

ANÁLISE DA HOMOGENEIDADE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS AO LONGO DA ESPESSURA DE CHAPAS GROSSAS EXTRA-PESADAS ¹

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

RESUMO

A melhor qualidade e os menores custos operacionais decorrentes do uso de lingotamento contínuo levaram à supressão da produção de placas através de lingotamento convencional e laminação desbastadora em escala mundial. Esta transição, contudo, acarretou algumas consequências inconvenientes. Por exemplo, o desaparecimento desta rota de produção de placas está provocando problemas na fabricação de chapas grossas extra-pesadas. Como as placas lingotadas continuamente são muito menos espessas que lingotes convencionais, não é possível aplicar a redução relativa mínima de espessura imposta por algumas normas de produto entre o semi-produto bruto de fusão e o laminado final. Este trabalho tem como objetivo mostrar que foram conseguidos bons níveis de homogeneidade em termos de propriedades mecânicas e microestruturas ao longo da espessura de chapas grossas extra-pesadas grau ASTM A36, laminadas a partir de placas lingotadas continuamente. Este bom resultado foi obtido mesmo aplicando-se esquemas de laminação com passes relativamente leves, abaixo do recomendado pela literatura. Este fato pode ser decorrência do uso de jatos de descamação em todos os passes de laminação, os quais resfriam as camadas periféricas do esboço, tornando-as mais duras e propagando com mais intensidade a deformação superficial decorrente da passagem do material entre os cilindros de laminação até o núcleo do laminado.

Palavras-Chave: chapa grossa extra-pesada, lingotamento contínuo, propriedades mecânicas

¹ Contribuição Técnica ao XXXVII Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – A.B.M., Curitiba PR, 20 a 22 de Setembro de 2000.

² Sócio da A.B.M. Engenheiro de Materiais, M.Eng., Analista de Processos da 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. Engenheiro Metalurgista e de Qualidade, Gerente de Suporte Técnico da Laminação a Quente da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: jackson@cosipa.com.br

⁴ Sócio da A.B.M. Engenheiro Metalurgista, M. Eng., Gerente da Laminação de Tiras a Quente da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁵ Sócio da A.B.M. Assistente Técnico da Gerência de Assistência Técnica da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

- INTRODUÇÃO

O substituição quase total do antigo processo de produção de placas através de lingotamento convencional mais laminação desbastadora pelo lingotamento contínuo foi praticamente inevitável, em função das melhores características de qualidade e menores custos promovidos por esta nova rota.

Tal fato, porém, criou um sério problema para a fabricação de chapas grossas extra-pesadas, ou seja, com espessura acima de 80 mm. Uma vez que a máxima espessura da placa lingotada continuamente é da ordem de 240 mm, teoricamente somente se pode garantir níveis adequados de sanidade interna e homogeneidade microestrutural para chapas grossas com espessura de até 80 mm, ou seja, um terço da espessura original da placa bruta de fusão. Isto é o que impõem as normas de chapas grossas para vasos de pressão, que exigem que o semi-produto bruto de fusão que dará origem ao laminado apresente espessura igual a pelo menos três vezes a espessura final da chapa [1].

Este impasse está provocando o questionamento deste antigo paradigma frente a uma nova realidade industrial. Torna-se necessário verificar até que ponto essa restrição continua procedente, considerando-se os grandes avanços no refino e limpeza dos aços que ocorreram ao longo das últimas décadas, bem como novas técnicas de laminação a quente.

Um trabalho anterior [2] mostrou que o uso de placas lingotadas continuamente para a produção de chapas grossas extra-pesadas grau ASTM A36, com espessura de até 150 mm, é perfeitamente viável. Conseguiu-se naquela ocasião atender não só aos requisitos mecânicos especificados por aquela norma, como também aos níveis de sanidade interna impostos pela norma ASTM A435. Contudo, de acordo com a literatura [3], as deformações por passe aplicadas durante a laminação a quente desses materiais não foram suficientes para promover a plena deformação do núcleo do laminado. Os valores do adimensional m (a razão entre o comprimento do arco de contato dos cilindros e a média das espessuras de entrada e saída) relativos aos passes de laminação ficaram abaixo de 0,8, que é o valor mínimo recomendado pela literatura.

