



EFEITO DE UM TRATAMENTO TÉRMICO BRANDO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL ESTRUTURAL LAMINADO A FRIO¹

Paulo Leandro Silva Marinho²
Alexandre de Oliveira³
Ricardo Augusto Carvalho Silva⁴
Willy Ank de Moraes⁵

Resumo

Neste trabalho, foi avaliada e descrita a evolução das propriedades mecânicas de um tipo de aço tratado termicamente em diferentes temperaturas e tempos, após diferentes graus de redução a frio. Os dados destinam-se a auxiliar a aplicabilidade desta categoria de aço para a fabricação de fitas de embalagens de alta resistência e boa ductilidade. Obtiveram-se informações como limite de resistência (LR), alongamento (Along) e dureza Vickers (HV) em tratamentos feitos em temperaturas entre 300°C e 650°C, tempos de 15 minutos a 120 minutos e graus de redução a frio entre 69% e 73%.

Palavras-chave: Recozimento; Propriedades mecânicas; Fitas de embalagem; Aços.

EFFECT OF SOFT THERMAL TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL COLD MILL ROLLED STEEL

Abstract

In this work was evaluated and described the evolution of mechanical properties of a type of steel annealed by different temperatures and times, after different cold rolled reductions. The data will be used to apply this category of steel to produce high strength and good ductility package bands. It was obtained information about ultimate tensile strength (UTS), elongation (Elong) and Vickers Hardness (HV) after treatments in temperatures between 300°C to 650°C, times from 15 to 120 minutes and cold reductions rates about 69 to 73% in thickness.

Key-words: Annealing; Mechanical properties; Package band; Steels.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Aluno de Engenharia de Produção, Téc. em Metalurgia, Laboratorista da USIMINAS – Usina de Cubatão. E-mail: paulo.marinho@usiminas.com.

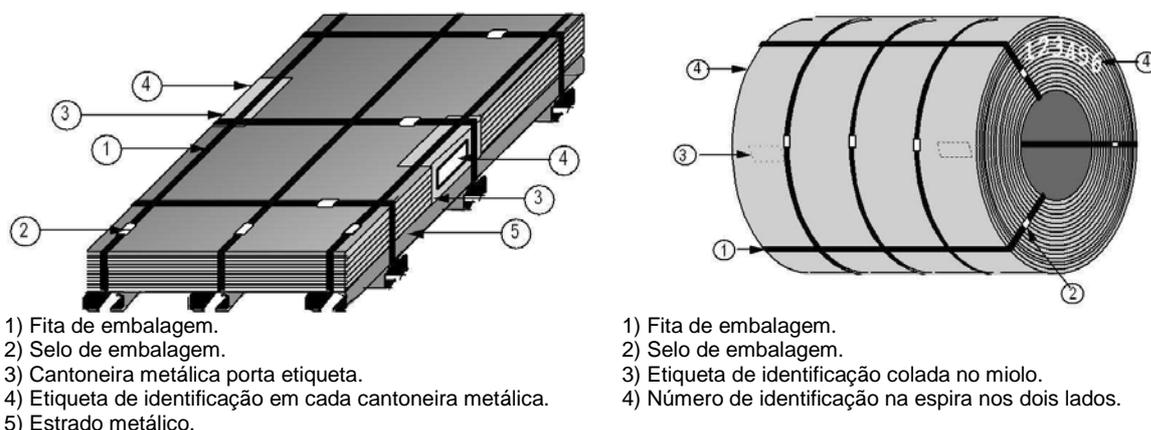
³ Eng^o Metalurgista, Engenheiro de Produto da Usiminas – Usina de Cubatão. E-mail: alexandre.oliveira@usiminas.com.

⁴ MBA, Eng^o Metalurgista, Engenheiro de Produto Sênior da Usiminas - Usina de Cubatão. E-mail: ricardo.silva@usiminas.com.

⁵ Doutorando, MSc., Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia, Engenheiro de Produto Sênior da Usiminas – Usina de Cubatão, Prof. da Faculdade de Eng^a da Unisanta e Diretor da divisão técnica “Aplicações de Materiais” da ABM. E-mails: willyank@unisanta.br; willy.morais@usiminas.com.

1 INTRODUÇÃO

Embalagens para produtos siderúrgicos planos devem apresentar a qualidade necessária para acondicionar produtos cujo peso pode chegar a algumas poucas dezenas de toneladas, como é o caso dos produtos oriundos dos novos laminadores a quente, como será o caso da Usiminas - Usina de Cubatão. Na Figura 1 ilustram-se dois tipos de embalagem para produtos siderúrgicos planos laminados a quente: 1.a chapas e 1.b bobinas.



- 1) Fita de embalagem.
- 2) Selo de embalagem.
- 3) Cantoneira metálica porta etiqueta.
- 4) Etiqueta de identificação em cada cantoneira metálica.
- 5) Estrado metálico.

- 1) Fita de embalagem.
- 2) Selo de embalagem.
- 3) Etiqueta de identificação colada no miolo.
- 4) Número de identificação na espira nos dois lados.

Figura 1 – Exemplos de tipos de embalagem para produtos laminados planos de aço em conformidade com a norma Mercosul NM73.⁽¹⁾

Nestas embalagens destaca-se o extensivo uso de fitas de embalagem (identificada na Figura 1 pelo número 1) que devem apresentar, obviamente, o mais baixo peso (espessura) possível, grande resistência mecânica para suportar o peso destes produtos e certa ductilidade para envolver convenientemente os produtos a serem embalados sem se romperem. Apesar da possível utilização de outros materiais, tais como o poliéster,⁽²⁾ para fazer fitas de embalagem ainda são muito utilizados os metais, particularmente os aços.

