

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA LAMINAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS: PROCESSOS E PRODUTOS¹

Antonio Augusto Gorni²

RESUMO

Os produtores brasileiros de produtos laminados planos começaram a defasar-se tecnologicamente em relação aos líderes mundiais do segmento a partir do início da década de 1980. Tal problema ocorreu em função da prolongada crise econômica que afligiu o país, a qual impediu investimentos em modernização de equipamentos. Por outro lado, a criatividade e a energia de seu corpo técnico impediu que ocorresse o mesmo nível de defasagem em termos de processos e produtos. O presente trabalho apresenta as mais recentes tendências mundiais no tocante ao desenvolvimento de processos e produtos na área de chapas grossas, bem como os esforços da COSIPA para acompanhá-los. Procurou-se, desse modo, caracterizar a vanguarda mundial neste segmento e verificar quais investimentos terão de ser feitos para se garantir a competitividade da Companhia. Em termos de novos processos, o resfriamento acelerado é o desenvolvimento que tem recebido mais atenção em termos mundiais. Já no tocante a produtos, a principal ênfase tem sido a adaptação da composição química de materiais tradicionais às novas rotas de processo. Outra abordagem tem sido o desenvolvimento de produtos especialmente concebidos para aumentar a competitividade do cliente final, como é o caso das chapas grossas com perfis especiais de espessura e largura, que vêm encontrando grande aceitação na indústria naval.

Palavras-Chave: Laminação de Chapas Grossas, Processos, Produtos

¹ Trabalho a ser apresentado no XXXIII Seminário de Laminação, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Volta Redonda RJ, Setembro de 1996.

² Engenheiro de Materiais, Mestre em Engenharia, Gerência de Pesquisas, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: agorni@dialdata.com.br

- INTRODUÇÃO

A falta de investimentos significativos na siderurgia de produtos planos ao longo da década de 1980 levou a uma grande defasagem tecnológica em termos de equipamentos nas usinas estatais. Por outro lado, a criatividade de seu corpo técnico evitou que o mesmo atraso se repetisse na área de processos e produtos. Uma boa dose de esforço e criatividade, eventualmente aliada com pequenos investimentos, conseguiu evitar que os níveis de competitividade ficassem abaixo de níveis críticos.

No tocante à laminação de chapas grossas da COSIPA, pequenos aperfeiçoamentos de processo, como a implantação de *plane view control*, laminação de chapas grossas extra-pesadas e resfriamento forçado intermediário na fase de espera da laminação controlada foram viabilizados com relativa facilidade. Por outro lado, alterações mais significativas em termos de processo e produto, como a utilização de resfriamento acelerado, produção de chapas grossas sem apartamento lateral ou com perfis especiais de espessura e largura não puderam ser viabilizados por carência de investimentos em equipamento.

- DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PROCESSOS

. Chapas Grossas Extra-Pesadas

O uso de placas lingotadas continuamente apresenta uma série de vantagens, como fluxo de produção simplificado, melhores níveis de segregação e limpeza interna no produto, níveis de qualidade mais uniformes, etc.

Contudo, a espessura final do produto restringe o uso de placas provenientes do lingotamento contínuo, uma vez que é necessário manter um grau mínimo de deformação total placa → esboço para que o produto adquira as propriedades finais desejadas. Ou seja, chapas grossas pesadas tem menor possibilidade de serem produzidas a partir de placas lingotadas continuamente. Esse grau de redução total mínimo

depende do nível de propriedades mecânicas desejadas, das características da placa que dará origem ao produto e do processo de laminação em si [1].

Por essas razões, a laminação consistente de chapas grossas pesadas com, por exemplo, 125 mm de espessura, a partir de placas lingotadas continuamente com bitola de 300 mm, requer um processo de conformação cuidadoso, uma vez que o grau de deformação total envolvido é de apenas 240 %. O principal objetivo deste processo será obter um produto com qualidade interna satisfatória e que atenda às propriedades mecânicas especificadas, mesmo no núcleo do material.

A solução para este problema está no dimensionamento de um processo de laminação que possibilite que o núcleo do material seja submetido a um nível adequado de deformação. O principal parâmetro que permite avaliar o processo de laminação sob este aspecto é o fator de forma \mathbf{m} , conhecido ainda como *fator de penetração da deformação*:

$$m = \frac{2 \sqrt{R \Delta h}}{(h_1 + h_2)} \quad (1)$$

onde \mathbf{R} é o raio dos cilindros de trabalho, \mathbf{h}_1 e \mathbf{h}_2 são as espessuras de entrada e saída do esboço, respectivamente, e $\Delta \mathbf{h}$ é a diferença entre elas. Esse fator expressa o tamanho da zona de tensões compressivas no material que está sendo deformado entre os cilindros. Quanto maior for esse parâmetro, mais elevado será o grau de deformação aplicado no núcleo do laminado, o que contribui beneficentemente para as propriedades mecânicas e sanidade interna do produto.

Outro aspecto a ser notado é que o efeito dos passes com alto valor de \mathbf{m} sobre o material é intensificado quando se lamina o material sob baixas velocidades.

