

PRODUÇÃO DE CHAPAS GROSSAS EXTRA-PESADAS, GRAU ASTM A36, A PARTIR DE PLACAS DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO ¹

Antonio Augusto Gorni ²
Celso Gomes Cavalcanti ³
Jackson Soares de Souza Reis ⁴
José Herbert Dolabela da Silveira ⁵

RESUMO

A melhor qualidade e o menor custo operacional decorrentes da produção de placas através de lingotamento contínuo está levando ao inexorável desaparecimento da rota lingotamento convencional-laminação de desbaste. Contudo, há determinados tipos de produto, como chapas grossas extra-pesadas, cuja fabricação era feita exclusivamente a partir de lingotes convencionais, em função do maior grau de redução a quente conseguida por esta rota. Este trabalho teve como objetivo verificar a possibilidade da produção de chapas grossas extra-pesadas, ou seja, com espessuras entre 100 e 150 mm, atendendo à norma ASTM A36, a partir de placas com espessura de 260 mm obtidas no lingotamento contínuo. Apesar da laminação a quente aplicada não ter proporcionado plenamente seu potencial de homogeneização, o produto obtido atendeu a todos os requisitos de sanidade interna e propriedades mecânicas. O tratamento de normalização adicional desses materiais melhorou ligeiramente sua ductilidade e tenacidade, sem contudo afetar sua resistência mecânica de forma significativa. Portanto, os resultados obtidos neste trabalho indicam que a fabricação deste tipo de material pode ser considerada potencialmente viável, não havendo necessidade de normalização posterior.

Palavras-Chaves: lingotamento contínuo, chapas grossas extra-pesadas, laminação a quente

¹ Trabalho a ser apresentado no XXXVI Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte MG, 22 a 24 de Setembro de 1999.

² Sócio da A.B.M. Engenheiro de Materiais e Mestre em Engenharia, Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: gorni@cosipa.com.br

³ Sócio da A.B.M. Técnico de Siderurgia, Gerência de Assistência Técnica da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁴ Sócio da A.B.M. Engenheiro Metalurgista e de Qualidade, Gerência de Suporte Técnico à Laminação a Quente da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁵ Sócio da A.B.M. Engenheiro Metalurgista e Mestre em Engenharia, Gerência de Laminação de Tiras a Quente da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

- INTRODUÇÃO

As vantagens inerentes ao processo de lingotamento contínuo de placas, não só em termos da redução do custo produtivo, como também da melhor qualidade interna dos semi-produtos, fizeram com que essa nova rota produtiva fosse ganhando participação cada vez maior no ambiente siderúrgico ao longo dos últimos 30 anos. O resultado final desse avanço está sendo a extinção progressiva, em escala mundial, do binômio lingotamento convencional/laminação desbastadora voltada para a produção de placas.

A eliminação desse antigo processo coloca em jogo a fabricação de chapas grossas extra-pesadas, que ainda são produzidas exclusivamente a partir de placas provenientes de lingotes convencionais. Esta preferência por um processo obsoleto é justificada pelo fato de que o grau adicional de deformação a quente proporcionado pela laminação desbastadora é um fator fundamental para se conseguir as características de propriedades mecânicas, homogeneidade microestrutural/mecânica e sanidade interna desejadas para este tipo de produto. De fato, lingotes apresentam espessura da ordem de 600 mm, que corresponde ao dobro da maior espessura de placa normalmente obtida pelo lingotamento contínuo.

Essa nova situação impõe que sejam encontradas alternativas para se manter viável a produção de chapas grossas extra-pesadas. Há diversas soluções propostas para este problema: manutenção de algumas poucas unidades para produção de placas através da laminação desbastadora de lingotes; aquecimento de lingotes em fornos *batch* seguido de desbaste em laminadores de chapas grossas; produção de *slingots*, ou seja, placas extra-pesadas obtidas diretamente através de fundição; produção de placas pesadas, com 400 mm de espessura, através de lingotamento contínuo; e aumento da redução no sentido da largura.

Todas essas soluções, contudo, exigem investimentos e/ou desenvolvimentos com algum grau de risco. É conveniente, portanto, verificar previamente até que ponto contramedidas mais simples, sem necessidade de grandes investimentos, podem resolver essa questão. Este é o objetivo deste trabalho.

Ao se trocar um lingote convencional com 600 mm de espessura por uma placa lingotada convencionalmente, com espessura máxima de 260 mm, perde-se 84% da deformação real que anteriormente era aplicada ao esboço. Essa redução no grau de deformação global pode implicar em menores graus de refino microestrutural, de homogeneização das segregações e de melhoria da sanidade interna da chapa grossa.

