

# AUMENTO DA TAXA DE RECRISTALIZAÇÃO DE MATERIAIS LAMINADOS A FRIO<sup>1</sup>

Rafael Masulck Santos<sup>2</sup>  
 Sergio Domingos Marinho Junior<sup>3</sup>  
 Ranieri Correa Salazar<sup>4</sup>  
 Leiner Novaes Aredes<sup>5</sup>  
 Luiz Fernando Witte Borges<sup>6</sup>

## Resumo

O aumento da deformação a frio gera um aumento na taxa de recristalização, gerando a possibilidade de aumento de produtividade sem detrimento a qualidade do aço em recozimento contínuo. A comprovação dos testes em escala piloto se deu por meio da evolução microestrutural (por microscopia óptica) e caracterização mecânica (por ensaios de microdureza e curva de cinética de recristalização). Em escala industrial, foi confirmado que o material processado com maior quantidade de deformação a frio que as observadas no procedimento usual, obtiveram sua microestrutura recuperada e a propriedade mecânica almejada em menores tempos de recozimento. Portanto, foi verificado que a influência da deformação a frio é fator determinante na taxa de recristalização. Conseqüentemente conseguiu-se uma redução significativa do tempo de processo e do aumento da produtividade dos equipamentos de recozimento.

**Palavras-chave:** Taxa de recristalização; Recozimento; Deformação a frio.

## COLD ROLLED MATERIALS RECRYSTALLIZATION RATE INCREASING

### Abstract

The cold deformation increasing leads to an increase in the recrystallization rate, yielding the possibility of productivity increasing without detriment to the steel quality in continuous annealing. In a pilot scale, an increase in the recrystallization rate through microstructural evolution (optical microscopy) and mechanical characterization (by micro hardness and curved track kinetics of recrystallization) was proved. With respect to the experimental methodology in an industrial scale, it was confirmed that the material processed with greater amount of cold deformation observed in the usual procedure, had recovered its microstructure and mechanical properties desired in lower annealing times. Therefore, it was found that the influence of cold deformation is an important factor in recrystallization rate. Consequently was possible a significant reduction in the process time and increasing the annealing equipment productivity.

**Keywords:** Recrystallization rate; Recrystallization; Annealing; Cold deformation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Produção – GRX. CSN, Volta Redonda.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro Especialista – GGGL. CSN, Volta Redonda.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Produção – GRX. CSN, Volta Redonda.

<sup>5</sup> Engenheiro Metalúrgico, Coordenador de Projetos Especiais – GLP. CSN, Volta Redonda.

<sup>6</sup> Técnico Metalúrgico, Técnico Especialista –GRF. CSN, Volta Redonda.

## 1 INTRODUÇÃO

Um fator importante no que diz respeito à redução dos custos de produção e no aumento da produtividade é a conscientização dos setores produtivos com a intenção de reavaliar seus processos produtivos.

É importante lembrar, que para implantar tal iniciativa é necessário o comprometimento de todas as áreas envolvidas no processo em busca do resultado esperado.

Nesse contexto o projeto propõe alterações em algumas variáveis dos processos de produção de laminados a frio da CSN, com o objetivo de otimizar a taxa de recristalização, o que causará um impacto significativo na produtividade e no custo final dos produtos Laminados a Frio.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Devido à necessidade de um maior entendimento do comportamento dos equipamentos de recozimento em relação a seu tempo de processo, foram feitas coletas de dados com o objetivo de, primeiro dimensionar o atual contexto em relação aos tempos de recozimento, para que posteriormente, fosse possível analisar alguns dos fatores que influenciam essa variável, para que dessa forma fosse definida a metodologia para atender o objetivo deste trabalho: aumentar a taxa de recristalização de materiais laminados a frio.

Escolhemos a Linha de Recozimento Contínua N°1 como referencia principal para as análises e os primeiros testes.

### 2.1 Identificação, Observação e Análise do Problema

Com o intuito de identificar a magnitude do problema, foram coletados dados referentes a 1450 bobinas processadas na LRCC#1 no período de 20/10/2009 a 20/11/2009, com o objetivo de dimensionar o desvio de velocidade. Para isso, foi comparada a velocidade REAL de processo e a velocidade ESTIPULADA pelo fabricante do equipamento, obtendo-se três gráficos para cada faixa de largura (800 a 1100 mm, 1101 a 1200 mm e 1201 a 1300 m) do material em estudo, conforme apresentados nas Figuras de 1 a 3.

Com esta primeira coleta de dados ficou bem evidente o grande desvio de velocidade de processo da linha, o que gera enorme perda de produtividade, conforme gráficos das Figuras 1 a 3.

