



AÇOS MICROLIGADOS AO Ti: OPTIMIZAÇÃO DE PRODUTIVIDADE NA LAMINAÇÃO A FRIO DA CSN*

Rodrigo Rocha de Meira¹
 Hugo Shokychi Toshimitsu²
 Marcelo Geraldo Rocha Milagres³
 Augusto Cesar Lacerda de Oliveira⁴
 Luiz Fernando Witte Borges⁵
 Flavia Tereza dos Santos Tolomelli⁶

Resumo

O laminador de tiras a frio nº 3 da CSN apresentava perdas de produtividade ao processar aços de elevada resistência microligados, com limite de escoamento mínimo igual a 340 MPa, dotados de largura superiores a 1400 mm. Devido à crescente demanda do mercado automotivo relativa a esta família de aços, tornou-se necessário um estudo para otimizar a produtividade do equipamento e não desestabilizar o fornecimento aos clientes. O estudo consistiu em testar parâmetros de processo alternativos, objetivando abastecer o laminador de tiras a frio com bobinas laminadas a quente dotadas de resistência mecânica ligeiramente menor, para promover maior estabilidade operacional no equipamento a partir da redução das cargas de laminação. As alterações propostas resultaram no aumento de produtividade do laminador de tiras a frio, sem comprometer as características mecânicas do produto final.

Palavras-chave: Aços de alta resistência; Composição química; Temperatura de bobinamento; Indústria automotiva.

Ti MICROALLOYED STEELS: OPTIMIZATION OF PRODUCTIVITY IN COLD ROLLING CSN

Abstract

The CSN's tandem cold mill presented in recent years, reduced productivity indexes when processing microalloyed high strength steels with minimum yield strength equal to 340 MPa, when the width exceeding 1400 mm. Due to increasing demand from the automotive market on this steels families, it became necessary a study to optimize the equipment productivity and not disrupt supplies to customers. The study was to test alternative process parameters, aiming to supply the tandem cold mill with hot rolled coils endowed with slightly lower mechanical resistance, to promote greater stability in equipment operation through the reduction of rolling loads. The proposed changes increased the tandem cold mill productivity, without compromising the mechanical properties of the final product.

Keywords: High strength steels; Chemical composition; Coiling temperature; Automotive industry.

¹ Engenheiro Metalúrgico, MSc., CQE., Engenheiro de Processos de Laminação da CSN.

² Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Redução a Frio da CSN;

³ Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Processos de Laminação da CSN;

⁴ Engenheiro Metalúrgico, DSc., Engenheiro de Desenvolvimento de Produtos da CSN.

⁵ Técnico de Desenvolvimento Especialista de Redução a Frio da CSN.

⁶ Engenheiro Metalúrgico, MSc., Engenheiro de Desenvolvimento de Produtos da CSN.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Guaçu, PR, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva, não só pelo elevado volume consumido, mas também pelo constante aprimoramento da sua matéria prima em relação aos requisitos de segurança veicular e proteção ambiental, é uma das principais consumidoras de aços planos. Isto resulta no desenvolvimento de inovações de processos e de produtos de maior valor agregado por parte das indústrias siderúrgicas.

No início da década de 1990 foi criado o projeto *Ultra Light Steel Autobody* (ULSAB), que intensificou o desenvolvimento de aços de elevada resistência destinados à fabricação de carrocerias automotivas mais leves e de maior segurança veicular. Dentre as diversas alternativas para a aplicação citada, destacam-se os aços da família *High Strength Low Alloy* (HSLA). Estes aços são dotados de propriedades mecânicas adequadas (limite de escoamento entre 250 e 650 MPa) [1] para a aplicação em peças estruturais de carrocerias automotivas, o que permite a redução de massa por meio da redução de espessura.

