

## ESTUDO DA DETERIORAÇÃO DE ABAFADORES EMPREGADOS NO RECOZIMENTO EM CAIXA DE BOBINAS DE AÇO<sup>1</sup>

Jorge Luís Colet<sup>2</sup>  
Andrés Ernesto Litz<sup>3</sup>  
Leonardo Boccanera<sup>4</sup>  
Ezequiel Pascual<sup>5</sup>  
Rubén Antonio Solé<sup>6</sup>  
Ricardo Pinheiro Domingues<sup>7</sup>

### Resumo

Este trabalho foi desenvolvido junto à Ternium Siderar, planta General Sávio, em San Nicolás de los Arroyos, Argentina, com apoio da UFOP e do IAS. Seu objetivo foi entender a deterioração dos abafadores dos fornos de recozimento em caixa HNX. Os abafadores têm uma vida útil aproximada de 15000 horas de fogo e trabalha-se até a ruptura do equipamento, o que expõe a carga ao contato com oxigênio e gera reprocessamento. Ensaios de dureza, metalográficos, químicos e small punch foram realizados a fim de se avaliar a condição estrutural do aço inoxidável AISI 309S, de que são fabricados os abafadores. Foram retiradas amostras de material fora de serviço, em serviço e novo (sem uso). Foi possível mostrar que os abafadores estiveram submetidos a três fenômenos progressivos que os degradam e podem levá-los ao colapso: a sensibilização, uma intensa carburização do aço do abafador na região dos queimadores e o crescimento grosseiro dos grãos austeníticos.

**Palavras-chave:** Abafadores; Deterioração; Aumento da vida útil.

### STUDY OF DETERIORATION OF BELLS USED IN THE PROCESS OF BATCH STEEL COILS ANNEALING

#### Abstract

This work has been developed at General Sávio plant in Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina, with helping of UFOP and IAS, aiming the understanding the deterioration of the HNX batch coil annealing furnaces' bells. These bells have a lifespan of about 15,000 hours under fire, and work until the failing of the equipment, which exposes the coils to contact with oxygen and generates reworking. Hardness tests, metallographic and chemical analyses, as well as small punch tests, were made with the purpose of assessing the structural condition of AISI 309s stainless steel, material that the bells are made of. Samples were removed from "fresh" (unused), "in service", and "out of service" material. It has been proved that the bells were subjected to three progressive phenomena, which, all of them, can act together, degrading and causing breakage: the sensitization, a massive steel carburization on the bell at the burner area, and an austenitic grain growth.

**Keywords:** Bells of batch steel coils annealing; Deterioration; Useful life increasing.

<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> Membro da ABM, Graduando em Eng. Metalúrgica na Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, MG.

<sup>3</sup> Engenheiro Eletrônico, Setor de Laminação a Frio, Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina

<sup>4</sup> Dr. Eng. pela UFSC - Florianópolis - Brasil. Setor de materiais, aportes e ensaios não destrutivos, Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina

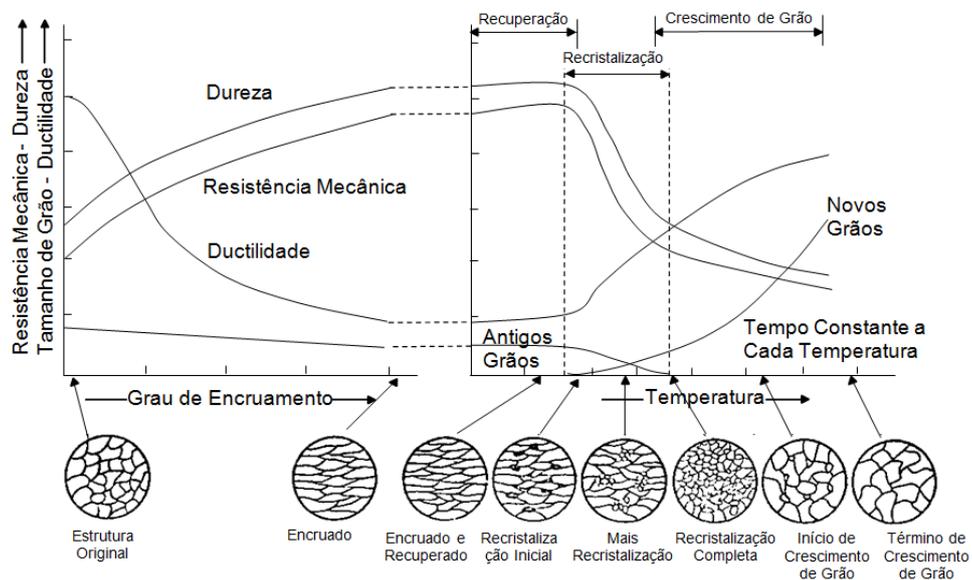
<sup>5</sup> Graduando em Eng. Mecânica na Faculdade Regional de San Nicolás, UTN, Argentina. Responsável pelas áreas de Análise de falha e ensaios físicos do Instituto Argentino de Siderurgia (IAS)

