

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E MACLAÇÃO MECÂNICA EM AÇO ELÉTRICO DE GRÃO ORIENTADO¹

Nicolau Apoena Castro²
Fernando Jose Gomes Landgraf³
Marcos Flávio de Campos⁴
Rodrigo Magnabosco⁵
Taeko Yonamine⁶
Leo Kestens⁷

Resumo

Chapas de aço elétrico de grão orientado foram submetidas à tração nas direções [100] e [110] em diferentes taxas de deformação. Chapas com e sem revestimento de silicato de magnésio, conhecido industrialmente como C5, foram submetidas a ensaio de tração e posteriormente analisadas em microscópio eletrônico de varredura equipado com sistema de difração de elétrons retroespalhados e em difratômetro de raios-X equipado com goniômetro de textura. Os resultados sugerem a existência de tensão crítica para maclação mecânica e que o revestimento tem participação importante no mecanismo de deformação por maclação. Além disso, foi observada forte anisotropia da deformação, não somente em relação ao mecanismo de maclação, que só ocorreu quando a tensão foi aplicada em [100], mas também na deformação plástica convencional observada nas condições em que não houve maclação mecânica.

Palavras-chave: Aço elétrico de grão orientado; Macla de deformação; Propriedades magnéticas.

MECHANICAL TWINNING AND STRAINING OF GRAIN ORIENTED STEEL SHEETS

Abstract

Grain oriented steel sheets were strained in [100] and [110] directions under different strain rates. Sheets with magnesium silicate glass (C5) and without C5, removed with #400 sandpaper, were strained and analyzed by scanning electron microscopy equipped with electron backscattering diffraction and by X-Ray diffraction with texture goniometer. The results show a critical resolved shear stress for mechanical twinning and the coating is important to the twinning mechanism. Strong strain anisotropy was observed when the mechanical twinning didn't occur. Twinning was observed only in samples strained in [100].

Keywords: Grain oriented electric steel sheets; Deformation twin; Magnetic properties.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² EPUSP - Departamento de Metalurgia e Materiais, IPT - Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos.

³ EPUSP - Departamento de Metalurgia e Materiais

⁴ EEIMVR - Universidade Federal Fluminense

⁵ FEI

⁶ INMETRO - Divisão de Metrologia de Materiais

⁷ Delft University

1 INTRODUÇÃO

Aços elétricos de grão orientado (GO) são utilizados na fabricação de transformadores elétricos. A utilização do aço elétrico GO em núcleo de transformadores proporciona perdas magnéticas reduzidas graças à textura favorável que este material apresenta. Também conhecida como componente Goss, a orientação $\{110\}\langle 100\rangle$ apresenta propriedades magnéticas excelentes quando o campo magnético está alinhado com o eixo $\langle 100\rangle$, o que ocorre em transformadores.

O processo de fabricação de alguns transformadores exige que as chapas sejam enroladas com raio de curvatura menor que 30 mm, provocando deterioração das propriedades magnéticas devido à deformação mecânica, que é suficiente para o surgimento de maclas de deformação.⁽¹⁾ A maclação mecânica durante a tração de chapas de aço elétrico de grão orientado será estudada nesse trabalho. O comportamento da curva tensão x deformação sugere a existência de tensão crítica para maclação mecânica e o revestimento à base de vidro de silicato de magnésio (C5) parece ter relação com o mecanismo de maclação. Segundo Sethi e Gibala,⁽²⁾ a presença de óxido anódico em monocristal de nióbio pode modificar substancialmente o comportamento mecânico, provocando deslocamento preferencial de discordâncias em cunha a partir de degraus de deslizamento da interface óxido-metal.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizadas chapas de aço elétrico de grão orientado com 3,2% de Si e 0,28 mm de espessura. As amostras foram tracionadas na direção de laminação e transversal em máquina de ensaio universal MTS, modelo 810.25. Como a maioria dos grãos de aço elétrico GO apresenta a orientação $(110)[001]$, pode-se dizer que as chapas foram tracionadas em $[100]$, quando a tensão foi aplicada na direção de laminação e em $[110]$, quando tracionadas na direção transversal. Foram utilizadas taxas de deformação entre 0,002 e $0,1 \text{ s}^{-1}$.

