

AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE CHAPAS GROSSAS NORMALIZADAS ¹

Antonio Augusto Gorni²
Celso Gomes Cavalcanti³
Jackson Soares de Souza Reis⁴
José Herbert Dolabela da Silveira⁵

RESUMO

A produção de chapas grossas normalizadas diretamente do calor de laminação vem despertando a atenção dos produtores de aço há mais de vinte anos, uma vez que a supressão do tratamento térmico resulta em apreciável economia nos custos de fabricação e agilização dos prazos de entrega. Do ponto de vista energético, a economia proporcionada por este novo processo é apreciável, uma vez que o consumo específico de combustível do tratamento térmico de normalização é da ordem de 35 kg de óleo por tonelada de chapa tratada. O objetivo deste trabalho foi dar continuidade a desenvolvimentos já efetuados na COSIPA, testando-se agora novas ligas microligadas ao Ti e TiV. Os resultados obtidos demonstraram que esta rota de produção é viável para esboços com espessura de até 30 mm, desde que se utilize aço ao TiV processado através de laminação controlada com recristalização. Sob tais condições, considerando-se uma estimativa de mercado da ordem de 1.000 t de chapas por mês, a economia total de óleo combustível em função da adoção do novo processo é da ordem de 35 t mensais. Esta economia de energia, aliada a outros fatores, proporciona uma redução de aproximadamente 10% no custo do produto final.

Palavras Chave: Laminação de Normalização, Chapas Grossas, Economia de Energia

¹ Contribuição Técnica ao XXI Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, a ser realizado em Junho de 1999, em Vitória, ES.

² Engenheiro de Materiais, Mestre em Engenharia, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Produto, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: agorni@iron.com.br

³ Técnico em Siderurgia, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Produto, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: g.calvalcanti@zipmail.com.br

⁴ Engenheiro Metalurgista e de Qualidade (A.S.Q.C.), Gerência de Suporte Técnico à Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁵ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia, Gerência de Laminação de Chapas Grossas, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

- INTRODUÇÃO

A principal característica de chapas grossas no estado normalizado consiste na relativa insensibilidade de suas propriedades mecânicas a um tratamento térmico de normalização adicional. Esta situação ocorre tipicamente em clientes que produzem peças submetidas às operações intensivas de soldagem. A rota clássica para a produção desse tipo de material inclui o tratamento térmico de normalização na usina, que consiste na austenitização da chapa e seu posterior resfriamento ao ar calmo.

Este tratamento térmico implica em custos adicionais de processamento e manuseio. Logo é desejável, tanto quanto possível, eliminá-lo para tornar o produto mais barato e reduzir seu tempo de fabricação. Estes fatores aumentam sua competitividade desde que, obviamente, sejam mantidas as mesmas características de qualidade do material normalizado convencionalmente.

Há mais de 20 anos as siderúrgicas mundiais desenvolveram processos de tratamento termomecânico que permitem a produção de chapas grossas no estado normalizado diretamente da laminação a quente. Este tratamento, conhecido como **laminação de normalização** é, na realidade, uma laminação efetuada sob condições controladas de temperatura. Um dos principais parâmetros a serem obedecidos é a temperatura de acabamento, que deve ser próxima à temperatura de austenitização utilizada no tratamento térmico convencional de normalização.

A principal preocupação ao se produzir chapas grossas normalizadas diretamente do calor de laminação está em se garantir que este material seja equivalente ao produto normalizado por tratamento térmico convencional. Um dos critérios que podem ser utilizados com este objetivo está descrito na Norma VdTÜV 1263 3.76 [1]. Basicamente ela impõe que, após o material normalizado diretamente do calor de laminação ter sido submetido a uma normalização convencional adicional, os requisitos mecânicos constantes da norma original do material continuem sendo atendidos e que a diferença verificada no limite de escoamento não ultrapasse 50 MPa no caso de materiais com limite de escoamento mínimo menor que 355 MPa ou 60 MPa quando ele for maior ou igual a 355 MPa.

