

SIMULAÇÃO, EM LAMINADOR PILOTO, DA INFLUÊNCIA DA LUBRIFICAÇÃO DURANTE O PROCESSO DE DEFORMAÇÃO A QUENTE NA TEXTURA DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 430¹

Henrique de Castro Rodrigues²
Ronaldo Antônio Neves Marques Barbosa³
Tarcisio Reis de Oliveira⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho é simular em laminador piloto o processo de laminação a quente reversível tipo Steckel, caracterizando a influência do uso de lubrificação durante a deformação a quente na microestrutura e textura de bobinas laminadas a quente, na microestrutura, anisotropia e grau de estriamento das bobinas laminadas a frio e nas cargas de laminação em bobinas laminadas a quente e a frio de aço inoxidável ferrítico AISI 430. Trata-se da realização de simulação do ciclo termomecânico do processamento industrial do aço AISI 430. O uso de lubrificação durante o processo de deformação a quente exerce uma forte influência na redução das texturas de cisalhamento e homogeneidade das fibras α ao longo da espessura nas amostras de tiras laminadas a quente, acarretando menores esforços mecânicos nos processos de laminação a quente e a frio, traduzindo em ganhos no consumo de energia elétrica e desgaste dos cilindros de trabalho, além da possibilidade de redução de um passe na laminação a frio, com conseqüente melhoria da produtividade; reduzindo o nível de estriamento, porém, apresentando um decréscimo da estampabilidade, provavelmente ligada à redução da relação entre fibras γ e θ como conseqüência da redução da anisotropia do material.

Palavras-chave: Simulação; Laminação piloto; Lubrificação; Deformação a quente.

SIMULATION, IN PILOT MILL, OF THE LUBRICATION INFLUENCE DURING HOT DEFORMATION IN TEXTURE OF FERRITIC STAINLESS STEEL AISI 430⁽¹⁾

Abstract

The objective this work is to simulate the hot strip Mill process in Steckel Mill, through characterization of lubrication influence during hot deformation in the hot coil microstructure and texture, and cold coil microstructure, anisotropy and ridding degree and hot and cold mill loads for ferritic stainless steel AISI 430. Deal of steel AISI 430 industrial thermo mechanical cycle process in ArcelorMittal Inox Brasil. Lubrication during hot deformation process has large influence in reduced shearing textures and fiber α homogeneity through hot band samples thickness, showing less mechanical efforts in the hot and cold rolling process: decreasing in hot and cold rolling loads, with possibility to reduce one cold rolling pass and to improve productivity gain, and a better ridging level, but, present a bad point: poor drawability caused for reduced in the fibers γ e θ relation in the cold rolling samples.

Key words: Simulation; Pilot mill; Lubrication; Hot deformation.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Engenheiro Mecânico – Engenheiro de Processo da Laminação a Quente, ArcelorMittal Inox Brasil.

³ Ph. D. – Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais.

⁴ Dr. – Pesquisador do Centro de Pesquisas da ArcelorMittal Inox Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis ferríticos vêm se tornando cada vez mais importantes no cenário mundial, no qual o aço AISI 430, contendo nominalmente 17 % de cromo em peso, tem uma significância particular, com seu bom acabamento superficial, estampabilidade, boa resistência a corrosão, soldabilidade e competitividade de custo frente aos aços inoxidáveis austeníticos, devido à ausência ou pouca adição de níquel. As propriedades desse tipo de aço estão diretamente ligadas a sua microestrutura final, que é determinada pela série de esquemas de deformações e recozimentos dentro do fluxo de processo.⁽¹⁾ A demanda cada vez mais crescente dos aços inoxidáveis ferríticos tem levado a ArcelorMittal Inox Brasil a optar pelo aumento da produção de bobinas do aço AISI 430, o que tem levado à necessidade de desenvolvimentos na área industrial, de forma a reduzir custos na produção. Nesse contexto, o uso do óleo de lubrificação no laminador Steckel mostra-se muito atraente para a empresa, pois, possibilita ganhos relacionados ao menor desgaste de cilindros de laminação e aos menores esforços necessários para a redução da espessura até o valor desejado pelos clientes, com um menor consumo de energia.

A designação de aço inoxidável ferrítico se deve à sua estrutura na condição de peça recozida. Em temperaturas elevadas, alguns desses aços podem apresentar, na verdade, uma estrutura *duplex*, ferrítica e austenítica, como, por exemplo, no caso do aço AISI 430 (Figura 1).

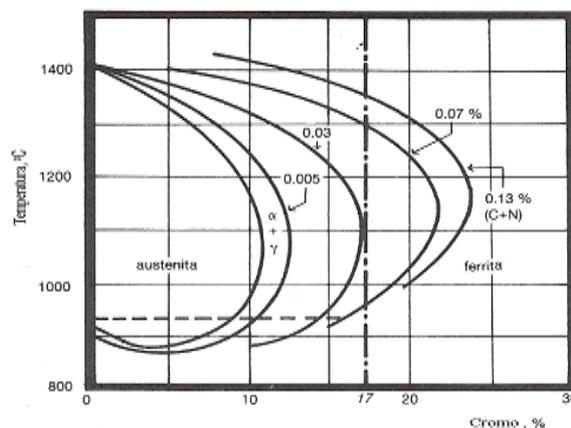


Figura 1. Efeito do teor de carbono e nitrogênio (C+N) no campo bifásico do diagrama Fe-Cr.⁽²⁾

Dentre os aços ferríticos com 17% de Cr em peso, o aço AISI 430 é o mais comum e, a partir dele, foram desenvolvidos outros aços para se atenderem necessidades de aplicações específicas.

Nos processos de deformação a quente em laminadores convencionais tipo “*Tandem*”, que possuem várias cadeiras de acabamento montadas em seqüência, onde vários passes de deformação estão envolvidos e o tempo entre passes é relativamente pequeno (< 1s), não existe tempo suficiente para amaciamento completo entre cada passe e parte da deformação é acumulada para o passe seguinte. Isto ocorre até que uma deformação crítica (ϵ_c) seja alcançada para que se inicie o amaciamento por recristalização dinâmica. Em laminadores reversíveis, como nos do tipo *Steckel*, o tempo entre passes é maior e diferentes fenômenos dinâmicos acontecem durante a deformação e fenômenos estáticos podem ocorrer durante o tempo de espera entre passes. A evolução microestrutural opera então de maneira cíclica a cada passe de laminação (deformação a cada passe + o tempo de

espera até o passe seguinte), e a microestrutura final é o resultado acumulado da seqüência destas transformações. Nas deformações subseqüentes, a tensão permanece relativamente baixa em função da recristalização dinâmica durante a deformação, suplementada pela ocorrência de recristalização metadinâmica, caso esta ocorra durante o intervalo de tempo entre passes.

