

EFEITO DO CICLO DE RECOZIMENTO CONTÍNUO NAS CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS E MECÂNICAS DE UM AÇO MULTIFÁSICO¹

Fábio Dian Murari²
Luiz Cláudio de Oliveira Meyer³
Roberta de Oliveira Rocha³

Resumo

Foi avaliado o efeito das temperaturas de encharque, de têmpera e de superenvelhecimento nas características microestruturais e nas propriedades mecânicas obtidas em tração de um aço multifásico processado via recozimento contínuo. O estudo foi desenvolvido em escala piloto, no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, utilizando-se máquina *Gleeble* para a simulação de ciclos térmicos de recozimento contínuo. Verificou-se que o aumento da temperatura de encharque, de 780°C para 820°C, provocou o refinamento da microestrutura, elevando os valores de limite de escoamento e de resistência e reduzindo o alongamento total. A redução da temperatura de têmpera, de 710°C para 650°C, resultou em aumento das quantidades de ferrita e de martensita, em detrimento da quantidade de bainita. A redução desse parâmetro não alterou significativamente os limites de escoamento e de resistência do aço analisado, mas provocou a redução do alongamento total quando associada com a temperatura de encharque de 820°C. Por fim, verificou-se que o aumento da temperatura de superenvelhecimento, de 260°C para 310°C, reduziu o limite de resistência e não provocou variações significativas nos valores de limite de escoamento e de alongamento total.

Palavras-chave: Aços laminados a frio; Aços multifásicos; Recozimento contínuo.

THE EFFECT OF CONTINUOUS ANNEALING CYCLE ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A COLD ROLLED MULTIPHASE STEEL

Abstract

The effects of annealing, quenching and overaging temperatures on the microstructure and on the mechanical properties of a multiphase steel were evaluated. The study was conducted at the Usiminas Research and Development Center, using a Gleeble machine for the simulation of continuous annealing thermal cycles. The microstructure was refined and the mechanical strength was increased and the total elongation was decreased with the increase of the annealing temperature from 780°C to 820°C. The ferrite and martensite contents were increased and the amount of bainite was reduced with the decrease of the quenching temperature from 710°C to 650°C. The mechanical strength was not affected significantly by this parameter. The martensite content and the tensile strength were decreased with the increase of the overaging temperature from 260°C to 310°C.

Key-words: Cold rolled steels; Multiphase steels; Continuous annealing.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

³ Membro da ABM; Engenheira Metalurgista, D.Sc., Gerência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas, Ipatinga; MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística, visando atender às demandas de redução no consumo de combustíveis e na emissão de poluentes atmosféricos, tem se preocupado, cada vez mais, em reduzir o peso das carrocerias dos veículos. Seguindo essa tendência, siderúrgicas de todo o mundo, entre elas a Usiminas, têm procurado desenvolver novos tipos de aços que utilizam principalmente a transformação de fase para aumento de resistência, conhecidos, de maneira geral, como aços multifásicos ou multiconstituídos.

Esses novos produtos, que incluem os aços *Dual Phase* (DP), *Transformation Induced Plasticity* (TRIP) e *Complex Phase* (CP) geralmente apresentam características especiais, como ausência de patamar de escoamento (DP, CP), baixa razão elástica (DP), elevado expoente de encruamento (DP, TRIP), altos valores de *bake hardenability* (DP, TRIP, CP) e uma boa combinação entre resistência e ductilidade (DP, TRIP)^(1,2). A obtenção de tais características se deve a uma microestrutura complexa, constituída por matriz ferrítica com uma dispersão de segundo constituinte duro, martensita e/ou bainita e, no caso dos aços TRIP, austenita retida.

Os aços multifásicos são fabricados, na sua maior parte, como laminados a frio e recozidos continuamente. O ciclo utilizado na Usiminas, cujos parâmetros são ajustados em função do tipo de microestrutura que se deseja obter, é mostrado na figura 1. De forma geral, ao término da etapa de aquecimento atinge-se uma temperatura (denominada de temperatura de encharque – T_{ENC}) que permanece constante ao longo de um determinado tempo (tempo de encharque - t_{ENC}). A temperatura de encharque afeta a quantidade de austenita formada na região intercrítica e o seu teor de carbono, influenciando diretamente a temperabilidade do aço.