Há basicamente quatro possibilidades para se recuperar a parcela de refino microestrutural que se perde ao se substituir o lingote convencional pela placa lingotada continuamente: otimização da composição química; redução da temperatura de reaquecimento; intensificação do processo de laminação a quente; e aplicação de tratamento térmico de normalização [1-5]. O ideal é que elas sejam aplicadas de forma simultânea, maximizando assim seu efeito no refino microestrutural.

A adição de elementos de liga que refinem o grão do produto, como titânio, é um bom ponto de partida para se recuperar o refino microestrutural perdido. A redução da temperatura de reaquecimento sem dúvida contribuiria para a diminuição do tamanho de grão inicial do esboço. Contudo, é uma medida de difícil implantação industrial, devido à alta inércia térmica dos fornos de reaquecimento de placas.

A intensificação do processo de laminação é sem dúvida a recomendação mais importante, dado seu efeito hegemônico sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do produto. O principal problema da laminação de chapas grossas pesadas está no fato de que a deformação não penetra totalmente ao longo da espessura do material, concentrando-se em sua periferia.

Algumas alterações a serem adotadas no processo de laminação a quente podem intensificar a penetração da deformação ao longo da espessura, maximizando seu efei-

to de refino e homogeneização microestrutural no núcleo do esboço. São elas: aumento do grau de deformação aplicado por passe, resfriamento intensificado da superfície do laminado e redução da velocidade periférica dos cilindros durante a aplicação do passe [6-9].

Por sua vez, um tratamento adicional de normalização proporciona refino de grão e maior homogeneização aos esboços como laminados. Contudo, é necessário determinar seu efeito quantitativo sobre as propriedades mecânicas do produto [10-12].

- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Para esta primeira abordagem foi eleito o desenvolvimento de chapas grossas extra-pesadas conforme a norma ASTM A-36, material com grande participação no mix produtivo do Laminador de Chapas Grossas da COSIPA. Foram escolhidas três espessuras de produto para esta experiência: 100, 120 e 150 mm. Sua largura foi fixada em 2.000 mm e o comprimento em 5.000 mm, pois são dimensões típicas de produtos que apresentam fácil venda. Eles foram produzidos a partir de placas com 260 mm de espessura.

A escolha da composição química foi praticamente imediata, sendo proposta uma liga baseada naquela que já era utilizada atualmente na produção de chapas grossas extra-pesadas ASTM A-36 via lingotamento convencional-laminação desbastadora. Adicionou-se titânio para proporcionar refino de grão intensificado ao material, em função do baixo grau de deformação a quente total aplicado neste tipo de produto.

As únicas alterações relevantes ocorridas no processo de laminação de chapas grossas foi reduzir ligeiramente a temperatura para início de laminação, aplicação do máximo grau de deformação possível por passe e o uso de descamação em todos os passes, com o intuito de se criar uma superfície mais fria e dura em relação ao núcleo o que, em tese, contribui para a aumentar a penetração da deformação. Este procedimento ainda apresenta a vantagem de abaixar a temperatura de acabamento, o que não deixa de ser mais um fator favorável para o refino do material. As demais possibilidades para intensificar o efeito da deformação não foram adotadas em função dos transtornos operacionais que poderiam acarretar e que já foram descritos na Introdução.

As chapas grossas extra-pesadas assim obtidas foram ultrassonadas de acordo com a norma ASTM 435, que constitui um requisito típico para este tipo de material.

Foi extraída uma amostra dos esboços através de corte a gás para os ensaios de caracterização do material como laminado. Esse corte foi feito na extremidade do esboço e somente até a metade da largura, extraíndo-se dessa forma apenas um “dente” do esboço. A seguir, os laminados foram encaminhados ao forno de tratamento térmico, onde foram normalizados. Após este tratamento, foi extraído o “dente” remanescente do esboço para servir de amostra para ensaios de caracterização.

As duas amostras extraídas para cada laminado, tanto no estado como laminado quanto no normalizado, foram caracterizadas do ponto de vista metalográfico e mecânico. Os ensaios mecânicos - tração e impacto Charpy a 0°C - foram efetuados em corpos de prova extraídos a $\frac{1}{4}$ da espessura, na direção transversal.

- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Os esquemas de passe para a laminação das chapas grossas extra-pesadas deveriam ser executados de forma que cada passe apresentasse grau de penetração de deformação **m** maior ou igual a 0,8. O valor do parâmetro **m** de cada passe é calculado a partir da divisão do comprimento do arco de contato pela média das espessuras de entrada e saída do

laminado em questão. Infelizmente nem todos os passes puderam atender a essa condição, em função de outras limitações de processo - condição de mordida, carga, torque, garantia de boa planicidade, etc. De todo modo, todos os esboços foram aprovados nos ensaios de ultra-som, independentemente do esquema de passes aplicado.

