

EFEITO DA TEMPERATURA DE ENCHARQUE E DA DEFORMAÇÃO NA LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO MICROLIGADO LAMINADO A FRIO¹

Rogério Carlos Oliveira Fernandes²
Gláucio Bortoli da Cruz Rabelo³
Paulo Roberto Cetlin⁴

Resumo

A obtenção de propriedades mecânicas adequadas nos aços de alta resistência depende tanto da composição química quanto das condições de processamento industrial. No caso específico dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), a importância das variáveis operacionais torna-se ainda mais significativa, em função da multiplicidade de mecanismos de endurecimento envolvidos (solução sólida, precipitação, refino de grão e densidade de deslocações). Neste trabalho, foram realizados três diferentes ciclos térmicos no recozimento contínuo e cinco níveis de deformações no laminador de encruamento (SPM). Os resultados indicam que as propriedades em tração são afetadas, significativamente, tanto pelas condições de encharque quanto pelas deformações no SPM, principalmente os valores de limite de escoamento e alongamento total.

Palavras-chave: Aços ARBL; Recozimento contínuo; Propriedades mecânicas; Deformações no encruamento.

EFFECT OF CONTINUOUS ANNEALING SOAKING AND AMOUNT OF TEMPER ROLLING BY MECHANICAL PROPERTIES OF THE MICROALLOYED COLD ROLLED STEEL

Abstract

The mechanical properties of steels are frequently related to both, process conditions and chemical composition. Concerning high strength low alloy (HSLA), these variables become of major importance as a result of multiples strengthening mechanisms involved in the production such as solid solution, precipitation, grain refinement, dislocations density. In this paper, three different thermal cycles at continuous annealing process line and five levels of elongation at skin pass mill (SPM) were evaluated. The results have shown, as expected, that tensile properties were significantly affected by both soaking conditions and temper rolled amount, mainly the yield strength and elongation results.

Key words: HSLA steels; Continuous annealing; Mechanical properties; Amount of temper rolling.

¹ *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Gainhas - PE*

² *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico; M.Sc.; Superintendência de Laminação a Frio da Usiminas, Ipatinga, MG.*

³ *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc; CQE/CQA/ASQ; Superintendência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.*

⁴ *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, Dr.; Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços ARBL, produzidos preferencialmente através das linhas de recozimento contínuo, apresentam limite de escoamento entre 250 MPa e 650 MPa,⁽¹⁾ são soldáveis e de boa resistência mecânica, tenacidade, ductilidade e caracterizam-se por adições de pequeno percentual de nióbio (Nb), vanádio (V) e/ou titânio (Ti).⁽²⁾ O nível de resistência mecânica do produto laminado a frio é conseguido pela obtenção de um tamanho de grão ferrítico extremamente fino, associado ao mecanismo de precipitação de carbonitretos formados por esses elementos e complementado pela adição de fósforo (P), manganês (Mn) e/ou silício (Si), que provocam um endurecimento adicional por solução sólida.⁽³⁾ Contudo, a adição de ligas é limitada por questões de custo e por aumentar a temperatura de recristalização, o que exige elevadas temperaturas de encharque no recozimento. Neste trabalho estudou-se os efeitos da temperatura de encharque e da deformação de encruamento sobre as propriedades mecânicas finais de um aço ARBL microligado com Nb, da especificação SEW 093⁽⁴⁾ e do grau ZStE 340 de limite de escoamento mínimo, laminado a frio e recozido continuamente. Visou-se determinar as melhores práticas operacionais, buscando um ponto ótimo entre a produção, qualidade e custo para fabricação desse aço.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram produzidas em escala industrial doze placas com 252 x 1000 x 6000 mm (espessura x largura x comprimento) de uma mesma corrida de aço ARBL, totalizando 150 t de material. A Tabela 1 mostra a faixa típica de composição química e requisitos normativos de propriedades mecânicas do aço ZStE 340.

Tabela 1. Composição química e requisitos de propriedades mecânicas do aço ARBL.