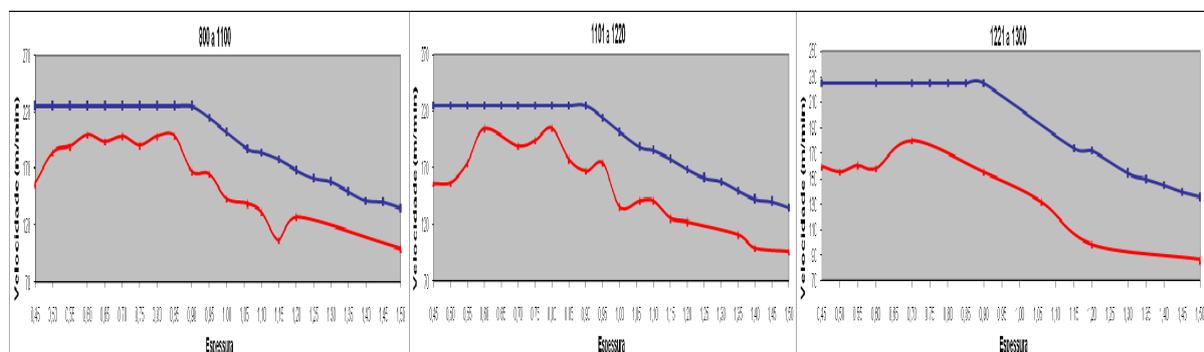


Figura 1 – 800 a 1100 mm

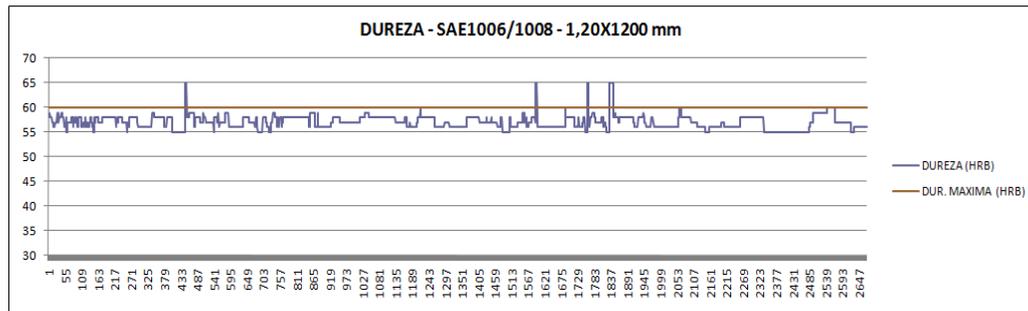
Figura 2 – 1101 a 1200 mm

Figura 3 – 1201 a 1300 mm

Quando a dureza medida na seção de saída da linha de recozimento chega próxima dos limites de especificação, há duas variáveis que podem ser alteradas para diminuir a dureza: a velocidade e a temperatura da linha.

O aumento da dureza significa que o aço não está se recristalizando completamente. A recristalização inadequada implica em dificuldade na aplicação do material.

Assim, como o forno já está em seu limite, rotineiramente, diminui-se a velocidade da linha. A Figura 4 mostra os resultados de dureza obtidos na linha para materiais comerciais.



**Figura 1** – Dureza materiais de Especificação SAE1006/1008

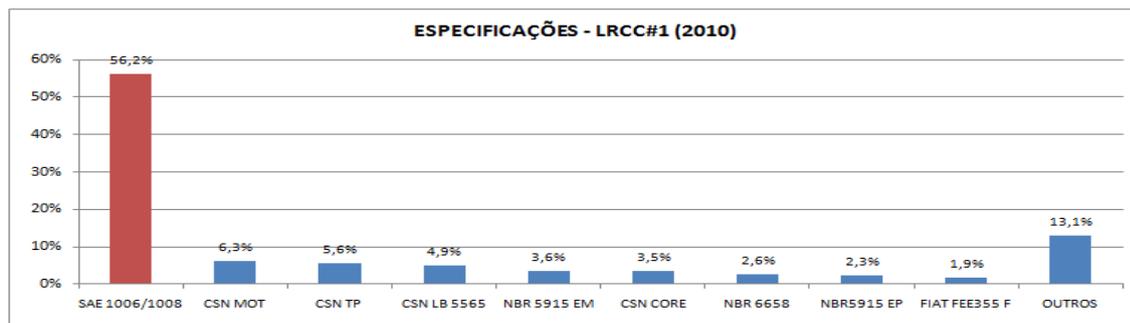
Logo, para aumentar a velocidade de processo da linha de recozimento, têm-se dois caminhos:

- aumentar a capacidade de aquecimento do forno, o qual forneceria maior quantidade de energia térmica para o material, sendo necessário menor tempo para recristalização e consequentemente possibilitando maior velocidade de processo; e
- aumentar a taxa de recristalização dos materiais processados pela LRCC1 através de alterações nas variáveis de processo (Composição química, temperatura de deformação a quente, quantidade de deformação a frio), o que possibilitaria um aumento na força motriz para a recristalização, e consequentemente possibilitaria uma maior velocidade de processo da linha.

