

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO LAMINADO A FRIO DURANTE O PROCESSO DE RECOZIMENTO EM CAIXA*

Marcos Natanael Marinho¹
Fernando de Souza Costa²
Nissandro Domingues³
Dagoberto Brandão Santos⁴

Resumo

No recozimento em caixa, a superfície da bobina absorve mais calor do que o interior, de modo que o perfil térmico real aplicado é diferente. A variação na taxa de aquecimento e na temperatura de recozimento entre o interior da bobina e as extremidades é em grande parte responsável pela alteração das propriedades mecânicas do aço nestas regiões, ao longo do ciclo térmico. Este estudo teve como objetivo avaliar a variação das propriedades mecânicas do material no recozimento, considerando separadamente as curvas características referentes a dois pontos de controle de temperatura no processo. Os resultados indicam que ocorreu variação das propriedades mecânicas entre as duas curvas, principalmente entre 14 e 26 h e que após este tempo houve uma estabilização destes valores, indicando homogeneização destas propriedades, dentro da faixa de requisitos do aço.

Palavras-chave: Propriedades Mecânicas; Aços ARBL; Recozimento em Caixa; Laminação a Frio.

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A COLD-ROLLED DURING THE BATCH ANNEALING PROCESS

Abstract

In batch annealing, the coil surface absorbs more heat than the center, so that the actual thermal profile applied is different. Variation on the heating rate and annealing temperature between the center region, and coil ends, is largely responsible for the variation of mechanical properties along the coil. This project aims to study the variation of the mechanical properties of the material along the annealing cycle, considering separately the characteristic curves referring to two temperature control points in the process. The results indicate that there was a variation of the mechanical properties between the two curves, mainly between 14 and 26h and after this time there was a stabilization of these values, indicating homogenization of these properties, in the range of steel requirements.

Keywords: Mechanical Properties; HSLA Steels; Batch Annealing; Cold Rolling.

¹ Engenheiro Metalurgista, MBA, CQE/ASQ, Engenheiro de Produção Sênior, Gerência Técnica de Laminações, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Físico, Dr; Pesquisador Especialista Pleno, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, M.Sc; CQE/ASQ; Pesquisador Sênior, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

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

1 INTRODUÇÃO

A deformação plástica imposta ao aço durante a etapa de laminação a frio resulta no encruamento de sua microestrutura, com alterações na forma dos grãos e na textura cristalográfica. Em decorrência disso, as propriedades mecânicas são modificadas ocorrendo o aumento do limite de escoamento e diminuição da capacidade de alongamento[1-4].

O processo de recozimento consiste no tratamento térmico cuja finalidade é aumentar a conformabilidade do aço, mediante a eliminação dos defeitos decorrentes do encruamento, e, com isso, promover a obtenção de propriedades mecânicas favoráveis à aplicação do produto em diversos seguimentos de transformação, como, automotivo, linha branca e construção civil [5,6]. É um fato conhecido que o amaciamento da microestrutura do aço durante o recozimento é um fenômeno termicamente ativado, no qual a energia armazenada devido ao encruamento promovido pela laminação a frio, é reduzida mediante os processos de recuperação e recristalização. A recuperação consiste na eliminação de defeitos da rede, tais como lacunas em excesso e discordâncias. A recristalização, por sua vez, consiste na substituição da microestrutura encruada por outra isenta de deformação. Trata-se de um processo que ocorre por nucleação e crescimento de novos grãos. Finalmente, havendo tempo e temperatura suficientes, ocorre o coalescimento dos grãos, motivado pela minimização da energia do sistema devido à eliminação de contornos, que resulta na diminuição da área total de contornos de grão. O amaciamento da microestrutura pode ser retardado, ou até mesmo paralisado, por elementos em solução sólida ou por precipitados finos e coerentes, cuja presença atrasa a nucleação e reduz a mobilidade dos contornos de grão [1,2,6].

Uma característica dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) é o mecanismo de endurecimento por precipitação, que ocorre com a diminuição da solubilidade de uma segunda fase com o decréscimo da temperatura [6]. Neste aço a composição química é desenvolvida para proporcionar altos valores de limite de resistência com a adição de pequenas quantidades de elementos de liga como o nióbio, titânio ou vanádio, ou a combinação destes[2,3]. Estes elementos têm tendência de formar carbonitretos estáveis que influenciam nas propriedades mecânicas do aço. [1,2,3,7].