A figura 1a mostra os valores de limite de escoamento conseguidos para os esboços, como laminados e após normalização. Pode-se observar que, em todos os casos, o limite de escoamento atendeu aos requisitos da norma ASTM A36, ou seja, ficou acima de 250 MPa. Não houve variação significativa desse parâmetro com a espessura final do produto nem com a temperatura de acabamento, conforme mostrado nas figuras 1a e b, tanto na condição como laminado quanto após normalização. Em outras palavras, não houve correlação entre o limite de escoamento e a deformação total a quente da placa, pelo menos na faixa entre 1,7:1 até 2,6:1. Este resultado é surpreendente devido ao refino de grão que certamente deve ter ocorrido no material mais fino mas, na verdade, apenas confirmou constatações anteriores [8].

A figura 2 permite constatar que a normalização promoveu uma inversão no *ranking* dos valores do limite de escoamento dos materiais. Ou seja, esboços que apresentaram valores máximos desse parâmetro após a laminação a quente passaram a ter valores mínimos após a normalização, e vice-versa. Durante a normalização de aços ao carbono ocorrem basicamente duas alterações microestruturais: refino no tamanho de grão e esferoidização da perlita [12]. Enquanto o primeiro fator tende a elevar o limite de escoamento do material, o segundo promove amaciamento. Logo, o que se pode concluir desses resultados é que o efeito da esferoidização da perlita proporcionado pela normalização tendeu a ser superior ao do refino de grão nos materiais que apresentaram limite de escoamento máximo após a laminação a quente, e vice-versa.

Os valores de limite de resistência obtidos, imediatamente após a laminação e pós-normalização, são mostrados nas figuras 3a e b. De forma análoga ao ocorrido para o limite de escoamento, todos os esboços atenderam aos requisitos especificados na norma ASTM A36 (ou seja, os valores do limite de resistência mantiveram-se entre 400 e 550 MPa), independentemente das condições de processo utilizadas. Não foram detectados efeitos da temperatura de acabamento e do grau de deformação total aplicado à placa sobre o limite de resistência, confirmando as conclusões de [8]. Ao contrário do que ocorreu com o limite de escoamento, o limite de resistência após a normalização foi diretamente proporcional ao obtido no estado como laminado, conforme aponta a figura 4.

O alongamento total dos esboços melhorou com o aumento da espessura do esboço, conforme mostrado na figura 5a, talvez por conta do aumento de grão que ocorre em função do menor grau de deformação total correspondente. Já a figura 5b mostrou que a temperatura de acabamento também não exerceu efeito sobre o alongamento total do esboço, quer no estado laminado, quer após normalização. Pode-se observar que esse tratamento térmico tendeu a melhorar ligeiramente a ductilidade do material, conforme mostrado na figura 6.

De forma análoga ao observado quanto ao alongamento total, também a resistência ao impacto determinada pelo ensaio Charpy aumentou com a espessura do produto, tanto para o material como laminado quanto normalizado, conforme mostra a figura 7a. Isto confirma as constatações já observadas em [2] para a resistência ao impacto Charpy medida em corpos de prova transversais. Provavelmente essa diminuição na tenacidade do material com o aumento do grau de deformação total decorra do maior alongamento verificado nas inclusões de sulfetos [2]. O mesmo gráfico permite verificar que, de maneira geral, o tratamento térmico de normalização tendeu a aumentar a tenacidade do material.

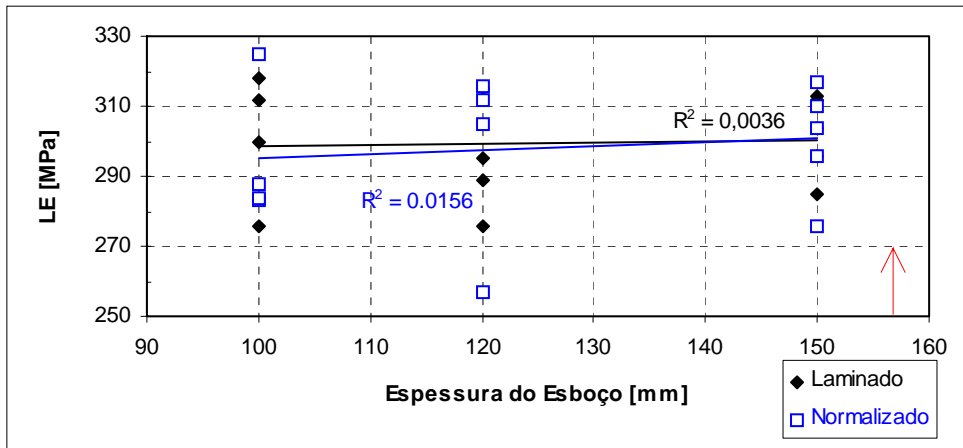
O abaixamento da temperatura de acabamento efetivamente elevou a tenacidade do material, conforme ilustra a figura 7b. Como seria de se esperar, o efeito da temperatura de acabamento - vale dizer, a declividade das retas obtidas - é maior para o material la-