Experiências preliminares na COSIPA [2], efetuadas com um aço ao NbTi, processado através de laminação controlada com recristalização, produziram resultados animadores. Os requisitos da norma DIN 17100 St 52.3N - a que apresenta maior participação no *mix* de materiais normalizados produzidos pela COSIPA - para chapas grossas com espessura de 19,0 mm foram razoavelmente atendidos quando a temperatura de acabamento foi igual a 860°C. Infelizmente, o valor do limite de escoamento do esboço submetido à normalização adicional ficou abaixo do especificado na norma, apesar de sua queda (de 53 MPa) ter ficado dentro dos limites aceitáveis.

A partir dos resultados obtidos ficou patente que deveria ser investigada a possibilidade de se elevar o teor de Mn e, eventualmente, de C da liga. Estas medidas permitiriam o atendimento da norma DIN 17100 St 52.3N com maior nível de segurança, utilizando-se eventualmente temperaturas de acabamento mais elevadas, o que possibilitaria suprimir ou mesmo minimizar o período de espera que geralmente se faz necessário durante a laminação de normalização, que é deletério para a produtividade do equipamento.

Logo, o objetivo deste trabalho foi desenvolver novas ligas e processos de tratamento termomecânico que permitissem a produção de chapas grossas normalizadas diretamente do calor de laminação, atendendo aos requisitos das normas DIN 17100 St 52.3N e VdTÜV 1263/3.76, de forma a se poder tomar proveito de todos os benefícios que esta rota de produção alternativa proporciona.

- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Decidiu-se efetuar experiências objetivando-se a produção de chapas grossas normalizadas diretamente do calor de laminação com seis espessuras diferentes: 8,0; 12,7; 16,0; 25,4; 38,0 e 50,8 mm, cobrindo a maior parte do *mix* de espessuras do material produzido de acordo com a norma DIN 17100 St 52.3N. A largura dos esboços foi de 2440 mm.

O *alloy design* do aço para normalização diretamente do calor de laminação apresenta características distintas do utilizado para normalização convencional em forno. Incluiu-se Ti em função de seu efeito refinador de grão durante a laminação a quente [3]. No caso de chapas grossas leves, com espessuras de até 16,0 mm, usou-se somente esse elemento como microligante. Para chapas grossas pesadas, na faixa de espessuras entre 25,4 e 50,8 mm, também adicionou-se V, pois este último elemento se solubiliza sob as temperaturas usualmente empregadas no tratamento térmico de normalização. De fato, cálculos efetuados através de um modelo termodinâmico de solubilização para aços ao TiV [4] mostraram que, a 900°C, 90% do V total da liga deverá estar solubilizado na austenita. Desse modo, ocorrerá precipitação de carbonitretos de V durante o resfriamento ao ar da chapa após sua normalização, o que poderá minimizar a queda da resistência mecânica que se observa após esse tratamento térmico.

As placas para laminação foram obtidas através de lingotamento contínuo, em função da melhor qualidade interna que este tipo de processo confere ao material. Além disso, ele proporciona a obtenção de uma fina precipitação de TiN, que restringe significativamente o crescimento de grão durante o reaquecimento da placa.

Uma vez que se deseja obter o produto na condição de normalizado diretamente ao final da conformação a quente, deve-se garantir uma condição fundamental para a laminação de normalização: a temperatura de acabamento deve ser da mesma ordem de grandeza da utilizada durante a fase de austenitização do tratamento térmico de normalização. Desse modo, o término da laminação dos esboços deve ocorrer sob temperaturas onde a recristalização da austenita entre passes ainda ocorre de forma plena. Logo, não devem ser utilizados elementos microligantes que elevem excessivamente a temperatura de não-recristalização (T_{nr}), o que reduziria o campo de temperaturas disponível para se efetuar a laminação. O uso de microligantes como o Ti e V é bastante oportuno neste sentido, pois seu efeito de elevação na T_{nr} é bem menor que o do Nb [5]. Isto permite abaixar significativamente a temperatura de acabamento, pois a faixa de temperaturas onde a austenita se recristaliza se torna maior.