Naturalmente, todas essas medidas implicam numa contrapartida em termos de equipamento. Altos valores de \mathbf{m} estão associados a altos valores de deformação por passe, que se traduzem em altos torques e cargas de laminação. Por exemplo, o laminador de acabamento da usina de Dillinger, Alemanha (carga máxima de 10.000 t, torque e potência nominais de 450 t.m e 20.000 kW, respectivamente) conse-

gue efetuar passes com Δh da ordem de 60 mm. Além disso, o uso de baixas velocidades de laminação sob tais condições requer sistemas de mancais adequados, além de boa refrigeração nos cilindros de trabalho.

Um trabalho semelhante foi desenvolvido na COSIPA [2], onde também se logrou garantir o nível de sanidade interna das chapas grossas obtidas a partir de lingotamento contínuo através da utilização de passes com alto valor de m . Contudo, em função da menor potência do laminador de chapas grossas da COSIPA, o valor máximo de Δh conseguido nos passes foi menor do que o obtido em Dillinger.

. Equivalência entre Laminação e Tratamento de Normalização

O tratamento térmico de normalização requer etapas adicionais para a elaboração do produto, o que sempre implica em maior custo e trabalho. Além disso, a oxidação adicional que ocorre no forno de tratamento térmico degrada um pouco mais a superfície do material.

Uma das alternativas disponíveis para se acelerar esse processo consiste em se obter as propriedades finais do laminado diretamente do calor de laminação. Isto pode ser conseguido através de um processo denominado *laminação para normalização*, definido nas normas técnicas SEW 082 e BS 4360 [1].

Neste tipo de laminação, a temperatura de acabamento é bem definida, devendo sempre estar acima do ponto Ar_3 do material, de forma análoga ao que ocorre no tratamento de normalização.

O problema é garantir que o material obtido diretamente da laminação realmente apresente idêntico desempenho ao material normalizado convencional. Sua solução exige um sofisticado modelamento estatístico, que permite prever precisamente as propriedades mecânicas do material após a laminação, em função de sua composição química e dos parâmetros do processo de laminação. Caso o modelo preveja uma situação de risco em termos de não-atendimento das propriedades especificadas, são feitos ensaios adicionais para se caracterizar adequadamente as características do produto.

. Aumento de Rendimento Metálico Através da Aplicação de Perfis Especiais de Espessuras (*Plane View Control*)

Nos últimos quinze anos tornou-se amplamente utilizada a aplicação de perfis especiais de espessura em momentos específicos do processo de laminação de chapas grossas, com o objetivo de se regularizar o formato do esboço [3]. Esta técnica pode ser empregada com dois objetivos. Um deles é minimizar o chamado *efeito barril*, ou seja, a variação de largura ao longo do comprimento do esboço, o qual faz com que a largura atinja um valor máximo na metade do comprimento do laminado. O outro é minimizar a formação de ponta em formato de *língua* nos esboços laminados a partir de placas lingotadas continuamente.

Consegue-se, nos dois casos, maior *índice de retangularidade* do laminado, reduzindo-se o nível de descarte necessário para se atingir às dimensões finais do produto. No primeiro caso reduz-se o descarte lateral e no segundo o descarte nas pontas do laminado.

A minimização do efeito barril é conseguido aplicando-se o perfil de espessura mostrado na figura 1 imediatamente após o último passe da fase de alargamento. Já a supressão de pontas em forma de língua é feita através da aplicação do entalhe no último passe imediatamente anterior ao início da fase de alargamento do esboço [4].

Este sistema permite que o rendimento metálico obtido em laminadores de chapas grossas sem cadeiras verticais (de bordas) se aproxime daqueles que dispõem desse equipamento.

A COSIPA foi pioneira no desenvolvimento de sistemas para aplicar esses perfis especiais de largura ao longo da laminação de chapas grossas, atendendo às duas situações aqui citadas. Os ganhos médios de rendimento metálico foram de, aproximadamente, 0,72% [5] e 0,70% [6], respectivamente.

Deve-se notar que, nos dois casos citados, tanto a profundidade como o formato do chanfro a ser aplicado dependem do grau de deformação que será aplicado no esboço entre o final da fase de acabamento e o final da laminação. Quanto maior

for esse grau de redução, mais profundo terá de ser o chanfro para se maximizar o grau de retangularidade do esboço. Ou seja, quando este chanfro tiver de ser profundo, o laminador deverá dispor de um sistema de acionamento dos parafusos controlado por computador, suficientemente rápido e preciso para se conseguir aplicar o chanfro de forma eficaz.

