

dB

IMPLANTAÇÃO DO RESFRIAMENTO FORÇADO INTERMEDIÁRIO NA
LAMINAÇÃO CONTROLADA DE CHAPAS GROSSAS⁽¹⁾

Júlio Márcio Silveira e Silva⁽²⁾
Antonio Augusto Gorni⁽³⁾
Celso Gomes Cavalcanti⁽⁴⁾
Jackson Soares de Souza Reis⁽⁵⁾

RESUMO

A laminação controlada de chapas grossas de aço microligado é uma técnica que possibilitou a obtenção de produtos com alta resistência mecânica a partir de composições químicas relativamente simples. Em contrapartida, este tratamento termomecânico reduz significativamente a produtividade do laminador, em decorrência do período de espera requerido, no qual o esboco esfria desde o fim da etapa de esboçamento até a temperatura adequada para o início da fase de acabamento. O resfriamento forçado intermediário com "spray" de água durante a fase de espera é uma das formas possíveis para se recuperar, ao menos parcialmente, a produtividade do equipamento, sem que sejam afetadas as propriedades do produto. Este trabalho descreve a implantação industrial deste processo na COSIPA e seu efeito positivo na produtividade do laminador.

-
- (1) Trabalho a ser apresentado no Seminário de Laminação da Associação Brasileira de Metais, Belo Horizonte, Novembro de 1991.
- (2) Membro da A.B.M. Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Divisão de Pesquisa e Tecnologia da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.
- (3) Membro da A.B.M. Engenheiro de Materiais, M.Sc., Divisão de Pesquisa e Tecnologia da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.
- (4) Membro da A.B.M. Técnico de Pesquisa, Divisão de Pesquisa e Tecnologia da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.
- (5) Membro da A.B.M. Engenheiro Metalurgista da Divisão de Metalurgia e Qualidade da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA.

- INTRODUÇÃO

A laminação controlada de aços microligados viabilizou a produção comercial de chapas grossas conforme as especificações A.P.I. X-65 e X-70, e até mesmo produtos com graus superiores de resistência e tenacidade. Como é de pleno conhecimento, este processo consiste em se laminar a placa em dois estágios, designados como esbocamento e acabamento, sob condições controladas de temperatura. A fase de esbocamento ocorre sob altas temperaturas, e a recristalização da austenita que ocorre entre os passes de laminação é completa. Já a fase de acabamento somente deve ser iniciada sob temperaturas relativamente baixas, onde a recristalização da austenita é suprimida pela ação dos elementos de micro-liga. Entre essas duas fases deve haver um período de espera para que a laminação se processe sob as condições de temperatura que favoreçam a ocorrência dos fenômenos metalúrgicos desejados.

Este tipo de processo, contudo, reduz significativamente a produtividade do laminador, em decorrência do período de espera em que o esboco esfria desde o fim da etapa de esbocamento até a temperatura adequada para o início da fase de acabamento. Além disso, devido à maior resistência à deformação a quente do material não-recristalizado, a fase de acabamento exige um maior número de passes, o que também aumenta o tempo requerido pelo processo.

Já foram experimentadas diversas alternativas para se minimizar o tempo de espera entre as fases de esbocamento e aca-

bamento. Uma alternativa é o abaixamento da temperatura de reaquecimento da placa, mas isto pode não eliminar totalmente a necessidade de se aplicar esse período de espera⁽¹⁾. A aplicação desta opção pode levar a uma economia de tempo de até 20% na laminação controlada, mas ocorre abaixamento do limite de escoamento do produto. O mesmo ocorre quando se reduz a quantidade total de deformação aplicada no esboco durante a fase de acabamento, que também é uma alternativa para se aumentar a produtividade do processo de laminação controlada. Uma alternativa que não afeta as propriedades do produto é a chamada laminação em "tandem", combinada com o controle das temperaturas de reaquecimento e acabamento⁽²⁾. Na versão mais simples desta opção duas placas são laminadas concomitantemente: durante o período de espera de um esboco processa-se à laminação de esbocamento da placa seguinte. Uma vez terminado esse esbocamento passa-se à fase de espera da segunda placa, enquanto que a primeira passa pela fase de acabamento. Após o acabamento da primeira placa o período de espera da segunda já deve ter terminado, iniciando-se então seu acabamento. Conforme a espessura do material pode-se processar até quatro placas em "tandem".