As chapas tracionadas foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 200, equipado com acessório de EBSD (Electron Backscattering Diffraction) da TSL. Os dados foram analisados em software TSL OIM Analysis versão 4.6. Foram realizadas análises em difratômetro de raios-X Shimadzu DRX-6000, equipado com goniômetro de textura; as ODFs (orientation distribution function) foram calculadas a partir das Figuras de pólo incompletas (110) , (200) , (211) e (310) , pelo método harmônico, utilizando o software Standard ODF versão 1.20, desenvolvido por Hirofumi Inoue.

4 RESULTADOS

As curvas tensão X deformação estão apresentadas na Figura 1.

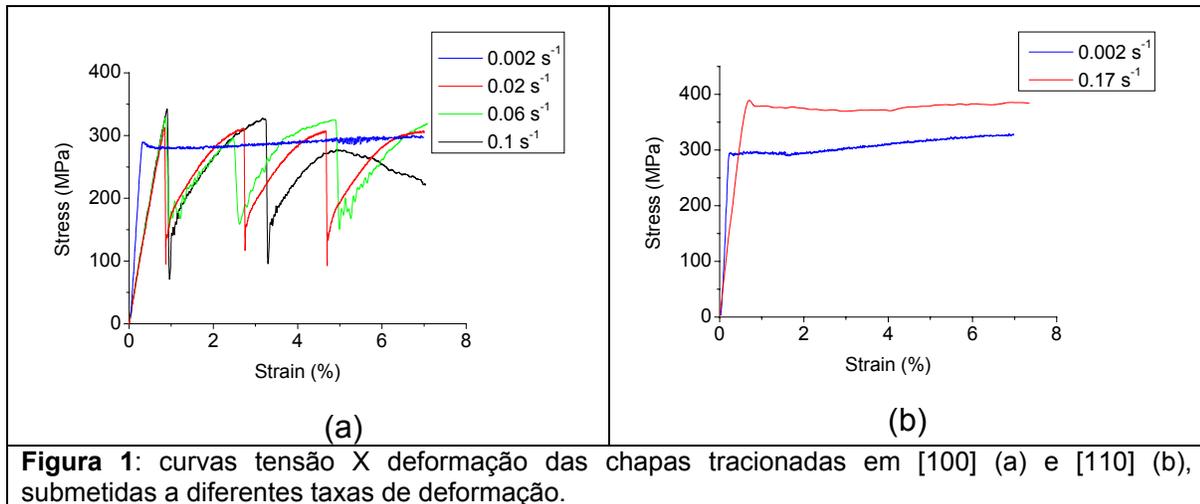


Figura 1: curvas tensão X deformação das chapas tracionadas em [100] (a) e [110] (b), submetidas a diferentes taxas de deformação.

Nota-se que para as chapas tracionadas em [100], a partir de taxa de deformação de 0,02 s⁻¹ ocorrem degraus na curva tensão x deformação, relacionados à ocorrência de maclação (Figura 1a). Para taxa de 0,002 s⁻¹ não foram observados degraus, indicando que não houve maclação mecânica. Para as chapas tracionadas em [110] não foram observados degraus mesmo para altas taxas de deformação (0,17 s⁻¹), como se pode observar na Figura 1b. É importante mencionar que os ensaios foram feitos nas chapas com revestimento de silicato de magnésio (C5). Removendo-se o revestimento com lixa #400 não foram observados degraus, mesmo utilizando-se taxa de deformação de 0,1 s⁻¹. Logo, a interface revestimento-metal tem papel fundamental no mecanismo de maclação. A Figura 2 apresenta a curva tensão x deformação para chapas sem revestimento tracionadas em [100].

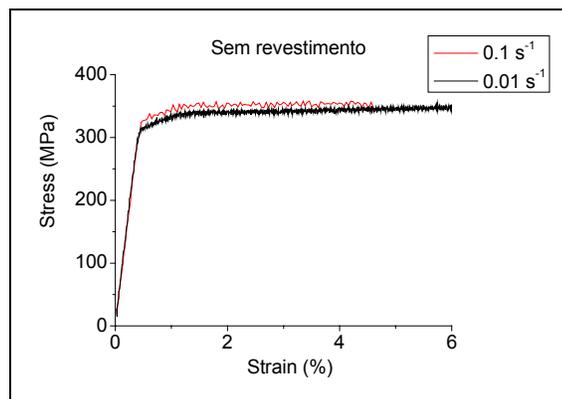


Figura 2: curva tensão x deformação de chapas sem revestimento, tracionadas em [100].