Optou-se pela segunda alternativa por não apresentar custos.

### 2.1.1 Escolha do material teste

Com o objetivo de facilitar o estudo, foi feito um levantamento de todas as especificações de aços produzidos no ano de 2010, onde se pode constatar a enorme contribuição dos aços baixo carbono de especificação SAE 1006 e SAE 1008, sendo que a produção de aços com essas duas especificações correspondem a 56,2% de toda a produção do equipamento em estudo (conforme apresentado na Figura 5).



**Figura 5** – Produção da LRCC de Jan/10 a Dez/10 por Especificação.

A composição química típica de aços com especificação SAE 1006/1008 é apresentada na Tabela 1:

**Tabela 1** – Faixa Típica da composição química de aços na especificação SAE 1006/1008, com percentual em peso dos principais elementos previstos

% C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%Sn	%Al	%N	%Nb	%Ti	%B	%V
0,03/0,05	0,25/0,35	0,02 MAX	0,025 MAX	0,02 MAX	0,06 MAX	0,04 MAX	0,06 MAX	0,02 MAX	0,02 MAX	0,02/0,05	0,006 MAX	0,005 MAX	0,005 MAX	0,0008 MAX	0,008 MAX

Em relação às condições de laminação a quente, essa especificação, tem temperatura de acabamento de 910 a 950°C e bobinamento de 640 a 680°C. No que diz respeito a quantidade de deformação a frio, há uma redução específica para cada dimensão final.

Identificou-se a dimensão destas especificações com maior volume de produção e desvio de velocidade teórica: 1,2 mm de espessura por 1220 mm de largura (15,7% das ocorrências em peso).

Para a dimensão acima (1,2 mm x 1200 mm), a quantidade de deformação a frio usual é de 65,7%, ou seja, a espessura de entrada no laminador de tiras a frio é de 3,5 mm.

## 2.2 Estudo das Variáveis de Processo que Afetam a Velocidade da LRCC1 e Definição das Metodologias de Estudo

Escolhido o material teste, o próximo passo, visou o estudo das variáveis de processo de possível atuação que afetam a velocidade da LRCC1:

- temperatura de deformação a quente: relativo as temperaturas de acabamento e de bobinamento aplicadas na linha de tiras a quente; e
- quantidade de deformação a frio: devido à redução na espessura da chapa laminada a quente na linha de tiras a frio.

Para avaliar efetivamente a Influência da quantidade de Redução a Frio, seguiram-se duas diferentes metodologias:

- ensaios em laboratório (escala piloto); e
- experiência em escala real de processo.

## 2.3 Estudo em Escala Piloto – Metodologia Laboratorial

No estudo em escala piloto, foi analisada a *cinética de recristalização* de duas amostras de materiais com diferentes quantidades de redução a frio. Assim, dimensionou-se a influência desta variável no comportamento da amostra frente ao tratamento térmico, ou seja, para um mesmo tempo e temperatura de recozimento,

comparou-se o perfil de amolecimento a partir da curva de recristalização de amostras processadas com diferentes condições.

### 2.3.1 Obtenção das amostras

Para o proposto estudo foram utilizadas amostras de material SAE 1006/1008 no estado encruado:

- Amostra I, denominada neste trabalho de “CSN” - Com os parâmetros de processo usuais de processo CSN (65,7% de redução, espessura a quente de 3,50 mm); e
- Amostra II, denominada neste trabalho de “CSN/Piloto” - Com os parâmetros de processo usuais da CSN, porém, com maior redução a frio promovida por um laminador em escala piloto (71,7% de redução, espessura a quente de 4,25 mm).

A laminação a Frio em Escala Piloto da Amostra II (amostra CSN/Piloto) procedeu-se utilizando um laminador FENN (Figura 6) instalado nas dependências da CSN. Foi utilizado um par de cilindros de 67 mm de raio.



