OPTIMIZATION OF PLATE CONTROLLED ROLLING THROUGH RE-DISTRIBUTION OF TOTAL STRAIN BETWEEN ROUGHING AND FINI-SHING STAGES

Antonio Augusto Gorni [1]
José Herbert Dolabela da Silveira [2]
Jackson Soares de Souza Reis [3]
Marco Antonio Nogueira Alves [4]

ABSTRACT

The need of an intermediate cooling phase between the roughing and finishing phases of controlled rolling is a very adverse factor to plate mill productivity.

In this paper it was analysed the feasibility of increasing productivity through the use of a thicker intermediate plate during the cooling phase, keeping obviously the same final plate thickness. This process modification led to a significant increase in the total rolling time of a single slab.

However, the greater intermediate cooling time associated with shorter intermediate plates eased the execution of tandem rolling. In fact, plate mill trials and theoretical calculations showed that an increase of the ratio between intermediate plate thickness and final thickness from two to three enhanced plate mill productivity. In this case, the exclusive use of tandem rolling with a maximum number of slabs being simultaneously processed is fundamental to achieve the productivity increase.

Finally, it was verified, under routine conditions, that the use of thicker intermediate plates, from two to three times the final plate thickness, led to a global productivity increase during controlled rolling of 21%, that is, an elevation of plate mill output from 87 to 105 t/h.

Keywords: Shipbuilding plate steels; controlled rolling; productivity

(1) Materials Engineer, M. Eng., Dr..Eng., Process Analyst, Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP, Brazil. E-Mail: gorni@cosipa.com.br.
(2) Metallurgical Engineer, M. Eng., M.B.A., Chief of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP, Brazil.
(3) Metallurgical Engineer, A.S.Q.C. Quality Engineer, Chief of the Cold Rolling Division, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP, Brazil.
(4) Metallurgy Technician, Foreman, Plate Rolling Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP, Brazil.

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DA LAMINAÇÃO

CONTROLADA DE CHAPAS GROSSAS VISANDO MÁXIMA PRODUTIVIDADE

Antonio Augusto Gorni [1]
José Herbert Dolabela da Silveira [2]
Jackson Soares de Souza Reis [3]
Marco Antonio Nogueira Alves [4]

INTRODUÇÃO

A necessidade de se observar um período de espera entre as fases de acabamento e esboçamento na laminação controlada prejudica severamente a produtividade do processo de fabricação de chapas grossas, especialmente quando estas apresentam grande espessura. Por tanto, medidas que venham a minimizar essa perda de produtividade são bem vindas como, por exemplo, o uso de resfriamento forçado na fase de espera e a chamada laminação em *tandem* [1,2]. Este último processo consiste na laminação concomitante de dois ou mais esboços, aproveitando-se o período de espera de um dado esboço para se iniciar e/ou continuar o processamento de outro laminado. Desse modo, a cadeira de laminação fica menos ociosa durante os períodos de espera, aumentando significativamente sua produtividade.

A figura 1 mostra esquematicamente os diversos tipos de laminação em tandem possíveis. Já a tabela I mostra equações para o cálculo, sob condições ideais, dos vários parâmetros temporais associados aos esquemas de laminação em tandem. Essas equações foram deduzidas assumindo-se laminação de esboços com mesmas dimensões e tipo de aço, além da ausência de pausas entre o desenfornamento de placas decorrentes de atrasos ou entraves operacionais.

O número máximo de placas que podem ser laminadas em tandem depende basicamente da diferença entre o tempo de espera e o maior valor entre o tempo de esboçamento ou de acabamento, conforme se pode observar na figura 1. Conforme se pode observar a partir das equações para cálculo do tempo ocioso da cadeira na laminação em tandem, descritas na tabela I, à medida que se aumenta o número de placas laminadas concomitantemente o tempo ocioso da cadeira diminui, ou seja, a produtividade da linha é aumentada. Ou seja, a princípio, o aumento da espessura do esboço na fase de espera pode contribuir para aumentar a produtividade do processo de laminação controlada.