Os mecanismos de amaciamento são controlados pela ativação térmica e pela energia acumulada durante a deformação. Quanto maior for a temperatura, maior será a cinética de recristalização e maior será o grão recristalizado.⁽⁴⁾ Para considerar os efeitos simultâneos da temperatura e da taxa de deformação na tensão de escoamento, o parâmetro de Zener-Hollomon deve ser utilizado, e este é dado por: $Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q_{\epsilon}}{RT}\right)$

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam um grande gradiente de textura e microestrutura ao longo de sua espessura, principalmente nas bobinas a quente. Isto é devido principalmente ao atrito entre o cilindro de trabalho e a superfície da chapa nos laminadores. Desde modo, ocorre um alto cisalhamento próximo a superfície e baixo/nulo no centro da tira (Figura 2).

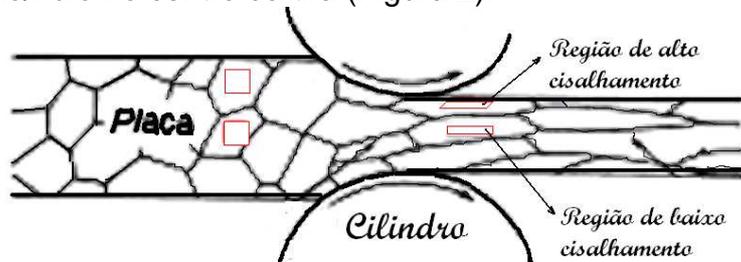


Figura 2. Representação esquemática do gradiente de cisalhamento no material na laminação a quente.

O processo de laminação de tiras a quente na ArcelorMittal Inox Brasil é realizado basicamente em 5 fases: reaquecimento, laminação de desbaste, laminação de acabamento, resfriamento da tira e bobinamento. Placas provenientes do lingotamento contínuo são reaquecidas até uma temperatura adequada para a laminação no forno de reaquecimento de placas tipo *Walking Beam*. A placa reaquecida tem a sua espessura inicial de 200 mm reduzida para 28mm durante o processo de laminação de desbaste, que é realizada em 7, 9 ou 11 passes no laminador desbastador *Rougher* tipo quadro reversível com laminador de bordas na entrada. O esboço proveniente da laminação de desbaste tem uma espessura de 28 mm que será reduzida à espessura final objetivada (12,70 mm a 2,00 mm) durante o processo de laminação de acabamento, que é realizada em 1, 3, 5 ou 7 passes no laminador acabador *Steckel* tipo quadro reversível. Após a laminação de acabamento, a tira é resfriada até uma temperatura objetivada para minimizar a formação de oxidação interna preferencial do cromo pela ação de sprays de água na Zona Úmida. A última fase do processo é o bobinamento da tira laminada, formando as bobinas laminadas a quente sem recozimento e decapagem (BQ Preta). Após laminação a quente, as bobinas são destinadas a linha de laminação de tiras a frio de inoxidáveis.

O processo de laminação de tiras a frio na ArcelorMittal Inox Brasil para o aço ferrítico AISI 430 é realizado basicamente em 6 fases principais: recozimento em caixa, decapagem da bobina laminada a quente e recozida, laminação a frio, recozimento e decapagem finais, laminação de encruamento e acabamento das bobinas laminadas a frio. A BQ Preta, proveniente da laminação de tiras a quente, é

tratada termicamente em fornos de recozimento em caixa, para decomposição da martensita gerada pela deformação a quente em ferrita mais carbonetos, adequando as propriedades do material para a trabalho a frio. Após o recozimento em caixa o material é destinado à linha de Recozimento e Decapagem Contínuos de BQ, onde ocorre a remoção dos óxidos formados durante os processos anteriores, obtendo assim uma bobina laminada a quente, recozida e decapada (BQ Branca). Posteriormente a BQ Branca é destinada aos laminadores a frio para redução da espessura até ao valor desejado pelos clientes, obtendo assim a bobina laminada a frio (BF). Em seguida a BF é processada na linha de recozimento e decapagem finais, onde são executados o tratamento térmico e decapagem contínuos, adequando as propriedades do material às exigências do cliente. Após essa etapa a BF é processada no laminador de encruamento, com um leve passe em cilindros brilhantes, de forma a ultrapassar a deformação necessária para que não ocorra o patamar de escoamento na curva tensão x deformação, evitando-se assim o fenômeno de Linhas de Luders e conferindo uma melhor forma e brilho ao produto. A última etapa de processamento é o acabamento, onde a BF é cortada nas dimensões solicitadas pelos clientes.

A Figura 3 apresenta um diagrama dos tratamentos termomecânicos que o durante seu processamento no fluxo de produção da ArcelorMittal Inox Brasil.

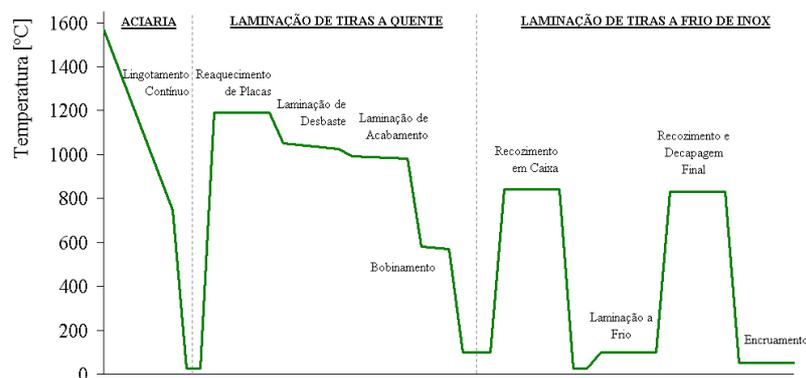


Figura 3. Diagrama de tratamentos termomecânicos do aço AISI 430 na ArcelorMittal Inox Brasil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para execução deste trabalho, amostras de material foram retiradas após laminação de desbaste no laminador Rougher (esboço) da ArcelorMittal Inox Brasil e enviadas para corte nas dimensões de 100 mm de comprimento, 28 mm de espessura e 50 mm de largura, com seus eixos longitudinais paralelos à direção de laminação (Figura 4), cuja composição química é mostrada na Tabela 1.