<sup>6</sup> Membro da ABM, Engenheiro Químico, M.Sc., D.Sc., Transferência de Tecnologia, Fundação Gorceix / DEPEC, Ouro Preto, MG.

<sup>7</sup> Membro da ABM, Eng. Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Professor Adjunto IV na Escola de Minas da UFOP - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Ouro Preto, MG.  
rpdemet@em.ufop.br

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata de um estudo da deterioração dos abafadores de recozimento em caixa de bobinas de aço na Ternium Siderar, planta de San Nicolás de los Arroyos. O processo de recozimento é realizado após a laminação a frio e, dependendo do material, com ou sem uma limpeza eletrolítica prévia, em um momento que o material encontra-se em um estado bastante encruado,<sup>(1)</sup> e a sua resistência mecânica aumenta consideravelmente devido aos defeitos impostos na rede cristalina pela laminação a frio, o que implica em uma drástica deterioração de algumas propriedades mecânicas, além de modificações no tamanho e na forma dos grãos e na textura. Como pode ser visto na Figura 1, ocorrem, por exemplo, o aumento do limite de escoamento, o aumento do limite de resistência e a perda da ductilidade, o que torna o material inadequado para certas aplicações, pois ele é sempre submetido a alguma deformação a frio para que seja obtida a forma final.



**Figura 1:** Representação esquemática do ciclo encruamento-recristalização mostrando-se os efeitos sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas.<sup>(2)</sup>

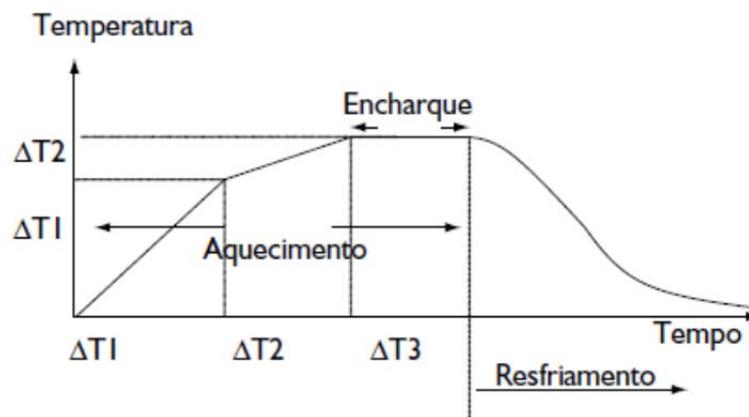
O aumento excessivo da resistência mecânica é devido principalmente, ao aumento da densidade de discordâncias, que pode atingir valores da ordem de  $10^{12}$  cm/cm<sup>3</sup>, dependendo da severidade de deformação. Quanto maior for a redução, mais forte é a modificação da estrutura interna do aço, correspondendo a um trabalho de deformação elevado que alonga os grãos ferríticos na direção de laminação, ficando o aço no estado encruado, comprometendo seriamente a dureza e o limite de resistência.<sup>(3)</sup>

Os abafadores são grandes campânulas colocadas sobre as bobinas que passaram pelo processo de recozimento e possuem as seguintes funções:<sup>(4)</sup>

1. Receber o calor dos gases de queima direta ou dos tubos radiantes e transmiti-lo para a atmosfera que circula no espaço interno.
2. Evitar a contaminação da atmosfera protetora pelos gases de combustão durante o aquecimento e a entrada de ar do exterior durante o ciclo de resfriamento.
3. Irradiar o calor durante a fase de resfriamento, extraindo-o dos gases da atmosfera protetora.

Os abafadores do forno de recozimento em caixa da em estudopossuem nominalmente uma vida útil de 15.000 horas de fogo, que corresponde ao tempo de aquecimento e homogeneização durante o ciclo. Eles são utilizados simultaneamente em dois tipos diferentes de fornos HNX, ou seja, com atmosfera de  $N_2$  e  $H_2$ , e não existe um controle horário do uso deste abafador com um ou outro tipo de forno. Um deles é conhecido como BLEIF e possui, no total, 8 queimadores tangenciais à superfície do abafador; o outro é conhecido como Lee Wilson e possui, em uma linha, 10 queimadores frontais à superfície do abafador. Os nomes dos fornos são devido aos seus respectivos fabricantes.