O ciclo térmico típico no processo de recozimento em caixa consiste no aquecimento, encharque e resfriamento lento do material. Neste processo a parte externa das bobinas absorve calor diretamente da atmosfera quente do ambiente interno do forno. Cria-se então um gradiente térmico que é responsável pelo fluxo de calor em direção ao interior da bobina. Assim sendo, as curvas de aquecimento destas duas regiões da bobina diferem entre si. A parte interna da bobina, *Cold Spot* (CS), tem um atraso em relação a parte externa, *Hot Spot* (HS), para atingir a temperatura de encharque. Caso o ciclo térmico não seja bem projetado, essa diferença pode levar à variação das propriedades mecânicas do aço ao longo do seu comprimento[1,2,7,8].

Um inconveniente do processo de recozimento em caixa, pode ser a nitretação da superfície da tira. Este fenômeno foi estudado por Costa [9], que constatou que a absorção de nitrogênio aumentou consideravelmente com a elevação da temperatura de encharque e com o aumento do tempo em que o material ficou nesta temperatura.

Após o processo de recozimento, aplica-se uma pequena deformação na tira para eliminação do patamar de escoamento, por meio do laminador *skin pass*. Caso esta eliminação não seja devidamente realizada, o produto pode apresentar o defeito chamado de “estrias” ou bandas de Lüders, após estampagem. O nível de deformação deve ser devidamente ajustado para garantir as propriedades mecânicas requeridas para o aço.

Este trabalho teve como objetivo estudar a variação das propriedades mecânicas obtidas ao longo do ciclo térmico de recozimento em caixa, considerando separadamente as curvas de dois pontos de controle de temperatura no processo, que representam as temperaturas do HS e do CS.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Para realização deste trabalho foi utilizado um aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), microligado ao nióbio, processado em escala industrial. A tabela 1 mostra a composição química para aço de grau 340, conforme a norma EN 10268 [10].

Tabela 1. Composição química.

C	Si	Mn	Nb	Al	Ti	P	S
<0,12	<0,5	< 1,5	<0,09	<0,015	<0,15	<0,030	<0,025

Os requisitos normativos de propriedades mecânicas do aço *steel number* 1.0548, conforme a norma EN 10268:2006+A1:2013 [10], estão listados na tabela 2.

Tabela 2. Requisitos de propriedades mecânicas do aço.

Limite de escoamento (MPa)	340 a 420
Limite de resistência (MPa)	410 a 510
Alongamento total (%)	> 21*

(*) Base de Medida = 50 mm. Direção transversal.

Para verificar como as propriedades mecânicas do aço em estudo variam em função do ciclo térmico de recozimento em caixa, foram realizadas, em escala laboratorial, simulações de duas curvas diferentes de ciclo térmico (figura 1). A primeira, em vermelho, representa a variação de temperatura do HS e a segunda, em azul, do CS. Ambas replicam o processo industrial de recozimento em caixa. Para realização destas simulações, foram retiradas amostras de 300 mm de comprimento por 200 mm de largura a 50 mm da borda de tiras laminadas a frio do aço em estudo com 2,5 mm de espessura (encruadas), com o lado menor orientado paralelamente à direção de laminação.