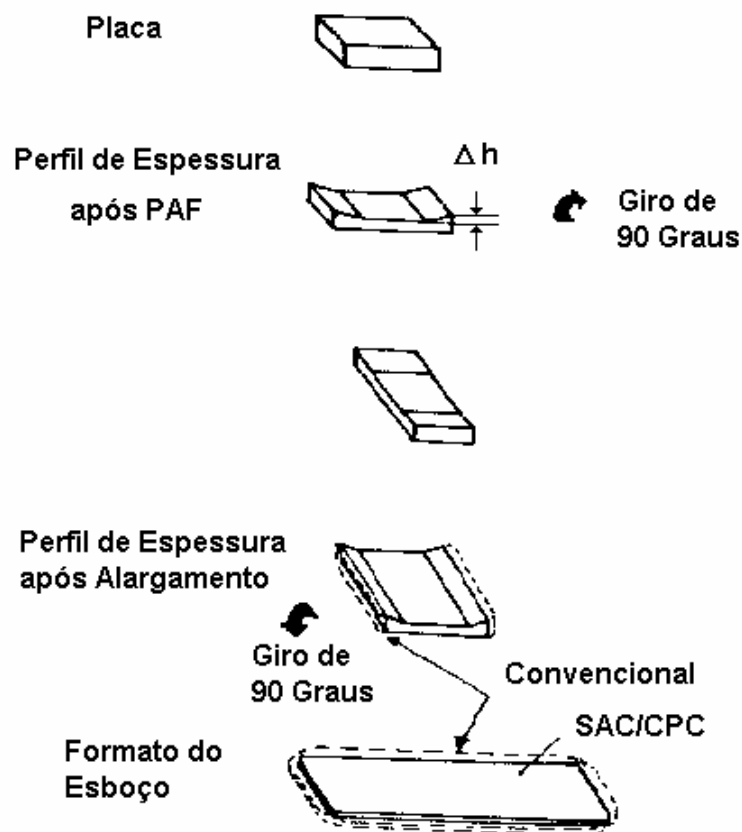


Figura 1: Esquema da aplicação de perfis especiais de espessura, ou entalhes, ao longo do processo da laminação de chapas grossas [11].

. Resfriamento Forçado Intermediário na Fase de Espera da Laminação Controlada

A necessidade de um período de espera entre as fases de esboçamento e acabamento na laminação controlada, quando o esboço fica resfriando ao ar sem que possa ser

laminado, sempre comprometeu a produtividade desse processo.

A contramedida clássica para esse problema, a *laminação em tandem*, consiste em se aproveitar o tempo de espera de um esboço para se adiantar o esboçamento da placa seguinte ou terminar o acabamento do esboço anterior. Esta é uma saída bastante eficaz, mas só apresenta bom desempenho para grandes lotes de produtos com as mesmas dimensões, condição que nem sempre ocorre na programação de um laminador de chapas grossas.

Para pequenos lotes ou placas isoladas, o resfriamento forçado durante a fase de espera - mediante a utilização de *sprays* de água e ar - é uma solução interessante para abreviar a duração do período de espera. A COSIPA foi pioneira na utilização desta técnica [7], conseguindo ganhos globais de produtividade da ordem de 8 a 20%, conforme as dimensões do produto, e, o que é o mais importante, sem afetar suas propriedades mecânicas.

Esta técnica já começa a se disseminar. Testes no laminador de chapas grossas da usina de Taranto, da ILVA, Itália, mostraram ganhos de produtividade de 2,5% [4]. O uso desta técnica também já foi anunciado pelo Instituto Central de Pesquisa na Indústria do Ferro e Aço da Rússia [8]. Os resultados obtidos pela aplicação desta técnica incluem um aumento de produtividade de 5 a 8% e elevação de 1,5 a 2,5% no rendimento metálico, em função da redução de desvios por propriedades mecânicas dos laminados. Recentemente, a British Steel, Inglaterra, anunciou o início da utilização desse processo em escala industrial na sua usina de Dalzell [9]. Segundo este trabalho, foi verificado um aumento de 35% na produtividade do laminador, além de substancial melhoria na tenacidade do material produzido. Um recente trabalho da usina de Dillinger, Alemanha, afirma que este processo vem sendo usado há quatro anos naquela usina, em combinação com resfriamento acelerado após o final da laminação, e há mais de dois anos na usina de Dunkerque, da GTS Industries, França [10]. O aumento de produtividade proporcionado pelo resfriamento intermediário forçado foi de aproximadamente 33% neste caso.

. Produção de Chapas Grossas Sem Necessidade de Aparamento Lateral

A necessidade de se aparar as bordas laterais dos esboços, de modo a

que as dimensões das chapas grossas atendam aos valores especificados pelos clientes, é mais um fator que diminui o rendimento metálico do processo.

O ideal é que a chapa grossa já apresente a largura especificada diretamente do calor de laminação, e que suas bordas apresentem perfil rigorosamente retangular. Infelizmente, o uso isolado do *plane view control* é incapaz de produzir chapas com o grau de precisão dimensional requerido para essa situação ideal.

Esta situação ideal já ocorre na Kawasaki Steel, que produz chapas grossas sem necessidade de aparamento lateral em sua usina de Mizushima, Japão. Contudo, foi necessário instalar um laminador de bordas acoplado à cadeira acabadora do laminador de chapas grossas [12]. Além de atuar diretamente na definição da largura do material, esse laminador de bordas pode aplicar perfil de *osso de cachorro* nas bordas do laminado, maximizando seu grau de retangularidade durante a laminação posterior. O desempenho obtido por esse equipamento fica ainda melhor quando se alia sua ação ao sistema de aplicação de perfis especiais de espessura ao longo do processo, através da cadeira esboçadora.

A distância entre os cilindros de trabalho do laminador de bordas é controlada automaticamente através de um sistema AWC (“Automatic Width System”), análogo ao sistema AGC dos laminadores horizontais.