Para execução das caracterizações de microscopia óptica e quantificação das componentes de textura presentes, tiras após laminação a quente piloto foram enviadas para corte de sub-amostras no centro de seu comprimento e largura, evitando assim a interferência nos resultados por variações no processo de conformação (início, meio e fim de tira). Essas amostras foram cortadas com auxílio de um disco abrasivo refrigerado, montadas, lixadas, polidas e atacadas, para realização de todas análises na seção longitudinal (direção de laminação).

Tabela 1. Composição química média da amostra de esboço de aço AISI 430 da ArcelorMittal Inox Brasil [% em peso]

Cr	Mn	Ni	Si	Cu	V	Mo	C	N	Nb	P	Sn	S
16,43	0,42	0,28	0,39	0,03	0,05	0,02	0,051	0,052	0,03	0,030	0,006	0,001

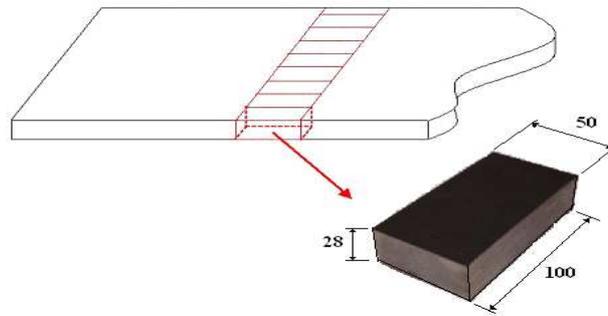


Figura 4. Esquema da amostragem de esboço para a laminação a quente piloto.

As variáveis temperatura de laminação (T), tempo entre passes (t_{ep}), deformação (ε) e velocidade de deformação ($\dot{\varepsilon}$) são as mais importantes nesse processamento termomecânico e, o material sendo processado responde a aplicação desta seqüência (T , t_{ep} , ε e $\dot{\varepsilon}$) gerando calor, mudando de forma e ocasionando uma força de resistência à deformação, que vai ser transmitida ao laminador através da força de separação entre os cilindros de trabalho. Na ArcelorMittal Inox Brasil, a laminação piloto é muito utilizada como ferramenta de simulação dos processos de deformação a quente e a frio e, a variável T precisa ser cuidadosamente trabalhada para ser reproduzida com exatidão ao longo da seqüência de laminação, pois, sua influência na cinética de amaciamento é muito maior que a deformação e a taxa de deformação.⁽³⁾

O laminador piloto do centro de pesquisas da ArcelorMittal Inox Brasil trata-se de um laminador duo ou quadro reversível, produzido pela Fenn Manufacturing e, dispõe de um sistema de supervisão e controle que adquire as informações do campo em tempo real, formando uma base de dados para atuação dos dispositivos, tais como posicionamento dos cilindros, e apresentando as informações em sinóticos dinâmicos com indicações das alterações nas variáveis de processo controladas, bem como registrando alarmes e eventos principais do processo. Na laminação piloto, mede-se a força de resistência máxima à deformação pela compressão do material entre os cilindros a uma distancia pré-estabelecida (abertura entre os cilindros). Essa medição é executada em intervalos de tempo muito baixos, porém, a rotina de armazenamento das informações é gerada a cada 0,5s, calculando-se o resultado médio dos últimos 10 pontos e arquivando no banco de dados do sistema supervisorio do equipamento. O cálculo da resistência média máxima de deformação é realizado em função da força de média máxima à deformação em cada passe e, é dado por:

$$\sigma_{m\varepsilon} = \frac{P}{w \cdot \sqrt{R \Delta h}},$$

onde $\sigma_{m\varepsilon}$ é a resistência média máxima de deformação, P é força média máxima de laminação, w é a largura da amostra, R é o raio médio dos cilindros de trabalho e Δh é a diferença entre as espessuras de entrada e saída em cada passe.

2.1 Condições de Testes Realizados no Laminador Piloto

Simulações em laboratório foram desenvolvidas em laminador piloto de forma a reproduzir o ciclo termomecânico da produção do aço AISI 430 de 4,10 mm x 1260 mm, onde ocorrem diferenças nos resultados obtidos dependendo da posição de cabeça, meio ou cauda, como por exemplo, a redução de temperatura e

conseqüente incremento na carga de laminação que são observados na cabeça e na cauda da tira laminada via Steckel (Figura 5). Esta redução da temperatura nas pontas da tira deve-se ao maior tempo de exposição ao ambiente no momento da reversão entre os passes de laminação e maior tempo de contato com o tambor do forno durante a laminação (3)

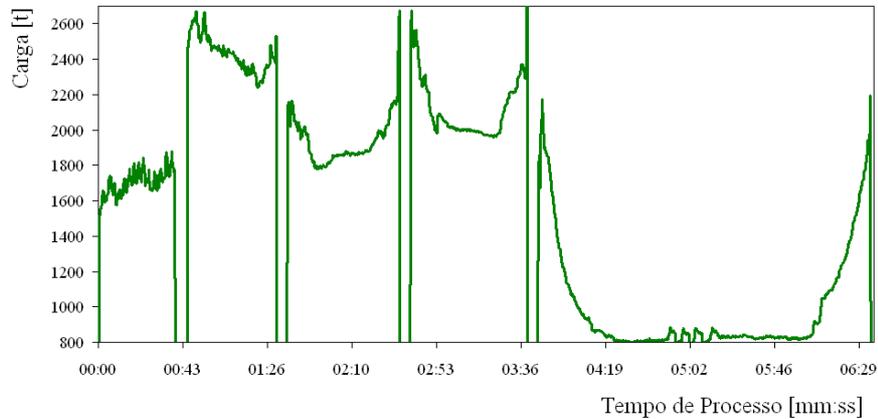


Figura 5. Variação da carga de laminação [t] no laminador Steckel.