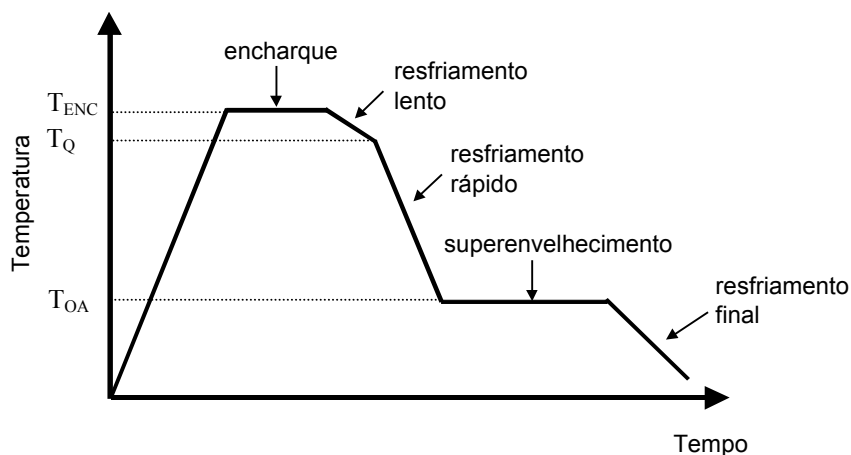


Figura 1. Ciclo esquemático de recozimento contínuo adotado na Usiminas para a produção de aços multifásicos laminados a frio.

Após o encharque, o material é resfriado lentamente até a temperatura de início de resfriamento rápido, ou temperatura de têmpera (T_Q). O objetivo desse resfriamento lento é diminuir a fração de austenita e enriquecê-la ao máximo em carbono. Em trabalho realizado por Girina, Fonstein e Bhattacharya⁽³⁾ observou-se, para um aço multifásico processado com temperatura de encharque de 760°C, que o resfriamento rápido feito a partir de 700°C resultou na formação de uma mistura de martensita e bainita, ao passo que o resfriamento realizado a partir de 600°C promoveu apenas a formação de martensita. Resultado semelhante foi observado após recozimento a

830°C. Em outro trabalho, Girina e Bhattacharya⁽⁴⁾ estudaram o efeito da temperatura de têmpera nas propriedades mecânicas de aços multifásicos com 0,1% de carbono e diferentes teores de manganês. Conforme relatado por esses autores, a elevação da temperatura de têmpera, na faixa entre 600°C e 800°C, provocou um aumento de resistência mecânica e uma redução do alongamento total, efeito que foi creditado ao aumento da quantidade do segundo constituinte formado. Após o resfriamento rápido, o material é mantido a uma temperatura intermediária ou de superenvelhecimento (T_{OA}), a qual exerce grande influência na natureza do segundo constituinte. Esse efeito foi observado no trabalho realizado por Girina, Fonstein e Bhattacharya,⁽³⁾ no qual um aço multifásico foi processado com temperaturas de superenvelhecimento entre 280°C e 360°C. Para a temperatura de 280°C, observou-se apenas a presença de martensita como segundo constituinte, ao passo que para temperaturas superiores a 320°C, notou-se, também, o aparecimento de bainita. Verificou-se, ainda, que o aumento da temperatura de superenvelhecimento provocou o revenimento da martensita formada. Com relação às propriedades mecânicas, os autores supracitados notaram que o aumento da temperatura de superenvelhecimento diminuiu o limite de resistência e aumentou os valores de limite de escoamento.

Neste estudo foi avaliado o efeito das temperaturas de encharque, de têmpera e de superenvelhecimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas em tração de um aço multifásico laminado a frio da classe de 590 MPa de limite de resistência.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido a partir de lingote produzido em escala piloto, em forno de fusão a vácuo, com composição química conforme Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do lingote produzido em escala piloto (% em massa).

C	Mn	Si	P	S	Al	N
≤ 0,15	≤ 2,00	≤ 0,02	≤ 0,015	≤ 0,006	≤ 0,040	≤ 0,007

O lingote foi processado por laminação a quente primeiramente até a espessura de 35,0 mm e em seguida até a espessura de 8,0 mm, com resfriamento em forno mufla, visando à simulação do bobinamento à temperatura de 630°C. As chapas obtidas foram usinadas até a espessura de 4,7 mm, sendo então laminadas a frio até a espessura final de 2,0 mm. Das chapas assim produzidas, foram preparados corpos-de-prova com as dimensões 150,0 x 50,0 x 2,0 mm para serem utilizados nas simulações de recozimento contínuo em máquina Gleeble. Os valores de tempo, temperatura e taxa de resfriamento (Tabela 2) foram escolhidos levando-se em consideração o comprimento dos vários fornos que fazem parte da linha de recozimento contínuo da Usiminas e a velocidade de processamento de 55 m/min, que corresponde ao valor adotado industrialmente para processar bobinas com espessura de 2,0 mm.