O ganho total de rendimento metálico através da aplicação dessa nova abordagem de laminação é, em média, de 2,0%, sendo 1,4% advindos ao menor aparamento lateral e 0,6% decorrentes do menor descarte nas pontas.

- DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS

A necessidade premente do aumento de competitividade por parte das indústrias pesadas está forçando à racionalização de suas atividades, objetivando uma redução de custos cada vez maior. O reflexo dessa nova condição dos clientes para os produtores de chapas grossas se traduz na necessidade de se desenvolver produtos que atendam de forma mais eficaz suas aplicações, particularmente em termos de melhor soldabilidade e tenacidade, sem que haja uma contrapartida equivalente nos preços.

Este objetivo está sendo perseguido em diversas frentes, que serão descritas a seguir.

Aços de Alta Resistência e Baixa Liga. Uma das principais atividades neste campo está na adequação da composição química de suas ligas ao processo de resfriamento acelerado, de forma a se aproveitar plenamente o potencial que ele oferece. Sob este aspecto, novas combinações de elementos microligantes vem apresentando resultados bastante efetivos, particularmente quanto ao aumento da soldabilidade dos produtos e no desenvolvimento de materiais com maior resistência mecânica. Por exemplo, pode-se citar as ligas com endurecimento a partir de precipitação de cobre, como o aço ASTM A-710 e os bainíticos de extra-baixo carbono ao Mn-Mo-Nb-Ti-B, destinados à fabricação de chapas grossas pesadas com alta resistência mecânica, com níveis similares aos aços API X-80 ou X-100 [13].

Outra abordagem para adequação à novos processos está no estudo das implicações metalúrgicas sobre o produto advindas da adoção da laminação direta ou enformamento de placas quentes.

O desenvolvimento de produtos vem sendo conduzido com o auxílio de novas ferramentas como, por exemplo, modelos matemáticos que inter-relacionam quantitativamente os fenômenos metalúrgicos que ocorrem na laminação e tratamento termomecânico de chapas grossas.

Chapas Grossas para Uso em Alta Temperatura. Tanques para armazenagem em indústrias químicas requerem chapas grossas com boa soldabilidade, além de resistência ao ataque por hidrogênio, à fragilidade pelo revenido e ao trinca-mento em condições específicas de montagem e soldagem. O desenvolvimento desses materiais exige estudos específicos. Por exemplo, hoje utiliza-se boro para aumentar a tenacidade do metal base, como uma medida preventiva contra a penetração de oxigênio. Aplicações como vasos de pressão para refino de óleo apresentam condições críticas de pressão e temperatura, que vem se tornando cada vez mais severas ao longo do tempo. Tais circunstâncias vem exigindo níveis jamais vistos de resistência mecânica e tenacidade nas chapas grossas. Uma possível solução para este problema está sendo investigada, através da abordagem de uma composição química otimizada aliada ao uso de resfriamento acelerado.

Chapas Grossas para Uso em Baixa Temperatura. Atualmente utili-

za-se ligas com teores de alumínio, boro, titânio e nitrogênio otimizados, aliados ao uso de resfriamento acelerado, para se obter aços com limite de escoamento de 500 MPa, boa soldabilidade e tenacidade para tanques de gás liquefeito de petróleo ou estruturas “off-shore” que devem ser instaladas no Ártico.

Outro desenvolvimento neste sentido são aços com 9% de níquel, com alta tenacidade, para uso em tanques de armazenagem. As características desse material foram melhoradas através da redução adicional nos teores de impurezas como fósforo, enxofre e nitrogênio, além de tecnologia melhorada em termos de têmpera e revenido.

Chapas grossas com 2,5% de níquel, com alta tenacidade e soldabilidade, destinadas à fabricação de tanques para armazenagem de gás liquefeito de petróleo, eram tradicionalmente produzidas pelo processo SHT. Note-se, contudo, que este processo tem o inconveniente de requerer um forno adicional na linha de chapas grossas, implicando ainda em maior consumo de energia devido ao reaquecimento intermediário. Estes problemas foram eliminados com a adoção do resfriamento acelerado, que permitiu substituir o processo SHT na produção de aços com 2,5% de níquel, sem que houvesse alteração nas propriedades mecânicas do produto.

Chapas Grossas para Aplicações Especiais. A Sumitomo Steel já produziu comercialmente vários tipos de aços “clad”: aço mais titânio, para usinas de dessalinização, com requisitos extremamente severos de corrosão; aço mais alumínio, para motores magnéticos lineares; aço mais cobre, para motores magnéticos lineares e utensílios de cozinha. Tais materiais tem sido produzidos através de laminação a quente.

Outro produto especial estudado foi aço não-magnético com alto teor de manganês para motores magnéticos lineares, com alta resistência mecânica e boa usinabilidade, com adição de terras raras e utilização de resfriamento acelerado. No momento estão sendo estudadas formas de melhorar sua resistência à corrosão. Além disso, estão sendo desenvolvidos aços resistentes à abrasão para uso em máquinas.