minado do que o normalizado. Isto demonstra o efeito homogeneizador deste tratamento térmico complementar. Contudo, os coeficientes de correlação r^2 apresentaram valores muito baixos, em decorrência da ampla dispersão associada à resistência ao impacto medida pelo ensaio Charpy. O gráfico da figura 8 permite verificar que o valor da resistência ao impacto do material como laminado não afetou significativamente os resultados obtidos no mesmo material após normalização adicional.

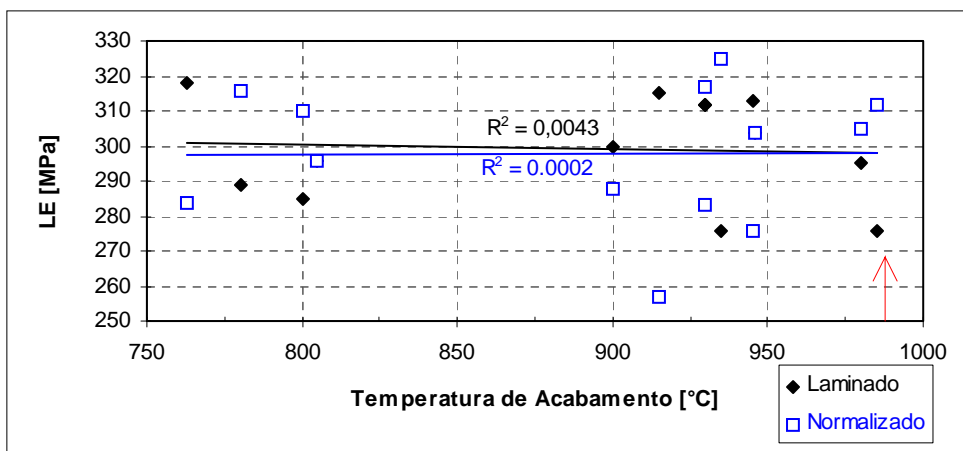
- CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho sobre a produção de chapas grossas grau ASTM A-36, com espessuras entre 100 e 150 mm, a partir de placas do lingotamento contínuo, permitiu chegar às seguintes conclusões:

- ⇒ Uma vez que não foram detectados problemas de sanidade interna e os requisitos de propriedades mecânicas da norma ASTM A36 foram plenamente atendidos para todos os esboços, aparentemente o esquema de passes utilizado se mostrou satisfatório, apesar de não ter sido o ideal do ponto de vista técnico;
- ⇒ A temperatura de acabamento não alterou significativamente as propriedades mecânicas do material, com exceção da tenacidade, que melhorou com a redução desse parâmetro;
- ⇒ A deformação total aplicada ao esboço não exerceu efeito sobre os limites de escoamento e resistência, pois elas se revelaram praticamente independentes da espessura final do esboço. Contudo, observou-se que o aumento da espessura tendeu a aumentar discretamente a ductilidade e a tenacidade do material, expressas respectivamente pelo alongamento total e a energia absorvida no ensaio Charpy a 0°C. Tal fato pode, a princípio, ser atribuído ao menor grau de bandejamento microestrutural que tende a ocorrer nos esboços mais pesados e também ao menor grau de alongamento das inclusões de sulfetos;
- ⇒ A normalização exerceu efeito máximo no limite de escoamento e a alteração promovida foi grande o suficiente para provocar reversão nos valores obtidos após laminação. Para as demais propriedades - limite de resistência, alongamento total e tenacidade - o efeito foi bem menor, surgindo uma tendência à equalização, embora ela tenha ficado longe de ser completa;
- ⇒ Os resultados deste trabalho mostram que a produção de chapas grossas estruturais extra-pesadas a partir de placas lingotadas continuamente é possível. O próximo passo consistirá no desenvolvimento da fase de consolidação deste produto, visando determinar a capacidade do processo, principalmente em termos da garantia da sanidade interna do produto.