Portanto, o objetivo do presente artigo está em complementar os resultados apresentados naquele primeiro trabalho, verificando a homogeneidade das propriedades mecânicas e microestruturas determinadas ao longo da espessura daquelas chapas grossas extra-pesadas. Pretende-se, dessa maneira, averiguar se o uso de passes de laminação relativamente leves levou a diferenças muito significativas entre as propriedades mecânicas da camada periférica do esboço e da sua região central.

- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta experiência foram produzidas chapas grossas extra-pesadas com espessuras de 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 no mercado brasileiro. Eles foram produzidos a partir de placas com 260 mm de espessura.

As únicas alterações relevantes feitas no processo de laminação dessas chapas grossas extra-pesadas foram uma ligeira redução na temperatura de início de laminação, aplicação do máximo grau de deformação possível por passe e o uso de jatos de descamação em todos os passes. Esta última medida teve o intuito de se criar superfícies mais frias e duras em relação ao núcleo do esboço 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 [2].

Como já foi destacado anteriormente, o esquema de passes aplicado nessa oportunidade não foi o ideal. Em função da necessidade de se manter a planicidade e formato

regular do esboço os passes de laminação foram relativamente leves, fazendo com que o adimensional m variasse numa faixa de valores entre 0,25 e 0,70, inferiores portanto ao mínimo de 0,8 proposto pela literatura [3].

Foi extraída uma amostra de cada esboço 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”. 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 aos ensaios de caracterização do material normalizado.

As duas amostras extraídas para cada esboço, 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 - e as análises microestruturais foram efetuados em corpos de prova extraídos a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura, na direção transversal.

- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Todos os requisitos de propriedades mecânicas impostos pela norma ASTM A36, em termos de limite de escoamento, resistência e alongamento total, foram satisfeitos em todas as chapas grossas aqui estudadas, laminadas ou normalizadas, tanto nas amostras extraídas a $\frac{1}{4}$ quanto a $\frac{1}{2}$ da espessura.

A figura 1 mostra os resultados de limite de escoamento obtidos para as chapas grossas extra-pesadas no estado como laminado ou após normalização determinados em dois pontos da espessura, bem como as diferenças verificadas entre eles. Pode-se observar que a diferença média entre o valor desse parâmetro medido entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura foi muito pequena e constante no caso das chapas como laminadas, da ordem de apenas 7 MPa em favor do limite de escoamento medido a $\frac{1}{4}$ da espessura. As diferenças máximas situaram-se em torno de +15/-30 MPa. Já no caso do material normalizado a diferença entre os limites de escoamento determinados a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ do esboço tornou-se mais aleatória, variando na faixa entre ± 25 MPa. Contudo, neste caso, a reta de regressão que mostra a relação entre os valores de limite de escoamento determinados a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da largura está bem mais próxima da reta ideal do gráfico que indica a situação de igualdade entre esses limites de escoamento. Ou seja, a normalização tendeu a equalizar os valores de limite de escoamento, independentemente do local da espessura onde foi extraída a amostra para o ensaio de tração.

Os limites de resistência determinados para as chapas grossas extra-pesadas, a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura da chapa, estão mostrados na figura 2. No caso dos esboços como laminados não ocorreu uma relação simples entre os valores desse parâmetro determinados para os dois diferentes valores de espessura. Para limites de resistência abaixo de 470 MPa verificou-se que os valores obtidos a $\frac{1}{2}$ da espessura foram maiores que os conseguidos a $\frac{1}{4}$; acima de 470 MPa a tendência observada foi exatamente a contrária. As diferenças entre os limites de resistência determinados a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura para o material como laminado variaram entre +12 a -15 MPa. O efeito homogeneizador da normalização fica bastante evidente ao se observar o gráfico relativo ao material normalizado: a reta de regressão entre os dados de limite de resistência determinados nas duas espessuras praticamente coincide com a reta ideal. A diferenças observadas entre os valores do limite de resistência determinados nos dois pontos da espessura ficaram compreendidas na faixa entre +9/-17 MPa; elas também passaram a apresentar resultado mais aleatório.