Por outro lado, logicamente a alteração na espessura de espera de um dado produto implica na alteração da distribuição de deformação total entre as fases de esboçamento e acabamento. Quando essa espessura é aumentada ocorre diminuição no grau de deformação aplicado durante o esboçamento, acompanhada do correspondente aumento no grau de deformação aplicado no acabamento. Uma vez que os mecanismos metalúrgicos atuantes nessas duas etapas da laminação são muito diferentes, é necessário considerar as implicações que essas alterações possam vir a ocasionar no processo de laminação e nas características do produto final.

---

(1) Materials Engineer, M. Eng., Dr..Eng., Process Analyst, Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP, Brazil. E-Mail: gorni@cosipa.com.br.
(2) Metallurgical Engineer, M. Eng., M.B.A., Chief of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP, Brazil.
(3) Metallurgical Engineer, A.S.Q.C. Quality Engineer, Chief of the Cold Rolling Division, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP, Brazil.
(4) Metallurgy Technician, Foreman, Plate Rolling Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP, Brazil.

Do ponto de vista do processo, é necessário considerar que o resfriamento de um esboço intermediário mais espesso

durante a fase de espera certamente demandará mais tempo que o normal. Além disso, deve-se lembrar que, durante a fase de acabamento, a austenita não mais se recristaliza entre os passes de laminação, o que provoca significativo aumento na sua resistência à deformação a quente. Logo, o aumento da espessura do esboço na fase de espera aumenta a quantidade de deformação a ser aplicada numa etapa do processo onde ocorrerá progressiva limitação da redução que poderá ser aplicada em cada passe de laminação. Esses dois fatores acarretam perda de produtividade no processo [3].

