

# CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA DA FRAÇÃO RECRISTALIZADA DE FERRITA NO AÇO AISI 430 DURANTE A DEFORMAÇÃO A QUENTE EM LAMINADOR STECKEL<sup>1</sup>

Willy Schuwarten Júnior<sup>2</sup>  
Ronaldo A.N.M. Barbosa<sup>3</sup>

## Resumo

Foi realizada uma caracterização do ciclo termomecânico do processamento industrial do aço AISI 430 desde o reaquecimento da placa até o bobinamento final. Foi realizada também uma caracterização da microestrutura do esboço da tira após laminação de desbaste e da bobina após laminação de acabamento. Foi desenvolvido um modelo em planilha eletrônica para prever a fração recristalizada de ferrita durante o processamento a quente do aço. Os resultados obtidos indicam que o modelo matemático representa o processo industrial, quando comparada a fração recristalizada de ferrita. O modelo matemático desenvolvido pode ser utilizado na otimização do processo industrial de laminação a quente deste aço. A quantificação da fração de ferrita recristalizada nas amostras obtidas no processo industrial para o ajuste do modelo foi realizada com o uso de EBSD. As análises de microestrutura por microscopia ótica convencional e também com o uso de ataque colorante e luz polarizada não se mostraram satisfatórias para a separação das frações de ferrita recristalizada e não recristalizada. Observou-se uma diferença na microestrutura da cabeça, corpo e cauda da tira de aço AISI 430. O modelo desenvolvido prevê tendências na mesma direção das observadas na linha de laminação industrial. O uso do EBSD torna a quantificação da fração de ferrita recristalizada possível e de maior confiança nos resultados.

**Palavras-chave:** Modelagem; Fração recristalizada; Ferrita; AISI 430.

## CHARACTERIZATION AND MATHEMATICAL MODELLING OF FERRITE RECRYSTALLIZED FRACTION FOR AN AISI 430 STEEL HOT DEFORMED IN A STECKEL MILL

### Abstract

A characterization of the thermo mechanical cycle of AISI 430 industrial process from reheating of the plate to coil has been presented. A mathematic model was developed in spreadsheet to predict the ferritic recrystallised fraction during the steel processing. The results obtained by mathematical model lead to a trend with the industrial process, if compared the levels of the recrystallised fraction of ferrite. The mathematical model developed can be used for industrial hot rolling process optimization of the AISI 430 steel. The quantification of the ferritic recrystallised fraction in samples, obtained from industrial process, for the model adjustment, was performed with EBSD. Analysis of microstructure by conventional optical microscopy and also with the use of color attack and polarized light were not satisfactory to separate fractions of ferrite recrystallised and not recrystallised. Differences in microstructure of the head, body and tail of the AISI 430 strip steel were observed. The mathematic model developed is able to provide trends in the same direction of observed on rolling industrial line. The use of EBSD became possible and reliable the quantification of the ferritic recrystallised fraction.

**Key words:** Modelling; Recrystallized fraction; Ferrite; AISI 430.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE*

<sup>2</sup> *Eng. Mecânico, M.Sc., Assistente Técnico da Gerência de Laminação de Tiras a Quente da ArcelorMittal Inox Brasil.*

<sup>3</sup> *Eng. Mecânico, Ph.D., Professor do Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.*

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho trata da caracterização e da modelagem matemática da fração recristalizada de ferrita no aço inoxidável ferrítico AISI 430 durante o processo de deformação a quente em laminador tipo Steckel.