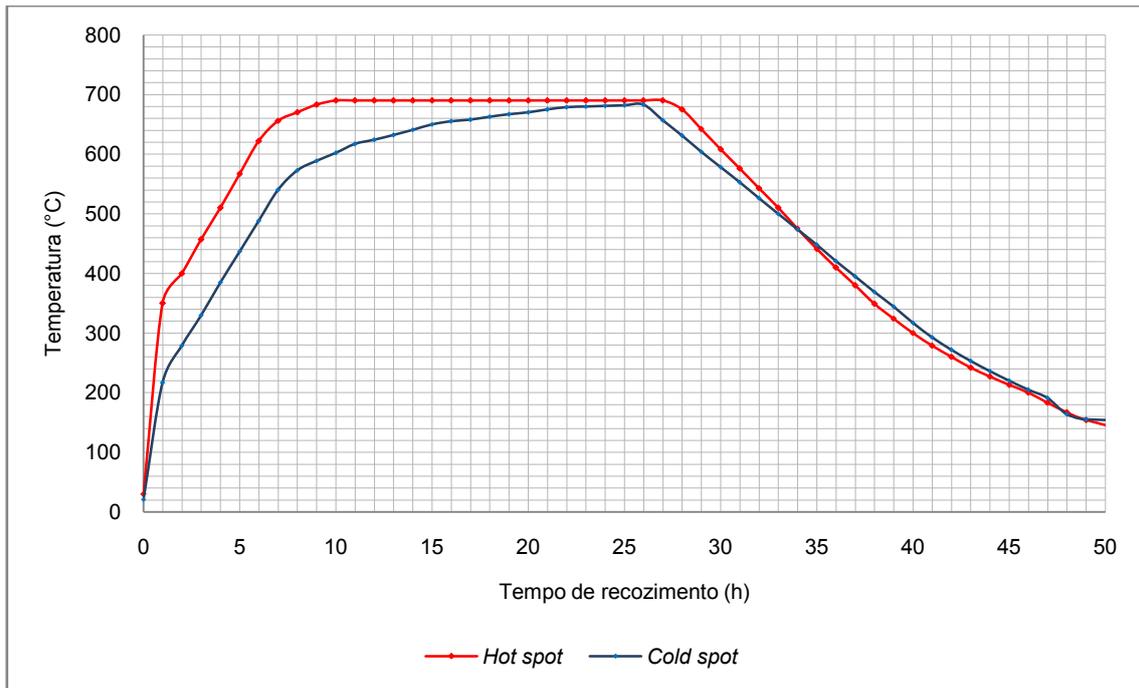


Figura 1. Ciclos térmicos de recozimento simulados em escala laboratorial.

Ao longo da realização desses ciclos foram retiradas amostras do forno a cada intervalo de uma hora, resfriando-as bruscamente em água, além da amostra antes do início do ciclo. Para cada amostra foram obtidos os valores de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento uniforme (ALu) e alongamento total (ALt), por meio da realização de ensaios de tração. Foram obtidas também a microestrutura em microscópio óptico utilizando o reativo Nital 4%.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de tração INSTRON de 10 t, utilizando corpos de prova, retirados transversalmente à direção de laminação, conforme a norma ISO 6892-2013 [11]. Os valores de LE, LR, ALu e ALt, foram obtidos pela média de resultados de três ensaios.

Nas amostras retiradas após 4, 26, 36 e 49 h de recozimento foi analisado o teor de nitrogênio absorvido na superfície em comparação ao da amostra antes da simulação. Esta análise foi realizada para avaliar uma possível influência da atmosfera de N_2 do recozimento em caixa nas propriedades mecânicas do aço decorrente de nitretação.

Foram realizadas simulações numéricas para avaliar a formação ou dissolução de precipitados em condições de equilíbrio termodinâmico, para a composição química deste aço, utilizando o software ThermoCalc, 2017.b e a base de dados termodinâmicos TFE6.

Foram utilizadas amostras recozidas, a partir de 35 h, para realização da simulação de laminação *skinpass*, em laminador piloto, para eliminar o patamar de escoamento e avaliar sua influência nas propriedades mecânicas do aço. Para isso, foram realizados passes de laminação visando alongamento total variando entre 2,0 e 5,2%.

2.2 Resultados e discussão

2.2.1 Variação das propriedades mecânicas e microestruturas durante o recozimento

A figura 2 mostra variação do LE, LR e ALtno ciclo térmico do HS. Pode-se observar a queda gradual do LR e do LE até uma região em torno de 26 h (aproximadamente 690°C). Após este tempo houve uma estabilização nos valores de LE e LR. Por outro lado, observa-se o aumento do alongamento do aço no mesmo intervalo de tempo.