No total, o equipamento HNX utilizado consiste de 138 bases, que trabalham com uma mistura de gás inerte na proporção de 93% de Nitrogênio e 7% de Hidrogênio. Os ciclos de recozimento (aquecimento, encharque e esfriamento) são longos. Para as bases HNX a duração total é de 90 horas a 130 horas. Uma curva típica do processo industrial é apresentada na Figura 2.



**Figura 2:** Perfil térmico típico de um ciclo de Recozimento em Caixa.<sup>(3)</sup>

A deterioração dos abafadores gera reprocessos na linha de recozimento, e a formação de uma espécie de pança no pé da chapa intermediária com que é construído o abafador é a principal causa dos defeitos. De um lado, nesta zona localiza-se a maioria das fissuras e, de outro, existe uma grande deformação desta mesma região que chega a impedir a colocação da campânula de resfriamento sobre o abafador, o que também acaba por inutilizá-lo. A Figura 3 mostra essa zona de defeitos.

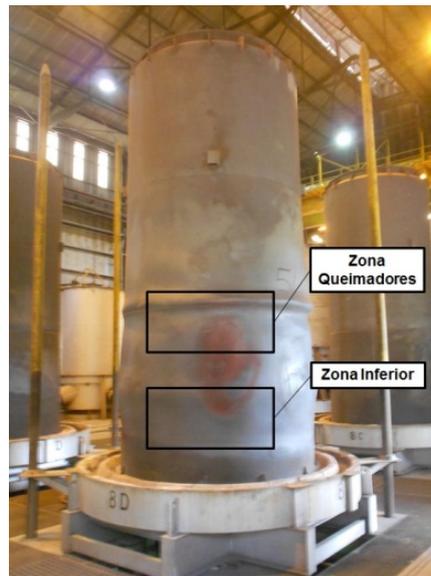


**Figura 3:** Abafadores de recozimento em caixa com a formação da pança que leva a deterioração.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

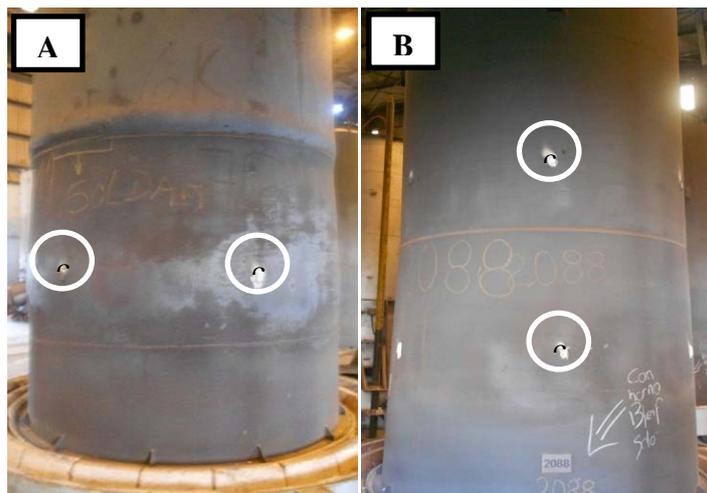
Para a caracterização do processo de deterioração dos abafadores retiraram-se amostras, para análise, de abafadores fora de serviço, de materiais novos (sem uso) e também foram ensaiados durante três ciclos de recozimento, corpos de prova do mesmo material do abafador, soldados à altura dos queimadores dos dois tipos de fornos HNX.

Os abafadores, como ilustrado na Figura 4, foram divididos em duas regiões caracterizadas, a primeira, como “zona de queimadores” e, a segunda, como “zona inferior”. As amostras foram estudadas por meio da metalografia do material, da composição química por combustimetria para C e S, da espectrometria de emissão óptica para os outros elementos e do small punch para resistência mecânica.



**Figura 4:** Área em que foram retiradas as amostras.

Em um segundo momento, amostras foram soldadas na superfície dos abafadores e cicladas durante o processo de recozimento por três ciclos. No abafador do forno Lee Wilson foram soldadas amostras em uma única altura, no abafador do forno BLEIF foram soldadas amostras em duas alturas, pois esse forno possui dois planos de queimadores. A disposição das amostras pode ser vista na Figura 5. As amostras tinha um tamanho aproximado de 50mm x 20mm x 8mm.