Para se obter os requisitos de propriedades mecânicas exigidos para o aço em questão, é necessária a presença de pequenos percentuais de nióbio (Nb), vanádio (V) e/ou titânio (Ti) [2] na sua composição química. Neste caso, a resistência mecânica do produto laminado a frio é obtida pelo refinamento mais acentuado da sua microestrutura, associado ao mecanismo de precipitação de carbeto e/ou carbonitretos formados pelos elementos acima citados. As adições de fósforo (P), manganês (Mn) e/ou silício (Si) [3] contribuem também para o aumento da resistência mecânica.

A CSN fornece regularmente aços da família HSLA340 (limite de escoamento mínimo igual a 340 MPa) para o segmento automotivo, e percebe o contante crescimento da quantidade destes aços demandada pelos clientes automotivos. No processamento de bobinas com larguras acima de 1400 mm e espessuras abaixo de 0,80 mm, notava-se a elevação de cargas na primeira cadeira do laminador a frio e a considerável queda de produtividade do equipamento, em relação ao processamento de outros aços com dimensão similar.

Devido à crescente demanda do mercado automotivo relativa a esta família de aços, tornou-se necessário um estudo para otimizar a produtividade do equipamento e não desestabilizar o fornecimento aos clientes, que consistiu em testar parâmetros de processo alternativos para promover maior estabilidade operacional no equipamento a partir da redução das cargas de laminação, nas dimensões do material acima citadas. Os parâmetros testados foram: temperatura de bobinamento da laminação a quente, diâmetro de trabalho da cadeira 1 do laminador a frio e a composição química do aço.

2 MATERIAIS E MÉTODOS [4,5]

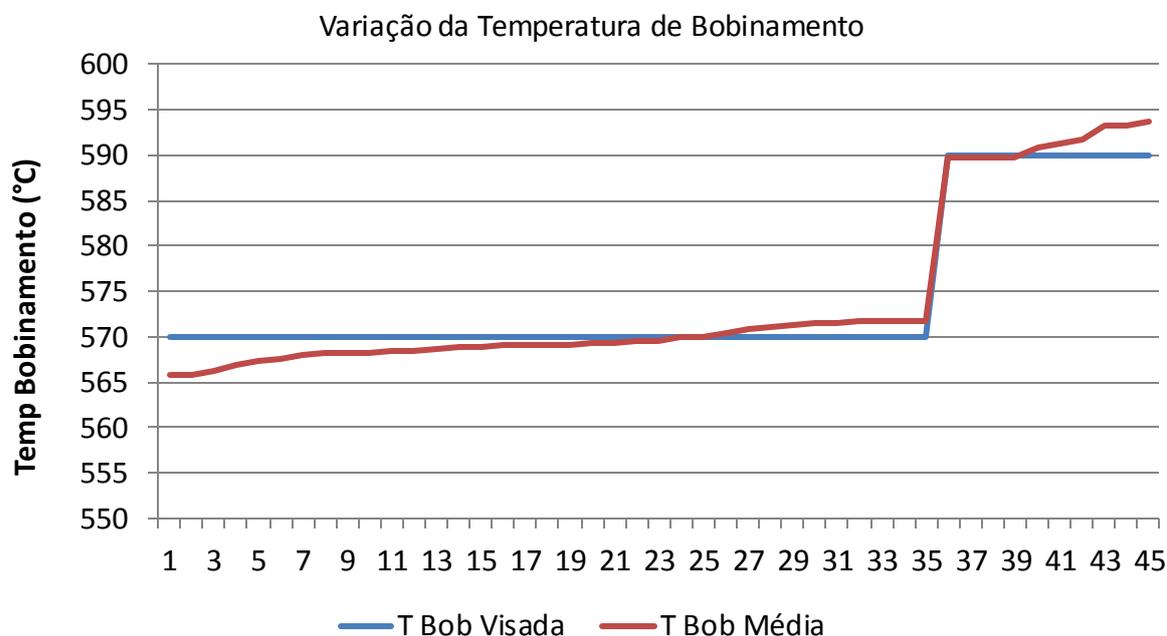
Para obter maior produtividade do laminador a frio, primeiramente foi testado o parâmetro temperatura de bobinamento na laminação a quente (TB) utilizando-se bobinas cuja composição química está discriminada na tabela 1, grupo 1, que é a utilizada regularmente na produção do aço em estudo.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Guaçu, PR, Brasil.