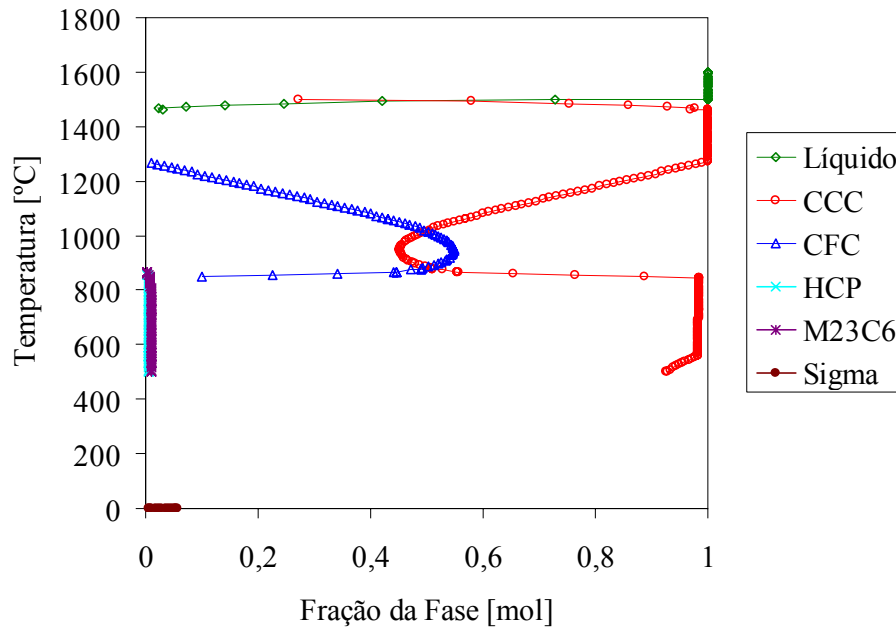
O tema deste trabalho é de grande interesse devido à crescente demanda do aço inoxidável ferrítico e do pouco conhecimento sobre a evolução da sua microestrutura durante o processo de laminação a quente em laminadores reversíveis do tipo Steckel. A relevância deste trabalho está na oportunidade de se conhecer melhor a fração recristalizada de ferrita do aço inox AISI 430 e de se desenvolver um método matemático de simulação do processo industrial de deformação a quente deste aço. Um melhor entendimento da evolução da fração recristalizada de ferrita do aço inoxidável AISI 430 durante o processo de laminação a quente em laminador do tipo Steckel vai direcionar e subsidiar futuros estudos envolvendo o processamento a quente deste aço. Este trabalho será um ponto de partida para outros com foco na melhoria das propriedades finais das tiras laminadas a frio, como melhoria da estampabilidade, redução da ocorrência de estrias etc.

São objetivos do presente trabalho caracterizar a fração recristalizada de ferrita do aço inoxidável ferrítico AISI 430 durante o processo de deformação a quente em laminador tipo Steckel e desenvolver um modelo matemático, via planilha eletrônica, para prever a fração recristalizada de ferrita após a laminação a quente. O modelo será validado comparando as previsões de fração recristalizada com os resultados obtidos na laminação de tiras a quente da ArcelorMittal Timóteo em pontos definidos ao longo do comprimento e da espessura da tira de aço inoxidável ferrítico AISI 430 laminado a quente.

### 1.1 O Aço Inoxidável Ferrítico AISI 430

A designação de aço inoxidável ferrítico se deve à sua estrutura na condição de peça recozida. A temperaturas elevadas, alguns desses aços podem apresentar, na verdade, uma estrutura “duplex”, ferrítica e austenítica, como, por exemplo, no caso do aço AISI 430. Em outros, dependendo do teor de cromo, de carbono, nitrogênio e de estabilizantes como nióbio e titânio, a estrutura pode permanecer totalmente ferrítica em todas as temperaturas.

O resultado da simulação com o uso do *software* Thermo-Calc para obtenção das fases presentes no equilíbrio do aço AISI 430 com a composição química citada, mostra uma região bifásica com a presença de  $\alpha$  (ferrita) e  $\gamma$  (austenita) nas temperaturas entre 846°C e 1.272°C (Figura 1).



**Figura 1** - Diagrama de equilíbrio do aço AISI 430 simulado por Thermo-Calc com a composição química 0,05%C, 0,39%Mn, 0,35%Si, 16,17%Cr e 0,05%N.

A Figura 1 mostra que o percentual de austenita em número de moles do aço AISI 430 vai variar durante o processo de laminação a quente. No forno de reaquecimento, com uma temperatura de desenformamento de 1.190°C, o percentual de austenita está em 17%. Durante a laminação de desbaste, que é realizada em torno de 1.130°C, o percentual de austenita sobe para 29%. No início da laminação de acabamento a 1.000°C, o percentual de austenita sobe para 52%, podendo chegar até a 55% nos passes finais que ocorrem em temperatura da ordem de 930°C.

## 1.2 Requisitos das Bobinas Laminadas a Quente de AISI 430

Para a aplicação final, as bobinas de aço inoxidável ferrítico AISI 430 devem apresentar, após a laminação a frio e posterior recozimento, boas propriedades de estampagem, alto brilho e uma superfície isenta de estrias.

Uma microestrutura, após a laminação a quente mais fragmentada e com textura menos intensa, tende a produzir as melhores bobinas a frio. A estampabilidade destes materiais é essencialmente dependente da textura após recozimento final e, esta última, é fortemente influenciada pela textura herdada da laminação a quente.