Composição	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb
Química (% em massa)	0,04 a 0,10	< 0,10	0,40 a 0,90	< 0,025	< 0,025	0,020 a 0,100	0,020 a 0,060
Requisitos de propriedades mecânicas	Limite de escoamento (MPa) Limite de resistência (MPa) Alongamento total (%)						340 a 420 410 a 540 > 20*

(*)Base de medida 50 mm e largura de 12,7 mm.

As doze placas geraram doze bobinas a quente que foram processadas em lote na linha de decapagem acoplada ao laminador a frio (PLTCM), com uma deformação a frio de 63%, para uma espessura final de 1,20 mm, gerando seis bobinas a frio que, em seguida, foram processadas no recozimento contínuo (CAPL).

Nesta etapa, foram avaliados três níveis de temperatura de encharque no recozimento contínuo (730°C, 750°C e 770°C), duas bobinas a frio para cada temperatura. Os demais parâmetros de recozimento foram mantidos constantes conforme o ciclo térmico ilustrado na Figura 1.

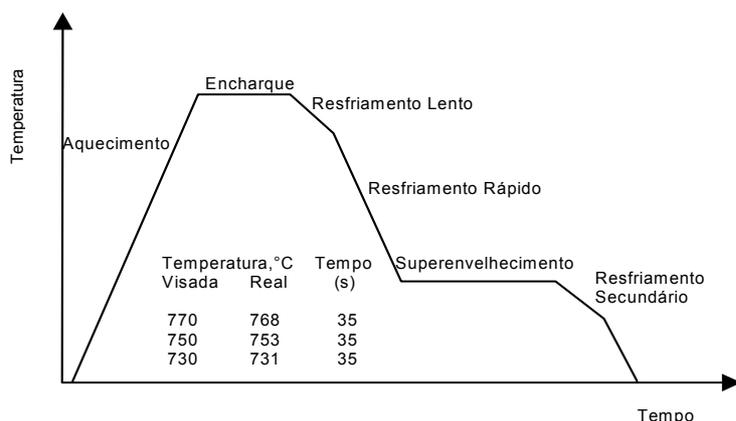


Figura 1. Representação esquemática do ciclo térmico do aço ARBL no recozimento contínuo.

O processo de encruamento no SPM foi realizado continuamente ao de recozimento e, para esta etapa, foram avaliados seis níveis de deformação para cada temperatura de encharque praticada. A cada mudança no valor de deformação do encruamento foi feita uma parada do laminador para identificar a região de mudança. Através dos níveis de deformação que foram aplicados, mostrados na Tabela 2, pretendeu-se avaliar o comportamento mecânico do material antes (como recozido), e após os diferentes valores de deformação no SPM.

Tabela 2. Valores de deformação na laminação de encruamento.

Temperatura de Encharque (°C)	Deformação no Encruamento (%)					
770	0,0	0,7	1,2	1,7	2,2	2,7
750						
730						

Posteriormente ao processo no recozimento contínuo, corpos-de-prova (CPs) foram retirados para ensaios de tração e análise metalográfica.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de tração INSTRON de 10 t, utilizando CPs conforme a norma NBR 6673-1081.⁽⁵⁾ Os valores de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento total (AL), foram obtidos pela média de nove CPs, retirados transversalmente à direção de laminação, nas regiões de início, meio e fim de cada bobina gerada nas diferentes combinações de temperatura e deformação no encruamento.

As avaliações da microestrutura foram realizadas na secção transversal, utilizando-se microscopia óptica com ampliação de 1000X e para determinação do tamanho de grão ferrítico, foi utilizado o método dos interceptos conforme a norma ASTM-E-112-1996.⁽⁶⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 ilustra o aspecto microestrutural das amostras como laminado a frio e recozido, sem deformação no encruamento. Para todas as condições analisadas, observou-se uma microestrutura constituída basicamente de ferrita.