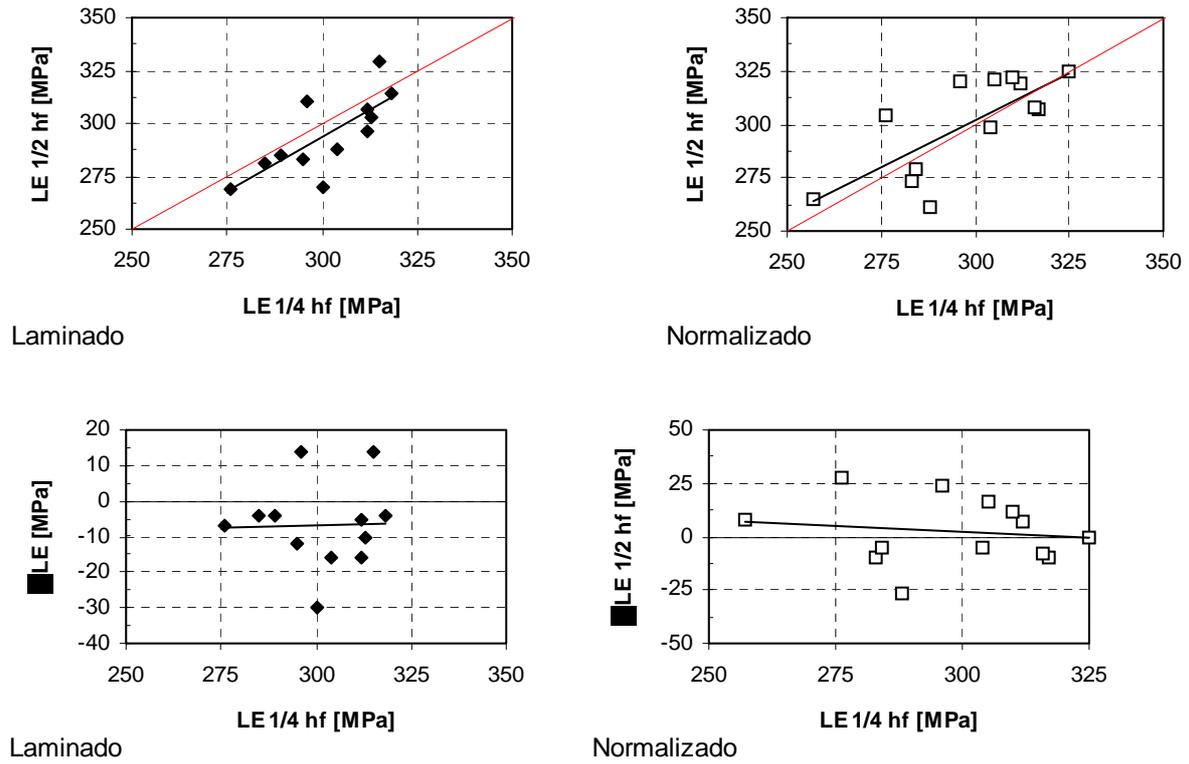


Figura 1: Limites de escoamento das chapas grossas extra-pesadas como laminadas e normalizadas, medidos a $1/4$ e $1/2$ da espessura, e as diferenças observadas entre eles.