Dessa forma, todos os dados de referência para a laminação piloto foram considerados no corpo da tira, na região central de seu comprimento e, foram efetuadas simulações, conforme situações descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Condições de testes realizados no laminador piloto da ArcelorMittal Inox Brasil

Condição de atrito na deformação a quente	Nº de Passes	Tipo de deformação	Produto
Sem lubrificação	5	A quente	BQ Preta
Com lubrificação a 1% de óleo específico para a laminação a quente			
Sem lubrificação	10	A frio	BF
Com lubrificação a 1% de óleo específico para a laminação a quente			

Os planos de passes, deformações verdadeiras e equivalentes e taxas de deformações de referência são estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3. Plano de passes, deformações verdadeira (ϵ_3) e equivalente (ϵ_{eq}) e taxas de deformações de referência

Nº Passe	Esp [mm]	ϵ_3	ϵ_{eq}	V_t [m/s]	t_c [s]	$\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]
0	28,0	-	-	-	-	-
1	19,7	0,35	0,41	3,54	0,015	26,3
2	11,6	0,53	0,61	6,35	0,009	72,2
3	7,7	0,41	0,47	7,35	0,005	93,2
4	5,0	0,43	0,50	11,07	0,003	177,6
5	4,1	0,19	0,22	3,71	0,005	46,9

As temperaturas de laminação consideradas (T_{Enc} , T_{Lam} e T_{Bob}) para amostras laminadas a quente estão listadas na Tabela 4 e são as medições ocorridas nos seguintes pontos do processo: após tesoura de pontas rotativa, representando a temperatura a ser usada para encharque do material (T_{Enc}); durante os passes na

entrada e saída do laminador Steckel, representando a temperatura a ser usada para a laminação de acabamento que é calculada com base na média das temperaturas de entrada e saída em cada passe (T_{Lam}) e durante o bobinamento, representando a temperatura a ser usada para resfriamento, que é calculada com base na média de todas as temperaturas medidas no corpo da tira (T_{Bob}).

Na tentativa de reproduzir o processo de laminação a quente via Steckel, foi usado o conceito da temperatura modificada (T_z) deduzida da equação de Zener-Hollomon, como forma de compensar a menor taxa de deformação conseguida em laminação piloto. Assim, temos:

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q_\epsilon}{RT}\right) \Rightarrow \frac{Z}{\dot{\epsilon}} = \exp\left(\frac{Q_\epsilon}{RT}\right) \Rightarrow \ln\left(\frac{Z}{\dot{\epsilon}}\right) = \frac{Q_\epsilon}{RT} \Rightarrow T_z = \frac{Q_\epsilon}{R \cdot \ln\left(\frac{Z}{\dot{\epsilon}}\right)}$$

Dessa forma, considerando o processo de laminação de acabamento no Steckel, o parâmetro Z de Zener-Hollomon foi calculado para cada passe e padrão de temperatura. Para a simulação, de posse do parâmetro Z, foi calculada sua respectiva T_z , obtendo-se então a temperatura objetivada de laminação por passe e padrão de temperatura no laminador piloto, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetro Z de Zener-Hollomon e Temperatura modificada T_z para cada passe de laminação no Steckel

Nº Passe	Esp [mm]	$\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	T_{Enc} [°C]	T_{Lam} [°C]	T_{Bob} [°C]	Q_ϵ [kJ.mol ⁻¹]	Z	$\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	T_z [°C]
0	28,0	-	1019	-	-	375	-	-	-
1	19,7	26,3	-	956	-		2,30467E+17	3,8	894
2	11,6	71,5	-	977	-		3,42793E+17	5,9	895
3	7,7	63,9	-	984	-		3,53363E+17	6,5	898
4	5,0	101,1	-	980	-		7,74221E+17	8,3	881
5	4,1	15,3	-	982	579		1,89735E+17	6,5	917

Nos processos em laminadores tipo Steckel, os tempos entre passes são muito longos se comparado a laminadores do tipo Tandem e, dependem do comprimento da bobina e da velocidade de laminação. Utiliza-se como referência para o cálculo do tempo entre passes, um ponto situado no meio do comprimento da tira, dado por:

$$t_{ep} = 0,5 \cdot (t_i + t_{i+1}) + t_r,$$

onde: t_{ep} é o tempo entre passes de laminação, t_i é o tempo do passe de laminação e t_r é o tempo de reversão entre passes.

Estes tempos entre passes são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Cálculo dos tempos entre cada passe de laminação no laminador Steckel

Nº Passe	Esp [mm]	t_i [s]	t_r [s]	t_{ep} [s]
0	28,0			
1	19,7	40	6	48
2	11,6	46		
3	7,7	58	5	64
4	5,0	60		
5	4,1	171	5	120

2.2 Procedimentos Experimentais

Devido à dificuldade de laminar a quente com termopares em todos os passes para levantamento das curvas reais de temperatura – os termopares utilizados não suportavam as reduções, rompendo no 2º passe de laminação – foi necessário o uso de um pirômetro portátil infravermelho Raynger® 3i™ modelo 2ML3B, da Raytek® Corporation, que é um instrumento portátil de medição de temperatura entre 200 e 1800°C, com emissividade ajustada para 0,92.

O aquecimento e encharque das amostras de esboço foi executado em um forno elétrico de câmara do tipo global, modelo FEG-25/60/20, fabricado pela Combustol Industria e Comercio Ltda, para trabalho com temperatura máxima de 1420°C e potência de 18 kW. O forno foi ajustado conforme os parâmetros listados na Tabela 6. A temperatura ajustada no forno foi 16°C a maior que a T_{Enc} estabelecida, como forma de minimizar as perdas de temperatura durante abertura das portas para colocação e retirada de amostras.