A quebra da textura de solidificação, durante as etapas de laminação a quente e a frio, é importante para evitar a formação de estrias durante as operações de estampagem. A solução passa por refinamento da estrutura da placa, com uso de equipamento de agitação eletromagnética e por destruição das faixas de grãos colunares, através de recristalizações sucessivas. Obtém-se a destruição destas faixas com as seguintes condições: laminação a quente com planos de redução favoráveis à recristalização, laminação a frio com martensita de baixo carbono e recozimentos intermediários.

### 1.3 Recristalização Estática após Laminação a Quente

A recristalização estática, durante a laminação a quente de aços inoxidáveis ferríticos, pode ser promovida por aumento da deformação, por aumento do tempo entre passes e pela utilização de temperaturas intermediárias de deformação. Temperaturas mais elevadas favorecem a recuperação e, a temperaturas mais baixas, o material não recupera nem recristaliza.

Glez, citado por Schuwarden<sup>(1)</sup> propôs um modelo para a cinética de recristalização do aço inox ferrítico AISI 430 com base na equação do tipo Avrami, sendo a fração recristalizada calculada pela seguinte equação:

$$X(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, t) = 1 - \exp \left[ - \ln 2 \cdot \left( \frac{t}{t_{0,5}} \right)^n \right]$$

O tempo para 50% de recristalização depende da deformação, taxa de deformação e temperatura:

$$t_{0,5} = t_0 \cdot \varepsilon^{-a} \cdot \dot{\varepsilon}^{-b} \cdot \exp \left( \frac{Q}{RT} \right)$$

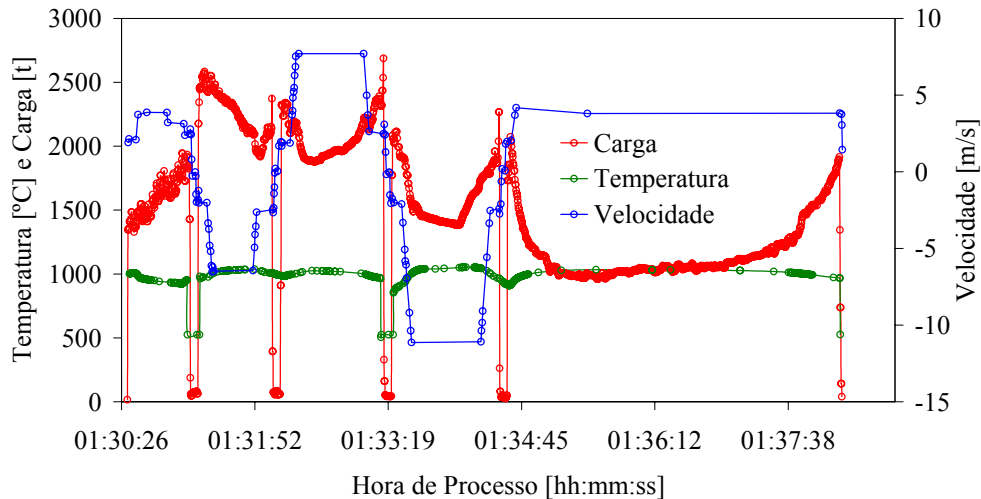
Onde:

- a: sensibilidade à deformação;
- b: sensibilidade à taxa de deformação;
- Q: energia de ativação em J/mol;
- R: constante dos gases = 8,314 J/mol/K;
- T: temperatura absoluta em K;
- t<sub>0</sub>: constante em s<sup>1-b</sup>

### 1.4 O Ciclo Termomecânico no Laminador Steckel

A temperatura é a variável mais importante nos processos de deformação a quente, já que todos os mecanismos de amaciamento são termicamente ativados. A influência da temperatura nas cinéticas de amaciamento é muito maior do que a da deformação ou da taxa de deformação.