Tais métodos, contudo, só se tornam econômicos quando aplicados a lotes grandes de um mesmo tipo de produto. Além disso, no caso específico da laminação em "tandem", a otimização do processo somente ocorre quando os tempos de laminação e período de espera são aproximadamente os mesmos, ou seja, na laminação de chapas grossas relativamente leves⁽³⁾.

Finalmente, laminadores que disponham de um sistema de resfriamento em sua saída podem utilizá-lo para promover um resfriamento forçado no esboco intermediário, reduzindo o tempo de espera entre as fases de esbocamento e acabamento^(1,2,4). Os dados de literatura indicam uma redução no tempo total de processo de 25 a 45%^(2,4). Contudo, deve ser evitado um resfriamento muito severo, uma vez que ele poderá provocar um acentuado gradiente de temperatura entre a superfície e o núcleo do esboco. Nestas condições a superfície seria super-resfriada, e após o término do resfriamento ela sofreria recalescência devido ao calor proveniente do núcleo do esboco. Este ciclo térmico pode afetar a temperatura de formação da ferrita e provocar precipitação excessiva. Tal precipitação pode levar a alterações significativas nas temperaturas de formação da ferrita e alterar a cinética de recristalização, levando à formação de grãos superficiais deformados e alongados. Essas alterações na microestrutura superficial não alteram de forma significativa as propriedades globais do produto, mas podem levar à formação de tensões internas de tração em sua superfície, podendo comprometer sua qualidade pelo surgimento de trincas⁽³⁾. Em alguns casos foi verificado ainda um ligeiro aumento na temperatura de transição do material. Em outros observou-se a formação de uma microestrutura "coquilhada", ou seja, os grãos superficiais do esboco são muito pequenos em relação aos presentes no seu núcleo. Além disso, há outras complicações operacionais, como a dificuldade no controle da temperatura após o resfriamento forçado e a necessidade de se respeitar um maior tempo de equalização após o resfriamento forçado pa-

ra que a temperatura do esboço atinja o equilíbrio após a recalcência.

Desse modo, um resfriamento forçado intermediário relativamente suave mostrou-se ser uma alternativa adequada para o aumento de produtividade na laminação controlada de chapas grossas, uma vez que neste caso o controle de temperatura é fácil e não há alterações na microestrutura e propriedades mecânicas do produto⁽¹⁾. Isto se torna especialmente válido no caso da laminação de lotes de pequena tonelagem, onde a aplicação da laminação em "tandem" pode ser anti-econômica⁽²⁾.

O desenvolvimento do sistema de resfriamento forçado intermediário na COSIPA é um bom exemplo de como a filosofia de Pesquisa e Desenvolvimento pode ser eficazmente aplicada para se conseguir otimizar o processo produtivo sem comprometer a qualidade do produto.

Este projeto se iniciou através do desenvolvimento de uma Dissertação de Mestrado, que incluiu como trabalho experimental a simulação da laminação controlada incluindo resfriamento forçado intermediário em escala laboratorial, usando um aço microligado da COSIPA próprio para produção de material A.P.I. 5LB/X-52⁽⁵⁾. O objetivo desta primeira abordagem era verificar se este processo era viável, qual a economia de tempo que seria possível na laminação controlada e quais as possíveis influências na microestrutura e propriedades mecânicas do produto. Os resultados obtidos indicaram ser possível uma redução no tempo de processamento de até 50% e, dentro das taxas de resfriamento utilizadas - 1,0 a 5,0°C/s - nenhuma deterioração na microestrutura e proprie-

dades mecânicas do produto. Não foi verificada ainda nenhuma alteração especial na microestrutura superficial do produto.