Tabela 6. Parâmetros ajustados no forno FEG-25/60/20

Temperatura de Encharque [°C]	Temperatura de Forno [°C]	Tempo de Encharque [s]	Tempo de Forno [s]
1019	1035	600	1800

Devido à maior relação de área em função do volume para as amostras de tiras laminadas no laminador piloto se comparadas com as laminadas no Steckel, as trocas térmicas com o ambiente são muito maiores, levando a uma grande perda de temperatura. Para garantir a laminação piloto similar ao processo do Steckel, após conclusão dos passes, as amostras foram enfornadas em dois fornos elétricos de dupla abertura do tipo EDG, para trabalho com temperatura máxima de 1200°C, sendo um forno para tiras na condição de laminadas após 1º passe até antes do 4º e outro para condição de antes do 5º - essa disposição foi necessária devido à diferença entre os tempos entre passes (t_{ep}) das duas configurações, como pode ser visto na Tabela 5. Os fornos foram ajustados conforme os parâmetros listados na Tabela 7, como forma de preservar os tempos entre passes iguais aos registrados na Tabela 5.

Tabela 7. Parâmetros ajustados nos fornos EDG

Passo	Temperatura de Forno [°C]
Até 4º	1100
5º	1000

As amostras de esboço foram enfornadas no forno Combustol e mantidas a temperatura e tempo de encharque conforme Tabela 6, sendo desenfnadas e levadas a mesa de entrada do laminador para execução do 1º passe de laminação. Para início de laminação, a sua temperatura foi medida com o pirômetro e, quando atingiu-se o valor de T_z estabelecido na Tabela 4 para cada passe, foi laminada e, em seguida enfornada no forno EDG (configurado para aquecimento antes do 2º até antes do 4º passe). Após a execução do 5º passe, a amostra foi resfriada ao ar até sua temperatura atingir o valor da temperatura de bobinamento (T_{Bob}) estabelecida na Tabela 4, simulando o processo de resfriamento que ocorre entre a cadeira de laminação do Steckel até seu início de bobinamento. Posteriormente, a amostra foi mergulhada em água, de forma a sofrer um resfriamento brusco, congelando a

estrutura de início de bobinamento, sendo tratada termicamente em forno estacionário com uso de atmosfera de N₂, conforme o ciclo descrito na Tabela 8 (processo de recozimento em caixa).

Todas amostras laminadas a quente e tratadas termicamente foram decapadas mecanicamente, por jateamento de granalhas e, em seguida, mergulhadas em banho químico com concentração de 20% de HNO₃ e 3% de HF para remoção completa de todos os óxidos. Posteriormente, foram laminadas a frio com uso de óleo de laminação específico para laminação a frio, obedecendo o esquema de passe listado na Tabela 9 e, tratadas termicamente a 830°C por 30 s em forno estacionário com atmosfera de N₂.

Tabela 8. Ciclo de tratamento térmico das amostras laminadas a quente

	Aquecimento					EnchARGE	Resfriamento		
Tempo (h)	-	-	-	-	-	18	-	1	10
Temperatura [°C]	330	530	630	780	840	840	790	790	350
Taxa de aquecimento [°C/h]	300	200	100	50	15	-	-5	-	-44

Tabela 9. Esquema de passe para laminação a frio

	Número do Passe									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Espessura [mm]	3,18	2,59	2,12	1,73	1,41	1,15	0,94	0,79	0,68	0,60

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma a obter uma visão da variação da microestrutura e textura ao longo da espessura das tira laminada a quente, essas caracterizações foram realizadas nas regiões próximas à superfície superior da chapa (borda superior), a ¼ da espessura superior (intermediário superior) e no centro da espessura da chapa (centro).

3.1 Resultados de Resistência Média de Deformação após Laminação a Quente Piloto

Os valores médios e desvios padrões de cada condição são mostrados na Tabela 10 para cada passe na laminação piloto.

Tabela 10. Resistências médias de deformação [MPa] por condição de laminação a quente piloto e por passe

Passe de Laminação	Sem lubrificação		Com lubrificação	
	Média da Resistência	Desvio Padrão	Média da Resistência	Desvio Padrão
1º Passe	72	20	82	7
2º Passe	175	28	169	36
3º Passe	286	36	246	18
4º Passe	481	30	353	41
5º Passe	523	62	445	28

O processamento a quente no laminador piloto do centro de pesquisas da ArcelorMittal Inox Brasil apresentou um problema quanto á aquisição dos dados de força média máxima de deformação: freqüência de aquisição é de 0,5s e, como em alguns passes o tempo de processo fica em torno de 1,0s; o número de dados amostrados é muito baixo para afirmações concretas, principalmente para o primeiro

e segundo passe. Do terceiro passe em diante, acredita-se que a informação extraída é de melhor qualidade, porém, testes com uma maior frequência de aquisição de dados são necessários para a confirmação dessa hipótese.

Pela verificação dos resultados obtidos, pode-se comentar:

- amostras laminadas com lubrificação apresentaram resistências médias de deformação menores;
- o uso do conceito de T_z não parece ser apropriado para materiais com mudança de fase durante o processo de laminação a quente, devido seu cálculo desprezar a condição metalurgia envolvida no processo (transformação de fase e precipitações de carbonetos).

3.2 Resultados da Caracterização da Microestrutura após Laminação a Quente Piloto

Para as amostras representativas de cada condição de simulação testada no laminador piloto foram realizadas fotomicrografias que são mostradas na Figura 6.

