

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DAS VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS MULTIFÁSICOS⁽¹⁾

Fábio Dian Murari⁽²⁾
Túlio Magno Füzessy de Melo⁽³⁾
Fernando de Souza Costa⁽⁴⁾

RESUMO

Foi avaliado o efeito da adição dos elementos silício e manganês e das variáveis operacionais temperatura de encharque e velocidade de processamento nas propriedades mecânicas de aços multifásicos. 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 a adição de silício provocou aumento significativo da ductilidade e elevação do limite de resistência. A adição de manganês resultou no aumento dos valores de limite de escoamento e de limite de resistência e na queda de ductilidade. Com relação ao processamento, observou-se que a elevação da temperatura de encharque provocou uma redução dos valores de limite de escoamento e de limite de resistência e um aumento do alongamento total. A elevação da velocidade de processamento, por sua vez, contribuiu para o aumento da resistência mecânica e diminuição da ductilidade.

Palavras-chave: Aços multifásicos; Aços de ultra alta resistência; Recozimento contínuo.

(1) *Contribuição Técnica ao 60º Congresso Anual da ABM; Belo Horizonte – MG, 25 a 28 de julho de 2005.*

(2) *Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga (MG).*

(3) *Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, M.Sc., Dr. – Ing., Gerência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga (MG).*

(4) *Membro da ABM, Físico, M.Sc., Gerência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga (MG).*

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística, visando atender às demandas de redução no consumo de combustíveis e na emissão de poluentes atmosféricos, tem se preocupado 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 vários mecanismos de endurecimento para aumento de resistência, conhecidos, de maneira geral, como aços multifásicos ou multiconstituídos.

Esses novos produtos, que incluem os aços *Dual Phase* (DP), Martensíticos (MART), *Transformation Induced Plasticity* (TRIP) e *Complex Phase* (CP) apresentam propriedades mecânicas especiais, como ausência de patamar de escoamento, baixa relação elástica, alto coeficiente de encruamento, elevados valores de *bake hardenability* e uma boa combinação entre resistência e ductilidade.^(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.

Os aços multifásicos são fabricados, na sua maior parte, via laminação a frio seguida de recozimento contínuo. O ciclo utilizado, mostrado na Figura 1, consiste em aquecer o material até a região intercrítica e, logo depois, resfriá-lo até uma temperatura intermediária (T_{OA}), de modo que a austenita remanescente se transforme em martensita e/ou bainita. Naturalmente, dependendo das condições utilizadas, alguma fração de austenita retida pode ser observada na microestrutura final.

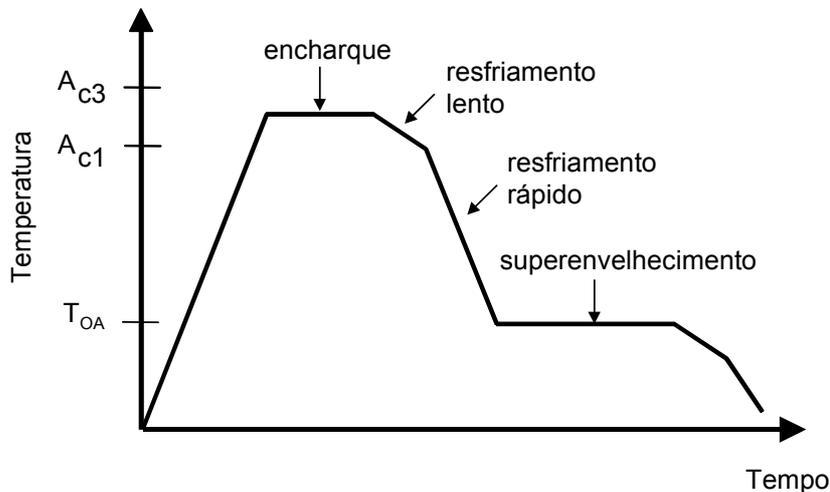


Figura 1. Ciclo esquemático de recozimento contínuo para a produção de aços multifásicos laminados a frio. A_{c1} e A_{c3} são as temperaturas de início e final de transformação da austenita, respectivamente.