Numa segunda etapa procedeu-se à recuperação do sistema de resfriamento já existente na saída do Laminador de Chapas Grossas da COSIPA, cujas características podem ser vistas na tabela I. Assim que essa instalação se tornou operacional foi efetuada uma aferição visando determinar sua capacidade de resfriamento em função da pressão e vazão de água utilizadas, bem como espessura de chapa. Subsequentemente foram efetuados testes em escala produtiva, visando determinar a viabilidade do processo, a possibilidade de um real ganho de produtividade e determinar, numa primeira aproximação, os parâmetros de processo a serem usados⁽⁶⁾. Foram estudados dois tipos de aço: ao Cr e ao Cr-Nb. Os resultados mostraram que a utilização do resfriamento forçado intermediário permitiu uma redução no tempo de processamento da laminação controlada de até 40%. Não foram observadas alterações significativas na microestrutura e propriedades mecânicas em virtude da adoção deste novo processo. O nível de aplainamento e os valores de carga de laminação também foram semelhantes aos observados utilizando-se o resfriamento intermediário convencional ao ar.

Decidiu-se então implementar esta alteração no processo de forma definitiva. Para tanto foi desenvolvido um novo projeto, com o objetivo de se especificar os parâmetros de processo do resfriamento forçado intermediário e verificar, sob reais condições operacionais, a economia do tempo e processo na laminação controlada.

Comprimento:	11,5 m
Largura:	4,0 m
Número de Coletores:	
- Superior:	8
- Inferior:	16
Número de Bicos:	
- Superior:	72
- Inferior:	362
Forma do Spray:	Lenticular
Vazão Máxima a 3 kgf/mm ² :	10.000 l/min

Tabela I: Características do Sistema de Resfriamento da Laminação de Chapas Grossas da COSIPA.

- DESENVOLVIMENTO

O objetivo deste projeto foi estabelecer, a partir das dimensões do esboço e suas condições de laminação, sob quais parâmetros operacionais o sistema de resfriamento deveria trabalhar, ou seja, qual a vazão, pressão e velocidade de mesa deveriam ser utilizadas para cada tipo de laminado, de modo a garantir redução máxima no tempo de processo da laminação controlada, mas sempre atendendo aos parâmetros estabelecidos nas normas operacionais.

O material selecionado para os estudos de implantação do novo processo foi para aplicação naval, microligado e submetido à laminação controlada.

Os principais parâmetros que tem de ser considerados na determinação dos parâmetros de processo do resfriamento forçado intermediário são:

- Esboco:
 - . temperatura inicial e final de resfriamento;
 - . espessura e largura.
- Sistema de Resfriamento:
 - . vazão e pressão dos "sprays";
 - . velocidade com que o esboco passa pela mesa.

Experiências preliminares indicaram que a alteração da vazão do sistema de resfriamento de um esboco a outro não é recomendável, pois a normalização da vazão após a mudança é muito lenta, o que poderia vir a comprometer a consistência do resfriamento do esboco. Logo, optou-se por manter a vazão de água e pressão dos "sprays" constante.

Ficou estabelecido que as condições de resfriamento seriam definidas a partir das dimensões do esboco, em termos da largura e espessura do produto final, que apresentam relação direta com as dimensões do esboco intermediário. A partir desses dados, as condições de resfriamento seriam definidas através do número de passagens do esboco pelo sistema de resfriamento e sua velocidade.

Ensaio preliminares mostraram que, em certos esbocos mais leves, a utilização do sistema de resfriamento, ainda que sob grande velocidade de mesa, promoveria resfriamento excessivo. Logo, decidiu-se nestes casos utilizar-se apenas a descamação do

próprio Laminador de Chapas Grossas para promover o resfriamento forçado intermediário.

A determinação dos diversos esquemas de resfriamento em função das dimensões dos esbocos foi feita a partir da experiência anterior acumulada^(6,7). Para uma dada espessura e largura de chapa era aplicada inicialmente uma condição branda de resfriamento, ou seja, uma passagem no sistema de resfriamento sob alta velocidade. Se fosse verificada a necessidade de um resfriamento mais intenso essa velocidade era diminuída e/ou o número de passagens pelo sistema de resfriamento era aumentado, tomando-se sempre cuidado para que a temperatura do esboco após o esquema de resfriamento não caísse abaixo da temperatura mínima para o início a fase de acabamento.