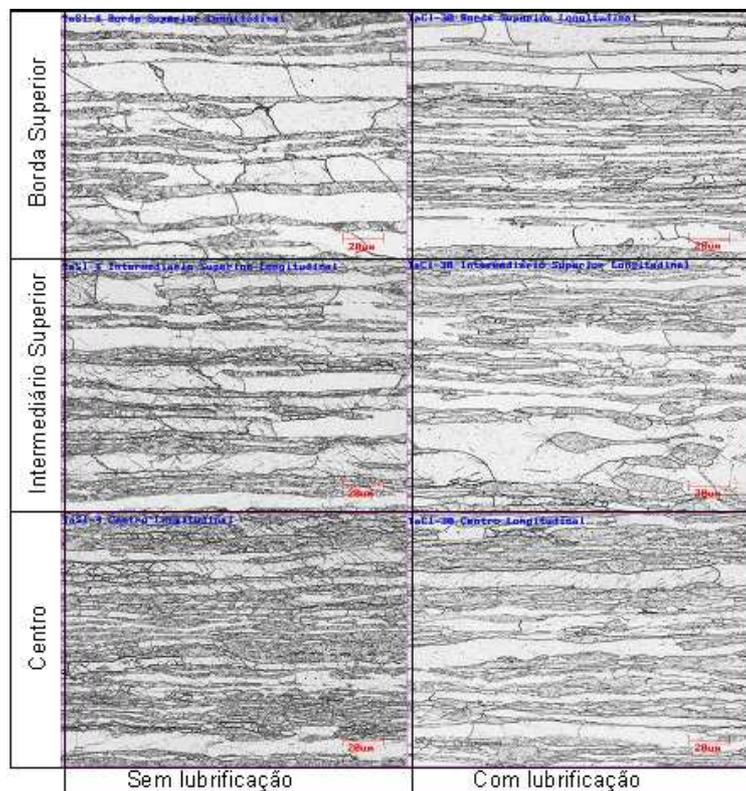


Figura 6. Fotomicrografias ópticas de amostra sem lubrificação e com lubrificação, após a laminação a quente piloto, seção longitudinal da espessura, aumento de 500X.

Observa-se nas fotomicrografias das tiras de aço AISI 430 deformadas a quente sem lubrificação, um evidente gradiente de recristalização na microestrutura entre uma região próxima à superfície da tira em comparação com outra região considerada no centro de sua espessura. O uso da lubrificação parece uniformizar a deformação ao longo da espessura das amostras, com os grãos panquecados aparentando uma altura mais uniforme se comparados com amostras laminadas sem lubrificação. As micrografias para os materiais laminados com lubrificação aparentam ser bem mais “limpas”, com menor intensidade de células de discordâncias no interior dos contornos de grãos lamelares.

3.3 Resultados da Caracterização da Textura Presente após Laminação a Quente Piloto

Os resultados de textura para cada condição de simulação testada no laminador piloto são mostrados na Tabela 11, por posição ao longo da espessura.

Tabela 11. Resultados das componentes de textura presentes nas amostras de tiras após a laminação piloto, seção longitudinal da espessura

Posição Amostra	Condição LTQ	Componentes de Textura / Designação					
		{hkl}<110> Fibra Alfa	{111}<uvw> Fibra Gama	{001}<100> Cubo	{011}<100> Goss	{112}<11-1> Cobre	{110}<1-12> Latão
Borda Superior	Sem lubrificação	15,3%	6,8%	0,9%	4,7%	7,2%	10,6%
	Com lubrificação	38,1%	9,2%	3,3%	2,6%	1,1%	1,2%
Intermediário Superior	Sem lubrificação	21,7%	9,9%	4,3%	3,2%	4,4%	3,7%
	Com lubrificação	37,2%	8,8%	4,1%	1,0%	0,7%	1,3%
Centro	Sem lubrificação	50,3%	9,6%	2,4%	0,5%	0,5%	0,6%
	Com lubrificação	36,6%	8,6%	9,6%	0,4%	0,9%	0,6%

Pela análise dos resultados de textura pode-se comentar:

- é considerável a influência da lubrificação no aumento da fibra alfa nos segmentos das posições de borda e intermediária e, na redução da fibra alfa no segmento central, provavelmente devido a menor resistência à compressão das camadas mais externas oriunda do menor encruamento ou menor quantidade das componentes de cisalhamento;
- é considerável a influência da lubrificação na redução das texturas de cisalhamento (Goss, Cobre e Latão) nos segmentos das posições de borda e intermediária; e
- o uso da lubrificação cria uma homogeneidade na distribuição das fibras alfa ao longo da espessura das amostras laminada a quente.

3.4 Resultados de Resistência Média de Deformação após Laminação a Frio Piloto

Os valores médios e desvios padrões de cada condição de lubrificação no processo de deformação a quente são mostrados na Tabela 12, após cada passe de laminação a frio.

Tabela 12. Média e desvio padrão das resistências médias de deformação [MPa] por condição de laminação a frio piloto e por passe

	Condição LTQ	Passe de laminação									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Média da Resistência	Sem lubrificação	805	1040	1291	1477	1711	1921	2227	2582	3105	3554
	Com lubrificação	741	933	1193	1344	1561	1731	1988	2317	2756	3015
Desvio Padrão	Sem lubrificação	57	112	31	84	90	101	82	131	180	179
	Com lubrificação	117	50	42	47	69	94	83	114	92	73

Após o processamento a frio no laminador piloto, pode-se comentar:

- quando da laminação a frio das amostras processadas durante a laminação a quente com lubrificação, os resultados de resistência média de deformação foram bem menores que aquelas laminadas a quente sem lubrificação;
- foi percebida a possibilidade de redução de um passe no laminador piloto. Essa situação culminou na seleção do valor de espessura do último passe igual ao do

passa anterior. Uma provável causa para a redução de esforços, está ligada a uma melhor distribuição da textura do material na condição de laminado a quente com lubrificação - na verdade a uma homogeneidade de textura ao longo da espessura da BQ - com valores muito baixos de texturas de cisalhamento, principalmente próximas às superfícies das tiras. A maior quantidade de componentes de cisalhamento na BQ, que provocam uma maior intensidade de fibras α e células de discordâncias no centro das amostras, tende a recrystalizar e formar grãos mais finos, gerando maior número de contornos de grão e, dessa forma, dificultando a movimentação das deslocações e, aumentando as forças necessárias para a redução a frio.

3.5 Resultados da Caracterização da Microestrutura após Laminação a Frio Piloto

O resultados de microestrutura são mostradas da Figura 7, reproduzindo a mesma situação da laminação a frio no laminador Sendzimir.

Pela análise das fotomicrografias das tiras de laminadas a frio, não são observadas grandes diferenças entre as amostras processadas a quente com e sem lubrificação. No caso do material laminado a quente com lubrificação, evidencia-se a presença de carbonetos mais alinhados, provavelmente ligados à menor intensidade de células de deformação no interior dos contornos de grãos lamelares da BQ. No caso do material laminado a quente sem lubrificação, a estrutura mostra-se bem recrystalizada, com carbonetos dispersos em toda matriz ferrítica.

O uso de lubrificação no processo de laminação a quente não parece que interfere na recrystalização das tiras laminadas a frio.