Entre os parâmetros de processamento que mais influenciam as propriedades mecânicas de um aço multifásico laminado a frio estão a temperatura de encharque e a velocidade de processamento. A temperatura de encharque controla, principalmente, a quantidade de austenita formada, enquanto a velocidade de processamento afeta as taxas de aquecimento e de resfriamento e os tempos de permanência em cada etapa do ciclo térmico.

Além desses fatores, também é de grande importância a composição química. Tradicionalmente, são utilizadas concepções à base de C-Mn e C-Mn-Si. O teor de

carbono determina a quantidade de austenita obtida na temperatura de encharque e também é o responsável pela dureza e morfologia do segundo constituinte. A adição de manganês reduz A_{C3} , ampliando o campo de estabilidade da austenita e levando, com isto, a um aumento no volume total dessa fase e, conseqüentemente, de martensita e/ou bainita após o processamento.⁽³⁾ O silício promove a formação de ferrita pró-eutetóide durante o resfriamento lento no recozimento contínuo, além de retardar a precipitação de carbonetos durante a formação da bainita, permitindo a difusão do carbono para a austenita.⁽⁴⁾

Neste estudo foi avaliada a influência das variáveis operacionais temperatura de encharque e velocidade de processamento e dos elementos manganês e silício nas propriedades mecânicas em tração de aços multifásicos.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo foi desenvolvido a partir de lingotes produzidos em escala piloto, em forno de fusão a vácuo, com composição química conforme Tabela 1. Não houve variação significativa nos teores dos elementos carbono, fósforo, enxofre, alumínio e nitrogênio nos 3 lingotes.

Tabela 1. Composição química dos lingotes produzidos em escala piloto (% em massa).

Aço	C	Mn	Si	P	S	Al _T	N
A	≤ 0,12	1,5	≤ 0,03	≤ 0,015	≤ 0,010	≥ 0,030	≤ 0,0065
B		1,5	0,50				
C		2,0	≤ 0,03				

Os lingotes foram processados por laminação a quente primeiramente até a espessura de 35,0 mm, e em seguida até a espessura de 7,0 mm, com resfriamento em forno mufla, visando à simulação do bobinamento à temperatura de 650 °C.

As chapas obtidas foram usinadas até a espessura de 3,75 mm, sendo então laminadas a frio até a espessura final de 1,50 mm. Após estas etapas, o material foi tratado termicamente em máquina Gleeble, visando à simulação do ciclo de recozimento contínuo. Foram empregadas as temperaturas de encharque de 760 °C, 780 °C, 800 °C e 820 °C e duas velocidades de processamento, 50 m/min e 110 m/min. Na seqüência, foram realizados ensaios de tração, de acordo com a norma ASTM A370/97,⁽⁵⁾ e análise por difratometria de raios-X, esta última objetivando avaliar a presença de austenita retida.

Para verificar a influência da composição química na quantidade de austenita transformada durante o aquecimento, realizou-se simulações de ciclos térmicos na Gleeble para monitoramento, via variação dimensional, da transformação alotrópica α/γ (ferrita/austenita). Durante o ensaio, foi registrada a dilatação do corpo-de-prova com a temperatura e, a partir da curva gerada, Figura 2, foi possível determinar a quantidade de austenita transformada. Para a obtenção das curvas dilatométricas, as amostras utilizadas foram aquecidas a uma taxa de 2,2°C/s, até a temperatura de 1000 °C.