Tabela 2. Parâmetros dos ciclos térmicos de recozimento contínuo realizados.

Ciclo	T _{ENC} (°C)	t _{ENC} (s)	Resfriamento lento (°C/s)	T _Q (°C)	Resfriamento rápido (°C/s)	T _{OA} (°C)	t _{OA} (s)
DI71A	780	123	1,4	710	13,6	310	692
DI71B					15,3	260	
DI65A			2,6	650	11,5	310	
DI65B					13,2	260	
DM71A	820	123	2,2	710	13,6	310	
DM71B					15,3	260	
DM65A			3,4	650	11,5	310	
DM65B					13,2	260	

t_{OA}: tempo de superenvelhecimento.

Na seqüência, foram realizados ensaios de tração para determinação das propriedades mecânicas, de acordo com a norma ASTM A370/97,⁽⁵⁾ e análises por microscopias óptica e eletrônica de varredura (MEV). A caracterização mecânica foi feita em termos de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento uniforme (AL_U) e alongamento total (AL_T). Foi determinada, também, a variação do expoente de encruamento (n) com a deformação verdadeira (ϵ). Após a análise qualitativa das microestruturas, foram realizadas análises metalográficas a fim de se determinar a fração percentual dos constituintes. A técnica de análise de imagens foi usada para medir a quantidade de ferrita, após ataque com nital a 4%, e a quantidade de martensita, após o ataque com metabissulfito. A difratometria de raios-X foi empregada para determinar a fração de austenita retida. A quantidade de bainita, por outro lado, foi determinada por diferença.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De um modo geral, observou-se que a microestrutura do aço estudado, para os diferentes ciclos de recozimento avaliados, apresentou um forte alinhamento do segundo constituinte, de forma paralela ao plano de laminação (Figura 2). Esse aspecto é consequência do bandeamento do material como laminado a quente e se deve, em grande parte, à migração de carbono para as regiões ricas em manganês, formadas nos espaços interdendríticos durante a solidificação do lingote. Com relação ao efeito dos parâmetros de processamento, pode-se observar que a elevação da temperatura de encharque provocou o refinamento da microestrutura, o que está associado principalmente à substituição de grande parte da ferrita oriunda da laminação a quente por uma nova ferrita, de granulação mais fina, formada durante o resfriamento lento. Resultado semelhante foi obtido por Girina, Fonstein e Bhattacharya.⁽³⁾

Na Figura 3 é apresentado o aspecto das microestruturas no microscópio eletrônico de varredura. Como pode-se observar, as microestruturas analisadas apresentaram uma distribuição complexa de constituintes, nas quais percebe-se a presença de martensita e bainita, dispersas em matriz ferrítica de granulação heterogênea.