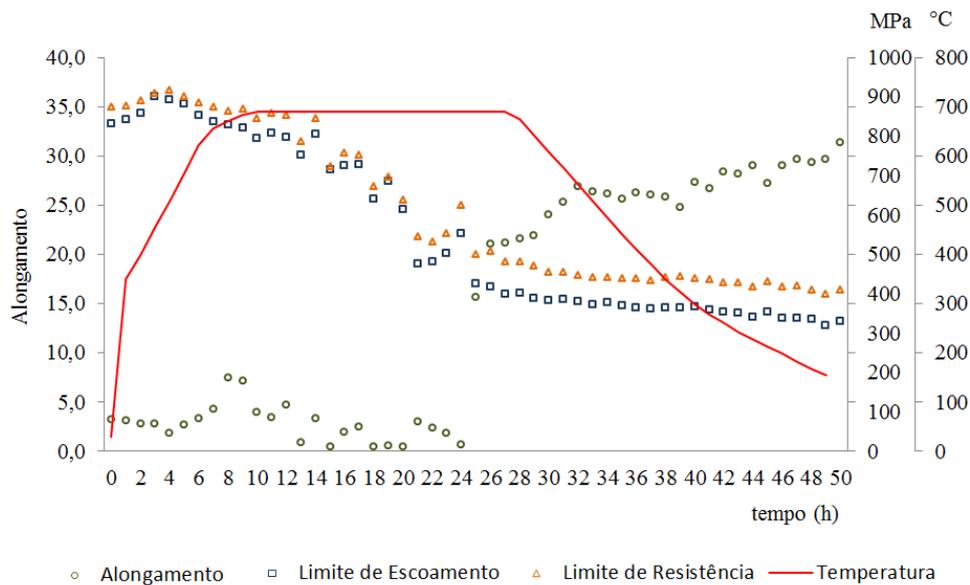


Figura 2. Variação das propriedades mecânicas do aço ao longo do ciclo de recozimento (*Hot Spot*).

A figura 3 mostra as mesmas propriedades mecânicas apresentadas na figura 5, considerando o ciclo térmico para o CS.

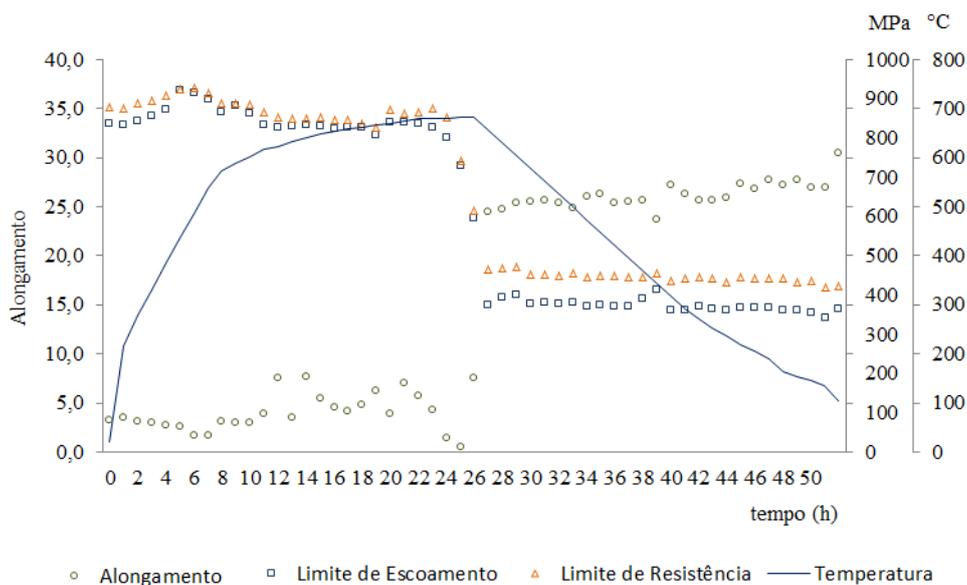


Figura 3. Variação das propriedades mecânicas do aço ao longo do ciclo de recozimento (*Cold Spot*).

Na figura 3, pode-se observar uma queda brusca dos valores de LE, LR e um aumento também brusco do ALt, em torno de 26 h de recozimento (683°C). A partir deste ponto, observa-se a estabilização dos valores destas propriedades, com todas elas situando dentro da faixa de requisitos normativos deste aço.

Comparando-se a figura 2 com a figura 3 observa-se uma redução gradual no LE e LR na primeira (figura 2) e redução brusca destes valores na segunda (figura 3). De acordo com Fang [1] a menor taxa de aquecimento tornará a recristalização mais difícil porque mais energia armazenada é consumida durante o estágio de recuperação. Fang também observou que para maiores temperaturas de encharque houve uma recristalização mais rápida [1].