. Chapas Grossas com Diferentes Perfis de Espessura ou Largura

Chapas grossas com diferentes perfis de espessura ao longo de seu comprimento ou largura foram laminadas pela primeira vez em 1983, na usina de Usinor-Sacilor, França, e Dillinger, Alemanha [14]. Uma típica aplicação deste tipo de laminado está na construção de pontes que têm de atender diferentes distribuições de carga, que variam ao longo de seu comprimento. A economia de custos obtida em função da minimização de operações de usinagem e soldagem de componentes varia entre 10 a 25%. Além disso, há melhoria no aspecto arquitetônico e na resistência à fadiga. Outro cliente em potencial para este tipo de chapa está na indústria naval, onde este tipo de produto permite reduzir o custo das estruturas e minimizar a necessidade das operações de soldagem, reduzindo seus custos de produção e aumentando sua eficiência global. Por exemplo, componentes estruturais que apresentem diferentes espessuras podem ser obtidos diretamente do calor de laminação, sem que o cliente tenha de fabricá-lo através da soldagem de diversas chapas com espessuras diferentes [15].

A tabela I mostra os tipos, aplicações e objetivos de diversas chapas grossas com diferentes perfis de espessura, produzidas pela Nippon Steel, Japão [15].

Há uma série de requisitos necessários em termos de equipamento e tecnologia de laminação para que este tipo de produto seja fabricado com sucesso.

Em primeiro lugar, não é possível implementar esses perfis de espessura em apenas um passe devido às limitações de carga e torque das cadeiras de laminação. O sistema de acionamento do parafuso deve ser suficientemente rápido e apresentar curso longo para conformar adequadamente o perfil relativamente complexo de espessura deste tipo de chapa grossa. Um exemplo deste tipo de equipamento está na cadeira de acabamento da usina de Dillinger, Alemanha, cujo sistema de ajuste fino de parafusos é hidráulico, possuindo velocidade máxima de 4,5 mm/s, aceleração de 700 mm/s² e 40 mm de curso [16].

O controle do processo de laminação deste tipo de produto é sofisticado, exigindo automação e modelos matemáticos específicos para cada tipo de perfil de espessura a ser impresso na chapa grossa.

No caso de chapas grossas com perfil especial de espessura ao longo do comprimento, requer-se controle preciso da taxa de escorregamento a vante, ou seja, da real velocidade do material já deformado, à frente dos cilindros de trabalho. O cuidado com a planicidade é vital, uma vez que defeitos originados na seção fina do material propagam-se facilmente até a seção mais espessa.






Formato da Chapa Grossa	Nome	Aplicação	Objetivo
	Chapa grossa com espessura diferencial ao longo do comprimento	Indústria Naval	Redução de operações de soldagem
	Chapa grossa com espessura multidiferencial ao longo do comprimento	Indústria Naval	Redução de operações de soldagem
	Chapa grossa em cunha no sentido do comprimento	Indústria Naval	Redução de operações de soldagem e do peso do navio
	Chapa grossa em cunha no sentido da largura	Indústria Naval, Tanques	Redução de operações de soldagem e do peso do componente
	Chapa grossa com espessura diferencial cíclica	Indústria Naval	Redução de operações de soldagem e do peso do componente

Tabela I: Tipos, aplicações e objetivos de chapas grossas com diferentes perfis de espessura [15].

Na produção de chapas grossas com perfil especial de espessura ao longo da largura (ou seja, coroa em forma de cunha) é fundamental que o esquema de passes seja aplicado de forma a que a deformação do material seja igual ao longo da mesa do cilindro de trabalho. Tal cuidado faz com que o material se alongue por igual ao longo da largura, evitando a formação de empeno lateral. Isso é conseguido através de um sistema que inclina os cilindros de trabalho; o ângulo de inclinação é função do

valor da cunha especificada para o produto.

Já chapas grossas com perfis cíclicos de espessura ao longo do comprimento apresentam intrinsecamente uma condição muito desfavorável para a obtenção de boa planicidade, uma vez que é praticamente impossível garantir uma relação de variação de coroa/espessura entre passes constante ao longo de todo o esquema de passes, uma vez que a espessura varia de forma contínua ao longo do comprimento. Como se sabe, o ideal é que essa relação de variação fique constante ao longo do esquema de passes para se garantir a boa planicidade do esboço. Na prática, há uma faixa de valores dessa relação de variação que proporciona boa planicidade ao laminado, estabelecendo uma faixa de tolerâncias para o esquema de passes. Em outras palavras, há uma “zona morta” em termos de deformação por passe onde se consegue boa planicidade no material. Logo, foi necessário elaborar um modelo matemático sofisticado para o cálculo do esquema de passes, de modo que ele ficasse estritamente dentro dessa região limite de tolerância para boa planicidade.

Contudo, até pelo menos cinco anos atrás, esse processo ainda apresentava menor eficiência e rendimento metálico que o processo convencional de chapas grossas, requerendo maiores estudos para seu aperfeiçoamento. Contudo, ele já estava implantado em escala industrial, possibilitando a fabricação de um produto dirigido a clientes específicos, com custo agregado significativamente maior que o material convencional.