A utilização dos aços se deve à sua grande versatilidade, pois é possível, com uma mesma composição química básica, obter-se um largo espectro de propriedades. Estas são função da microestrutura do material, ou seja, da quantidade relativa e da forma de disposição das várias fases presentes na liga. Nas fitas de embalagem, as principais propriedades que estes materiais devem possuir são: ductilidade, resistência mecânica e baixo custo.

Existem dois processos básicos para a produção de fitas de embalagem de aço: (a) realização de um tratamento térmico brando em um aço encruado por laminação a frio e (b) utilização de um tratamento térmico de austêmpera. Ambos os processos permitem obter fitas de embalagem com grandes valores de resistência mecânica, porém, existem algumas particularidades nestes dois processos.

No processo de tratamento térmico para ajuste de um aço encruado por laminação a frio, o aço tem seu encruamento diminuído por um recozimento brando em temperaturas da ordem de 450°C. Esse tratamento não é feito com o objetivo de recristalizar o material, mas sim de recuperar parcialmente sua ductilidade. Este processo apresenta algumas características que o tornam mais econômico:

- ciclo mais curto de produção;
- não necessitar de temperaturas elevadas (necessárias para austenitização, como no outro processo); e
- não envolver banhos químicos (com sais fundidos ou chumbo líquido).

Entretanto, é limitada a capacidade de obter altos valores de resistência mecânica conjuntamente com uma boa ductilidade.

No processo de austêmpera, um aço com um valor de carbono equivalente mais elevado (da ordem de 0,50%C) é laminado a frio, austenitizado e posteriormente tratado por austêmpera. Este é um processo mais complexo, porque envolve temperaturas mais elevadas e um tratamento térmico que necessita de um meio líquido para manter a temperatura constante (austêmpera). Apesar da maior complexidade do tratamento, a estrutura bainítica oriunda deste tratamento oferece, em média, uma melhor combinação de propriedades de resistência e ductilidade.

Em ambos os casos, é possível obter e aperfeiçoar o tratamento de um aço para obter uma melhor combinação entre resistência mecânica e ductilidade. Porém, as etapas de produção deste aço, feito na siderúrgica, e seu tratamento térmico, feito no produtor de fitas de embalagem, apesar de serem complementares são etapas realizadas distintamente. O melhor tipo de aço pode até ser definido pela siderúrgica. Porém o melhor tipo de tratamento térmico aplicável a este aço deve ser analisado entre a siderúrgica e o produtor das fitas.

O efeito do tratamento realizado no produtor final das fitas de embalagem depende de vários parâmetros deste processamento, os quais já são conhecidos para os aços tipicamente utilizados. Porém, no desenvolvimento de um novo tipo de aço, no qual se deseja o máximo desempenho, deve-se buscar a melhor combinação destes parâmetros.

Assim, foi realizado um trabalho para averiguar o efeito de um tratamento térmico brando sobre as propriedades e microestrutura de uma nova proposta de aço para fitas de embalagem. Os resultados obtidos dos testes de amostras encruadas por laminação a frio e tratadas termicamente servem como critério de comparação com os resultados dos mesmos testes de caracterização feitos em amostras industriais, processadas no produtor de fitas. Os parâmetros obtidos de ensaios mecânicos de tração (limite de escoamento, limite de resistência e alongamento), dureza (Vickers) e análise microestrutural (metalografia) serão utilizados como critério de comparação entre as amostras laboratoriais e industriais.

Este artigo descreve os resultados obtidos nos ensaios realizados nas amostras laboratoriais. Foram empregadas diferentes combinações de temperatura e tempo para oferecer uma visão global do efeito de um tratamento térmico brando sobre as propriedades e microestrutura do aço analisado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A maneira mais simples de se obter um metal de maior resistência mecânica é reduzindo a movimentação das suas discordâncias, principal fenômeno responsável pela deformação plástica dos metais. Assim, é natural que, com o aumento da resistência mecânica, ocorra uma diminuição da capacidade de deformação plástica (ductilidade) do metal ou de sua conformabilidade.⁽³⁾ Para ilustrar o efeito da deformação a frio sobre as propriedades mecânicas dos aços, a Figura 2 apresenta a comparação da resistência mecânica (obtida em tração pura) entre um material laminado a quente e a do mesmo material após 10% de redução em laminação a frio.

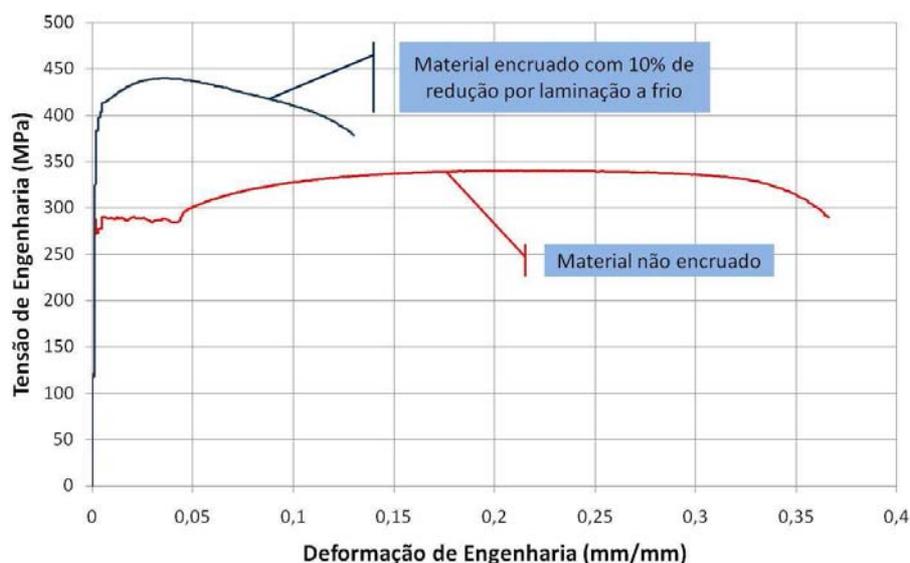


Figura 2 – Curvas tensão-deformação de engenharia obtidas em ensaios de tração para um aço comercial (classe SAE 1008 com espessura de 2,00mm) não encruado e com apenas 10% de redução por laminação a frio (CP com L0=50mm).

