de condições adequadas para fornecer valores da FDOC [4].

Uma das vantagens apontadas para os “métodos diretos” é que não necessitam de três figuras de pólos para o cálculo da FDOC [4]. No caso de textura de um aço inoxidável duplex, as figuras de pólos (110) da ferrita e (111) da austenita se sobrepõem não sendo possível serem utilizadas para cálculo da FDOC. Com isto, a utilização de três figuras de pólos para o cálculo da FDOC da fase ferrita é impraticável quando se utiliza radiação Co ou Cu devido ao alto ângulo  $2\theta$  para a terceira figura de pólos da ferrita.

Neste trabalho serão comparadas FDOC's calculadas pelo método de séries harmônicas e pelo processo ADC para um aço baixo carbono laminado a frio. O processo ADC será utilizado inicialmente com 3 figuras de pólos, (110), (200) e (211) e num segundo cálculo com a retirada da figura (110) do processo de cálculo. Após isto serão calculadas pelo processo ADC, utilizando apenas duas figuras de pólos para ferrita, as FDOC's para amostras de aço inoxidável duplex nas condições laminado a quente e laminado a frio 60%.

## **Materiais e Métodos**

Foram medidas figuras de pólos para três amostras. Uma amostra de aço baixo carbono laminado a frio e uma amostra de aço inoxidável duplex UNS S31803 na condição laminado a quente e deformado em laminador laboratorial em múltiplos passes até 60% da espessura. As figuras de pólos foram medidas em um difratômetro modelo X'Pert da Philips utilizando radiação Cu com monocromador. As medidas foram realizadas na meia espessura das amostras nas figuras de pólos (110), (200) e (211) para o aço carbono e no aço inoxidável duplex utilizou-se as figuras de pólos (200) e (211) para a fase ferrita e (200), (220) e (311) para a fase austenita.

As amostras após polimento foram submetidas ao ataque numa solução de 95% de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e 5% de ácido fluorídrico (HF) com o objetivo de eliminar tensões residuais superficiais.

Para o cálculo da FDOC pelo método harmônico foi utilizado o software POPLA de Los Alamos e para o cálculo pelo método direto utilizou-se o software LABOTEX que utiliza o método ADC.

Os resultados de EBSD foram obtidos em um sistema Oxford, Crystal 300 acoplado a um microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30. A preparação das amostras para

os ensaios de ebsd foi feita em máquina de polimento automático utilizando uma solução de sílica coloidal.

## Resultados

A figura 1 apresenta a seção de  $\varphi_2=45^\circ$  para um aço baixo carbono deformado a frio. A textura apresentada é típica de uma estrutura cúbica de corpo centrado apresentando os máximos valores de FDOC para as componentes  $\{111\}\langle 112\rangle$  e  $\{111\}\langle 110\rangle$ .

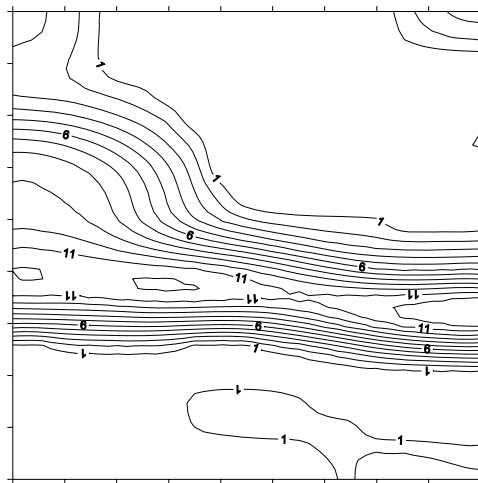


Figura 1- Seção de  $\varphi_2=45^\circ$  para um aço baixo carbono deformado a frio calculada usando software POPLA..