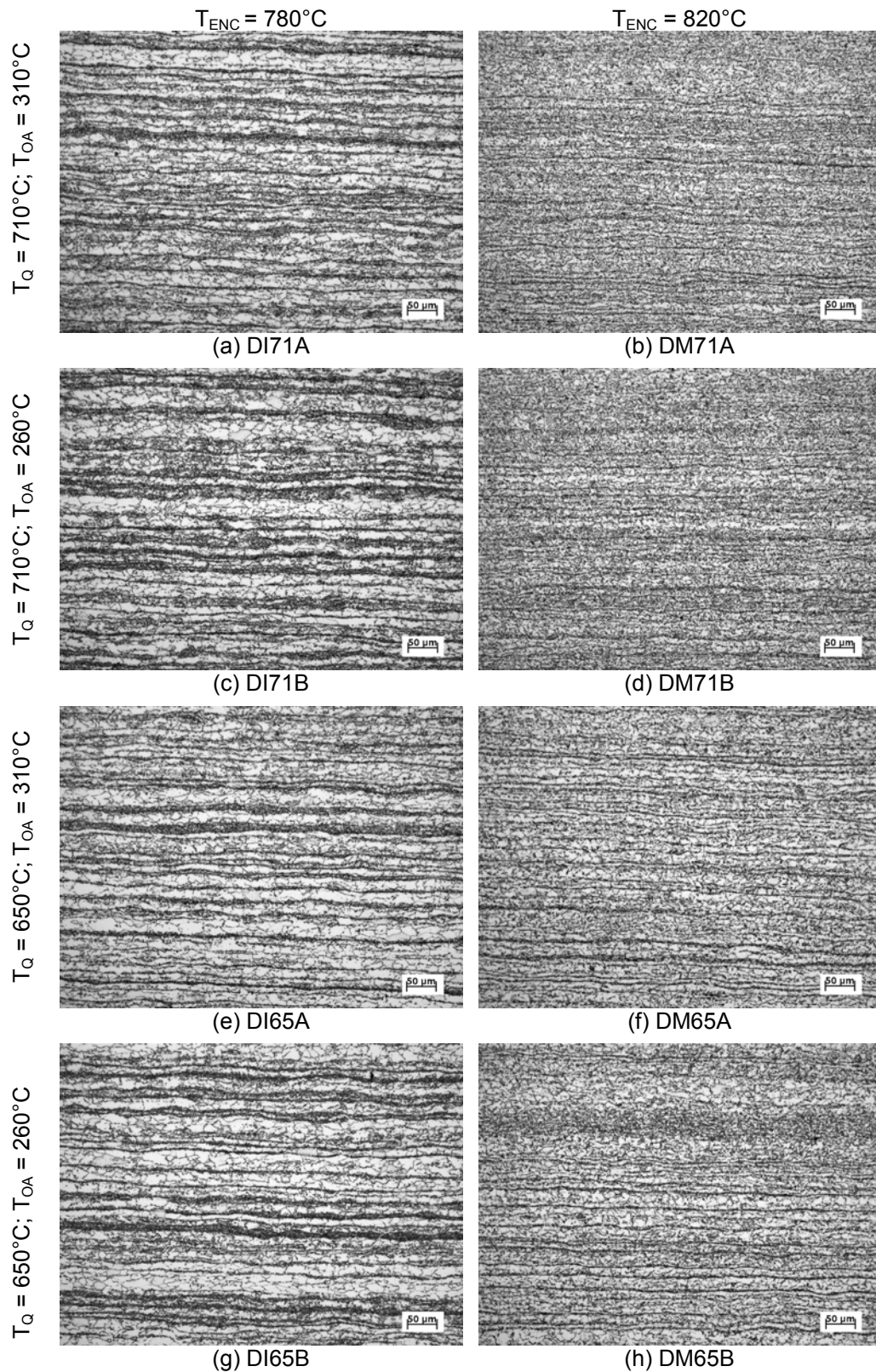


Figura 2. Microestrutura do aço estudado após os diferentes ciclos de recozimento contínuo realizados. Seção longitudinal. Ataque: nital 4%.