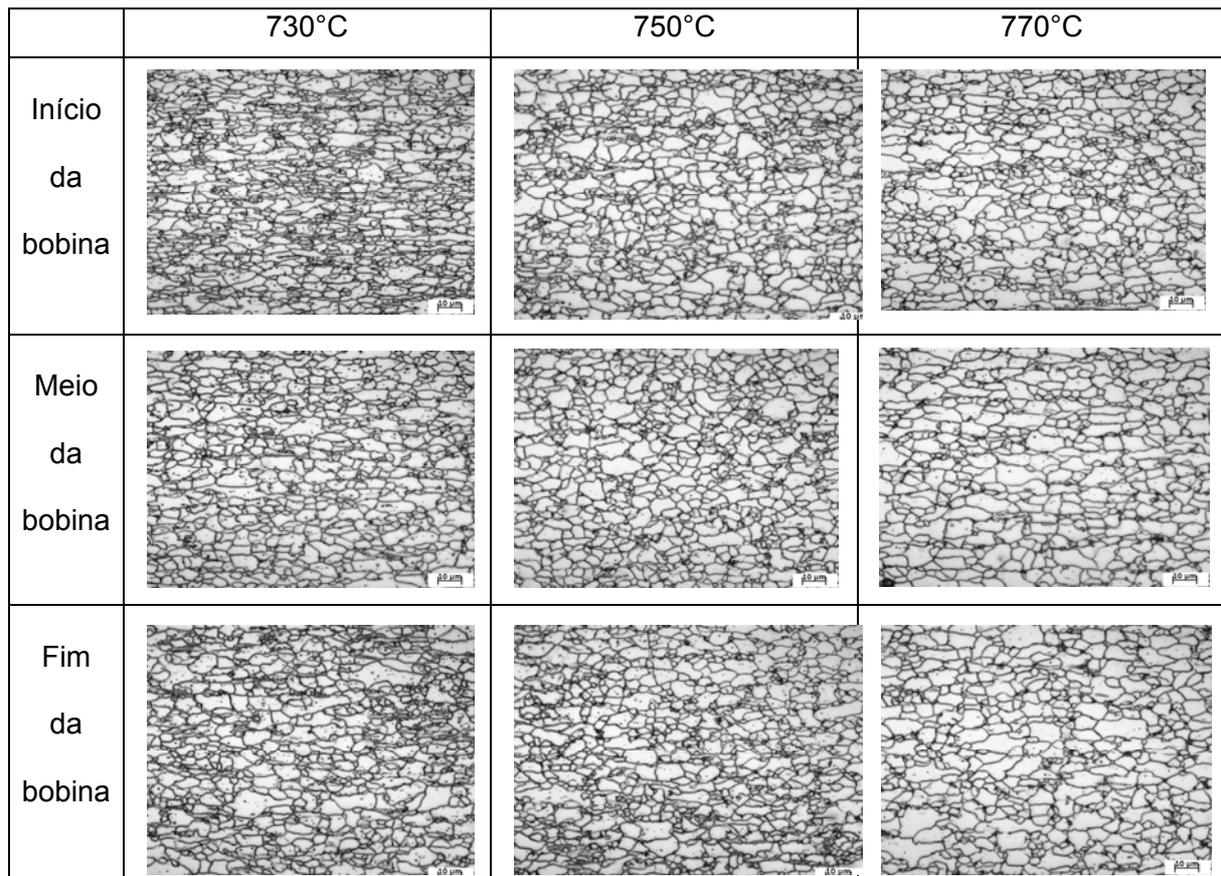


Figura 2. Aspecto microestrutural das amostras na secção transversal. Ataque Nital 4%. Aumento 1000X.

A Tabela 3 apresenta os valores médios do tamanho de grão ferrítico, sem deformação no SPM.

Tabela 3. Valores médios de tamanho de grão ferrítico (d) e ASTM (N) na condição de laminado a frio e recozido.