Conforme observado pelas curvas tensão x deformação de engenharia da Figura 2, obtidas em ensaios de tração, o encruamento aumenta rapidamente a resistência mecânica e reduz mais rapidamente ainda os valores de alongamento do metal. O tipo de aço estudado neste trabalho foi laminado a frio com 69% a 73% de redução na espessura; portanto, sofreu um grau de deformação e encruamento muito superior ao ilustrado na Figura 2. Adicionalmente, a composição do aço e o processo de fabricação foram definidos justamente para facilitar a laminação a frio, maximizar o grau de encruamento e também para oferecer um produto final mais estável.

Como características relevantes desta categoria de aço, pode-se citar:

- Composição química conforme norma NBR 6650 CF30:⁽⁴⁾
 - Carbono: $\leq 0,30\%C$;
 - Fósforo: $\leq 0,040\%P$;
 - Silício: $\leq 0,040\%P$;
 - Enxofre: $< 0,010\%$;
- Microestrutura:
 - perlita-ferrita (60%/40%) com bandeamento (antes de laminação a frio)
 - tratamento de controle de morfologia de inclusões
- Condição de fornecimento
 - bobinas de aço laminadas a frio com espessuras de 0,60 a 1,0mm
 - encruado sem recozimento pleno (conhecido como *Full-Hard*)

Diferentes bobinas laminadas a frio (*Full-hard*) foram amostradas e estas amostras foram preparadas para fornecer fitas de 1 polegada (25,4 mm) de largura, por aproximadamente 40 cm de comprimento. Essas são dimensões padrão utilizadas para realizar ensaios de tração para aprovação do material como fita de embalagem. A Figura 3 ilustra algumas das amostras conforme recebidas no laboratório da Usiminas - Usina de Cubatão assim como fotos do forno da marca *Bloomfield*, de atmosfera semi-controlada, empregado para realizar os tratamentos térmicos.

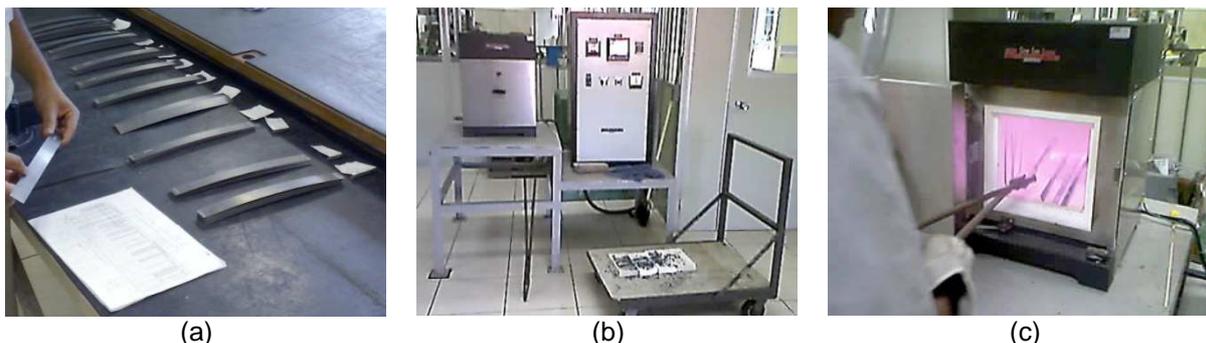


Figura 3 – (a) Inspeção de recebimento das amostras encruadas (“Full-Hard”). (b) Forno de atmosfera semi-controlada utilizado no tratamento térmico das amostras. (c) Forma de enformamento.

Os tratamentos térmicos foram feitos em um forno com controle automático de temperatura com a seguinte sequência de tratamento:

- aquecimento, a uma taxa de 10°C/min;
- manutenção de um pico de temperatura de tratamento (que será chamada de T_{Rec}) a um tempo definido (que será chamado de t_{Rec}); e
- resfriamento ao ar (similar ao processo no cliente).

Este tipo de ciclo de tratamento térmico brando foi escolhido para melhor simular o tipo de processamento que ocorre no fabricante das fitas de embalagem. As combinações de variáveis utilizadas para gerar as amostras foram:

- grau de redução a frio: 69%, 70% e 73%;
- temperatura de tratamento (T_{Rec}): 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 550°C e 650°C; e
- tempo de tratamento térmico (t_{Rec}): 15 min, 30 min, 45 min, 60 min e 120 min.

Após os tratamentos, as amostras foram testadas mecanicamente em tração e em dureza Vickers (carga de 5 kg), nos equipamentos de liberação padrão de produtos da Usiminas - Usina de Cubatão. Os dados obtidos foram analisados com o auxílio do software Origin 7.0: *Scientific Graphing and Data Analysis*®, produzido pela OriginLab para gerar equações que prevêm o comportamento do material nas diferentes combinações de tratamentos térmicos.

Além disso, as amostras foram analisadas por metalografia tanto no procedimento padrão para verificar o nível de inclusões, nas amostras polidas, quanto na verificação da microestrutura e sua evolução com os diferentes tratamentos. Utilizou-se ataque metalográfico com Nital a 2%.

3 RESULTADOS

Os resultados gerais da relação entre resistência mecânica e ductilidade estão ilustrados pelo gráfico da Figura 4. Neste gráfico, também foram colocados, para fins de comparação, alguns resultados do mesmo tipo de aço laminado a quente e a frio com recozimento com recristalização (símbolos abertos). Os resultados aparentemente seguem a típica tendência antagônica entre resistência e ductilidade.