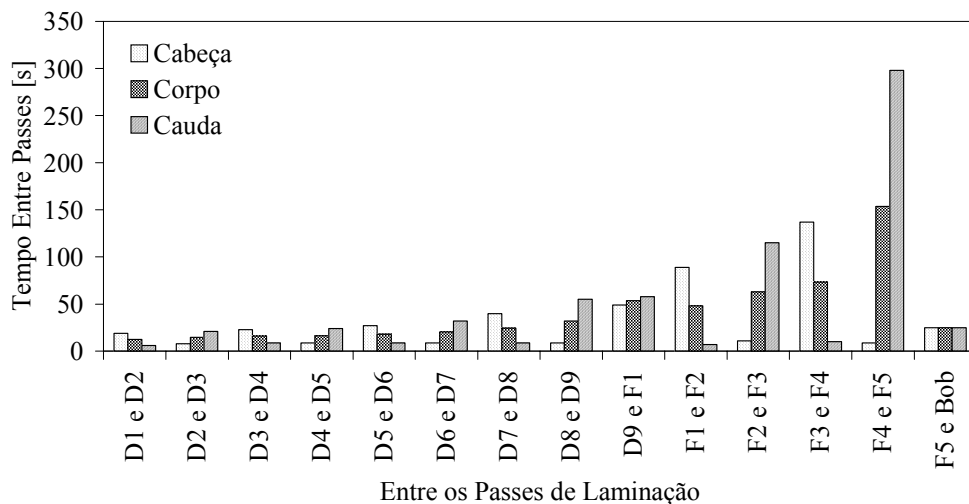
A redução de temperatura e conseqüente incremento na carga de laminação que são observados na ponta e na cauda da tira, laminada via Steckel, podem ser vistos na Figura 2. Esta redução da temperatura na ponta e na cauda da tira deve-se ao maior tempo de exposição desta região no momento da reversão entre os passes de laminação e maior tempo de contato com o tambor do forno durante a laminação.



**Figura 2** - Perfil de temperatura, carga e velocidade de laminação de uma tira de aço AISI 430 de 3,10mm x 1060mm laminada a quente via Steckel.

Nos processos em laminador tipo *Tandem*, o tempo entre passes é muito pequeno, enquanto que nos laminadores tipo Steckel o tempo é muito maior e depende do comprimento da bobina e da velocidade de laminação.

Para um ponto situado na ponta da tira, os tempos entre passes são maiores após os passes a frente, e menores após os passes a ré. Considerando um ponto situado na cauda da tira, os tempos entre passes são menores após os passes a frente, e maiores após os passes a ré. Dessa forma, os tempos entre passes em um ponto de referência situado numa extremidade da tira variam muito mais quando comparados com outro situado na metade do comprimento laminado (Figura 3).



**Figura 3** - Comparação do tempo entre passes da ponta, cauda e corpo da tira na laminação de desbaste e laminação de acabamento.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho é o aço inoxidável ferrítico AISI 430, retirado diretamente da linha de laminação a quente da ArcelorMittal Inox Brasil. Sua

composição química média é dada por 0,05%C, 0,39%Mn, 0,35%Si, 16,17%Cr e 0,05%N, sendo todos os números em percentuais do peso.

### 3.1 Modelo de Previsão da Fração de Ferrita Recristalizada

Dentre as principais vantagens da modelagem matemática estão: a redução do número de experiências nas linhas de produção, a avaliação de modificações em equipamentos, a previsão de variáveis que não podem ser medidas nas linhas de produção, a avaliação do sinergismo entre variáveis de processo, a possibilidade de controle baseado em modelo matemático e a pesquisa de baixo custo. Os modelos matemáticos permitem prever: a cinética de transformação de fases, o tamanho de grão, fases presentes, dureza, limite de escoamento, limite de resistência e temperatura de transição dúctil-frágil. Por outro lado, dentre as principais dificuldades na modelagem matemática se encontram a escolha das equações que descrevem os fenômenos físicos. Equações que descrevem parâmetros ou fenômenos microestruturais, tais como o tempo para 50% de recristalização, tamanho de grão recristalizado e crescimento de grão, podem apresentar diferenças significativas em função do material e das condições de processamento.

Para a modelagem matemática do processo de laminação a quente dos aços carbono, inclusive os microligados, as principais equações necessárias estão disponíveis na literatura em inúmeras publicações, o que não ocorre para os aços inoxidáveis, principalmente os ferríticos, que foram pouco estudados. Neste trabalho, o desenvolvimento de um modelo matemático para se prever a fração recristalizada de ferrita do aço AISI 430 foi motivado pela possibilidade de otimização do processo de laminação a quente deste aço. A expressão “otimizar o processo de laminação a quente” significa aqui, se obter uma bobina com microestrutura mais recristalizada e de textura aleatória, contribuindo para uma melhor qualidade superficial do produto nas fases subseqüentes do processo.

Os principais parâmetros de laminação utilizados para o modelo de recristalização são: a temperatura, a deformação, a taxa de deformação, os planos de redução com os tempos entre deformação, o tipo de aço e sua microestrutura inicial.