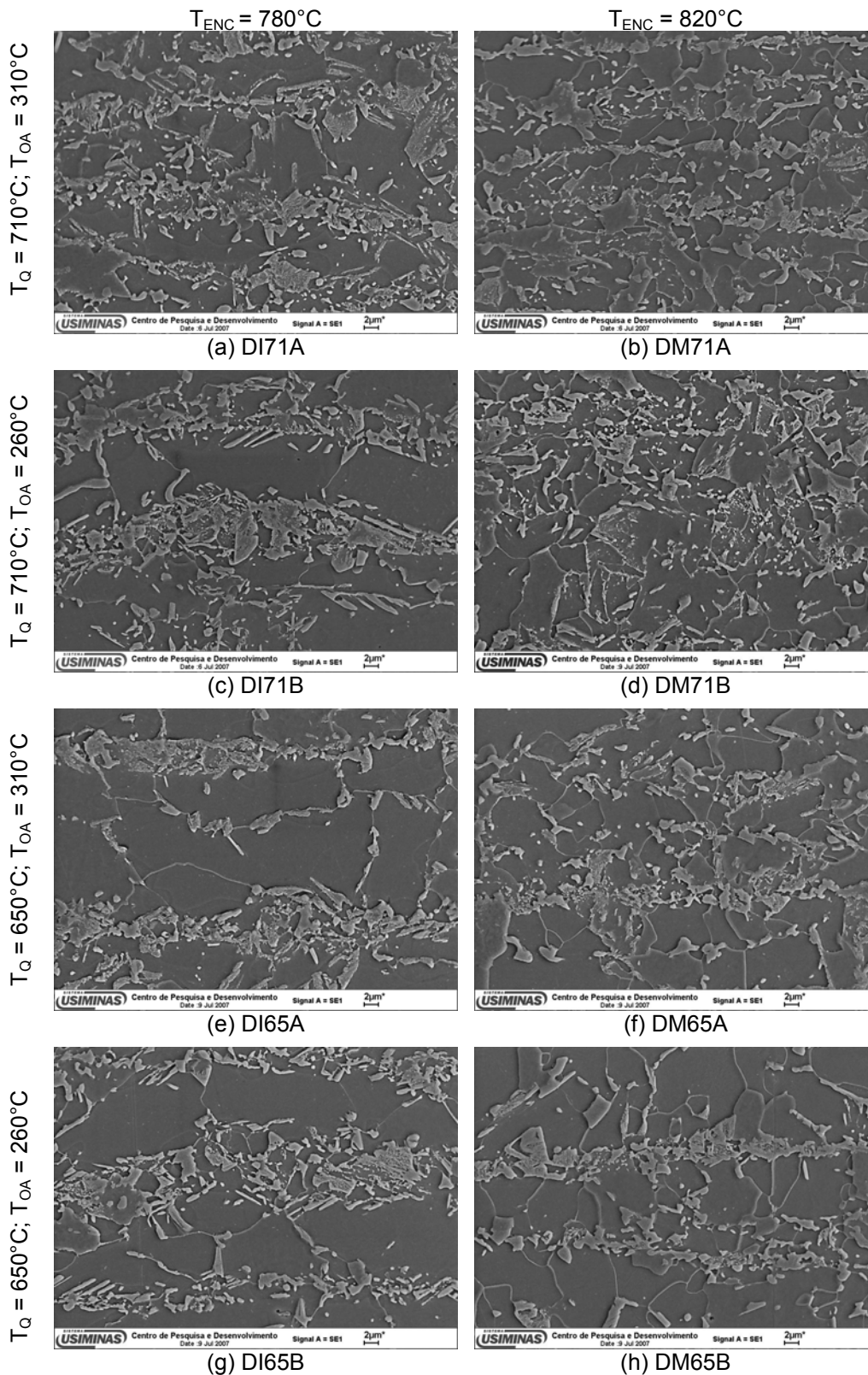


Figura 3. Efeito do ciclo de recozimento contínuo na microestrutura do aço estudado. MEV. Ataque: nital 4%.

Analisando-se a Figura 4 percebe-se que, de forma geral, o aumento da temperatura de encharque não teve efeito significativo nas quantidades dos constituintes formados, o que se deve, provavelmente, à baixa velocidade de processamento. A redução da temperatura de têmpera resultou em aumento das quantidades de ferrita

e de martensita, em detrimento da quantidade de bainita, confirmando a tendência encontrada na literatura^(3,4). Nota-se, ainda, que a redução da temperatura de superenvelhecimento favoreceu a formação de martensita, o que está de acordo com os resultados obtidos por Faral e Hourman.⁽⁶⁾ A quantidade de austenita retida foi inferior a 1%.

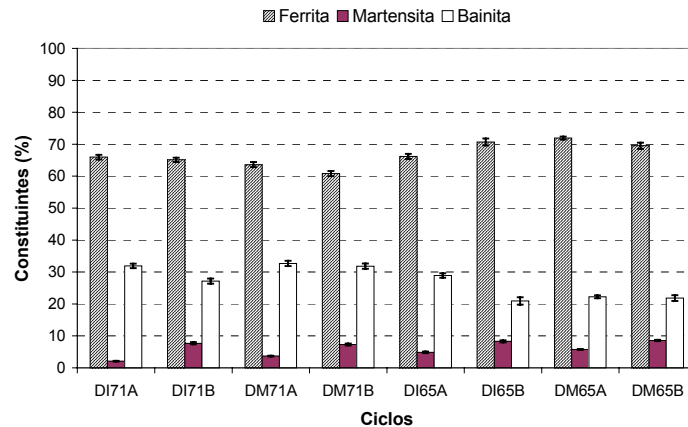


Figura 4. Resultado da determinação das quantidades de constituintes para o aço estudado.