Tabela 1. Composição química dos aços estudados

	GRUPO 1	GRUPO 2
	MÁX.	MÁX.
%C	0,080	0,070
%Mn	0,700	0,650
%P	0,025	0,020
%S	0,015	0,010
%Ti	0,040	0,037

Trinta e cinco bobinas a quente (BQs) foram bobinadas à temperatura visada de 570°C e dez bobinas foram laminadas à temperatura visada de 590°C, e o efeito nas cargas de laminação médias das cinco cadeiras foi verificado posteriormente. A figura 1 descreve a variação da TB.


Figura 1. Variação da temperatura de bobinamento em BQs.

Em relação ao diâmetro dos cilindros de trabalho, foram processadas 1810 t de bobinas a quente do grupo 1, utilizando-se as medidas 517, 539, 550, 551 e 557 mm no diâmetro dos cilindros de trabalho da cadeira 1 do laminador a frio. O efeito do diâmetro de cilindros foi avaliado conforme a carga de laminação observada na cadeira 1. Os demais parâmetros de processo não foram alterados.

Para se estudar o efeito da composição química, foram processadas 1280 t do aço em estudo utilizando-se as composições químicas dos grupos 1 e 2 da tabela 1, destinadas à produção de bobinas a frio galvanizadas. Com o objetivo de reduzir a resistência mecânica das BQs, foi proposta a composição química do grupo 2 com base em simulações a partir de um modelamento matemático preditivo de propriedades mecânicas, utilizando-se as variáveis de entrada composição química, espessura do esboço laminado a quente e as temperaturas de acabamento e bobinamento. Este modelo matemático forneceu a predição de um limite de

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



escoamento de BQ 15% menor em relação à utilização da composição química do grupo 2.

Os demais parâmetros de processo não foram alterados. O efeito da variação da composição química foi avaliado conforme as cargas de laminação nas cinco cadeiras do laminador a frio e também conforme as propriedades mecânicas da BQ e do produto final.

O fluxo de produção do material estudado está detalhado na figura 2.

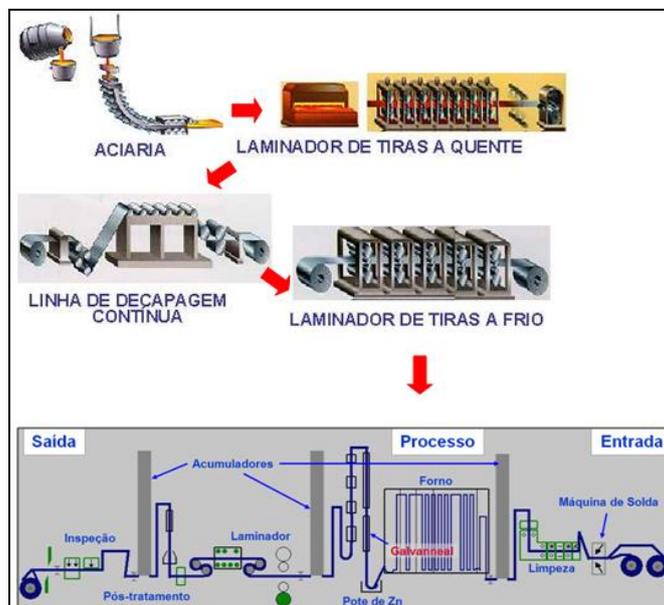


Figura 2. Fluxo de produção das bobinas galvanizadas por imersão a quente na CSN.