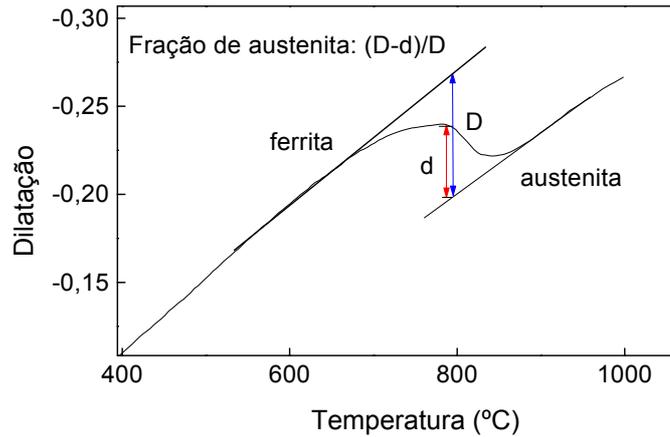


Figura 2. Curva dilatométrica obtida para ensaio com o aço A, ilustrando o método utilizado para cálculo da fração de austenita transformada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme mostra a Figura 3, construída a partir de dados coletados até o início da estricção, a adição de silício (aço B) provocou aumento significativo da ductilidade e elevação do valor do limite de resistência (LR). Esses resultados estão de acordo com os observados por Castro e Melo.⁽⁶⁾

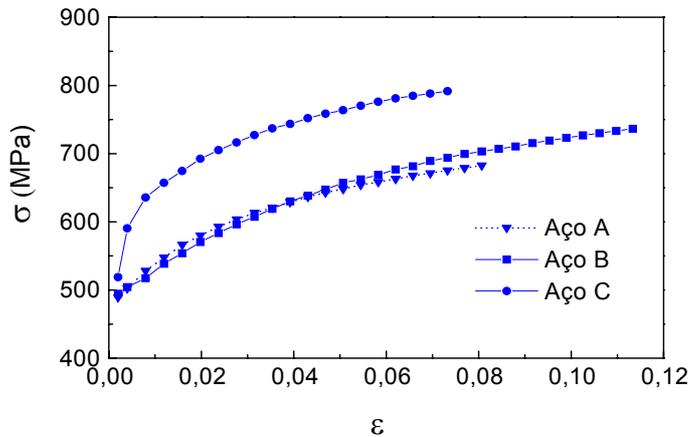


Figura 3. Curvas tensão verdadeira (σ) versus deformação verdadeira (ϵ), obtidas em tração, para os diferentes aços avaliados. Velocidade de processamento: 50 m/min. Temperatura de encharque: 760 °C.

A elevada ductilidade do aço B resulta do efeito TRIP (plasticidade induzida por transformação da austenita retida (γ_r) em martensita), que ocorre durante o ensaio de tração, de modo que a deformação propaga-se uniformemente pelas regiões não deformadas, onde a resistência é relativamente menor. Deste modo, obtém-se a conjugação de alta ductilidade, através do atraso da fratura causado pela transformação progressiva de γ_r , com alta resistência final, devido ao aumento da fração de martensita na microestrutura. Os resultados apresentados na Tabela 2, para as duas temperaturas analisadas, mostram a presença de γ_r na microestrutura desse aço e dão sustentação ao que foi exposto. Deve-se ressaltar que os demais aços avaliados não apresentaram indício de γ_r .

Tabela 2. Resultados da determinação da fração de γ_r por difração de raios-X para o aço B.

Velocidade de processamento (m/min)	Temperatura de encharque (°C)	γ_r (%)
50	760	2,45
	820	2,65
110	760	7,41
	820	5,04

O fato do silício ser um elemento estabilizador da ferrita favoreceu a redução da fração volumétrica de austenita transformada durante o aquecimento, Figura 4, e, conseqüentemente, promoveu o enriquecimento dessa austenita em carbono, aumentando a sua estabilidade à temperatura ambiente. Além disso, o efeito do silício sobre a formação de ferrita pró-eutetóide durante o resfriamento lento no recozimento contínuo e sobre a precipitação de carbonetos durante a transformação bainítica, comentados anteriormente, provavelmente, também contribuiu para a presença de γ_r na microestrutura do aço B.