Na Figura 5 são apresentados os valores de propriedades mecânicas obtidos em tração. De um modo geral, observa-se que a elevação da temperatura de encharque provocou o aumento dos valores de limite de escoamento e de resistência e a redução do alongamento total, o que se deve principalmente ao refinamento da microestrutura. A redução da temperatura de têmpera não resultou em alterações significativas nos valores de resistência mecânica (LE e LR) do aço analisado, mas provocou a redução do alongamento total quando associada com a temperatura de encharque de 820°C. Por fim, verifica-se que a redução da temperatura de superenvelhecimento provocou o aumento do limite de resistência e do alongamento uniforme, especialmente para o ciclo DI, e praticamente não alterou os demais parâmetros. Resultados semelhantes foram obtidos por Barrado et al.⁽⁷⁾

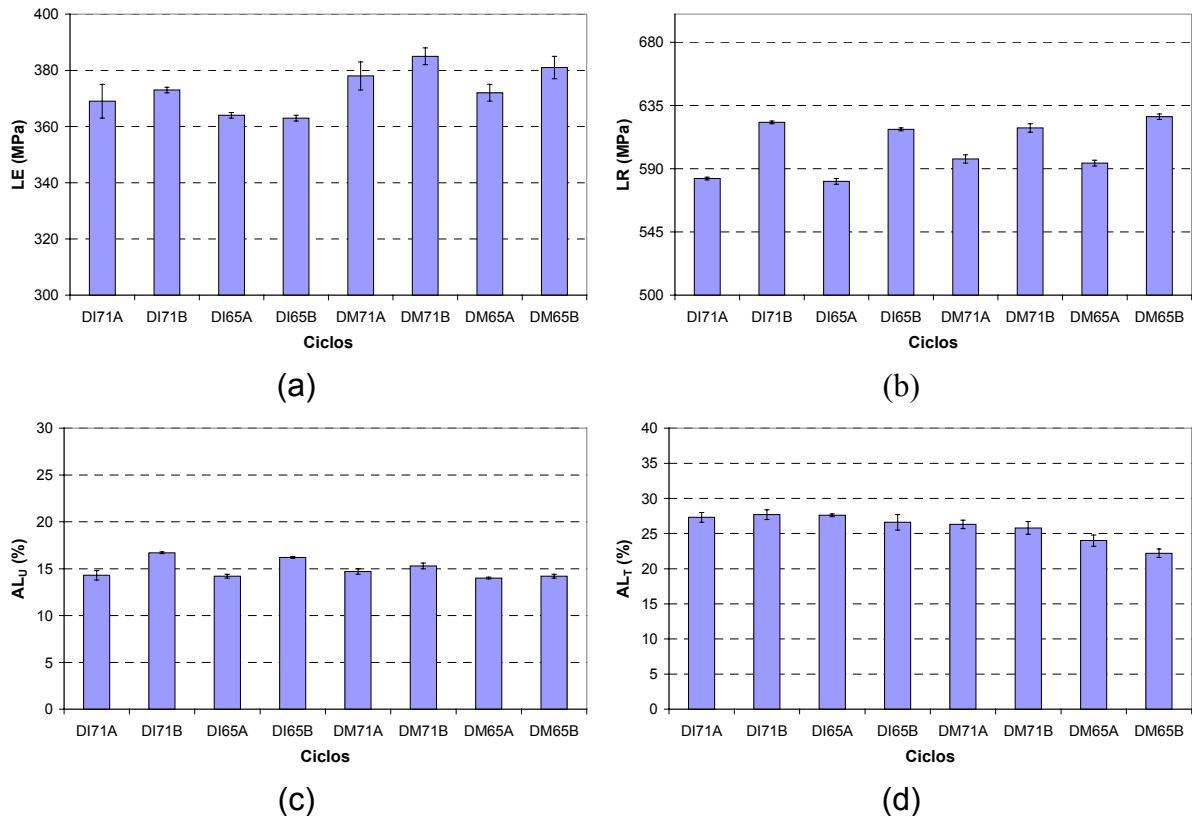


Figura 5. Valores de propriedades mecânicas em tração para os diferentes ciclos avaliados. Taxa de deformação média da ordem de 10^{-3} s^{-1} . Base de medida: 25 mm. Direção transversal.