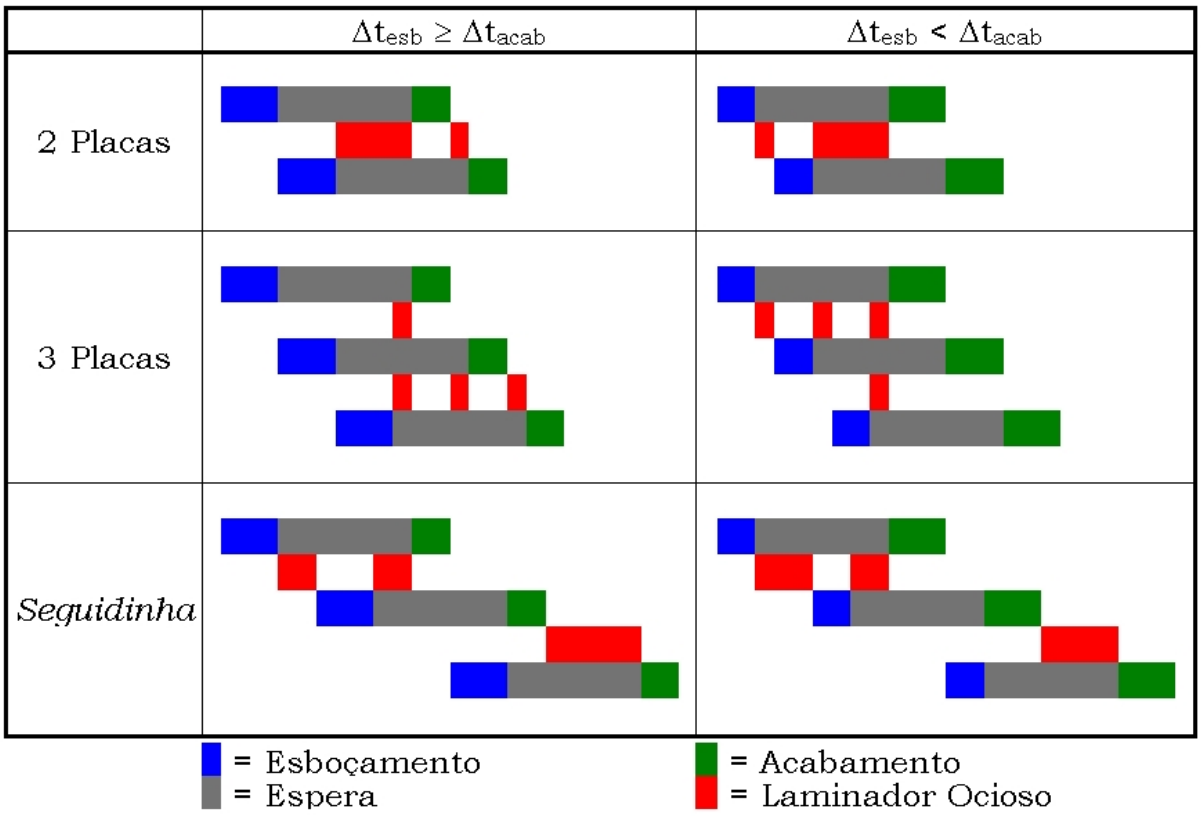

Figura 1. Representação esquemática da alocação de tempo relativa às várias etapas de processo para diversos esquemas de laminação controlada em tandem.

Figure 1. Schematic representation of time allocation relative to the several process steps for various tandem controlled rolling schedules.

Deve-se considerar também os possíveis efeitos que a alteração na distribuição de deformação entre as fases de esboçamento e acabamento podem vir a ocasionar no produto final. No caso específico da COSIPA foi verificado que, num aço microligado ao NbTi tipicamente utilizado na produção de chapas grossas navais, esse aumento no grau de deformação durante a fase de acabamento levou a um ligeiro refino no tamanho de grão final [4]. Contudo, essa alteração microestrutural não levou a mudanças significativas nas propriedades mecânicas do produto [5]. Em chapas de 12,7 mm, o aumento da espessura de espera de 2 até 5 vezes a espessura final não levou a alterações estatisticamente significativas. Para materiais com 25,4 mm, o aumento da espessura de espera de 2 até 4 vezes a espessura final levou apenas a um aumento médio de 18 MPa no limite de escoamento. Para espessuras da ordem de 32,0 mm, o aumento da espessura de espera de 2 até 3 vezes a espessura final levou a aumento médio de 22 MPa no limite de escoamento, 10 MPa no limite de resistência, 2% na razão elástica e 52 J na energia absorvida durante o ensaio de impacto Charpy efetuado a -20^{o}C. Não ocorreram alterações significativas no alongamento total para quaisquer das espessuras estudadas. Logo, do ponto de vista das características mecânicas para este produto em particular, não há razões fundamentadas para se desaconselhar uma eventual alteração na espessura de espera com o objetivo de se maximizar a produtividade da linha.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi verificar quantitativamente o efeito do aumento da espessura do esboço intermediário durante a fase de espera da laminação controlada sobre a produtividade do laminador de chapas grossas, considerando-se o uso de esquemas de laminação em tandem.

TANDEM	EQUAÇÕES	$\Delta t_{esb} \geq \Delta t_{acab}$	$\Delta t_{esb} < \Delta t_{acab}$

n Placas	Requisitos de Tempo	$\Delta t_{esp} \geq (n\text{-}1)\ \Delta t_{esb}$	$\Delta t_{esp} \geq (n\text{-}1)\ \Delta t_{ac}$ Pausa de Δt_{ac}-Δt_{esb} entre fim de esboçamento de cada placa e início de esboçamento da segunda.
	Tempo de Laminação	$\frac{n\ \Delta t_{esb} + \Delta t_{esp} + \Delta t_{ac}}{n}$	$\frac{\Delta t_{esb} + \Delta t_{esp} + n\ \Delta t_{ac}}{n}$
	Economia de Tempo	$\frac{(n-1)\ (\Delta t_{esp} + \Delta t_{ac})}{n}$	$\frac{(n-1)\ (\Delta t_{esp} + \Delta t_{esb})}{n}$
	Tempo Ocioso	$\frac{\Delta t_{esp} - (n-1)\ \Delta t_{ac}}{n}$	$\frac{\Delta t_{esp} - (n-1)\ \Delta t_{esb}}{n}$
Seguidinha	Requisitos de Tempo	$\Delta t_{esp} \geq \Delta t_{esp} + \Delta t_{ac}$ Pausa de Δt_{ac} entre o fim de esboçamento da placa de número ímpar e o início de esboçamento da placa de número par.	
	Tempo de Laminação	$\frac{\Delta t_{esb} + \Delta t_{esp} + \Delta t_{ac}}{2}$	
	Economia de Tempo	$\frac{\Delta t_{esb} + \Delta t_{esp} + \Delta t_{ac}}{2}$	
	Tempo Ocioso	$\frac{\Delta t_{esp} - \Delta t_{esb}}{2}$	