(a)



(b)

Figura 1: Limite de escoamento dos esboços extra-pesados na condição como laminado e normalizado, em função da a) espessura final do esboço e b) temperatura de acabamento.

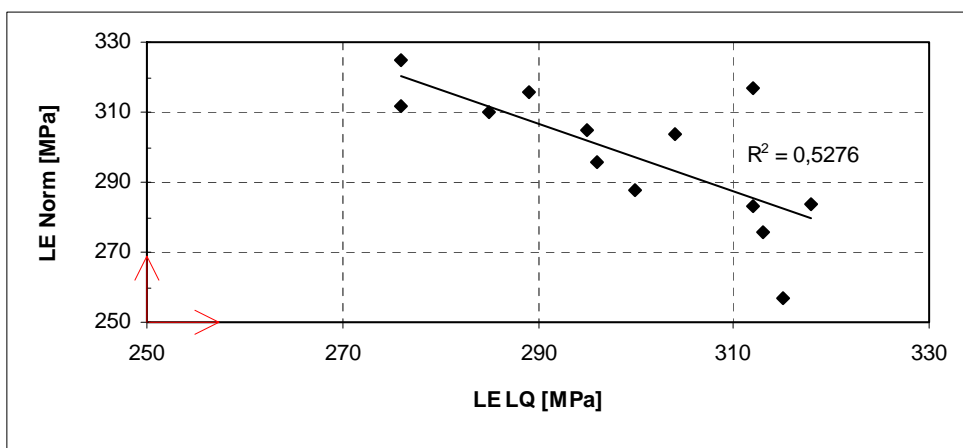
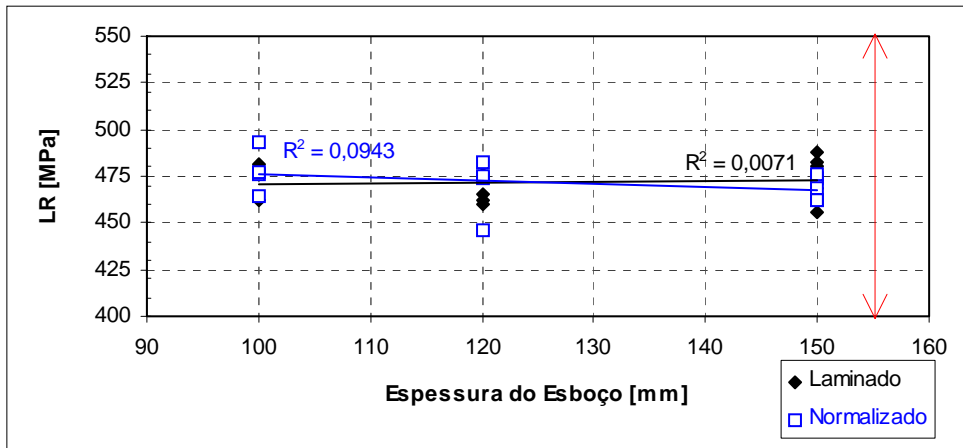
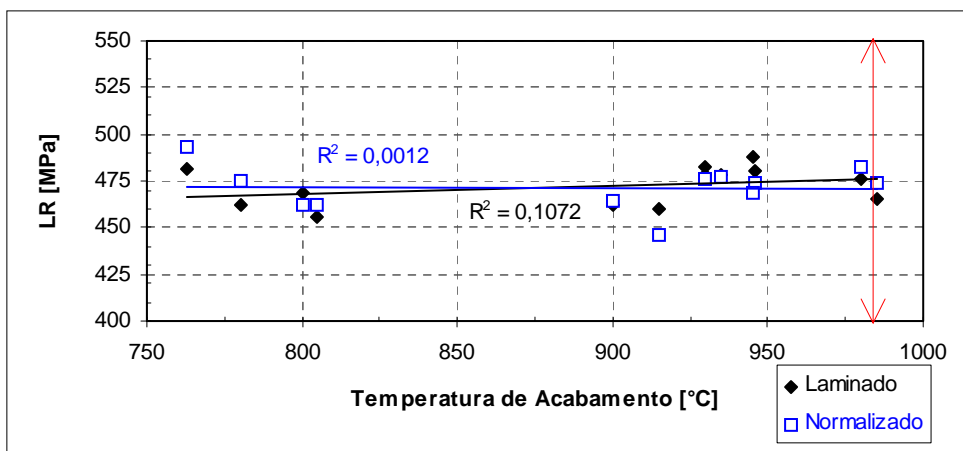


Figura 2: Efeito do tratamento térmico de normalização sobre o limite de escoamento dos esboços aqui estudados.