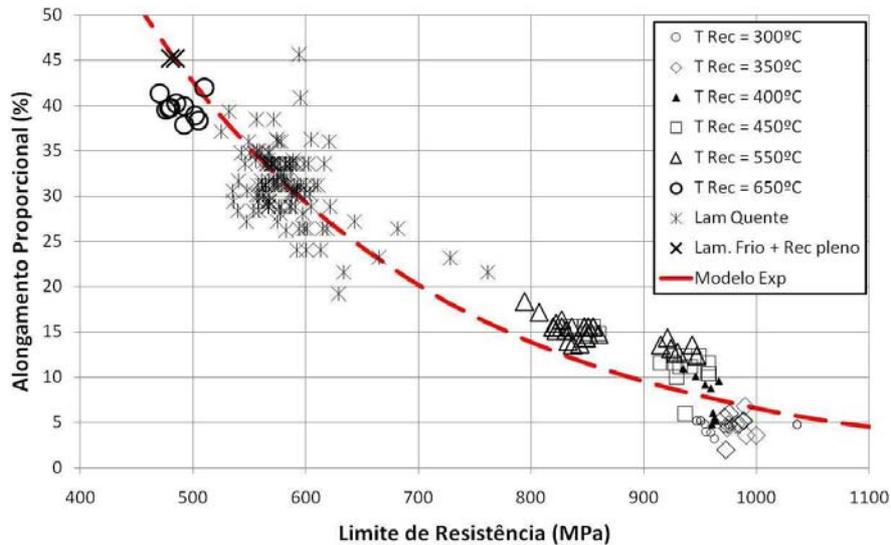


Figura 4 – Combinações de valores de limite de resistência (LR) e alongamento proporcional em diversas condições de tratamento do aço analisado ($R^2=0,860$).

O gráfico da Figura 4 ilustra uma regressão para demonstrar a correlação dos dados, genericamente descrita pela Equação 1:

$$\text{Along} = A \cdot e^{-B \cdot (\text{LR})} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde: Along é o valor do alongamento proporcional e LR significa Limite de Resistência obtido nos ensaios de tração. A ($>>0$) e B ($0 < B < 1$) são constantes da regressão.

A Figura 5 ilustra a variação no limite de resistência com a variação da temperatura de tratamento brando. Também estão ilustrados, na forma de duas linhas limítrofes, os valores médios de limite de resistência obtidos em bobinas laminadas a quente e a frio do mesmo aço. No modelamento dos dados, considerou-se que o valor mínimo para o limite de resistência seria exatamente a média obtida em recozimento pleno (neste caso, 480 MPa). Também admitiu-se que estes dados seriam descritos pela seguinte equação:

$$LR = LR_{Méd} - b \cdot ATAN \left[k \frac{(T_{Rec} - T_{Méd})}{\pi} \right] \quad (\text{Eq.2})$$

Onde: LR é o valor do limite de resistência (MPa) obtido a partir de um tratamento brando feito em uma temperatura T_{Rec} . Os parâmetros $b (>>0)$, $k (>0)$ e $\pi (3,14159\dots)$ são constantes da regressão. $LR_{Méd}$ (MPa) e $T_{Méd}$ (°C) são parâmetros de referência da inflexão na tendência dos dados.

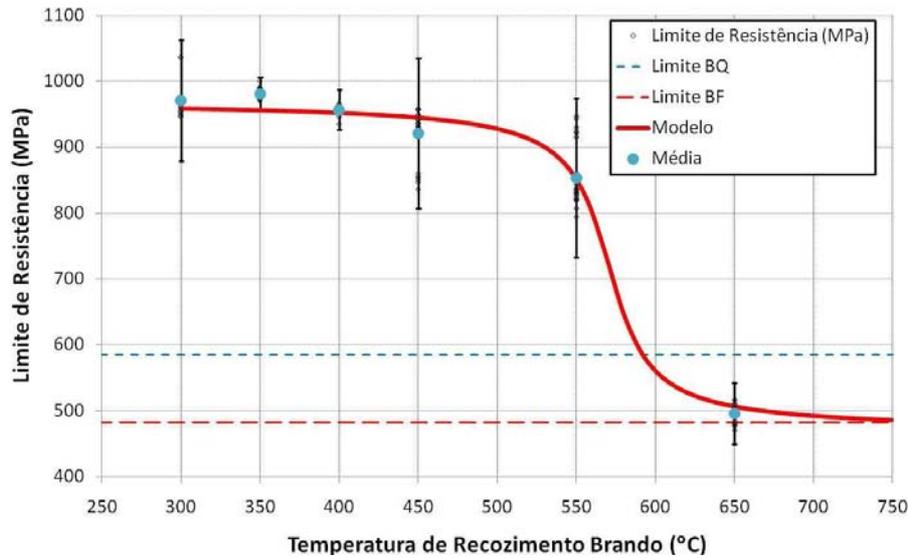


Figura 5 – Evolução nos valores de limite de resistência (LR) em função da temperatura de tratamento térmico brando ($R^2=0,946$).

A Figura 6 ilustra o mesmo tipo de análise, porém para os valores de dureza Vickers. Neste caso, também foi aplicada a Equação 2; porém, ao invés de utilizar-se os valores de LR (Limite de Resistência, em MPa), foram utilizados os valores medidos da dureza Vickers (HV, com carga de 5 kg). Os valores de dureza são tipicamente mais imprecisos que os valores de limite de resistência, porém são mais fáceis de medir e também de serem utilizados para acompanhar o desempenho do processo de produção na prática, daí o interesse em também verificar a evolução da dureza do material.