De forma análoga ao trabalho anterior [2], decidiu-se aqui incorporar à laminação de normalização os conceitos da chamada *laminação controlada com recristalização* (“R.C.R. - Recrystallization Controlled Rolling”) na produção deste material. Este tipo de tratamento termomecânico é vital para esta rota de fabricação, pois promove sucessivas recristalizações na austenita a cada passe de laminação, refinando intensivamente seu tamanho de grão. A presença de Ti neste tipo de aço não só intensifica ainda mais o refino de grão, como também contribui para sua homogeneidade, aumentando a confiabilidade no desempenho do material [3]. O esquema de passes objetivado especificou grau de deformação real mínimo de 0,16 por passe, para garantir a plena recristalização da austenita no intervalo de tempo entre passes. Este requisito, juntamente com a aplicação de uma temperatura de acabamento acima de T_{nr} , são os fundamentos básicos da laminação controlada com recristalização.

Foram processados pelo menos seis esboços para cada condição de espessura. Após a laminação foram extraídas amostras dos esboços, no topo da segunda chapa. A seguir, os mesmos esboços foram submetidos a tratamento térmico convencio-

nal de normalização, sob escala industrial, para se verificar o nível de alteração nas propriedades mecânicas que ele provocaria no material.

Tanto os esboços laminados como os laminados e normalizados convencionalmente foram caracterizados do ponto de vista mecânico e microestrutural. Em termos de propriedades mecânicas, foram determinados os limites de escoamento/resistência e alongamento total através de ensaios de tração, bem como a curva de transição através de ensaios Charpy executados a -60, -40, -20 e 0°C.

- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

A figura 1 mostra como as propriedades mecânicas dos esboços estudados neste trabalho se alteraram com a espessura do produto, tanto no estado como laminado quanto normalizado. Como seria de se esperar, a resistência mecânica decresceu com o aumento da espessura, enquanto que o alongamento total e a resistência ao impacto aumentaram. Uma vez que a espessura inicial da placa foi mantida fixa para todos os esboços, essas constatações representam, em última análise, o efeito da redução total aplicada durante a laminação sobre as propriedades mecânicas. As correlações observadas foram metalurgicamente coerentes para o limite de escoamento e resistência.

Quanto ao atendimento da norma DIN 17100 St 52.3, foi verificado que o aço ao Ti como laminado satisfaz ao requisito de limite de escoamento (mínimo de 355 MPa) apenas para o esboço mais leve, com 8,0 mm de espessura. Ainda assim, após a normalização adicional, um dos esboços apresentou limite de escoamento insuficiente. Este resultado inviabiliza o uso deste aço para atendimento a esta norma. Já o aço ao TiV atendeu aos requisitos de limite de escoamento desta norma para os esboços com espessura de 25,4 mm (mínimo de 345 MPa), mas o mesmo não ocorreu para as espessuras de 38,0 mm e 50,8 mm (mínimo de 335 MPa), já na condição como laminado. Por outro lado, todos os demais requisitos de propriedades mecânicas foram atendidos por esta liga para esboços com bitola de 25,4, 38,0 e 50,8 mm, tanto na condição como laminado quanto normalizado. Note-se que os resultados de resistência ao impacto da figura 1 foram determinados a partir de corpos de prova extraídos na direção transversal do esboço, condição mais crítica que a especificada pela norma, que pede originalmente corpos de prova longitudinais.

As alterações nas propriedades mecânicas do produto provocadas pelo tratamento térmico adicional de normalização podem ser vistas na figura 2. Conforme esperado, foi verificada ligeira queda no limite de escoamento somente para os materiais mais leves, feitos a partir do aço ao Ti; apenas no esboço mais espesso desta série - com 16,0 mm - verificou-se declínio acentuado, da ordem de 32 MPa. Os demais esboços, com espessura acima de 25,4 mm, apresentaram aumento do limite de escoamento após a normalização. Esse aumento chegou a atingir 20 MPa para as chapas grossas com espessura de 25,4 e 38,0 mm, mas foi particularmente nítido para o material com 50,8 mm de espessura, variando de 10 até quase 90 MPa. Isto parece demonstrar que a normalização tende a aumentar a resistência mecânica a medida que o grau de deformação total placa-esboço, aplicado durante a laminação, decresce. Neste caso, aparentemente o efeito endurecedor do refino de tamanho de grão promovido pela normalização é significativamente maior que a perda de resistência provocada pelo coalescimento dos precipitados eventualmente existentes e pela esferoidização da microestrutura. Os requisitos da norma TÜV 1263/3.76 foram atendidos para os esboços com 25,4 mm de espessura, uma vez que a variação no limite de escoamento não ultrapassou 50 MPa [1].