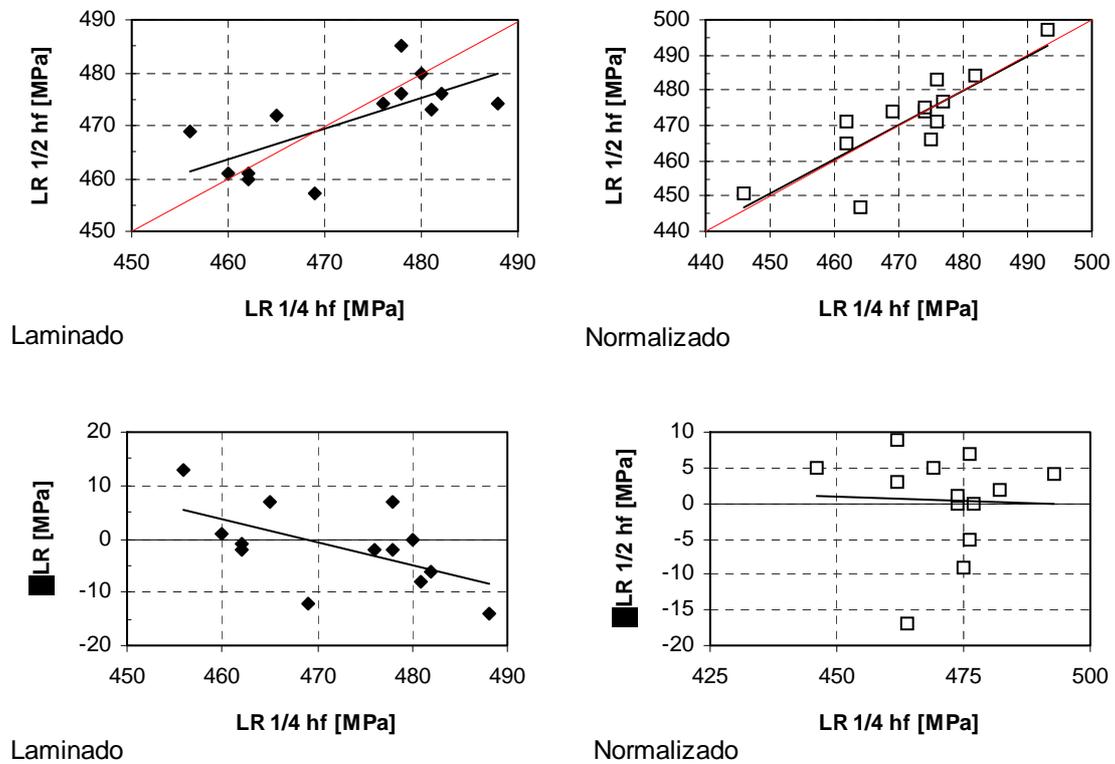


Figura 2: Limites de resistência das chapas grossas extra-pesadas como laminadas e normalizadas, medidos a $1/4$ e $1/2$ da espessura e as diferenças observadas entre eles.

É interessante notar que as relações entre os valores de razão elástica determinados a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura, mostrados na figura 3, apresentaram as mesmas tendências já verificadas no caso do limite de resistência. Isto ocorreu em virtude do fato das diferenças do limite de resistência ao longo da espessura serem maiores do que as verificadas para o limite de escoamento, o que fez com que os valores da razão de escoamento - que nada mais é do que a razão limite de escoamento/limite de resistência - refletissem a evolução ditada pelo limite de resistência. No caso do material como laminado, as diferenças observadas nos valores da razão elástica obtidos a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura variaram entre + 3,0 a -6,0%; em chapas normalizadas, essas diferenças ficaram entre +5,0 a -4,0%.

O alongamento total medido a $\frac{1}{4}$ da espessura tendeu a ser maior que o obtido a $\frac{1}{2}$ da espessura no caso dos esboços como laminados. Surpreendentemente, a normalização realçou ainda mais essa tendência, conforme mostra a figura 4; a reta de regressão obtida para os materiais tratados termicamente ficou tão afastada da ideal quanto a conseguida para os materiais como laminados. Além disso, a faixa de valores de alongamento total apresentada pelos esboços normalizados foi mais extensa do que a observada nos materiais como laminados. De fato, no caso dos materiais como laminados essa faixa se estendeu aproximadamente entre 32 e 37%; a normalização a alargou, ficando entre 29 e 42%. Contudo, as diferenças entre os valores de alongamento total medidos a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura foi menor para os materiais normalizados: elas ficaram em torno de +4 e -6% para os esboços como laminados e entre +3 e -4% para os normalizados.