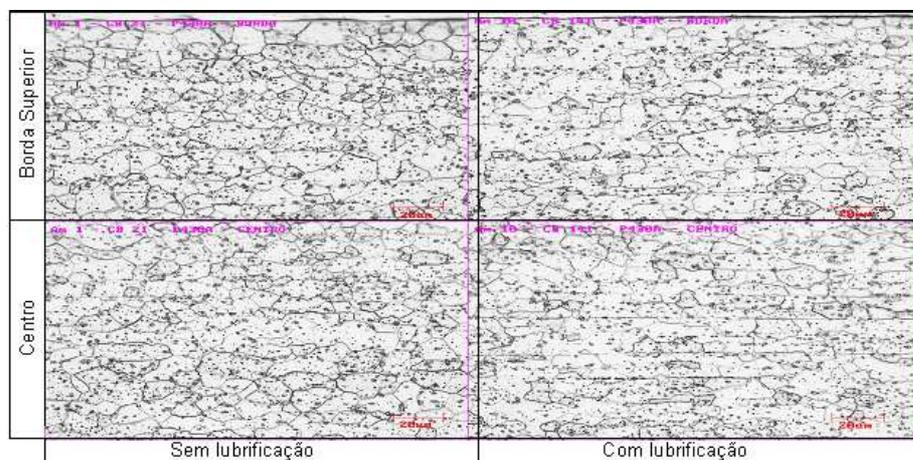


Figura 7. Fotomicrografias ópticas das amostras com e sem lubrificação no processo de deformação a quente, após a laminação a frio piloto, seção longitudinal da espessura, aumento de 500X.

3.6 Resultados da Caracterização da Textura após Laminação a Frio Piloto

Os resultados de textura por EBSD para cada amostra laminada a frio via laminador piloto são mostrados na

Tabela 13. As caracterizações de textura foram realizadas de forma a obter uma visão da variação da participação de cada componente de textura ao longo da espessura da tira laminada a frio.

Tabela 13. Resultados das componentes de textura presentes nas amostras de tiras após a laminação a frio piloto, seção longitudinal da espessura

Componentes de Textura	Designação	Participação por condição de atrito [%]	
		Sem lubrificação	Com lubrificação
{hkl}<110>	Fibra Alfa	29,1	26,8
{111}<uvw>	Fibra Gama	35,6	31,9
{100}<uvw>	Fibra Teta	16,3	18,9
-	Gama/Teta	2,2	1,7
{112}<11-1>	Cobre	0,5	0,4
{110}<1-12>	Latão	0,4	0,6

Pela análise dos resultados de textura obtidos, pode-se comentar:

- de forma geral, para as duas condições de atrito utilizadas no processo de deformação a quente, as componentes de textura obtidas correspondem a um material CCC característico, isto é, basicamente constituída pelas fibras α e γ ;
- observa-se uma pequena redução de fibras α nas amostras laminadas a quente com lubrificação, podendo dessa forma, justificar o resultado um pouco melhor em termos de estriamento na condição de “estrias maiores”, uma vez que a incidência dessas fibras está diretamente ligada à presença de estrias nos materiais CCC; e
- nota-se uma redução de fibras γ e aumento das fibras θ nas amostras laminadas a quente com lubrificação, com conseqüente redução na relação γ/θ podendo dessa forma, justificar o resultado pior em termos de anisotropia nessa condição de atrito, uma vez que a relação entre essas fibras está diretamente ligada à uma melhor estampagem e, conseqüentemente a melhores valores de r_m e Δr nos materiais CCC;

3.7 Resultados dos Ensaios de Tração após Laminação a Frio Piloto

O resultado dos ensaios de tração para as amostras laminadas a frio via laminador piloto são mostrados na Tabela 14.

Para o cálculo de r_m e Δr , foram utilizadas sub-amostras para coleta dos valores de r nas três direções (0° , 45° e 90°).

De maneira geral, pode-se observar:

- os valores dos limites de escoamento a 0,2% e resistência; bem como, alongamentos total e uniforme, foram pouco influenciados pela condição de atrito no processo de deformação a quente;
- os valores de anisotropia (r_m e Δr), que estão diretamente relacionados a estampabilidade dos materiais, foram bastante afetados pelo uso da lubrificação no processo de deformação a quente. Essa situação está diretamente relacionada a menor presença de fibras γ e a maior presença de fibras θ nessas amostras.

Tabela 14 Resultados dos ensaios de tração das amostras laminadas a frio

Ensaio	Participação por condição de atrito	
	Sem lubrificação	Com lubrificação
Espessura [mm]	0,65 ± 0,01	0,61 ± 0,02
Limite de Escoamento a 0,2% [MPa]	366 ± 10,2	353 ± 9,8
Limite de Resistência [MPa]	506 ± 7,3	488 ± 12,0
Alongamento total [%]	25,9 ± 2,7	26,2 ± 2,1
Alongamento uniforme [%]	18,1 ± 2,5	18,3 ± 1,6
n	0,25	0,25
r_0^0 na amostra de tração	0,62 ± 0,04	0,56 ± 0,02
Dureza [HRB]	81,6 ± 1,7	78,9 ± 1,2
r_0^0 – sub-amostra	0,71	0,54
r_{45}^0 – sub-amostra	1,08	0,97
r_{90}^0 – sub-amostra	1,06	0,67
r_m	0,98	0,81
Δr	-0,19	-0,4

3.8 Resultados dos Ensaios de Estriamento após Laminação a Frio Piloto

Os resultados do ensaio de estriamento para as amostras laminadas a frio via laminador piloto são mostrados na Tabela 15 e Tabela 16, onde são apresentados, respectivamente, os valores das estrias maiores (aquelas visíveis a olho nú) e estrias menores (somente detectável por rugosímetro).