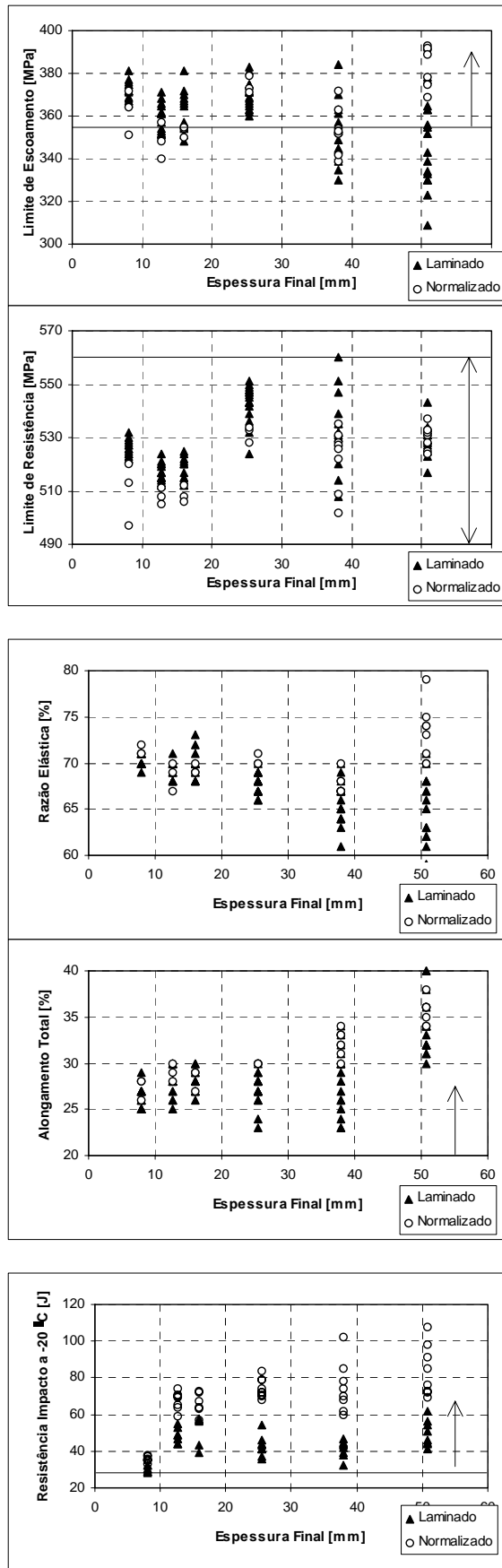


Figura 1: Correlação entre a espessura final do produto e propriedades mecânicas para os materiais estudados neste trabalho.