Conforme figura 2, o aço líquido proveniente do convertedor LD é lingotado continuamente, laminado a quente em um laminador de sete cadeiras, processado em uma linha de decapagem contínua para retirada de óxido de ferro da laminação a quente e laminado a frio em laminador de cinco cadeiras. Em seguida as bobinas laminadas a frio foram recozidas e galvanizadas por imersão a quente na linha de galvanização.

Os aços da família HSLA340 nas dimensões acima citadas são produzidos regularmente na CSN com a composição química discriminada no grupo 1. A partir da necessidade do laminador de tiras a frio em aumentar a produtividade no processamento deste aço, foi proposta a composição química do grupo 2, caracterizada pelo “descarregamento” dos elementos Mn, P, S e Ti, e pela maior descaburação, com o objetivo de se produzir uma liga que promovesse menores cargas de laminação, resultando em ganho de produtividade.

Os parâmetros de processo na galvanização por imersão a quente não foram alterados.

Todos os testes já descritos consistiram em avaliar os efeitos das variações dos parâmetros citados nas cargas de laminação do laminador a frio e nas propriedades mecânicas da BQ e do produto final, por meio de análise de variância e estatística descritiva. A medição das cargas de laminação foi feita de modo automático no laminador de tiras a frio e as propriedades mecânicas foram medidas nas máquinas INSTRON 33R4484 (produto final) e EMIC DL30000.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito da Temperatura de Bobinamento

Conforme a variação da TB descrita na figura 2, a figura 3 discrimina o efeito deste parâmetro na carga de laminação do laminador a frio.

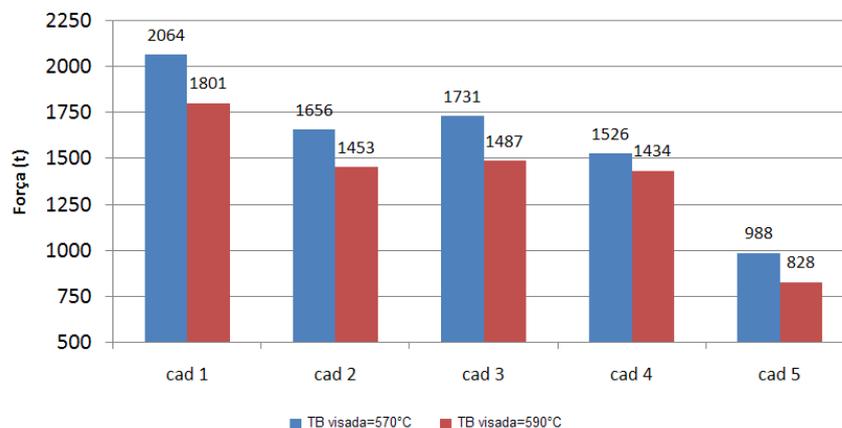


Figura 3. Efeito da variação da TB nas cargas de laminação médias do laminador a frio.

Nota-se na figura 3 uma redução das cargas de laminação das cinco cadeiras do laminador. Teoricamente, o material processado com maior temperatura de bobinamento possui maior deformabilidade, em decorrência do coalescimento acentuado dos precipitados de titânio presentes na matriz ferrítica. Apesar da redução das cargas de laminação em todas as cadeiras, não foi observado o esperado aumento de produtividade do laminador a frio. Todas as BQs foram provenientes do grupo 1.