Temperatura de encharque, °C	d (μm)	N (ASTM)
730	5,6 ± 0,6	11,6
750	5,8 ± 0,6	11,6
770	6,3 ± 0,6	11,4

Neste estudo, para mostrar o efeito do tamanho de grão nas propriedades mecânicas do material, foi realizada análise de variância a partir dos resultados de tamanho de grão das amostras retiradas após recozimento contínuo. Com índice de significância (α) de 5% pode-se concluir que as alterações no tamanho de grão (de 5,6 μm para 6,3 μm), observadas na Tabela 3, são significativas, ou seja, o tamanho de grão sofre alteração com variações da temperatura de encharque. Entretanto, ao submeter os valores dessas alterações ao estudo de Goodman,⁽¹⁰⁾ pela relação de Hall-Petch, obteve-se uma diferença de 12 MPa no limite de escoamento, o que representa 30% da variação total do LE neste estudo. Portanto, embora o tamanho de grão, e por consequência as propriedades mecânicas, sejam alteradas em função da temperatura, a alteração medida neste trabalho (\cong 41 MPa) não é integralmente explicada pelo mecanismo de refino do tamanho de grão. Desta forma, sugere-se a contribuição de outros mecanismos para explicar a grande sensibilidade das propriedades mecânicas às variações de temperatura. Um

mecanismo que pode explicar esta variação é o coalescimento de precipitados durante a etapa de encharque no recozimento contínuo.

A influência da temperatura de encharque nas propriedades mecânicas medidas em tração uniaxial, é mostrada na Figura 3. Vale ressaltar que estes resultados foram obtidos em materiais recozidos submetidos a 1,7% de deformações no SPM.

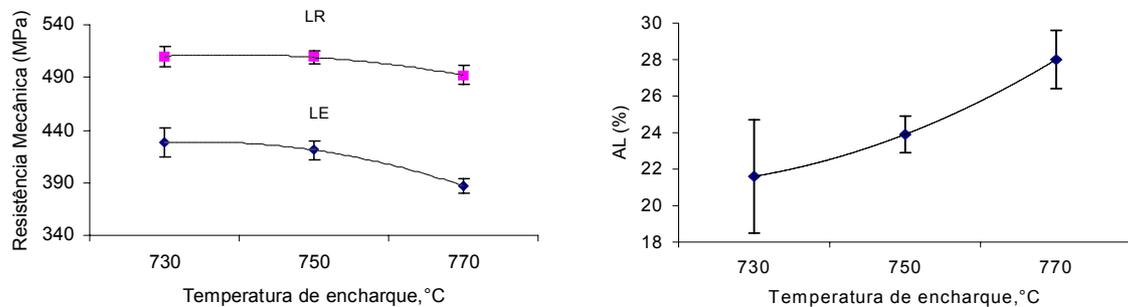


Figura 3. Influência da temperatura de encharque nos valores de LE, LR e AL.

Percebe-se uma progressiva diminuição, principalmente no LE (41 MPa) com a elevação da temperatura, sendo que a queda mais pronunciada foi observada no intervalo entre 750°C e 770°C (34 MPa). Para o LR, a queda foi menos acentuada, quando comparada ao comportamento do LE, considerando os mesmos intervalos de temperatura testados.

O alongamento total exibe um aumento progressivo com a elevação da temperatura de encharque, totalizando uma elevação de 6 pontos percentuais na faixa de temperatura estudada, sendo que o aumento mais pronunciado foi verificado no intervalo entre 750°C e 770°C, de 4 pontos percentuais.

Os resultados obtidos no presente trabalho são referendados por vários autores^(7, 8, 9) que mostraram o comportamento da resistência e da ductilidade frente às variações de temperatura de encharque no recozimento contínuo. As variações mais acentuadas foram também observadas principalmente no LE e no AL.

A Figura 4 mostra os comportamentos do LE, LR e do patamar de escoamento (YPE), para diferentes deformações no SPM e diferentes temperaturas de encharque. Observa-se que o LE inicialmente decresce sob influências de pequenas deformações, atinge uma região de mínimo e em seguida passa a crescer discretamente com maiores valores de deformação. Quanto ao LR, foi observado um comportamento relativamente constante em relação à variação de deformação no SPM. Portanto, independente da temperatura de encharque a que foi submetido o material, o LE é sensível às variações de deformação no SPM.