Figura 6 – Laminador Fenn do Centro de Pesquisa da CSN.<sup>(1)</sup>

### 2.3.2 Corpos de prova para tratamento de recozimento

Foram confeccionados 20 corpos de prova (CP's) para cada uma das amostras do aço em estudo citada acima (Material “CSN” e Material “CSN/Piloto”), resultando um total de 40 CP's. Cada um destes CP's com dimensão 8 x 20 mm, sendo a maior dimensão no sentido de laminação. Tendo sido feito um furo de 2,5 mm de diâmetro em cada CP, para que o mesmo pudesse ser apoiado em um suporte, que visava agrupar as amostras CSN e CSN/Piloto que foram tratadas a mesma temperatura e tempo de encharque quando inseridas no forno.

Apesar de terem sido preparados 20 CP's para cada amostra, foram efetivamente utilizados 16 Cp's para cada uma (Amostras CSN e CSN/Piloto). Os 4 CP's excedentes tinham a função de reserva caso ocorresse algum problema no momento do tratamento térmico e/ou para que pudesse proceder análises na condição não recozida (encruada).

Depois de preparados, os CP's foram identificados com numeração de 1 a 40, para facilitar a posterior seqüência de Tratamento térmico. A Tabela 2 apresenta as codificações adotadas para identificar os corpos de provas das Amostras CSN e CSN/Piloto que foram posteriormente tratadas em um forno de mufla, afim de obter suas respectivas curvas de recristalização por meio da simulação do tratamento de recozimento contínuo.

**Tabela 2** – Codificação dos CP,s indicando a amostra a qual o mesmo representa e a condição de recozimento (Tempo e temperatura) que será submetido

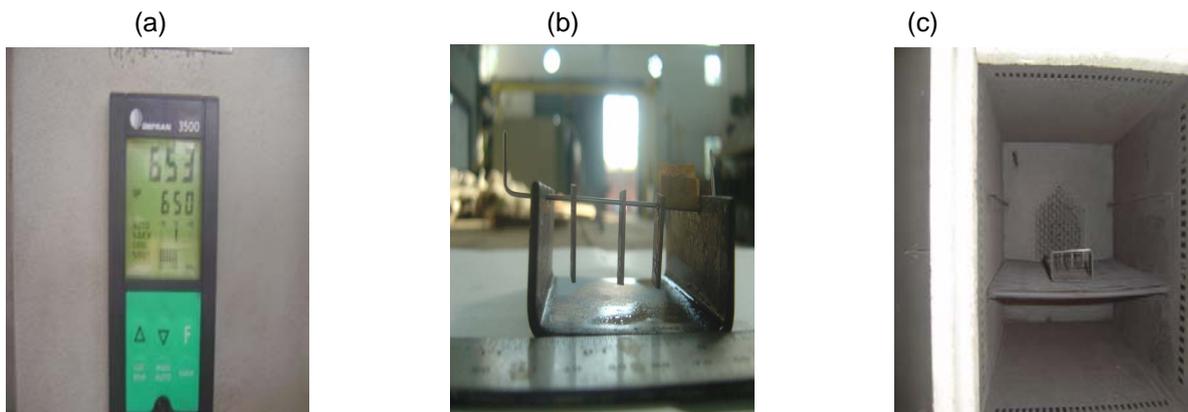
	Marcação	Temperatura	Tempo		Marcação	Temperatura	Tempo
AMOSTRA I	1	650°C	10 s	AMOSTRA II	21	650°C	10 s
	2		30 s		22		30 s
	3		45 s		23		45 s
	4		1 min		24		1 min
	5		2 min		25		2 min
	6		3 min		26		3 min
	7		5 min		27		5 min
	8		10 min		28		10 min
	9	750°C	10 s		29	750°C	10 s
	10		30 s		30		30 s
	11		45 s		31		45 s
	12		1 min		32		1 min
	13		2 min		33		2 min
	14		3 min		34		3 min
	15		5 min		35		5 min
	16		10 min		36		10 min
	17	Reserva/ Encruada			37	Reserva/ Encruada	
18			38				
19			39				
20			40				

### 2.3.3 Tratamento térmico de recozimento em escala piloto

Para identificar o comportamento do material em relação à recristalização diante as três diferentes condições das amostras, foi procedido a simulação do recozimento em um forno Mufla, da seguinte forma:

- Temperatura de encharque: 650°C e 720°C;
- Tempo de encharque: 10 segundos, 30 segundos, 45 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 3 minutos, 5 minutos e 10 minutos; e
- 1 CP por cada condição de tratamento, totalizando 16 CP's por amostra (Amostras CSN e CSN/Piloto).