Tabela I. Requisitos em termos de tempo para a execução, tempo total de laminação, economia de tempo e tempo ocioso da cadeira para cada tipo de laminação em tandem considerado. O tempo de laminação, economia de tempo e tempo ocioso se referem a cada placa laminada.

Table I. Requisites in therms of execution time, total rolling time, time savings and idle time of the rolling stand for each type of tandem rolling considered in this paper. The rolling time, time savings and idle times refer to each rolled slab.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Numa primeira fase do trabalho decidiu-se acompanhar a laminação controlada de um lote de chapas grossas de aço microligado ao NbTi para a indústria naval, produzido conforme a norma DH36, utilizando-se espessuras de espera iguais a 2, 3, 4 ou 5 vezes a espessura final. A espessura do produto variou entre 12,7 e 32,0 mm, enquanto que sua largura situou-se entre 2000 e 2700 mm. Esse monitoramento teve por objetivo levantar os tempos de processo associados a esses valores de espessura de espera. Foram ainda incluídos nesse levantamento dados obtidos em trabalhos similares anteriores [4,5]. Foram coletados dados de processo de 268 esboços acompanhados na linha, incluindo-se peso da placa, tempo decorrido na fase de esboçamento (Δt_{esb}), espessura do esboço intermediário (h_{esp}), tempo decorrido na fase de espera (Δt_{esp}), tempo decorrido durante a fase de acabamento (Δt_{ac}) e espessura final do esboço (h_f).

Paralelamente a esse acompanhamento foram efetuados levantamentos na base de dados operacionais da COSIPA em termos de peso de placa, espessura e largura do esboço, bem como tempo total de laminação, relativos a 1842 esboços de material naval laminados com espessura de espera igual a duas vezes a espessura final. Idêntico levantamento foi realizado em 468 esboços do mesmo tipo de aço, laminados com espessura de espera igual a três vezes a espessura final.

Os dados assim obtidos foram estratificados em termos da espessura de espera, tipo de esquema de laminação em tandem e espessura/largura do esboço. Quando necessário, foram realizadas análises estatísticas mais detalhadas sobre essa massa de dados, incluindo teste de médias (*t* de Student) e análise de variância.

Conforme já era esperado, as propriedades mecânicas de todos os laminados aqui estudados atenderam às especificações da norma especificada, conforme havia sido constatado em trabalho anterior [5].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 permite uma comparação entre os tempos totais de laminação obtidos a medida que se variou a relação entre espessura de espera e espessura final, considerando-se somente a laminação de placas isoladas. Neste gráfico, como em todos os demais, assumiu-se como tendo valor 100 o tempo total de laminação de um esboço com espessura final menor que 12,7 mm e espessura de espera equivalente a 2 h_f. Pode-se observar, a partir desses dados, que o aumento da relação entre a espessura de espera e a final levou a uma nítida elevação do tempo total de laminação. Do mesmo modo, o aumento da espessura final promoveu aumento do tempo total de laminação, qualquer que fosse a relação entre espessura de espera e final.