Já o YPE, decresce de comprimento à medida que aumentam as deformações no SPM, até sua completa supressão. Neste estudo, a supressão do YPE foi verificada para a deformação de 1,7% no SPM, independente da temperatura de encharque. O comprimento médio obtido do YPE, nas temperaturas de encharque estudadas, foi de 8,0% sem pré-deformação e foi medido manualmente no gráfico de tração.

Experiências de Goodman⁽⁷⁾ mostraram que chapas de aço recozidas contendo Nb exibiam patamar de comprimento similar e que para sua eliminação eram necessários valores de alongamento no encruamento entre 1,5% a 2,0%.

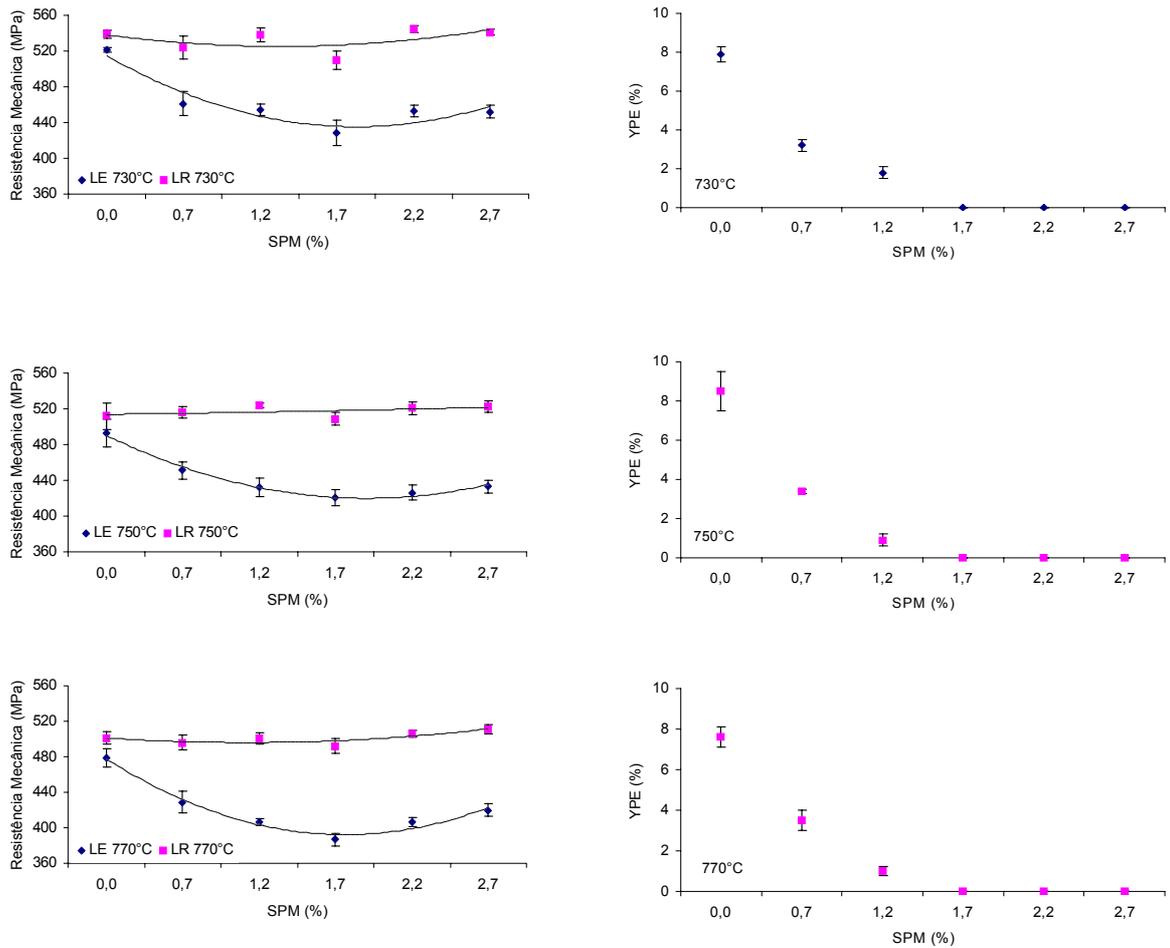


Figura 4. Influência da deformação no SPM sobre o LE, LR e YPE.