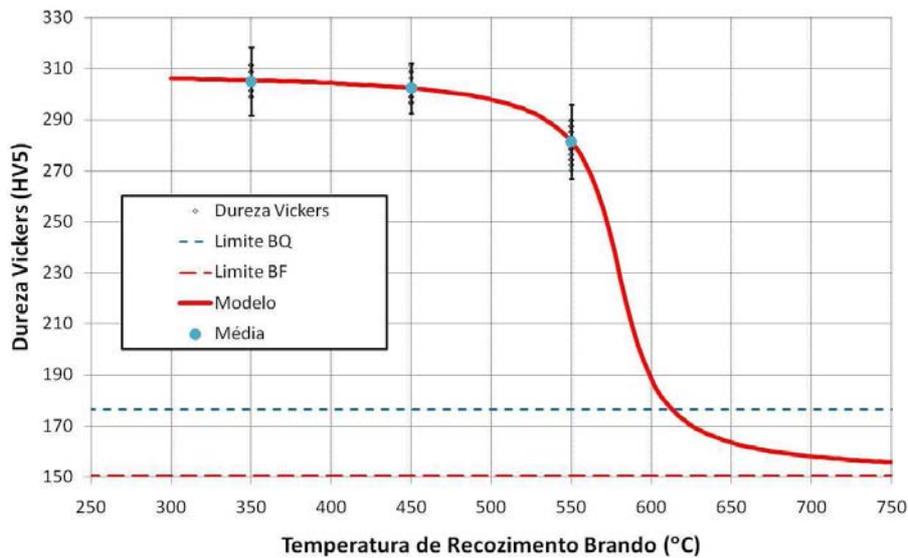


Figura 6 – Evolução nos valores de dureza Vickers (HV_{5kg}) em função da temperatura de tratamento térmico brando ($R^2=0,874$).

Existe uma relação entre dureza e resistência mecânica, dada por tabelas em várias normas, tais como na norma DIN EN ISO 18265.⁽⁵⁾ A partir dos dados desta norma, um dos autores já havia criado uma regressão entre dureza Vickers (HV) e limite de resistência (LR). A aplicabilidade desta regressão foi comprovada em situações

práticas na empresa e em seus clientes. Por isso, a equação a seguir tem sido utilizada na verificação (comparação) destas características mecânicas:

$$HV = -4,25 + 0,349 \times LR - 1,045 \cdot 10^{-4} \times (LR)^2 + 1,236 \cdot 10^{-7} \times (LR)^3 - 6,408 \cdot 10^{-11} \times (LR)^4 + 1,129 \cdot 10^{-14} \times (LR)^5 \quad (\text{Eq.3})$$

Onde: HV é o valor da dureza Vickers e LR é o valor do limite de resistência (MPa). Desta forma, uma das possibilidades para o controle de qualidade do processo de produção das fitas de embalagem é a medição de dureza. Isto pode ser feito em uma frequência maior do que os ensaios de tração e com bem menos recursos. Apesar da Equação 3 dizer respeito da dureza Vickers, outras relações similares já foram obtidas para outras escalas de dureza a partir da DIN EN ISO 18265.⁽⁵⁾ Evidentemente, existe uma imprecisão na utilização da dureza e no uso da Eq. 3. Por isso, esta medição deve ser feita apenas como forma de melhoria de controle de processo e não para controle de qualidade de produto. É uma prática comum em vários setores que lidam com produtos siderúrgicos utilizar mecanismos de controle de processo que não necessariamente podem ser utilizados para controle de produto. O gráfico da Figura 7 ilustra resultados reais de limite de resistência e dureza Vickers e a regressão representada pela Equação 3.

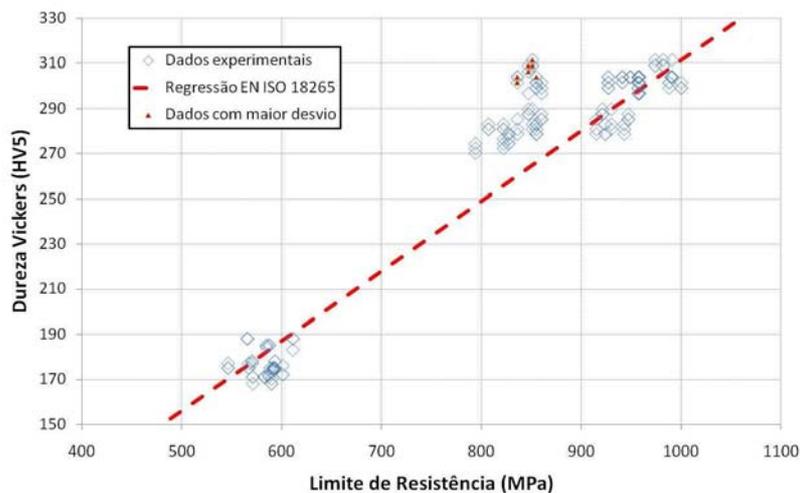


Figura 7 – Correlação entre o Limite de Resistência (LR) em tração e a dureza Vickers (HV_{5kg}) das amostras analisadas ($R^2=0,942$). Estão assinalados os resultados mais afastados da correlação.

Outra possibilidade que pode ser explorada é a verificação de heterogeneidades nas propriedades do material ou na forma de amostragem, pois desvios muito grandes entre o LR e a dureza, em relação às regressões, merecem ser analisados com mais cuidado. Por exemplo, nos dados mostrados na Figura 7, somente alguns pontos destacados neste gráfico apresentam um desvio acima de 12%. Verificou-se que estes dados estão relacionados a um único conjunto de amostras, tratadas no mesmo enformamento. Assim, o desvio insinua que ocorreu alguma variação no procedimento de teste destas amostras. Realmente, verificou-se que neste conjunto de amostras houve uma alteração não intencional na posição de medição da dureza. No que diz respeito à ductilidade, quantificada pelos valores de alongamento proporcional, os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 8. Para estes resultados a Equação que ajustou os dados foi similar à Equação 2, porém empregando tangente hiperbólica ao invés de arco tangente:

$$Along = Along_{Méd} - b \cdot \text{TANH} \left[k \frac{(T_{Rec} - T_{Méd})}{\pi} \right] \quad (\text{Eq.4})$$

Onde: Along é o valor do limite de resistência (MPa) obtido a partir de um tratamento brando feito em uma temperatura T_{Rec} . Os parâmetros $b(>0)$, $k(<0)$ e π (3,14159...) são constantes da regressão. $Along_{Méd}$ (Adim.) e $T_{Méd}$ (°C) são a referência da inflexão na tendência dos dados.