Com base nas equações e parâmetros obtidos na literatura, foi desenvolvido um modelo matemático em planilha eletrônica para prever a evolução da fração recristalizada de ferrita a cada passe de laminação e a fração recristalizada final após a laminação a quente do aço AISI 430 em laminador reversível tipo Steckel. As variáveis do processo de laminação utilizadas pelo modelo foram obtidas a partir de registros do modelo matemático de *setup* dos laminadores de tiras a quente da ArcelorMittal Timóteo e de variáveis de processo registradas por *softwares* de monitoramento da planta industrial. São dados de entrada do modelo os que se seguem: os valores de diâmetro dos cilindros de trabalho do laminador desbastador e do laminador acabador, a temperatura de desenformamento, a temperatura medida na tesoura de pontas antes da entrada da tira no laminador acabador, o plano de reduções com espessura, velocidade média e temperatura média de cada passe de laminação, os tempos de cada passe e os tempos entre passes de laminação.

A implementação do modelo foi realizada em planilha eletrônica do tipo Microsoft® Excel®. Este recurso oferece uma grande facilidade para realizar os cálculos de evolução da microestrutura a cada passe de laminação, considerando os resultados de microestrutura do passe imediatamente anterior. A entrada de dados, a possibilidade de resultados na forma de tabela ou de gráficos e a facilidade de uso, também são vantagens deste recurso. Por estas facilidades, as planilhas eletrônicas

vêm sendo utilizadas com muito sucesso para desenvolver modelos de previsão da evolução microestrutural dos aço.

O modelo matemático foi desenvolvido para calcular a fração recristalizada de ferrita em três diferentes pontos ao longo da espessura da tira e em três diferentes pontos ao longo do comprimento da tira. Esta estratificação foi proposta em função do gradiente de microestrutura que pôde ser observado ao longo da espessura nas tiras de aço AISI 430 laminadas a quente via Steckel e para considerar também a diferença na cinética do processamento termomecânico ao longo do comprimento da tira.

Os pontos ao longo do comprimento da tira considerados na simulação são mostrados na Figura 5. São consideradas as posições de cabeça, corpo e cauda da tira. Os dados de temperatura, velocidade de laminação e tempo entre passes são identificados para cada ponto considerado a partir dos registros de dados do modelo matemático de *setup* e dos registros de variáveis de processo de laminação.

O gradiente de temperatura e de deformação, que existe ao longo da espessura da tira, foi considerado no modelo tomando-se três pontos de referência em relação à espessura da tira: um ponto próximo à superfície da tira, um ponto no centro da espessura da tira e um ponto em uma posição intermediária. A deformação utilizada pelo modelo no cálculo da fração recristalizada nestes pontos foi estimada a princípio, como sendo duas vezes a deformação média do passe para o ponto considerado próximo à superfície da tira, a metade da deformação média do passe para o ponto considerado no meio da espessura da tira e igual à deformação média do passe para o ponto considerado a ¼ da espessura da tira.

As temperaturas utilizadas pelo modelo no cálculo da fração recristalizada são as calculadas pelo modelo matemático de *setup* dos laminadores. Com base neste mesmo modelo, um valor de temperatura para ¼ da espessura foi estimado.

O modelo desenvolvido para o cálculo da fração recristalizada de ferrita, após cada passe de laminação, supõe uma evolução conforme a lei de Avrami.

$$X_{REX} = 1 - \exp \left[ - \ln 2 \cdot \left( \frac{t}{t_{0,5}} \right)^n \right]$$

O tempo para 50% de recristalização ( $t_{0,5}$ ) depende da deformação, da taxa de deformação e da temperatura:

$$t_{0,5} = a \cdot \varepsilon^{-b} \cdot \dot{\varepsilon}^{-c} \cdot D^d \cdot \exp \left( \frac{Q_{REX}}{RT} \right)$$

Uma equação para o cálculo do tempo para 50% de recristalização ( $t_{0,5}$ ) considerando o parâmetro de Zener-Hollomon, como a utilizada por McLaren e Sellars em trabalhos anteriores e que foram citados por Schuwarden,<sup>(1)</sup> também foi implementada como uma opção no modelo.

$$t_{0,5} = a \cdot \varepsilon^{-b} \cdot Z^{-c} \cdot D^d \cdot \exp \left( \frac{Q_{REX}}{RT} \right)$$

Desta forma, consideramos a taxa de deformação corrigida pela temperatura absoluta de deformação. O parâmetro de Zener-Hollomon é um fator importante na modelagem matemática dos fenômenos relacionados com os processos de deformação a quente e é dado por:

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp \left( \frac{Q_{\varepsilon}}{RT} \right)$$

onde  $Q_{\varepsilon}$  é a energia de ativação para a deformação e R a constante universal dos gases.