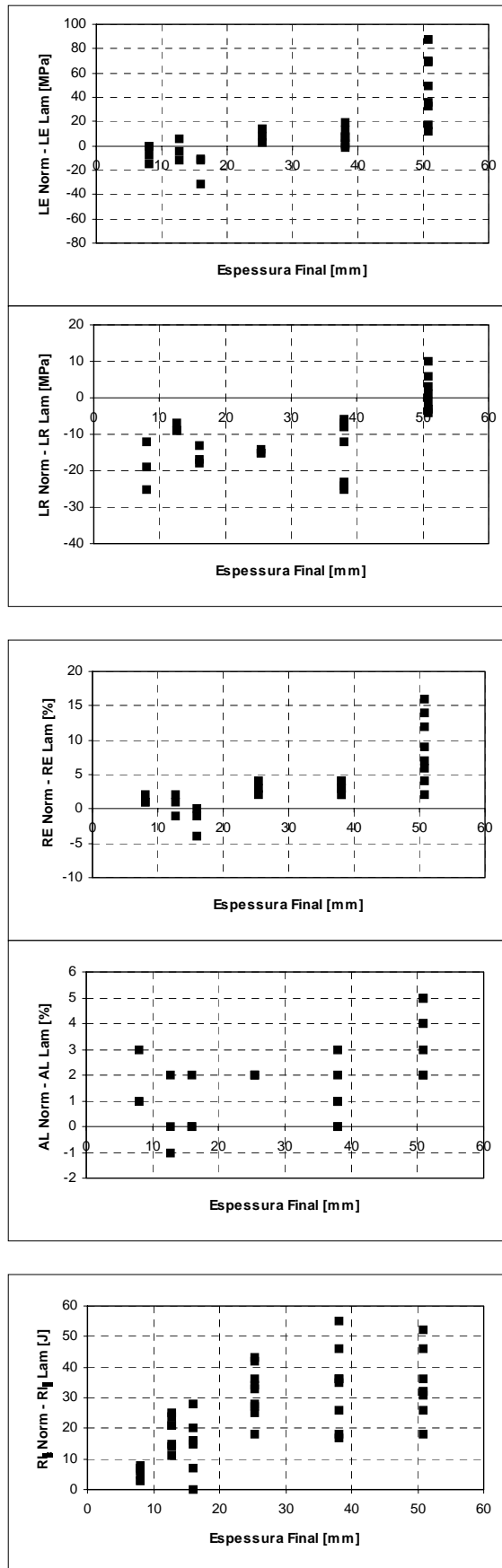


Figura 2: Alterações nas propriedades mecânicas dos esboços estudados neste trabalho provocadas pelo tratamento térmico adicional de normalização.

O efeito da normalização adicional sobre o limite de resistência foi ligeiramente diferente ao já verificado para o limite de escoamento. Houve quedas de até 30 MPa para os materiais com espessura de até 38,0 mm. A tendência se reverteu para os esboços com espessura máxima (50,8 mm), onde aparentemente houve igual tendência para o aumento ou declínio do limite de resistência, dentro de uma faixa de ± 10 MPa. Neste último caso o declínio, quando observado, foi menor que para os demais esboços.

A normalização adicional ainda provocou ligeira elevação na razão elástica, da ordem de 3 a 4 pontos percentuais, exceto para o esboço de maior bitola feito com aço ao Ti (16,0 mm), onde ela caiu ligeiramente, e também para o esboço de maior bitola feito com aço ao TiV (50,8 mm), onde esse aumento oscilou entre 2 e 16 pontos percentuais. Finalmente, verificou-se aumento tanto no alongamento total (até 3 pontos percentuais) como na energia absorvida durante o ensaio Charpy após o material ter sido submetido à normalização adicional. O aumento na tenacidade foi nitidamente maior para as chapas feitas com o aço ao TiV (entre 20 e 55 J) do que para o aço ao Ti (entre 0 e 30 J). Neste último caso, o aumento de tenacidade foi proporcional à espessura da chapa.

A figura 3 mostra as curvas de transição determinadas a partir de ensaios de impacto Charpy executados a -60 , -40 , 20 e 0°C , a partir de corpos de prova extraídos na direção longitudinal, para esboços tanto no estado laminado, como após normalização adicional. Mais uma vez verificou-se que, de maneira geral, esboços mais pesados apresentaram maior tenacidade. Por outro lado, é interessante notar que o esboço mais fino, com 8,0 mm de comprimento, apresentou tenacidade praticamente constante ao longo de toda a faixa de temperaturas de ensaio Charpy. Isto pode estar associado ao uso de corpos de prova reduzidos, que se fez necessário para testar materiais abaixo de 10 mm de espessura. Todas as demais bitolas apresentaram energia absorvida decrescente a medida que se abaixou a temperatura do ensaio, tanto no estado laminado, como após normalização adicional.

O efeito da normalização, de maneira geral, ocorreu no sentido de aumentar a tenacidade do material. Aparentemente esse efeito foi proporcional à espessura do material e, de fato, esboços com espessura de 8,0 mm praticamente não tiveram sua tenacidade alterada por este tratamento térmico. Isto parece estar ligado ao refino de grão proporcionado pela normalização. É interessante notar ainda que, no estado laminado, as curvas correspondentes aos esboços leves e pesados praticamente se misturaram. A normalização adicional, entretanto, provocou uma clara separação entre os grupos de curvas relativas à cada tipo de aço (Ti e TiV); as chapas mais leves, feitas em aço ao Ti, apresentaram valores de energia absorvida a -60°C nitidamente inferiores aos demais esboços. Na verdade, aparentemente a normalização não exerceu seu efeito benéfico em termos de tenacidade para este grupo de chapas quando testados na faixa inferior de temperaturas. Contudo, a medida que a temperatura do ensaio se eleva, seu desempenho se aproxima do obtido pelas chapas de aço ao TiV, praticamente se misturando a 0°C , exceto no caso do esboço mais fino, com 8,0 mm de espessura.