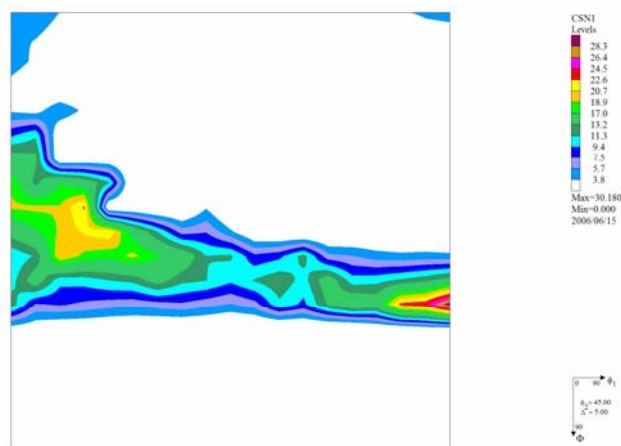


Figura 2- Seção de  $\varphi_2=45^\circ$  para um aço baixo carbono deformado a frio e calculada usando software LABOTEX.

A figura 2 apresenta a secção de  $\varphi_2=45^\circ$  para uma amostra de aço carbono laminado a frio usando o software LABOTEX e as figuras de pólos (110), (200) e (211). Pode-se observar que a textura apresentada é semelhante a obtida pelo método de séries harmônicas não ficando visível no entanto a componente  $\{110\}\langle 001\rangle$  localizada no canto direito inferior da Fig. 1. Esta componente é provavelmente um “fantasma” resultado de truncamento da série de harmônicos. O não aparecimento desta componente é uma das vantagens do método direto, pois não há o problema de truncamento da série [4].

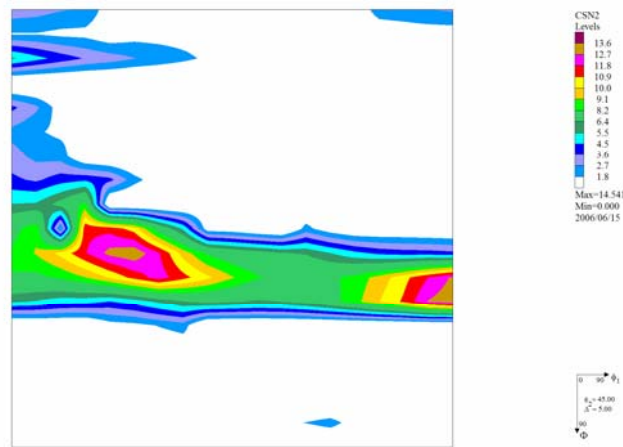


Figura 3- Seção de  $\varphi_2=45^\circ$  para um aço baixo carbono deformado a frio e calculada usando software LABOTEX com apenas duas figuras de pólos.

A FDOC apresentada na Fig. 3 foi calculada com as figuras de pólos (200) e (211) tendo sido retirada do arquivo os dados referentes ao plano (110). Pode-se observar que a aproximação é muito boa principalmente se compararmos com a FDOC calculada pelo método de séries harmônicas.

A textura em aços inoxidáveis duplex se caracteriza por apresentar fraca textura de deformação em ambas as fases [5],[6]. Na figura 4 estão mostradas as seções de  $\varphi_2=45^\circ$  para a fase ferrítica na condição laminada a quente (a) e laminada a frio 60% (b). O material laminado a quente apresenta textura muito fraca na fase ferrítica caracterizada pelas componentes  $\{111\}\langle uvw\rangle$ ,  $\{001\}\langle uvw\rangle$  e  $\{110\}\langle uvw\rangle$ . A evolução da textura com

a deformação, se caracteriza pelo aparecimento de uma componente  $\{112\}\langle 111\rangle$  e  $\{110\}\langle 110\rangle$  e quase nenhuma variação na fibra  $\{111\}$ .