3.2 Efeito do Diâmetro dos Cilindros de Trabalho da Cadeira 1

A figura 4 mostra o efeito da variação do raio dos cilindros de trabalho (R) nas cargas de laminação da cadeira 1, utilizando-se duas espessuras de BQ: 2,70 e 2,81 mm. Para as duas espessuras de BQ testadas, notam-se menores valores de carga na utilização de menores valores de R. Isto porque, quanto menor R, menor é a área de contato entre o cilindro e a chapa, resultando em menores esforços de laminação por parte do laminador, conforme equação 1 [6].

$$P/w = S\sqrt{R\Delta h} \quad (1)$$

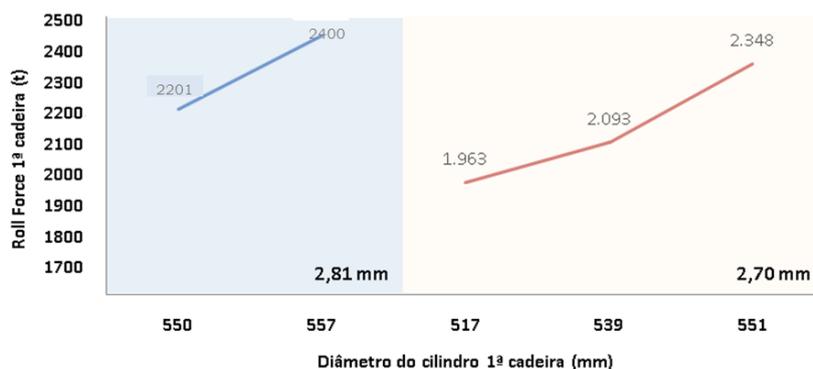


Figura 4. Efeito da variação de R nas cargas de laminação médias do laminador a frio.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



Onde a razão P/w é carga de laminação por unidade de largura da chapa, S a tensão média de escoamento do material no estado plano de deformação e Δh a diferença entre as espessuras final e inicial da chapa laminada.

Uma vez que os maiores esforços de laminação são observados na cadeira 1, os cilindros de menor diâmetro foram testados somente nesta cadeira. Apesar da redução de cargas observada na primeira cadeira, o esperado aumento de produtividade não pôde ser observado, principalmente pela pequena disponibilidade de pares de cilindro com menor R . Neste caso, seria necessária uma adequação desta disponibilidade ao programa de produção do laminador, o que nem sempre é possível.

3.3 Efeito da Composição Química

Após a ocorrência dos fenômenos de precipitação na composição química do grupo 2, a situação de cada elemento em solução após os efeitos das combinações com Ti e Al são:

- Todo o N é consumido na precipitação de TiN .
- O S é consumido parcialmente para se formar o precipitado TiS .
- Apenas 14 ppm de C são consumidos na formação do precipitado TiC .

Conforme a literatura consultada, TiN e TiS são precipitados com diâmetro médio consideravelmente maior que o do TiC , o que resulta em modesta contribuição para o mecanismo de endurecimento por precipitação. Presume-se que o endurecimento que ocorre no aço em estudo pode ser creditado às presenças de C , Mn , P e S em solução sólida, além do endurecimento por precipitação de TiC .

A tabela 2 representa uma análise comparativa entre as propriedades mecânicas das BQs provenientes dos grupos 1 e 2 (cp base 80 mm, direção transversal).

Tabela 2. Propriedades mecânicas de BQ referentes aos grupos 1 e 2.

	Grupo 1			Grupo 2		
	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
	439	529	23	382	516	27
	453	532	25	426	520	24
média	446	531	24	404	518	26
dp	10	2	1	31	3	2

De acordo com os resultados acima, nota-se maior média de LE e LR do grupo 1 em relação ao grupo 2, bem como menor média de AL do grupo 1 em relação ao grupo 2. Tais resultados estão conforme o esperado, visto que a composição química do grupo 2 é menos “carregada” em relação ao grupo 1. A figura 5 mostra a microestrutura das BQs referentes a cada grupo. Não foi observada a diferença entre os tamanhos de grão ferríticos.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