O modelo desenvolvido contribui com o proposto anteriormente por Glez para o cálculo da fração recristalizada de ferrita do aço inoxidável AISI 430, por considerar também uma primeira estimativa para o gradiente de microestrutura ao longo da espessura da tira, mesmo usando apenas um coeficiente para representar o gradiente de deformação ao longo desta espessura.

### 3 RESULTADOS

É apresentado como exemplo, o resultado da previsão de fração recristalizada para um ponto na região de meio do comprimento da tira, considerando a região intermediária entre a superfície e o meio da espessura da tira (Tabela 1).

Uma comparação da fração recristalizada de ferrita medida por EBSD com a fração de ferrita recristalizada calculada pelo modelo são apresentados na Tabela 2, para o esboço da tira após laminação de desbaste, e na Tabela 3 para a tira após laminação de acabamento. Os resultados do modelo foram obtidos com o melhor ajuste para o gradiente de deformação ao longo da espessura da tira.

**Tabela 1** - Resultado da previsão de fração recristalizada de ferrita calculada pelo modelo para o corpo da tira, em uma região intermediária.

	Passe	Esp <sub>i</sub> [mm]	Esp <sub>f</sub> [mm]	v [m.s <sup>-1</sup> ]	t <sub>c</sub> [s]	$\dot{\gamma}/t_c$ [s <sup>-1</sup> ]	T <sub>3</sub> [°C]	t <sub>ep</sub> [s]	<sup>a</sup>	Z [s <sup>-1</sup> ]	t <sub>0,5</sub> [s]	t <sub>0,95</sub> [s]	X <sub>RXE</sub>	
Rougher	D1	200,0	177,0	2,2	0,05	0,11	2,4	1148	12,5	0,11	168	81,5	232,7	0,049
	D2	177,0	152,2	3,1	0,03	0,14	4,1	1144	14,5	0,25	285	26,5	75,5	0,258
	D3	152,2	137,1	3,1	0,03	0,10	3,6	1139	16,0	0,28	257	23,0	65,6	0,341
	D4	137,1	120,0	3,2	0,03	0,12	4,5	1133	16,5	0,31	324	19,9	56,9	0,412
	D5	120,0	102,5	3,2	0,03	0,15	5,3	1127	18,0	0,32	386	18,2	52,1	0,494
	D6	102,5	82,4	3,2	0,03	0,20	6,8	1123	20,5	0,37	505	15,2	43,3	0,653
	D7	82,4	64,5	3,2	0,03	0,22	8,1	1116	24,5	0,35	613	15,9	45,3	0,720
	D8	64,5	44,6	3,2	0,03	0,34	11,6	1107	32,0	0,44	903	11,4	32,6	0,947
	D9	44,6	28,3	3,2	0,03	0,42	15,7	1089	53,5	0,44	1297	11,5	32,8	0,997
Steckel	F1	28,3	19,6	3,6	0,02	0,34	22,3	993	48,0	0,34	2582	20,6	58,7	0,897
	F2	19,6	11,0	5,8	0,01	0,53	56,4	984	63,0	0,56	6753	9,4	26,9	1,000
	F3	11,0	6,2	6,9	0,01	0,52	89,1	972	73,5	0,52	11159	10,1	29,0	1,000
	F4	6,2	4,2	10,6	0,00	0,37	146,3	959	153,5	0,37	19280	16,1	45,9	1,000
	F5	4,2	3,1	3,6	0,01	0,28	51,5	931	25,0	0,28	7610	30,0	85,7	0,415

**Tabela 2** - Comparação da fração recristalizada de ferrita medida por EBSD com a fração de ferrita recristalizada calculada pelo modelo com a utilização dos parâmetros calculados por Glez para o esboço da tira após laminação de desbaste.

	Cabeça do Esboço		Cauda do Esboço	
	Modelo	EBSD	Modelo	EBSD
Superfície	1,000	0,954	1,000	0,948
Intermediário	1,000	0,955	0,998	0,949
Centro	1,000	0,797	0,980	0,800



**Tabela 3** - Comparação da fração recristalizada de ferrita medida por EBSD com a fração de ferrita recristalizada calculada pelo modelo com a utilização dos parâmetros calculados por Glez para a tira após laminação de acabamento.