Uma extensão deste processo está na produção de chapas grossas com largura variável, processo já desenvolvido na usina de Oita, da Nippon Steel, Japão, onde também é produzido material com perfis especiais de espessura [17]. A tabela II mostra, de forma esquemática, os conceitos envolvidos na laminação deste tipo de produto. Caso a diferença de espessura entre as seções for muito grande, opta-se por reverter o laminador ao se aplicar o passe. Caso a diferença não seja muito acentuada, os cilindros são abertos de forma correspondente ao longo do passe. No caso da produção de chapas grossas com largura variável, o último passe da fase de alargamento aplica um perfil de espessura adequado à obtenção dos valores de largura requeridos.

A figura 2 mostra a evolução crescente da produção de chapas grossas com perfis especiais de espessura na usina de Usinor-Sacilor, na França [14].

A análise dos lotes produzidos deste tipo de material na usina de Usinor-Sacilor, França, em 1991, revelou que o limite de escoamento mínimo era quase sempre de 355 MPa, com requisitos de energia de impacto a -20°C ou -50°C ; a espessura variou entre 18 e 150 mm; a largura variou entre 740 e 3.070 mm; a declividade de espessura variou entre 0,1 e 5,4 mm por metro de comprimento; foram aplicados de um a três valores de declividade de espessura por chapa.

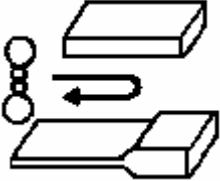
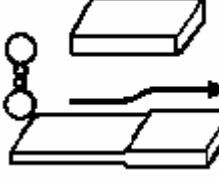
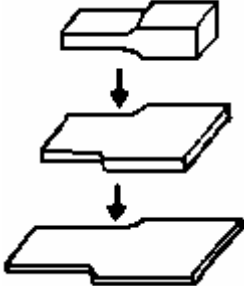
Laminação de chapas grossas com espessura variável (grande diferença de espessura)	Laminação de chapas grossas com espessura variável (pequena diferença de espessura)	Laminação de chapas grossas com largura variável
 <p data-bbox="188 1048 579 1126">Reversão do esboço durante a laminação</p>	 <p data-bbox="603 1037 994 1149">Abertura entre os cilindros é alterada durante a aplicação do passe</p>	

Tabela II: Conceitos de laminação envolvidos na produção de chapas grossas com espessura ou largura variáveis [17].

O tamanho dos lotes solicitados variou entre 17 a 1.270 toneladas, o que mostra que as chapas grossas com perfis especiais de espessura são utilizadas em numerosos projetos, mas em pequenos lotes.

. Resfriamento Acelerado

O binômio laminação controlada-resfriamento acelerado já se tornou uma rota padrão de produção de chapas grossas em muitas usinas, atendendo às indústrias de tubos para oleodutos e gasodutos, plataformas marítimas, construção naval e estrutural, etc. Por exemplo, mais de 300.000 t de chapas grossas foram submetidas a

resfriamento acelerado na usina de Dillinger em 1993, utilizando-se o equipamento MULPIC. A maior parte desse material foi destinado à fabricação de tubos resistentes a HIC para a indústria petrolífera [1].

Essa mesma usina desenvolveu um “lay-out” interessante para flexibilizar o tratamento termomecânico de seus produtos. Foi instalado um forno com carregamento lateral entre as cadeiras de esboçamento e acabamento, próximo à linha de resfriamento forçado. Ele dispõe de soleira com área de $6 \times 19 \text{ m}^2$ e capacidade nominal de 15 t/h.

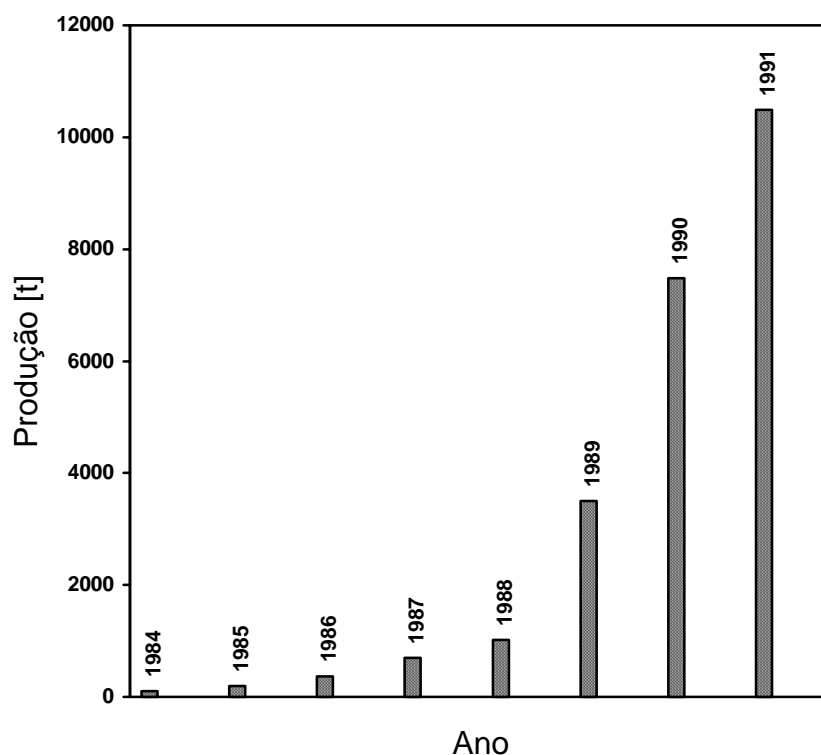


Figura 2: Evolução da produção de chapas grossas com perfis especiais de espessura na usina de Usinor-Sacilor, França [14].