A Figura 5 mostra o comportamento do LE em função da deformação no encruamento e da temperatura de encharque no recozimento. Pode-se observar que, pela combinação da temperatura e deformação no encruamento, obtém-se uma grande amplitude nos valores de LE, provocando um efeito da ordem de 134 MPa (521 MPa a 730°C na condição sem deformação no SPM e 387 MPa para a temperatura de 770°C com 1,7% de deformação). Para a temperatura de encharque no intervalo estudado (entre 730°C e 770°C), considerando a deformação no SPM de 1,7% (YPE = 0), foi observada uma queda de 41 MPa no LE.

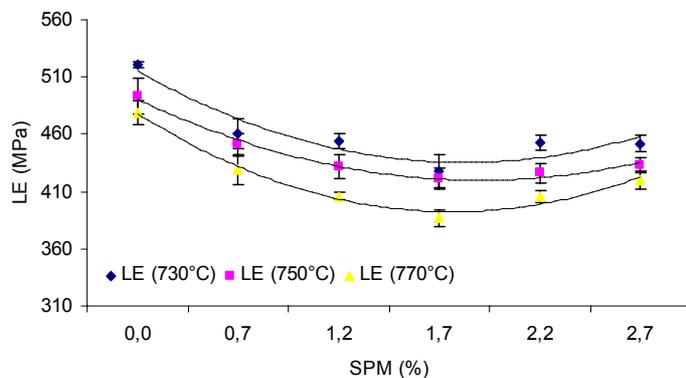


Figura 5. Influência da temperatura de encharque do recozimento contínuo e da deformação no SPM no LE do aço ARBL de grau 340 MPa.

A Figura 6 mostra a variação do alongamento total em função do grau de deformação no encruamento, nas temperaturas de encharque estudadas.