Tabela 15. Resultados do ensaio de estriamento das amostras laminadas a frio – Estrias maiores

Característica	Participação por condição de atrito	
	Sem lubrificação	Com lubrificação
Estria visual	0,7	0,7
Ondulação média - W_a [μm]	15,77	12,22
Ondulação total - W_t [μm]	77,40	66,68
Ondulação entre picos e média - W_{sm} [μm]	13,76	7,77

Tabela 16. Resultados do ensaio de estriamento das amostras laminadas a frio – Estrias menores

Característica	Participação por condição de atrito	
	Sem lubrificação	Com lubrificação
Ondulação média - W_a [μm]	2,01	3,14
Ondulação total - W_t [μm]	12,60	18,50
Ondulação entre picos e média - W_{sm} [μm]	2,48	2,77

Pela análise dos resultados de estriamento, pode-se observar:

- pelo método de análise visual por comparação com o padrão de estrias, praticamente não existe diferença entre os valores obtidos nas duas condições de atrito usadas no processo de deformação a quente;
- pelo método de medição da rugosidade, para o caso das “Estrias maiores”, a condição de deformação a quente com lubrificação apresentou resultados ligeiramente melhores. Essa situação é a que normalmente percebemos a olho nu, portanto, na maioria das vezes, e a que atualmente damos maior importância na hora de inspecionar os produtos finais; e

- para o caso da medição de rugosidade das “estrias menores”, a condição de deformação a quente sem lubrificação apresentou resultados um pouco melhores.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O processamento no laminador piloto do centro de pesquisas da ArcelorMittal Inox Brasil, apesar do problema da frequência de aquisição de dados, permite uma boa simulação da laminação a quente via Steckel e da laminação a frio via Sendzimir, principalmente quando executada em números de passes e reduções iguais ao processo industrial.

O uso da lubrificação parece reduzir o gradiente de recristalização ao longo da espessura das amostras laminadas a quente, com os grãos apresentando-se uniformemente panquecados e com uma altura mais homogênea se comparados com amostras laminadas sem lubrificação.

Do ponto de vista de cargas de laminação a frio e, conseqüentemente, resistência média de deformação, o uso de lubrificação no processo de deformação a quente indica a possibilidade de uma redução considerável em seus valores, podendo permitir a redução do número de passes no processo de laminação a frio, com conseqüente aumento de sua produtividade.

O uso do conceito da temperatura transformada T_z não parece ser adequado para materiais suscetíveis à transformação de fase ou precipitação durante a deformação a quente, pois, a redução de temperatura pode ocasionar a laminação fora da região bifásica do diagrama de equilíbrio, dificultando a comparação dos resultados obtidos em laminador piloto com os resultados obtidos em laminação industrial, principalmente para as caracterizações de microestrutura e fases presentes.

A influência da lubrificação na textura, foi considerável para:

- aumento da fibra alfa nos segmentos das posições de borda e intermediária;
- redução da fibra alfa no segmento central. Mostrando que o processo de laminação a quente sem lubrificação é muito mais heterogêneo quanto às texturas, apresentando alta intensidade de fibras α no centro, provavelmente devido a maior resistência à compressão das camadas mais externas, oriunda de maior encruamento ou componentes de cisalhamento mais resistentes;
- redução das texturas de cisalhamento (Goss, Cobre e Latão) nos segmentos das posições de borda e intermediária; e
- o uso da lubrificação cria uma homogeneidade na distribuição das fibras α ao longo da espessura das amostras laminadas a quente.

O uso de lubrificação no processo de laminação a quente não parece que interfere no processo de recristalização das tiras laminadas a frio, nem tão pouco nos valores dos limites de escoamento a 0,2% e resistência; bem como, alongamentos total e uniforme.

Os valores de anisotropia (r_m e Δr), que estão diretamente relacionados a estampabilidade dos materiais, foram bastante afetados pelo uso da lubrificação no processo de deformação a quente. Nota-se uma redução de fibras γ e aumento das fibras θ nas amostras laminadas a quente com lubrificação, com conseqüente redução na relação γ/θ podendo dessa forma, justificar o resultado pior em termos de anisotropia nessa condição de atrito, uma vez que a relação entre essas fibras

está diretamente ligada à uma melhor estampagem e, conseqüentemente a melhores valores de r_m e Δr nos materiais CCC.

Quanto ao estriamento, o uso de lubrificação no processo de deformação a quente, pouco interfere nos valores obtidos pelo método de análise visual por comparação com o padrão de estrias, porém, pelo método de medição da rugosidade, para o caso das “Estrias maiores”, essa condição apresentou resultados ligeiramente melhores. Para o caso da medição de rugosidade das “estrias menores”, a condição de deformação a quente sem lubrificação apresentou resultados um pouco melhores. Observa-se uma pequena redução de fibras α nas amostras laminadas a quente com lubrificação, podendo dessa forma, justificar o resultado um pouco melhor em termos de estriamento na condição de “estrias maiores”, uma vez que a incidência dessas fibras está diretamente ligada à presença de estrias nos materiais CCC.

4.1 Recomendações

Do ponto de vista de previsão de cargas de laminação e, conseqüentemente, resistência média de deformação, uma atuação no sentido de melhorar a frequência de aquisição dos dados faz-se necessária para a quantificação dos ganhos em consumo de energia com uso lubrificação, que indicam ser consideráveis.

Nas análises em EBSD para produtos laminados a quente, a área de amostragem a ser considerada deve ser a maior possível, de forma a obter um número considerável de grãos e melhorar a análise estatística da amostra.

Simular a influência de diferentes concentrações de óleo de lubrificação específico para laminação a quente, principalmente para os casos de concentrações de 0,2 e 0,4% de óleo – que são os valores atuais normais e máximos, respectivamente do sistema de injeção de óleo no laminador Steckel da ArcelorMittal Inox Brasil..

REFERENCIAS

- 1 HINTON, J.S., *Laboratory Simulation of Microstructural Evolution in AISI 430 Ferritic Stainless Steel during the Steckel Mill Process*. (Tese, Doutorado em Engenharia de Materiais) – Department of Engineering Materials, The University of Sheffield , 2006.
- 2 BAROUX, B. The 17% Cr Ferritic Stainless Steels. In: LACOMBE, P., BAROUX, B., BERANGER, G. *Stainless Steels*. 1ª ed. Les Ulis, France: Les Éditions de Physique, 1993. cap 14, p505-534.
- 3 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 Reversível Tipo Steckel*. (Dissertação, Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2007.
- 4 GLEZ, J.C., FLORES, V. Recrystallization kinetics of the grades FS30 and FT21 after hot torsion. UGINE & ALZ, trabalho não publicado, 2005.