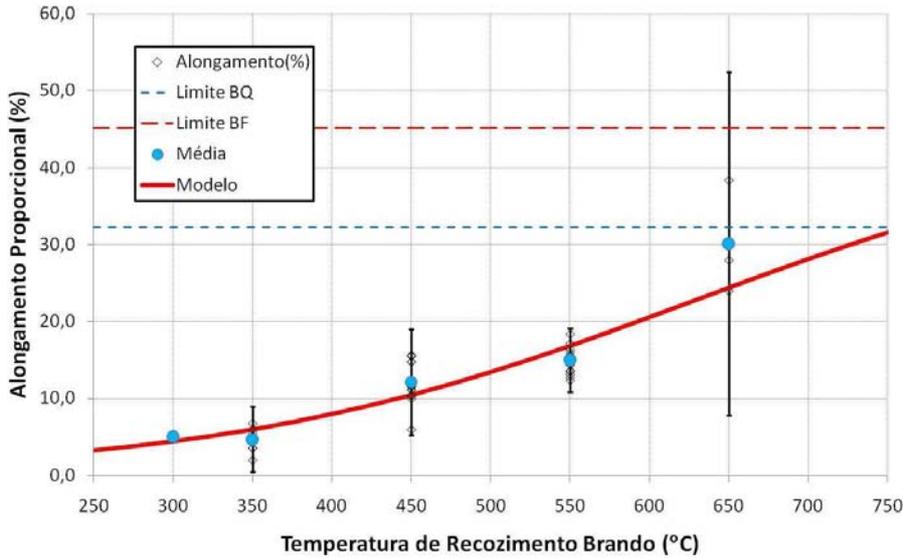


Figura 8 – Evolução nos valores de dureza Vickers (HV_{5kg}) em função da temperatura de tratamento térmico brando ($R^2=0,754$).

Os gráficos da Figura 9 ilustram os resultados de limite de resistência e alongamento proporcional em função do tempo de tratamento para duas temperaturas: 450°C e 550°C.

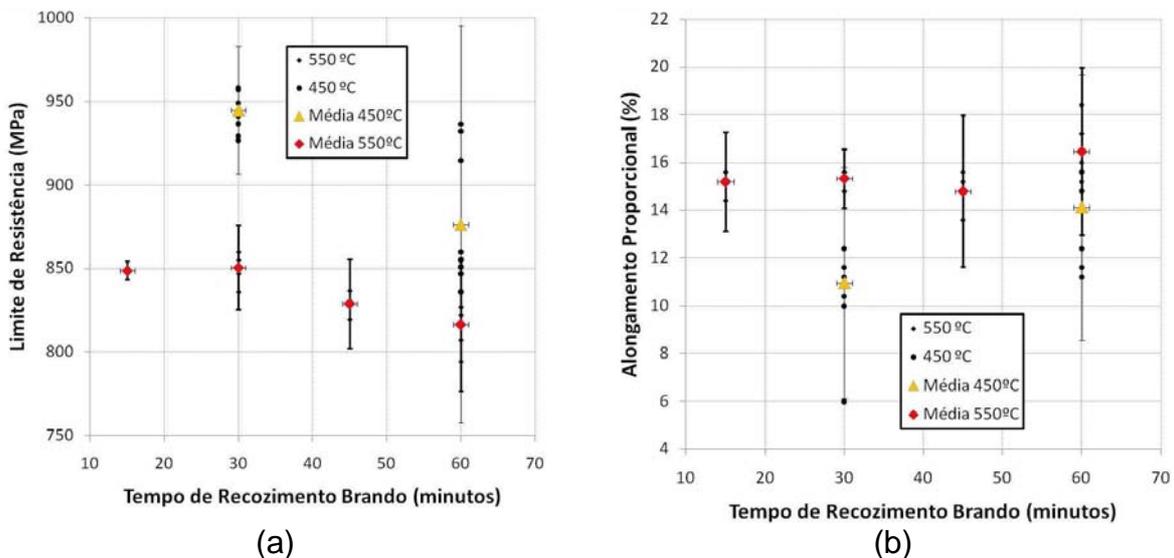


Figura 9 – Evolução nos valores de Limite de Resistência e Alongamento Proporcional em função do tempo de tratamento brando para duas temperaturas.

Quanto à estrutura, a Figura 10 ilustra a microestrutura original do material como laminado a quente. A Figura 11 ilustra a evolução da microestrutura encruada por

laminação a frio e submetida a três temperaturas de tratamento de tratamento brando a um tempo constante de 30 minutos. Finalmente, a Figura 12 ilustra a evolução da microestrutura tratada a uma temperatura constante de 450°C, porém em dois tempos diferentes: 30 minutos e 60 minutos.