A partir do desempenho dos materiais estudados neste trabalho, pode-se concluir que a produção de material normalizado diretamente do calor de laminação, objetivando atendimento aos requisitos impostos pelas normas DIN 17100 St 52.3N e TÜV 1263/3.76, é viável para chapas grossas com até 30 mm de espessura. Aços equivalentes a essa norma DIN, como os regidos pelas normas BS 4360 50A, B, C e D, e EN 10025 S355J2G3, também podem ser produzidos conforme as recomendações acima.

Esta constatação é bastante auspiciosa, pois a supressão do tratamento térmico de normalização permite economizar a energia que seria necessária à austenitização das chapas grossas que faz parte desta etapa do processamento. A tabela I mostra dados sobre a evolução do consumo energético do Forno de Tratamento Térmico da COSIPA. A partir deles, é possível verificar que o consumo energético específico médio durante o processo de austenitização da chapa grossa é de aproximadamente 0,035 toneladas de óleo por tonelada de chapas grossas processadas. Uma vez que a estimativa de mercado para chapas grossas grau DIN 17100 St 52.3N e equivalentes, com espessura máxima de 30 mm, é da ordem de 1.000 t/mês, a economia mensal prevista de óleo é da ordem de 35 t/mês. O potencial de economia, contudo, é ainda maior, uma vez que a produção de outras qualidades de chapas grossas normalizadas também poderá ser feita através da nova rota.

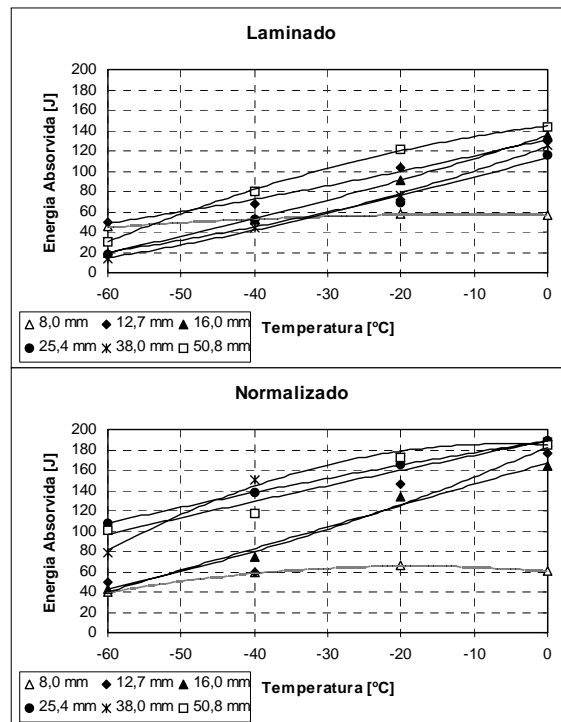


Figura 3: Curvas de transição determinadas a partir da energia absorvida nos ensaios de impacto Charpy executados a -60, -40, -20 e 0°C, em corpos de prova extraídos na direção longitudinal do esboço, para esboços como laminados e laminados com normalização adicional.

	1997				1998							
	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Consumo de Combustível [t óleo]	246	277	368	307	265	203	297	329	368	211	326	323
Chapas Tratadas [t]	6485	7100	9424	7476	9155	8139	9008	9395	10221	6580	9044	8720
Consumo Específico [t óleo/t chapa]	0,038	0,039	0,039	0,041	0,029	0,025	0,033	0,035	0,036	0,032	0,036	0,037

Tabela I: Dados de consumo energético do Forno de Tratamento Térmico da COSIPA.