De acordo com a Figura 1a, a tensão em que ocorre ativação da maclação é de aproximadamente 350 MPa, para taxa de deformação de $0,1 \text{ s}^{-1}$. O limite de resistência para a amostra sem revestimento, submetida a taxa de deformação de $0,1 \text{ s}^{-1}$ é aproximadamente 350 MPa e, no entanto, não ocorre maclação. Isso indica que a interface revestimento-metal favorece a ocorrência de maclação mecânica, seja por restrição da movimentação de discordâncias, seja por redução da tensão crítica de maclação. Christian e Mahajant (3) não discutem tensão crítica de maclação mecânica, sugerindo que a nucleação homogênea de maclação é pouco provável, no entanto os ensaios de tração realizados nesse trabalho sugerem o contrário. Maclação mecânica em materiais cúbicos de corpo centrado (CCC) normalmente ocorre em taxas de deformação muito elevadas e baixas temperaturas (4). Neste caso observou-se maclas de deformação em moderadas taxas de deformação a temperatura ambiente, indicando que as chapas de aço GO são mais suscetíveis a maclação devido à reduzida mobilidade de discordâncias ou à reduzida energia necessária para ocorrência de deformação por maclação. A presença de Si em solução sólida e do revestimento devem ser determinantes para a ativação desse mecanismo.

A Figura 3 apresenta imagem de seção paralela à superfície de chapa tracionada em [100] com taxa de deformação de $0,1 \text{ s}^{-1}$. É possível observar maclas de deformação paralelas à direção [110] dos cristais.

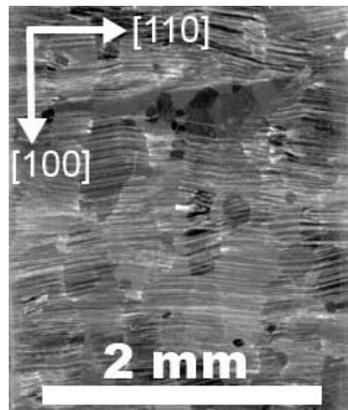


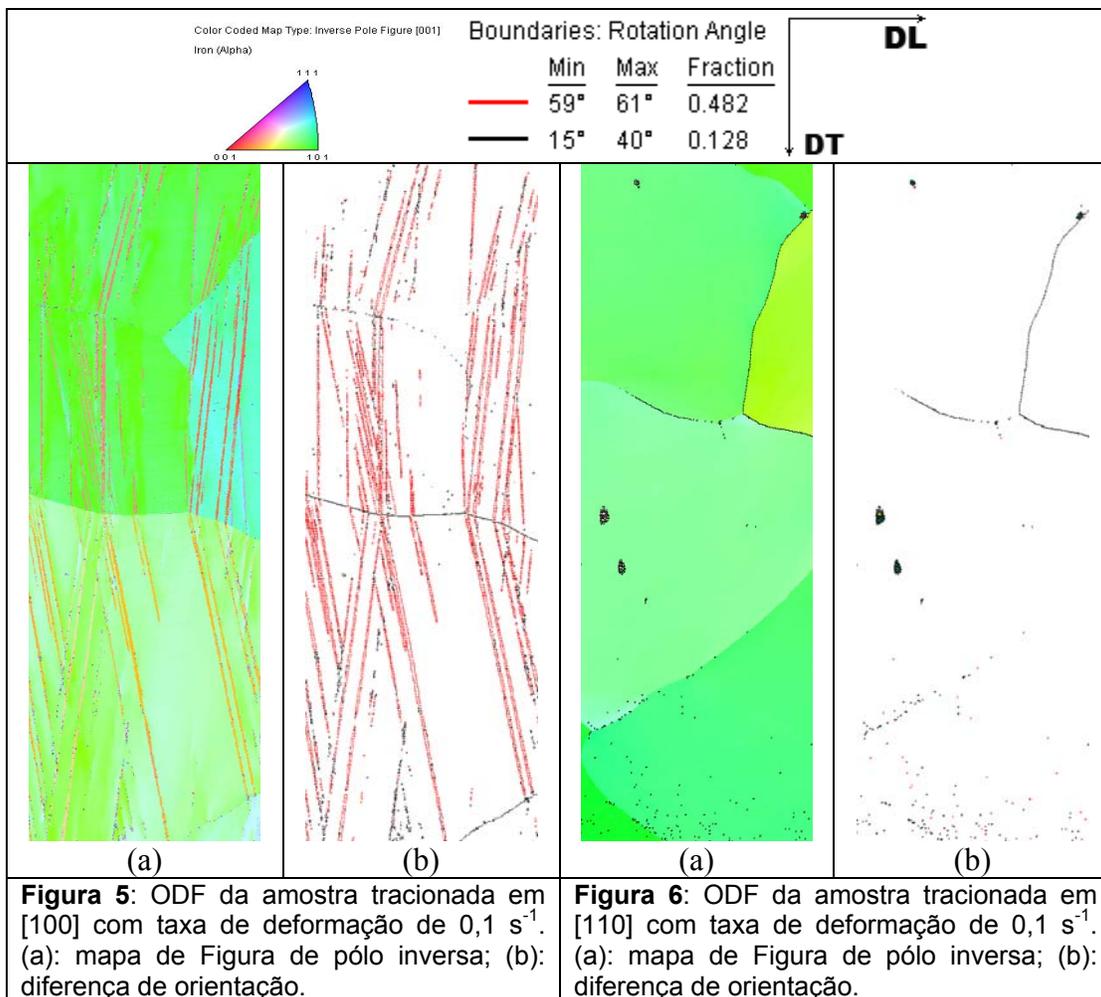
Figura 3: maclas de deformação em amostra tracionada em [100] em taxa de deformação de $0,1 \text{ s}^{-1}$.