(a)



(b)

Figura 3: Limite de resistência dos esboços extra-pesados na condição como laminado e normalizado, em função da a) espessura final do esboço e b) temperatura de acabamento.

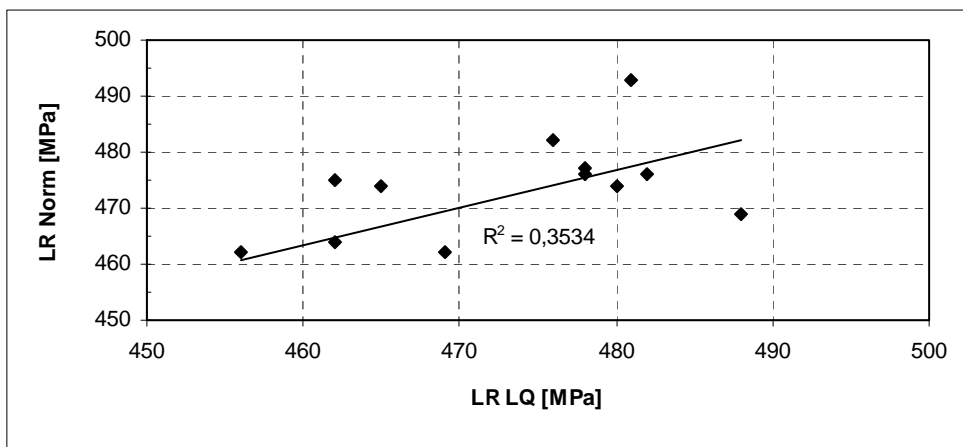
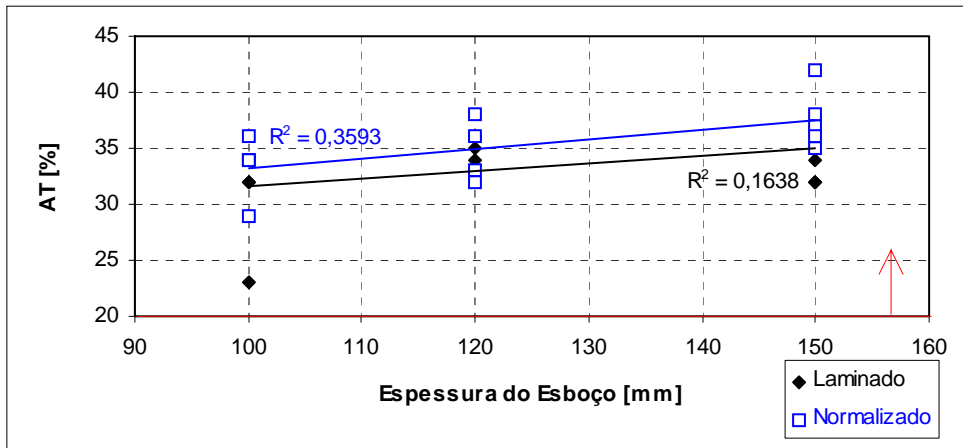
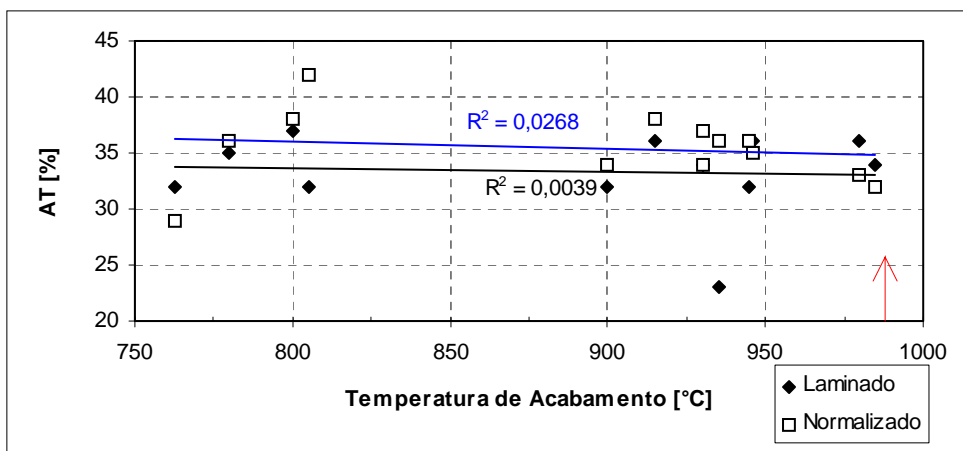


Figura 4: Efeito do tratamento térmico de normalização sobre o limite de resistência dos esboços aqui estudados.