Este forno permite uma série de rotas de processo. As mais comuns são duas: a) austenitização mais resfriamento com água, com desempenho a quente antes ou depois do resfriamento; b) reaquecimento sob uma determinada temperatura, laminação, resfriamento acelerado e tratamento térmico adicional (por exemplo, revenido) no forno de carregamento lateral.

Os esquemas de têmpera empregados nessa usina são escolhidos em função das propriedades desejadas: a) resfriamento acelerado sob taxa *ideal* objetivando resfriar o núcleo do material o mais rapidamente possível, mas com término do resfriamento imediatamente antes da superfície da chapa atingir a temperatura M_s ; b) resfriamento acelerado sob taxas mais elevadas, sendo ligeiramente abrandado quando a superfície atinge a temperatura M_s e interrompido após o núcleo ter atingido essa temperatura; c) resfriamento extremamente severo durante curto período de tempo, de modo a deixar apenas a região superficial do esboço abaixo de M_s . Desligamento do sistema, permitindo que a recalescência do material permita o auto-revenido da microestrutura obtida.

Um típico exemplo de aplicação deste último esquema está na produção de material ao Mn-Cr-B, com 170 mm de espessura, 3.000 mm de largura e 10.000 mm de comprimento. Sua superfície apresentou dureza de 350 HV₁₀ em função da necessidade de resistência à abrasão requerida pela aplicação dessa chapa grossa. Por outro lado, esse material deve apresentar acentuado gradiente de dureza ao longo da espessura para facilitar sua usinabilidade, apresentando dureza de 235 HV₁₀ em seu núcleo. A transição de 350 para 235 HV₁₀ ocorreu ao longo de 25 mm a partir da borda do material. Esse perfil de dureza resulta da microestrutura peculiar a este tipo de produto, que apresenta martensita na superfície e ferrita-perlita no núcleo. A planicidade do material também foi muito boa: 95% dos laminados não precisaram passar por processos adicionais de desempenho.

Já a usina de Posco, Coréia, optou pelo sistema ADCO de resfriamento acelerado, tendo produzido 400.000 t de chapas grossas entre 1989 e 1993 [18]. A maior parte do material processado por esta linha é destinado à indústria naval. Já na usina de Dunkerque, da GTS Industries, França, que possui equipamento similar, o material produzido destina-se geralmente para a fabricação de tubos petrolíferos.

. Aços para Construção Civil

Uma tendência recente nas usinas japonesas é o desenvolvimento de

chapas grossas com propriedades especialmente adequadas para construção civil [19,20,21].

Alta soldabilidade tem se tornado um requisito muito importante, particularmente para chapas grossas extra-pesadas, ou seja, com espessura entre 50 e 100 mm. Esta necessidade vem sendo satisfeita através da minimização dos teores de elementos de liga no aço, cujo efeito vem sendo substituído pelo uso de resfriamento acelerado.

O *alto limite de escoamento* permite reduzir a seção das estruturas, reduzindo seu peso. Por exemplo, seu aumento de 370 para 480 MPa permite redução de 10% no peso do edifício e, em conseqüência, redução de 3% em sua altura. Isto não só permite economia de aço, como também de materiais para acabamento interno e externo do edifício. Além disso, ocorre aumento na eficiência no aproveitamento do espaço interno, através do uso de colunas mais esbeltas.

Um requisito tipicamente japonês é a *baixa razão elástica*, fundamental num país muito sujeito a terremotos. Neste caso, a capacidade de deformação plástica das estruturas é um importante fator de projeto, pois aumenta a resistência do edifício aos sismos. Pode-se minimizar o limite de escoamento através de minimização dos teores de elementos de liga como carbono, silício, manganês, etc.; aumento do tamanho de grão; e combinação do carbono e nitrogênio com titânio e nióbio, evitando que esses intersticiais venham a bloquear a migração de discordâncias.

Pelo mesmo motivo, é fundamental que haja *alta precisão no limite de escoamento* no material, mesmo entre diferentes lotes. Tal requisito se deve ao fato de que diferenças no limite de escoamento ao longo da estrutura do edifício afetam significativamente sua resposta durante o terremoto, reduzindo sua segurança. Este último requisito foi atendido através do estabelecimento de relações altamente confiáveis entre a composição química e o processo de laminação, além de um controle de processo bastante rígido no refino e laminação do aço.

Outro aspecto muito importante é a *resistência a incêndios*, cujos requisitos vem se tornando cada vez mais severos. Atualmente as normas estabelecem que o aço a ser empregado em construção civil retenha dois terços de sua resistência mecânica sob temperatura ambiente quando estiver submetido a temperaturas da or-

dem de 600°C. Isto permite eliminar ou pelo menos reduzir a espessura de revestimento cerâmico termicamente isolante que normalmente é utilizado nas estruturas de aço. Essa resistência às temperaturas elevadas pode ser conseguida através da solução sólida do ferro com elementos de liga, como molibdênio, e da interação entre precipitados de nióbio e elementos de liga.