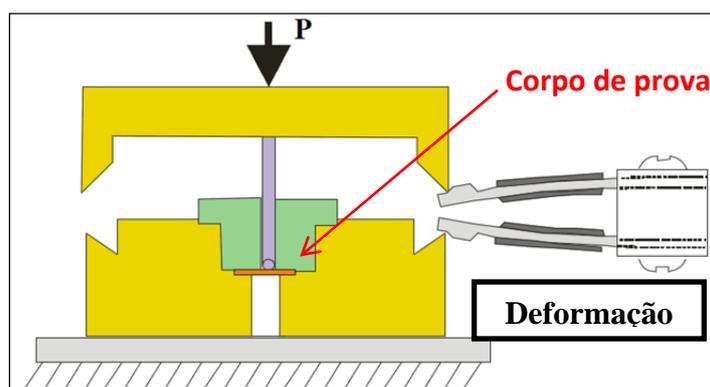


**Figura 5:** Amostras soldadas nos abafadores. (A) Abafador ciclado com o forno Lee Wilson; (B) Abafador ciclado com o forno Bleif.

## 2.1 Ensaio *Small Punch*

Como mencionado anteriormente, para a determinação das propriedades mecânicas do material, devido à escassa quantidade de amostras disponíveis, se optou pela caracterização das mesmas através do ensaio *small punch*, uma vez que este ensaio permite avaliar diretamente as propriedades mecânicas dos materiais a partir de amostras com um pequeno tamanho e com geometria simples.

Neste ensaio normalmente se usa corpos de prova quadrados, de 10mmx10mm de seção e 0,5 mm de espessura. O ensaio consiste na fixação das extremidades do corpo de prova entre duas matrizes e, através de um punção com a cabeça semiesférica (de 1,25 mm de raio), a aplicação de uma carga no corpo de prova até o seu rompimento, tal como ilustra a Figura 6.<sup>(5,6)</sup>



**Figura 6:** Esquema do dispositivo empregado IAS.

Durante o ensaio se registra de maneira contínua a carga aplicada e a deformação imposta pelo punção ao corpo de prova, fornecendo uma curva com o aspecto ilustrado na Figura 7.<sup>(6)</sup>

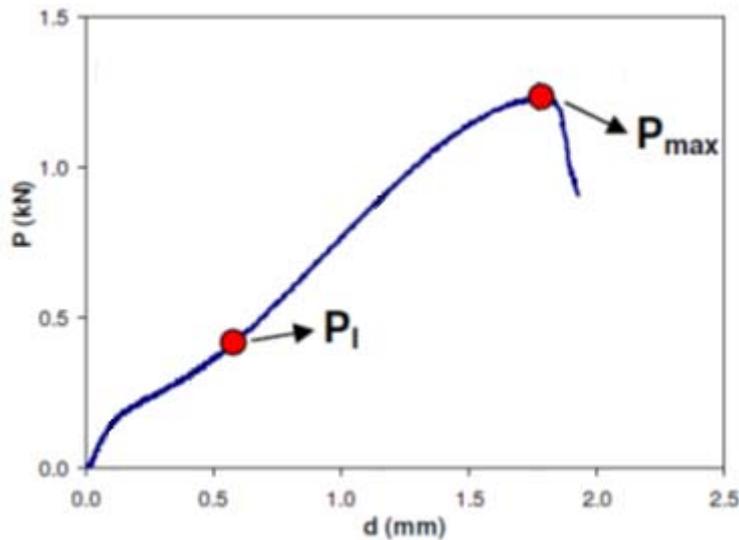


Figura 1: Curva típica obtida em um ensaio *small punch* (adaptado).<sup>(6)</sup>

O limite de resistência do material,  $S_u$ , é obtido a partir de equações paramétricas, como a mostrada na eq.1.

$$S_u = \alpha \frac{P_I}{t^2} + \beta \frac{P_{max} - P_I}{t} \quad (\text{eq.1})$$

onde

$\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes empíricos;

$P_{max}$  e  $P_I$  são respectivamente a carga máxima medida e a carga de inflexão que marca a mudança do tipo de deformação que o material está sofrendo  
 $t$  é a espessura do corpo de prova.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 detalha os resultados obtidos para o material novo, para o material fora de serviço retirado da zona dos queimadores, de uma zona inferior aos mesmos e compara com a composição química do aço AISI 309s especificado no plano de referencia para construção dos abafadores.