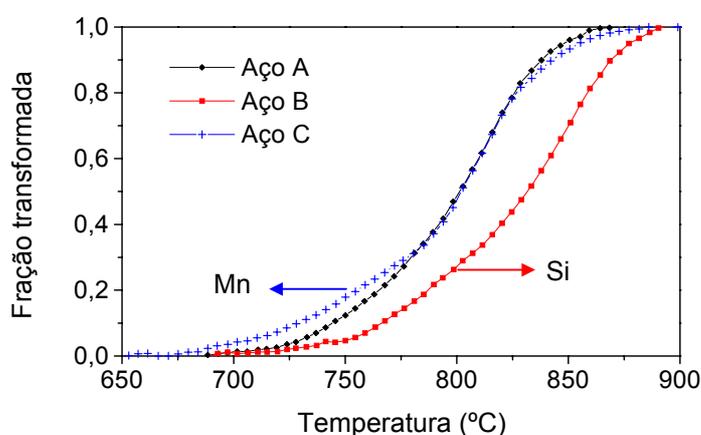


Figura 4. Fração de austenita transformada durante o aquecimento dos diferentes aços avaliados.

A adição de manganês (aço C) provocou a elevação dos valores de LR e de limite de escoamento (LE) e também a redução da ductilidade. Esse comportamento está relacionado, principalmente, ao aumento da fração volumétrica do segundo constituinte, conforme pode-se verificar na Figura 5. Os resultados obtidos por dilatométrica, apresentados na Figura 4, confirmam essa tendência. Conforme pode-se observar, a adição de manganês aumentou a fração de austenita transformada, principalmente para temperaturas abaixo de 790 °C. Para temperaturas superiores não observa-se o mesmo comportamento, porém, esse fato pode estar relacionado às imprecisões envolvidas no método utilizado para a determinação da fração de

austenita transformada e aos efeitos da recristalização e da decomposição da perlita, não considerados nessa determinação.

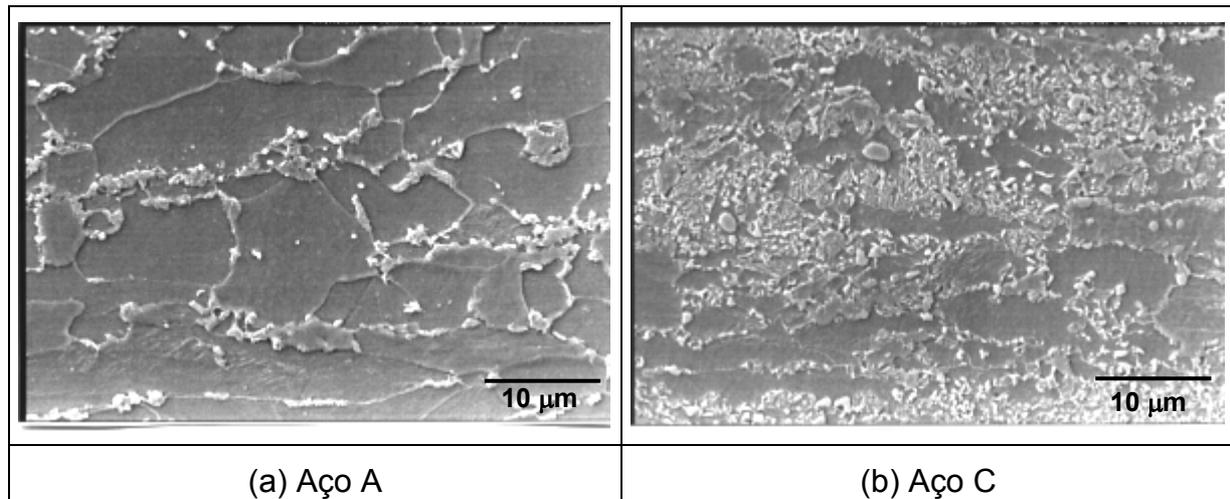


Figura 5. Micrografias de microscopia eletrônica de varredura para os aços A e C. Velocidade de processamento: 50 m/min. Temperatura de encharque: 760°C. Ataque: Nital 4%.

De um modo geral, observou-se que a elevação da temperatura de encharque provocou uma tendência de redução dos valores de LR e LE e de aumento do alongamento total. Esses resultados podem ser observados na Figura 6 para o aço A.