A Figura 4 apresenta uma imagem comparativa dos corpos de prova tracionados nas direções [100] e [110], com taxas de deformação de $0,002 \text{ s}^{-1}$. Não houve maclação mecânica para essa taxa de deformação. Ocorreu acentuada redução de largura das amostras tracionadas em [110] e considerável redução de espessura da amostra tracionada em [100]. O comportamento está relacionado com os sistemas de escorregamento ativados. Quando a tensão é aplicada em [100], os sistemas com maiores fatores de Schmid⁽³⁾ provocam alongamento e redução de espessura. Quando a tensão é aplicada em [110], os sistemas ativados apresentam direções [111] paralelas ao plano da chapa, causando alongamento, redução da largura e nenhuma redução de espessura do corpo de prova.



Figura 4: corpos de prova tracionados em [100] e [110]

Foram preparadas seções paralelas ao plano das chapas (DL-DT) tracionadas em [100] e [110] para análise em EBSD. Mapas de Figura de pólo inversa e diferenças de orientação estão apresentadas nas Figuras 5 e 6.



Foram identificados contornos de 60° apenas na amostra tracionada em [100] em taxas de deformação de 0,1 s⁻¹ (Figura 5b). A maclação mecânica em materiais Cúbicos de Corpo Centrado ocorre no sistema {211}<111>, com contorno de macla de 60°. (3) A Figura 7 mostra grão com orientação (981)[111] da amostra tracionada em [100] com taxa de deformação de 0,1 s⁻¹. Os traços entre planos {211} e o plano superficial foram determinados geometricamente.