**Tabela 1:** Composição química das amostras analisadas

	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%
Material novo (sem uso)	0,05	1,21	0,36	0,026	0,019	21,37	12,94	0,43
Zona dos Queimadores	<b>2,56</b>	0,90	0,11	0,007	0,007	24,29	10,96	0,17
Zona inferior a dos queimadores	0,06	1,26	0,36	0,030	0,018	21,62	12,67	0,45
AISI 309s	0,08 máx.	2,00 máx.	0,75 máx.	0,045 máx.	0,030 máx.	22,00 24,00	12,00 15,00	—

A partir dos resultados obtidos na Tabela 1, fica evidente a carburização do abafador na zona dos queimadores, chegando o teor de carbono, ao final da vida do mesmo, a valores da ordem de 2,56%, o que contribui para a sua fragilização, a partir da geração de altos volumes de carbonetos que diminuem o teor de cromo na matriz do aço o que aumenta a susceptibilidade a oxidação do material.

Em relação à metalografia o material novoestudado apresentou uma estrutura metalográfica do formada por grãos poligonais de austenita e também maclas em diversos grãos. Na Figura 8A é mostrada uma micrografia dessa amostra.

Já na amostra fora de serviço retirada da zona dos queimadores a estrutura metalográfica apresenta grãos poligonais de austenita com carbonetos massivos localizados nos contornos de grãos e em planos preferenciais no interior do grão, como ilustrado na Figura 8B.

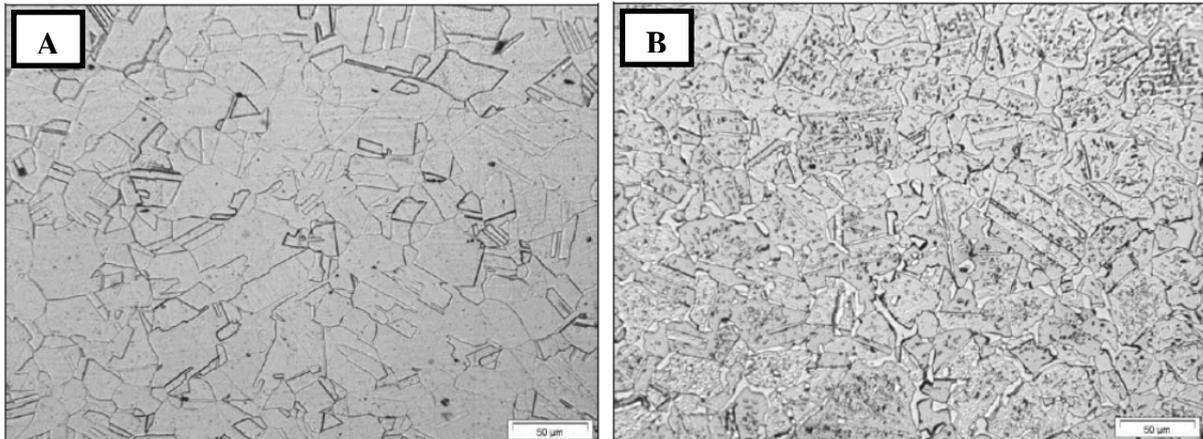


Figura 8: (A) Estrutura metalográfica da amostra nova. (B) Estrutura metalográfica da amostra na zona de queimadores

Na zona denominada de inferior aos queimadores a metalografia da Figura 9A mostra um crescimento grosseiro de grãos na superfície externa da chapa utilizada no abafador, uma estrutura constituída de grãos maclados de austenita com a presença de carbonetos no contorno de grão e nas maclas e, observam-se também carbonetos de morfologia poligonal no interior dos grãos. A Figura 9B também ilustra a metalografia do material da zona inferior constituída de carbonetos nos contornos de grãos austeníticos e em planos preferenciais no interior do grão.