A microestrutura final obtida nesse aço após o recozimento foi similar nas duas condições de ensaio (figura 4). Observa-se uma predominância de grãos de ferrita e carbonetos esferoidizados.

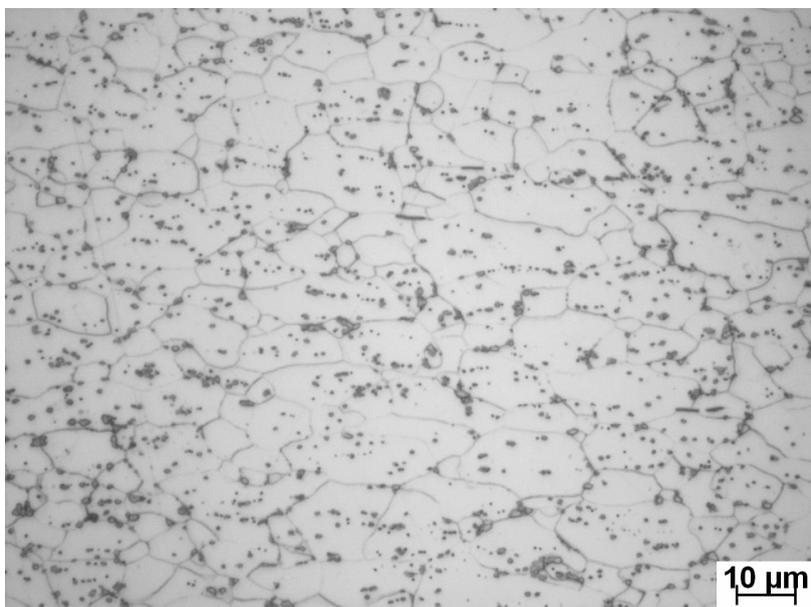


Figura 4. Microestrutura obtida após o ciclo de recozimento. Ampliação original: 1000x

2.2.2 Influência da atmosfera de nitrogênio

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos quanto ao teor de nitrogênio medido em diferentes estágios do ciclo térmico.

Tabela 3. Teores de nitrogênio em diferentes estágios do recozimento

Amostras	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Nitrogênio (ppm)
I	0	30	22,0
II	4	510	22,3
III	26	690	23,4
IV	36	410	23,9
V	49	380	22,2

Os teores de nitrogênio obtidos estão na faixa de erro do equipamento de 2 ppm, com o decorrer do ciclo de recozimento. Estudos realizados em condições similares de simulação [9] mostraram que a absorção de nitrogênio é favorecida pela elevação da temperatura de encharque e pelo aumento do tempo em que o material fica exposto a esta temperatura. No entanto, para este aço e ciclo de recozimento não ocorreu significativa absorção de nitrogênio.

2.2.3 Formação ou dissolução de precipitados

Como mostra a figura 5, as temperaturas para formação ou dissolução dos precipitados avaliados estão acima da temperatura máxima do ciclo térmico utilizado. Para dissolver completamente os precipitados de AlN, Nb(C,N) e MnS deste aço, seriam necessárias temperaturas superiores a 1000, 1100 e 1450°C, respectivamente. Isto indica que estes precipitados já haviam sido previamente formados no processo de laminação a quente, podendo coalescer durante o recozimento. O efeito destes precipitados, notadamente o Nb(C,N), é mais relevante durante a laminação a quente, quando eles favorecem o refinamento da microestrutura [3]. Durante o ciclo de recozimento em caixa, todavia, seu efeito não é muito pronunciado.