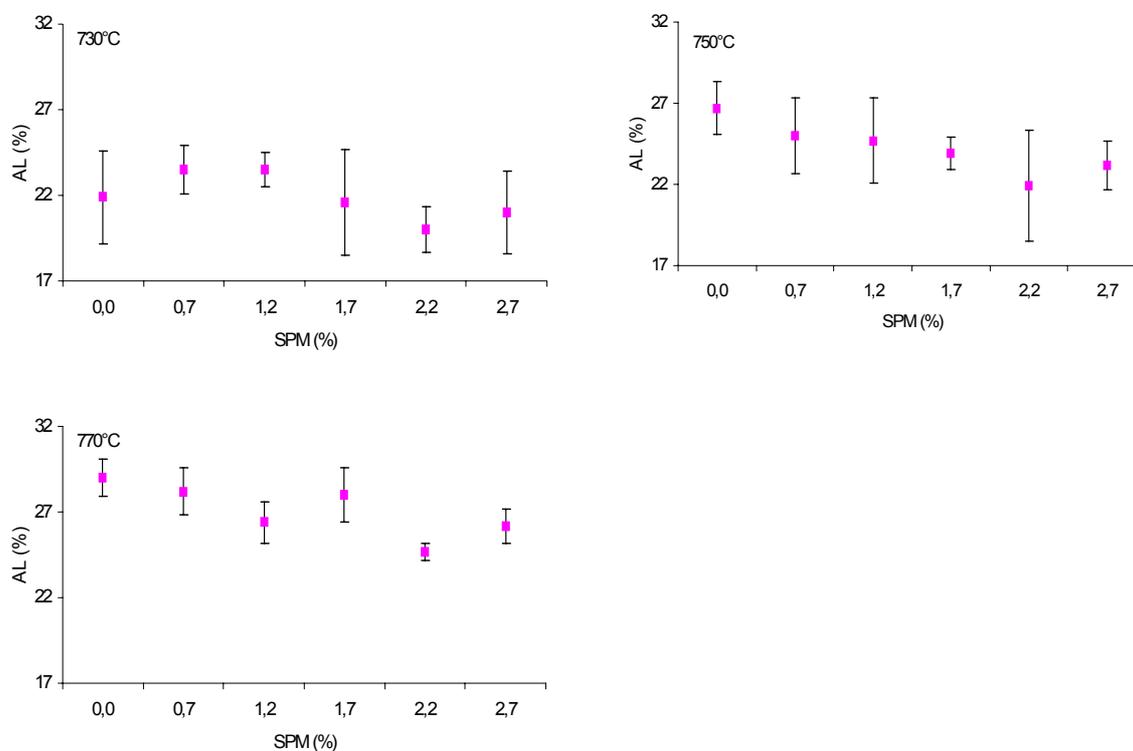


Figura 6. Influência da deformação no SPM sobre o alongamento total.

Para o alongamento total pode-se observar uma leve tendência de queda para as temperaturas de 750°C e 770°C, o que não foi observado para a temperatura de 730°C, quando submetido a deformações crescentes no SPM.

4 CONCLUSÕES

Das condições testadas, a combinação temperatura de encharque a 770°C e deformação no SPM de 1,7%, foi a condição que melhor atendeu à especificação SEW 093⁽⁴⁾ para o grau ZStE 340, contrariando o desejo de redução de temperatura. Entretanto, o conhecimento aqui desenvolvido pode ser a base para outros experimentos visando minimização de custos e redução da dispersão dos valores de propriedades mecânicas. Eventual produção, considerando-se somente a redução de temperatura de encharque, mostra-se inadequada para o atendimento dos requisitos normativos deste grau de aço.

Através deste estudo, foi possível mostrar o ponto ótimo operacional para produção do aço ARBL como laminado a frio e recozido continuamente, bem como permitir o desenvolvimento de aços com graus de resistência distintos a partir da mesma faixa de composição química, como consequência a possibilidade de reduzir custos de fabricação.

REFERÊNCIAS

- 1 ULSAB – AVC Advanced high Strength Steel Application Guidelines. International Iron and Steel Institute. Committee on Automobile Applications. March 2005.
- 2 PANIGRAHI, B. K. Processing of Low Carbon Steel Plate and Hot Strip – An Overview.. Bull. Mater. As., v.24, n.4, p.361-371, 2001.
- 3 PRADHAN, R. High Strength/High Yield-Ratio Cold-Rolled Steels Produced by Continuous Annealing. Scandinavian journal metallurgy, v.13, n.5, p.298-307,1984.
- 4 STAHL EISEN WERKSTOFFBLATTER, Dusseldorf. SEW093, Technische Lieferbedingungen, 1987, 6p.
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, São Paulo. NBR6673-81, Produtos Planos de Aço. Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração, 1981.
- 6 ASTM-E-112-1996. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- 7 GODMAM, S. R. CHAUDRHRY, A. R. Recrystallization Behavior and Tensile Properties of Continuous Annealed High-Strength Cold Rolled Steel Sheets Containing Columbium and Titanium. In: SYMPOSIUM ON METALLURGY OF CONTINUOUS ANNEALED SHEET STEEL, 1982, Dallas, Warrendale: AIME, 1984, p.229-247.
- 8 BAE, D. C., SHIN, J. C. Development of High Strength galvanized steel Sheets. HSLA Steels: Processing Properties and Applications the minerals, metals & Materials Society, 1992. P.329-333.
- 9 BARBOSA, A. H., PEREIRA, J. F. B., ALVES, H. A., RIBEIRO, C. F. Influência dos Parâmetros de Recozimento Contínuo na Produção de Aços ARBL Laminados a frio. In: Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM, Florianópolis, SC, 2001. p.224-234.
- 10 GOODMAN, S. R. Metallurgy of High Stength Cold-Rolled Sheets. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY AND APPLICATIONS of HSLA STEELS, 1983, Philadelphia. HSLA Steels Technology e Applications. Ohio: ASM, 1984.p.239-252.