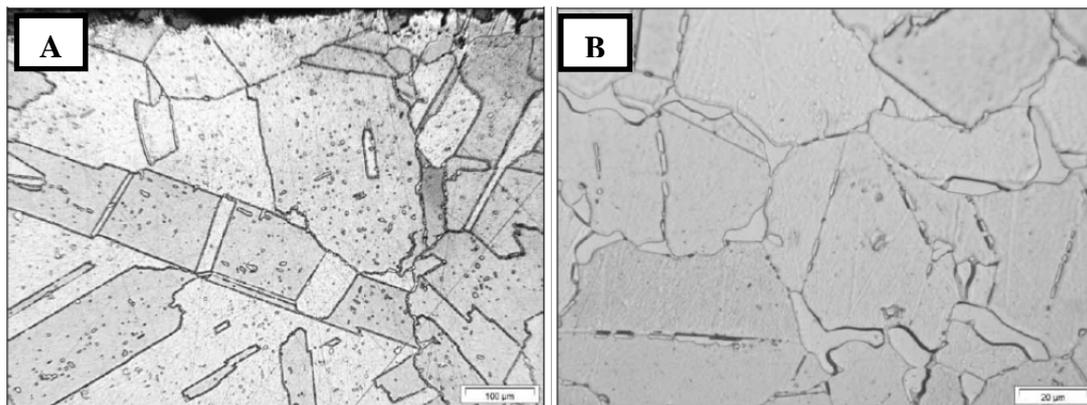


Figura 9: Estrutura metalográfica do material na zona inferior aos queimadores.

Os limites de resistência calculados através dos ensaios small punch para as amostras da zona dos queimadores, da zona inferior e a amostra nova são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Limites de resistência ensaios small punch

Amostra	$S_u$	Média
Nova 1	731,0	704,5
Nova 2	678,0	
Usada – Zona inferior queimador 1	510,0	494,0
Usada – Zona inferior queimador 2	478,0	
Usada – Zona queimador 1	462,0	420,0
Usada – Zona queimador 2	378,0	

As amostras cicladas foram ensaiadas em um ciclo de alta energia, ou seja, com o maior tempo e temperatura de recozimentos utilizados na empresa. Os tempos reais de ciclo aplicados são mostrados na Tabela 3 e a composição química para as amostras cicladas é mostrada na Tabela 4.

**Tabela 3:** Tempo de processo em horas reais para cada abafador ensaio.

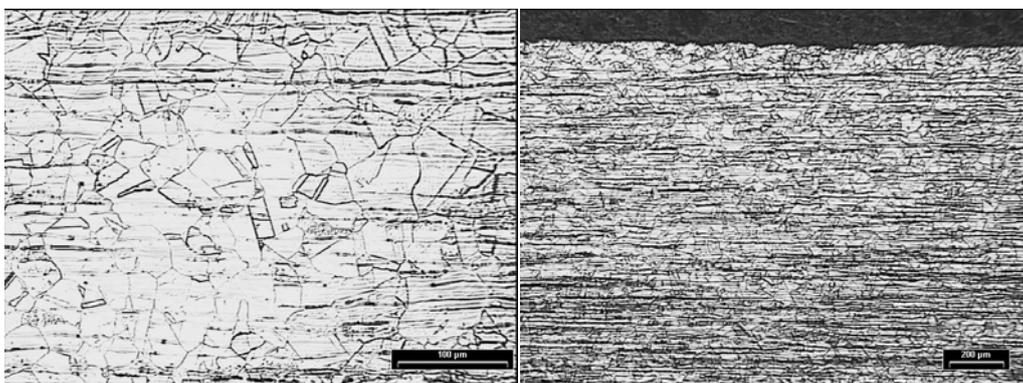
Abafador 2011		Abafador 2088	
Carga	Tempo (horas)	Carga	Tempo (horas)
466L	115,76	465L	124,01
536k	129,46	535N	124,86
596k	120,37	595N	110,2
Total de horas	365,59	Total de horas	359,07

**Tabela 4:** Composição química das amostras cicladas

	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%
Material novo (sem uso)	0,030	1,81	0,43	0,030	0,002	17,44	9,32	0,33
Amostra ciclada	<b>0,121</b>	1,72	0,26	0,019	0,007	19,20	8,47	0,35
AISI 309s	0,08 máx.	2,00 máx.	0,75 máx.	0,045 máx.	0,030 máx.	22,00 24,00	12,00 15,00	–

Analisando a Tabela 4 nota-se novamente a carburização do material na zona dos queimadores, entretanto, agora foram apenas três ciclos impostos as amostras, o que totalizou aproximadamente 360 horas de exposição ao ciclo de recozimento. Isso mostra que esse fenômeno acontece desde o início com o material, deteriorando-o desde o primeiro ciclo e podendo elevar o teor de carbono, com apenas três ciclos, até 0,121%.

A Figura 10 mostra a estrutura do material novo, constituída por grãos poligonais de austenita. Estima-se um tamanho de grão 5-6 segundo a norma IRAM –IAS U 500-122 para aumentos de 256x e de 64x.