- CONCLUSÕES

O desenvolvimento de processos na laminação de chapas grossas a nível internacional vem apresentando como principal objetivo a redução do custo final do produto. A produção de chapas grossas extra-pesadas a partir de placas lingotadas continuamente viabiliza a utilização de um semi-produto metalurgicamente superior e mais barato; a laminação de normalização permite suprimir um tratamento térmico suplementar; o resfriamento forçado intermediário reduz a perda de produtividade induzida pelo período de espera durante a laminação controlada. O mesmo ocorre nas melhorias de processo que objetivam explicitamente o aumento do rendimento metálico, como o *plane view control* e o uso de laminadores de bordas.

Por outro lado, a principal ênfase no desenvolvimento de produtos tem sido a adequação da composição química de materiais convencionais às novas rotas de processo, como resfriamento acelerado, incluindo ou não tratamentos térmicos on-line. Um desenvolvimento particularmente promissor parece ser as chapas grossas com perfis especiais de espessura e largura, uma vez que aumentam consideravelmente a competitividade do cliente final ao reduzir suas operações de soldagem e montagem. O mercado da construção civil parece ser um mercado ainda por ser completamente explorado.

- BIBLIOGRAFIA

1. OSWALD, W. e outros. In: METEC CONGRESS '94: 6th INTERNATIONAL

- ROLLING CONFERENCE. Proceedings. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf, 20-22 June 1994, 42-51.
2. SILVEIRA, J.H.D. e outros. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. Proceedings. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Porto Alegre, 1992, 195-215.
 3. YAZANAWA, T. e outros. Kawasaki Steel Technical Report, Sept. 1980, 33-46.
 4. AGRUSTI, C. e outros. In: METEC CONGRESS '94: 6th INTERNATIONAL ROLLING CONFERENCE. Proceedings. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf, 20-22 June 1994, 86-92.
 5. BONILHA, F.M. e outros. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. Proceedings. Associação Brasileira de Metais, Recife, 1984, 83-103.
 6. JACKSON, J.S.S. e outros. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. Proceedings. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Porto Alegre, 1992, 365-378.
 7. SILVA, J.M.S. e outros. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. Proceedings. Associação Brasileira de Metais, Belo Horizonte, 1991, 337-353.
 8. ANON. Plate Controlled Rolling Technology with Controlled Interpass Cooling. I.P. Bardin Central Research Institute of Iron and Steel Technology, Moscou, 1990. 2 p.
 9. ANON. Steel News, August 1995, 1.
 10. DILG, C. e outros. La Revue de Metallurgie - CIT, Juillet-Août 1995, 883-892.
 11. MOREL, M. e outros. Iron and Steel Engineer, May 1984, 48-53.
 12. NISHIDA, S.I. e outros. In: DIMENSIONAL CONTROL IN ROLLING MILLS. Proceedings. The Institute of Materials, London, 1990, 152-159.
 13. GORNI, A.A. Chapas Grossas para Aplicações Navais Militares. In: SEMINÁRIO INTERNO DE LAMINAÇÃO, COSIPA, Junho 1994. 53 p.
 14. VIGO, J.M. e outros. La Revue de Metallurgie - CIT, Oct. 1993, 1333-40.
 15. OHTSUBO, T. & TSURU, S. In: DIMENSIONAL CONTROL IN ROLLING. Proceedings. The Institute of Materials, Londres, 1990, 166-174.
 16. WILMS, W. Entwicklung in der Blechwalzung. Düsseldorf, MDS Mannesmann-Demag-Sack GmbH, 1991. 27 p.
 17. DAIRIKI, O. e outros. Nippon Steel Technical Report, July 1989, 38-47.

18. RENÉ, L. e outros. In: METEC CONGRESS '94: 6th INTERNATIONAL ROLLING CONFERENCE. Proceedings. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf, 20-22 June 1994, 197-204.
19. ANON. The Sumitomo Search, Dec. 1990, 18-30.
20. OHASHI, M. e outros. Nippon Steel Technical Report, Jan. 1990, 8-20.
21. OTANI, K. Nippon Steel Technical Report, July 1992, 27-36.

- ABSTRACT

**TECHNOLOGICAL INNOVATIONS IN PLATE ROLLING:
PROCESSES AND PRODUCTS**

The Brazilian flat products producers began to show a technological gap from the world steelmakers leaders since the beginning of the 1980's. This problem was a consequence of a long economical crisis, that hindered equipment modernization. However, the criativity and hard work of their technical staffs keep relatively updated the development of processes and products. This paper shows the most recent world tendencies regarding the development of processes and products about plates, as well the COSIPA's efforts in this field. It was intended to characterize the vanguard in this product segment and identify which investiments must be done to warrant COSIPA's competitiveness. The accelerated cooling is to most import new process, as a great deal of effort is being dedicated to it. Regarding new products, it was detected an emphasis on studies about the adaptation of the chemical composition of traditional products regarding new process routes and products specially developed to maximize the final customer's competitiveness. Na example of this latter case is plates with special width/thickness profiles, that are being successfully delivered to shipbuilding industries.

Keywords: Plate Rolling; Processes; Products