Deve-se notar ainda que há outros benefícios importantes além da economia de energia. A supressão do tratamento térmico nas chapas grossas normalizadas libera o Forno de Tratamento Térmico para a produção de maior quantidade de chapas grossas temperadas e revenidas. Este tipo de produto apresenta valor agregado ainda maior do que o das chapas grossas normalizadas e o uso do Forno de Tratamento Térmico é indispensável para sua fabricação. Outros benefícios estão na redução da manipulação do produto na usina e no encurtamento do seu prazo de entrega, em função da supressão de uma etapa no seu processo de produção.

Todos esses fatores fazem com que a economia de custos obtida através dessa nova rota de fabricação seja da ordem de 10% em relação ao processo convencional, que utiliza tratamento térmico de normalização em forno.

- CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo viabilizar a produção de chapas grossas no estado normalizado diretamente da laminação a quente, utilizando-se aços microligados ao Ti para esboços leves e ao TiV para esboços pesados, visando atendimento aos requisitos da norma DIN 17100 St 52.3N e TÜV 1263/3.76.

Os esboços mais pesados tenderam a apresentar menor nível de resistência mecânica e, surpreendentemente, maiores valores de tenacidade, particularmente em relação às chapas mais leves, feitas em aço ao Ti.

O tratamento térmico de normalização adicional reduziu o limite de escoamento apenas nos esboços mais leves, feitos com aço ao Ti. Já para os esboços mais pesados, em aço ao TiV, houve aumento nesse parâmetro. O limite de resistência apresentou tendência global de queda para todos os esboços estudados, exceto para os mais pesados, com 50,8 mm de espessura. O alongamento aumentou, do mesmo modo que a tenacidade, de maneira diretamente proporcional à espessura do esboço.

Os resultados obtidos a partir das curvas de transição determinadas por ensaios de impacto Charpy demonstraram que a normalização adicional também proporcionou aumento de tenacidade, particularmente para os materiais de maior bitola, feitos em aço ao TiV.

Os resultados deste trabalho demonstraram que a produção de chapas grossas com espessura máxima de 30 mm, normalizadas diretamente do calor de laminação, atendendo aos requisitos da norma DIN 17100 St 52.3 e TÜV 1263/3.76, é viável. Consegue-se, dessa maneira, economia mensal de combustível equivalente a 35 t de óleo, considerando-se uma produção mensal de 1.000 t de chapas grossas dessa qualidade. Esta economia, somada a outros benefícios decorrentes desse novo processo, permitem economia global de 10% no custo do produto em relação ao processamento convencional, além da redução no tempo de fabricação do material.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. VdTÜV-Merksblatt Werkstoffe 1263/3.76, 1976.
2. GORNI, A.A. e outros. In: XXXIV SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO - PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Agosto de 1997, 479-498.

3. DE BOER, H. e outros. Thyssen Technische Berichte, 2/1989, 135-146.
4. GORNI, A.A. In: SPREADSHEETS IN SCIENCE AND ENGINEERING. Springer-Verlag, Heidelberg, 1998, 237-269.
5. BORATTO, F. e outros. In: THERMEC '88. Proceedings. Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, 1988, p. 383-390.

ABSTRACT

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY IN THE PRODUCTION OF NORMALIZED STEEL PLATES

Several steelmakers in Germany, France, Japan and U.S.A. produce as-rolled normalized steel plates more than twenty years ago, as the suppression of the normalizing heat treatment results in substantial cost saving and minimization of delivery schedules. From the energy standpoint, the economy achieved by this process can be very significant, as specific consumption of fuel in the COSIPA's plate heat treatment furnace is about 35 kg of fuel oil per ton of heat treated plate. The aim of this work was to further describe the developments carried out at COSIPA in the production of as-rolled normalized plate using new alloy designs: Ti and TiV microalloyed steels. The results got in this development showed that this production route is metallurgically feasible for DIN 17100 St 52.3N, TiV steel plates, with maximum thickness of 30 mm, processed through recrystallization controlled rolling (R.C.R.). This new process allows a monthly energy consumption saving of about 35 tons of fuel oil per month, considering a monthly production of 1.000 t of DIN 17100 St 52.3N plates using this alternative route. This lower energy consumption, allied to other advantages derived from this new process, can allow a 10% decrease in the manufacturing costs of normalized plate.

Keywords: Normalizing Rolling, Plates, Energy Savings