**Figura 10:** Estrutura metalográfica do material novo para as amostras cicladas.

Os ensaios metalográficos mostram um crescimento de grão em praticamente todas as amostras. Em geral o crescimento foi mais acentuado na superfície das amostras ao invés do centro. Na Figura 11 é mostrada a metalografia da superfície do material ciclado, respectivamente em um forno Lee Wilson (A) e em um forno Bleif (B), em que se ilustra o crescimento de grão do material, mas sem precipitação de carbonetos no contorno de grão nessas amostras.

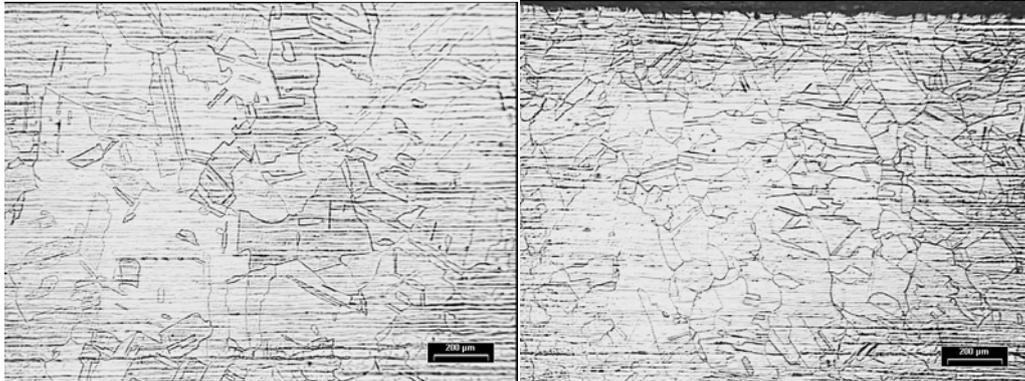


Figura 11: (A) Metalografia de uma amostra ciclada no forno Lee Wilson. (B) Metalografia de uma amostra ciclada no forno Bleif.

A precipitação de carbonetos nos contornos de grãos austeníticos ocorreu em apenas duas amostras do forno Lee Wilson. Acredita-se que o tempo de processo imposto nas amostras foi pequeno para caracterizar totalmente o fenômeno de sensitização em todas as amostras, a partir do que se deduz que um tempo maior de processamento deve ser imposto às amostras.

A Figura 12 mostra, em duas ampliações, a precipitação de carbonetos nos contornos de grão do material.

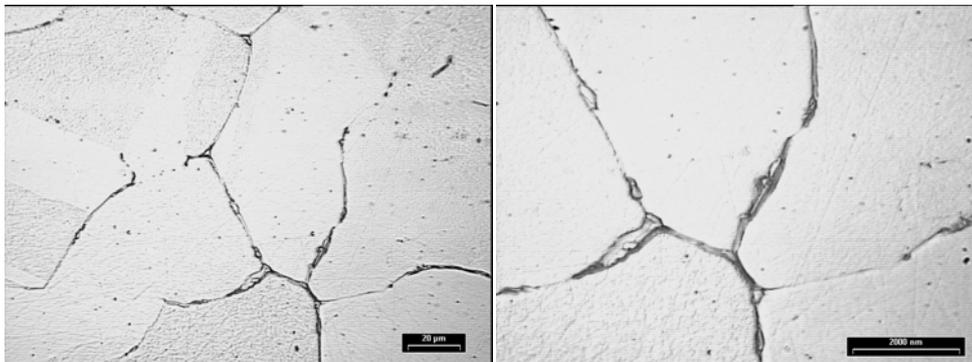


Figura 12: Precipitação de carbonetos nos contornos de grão austenítico do material em amostras cicladas com o forno Lee Wilson.

A precipitação dos carbonetos de cromo nos contornos de grãos austeníticos do aço inoxidável utilizado nos abafadores e nas amostras cicladas ilustra um fenômeno conhecido como sensitização, a qual impõe uma das corrosões mais prejudiciais para os aços inoxidáveis, que é a corrosão intergranular (corrosão pontual que ocorre quando há um caminho preferencial devido a alterações na composição química ou na microestrutura do material). Há um empobrecimento de cromo nas regiões vizinhas por causa da diferença na velocidade de difusão do cromo e do carbono na austenita, quando o aço é exposto, ainda que por um pequeno tempo, em uma faixa de temperatura que varia de 420°C e 850°C, devido a tratamento

térmico, solda ou resfriamento lento. Os principais tipos de carbonetos que são precipitados têm as seguintes fórmulas químicas:  $M_{23}C_6$ , MC,  $M_7C_3$  e  $M_2C$ . Os resultados ensaios small punch para as amostras cicladas são mostrados na Tabela 5.