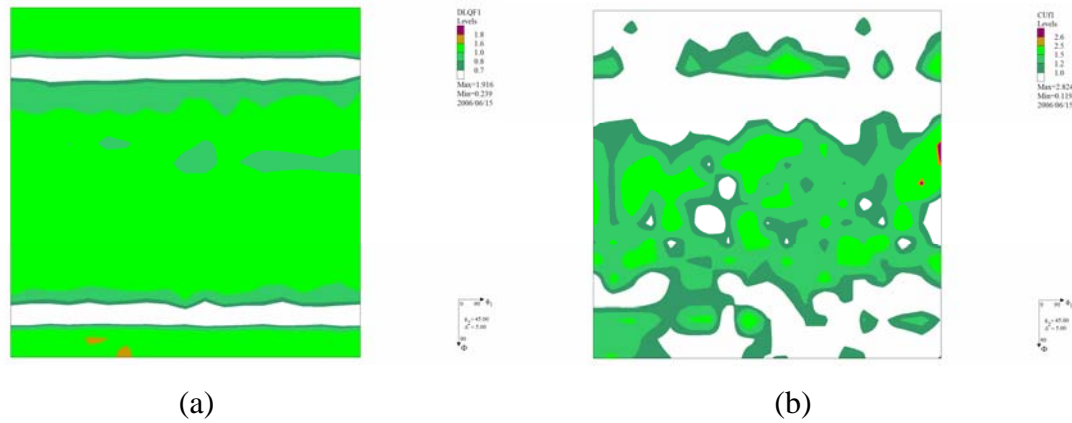


Figura 4- Seções de  $\phi_2=45^\circ$  para aço inoxidável duplex laminado a quente (a) e deformado a frio 60% (b).

A figura 5 apresenta o mapa de qualidade sobreposto pelo mapa de fases para a amostra na condição laminada quente. Os grãos de ferrita são os de tonalidade amarela e os de austenita os de tonalidade rosa.

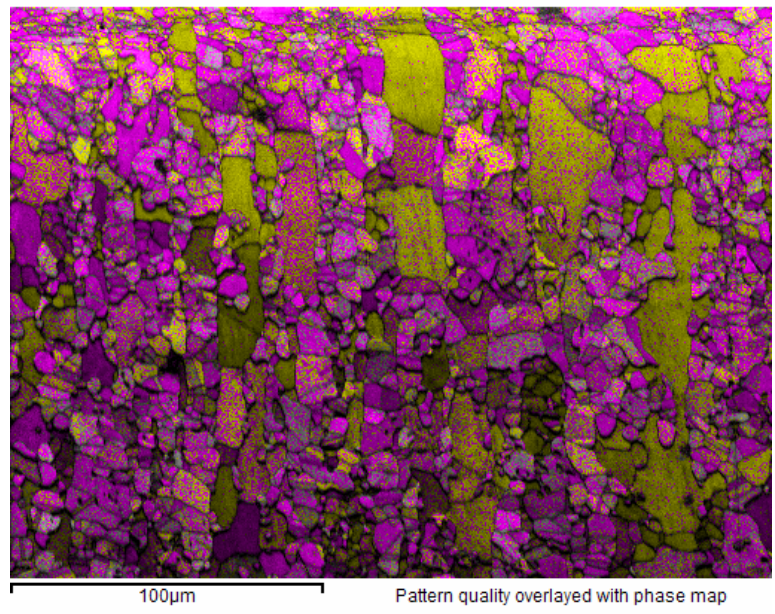


Figura 5- Mapa de qualidade sobreposto pelo mapa de fases para uma amostra na condição laminada a quente.

Na figura 6 podemos observar o mapa de qualidade sobreposto pelo mapa de orientações para fase ferrítica. Pode-se constatar uma fraca textura cristalográfica tendo uma maior concentração de grãos na tonalidade azul correspondente a família de planos  $\{111\}$  paralela a normal à superfície da amostra.