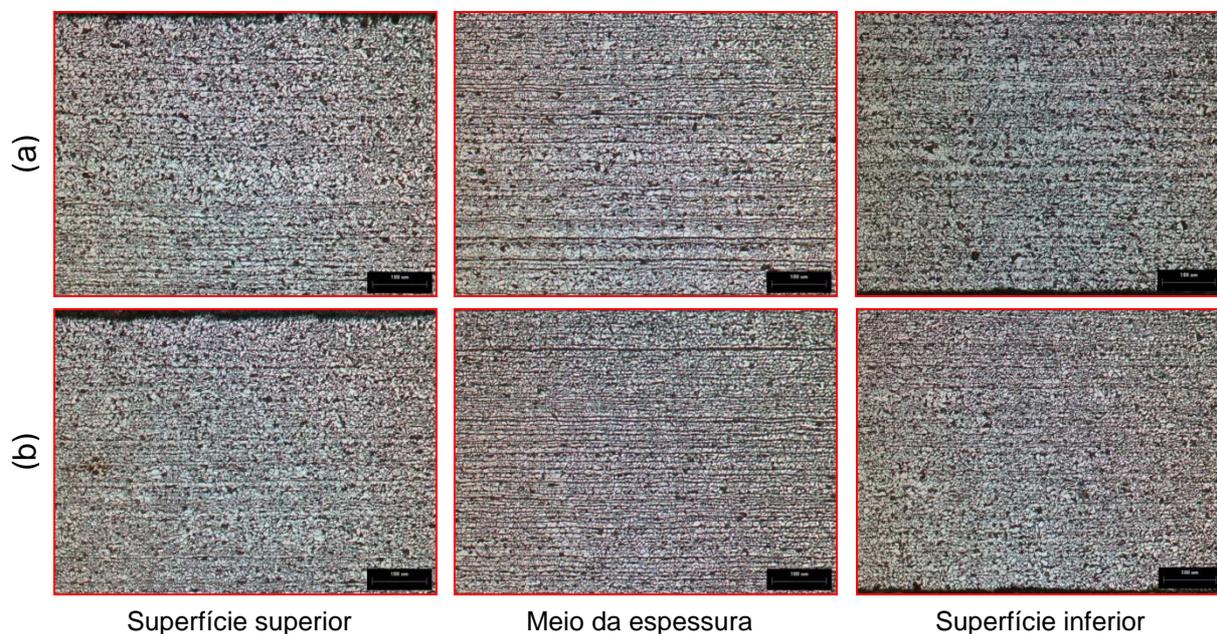


Figura 10 – Aspecto metalográfico de amostras retiradas na superfície superior, inferior e no meio da espessura de 2 bobinas laminadas a quente: (a) e (b).

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados ilustrados na Figura 4 pode-se prever as propriedades que podem ser obtidas no tratamento térmico do aço proposto. Por exemplo, para limite de resistência acima de 900 MPa é possível obter um alongamento proporcional acima de 10%. Este tipo de previsão, auxiliada pela (Eq.1) é bastante útil, pois permite estabelecer o enquadramento ou não dos aços analisados na categoria de resistência de fita de embalagem da norma de produto a que se destina este aço. Também é importante verificar como evoluem a resistência mecânica e a ductilidade ao longo dos tratamentos. Os parâmetros $T_{Méd}$ (°C) para as regressões do limite de resistência e dureza (Eq.2) são praticamente iguais. Isto era esperado, já que as duas variáveis possuem uma relação matemática entre estas (Eq. 3). Porém o parâmetro $T_{Méd}$ (°C) para a regressão do alongamento proporcional (Eq. 4) é maior do que no caso da resistência, o que pode ser notado ao se comparar as Figuras 5, 6 e 8. Isto indica que o ganho na ductilidade tem uma dinâmica ao longo do processo de tratamento térmico diferente da dinâmica de diminuição na resistência.

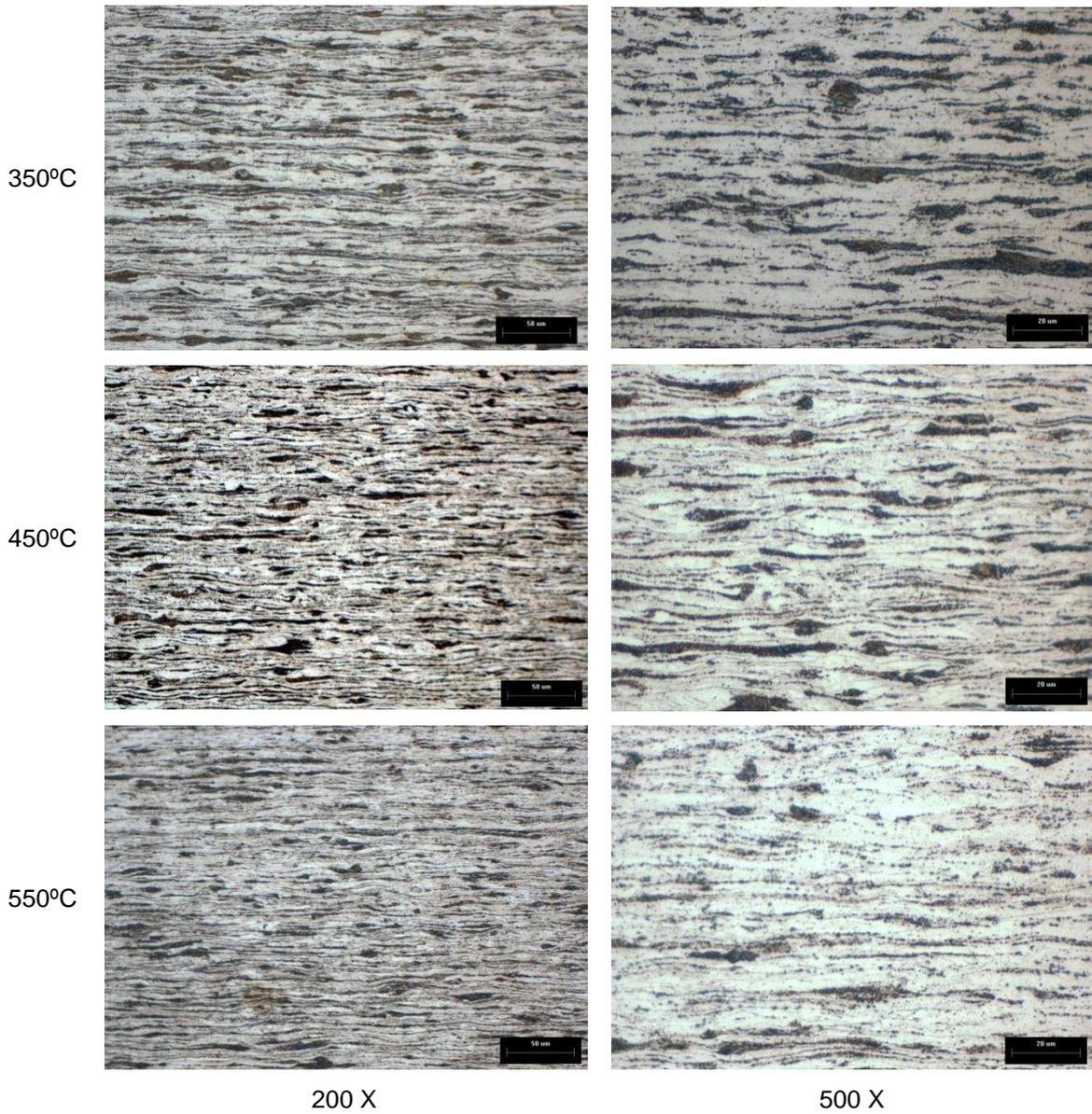
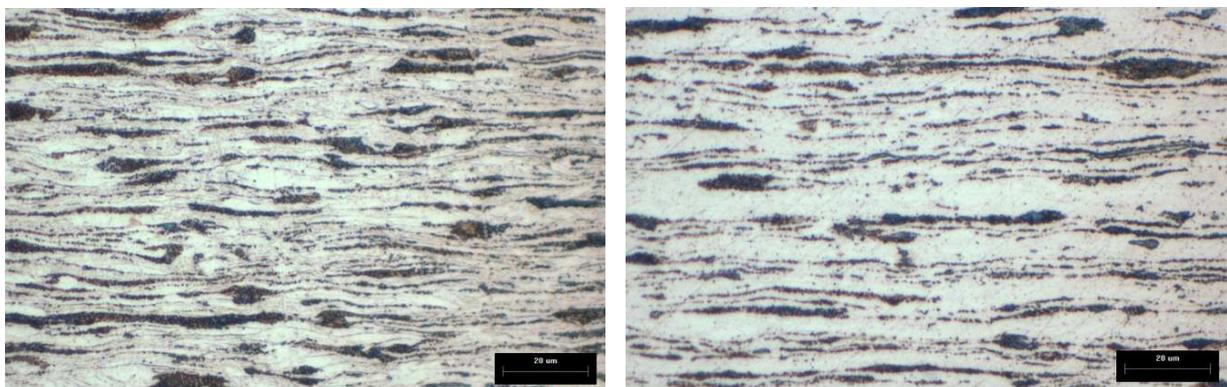