Inicialmente foi programado o forno Mufla para 650°C, conforme pode ser observado na Figura 7-a. Quando estabelecido a temperatura programada, as amostras foram inseridas no suporte, o mesmo sendo apoiado em uma base metálica que se encontrava no interior do forno a temperatura do mesmo, conforme representado na Figura 7-b e 7-c.



**Figura 7** – (a) Indicação da primeira temperatura de encharque utilizada no tratamento térmico.(b) suporte com os três cp's. (c) suporte com os cp's inserido dentro do forno.

Depois de terminados os tratamentos a temperatura de 650°C, o forno foi programado para estabelecer a temperatura de 750°C, e repetido o procedimento citado acima para os mesmos períodos de marcação.

## 2.4 Experiência em Escala Industrial

Com o respaldo dos estudos teóricos citados neste trabalho, foram feitas alterações na quantidade de deformação a frio em escala industrial. Foram utilizadas 20 bobinas (900 t) com espessura a quente de 3,90mm, mantendo as demais condições.

### 2.4.1 Plano de aumento na velocidade da lrcc1 para o processamento do material teste

Com base nos resultados obtidos pelos testes em escala Piloto, foi determinado um aumento na velocidade da LRCC1, com o intuito de verificar e avaliar o proposto aumento na taxa de recristalização deste material teste.

Para que esse teste pudesse ser feito, é necessário citar algumas variáveis (Usuais e Visadas no teste):

- Velocidade usual praticada: **120 m/min**
- Temperatura de Aquecimento/Encharque Usuais: **700°C** (+/- 20°C)
- Velocidade e temperatura proposta no teste: Como não havia uma referencia precisada da Máxima Velocidade as quais poderia se submeter o material sem que o mesmo deixasse de atender as propriedades especificadas, a estratégia foi aumentar a velocidade (e reduzir a temperatura), de forma que a Dureza final do produto se mantivesse abaixo do valor Maximo permitido, que é de **60 Hrb**. Dessa forma, prova-se que mesmo com o acréscimo de Velocidade, obteve-se a mesma Recristalização (medida pela dureza) que antes, gerando ganho na produtividade sem perdas na qualidade do produto.

## 2.5 CARACTERIZAÇÃO DAS Amostras em Estudo

Para observar e analisar a evolução microestrutural foi feita a caracterização metalográfica das amostras utilizadas na experiência em escala piloto e industrial.

As amostras foram embutidas em baquelite, seguindo o lixamento com lixas de carbetto de silício (220 mesh, 320 mesh, 500 mesh, 800 mesh, 1.000 mesh e 1.200 mesh). Posteriormente as mesmas foram polidas com pasta de diamante de granulometria de 6 e 3  $\mu\text{m}$  e com alumina com granulometria de 0,3  $\mu\text{m}$ . Foi feito ataque com Nital 3% com imersão por 5 segundos.

A análise metalográfica utilizou microscópio ótico (Zeiss – Axioplan 2) com sistema digital de aquisição de imagens, instalado na CSN.

Após a análise microestrutural todas as amostras utilizadas nos testes em escala piloto, foram submetidas a 5 medidas de dureza Vickers num equipamento de microdureza (Micromet 3 da Buehler LTD com carga de 200 gf e manutenção da carga por 15 s).

A partir destes resultados foi possível obter a curva de recristalização para as amostras utilizadas nos testes em escala piloto.

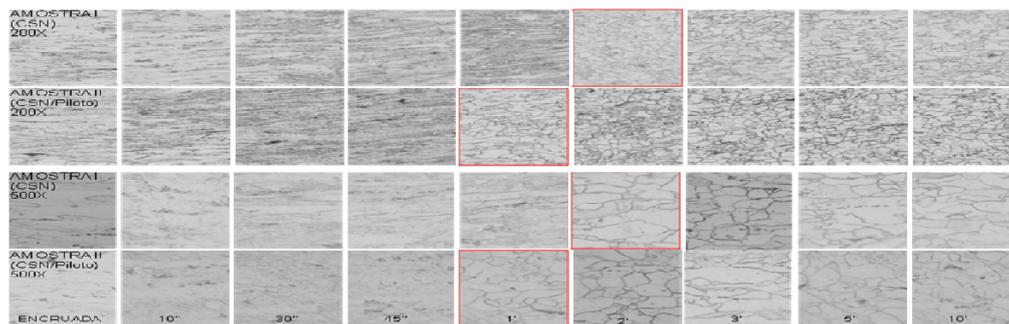
Para obtenção da curva de recristalização, foram calculadas a média das 5 medidas de dureza Vickers obtidas em diferentes pontos de cada uma das amostras (para 650°C e 750°C), com posterior cálculo do desvio padrão e do erro.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Testes em Escala Piloto

#### 3.1.1 Evolução microestrutural

Podemos observar o comportamento da evolução microestrutural das três amostras em estudo submetidas ao tratamento de simulação do recozimento contínuo em escala piloto a 650°C, com aumento de 200X e 500X, na Figura 8. A amostra identificada como amostra I (CSN) se refere a material deformado a frio com redução da espessura de 65,7% em escala industrial. A amostra identificada como amostra II (CSN/Piloto) se refere a material deformado a frio com redução da espessura de 71,7% em escala piloto.