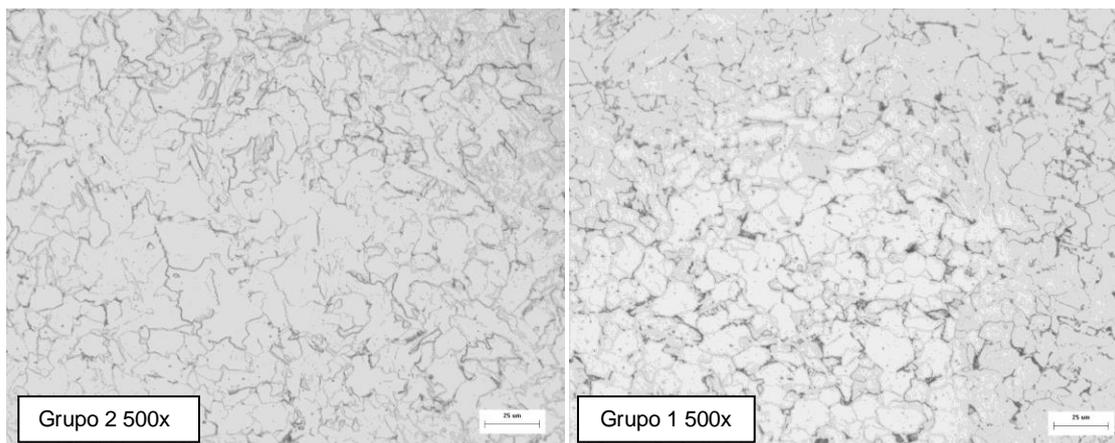


Figura 5. Microestrutura de BQ dos aços estudados.

A figura 6 mostra o efeito da composição química nas cargas de laminação das cinco cadeiras do laminador a frio.

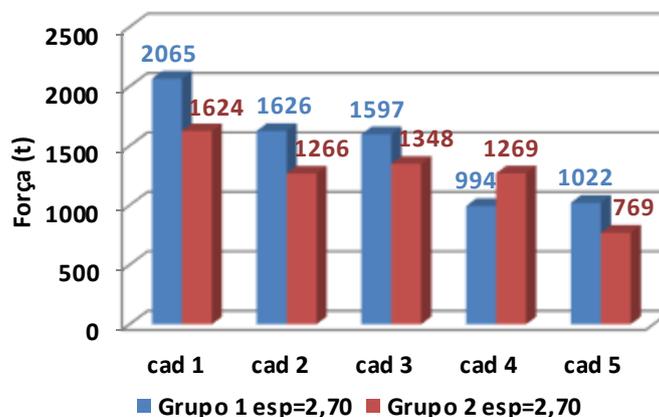


Figura 6. Efeito da composição química nas cargas de laminação médias do laminador a frio.

Nota-se na figura 6 que as cargas de laminação obtidas no material do grupo 2 foram menores que as relativas ao grupo 1, exceto na cadeira 4, onde o modelo matemático do laminador necessitará de pequenos ajustes, pois a carga obtida não condiz com o resultado esperado.

Considerando o que foi mostrado na tabela 3 e na figura 5, pode-se inferir que o aço do grupo 2 possui menor resistência mecânica que o aço do grupo 1. Estes resultados traduzem condições operacionais mais confortáveis no processamento do aço do grupo 2, dando ao equipamento melhores oportunidades de melhoria de produtividade, conforme a figura 7.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

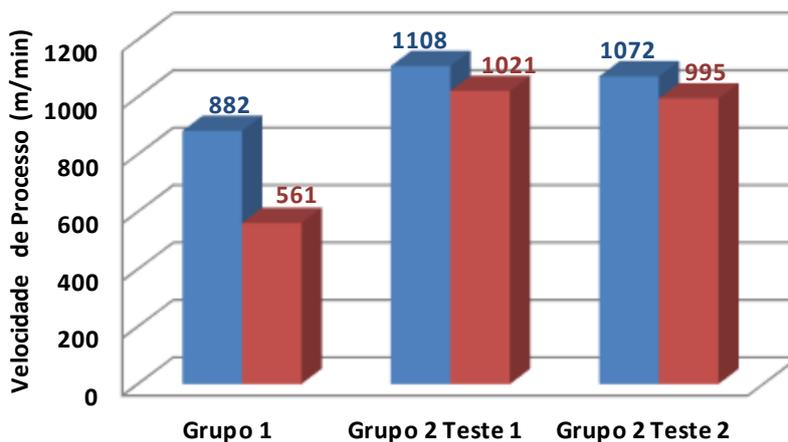


Figura 7. Efeito da composição química na produtividade do laminador a frio.