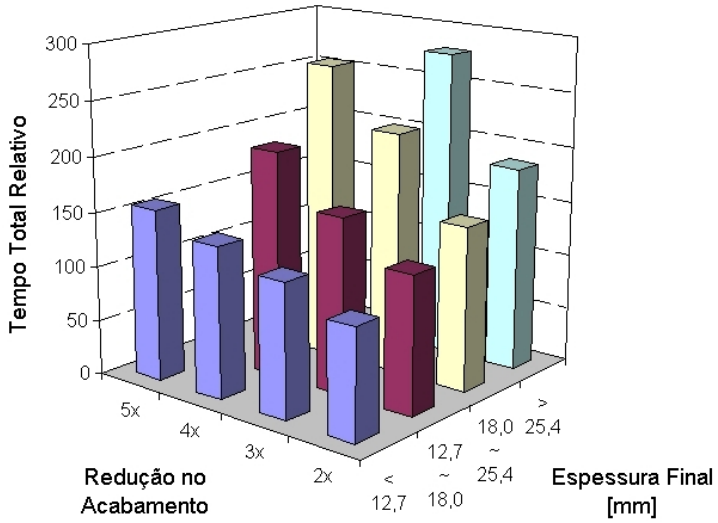

Figura 2. Comparação entre os tempos totais de laminação por placa para diversas razões de espessura de espera/espessura final, considerando-se laminação de placas isoladas. A escala de tempo, nesta figura e nas demais, é relativa, assumindo-se que o tempo total de laminação de um esboço com espessura final igual a 12,7 mm e espessura de espera equivalente a 2 h_f é igual a 100.

Figure 2. Comparison between the total rolling times per slab for various intermediate cooling thickness/final thickness ratios, considerating the rolling of single slabs. The time scale adopted in this figure and the following is relative, assuming that the total rolling time of a rolling stock with final thickness equal to 12.7 mm and intermediate cooling thickness equivalente to 2 h_f equals 100.

Tais constatações são justificadas pelos dados mostrados na figura 3. Eles mostram que o aumento da relação entre espessura de espera e espessura final levou a significativos aumentos nos tempos de espera do esboço. O tempo de acabamento também foi aumentado, mas não de maneira muito expressiva. De todo modo, esse aumento conjunto não foi contrabalançado pelas discretas reduções observadas nos tempos de esboçamento. Aliás, o aumento da razão entre espessura de espera e final nem sempre levou à redução no tempo de esboçamento e aumento no de acabamento para uma mesma faixa de espessura de produto final, provavelmente devido à dispersão estatística existente no processo. De forma análoga, o aumento na espessura do produto final levou a significativos aumentos no tempo de espera, e reduções discretas nos tempos de esboçamento e acabamento.

Os resultados de análise de variância para os tempos totais, de esboçamento, espera e acabamento para as várias razões entre espessura de espera e final, agrupados em termos da espessura final de produto, podem ser vistos na tabela 2. Como se pode observar, o aumento da razão entre espessura de espera e final realmente afetou os valores de tempo obtidos, exceto no caso de chapas com espessura acima de 25,4 mm, onde não houveram diferenças significativas entre os tempos de esboçamento e entre os tempos de acabamento, provavelmente devido ao pequeno número de chapas analisadas.

Logo conclui-se que, no caso da laminação de placas isoladas, o aumento da relação entre a espessura de espera e a espessura final leva a uma intolerável perda de produtividade na laminação controlada, como já era previsto. Essa alteração de processo só é viável quando associada a outras medidas que permitam recuperar produtividade, tais como resfriamento forçado intermediário e laminação em tandem.

De fato, os resultados obtidos ao se elevar a razão entre as espessuras de espera e a final, e executar a laminação em tandem, processando-se o maior número possível de esboços de forma simultânea em cada caso, mostraram que ocorreu

significativa redução no tempo total de laminação por placa, conforme mostram os dados da figura 4. Isso já seria de se esperar, uma vez que o aumento da razão entre a espessura de espera e a espessura final tende a facilitar a execução da laminação em tandem, pois reduz o comprimento dos esboços após a fase de esboçamento e aumenta o tempo de espera, permitindo que se lamine maior número de placas de forma concomitante. É intrigante notar, contudo, que o uso de uma razão entre espessura de espera e final igual a três apresentou menores tempos de laminação total do que quando se usou uma razão igual a quatro, para qualquer condição onde essas duas razões foram utilizadas. Ou seja, aparentemente há um valor ótimo dessa razão em termos da maximização da produtividade na laminação controlada.