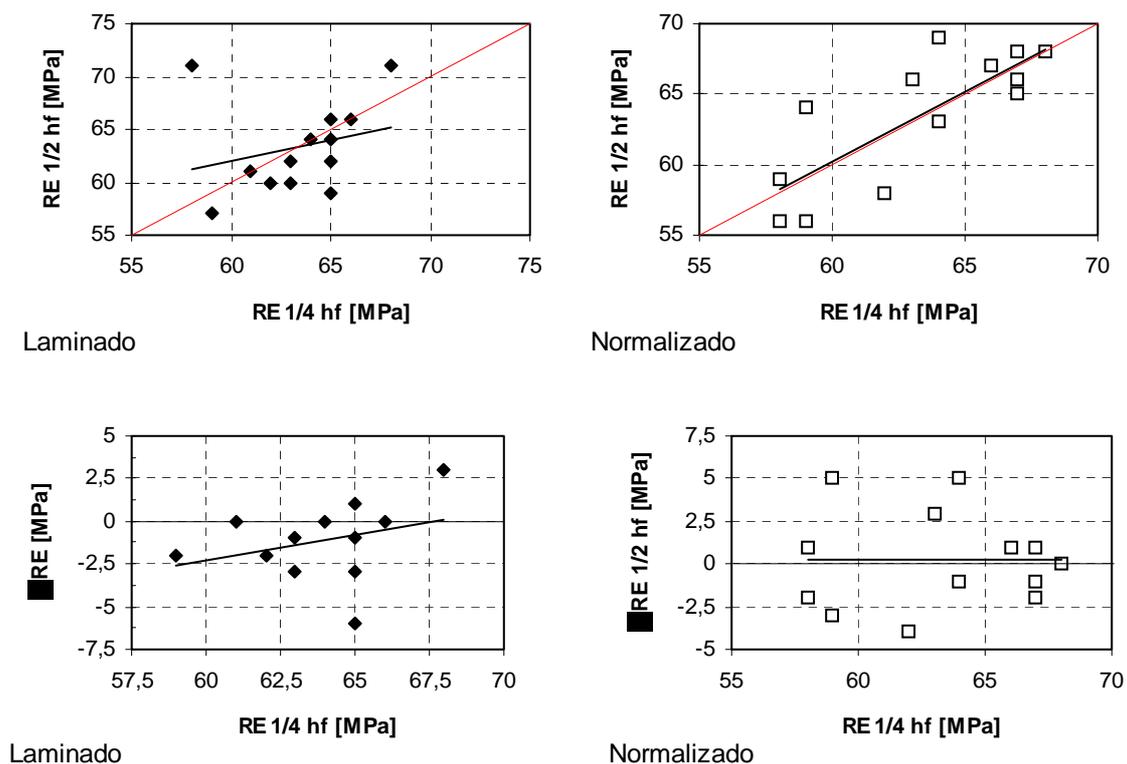


Figura 3: Razões elásticas das chapas grossas extra-pesadas como laminadas e normalizadas, medidas a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura, e as diferenças observadas entre elas.

Os resultados obtidos em termos da tenacidade medida pelo ensaio Charpy a 0°C , mostrou que, no caso dos materiais que apresentaram valores de energia relativamente

baixos, abaixo de 50 J, os resultados obtidos a $\frac{1}{2}$ da espessura tenderam a ser maiores que os obtidos a $\frac{1}{4}$ da espessura. Quando o produto apresentava tenacidade acima daquele valor crítico a situação se invertia. O tratamento térmico de normalização tendeu a uniformizar os valores obtidos, aproximando-os da reta ideal. Além disso, aumentou os valores mínimos de energia absorvida no ensaio de impacto, que passaram de 15 J, no caso dos materiais como laminados, para 30 J. A normalização também reduziu a diferença observada entre os valores de resistência ao impacto determinados a $\frac{1}{4}$ e a $\frac{1}{2}$ da espessura do esboço. Enquanto que para os esboços como laminados essa diferença oscilou entre +65 e -50 J, a normalização reduziu essas diferenças, que passaram a variar entre +20 e -38 J.