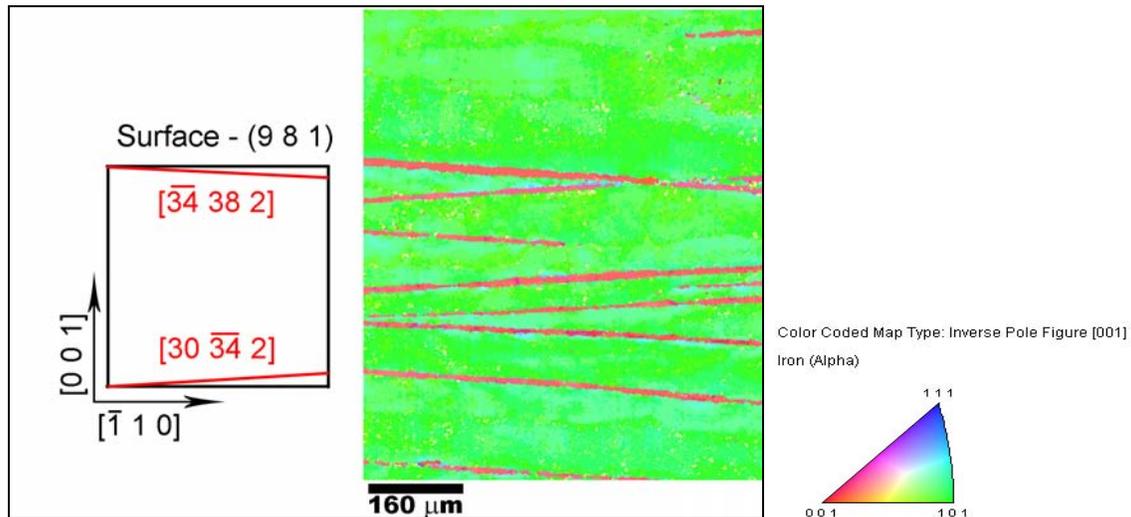


Figura 7: mapa de Figura de pólo inversa obtido por EBSD e traços entre planos {211} e o plano da superfície, determinados geometricamente.

Observa-se que os traços entre a superfície (981) e os planos (112) e (11 $\bar{2}$) são paralelos às maclas encontradas. Fica claro, portanto, que o plano de maclação é do tipo {112} e que apenas dois sistemas foram ativados. É possível que a ocorrência de maclação mecânica esteja relacionada com o fator de Schmid. Sistemas que apresentem maior tensão projetada podem ser mais favoráveis à maclação. A Tabela 1 apresenta fatores de Schmid para o sistema {211}<111>, quando a tensão é aplicada nas direções [001] e [110].

Tabela 1: fatores de Schmid para tensão aplicada em [001] e [110]. Em destaque os sistemas em que ocorre maclação.

Sistema de escorregamento						tração em [001]	tração em [110]
h	k	l	u	v	w	fator de Schmid	fator de Schmid
1	1	2	1	1	-1	-0,47	0,00
1	1	-2	1	1	1	-0,47	0,00
1	-1	2	-1	1	1	0,47	-0,47
-1	1	2	1	-1	1	0,47	-0,47
1	2	1	1	-1	1	0,24	-0,24
1	2	-1	-1	1	1	-0,24	0,24
1	-2	1	1	1	1	0,24	0,00
-1	2	1	1	1	-1	-0,24	0,00
2	1	1	-1	1	1	0,24	-0,24
2	1	-1	1	-1	1	-0,24	0,24
2	-1	1	1	1	-1	-0,24	0,00
-2	1	1	1	1	1	0,24	0,00

Quatro sistemas apresentaram fatores de Schmid máximos em valores absolutos, quando a tensão é aplicada em [001]. Os sistemas em que foram encontradas maclas apresentaram altos fatores absolutos, porém não ocorreu maclação nos planos $(1\bar{1}2)$ e $(\bar{1}12)$ apesar da elevada tensão projetada. Os sistemas em que se observou maclação mecânica apresentam direções $[111]$ e $[11\bar{1}]$, que são concorrentes ao plano da superfície, enquanto que os sistemas com alto fator (absoluto) de Schmid que não foram ativados apresentam direções $[\bar{1}11]$ e $[1\bar{1}\bar{1}]$, que são paralelas ao plano superficial. É possível que neste caso a interface revestimento-metal não esteja participando do mecanismo de maclação, logo não são observadas maclas para esse sistema. Quando a tensão foi aplicada em $[110]$, não ocorreu maclação e os sistemas com alto fator de Schmid são os mesmos que não foram ativados para tração em $[001]$, reforçando a hipótese de que o revestimento é importante para a ocorrência de maclação. A Figura 8 apresenta imagem de microscopia óptica de seção longitudinal (DL-DN) de chapa tracionada em $[001]$ em taxa de deformação de $0,1 \text{ s}^{-1}$. Observam-se maclas somente em direções concorrentes ao plano da superfície.