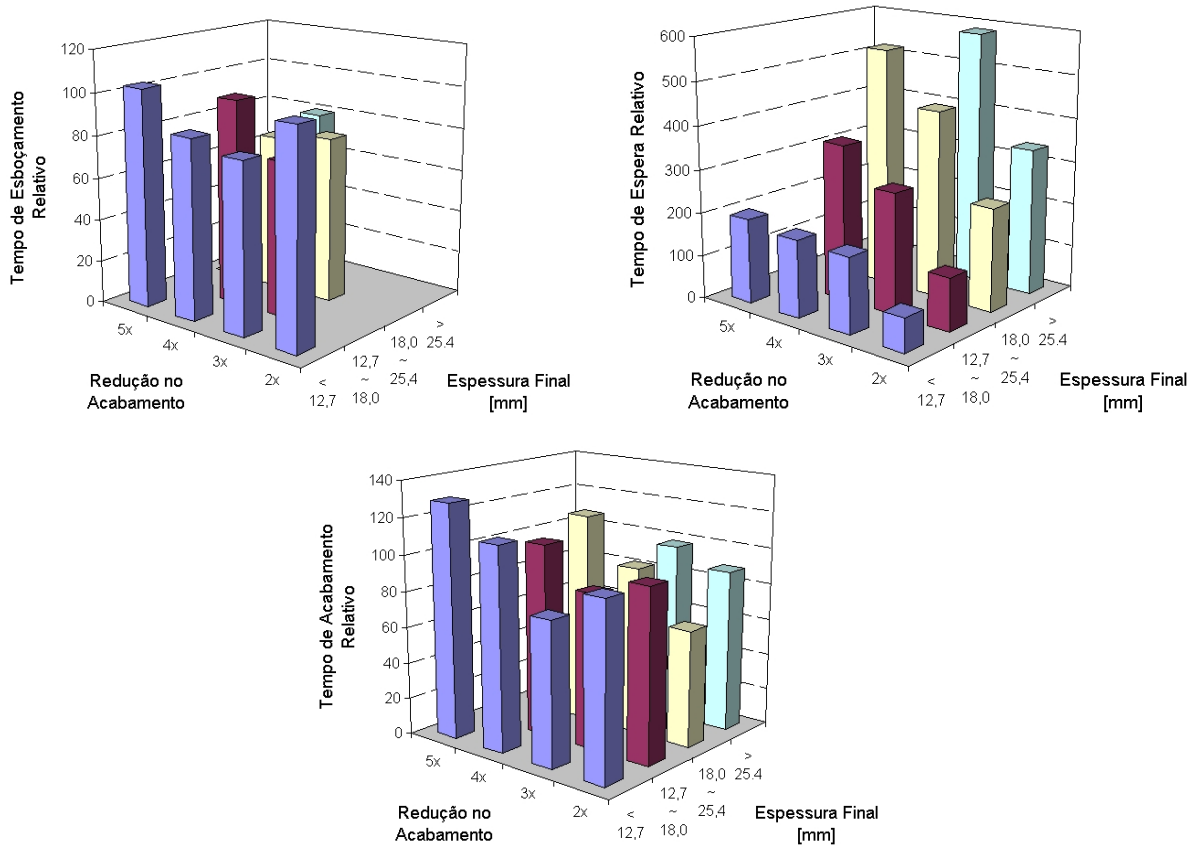

Figura 3. Comparação relativa entre os tempos de esboçamento, espera e acabamento por placa, para diversas razões de espessura de espera/espessura final.

Figure 3. Relative comparison between roughing, intermediate cooling and finishing times per slab for several intermediate cooling thickness/final thickness ratios.

h_f [mm]	Δt_{esb} [%]	Δt_{esp} [%]	Δt_{ac} [%]	Δt_{tot} [%]
≤ 12,7	99,5	100	100	100
12,7 ~ 18,0	100	100	97,1	100
18,0 ~ 25,4	99,6	100	100	100
> 25,4	*71,0*	99,5	*51,4*	99,9

Tabela 2. Graus de confiança decorrentes da análise de variância relativa aos tempos totais, de esboçamento, espera e acabamento para as várias razões entre espessura de espera e final, agrupados pela espessura final do produto. Grau de confiança mínimo: 95%.

Table 2. Values of confidence degrees calculated by ANOVA relative to total rolling, roughing, intermediate colling and finishing times for the several intermediate cooling thickness/final thickness ratios, grouped by the product final thickness. Minimum confidence degree: 95%.