Nota-se um incremento médio de 90% na velocidade de processo do laminador, indicando expressivo ganho de produtividade ao se processar o aço proveniente da composição química do grupo 2.

Na figura 8 é mostrada uma análise de variância – 1 fator, que compara os resultados das propriedades mecânicas LE, LR e AL do produto final, proveniente dos grupos 1 ou 2.

Anova: LE

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
LE Grupo 1	34	12512	368	384
LE Grupo 2	22	7822	356	175

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2072	1	2072	7	0,011551738	4
Dentro dos grupos	16365	54	303			
Total	18437	55				

Anova: LR

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
LR Grupo 1	34	15433	454	754
LR Grupo 2	22	9528	433	328

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5790	1	5790	10	0,002760508	4
Dentro dos grupos	31769	54	588			
Total	37559	55				

Anova: AL

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
AL Grupo 1 (b 80)	34	855	25	15
AL Grupo 2 (b 80)	22	615	28	13

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	105	1	105	7	0,008961787	4
Dentro dos grupos	773	54	14			
Total	879	55				

Figura 8. Efeito da composição química nas propriedades mecânicas do produto final.

A partir dos resultados da figura 8, pode-se afirmar que os produtos provenientes dos grupos 1 e 2 possuem propriedades mecânicas de produto diferentes entre si, mesmo atendendo os requisitos das principais normas automotivas dos aços da família HSLA340. Os produtos do grupo 2 possuem características mecânicas que indicam maior conformabilidade em relação ao grupo 1.

4 CONCLUSÃO

A alteração da temperatura de bobinamento foi eficaz na redução de cargas do laminador a frio, no entanto não se caracterizou como fator decisivo para o aumento de produtividade deste equipamento.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



O uso de menores diâmetros de cilindro de trabalho indicou uma redução de cargas de laminação na primeira cadeira, porém o esperado aumento de produtividade não pôde ser observado, principalmente pela pequena disponibilidade de pares de cilindro com menor diâmetro. Além disso, é inviável para o programa de produção conciliar o processamento do aço em estudo com a utilização de cilindros de menor diâmetro.

A alteração da composição química foi o fator que resultou no aumento da produtividade do laminador. A composição química menos carregada em relação aos elementos C, Mn, Ti, P e S contribuiu consideravelmente para o maior conforto operacional do laminador, ao processar BQs dotadas de propriedades mecânicas mais propícias à conformabilidade. Houve um considerável incremento na velocidade de processo do equipamento, em torno de 90%, superando as expectativas no início do estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 ULSAB – AVC Advanced High Strength Steel Application Guidelines. International Iron and Steel Institute. Committee on Automobile Applications. March 2005.
- 2 Panigrahi BK. Processing of Low Carbon Steel Plate and Hot Strip – an Overview. Bull. Mater.Sci, 2001; 24(4): 361-371.
- 3 Pradhan R. High Strength/High Yield-Ratio Cold Rolled Steels Produced by Continuous Annealing. Scandinavian journal Metallurgy, 1984; 13(5): 298-307.
- 4 Fernandes RCO. Efeito da Temperatura de Encharque no Recozimento Contínuo e das Deformações na Laminação de Encruamento Sobre as Propriedades Mecânicas de um Aço Microligado Laminado a Frio. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 5 Reed-Hill RE. Princípios de Metalurgia Física. 2º Ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara dois, 1982. 776p.
- 6 Helmann H, Cetlin PR. Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais. 1º Ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara dois, 1983. 170p.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.