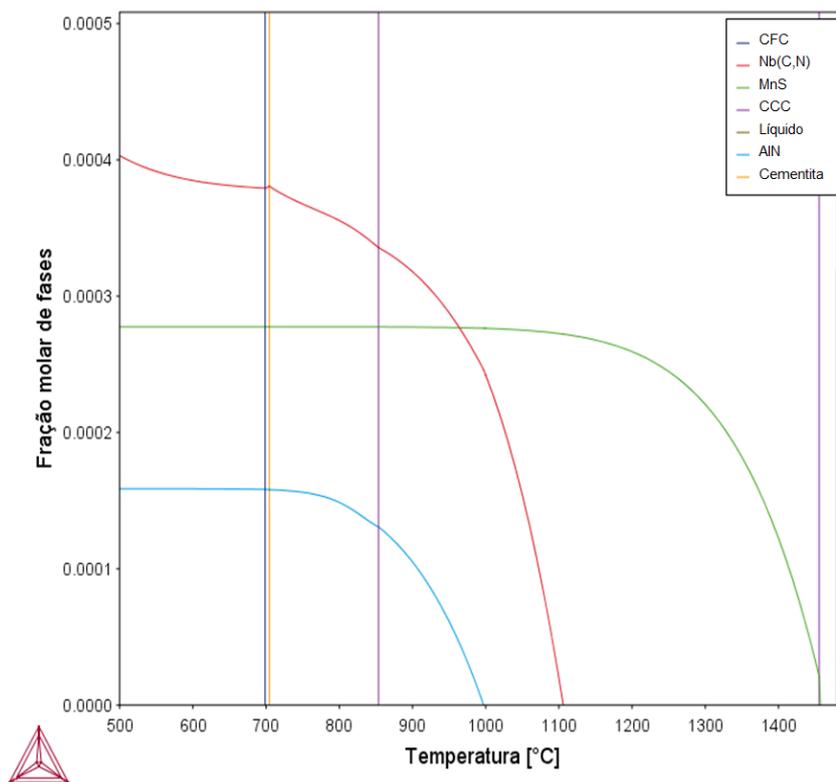


Figura 5. Diagrama de equilíbrio termodinâmico em função das frações de constituintes

2.2.4 Influência da laminação de encruamento

A tabela 4 apresenta os valores medidos de LE, LR, ALu e ALt para cada condição ensaiada e a variação destes antes e após o laminador de encruamento *SkinPass* (SP).

Tabela 4.Variação das propriedades mecânicas com o *skin pass*.

Alongamento no SP (%)	Antes <i>SkinPass</i>				Após <i>SkinPass</i>			
	LE (MPa)	LR (MPa)	ALu (%)	ALt (%)	LE (MPa)	LR (MPa)	ALu (%)	ALt (%)
2,03	377	442	15,8	26,2	346	441	11,9	23,1
2,50	341	420	17,3	29,1	323	420	13,4	23,6
2,53	364	449	15,6	24,8	348	441	12,8	22,6
2,93	364	451	16,3	25,8	359	447	13,0	22,8
3,13	355	431	16,3	27,3	339	428	13,5	24,2
3,17	369	443	15,7	25,6	364	440	10,9	23,1
3,45	339	421	17,3	29,6	373	424	12,3	23,7
3,50	368	440	16,6	27,3	381	440	11,1	20,6
5,21	335	410	17,7	29,4	373	418	11,5	22,9

Conforme se observa na tabela 4, não houve variação significativa do LR antes e após o laminador de encruamento, para alongamentos no SP entre 2,0 e 5,2%. Por outro lado, como esperado [3,5,7], verifica-se uma elevação no LE após aproximadamente 3,5% de deformação no laminador de encruamento. Houve redução no ALu, após a aplicação do *skinpass*, em todas condições ensaiadas. Para realçar este comportamento, retirando o efeito da variação das propriedades mecânicas entre as amostras, foram realizadas curvas das variações dessas propriedades mecânicas (Δ LE, Δ LR, Δ ALu e Δ ALt), obtidas pela diferença entre os valores após e antes o SP, como mostrado nos gráficos da figura 6.