Conforme se observa na Figura 6, os corpos-de-prova processados com menor temperatura de superenvelhecimento (condição B) apresentaram os maiores valores de expoente de encruamento, destacando-se dentre esses os processados com menor temperatura de encharque (ciclo DI), o que pode estar associado à maior quantidade e também à maior dureza da martensita formada nessas condições.

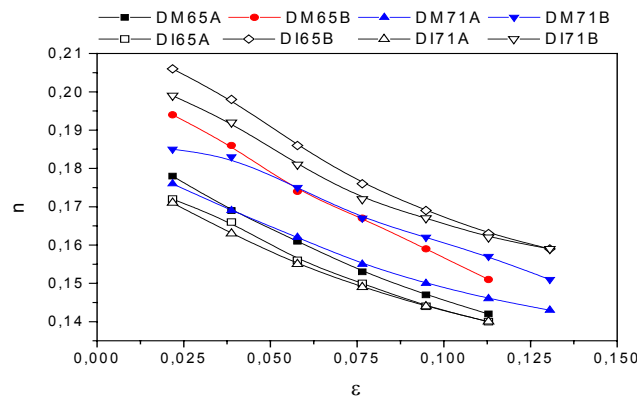


Figura 6. Variação do expoente de encruamento com a deformação verdadeira para os diferentes ciclos de recozimento experimentados.

4 CONCLUSÕES

A elevação da temperatura de encharque provocou o refinamento da microestrutura, efeito que foi creditado à substituição de grande parte da ferrita oriunda da laminação a quente por uma nova ferrita, de granulação mais fina, formada durante o resfriamento lento. De um modo geral, a alteração desse parâmetro não teve efeito

significativo nas quantidades de constituintes formados, o que pode estar associado à baixa velocidade de processamento.

A redução da temperatura de têmpera resultou em aumento das quantidades de ferrita e de martensita, em detrimento da quantidade de bainita. Notou-se, ainda, que a redução da temperatura de superenvelhecimento favoreceu a formação de martensita.

A elevação da temperatura de encharque provocou o aumento dos valores de limite de escoamento e de resistência e a redução do alongamento total, o que foi associado ao refinamento da microestrutura. A redução da temperatura de têmpera não resultou em alterações significativas nos valores de resistência mecânica. Verificou-se, ainda, que a redução da temperatura de superenvelhecimento provocou o aumento do limite de resistência e, quando associada com temperatura de encharque de 780°C, do alongamento uniforme.

Por fim, observou-se que os aços processados com menor temperatura de superenvelhecimento (260°C) apresentaram os maiores valores de expoente de encruamento, destacando-se dentre esses os processados com menor temperatura de encharque (780°C).

REFERÊNCIAS

- 1 ANDRADE, S. L.; TAISS, E. J. M.; ROSA, L. K. ULSAB – AVC: O Aço no Automóvel do Futuro. In: 57º Congresso Anual da ABM; julho de 2002. São Paulo – SP, p. 721-731.
- 2 MESPLONT, C.; VANDEPUTTE, S.; DE COOMAN, B. C. Microstructure – Properties Relationships in Complex Phase Cold-Rolled High Strength Steels. In: 43rd MWSP CONF. PROC., ISS, VOL. XXXIX, p. 359-371, 2001.
- 3 GIRINA, O. A.; FONSTEIN, N. M.; BHATTACHARYA, D. Effect of Annealing Parameters on Austenite Decomposition in a Continuously Annealed Dual Phase Steel. In: 45th MWSP CONF. PROC., ISS, VOL. XLI, p. 403-414, 2003.
- 4 GIRINA, O. A.; BHATTACHARYA, D. Effect of Mn on the Stability of Austenite in a Continuously Annealed Dual Phase Steel. In: 45th MWSP CONF. PROC., ISS, VOL. XLI, p. 415-420, 2003.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM A-370 – 97 a; Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
- 6 FARAL, O. M.; HOURMAN, T. Influence of Continuous Annealing on Dual Phase and TRIP Steels for Automotive Application. In: 41st MWSP CONF. PROC., ISS, VOL. XXXVII, p. 253-263, 1999.
- 7 BARRADO, F. S.; MELO, T. M. F.; CÂNDIDO, L. C.; GODEFROID, L. B. Efeito de parâmetros do recozimento contínuo nas propriedades mecânicas em tração de aço Dual Phase. In: XL Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos; outubro de 2003. Vitória – ES, p. 536-544.