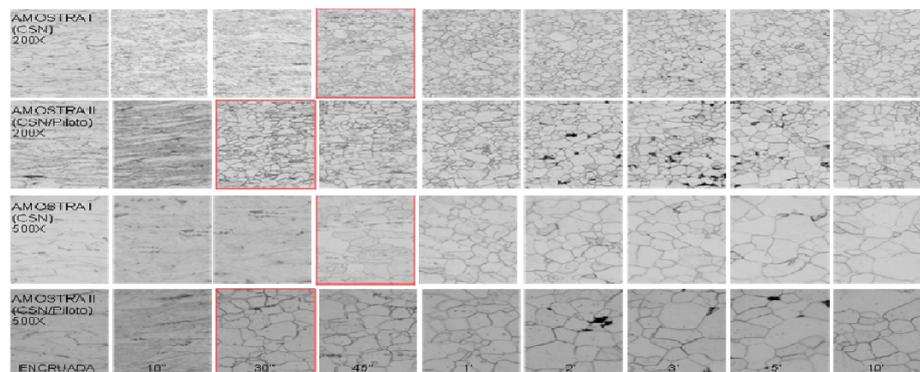


**Figura 8** – Evolução microestrutural das duas amostras em estudo (Amostra I – CSN e Amostra II – CSN/Piloto) frente a simulação do recozimento contínuo em escala piloto em um forno Mufla, com a temperatura de 650°C e aumento de 200X e 500x. Em destaque de Vermelho o tempo que indica o INICIO da recrystalização

Com relação a evolução microestrutural das amostras recozidas em escala piloto a 650°C, pode se verificar a partir da análise da Figura 8 que começam a apresentar evidências de microestrutura parcialmente recrystalizada: em 2 minutos para a amostra I e em 1 minuto para a amostra II.

Estes resultados estão de acordo com a literatura,<sup>(2)</sup> onde materiais com maior quantidade de deformação a frio apresentam menor tempo para completa recrystalização a uma dada temperatura.

Observou-se comportamento semelhante na evolução microestrutural duas amostras submetidas ao tratamento de simulação do recozimento contínuo em escala piloto a 750°C (Figura 9).



**Figura 9** – Evolução microestrutural das três amostras em estudo (Amostra I – CSN e Amostra II – CSN/Piloto) frente a simulação do recozimento contínuo em escala piloto em um forno Mufla, com a temperatura de 750°C e aumento de 200X e 500x. Em destaque de Vermelho o tempo que indica o início da recrystalização

A amostra I começa apresentar evidências de microestrutura parcialmente recristalizada em 45 segundos. Já a amostra II, em 30 segundos. Conforme prevista pela literatura<sup>(2)</sup> o aumento na temperatura de recozimento acelera o tempo necessário para completa recristalização.

O método de análise da cinética de recristalização via fração amolecida (medidas de dureza vickers) é um processo importante devido a sua praticidade e por ser um excelente indicativo de recristalização.<sup>(3)</sup>

Fez-se uso da técnica que identifica a cinética *de recristalização via fração amolecida*. A partir desta metodologia foram obtidos os valores apresentados nas Tabelas 3 e 4 para a cinética de recristalização via fração amolecida das amostras em estudo (Amostra I – CSN e Amostra II – CSN/Piloto) submetidas a simulação do recozimento contínuo em escala piloto a 650°C e 750°C (respectivamente).