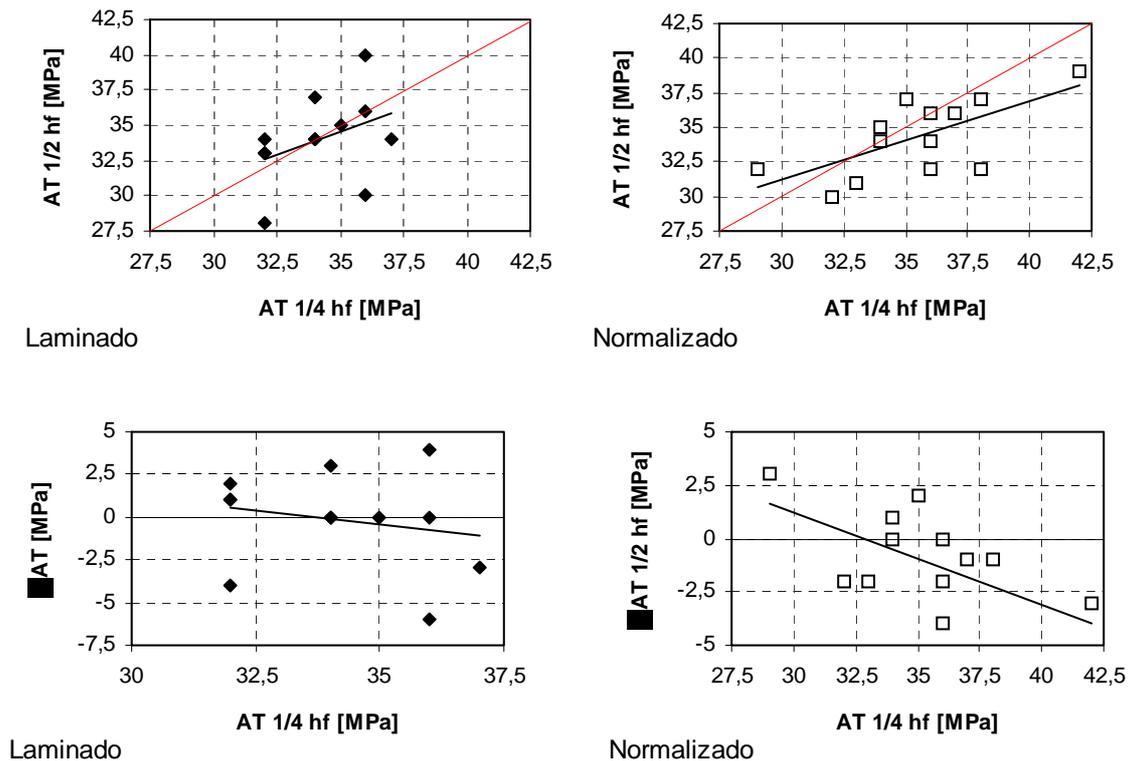


Figura 4: Alongamentos totais das chapas grossas extra-pesadas como laminadas ou normalizadas, medidos a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura, e as diferenças observadas entre elas.

A análise global dos resultados permite concluir que as diferenças observadas nos parâmetros mecânicos determinados a partir de corpos de prova extraídos a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura das chapas grossas extra-pesadas não foram significativas, oscilando dentro da faixa de dispersão experimental dos próprios ensaios laboratoriais. O tratamento térmico de normalização contribuiu para reduzir essas diferenças, aumentando o grau de homogeneidade ao longo da espessura do material. A resistência ao impacto foi a única propriedade onde essas diferenças foram um pouco mais significativas, mas deve ser levado em conta que os resultados obtidos no ensaio Charpy apresentam inerentemente altas dispersões [4].