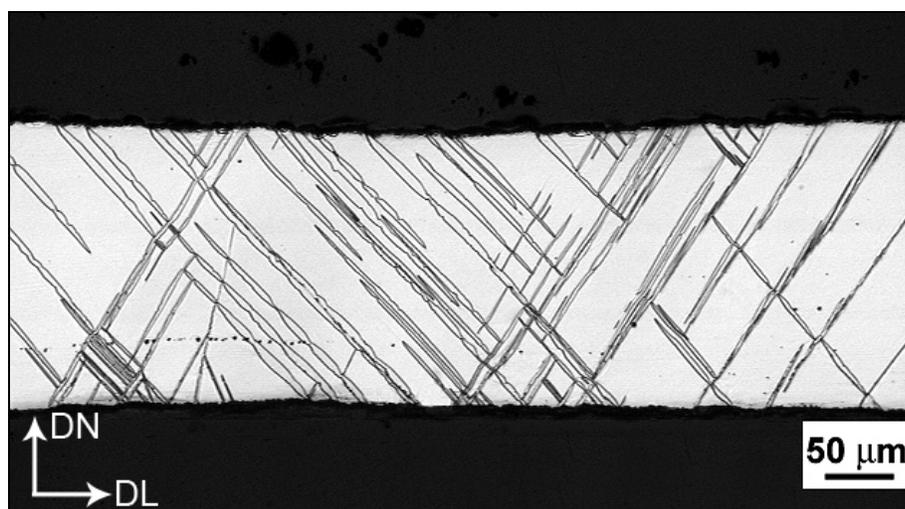
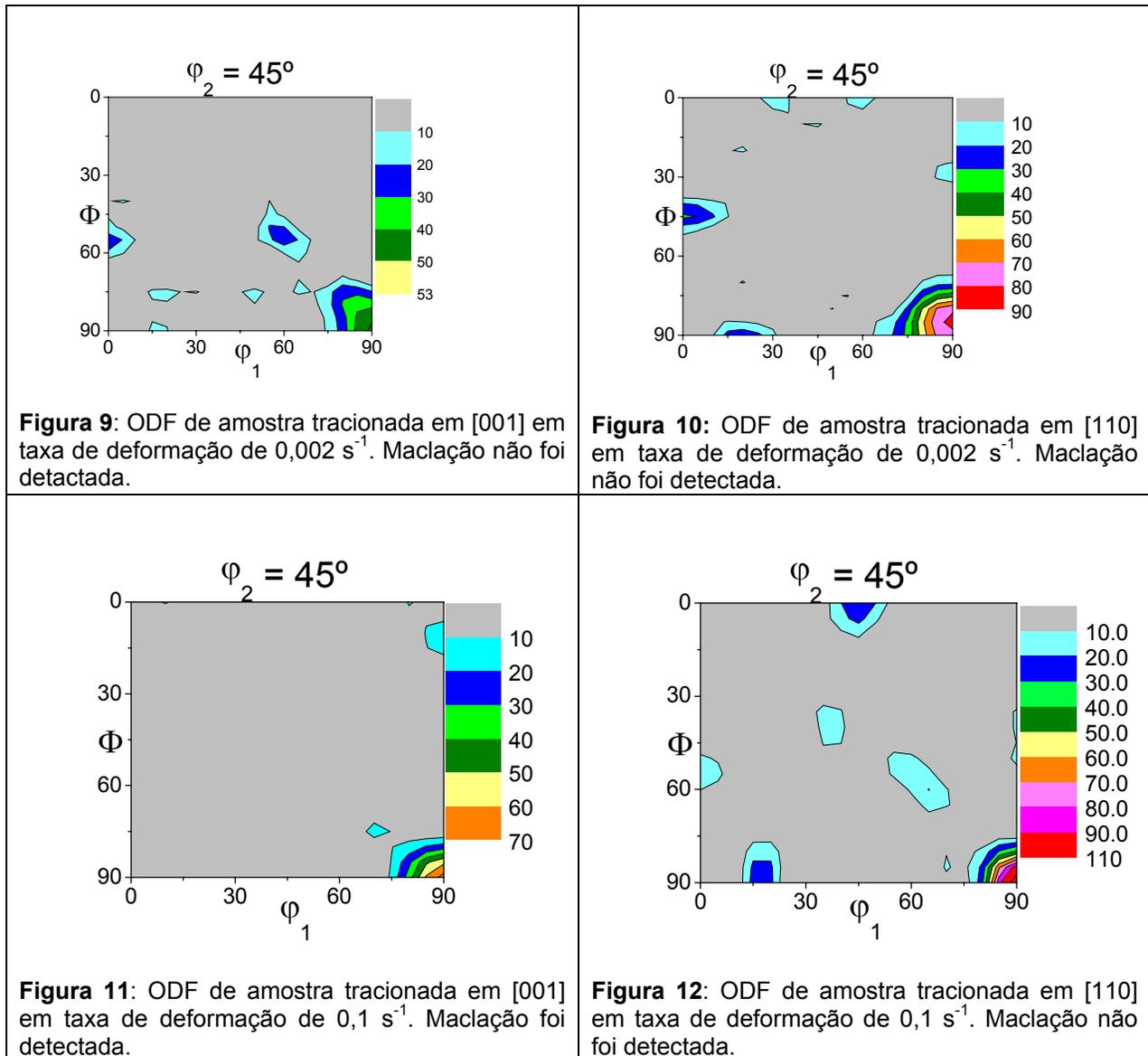