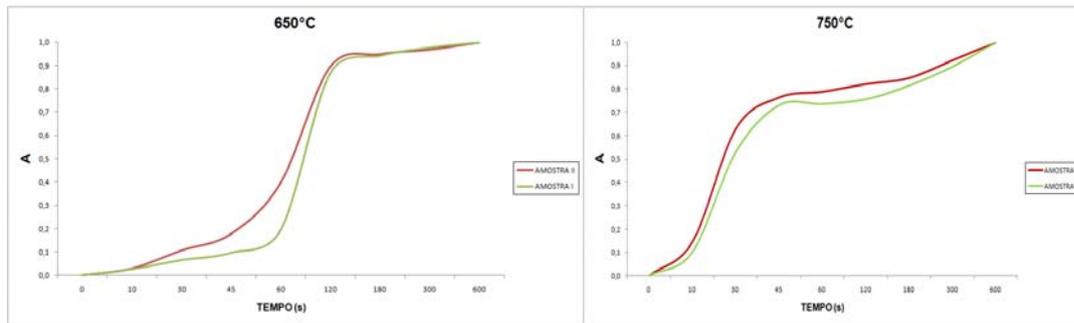
**Tabela 3** – Indicação da Fração amolecida ( $A$  ou  $X_{RV+RX}$ ) de cada amostra para cada um dos tempos de tratamento de simulação do recozimento contínuo, todas a 650°C

Tempo (s)	Ln (t)	Amostra I – CSN	Amostra II – CSN/Piloto
		<b>A ou <math>X_{RV+RX}</math></b>	<b>A ou <math>X_{RV+RX}</math></b>
0		0,0000	0,0000
10	2,303	0,0254	0,0281
30	3,401	0,0646	0,1058
45	3,807	0,0959	0,1771
60	4,094	0,1937	0,3974
120	4,787	0,8689	0,8963
180	5,193	0,9432	0,9503
300	5,704	0,9785	0,9698
600	6,397	1,0000	1,0000

**Tabela 4** – Indicação da Fração amolecida ( $A$  ou  $X_{RV+RX}$ ) de cada amostra para cada um dos tempos de tratamento de simulação do recozimento contínuo, todas a 750°C

Tempo (s)	Ln (t)	Amostra I – CSN	Amostra II – CSN/Piloto
		<b>A ou <math>X_{RV+RX}</math></b>	<b>A ou <math>X_{RV+RX}</math></b>
0		0,0000	0,0000
10	2,303	0,1018	0,1449
30	3,401	0,5293	0,6286
45	3,807	0,7303	0,7633
60	4,094	0,7354	0,7878
120	4,787	0,7557	0,8204
180	5,193	0,8142	0,8469
300	5,704	0,8957	0,9224
600	6,397	1,0000	1,0000

A Figura 10 representa a cinética de recristalização para os tratamentos de simulação de recozimento contínuo em escala piloto a 650°C e 750°C. Verifica-se que a Amostra II (CSN/Piloto) tem cinética mais acelerada do que as amostras I (CSN) para os tratamentos que simularam o recozimento contínuo em escala piloto procedidos a 650°C e 750°C.



**Figura 10** – Fração amolecida de cada uma das três amostras (Amostra I – CSN e Amostra II – CSN/Piloto) 650°C e 750°C.

Analisando a curva de cinética de recristalização (Principalmente a 650°C), observamos que a amostra II (CSN/Piloto) teve o início e a estabilização da recristalização mais rápido que a outra amostra. Como exemplo, podemos citar que a 650°C / 60 s, enquanto a amostra I (CSN) havia recristalizado (amolecido) 20%, a amostra II (CSN/Piloto) já havia recristalizado (amolecido) 40%.

Tanto pela caracterização microestrutural (evolução microestrutural perante sequencia de recozimento) quanto pela caracterização mecânica (representada pela curva de cinética de recristalização), ficou evidenciado que a amostra II teve maior taxa de recristalização em comparação com a amostra I.

### 3.2 Testes em Escala Industrial

Com o objetivo de confirmar os resultados obtidos no teste em escala piloto, foi executado o teste de recozimento na LRCC1 com 30 bobinas, todas com as dimensões finais de 1,20 mm de espessura e 1200 mm de largura, sendo:

- 10 Bobinas obtidas a partir da redução a frio usual, ou seja, 3,50mm de espessura a quente, apresentando redução a frio de 65,7%; e
- 20 Bobinas obtidas a partir de maiores reduções a frio, ou seja, 3,90 mm de espessura a quente, apresentando redução a frio de 69,2%.

O objetivo do teste era aumentar a velocidade da linha, em torno de 20 m/min, tendo como fator limitante a Dureza do material, esta que tem como valor Maximo 60 HRB.

Na Tabela 5 é possível observar os valores médios de velocidade e conseqüentemente das Temperaturas de aquecimento e encharque obtidos em cada bobina do teste.

Ficou claro, que mesmo com o aumento de velocidade de 17,1 m/min, a dureza do material se manteve praticamente inalterada, indicando que o material que obtinha maior Redução a frio, apresentou melhor desempenho quanto a recristalização.