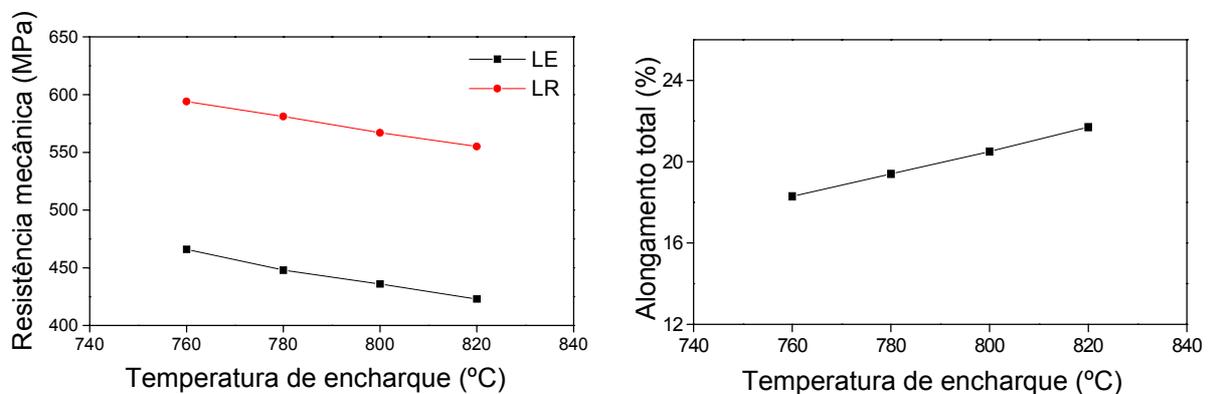


Figura 6. Variação das propriedades mecânicas em tração com a temperatura de encharque para o aço A. Velocidade de processamento: 50 m/min. Base de medida: 50 mm.

A redução do LR se deve, principalmente, ao menor teor de carbono da austenita formada em temperaturas mais elevadas, o que resulta em uma martensita de menor resistência mecânica e, também, em maiores quantidades de bainita. Esse efeito foi observado por Kim, Reichel e Dahl⁽⁷⁾ em estudo sobre aços *Dual Phase*. A queda do LE pode ser associada ao aumento da fração de ferrita recristalizada e à maior difusão do carbono para a austenita, o que contribui para a obtenção de uma ferrita mais macia e para um aumento da densidade de deslocamentos móveis nas interfaces ferrita/segundo constituinte. Isso explica, também, o aumento do alongamento total.

A elevação da velocidade de processamento provocou aumento dos valores de LE e LR e redução da ductilidade, exceto para o aço B (com adição de silício), Figura 7. Esses efeitos estão de acordo com os resultados obtidos por Pichler et al.⁽⁶⁾ A elevação do LE se deve à redução do tempo para a difusão do carbono para a austenita durante o recozimento, ao aumento da fração volumétrica do segundo constituinte (menor tempo para a nucleação e crescimento da ferrita pró-eutetóide) e à redução da fração de ferrita recristalizada. Esses fatores também explicam a redução da ductilidade observada para os aços A e C. Para o aço B, o aumento da ductilidade com a elevação da velocidade de processamento pode ser creditado à maior fração de γ_r na microestrutura, conforme mostra a Tabela 2. A elevação do LR pode ser associada à maior quantidade de segundo constituinte formado e ao menor tempo de revenimento da martensita durante a etapa de superenvelhecimento, mostrado na Figura 1.