Uma vez definida a estratégia de implantação do processo deu-se início à fase de coleta de dados na área. Foram acompanhados 205 esbocos de material para aplicação naval, no Laminador de Chapas Grossas, submetidos ou não ao resfriamento forçado intermediário. Foram registrados os seguintes dados nestes levantamentos:

- número de laminação;
- dimensões do produto;
- temperatura inicial de laminação;
- tempo decorrido na laminação de esbocamento;
- espessura do esboco;
- tempo decorrido na espera;
- vazão, velocidade de mesa e número e vezes que o esboco passou no sistema de resfriamento ou pela descamação, no caso de ter sido aplicado o resfriamento forçado intermediário;
- temperatura de início de acabamento;
- tempo decorrido na laminação de acabamento;
- temperatura de acabamento;

- tempo total de laminação.

Uma vez que trabalhos anteriores demonstraram que a implantação deste processo não altera significativamente as propriedades mecânicas do produto^(5,6) não se procurou efetuar um levantamento sistemático das propriedades mecânicas dos produtos oriundos dos esboços estudados. Procurou-se, contudo, levantar as propriedades mecânicas do material sempre que uma placa-mãe era laminada através do novo processo, ocasião em que elas eram determinadas de acordo com a rotina de liberação do produto.

- RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos foram determinadas as condições de resfriamento intermediário forçado do esboço em função da espessura e largura do produto final, as quais podem ser vistas na tabela II. Optou-se ainda por utilizar-se o resfriamento intermediário forçado apenas nas placas laminadas de forma isolada e não nas laminadas em "tandem". Esta tabela reflete as condições de resfriamento mais intensas passíveis de serem aplicadas à cada condição, de forma a maximizar o ganho e produtividade na laminação controlada, mas sem que a temperatura de início da fase de acabamento seja abaixada além do que é especificado pelas normas operacionais.

Largura (mm)	Espessura (mm)			
	$\leq 12,7$	$12,70 < e \leq 18,0$	$18,0 < e \leq 25,4$	$e > 25,4$
$l \leq 2000$	Desc, 3X	V1, 1X	V1, 2X	V1, 2X
$l > 2000$ ≤ 2700	Desc, 3X	V2, 2X	V1, 1X	V1, 2X
$l > 2700$	Desc, 2X	V2, 1X	V2, 1X	V1, 1X

Tabela II: Condições de Resfriamento Forçado Intermediário determinadas por este Trabalho. "Desc" indica uso exclusivo da descamação. V1 e V2 correspondem, respectivamente, a um ou dois pontos na manete de velocidades do sistema de resfriamento. 1X = uma passagem do esboco; 2X = duas passagens; 3X = três passagens.

Caso a temperatura de fim de esbocamento seja menor que um determinado limite o sistema de resfriamento não deve ser utilizado, pois neste caso o tempo total de resfriamento - incluindo o deslocamento até o sistema de resfriamento e o retorno até o laminador - será excessivo e a temperatura de início de acabamento poderá ficar abaixo do mínimo especificado pelas normas operacionais.

A partir dos resultados obtidos foi determinada a redução no tempo de espera, conforme se pode observar na tabela III. A figura 1 permite verificar ainda que a redução no tempo de processamento foi maior para os produtos com até 18 mm de espes-

sura. Isto pode indicar que os parâmetros do resfriamento intermediário forçado talvez ainda possam ser otimizados para o material mais pesado. Contudo, a aplicação de um resfriamento mais intenso neste caso somente pode ser aplicado desde que haja consistência nas condições de encharque da placa para que não ocorram problemas quanto a um eventual super-resfriamento do esboco. A figura 2 permite observar o aumento na taxa de resfriamento dos esbocos proporcionado pelo resfriamento intermediário.

O teste de hipóteses por Student⁽⁸⁾ comprovou a ação do resfriamento intermediário forçado na redução do tempo de laminação, exceto em dois casos, onde o número de esbocos acompanhados foi pequeno para se confirmar os resultados positivos que foram obtidos. Além disso, este teste permite confirmar que a economia de tempo para espessuras abaixo de 18,00 mm e larguras entre 2000 e 2700 mm é bastante acentuada em relação às demais.