A análise microestrutural mostrou que o tamanho de grão assumiu valor ASTM igual a 6 para os materiais como laminados e 7 para os normalizados. Como já seria de se esperar, o tratamento de normalização promoveu refino microestrutural. Não foram constatadas diferenças significativas nesse parâmetro microestrutural em função da posição da amostra ao longo da espessura, tanto para o material como laminado quanto para o normaliza-

do. Também a fração de perlita presente na microestrutura não variou de forma significativa, tanto em função da condição do laminado quanto do local da espessura onde foi feita a amostragem, ficando por volta de 23%.

Logo, apesar das informações presentes na literatura sinalizarem que as reduções por passe aplicadas nos esboços estudados neste trabalho terem sido insuficientes [3], conseguiu-se um grau de homogeneidade razoável entre as propriedades mecânicas e microestruturas determinadas para amostras extraídas a $\frac{1}{4}$ e a $\frac{1}{2}$ da espessura do esboço. Esta constatação pode ter sido decorrência do uso de jatos de descamação em todos os passes de laminação, os quais resfriam de forma mais acentuada as camadas periféricas do esboço. Sua menor temperatura as torna mais rígidas, fazendo com que elas atuem como se fossem duas placas paralelas comprimindo o núcleo do laminado. Desse modo, ocorre a propagação mais intensa da deformação até o núcleo do laminado, concorrendo para o refino e homogeneização de sua microestrutura, o que já havia sido proposto por outros autores [5].

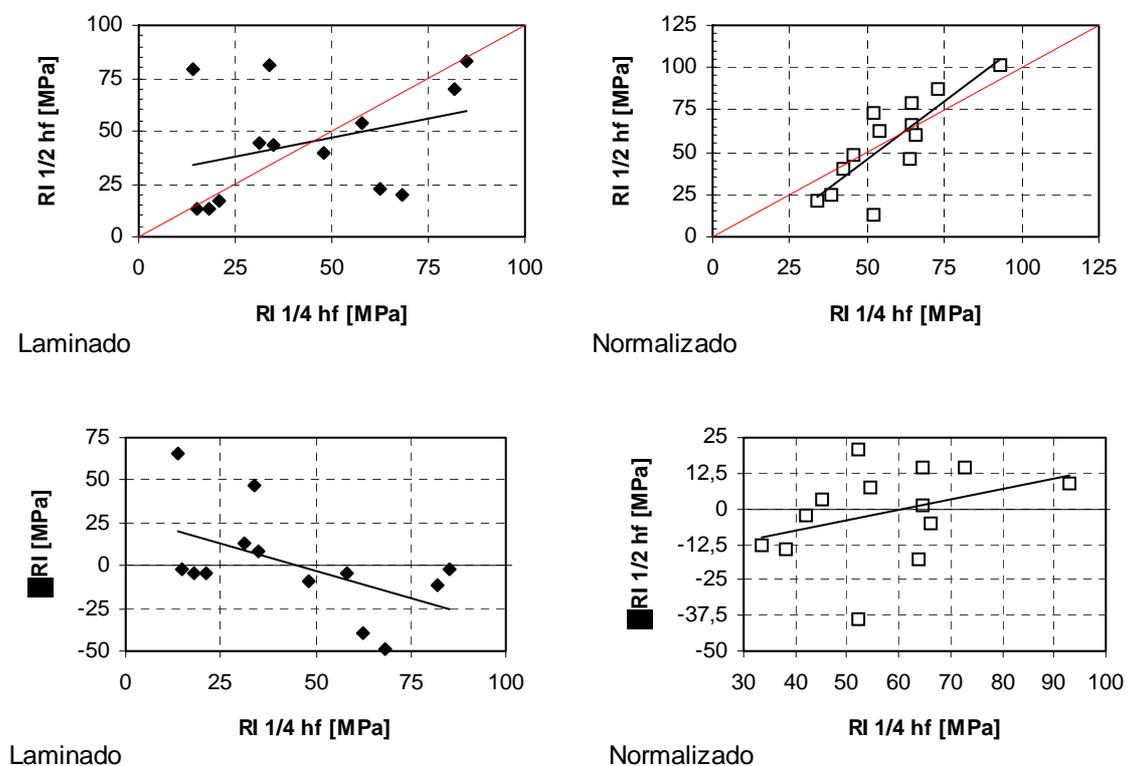


Figura 5: Valores de resistência ao impacto, determinados a 0°C, das chapas grossas extra-pesadas como laminadas e normalizadas, medidos a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura, e as diferenças observadas entre eles.