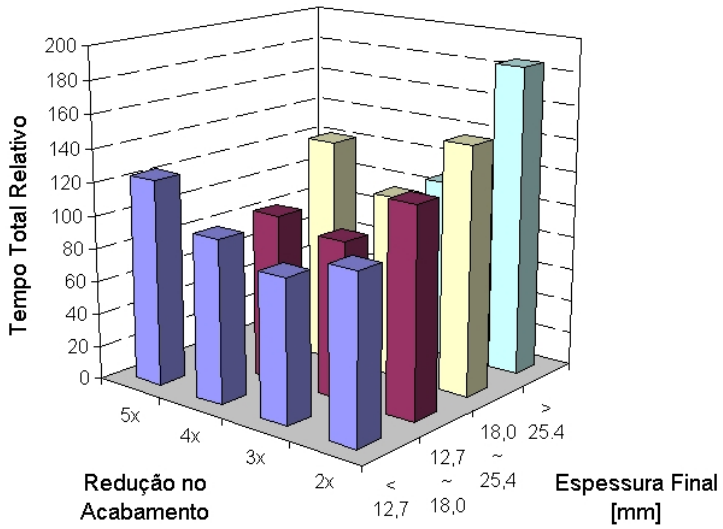

Figura 4. Comparação relativa entre os tempos totais de laminação por placa para diversas razões de espessura de espera/espessura final, considerando-se laminação de placas isoladas para $h_{esp} = 2\ h_f$ e em tandem (qualquer esquema) para as demais classes de h_{esp} (3, 4 e 5 h_f).

Figure 4. Relative comparison between total rolling time per slab considering several intermediate cooling thickness/final thickness ratios, considering the rolling of single slabs for $h_{esp} = 2\ h_f$ and using tandem rolling (any schedule) for the remaining hesp classes (3, 4 and 5 h_f).

Cálculos feitos com as equações teóricas para determinação do tempo total de laminação por placa, constantes na tabela I, usando-se os dados sobre tempos de esboçamento, espera e acabamento coletados nos levantamentos, permitiram determinar as condições em que se obteve mínimo tempo total de laminação por placa em função das classes de espessura consideradas, as quais estão mostradas na tabela 3. Dessa forma foi confirmado que o valor ótimo da razão entre as espessuras de espera e final, para as atuais condições operacionais da COSIPA, é igual a três. Um aumento nessa relação leva a um aumento exagerado o tempo de espera, o qual não consegue ser compensado pelo aumento do número de esboços laminados de forma concomitante. Isso resultou em perda global de produtividade.

A fim de se confirmar os resultados teóricos e os obtidos no levantamento detalhado, foi feito um estudo adicional sobre a produtividade da linha, expressa em toneladas/hora, a partir da base de dados operacionais da COSIPA. Conforme se pode observar na figura 5, ficou claramente provado que o aumento do valor da razão entre a espessura de espera e a espessura final de dois para três levou a um aumento de 9 a 17% na produtividade da laminação controlada de chapas grossas, conforme a faixa de espessura do produto final.

FAIXAS DE ESPESSURA [mm]	TIPO DE LAMINAÇÃO EM TANDEM	RAZÃO h_{esp}/h_f	TEMPO TOTAL RELATIVO DE LAMINAÇÃO
≤ 12,7	3 Placas	3	60
12,7 ~ 18,0	4 Placas	3	63
18,0 ~ 25,4	5 Placas	3	71
> 25,4	5 Placas	3	85

Tabela 3. Condições de razão entre espessura de espera e espessura final, e do tipo de laminação em tandem, para se atingir mínimo tempo total de laminação calculado por placa.

Table 3. Intermediate cooling thickness/final thickness ratio and tandem rolling type conditions in order to achieve a minimum calculated total rolling time per slab.

Além disso, ao se considerar toda a faixa de larguras produzidas no laminador de chapas grossas, verificou-se que a produtividade global da laminação controlada subiu de 87 para 105 t/h ao se elevar a razão entre a espessura de espera e a espessura final de dois para três. Ou seja, ocorreu um aumento global de 21% na capacidade do equipamento ao se executar laminação controlada.