Apesar de não ter sido montado um acompanhamento formal das propriedades mecânicas, não houve nenhum registro de material processado no resfriamento forçado intermediário que tenha sido desviado por essa causa. De fato, as velocidades de resfriamento obtidas flutuaram entre 0,8 e 1,9°C/s, muito baixas para causar alteração microestrutural acentuada no produto.

Em Janeiro de 1990 foram produzidas 6650 t de chapas grossas para aplicação naval com espessura de 18 mm e largura entre 2000 e 2700 mm através de laminação controlada. O tempo utilizado no processamento deste material foi de 73,9 horas. Caso todas elas fossem processadas através do resfriamento forçado intermediário esse tempo de processamento seria abaixado para 63,3

Largura (mm)	Espessura (mm)			
	$\leq 12,7$	$12,70 < e \leq 18,0$	$18,0 < e \leq 25,4$	$e > 25,4$
1) 2000 (=2700)	Ao ar: 0,85°C/s	Ao ar: 1,00°C/s	Ao ar: 0,80°C/s	Ao ar: 0,75°C/s
	Forçado: 1,70°C/s	Forçado: 1,90°C/s	Forçado: 0,90°C/s	Forçado: 0,95°C/s
	Red =45% Red _t =18%	Red =31% Red _t =12%	Red =16% Red _t =6%	Red =20% Red _t =8%
	t =3,68 t _s =1,72 OK	t =4,77 t _s =1,71 OK	t =2,02 t _s =1,72 OK	t =0,72 t _s =2,35 ?
1) 2700	Ao ar: 1,10°C/s	Ao ar: 0,75°C/s		
	Forçado: 1,60°C/s	Forçado: 1,05°C/s		
	Red =45% Red _t =17%	Red =39% Red _t =16%		
	t =0,04 t _s =1,80 ?	t =4,44 t _s =2,35 OK		

Tabela III: Comparação dos tempos de espera ao ar (convencional) e utilizando resfriamento forçado. Notação: t_c = tempo de espera ao ar, mm:ss, seguido da taxa de resfriamento; t_f = tempo de espera usando resfriamento forçado, mm:ss, seguido da taxa de resfriamento; Red = redução no tempo de espera; Red_t = redução no tempo total da laminação controlada; t = Valor t de Student relativo à diferença dos valores médios do tempo de espera ao ar e sob resfriamento forçado; t_s = Valor t de Student, lido na tabela com 95% de confiança, considerando cada tamanho de amostra; OK = a diferença dos tempos de resfriamento é significativa.

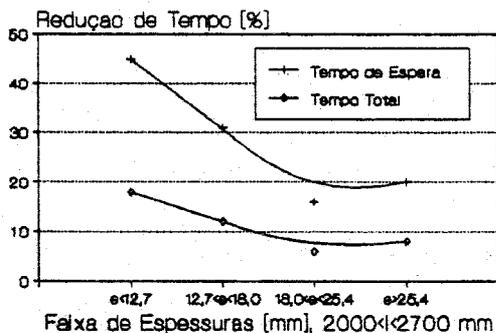


Figura 1: Redução do Tempo de Espera e Tempo Total através da utilização do sistema de resfriamento forçado de acordo com as condições expostas na Tabela I.

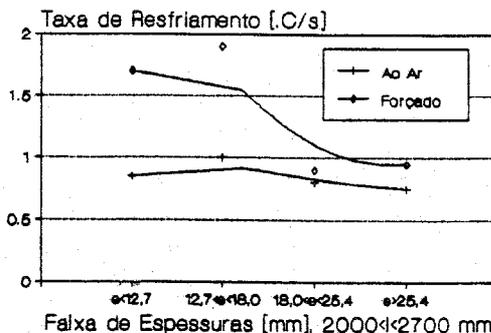


Figura 2: Taxas de Resfriamento obtidas com e sem utilização do resfriamento forçado intermediário, conforme as condições expostas na Tabela I.

horas, o que resultaria num ganho de 10,6 horas. Se esse tempo economizado fosse utilizado para processar mais material para aplicação naval poderiam ser produzidas 1113 t adicionais que, a

um custo médio de US\$ 400/t, significariam um aumento de faturamento mensal de US\$ 445.000, sem que houvesse nenhum investimento em instalações físicas ou aumento do custo do processo. Este aumento hipotético de produção pode ser visto graficamente na figura 3.