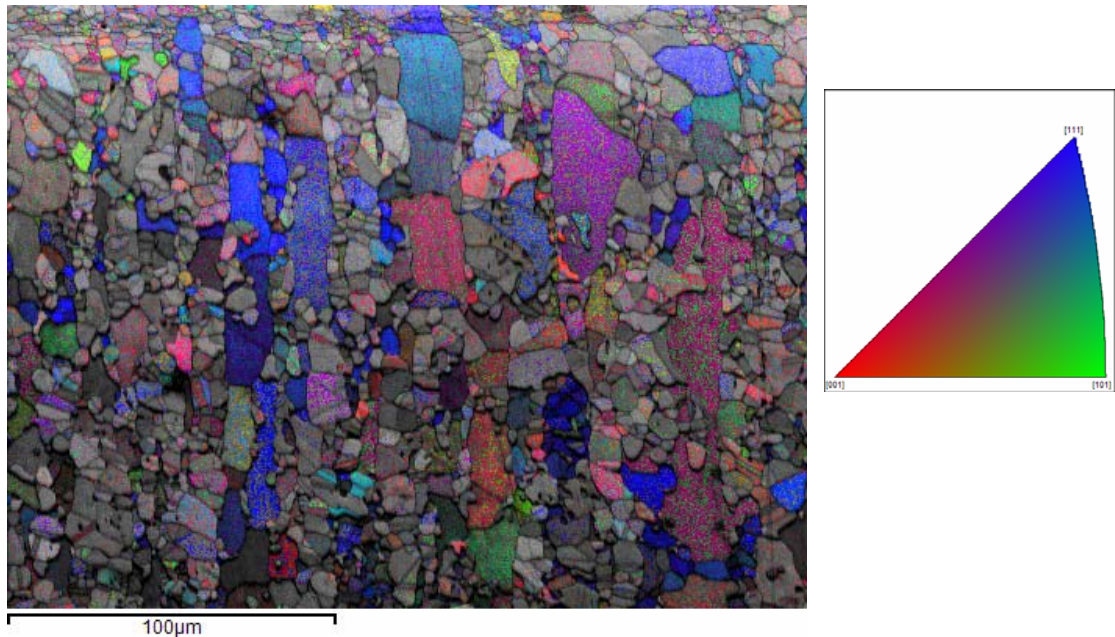


Figura 6- Mapa de orientações para a fase ferrítica.

A textura na fase austenítica é bastante fraca mesmo para o material deformado 60%. A figura 7 apresenta as seções de  $\varphi_1=0^\circ$  e  $\varphi_1=45^\circ$  para amostras de aço inoxidável duplex laminadas a quente (a) e laminadas a frio com 60% de redução (b).

A principal componente de textura na amostra laminada a quente é  $\{001\}\langle 100\rangle$  (textura de cubo). Com a deformação a frio de 60% há pouca variação na severidade da textura havendo, no entanto uma alteração nas principais orientações ficando as componentes com maiores intensidades localizadas no plano  $\{110\}$ .

A figura 8 apresenta o mapa de orientações sobreposto ao mapa de qualidade na amostra laminada a quente. Pode-se observar que a maioria dos grãos austeníticos possui uma tonalidade esverdeada o que corresponderia à família de planos  $\{110\}$  diferindo um pouco dos resultados obtidos por raios-x onde a textura de cubo foi a predominante.

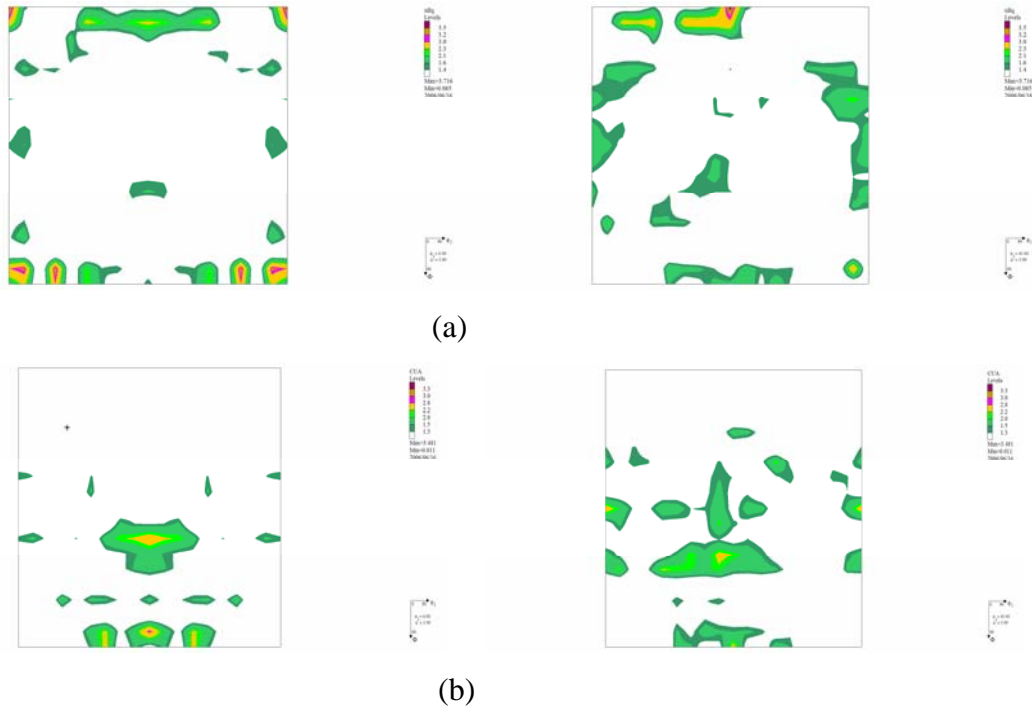


Figura 7- Seções de  $\varphi_1=0^\circ$  e  $\varphi_1=45^\circ$  para a fase austenita (a) laminada a quente e, (b) após deformação de 60% a frio.