Figura 8: seção longitudinal de amostra tracionada em $[001]$ em taxa de deformação de $0,1 \text{ s}^{-1}$. Observam-se maclas em direções concorrentes ao plano da chapa.

Foram analisadas chapas tracionadas até a ruptura em difratômetro de raios-X equipado com goniômetro de textura, retirando-se amostras próximas à região de ruptura. As ODFs estão apresentadas nas Figuras 9 a 12.



Observa-se que as amostras tracionadas em taxa de deformação de $0,002 \text{ s}^{-1}$ apresentam fortalecimento de componentes próximas a $(100)[001]$, $(223)[\bar{1}\bar{1}0]$ e $(110)[2\bar{2}1]$, como se pode observar nas Figuras 9 e 10. A tração em [100] em taxa de deformação de $0,1 \text{ s}^{-1}$ (Figura 11) provocou pouca mudança de textura. Apenas o surgimento de uma componente $(119)[44\bar{1}]$ foi observado e deve estar relacionado à orientação da macla. Para a mesma taxa de deformação, a chapa tracionada em [110] (Figura 12) apresentou comportamento semelhante às amostras deformadas com menor velocidade. Portanto, para as condições em que não houve maclação mecânica

observou-se rotações em três componentes principais, enquanto que a amostra maclada apresentou somente a componente Goss original e a orientação da macla, indicando que o processo de deformação plástica não foi o mesmo, ou seja, quando houve deformação por maclação a textura foi menos alterada e a deformação plástica pode ficar restrita a pequenas regiões da chapa, provavelmente nas regiões macladas, enquanto que a matriz de grãos com orientação Goss permanece pouco deformada.

5 CONCLUSÕES

- Os ensaios de tração sugerem a existência de tensão crítica para maclação mecânica do Fe-3,2% Si em torno de 350 MPa;
- Observou-se maclação mecânica em somente dois sistemas: $(112)[11\bar{1}]$ e $(11\bar{2})[111]$, que apresentam direções de maclação concorrentes ao plano da chapa;
- O revestimento de vidro de silicato de magnésio (C5) tem participação no mecanismo de maclação mecânica das chapas de aço elétrico GO analisadas;
- Foram encontradas texturas de deformação distintas nas condições em que ocorreu maclação mecânica.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, Maria do Carmo Amorim da; CAMPOS, Marcos Flavio de; LANDGRAF, Fernando Jose Gomes; FALLEIROS, Ivan Gilberto Sandoval. **TEXTURA DE RECRISTALIZAÇÃO DE UM AÇO COM TEXTURA (110) (001) LAMINADO EM DIFERENTES ÂNGULOS EM RELAÇÃO A DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO**. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2004, Porto Alegre. Anais XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2004. p. 1-10.
- 2 Sethi, V. K.; Gibala, R. **SURFACE OXIDE SOFTENING OF NIOBIUM SINGLE CRYSTALS**. In: Acta Metallurgica V. 25 (1977), pp. 321 – 332.
- 3 J. W. Christian and S. Mahajant. **DEFORMATION TWINNING**. Progress in Materials Science Vol. 39, pp. 1-157, 1995
- 4 Padilha, A. F., Siciliano Jr, F. O ESTADO ENCRUADO. In: PADILHA, F. A. **ENCRUAMENTO, RECRISTALIZAÇÃO, CRESCIMENTO DE GRÃO E TEXTURA**. 3ª Edição. São Paulo: ABM Livros, 2005. p. 22 - 23.