Figura 11 – Aspecto metalográfico das amostras tratadas por tratamento térmico brando a um tempo de 30 minutos.



30 minutos (ampliação 500X)

60 minutos (ampliação 500X)

Figura 12 – Aspecto metalográfico das amostras tratadas por tratamento térmico brando a uma temperatura de 450°C em 30 minutos e 60 minutos.



Esta maior inércia na alteração do alongamento também pode ser vista na Figura 9, especialmente para a temperatura de 550°C. Nesta temperatura, os valores de alongamento das fitas de aço praticamente não variaram com os tempos de 15 minutos, 30 minutos e 45 minutos de tratamento, só recuperando a ductilidade (aumento o alongamento) a partir de 60 minutos. Por outro lado, percebe-se uma diminuição gradual no limite de resistência a partir de 45 minutos de tratamento a 550°C. Apesar de mais tardia, a variação observada a 550°C nos valores de alongamento é percentualmente maior (8,3% em média) do que do limite de resistência (apenas 3,8% em média).

Nesta mesma linha, as metalografias também ilustram a evolução microestrutural do material e permitem, via metalografia quantitativa, a comparação da estrutura obtida na prática industrial de produção de fitas com o aspecto das amostradas tratadas laboratorialmente. A comparação microestrutural é uma forma relativamente eficiente de perceber o efeito do tratamento térmico. Porém, recomenda-se o auxílio de parâmetros bem definidos de metalografia quantitativa⁽⁶⁻⁸⁾ para se obter uma comparação representativa. Neste sentido deverão ser utilizados não apenas a fração das fases presentes, mas também a intensidade de bandeamento, o tamanho de grão e presença de carbonetos precipitados.

A próxima etapa do trabalho será analisar amostras oriundas do processamento industrial do aço totalmente encruado por laminação a frio (*Full-Hard*) e fazer as mesmas análises de caracterização apresentadas neste trabalho. Com base nos resultados obtidos será possível correlacionar os resultados laboratoriais com os resultados industriais de tal forma que poderão ser feitas recomendações das melhores práticas de processamento para a obtenção das fitas de embalagem.⁽⁹⁾

REFERÊNCIAS

- 1 NM 73: Embalagem para produtos planos laminados. Comité Mercosur de Normalizacion. 1996.
- 2 ALTERNATIVAS para embalar aço. In: Siderurgia Brasil, v.5, n.16, p.14-15, mar./abr.. 2004.
- 3 MORAIS, W.A.. Aumento da Resistência Mecânica. In: MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S; NETTO, E.B.M.; Metalurgia física e mecânica aplicada. 2a Edição. São Paulo: ABM, 2009. Módulo 4. Cap.1, p.327-380.
- 4 ABNT NBR 6650. Chapas finas a quente de aço-carbono para uso estrutural. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1986.
- 5 DIN. EN ISO 18265. Metallic Materials - Conversion of hardness values. Deutsches Institut für Normung. 2004.
- 6 ASTM. E 1268. Standard practice for assessing the degree of banding or orientation of microstructures. Edição 2007.
- 7 ASTM. E 112. Test methods for determination average grain size. Edição 1996; Revisão E2.
- 8 ASTM E562 - 08 Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count.
- 9 ABNT. NBR 6653. Fitas de aço para embalagem. Edição 1988.