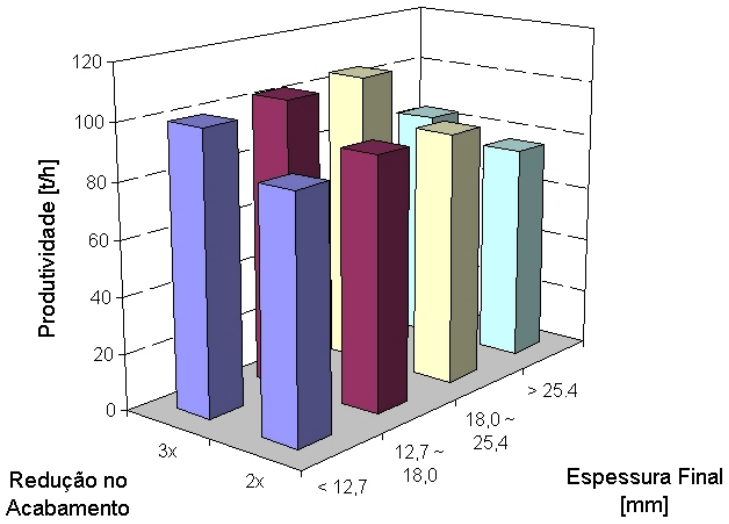

Figura 5. Aumento da produtividade da laminação controlada decorrente do aumento da razão entre espessura de espera e espessura final, que passou de dois para três.

Figure 5. Controlled rolling productivity increase resulting from the increase in the ratio between intermediate cooling thickness and final thickness, which passed from two to three.

CONCLUSÕES

O aumento da razão entre espessura de espera e espessura final levou a significativos aumentos no tempo de espera, elevação nos tempos de acabamento e discretas reduções nos tempos de esboçamento. O resultado líquido dessas alterações foi um nítido aumento no tempo total de laminação de placas isoladas o que poderia, a princípio, prejudicar a produtividade da linha. Por outro lado, o aumento da referida razão facilita a execução da laminação em tandem, devido à redução no comprimento dos esboços intermediários e pelo significativo aumento no tempo de espera. Esses dois fatores permitem aumentar o número de placas que podem ser laminadas simultaneamente em tandem, o que representa um grande potencial para o aumento de produtividade.

Os resultados da análise teórica e de um acompanhamento industrial confirmaram esse aumento de produtividade, desde que sempre se pratique laminação em tandem com número máximo de placas sendo processadas simultaneamente. Sob as atuais condições operacionais do laminador de chapas grossas da COSIPA conseguiu-se maximizar a produtividade da linha quando se utilizou uma relação entre espessura de espera e espessura final igual a três. Acompanhamentos de rotina mostraram um aumento global de produtividade de 87 para 105 t/h, ou seja, acréscimo de 21%, quando a razão entre as espessuras de espera e final foi aumentada de dois para três.

BIBLIOGRAFIA

(1) STUART, M.A. e outros. Aspectos do Reaquecimento nas Propriedades Mecânicas de Chapas Grossas. In: 28° SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. **Anais**. Associação Brasileira de Metais, Belo Horizonte, Novembro de 1991, 354-373.

(2) SILVA, J.M.S. e outros. Implantação do Resfriamento Forçado Intermediário na Laminação Controlada. In: 28° SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. **Anais**. Associação Brasileira de Metais, Belo Horizonte, Novembro de 1991, 337-353.

(3) LEDERER, A. Influence of Thermomechanical Rolling of HSLA Steel Plates on Mill Production In: HSLA STEEL '85. **Proceedings**. American Society for Metals, Beijing, 1985, 507-516.

(4) GORNI, A.A. e outros. Efeito da Alteração na Espessura de Espera durante a Laminação Controlada sobre Parâmetros Microestruturais de Chapas Grossas Navais. In: 50º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Pedro, Agosto de 1995.

(5) GORNI, A.A. e outros. Otimização da Composição Química e do Processo de Laminação Controlada de Chapas Grossas Navais. In: 32° SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. **Anais**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Curitiba, Novembro de 1995, 373-392.

START