O aumento de produtividade calculado teoricamente acima foi confirmado na prática conforme os dados coletados nos registros da área em termos de tonelagem/hora. A utilização do resfriamento forçado intermediário provocou o aumento do índice de produtividade real em 26%, para produtos para aplicação naval, espessura menor que 18 mm e larguras entre 2000 e 2700 mm.

- CONCLUSÕES

De acordo com os acompanhamentos efetuados, a implantação do resfriamento acelerado intermediário forçado levou a uma redução de até 40% em relação ao tempo de espera convencional, ao ar, utilizado na laminação controlada de chapas grossas. Isto resultou numa redução de 17% no tempo global do processo, elevando a produtividade do Laminador de Chapas Grossas em 26% durante a aplicação da laminação controlada. Este aumento de produtividade pode levar, dentro das condições atuais do "mix" de produtos da COSIPA, a um aumento de produção de 1113 t do material para aplicação naval processado por laminação controlada, o que corresponderia a um aumento de faturamento da ordem de US\$ 445.000,

desde que houvessem pedidos adicionais desse material à COSIPA.

Durante a fase de implantação não houve nenhuma reclamação sobre as propriedades mecânicas nos produtos obtidos dos esboços submetidos ao resfriamento intermediário forçado.

Observa-se desse modo que o resfriamento forçado intermediário implantado na COSIPA constitui um refino do processo de laminação controlada, permitindo aumento de produtividade do laminador sem afetar a qualidade do produto.

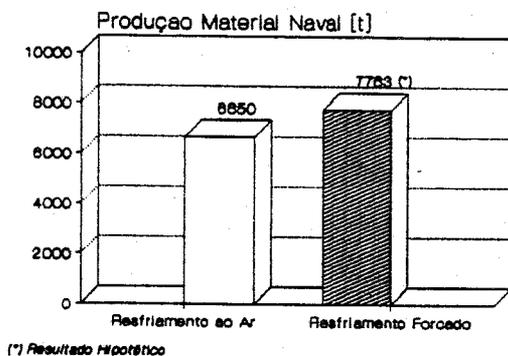


Figura 3: Um exemplo do possível aumento da produtividade do processo de Laminação de Chapas Grossas proporcionado pelo Resfriamento Forçado Intermediário. Estes dados se referem a material processado por laminação controlada, para aplicação naval, com espessura menor ou igual a 18 mm e largura entre 2000 e 2700 mm, processado em janeiro de 1990.

- BIBLIOGRAFIA

- 1) FEGREDDO, D.M. Hold Period Accelerated Cooling Experiments on Nb- and Ti-HSLA Steels. Metals Technology, Sept. 1977, 417-424.
- 2) HEEDMAN, P.J. Controlled Rolling of Plates with Forced-Water Cooling during Rolling. Metals Technology, Sept. 1981, 352-360.
- 3) LEDERER, A. Influence of Thermomechanical Rolling of HSLA Steel Plates on Mill Production and Design. In: HSLA STEELS '85. Proceedings. American Society for Metals, Materials Park, 1985, 507-516.
- 4) ABRAMS, H. Accelerated Spray Cooling to a Reduced Intermediate Temperature for Controlled Rolling. Iron & Steelmaker, Dec. 1984, 11-17.
- 5) SILVA, J.M.S. Estudo sobre a Utilização de Resfriamento Intermediário na Laminação de um Aço Microaligado com Nb. Dissertação de Mestrado, U.F.M.G., 1987. 171 p.
- 6) SILVA, J.M.S. Utilização do Resfriamento Forçado Intermediário na Laminação de Chapas Grossas da Cosipa. In: 44º CONGRESSO ANUAL DA A.B.M. Anais. Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1989.
- 7) BOCCALINI, M. Desenvolvimento do Resfriamento Controlado de Chapas Grossas da Cosipa. In: VI SIMPÓSIO INTERNO DE LAMINAÇÃO. COSIPA, Maio 1983.
- 8) SPIEGEL, M.R. Estatística. Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, São Paulo, 1976. 580 p.