	Cabeça da Tira		Corpo da Tira		Cauda da Tira	
	Modelo	EBSD	Modelo	EBSD	Modelo	EBSD
Superfície	0,961	-	0,716	0,805	0,716	0,651
Intermediário	0,859	-	0,415	0,361	0,415	0,310
Centro	0,754	-	0,293	0,287	0,293	0,692

#### 4 DISCUSSÃO

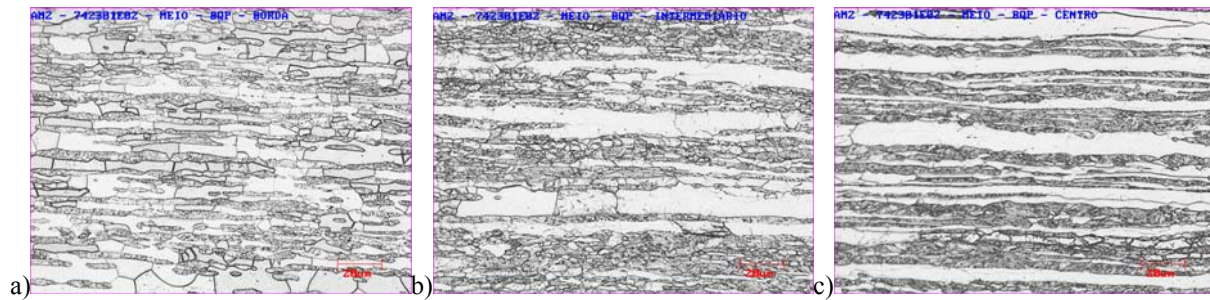
Os dados do modelo deveriam ser comparados com a evidência das fotomicrografias advindas das amostras de esboço e de tira laminada quente (Figura 6). Embora muitas indicações qualitativas possam ser retiradas das imagens ali apresentadas, o valor da fração recristalizada de ferrita não pôde ser obtido com precisão utilizando-se a metodologia convencional de quantificação de fases. Dessa forma, houve a necessidade de uma quantificação dessas amostras por imagens geradas por EBSD.

O erro na avaliação da fração recristalizada está no fato de que algumas vezes é muito difícil saber se o grão pode ser considerado recristalizado ou não. Isto vai depender da revelação da microestrutura e também da heterogeneidade da microestrutura. A utilização de um número maior de campos pode reduzir o desvio padrão e, conseqüentemente, os resultados serem considerados mais representativos.

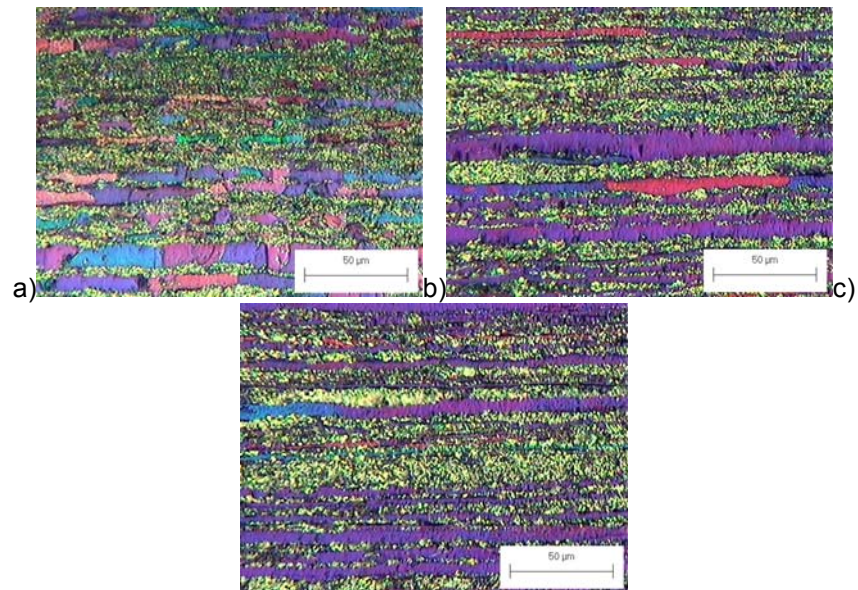
Algumas dificuldades listadas por Glez e citadas por Schuwarten<sup>(1)</sup> para avaliação da fração recristalizada foram confirmadas durante o procedimento experimental realizado na execução deste trabalho, onde a quantificação da fração recristalizada realizada por microscopia ótica se mostrou impraticável.

Uma tentativa de melhor revelar a microestrutura para a quantificação da fração de ferrita recristalizada foi realizada com o uso de ataque colorante e luz polarizada (Figura 5). A microestrutura revelada com este método se mostrou mais legível do que a revelada com o uso do reagente Villela (Figura 4) em tons de cinza, porém, a quantificação da fração de ferrita recristalizada ainda se mostrou impraticável pelos mesmos motivos já citados. É importante mencionar que esta técnica permite se ter uma noção da orientação dos grãos de ferrita pela diferença de cor dada pelo uso da luz polarizada.