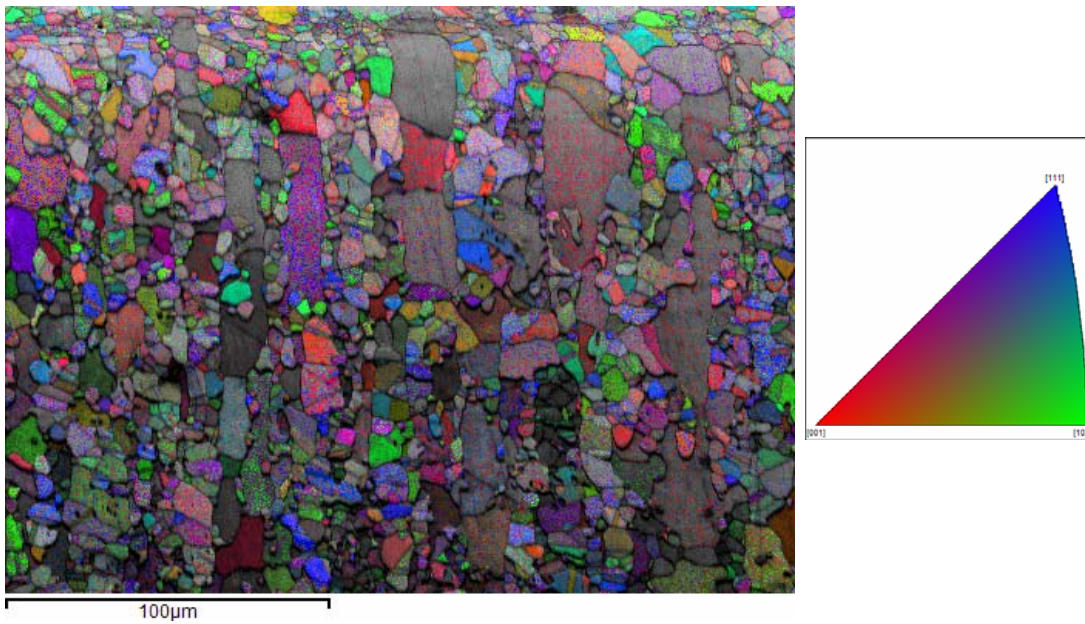


Figura 8- Mapa de orientações para a fase austenítica.

## **Conclusões**

No presente trabalho analisou-se a dificuldade de determinação da textura cristalográfica em materiais com mais de uma fase. Foram comparados resultados obtidos para FDOC pelo método de séries harmônicas usando 3 figuras de pólos com os obtidos pelo processo ADC utilizando apenas 2 figuras de pólos em amostra de aço carbono laminado a frio. Os resultados mostraram-se bastante próximos para as duas situações. Foi então analisada a textura de um aço inoxidável duplex usando o método ADC com 3 figuras de pólos para a austenita e duas para a ferrita. Os resultados mostraram que a textura de deformação em ambas as fases é bastante fraca. Análises por ebsd na amostra laminada a quente verificaram a baixa orientação preferencial constatada usando raios-x.

## **Referências Bibliográficas**

- 1- Roe, R.-J, J.App. Phys, 36, 2024-2031, 1965.
- 2- Bunge, H.-J., Texture Analysis in Materials Science, Mathematical Methods, (London-Butterworths), 1982.
- 3- Randle, V., Introduction to texture analysis, Gordon and Breach Science Publisher, 2000.
- 4- Akdut, N., Foct, J., Scripta Met. Mat, 32, 103-108, 1995.
- 5- Hutchinson. W.B., Ushioda, K., Runnsjö, J., Mat. Sci& Techn., 1985, 1, 728.