- CONCLUSÕES

A análise das propriedades mecânicas de amostras extraídas a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura de chapas grossas extra-pesadas grau ASTM A36, com espessuras entre 100 e 150 mm, laminadas a partir de placas lingotadas continuamente, permitiu chegar às seguintes conclusões:

⇒ Todas as chapas grossas extra-pesadas estudadas apresentaram valores de propriedades

mecânicas (limite de escoamento, de resistência e alongamento total) dentro da faixa especificada pela norma ASTM A36, tanto nas amostras extraídas a $\frac{1}{4}$ quando a $\frac{1}{2}$ da espessura;

- ⇒ As diferenças observadas entre as propriedades mecânicas determinadas a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura dos esboços, tanto como laminados quanto normalizados, não foram significativas, ficando dentro dos limites do erro experimental dos ensaios laboratoriais. As diferenças observadas nos valores de resistência ao impacto foram significativas, mas podem decorrer da grande dispersão que normalmente está associada aos ensaios Charpy;
- ⇒ As amostras normalizadas apresentaram menores diferenças entre os valores de propriedades mecânicas determinadas a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura do esboço que as observadas para o material como laminado. Isto já era esperado, dado o caráter homogeneizador deste tratamento térmico;
- ⇒ As diferenças em termos de tamanho de grão ao longo da espessura não foram significativas, ao menos dentro do procedimento utilizado para sua medição, ou seja, comparação com a tabela ASTM. Já o material normalizado apresentou tamanho de grão menor que o como laminado. As frações de perlita na microestrutura foram praticamente iguais para todos os materiais, independentemente do ponto da espessura considerado ou condição de tratamento do laminado;
- ⇒ O esquema de passes aplicado, apesar de suas deformações por passe serem excessivamente leves de acordo com as informações da literatura, revelou-se adequado para proporcionar níveis de propriedades adequados não só na camada periférica dos esboços, como também em seu núcleo. Esse maior grau de homogeneidade pode ter sido conseguido em função do uso de jatos de descamação em cada passe de laminação.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM. Standard Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels. ASTM Standard A20, 1999.
2. GORNI, A.A. e outros. In: XXXVI Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Setembro de 1999.
3. OKUMURA, N. e outros. Tetsu-to-Hagané, February 1984, p. 216-236 (Tradução CIT-COSIPA 1119).
4. SIEWERT, T.A. e outros. In: Pendulum Impact Testing: A Century of Progress, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 1999.
5. ASFAHANI, R.I. e outros. In: XXXI MECHANICAL WORKING AND STEEL PROCESSING. Proceedings. AIME, Warrendale, 1994, 371-378.

- ABSTRACT

HOMOGENEITY ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES ACROSS THE THICKNESS OF EXTRA-HEAVY STEEL PLATES

The better quality and lower costs that characterize the use of continuous casting forced the suppression of the old slab production route comprising conventional ingot casting and slabbing rolling all over the world. This transition, however, led to some inconvenient consequences. For example, the production of extra-heavy plates became more difficult. As continuously cast slabs are thinner than conventional slabs it became impossible to apply a minimum thickness reduction rate between the as-cast slab and the final product, as required by some plate standards. This paper shows that good homogeneity levels along thickness can be got in terms of mechanical properties and microstructures for ASTM A36 extra-heavy plates produced from continuously cast slabs. This good result was got even using a pass schedule with relatively weak individual deformations, below the minimum values recommended by the literature. It is believed that this apparently unfavourable condition was compensated by the use of descaling high pressure water jets applied during each rolling pass, which chilled bar surfaces, making them more harder and intensifying strain penetration into the half-thickness of the rolling stock.

Keywords: extra-heavy plates, continuous casting, mechanical properties