Com um aumento adequado, é possível identificar regiões de subestrutura de grãos nas amostras provenientes do processo industrial, porém, a redução da área de análise inviabiliza uma quantificação de ferrita recristalizada e não recristalizada com precisão satisfatória.



**Figura 4** - Fotomicrografias óticas na posição do corpo de uma tira de aço AISI 430 após a laminação de acabamento e submetida a resfriamento na zona úmida, seção longitudinal da espessura. (a) região próxima à superfície da tira, (b) região intermediária, (c) região no meio da espessura.



**Figura 5** - Fotomicrografias óticas na posição do corpo de uma tira de aço AISI 430 após a laminação de acabamento e submetida a resfriamento na zona úmida, seção longitudinal da espessura, ataque colorante e uso de luz polarizada. (a) região próxima à superfície da tira, (b) região intermediária, (c) região no meio da espessura.

Amostras de uma bobina de aço AISI 430 com bitola 3,10mm de espessura e 1060mm de largura, laminada com o mesmo ciclo termomecânico simulado pelo modelo, foram analisadas por EBSD para quantificação do percentual de ferrita recristalizada. Para a amostragem realizada na cabeça da tira, foram preparadas mais de uma amostra com tempos de polimento acima de 10h e mesmo assim, o resultado do EBSD não apresentou indexação satisfatória para uma quantificação das frações de ferrita recristalizada e não recristalizada (Tabela 4).

**Tabela 4** - Resultado da fração recristalizada de ferrita medida por EBSD nas amostras do esboço e da tira laminada.

		Esboço		Bobina Laminada a Quente		
		Cabeça	Cauda	Cabeça	Corpo	Cauda
Próximo à Borda	Ferrita Rex	95,4%	94,8%	-	80,5%	65,1%
	Ferrita Nrex	4,6%	5,2%	-	19,5%	34,9%
Intermediário	Ferrita Rex	95,5%	94,9%	-	36,1%	31,0%
	Ferrita Nrex	4,5%	5,1%	-	63,9%	69,0%
Centro da Espessura	Ferrita Rex	77,7%	80,0%	-	28,7%	69,2%
	Ferrita Nrex	22,3%	20,0%	-	71,3%	30,8%

## 5 CONCLUSÃO

O ciclo termomecânico da laminação via Steckel é complexo pelas diferenças de tempos e temperatura entre cabeça, corpo e cauda da tira. O presente modelo é uma primeira aproximação da solução da questão. Mesmo sendo bastante simplificado, o modelo é capaz de prever tendências na mesma direção das observadas na linha de laminação, como a previsão de recristalização superior a 80% após desbaste, independentemente da posição da amostra. O modelo prevê corretamente uma maior recristalização na cabeça e na superfície do esboço, em contraste com uma menor recristalização no centro da cauda e também prevê a tendência observada na laminação após acabamento, em que há uma maior “fragmentação” na região do corpo da bobina do que na cauda.

O uso de microscopia ótica para a quantificação de fração de ferrita recristalizada no aço AISI 430 após laminação a quente é impraticável. As fotomicrografias com o uso de luz polarizada melhoram a visualização em relação à microscopia ótica convencional, mostrando a orientação dos grãos, mas também não resolvem o problema. Estas técnicas podem ser usadas como preparatórias para o EBSD, que é um recurso escasso e que demanda maior tempo de preparação da amostra e de uso do microscópio eletrônico de varredura. O uso do EBSD torna a quantificação da fração de ferrita recristalizada possível com resultados de maior confiabilidade e repetibilidade.

Trabalhos com o objetivo de aperfeiçoar a metodologia de quantificação da fração recristalizada de ferrita com o uso da técnica por EBSD para os aços inoxidáveis ferríticos devem ser realizados, dando ênfase principalmente, à técnica de preparação das amostras para melhorar a indexação.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Arcelor Mittal Inox Brasil e à Universidade Federal de Minas Gerais pelo apoio no desenvolvimento do trabalho, ao Dr. Ricardo Nolasco de Carvalho da V&M do Brasil pela ajuda com o *software* Thermo Calc, ao Sr. Nilton José Lucinda de Oliveira e à Dra. Margareth Spangler Andrade do CETEC-MG pela colaboração com as fotomicrografias com uso de luz polarizada.

### REFERÊNCIAS

- 1 SCHUWARTEN Jr, W. Caracterização e modelagem matemática da fração recristalizada de ferrita no aço inoxidável ferrítico AISI 430 durante o processo de deformação a quente em laminador Steckel. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2007, 122p.