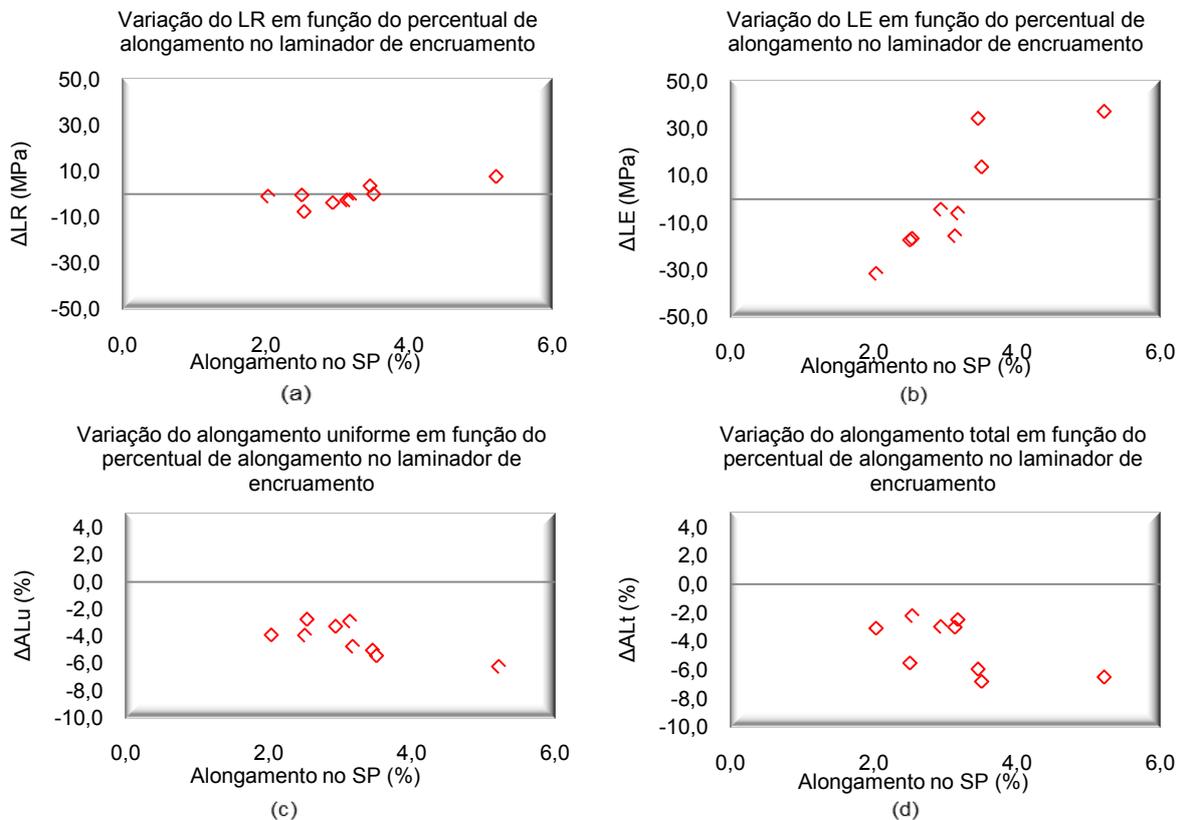


Figura 6.Variação do (a) limite de resistência (b) limite de escoamento (c) alongamento uniforme e (d) alongamento total em função dos níveis de deformações no laminador de encruamento.

Este aço apresenta um patamar de escoamento, conforme mostra a figura 7a. Já a figura 7b mostra que a aplicação de 2% de alongamento no SP é suficiente para eliminar o patamar de escoamento.

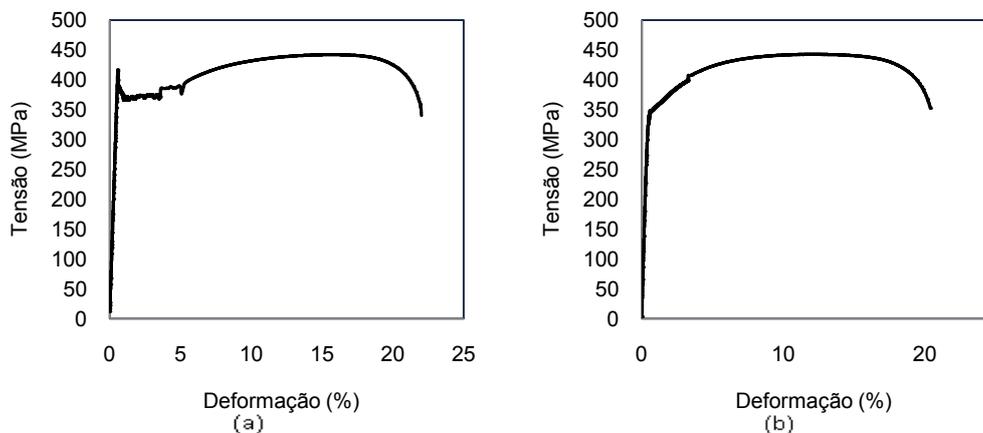


Figura 7. Curvas tensão-deformação (a) antes do SP e (b) Após 2% de alongamento no SP.