(a)



(b)

Figura 5: Alongamento total dos esboços extra-pesados na condição como laminado e normalizado, em função da a) espessura final do esboço e b) temperatura de acabamento.

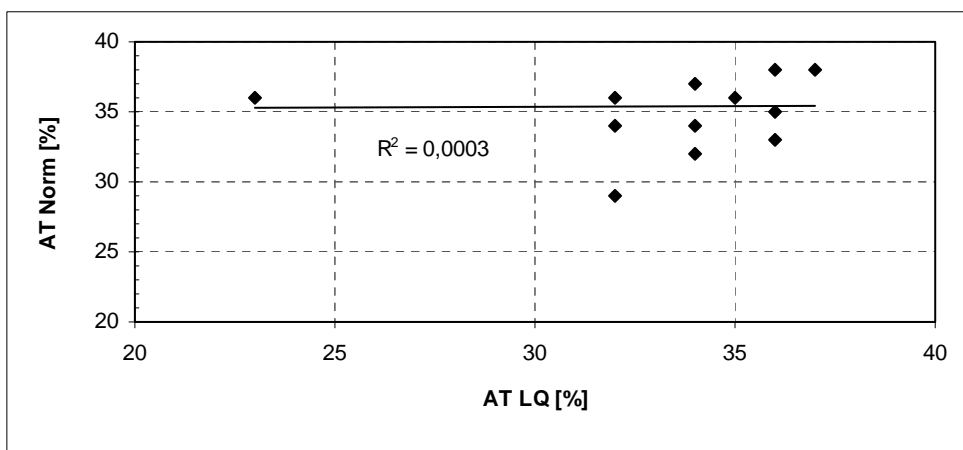
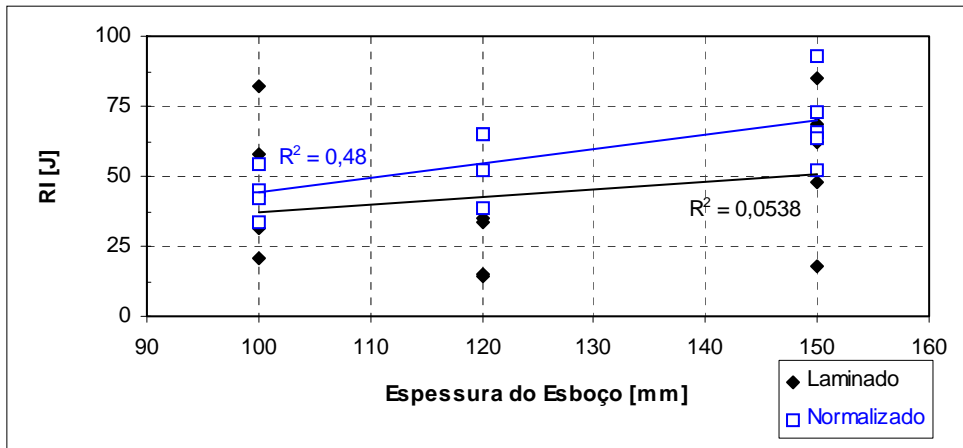
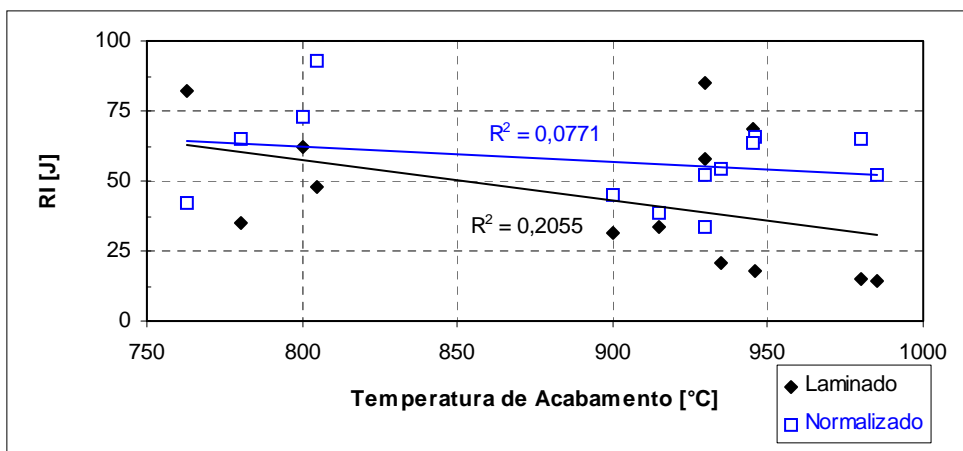


Figura 6: Efeito do tratamento térmico de normalização sobre o alongamento total dos esboços aqui estudados.