**Tabela 1:** Ensaio small punch amostras cicladas nos dois tipos de fornos

Amostra	$S_u$	Média
Nova, sem uso	630,0	-
Forno Lee Wilson1	529,0	556,0
	583,0	
Forno Lee Wilson2	640,0	597,0
	554,0	
Forno Bleif, queimadores inferiores1	663,0	607,0
	551,0	
Forno Bleif, queimadores inferiores 2	593,0	593,0
	593,0	
Forno Bleif, queimadores superiores1	643,0	624,0
	605,0	
Forno Bleif, queimadores superiores2	550,0	569,5
	589,0	

O ensaios *small punch* para as amostras cicladas ilustram uma pequena variação no limite de resistência do material ensaiado, entretanto, devido ao pequeno tempo de exposição do material a altas temperaturas, não foi possível estabelecer uma relação inicial do processo de deterioração do material, uma vez que os limites de resistência encontrados estão próximos ao da amostra nova, sem ser ciclada.

## 4 CONCLUSÃO

Como resultado dos estudos realizados pode-se concluir que o processo de deterioração dos abafadores dos fornos de recozimento em caixa é devido, de um lado ao fenômeno de sensitização do aço inoxidável, fenômeno que ocorre quando o aço é exposto a uma faixa de temperatura entre 420°C e 850°C, onde existe a precipitação de carbonetos de cromo, principalmente na forma  $Cr_{23}C_6$  nos contornos de grãos austeníticos do material, a partir disso, o material fica sujeito a fenômenos de corrosão, dentre esses a corrosão intergranular que corrói localmente o metal, deteriorando suas propriedades mecânicas. Por outro lado a carburização do material na zona de queimadores, que contribui para a fragilização dos mesmos devido ao alto volume de carbono e o incremento a susceptibilidade de um ataque por oxidação. Além do crescimento de grão observado, que também auxilia na deterioração do material a partir da perda de resistência.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Ternium Siderar, unidade de San Nicolás, Argentina, na pessoa do seu Gerente Geral da Laminação, Sr. Jorge Von Bergen, pela disponibilização de suas instalações e equipamentos e pela concessão e tutoria do estágio ao Graduando Jorge Luís Coleti, encarregado da coleta de dados que deu origem a esta contribuição. Esta tutoria foi conduzida pelo Eng. Andrés Ernesto Litz, com a participação, do Eng. Leonardo Boccanera. Agradecem, também, ao Departamento de Pesquisa e Educação Continuada da Fundação Gorceix, Ouro Preto, MG, Brasil, por possibilitar a efetiva orientação do Graduando, realizada pelos



demais autores deste trabalho. Agradecem, ainda, ao IAS – Instituto Argentino de Siderurgia, nas pessoas do Eng. Ezequiel Pascuali e Luiz Reda, pelo apoio na realização dos ensaios metalográficos, químicos e *small punch*.

## REFERÊNCIAS

- 1 USIMINAS: Coordenação de Gestão da Laminação a Frio. **Curso de siderurgia básica: laminação a frio**, Belo Horizonte, 2008.
- 2 DOMINGUES, R. P. & ARAUJO, F. G. S. **Processos de Conformação**, IN DEPEC/FG Curso Cadeia Produtiva Usiminas, Ouro Preto, novembro de 2010
- 3 DE DEUS, V. S., AMORIM, E., NATAL, E., RABELO, F. A., REIS, M. O., GUEDES, C. A. **Desenvolvimento de novo controle e gerenciamento para o processo dos fornos de recozimento em caixa N.º 1 da CSN**. Publicado em Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.3, n.3, p. 46-51, jan-mar. 2007, disponível em <http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/811202.pdf>, acesso em: 10/10/2011.
- 4 ARAUJO, A. L. **Manual de Siderurgia**, Volume 2 (Transformação), Editora Arte & Ciência, São Paulo/SP – Brasil, pp. 313-328, 1997.
- 5 AUTILLO J., CONTRERAS M. A., BETEGÓN C., RODRÍGUEZ C., BELZUNCE F.J. **Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento (small punch test) en la caracterización mecánica de aceros**. Anales de Mecánica de la Fractura Vol. I (2006).
- 6 LACALLE R., GARCÍA J., ÁLVAREZ J.A., GUTIÉRREZ-SOLANA F. **Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos**. Anales de Mecánica de La Fractura 26, Vol. 2 (2009).