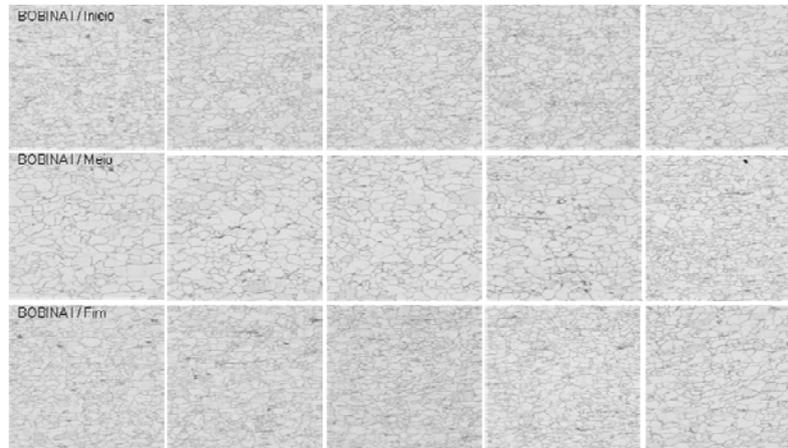
A diferença entre a produtividade real e a produtividade, calculadas caso fosse utilizado o material teste é de 14,1% (Tabela 5).

**Tabela 5** – Comparação da Produtividade (t/h) obtidos para o material USUAL e material TESTE

	VELOCIDADE (m/min)	PRODUTIVIDADE (t/h)	GANHO
USUAL	122,4	83	14,10%
TESTE	139,6	94,7	

### 3.2.1 Análise microestrutural

Podemos observar na caracterização metalográfica representada na figura 11, que as bobinas recozidas no teste em escala industrial não apresentaram sinais de microestrutura deformada, ou seja, observa-se que ocorreu recuperação da estrutura encruada oriunda da laminação a frio.



**Figura 11** – Representação da Microestrutura recristalizada das amostras referente ao centro, a ¼ da borda e das bordas da BOBINA I. Microscopia Ótica com aumento de 200X.

Em ambas as microestruturas, que representam a borda, 1/4 da borda e o centro da bobina, observa-se o aparecimento de grão equiaxiais característicos de materiais recristalizados, evidenciando que houve recuperação completa da estrutura deformada a frio (encruada) após o aumento da velocidade, provando que as alterações de processo propostas tiveram influência positiva sobre o resultado almejado.

## 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e da análise histórica de Produtividade de todos os equipamentos envolvidos na cadeia de Produção de Laminados a frio, chegou-se a conclusão que o Aumento Da espessura do Material de entrada do Laminador de Tiras a Frio, causaria ganhos de Produtividade, não apenas nos equipamentos de Recozimento, devido o Aumento da Taxa de Recristalização abordado neste trabalho, mas também nos equipamentos de Laminação a quente, já que esse aumento de Espessura é favorável a Relação Tonelada/Hora de cada equipamento, conforme descrito abaixo:

Ganho Percentual Médio de Produtividade :

- Linha de Decapagem Contínua (LDC): 4,39%;
- Linha de Recozimento Contínuo de Chapas (LRCC) : 8,7%; e
- Fornos de Recozimento em Caixa (FRCX): 8,0%.

Tanto pela metodologia em escala piloto, quanto em escala industrial, ficou evidenciado que os materiais que tiveram *maiores quantidade de redução a frio*, em relação ao procedimento usual, obtiveram maiores taxas de recristalização.

Do ponto de vista da evolução microestrutural, nas amostras com maiores Reduções a Frio, foi verificada a presença de vestígio de recristalização com tempos menores de recozimento do que para aquelas com redução a frio usuais (Menores).

Pela análise da curva de cinética de recristalização via fração amolecida, ficou evidenciado que amostras com maior redução a frio, apresentaram fração



recristalizada mais rapidamente, quando comparadas com amostras obtidas a partir de Reduções a frio usuais (Menores).

No que diz respeito ao processamento em escala industrial as bobinas que foram obtidas com maiores reduções a frio, mesmo com velocidade de 17,1 m/min acima da usual, apresentaram a recristalização esperada.

## REFERÊNCIAS

- 1 A.S. PAULA, Caracterização estrutural comparativa: um aço extra-baixo carbono ao boro em um aço livre de intersticiais ao titânio. Dissertação - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2002.
- 2 A.F. Padilha e F. Siciliano Jr., Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura, Editora ABM, 3ª Edição, 2005.
- 3 N.J. LINHARES, Manual de Treinamento da Linha de Recozimento Contínuo de Chapas. Volta Redonda: CSN, 1994.