(a)



(b)

Figura 7: Resistência ao impacto a 0°C dos esboços extra-pesados na condição como laminado e normalizado, em função da a) espessura final do esboço e b) temperatura de acabamento.

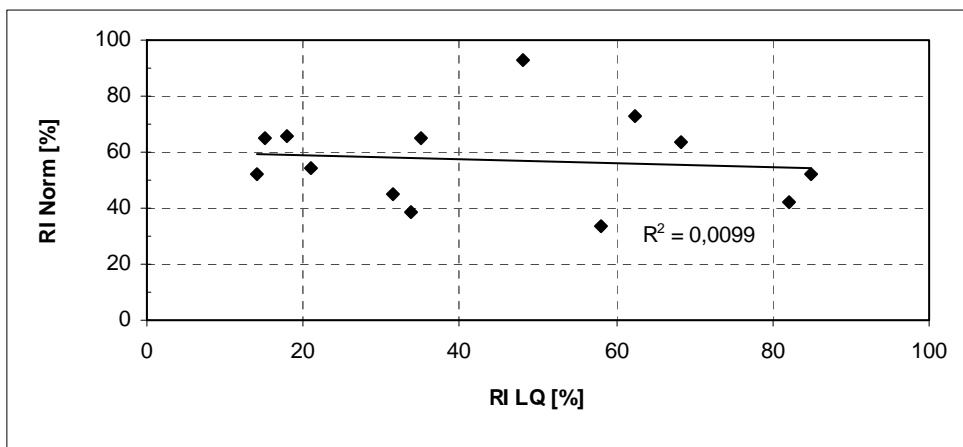


Figura 8: Efeito do tratamento térmico de normalização sobre a resistência ao impacto a 0°C dos esboços.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RATNAPULI, R.C. e outros. XLV CONGRESSO ANUAL DA A.B.M. Anais. Rio de Janeiro, Setembro 1990, p. 311-330.
2. OKUMURA, N. e outros. Tetsu-to-Hagané, March 1984, 388-395.
3. OKUMURA, N. e outros. Tetsu-to-Hagané, February 1984, 216-236.
4. NOZAKI, N. e outros. The Sumitomo Search, November 1978, 15-29.
5. TAGAWA, H. e outros. Tetsu-to-Hagané, January 1987, 123-129.
6. ASFAHANI, R.I. e outros. In: XXXI MECHANICAL WORKING AND STEEL PROCESSING. Proceedings. AIME, Warrendale, 1994, 371-378.
7. WILLIAMS, J.G. e outros. HSLA '85. Proceedings. American Society for Metals, Beijing, 1985, p. 567-578.
8. SILVEIRA, J.H.D. e outros. Metalurgia e Materiais, Dezembro 1992, 767-772.
9. ARAKI, K. e outros. Kawasaki Steel Giho, 3, 1998, 181-185.
10. ASKOLDOV, V.I. e outros. Steel in the USSR, July 1976, 384-386.
11. FONTES, R.S. e outros. Metalurgia ABM, Junho 1979, 429-433.
12. TSUKADA, K. e outros. Nippon Kokan Technical Report Overseas, 32, 1981, 1-11.

PRODUCTION OF EXTRA-HEAVY, ASTM A36 GRADE PLATES FROM CONTINUOUSLY CAST SLABS

The better quality and lower production cost of continuously cast slabs are promoting an extensive shutdown of the conventional ingot production-slab rolling lines all over the world. However, there is some flat rolled products, like extra-heavy plates, which are still produced exclusively from ingot-rolled slabs. These conventionally produced slabs have a more refined structure, due to the contribution of the hot slabbing of the ingots. The aim of this work was to check the production feasibility of 100 to 150 mm thick plates, grade ASTM A36, hot rolled from 260 mm thick continuously cast slabs rolled according to a modified process. Due to operational restrictions such modifications could not be completely followed, but the produced material complied to all aimed requisites regarding internal soundness and mechanical properties. An additional normalizing heat treatment improved slightly ductility and toughness of plates, but did not affect significantly mechanical strength. The results got in this work indicate that the production of ASTM A36 extra-heavy plates from continuously-cast slabs is feasible, with no need to apply a posterior normalizing treatment.

Palavras-Chaves: continuous casting, extra-heavy plates, hot rolling