3 CONCLUSÕES

Por meio desse estudo, pode-se concluir que:

Ocorreu uma variação dos valores de LE, LR e AL_{tao} longo do ciclo térmico realizado, entre as regiões do *Hot Spote* do *ColdSpot*, principalmente entre 14 e 26 h. A menor taxa de aquecimento observada na curva para o *ColdSpot* torna a recristalização mais difícil porque mais energia armazenada é consumida durante o estágio de recuperação. Em ambas, observa-se uma estabilização dos valores das propriedades mecânicas em torno de 26 h de recozimento, indicando homogeneização destas propriedades, dentro da faixa de requisitos normativos de projeto do aço avaliado.

A microestrutura do produto final apresentou uma predominância de pequenos grãos de ferrita e carbonetos (1000x), similares nas duas condições de ensaio (HS e CS).

Considerando as condições de equilíbrio termodinâmico, os precipitados de AlN, Nb(C,N) e MnS não se dissolvem, de forma significativa, durante o ciclo de recozimento realizado, uma vez que as temperaturas desse ciclo não ultrapassam 690°C. Para a dissolução completa destas partículas seriam necessárias temperaturas superiores a 1000, 1100 e 1450°C, respectivamente.

Não houve absorção significativa de nitrogênio no aço durante as simulações. Verificou-se que a variação do teor de nitrogênio das amostras se encontra dentro da faixa do erro de medição do equipamento (2 ppm) utilizado para análise deste elemento químico.

Não houve variação no limite de resistência do aço antes e após laminação de *skin pass*. Por outro lado, como esperado, verificou-se uma elevação no limite de escoamento após aproximadamente 3,5% de deformação no laminador de encruamento e redução no alongamento em todas as condições ensaiadas.

O ciclo térmico estudado está adequado para o aço, contudo pode-se estudar o aumento na taxa de aquecimento e/ou na temperatura de encharque visando melhor uniformidade nas propriedades mecânicas e possível redução no tempo de encharque.

REFERÊNCIAS

- 1 Fang C. Annealing and Precipitation Behavior During Batch Annealing of HSLA Steels. Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh. 2011. [acessoem 20 out. 2017]147. Disponível em: http://d-scholarship.pitt.edu/64333/1/Chao_Fang_PhD_ETD_2011.pdf
- 2 Fang C, Garcia CI, Choi SH. et al. A Study of the Batch Annealing of Cold-Rolled HSLA Steels Containing Niobium or Titanium. Metallurgical and Materials Transactions A. 2015;46(8): 3635–3645.
- 3 Gladman T. The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels. London: The Institute of Materials; 1997.
- 4 Liu Z, Ordenez RO, Lei Y, Garcia CI, Wang G. Microstructural characterization and recrystallization kinetics modeling of annealing cold-rolled vanadium microalloyed HSLA steels. Journal of Alloys and Compounds. 2016; 679: 293–301.
- 5 Abbaschian R, Abbaschian L, Reed-Hill RE. Physical Metallurgy Principles. 4ª Ed. Stamford: Cengage Learning; 2008.
- 6 Dieter GE. Metalurgia Mecânica. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois; 1981.
- 7 Krauss G. Steels – Processing, Structure and Performance. 2ª Edição. Ohio: ASM International; 2015.
- 8 Pickering FB. Physical Metallurgical and the Design of Steels. London: Applied Science Publishers Ltd; 1978.
- 9 Costa GCA. Análise da absorção de nitrogênio no recozimento em caixa de aços acalmados ao alumínio para Estampagem profunda. Dissertação de Mestrado. UFMG. 2003:104.
- 10 EUROPEAN STANDARD INSTITUTION, UK. BS EN 10268:2006+A1:2013 Cold rolled steel flat products with high yield strength for cold forming - Technical delivery conditions.
- 11 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, São Paulo. NBR ISO 6892-1:2013 Materiais metálicos - Ensaio de tração: Pt 1: método de ensaio à temperatura ambiente.