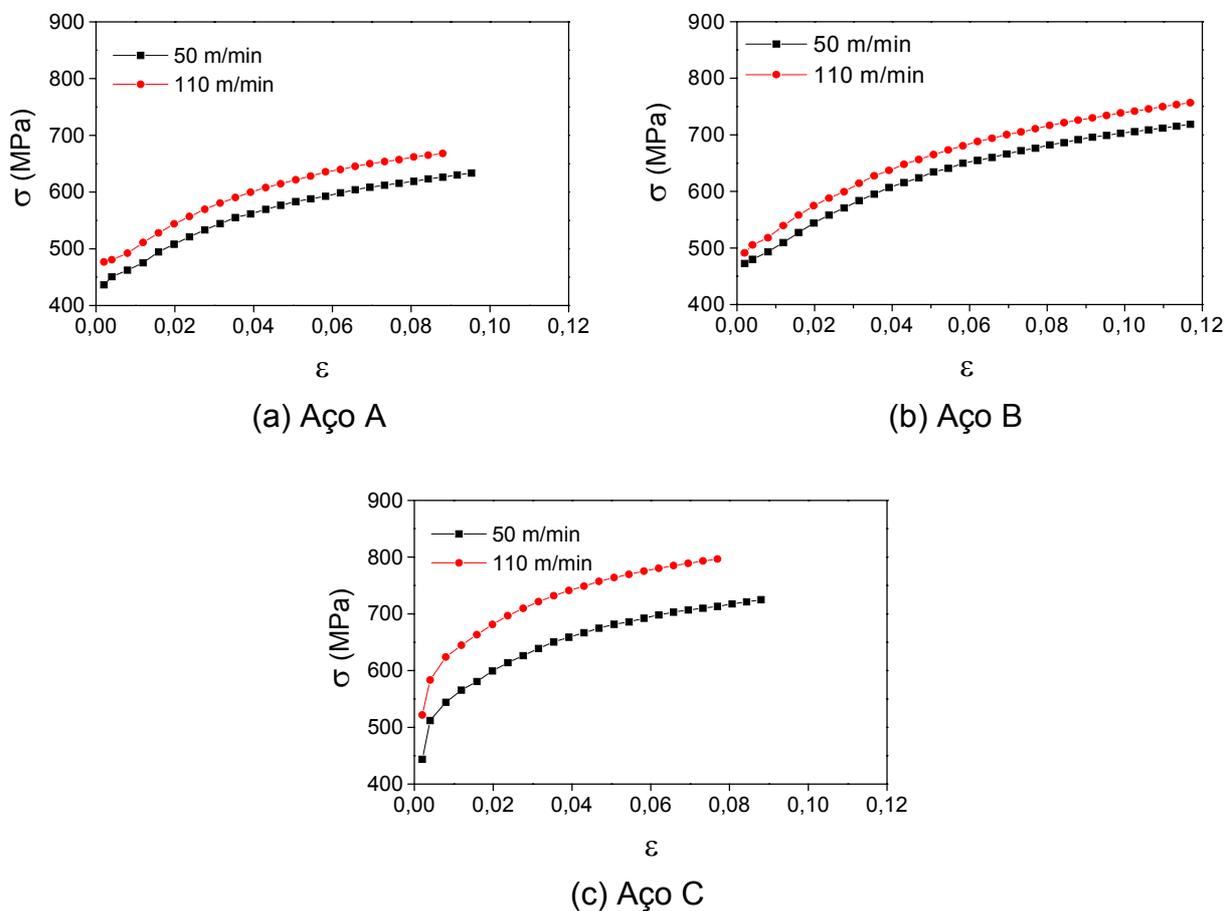


Figura 7. Influência da velocidade de processamento no comportamento mecânico em tração dos aços avaliados. Temperatura de encharque: 800 °C.

4 CONCLUSÕES

Verificou-se que a adição de silício provocou atraso na transformação ferrita/austenita e favoreceu a presença de γ_r na microestrutura. Em função disso, observou-se aumento significativo da ductilidade e elevação do LR.

A adição de manganês resultou no aumento dos valores de LR e de LE e em queda da ductilidade, efeitos que foram associados à elevação da fração volumétrica do segundo constituinte.

A elevação da temperatura de encharque resultou na redução dos valores de LE e no aumento do alongamento total, comportamento que pode ser explicado pela maior difusão do carbono para a austenita e pela elevação da fração de ferrita recristalizada. Observou-se, também, diminuição do LR, fato que foi relacionado à redução da resistência mecânica do segundo constituinte.

O aumento da velocidade de processamento provocou elevação do LE e redução da ductilidade, exceto para o aço com adição de silício. Esses efeitos foram associados à redução do tempo para a difusão do carbono para a austenita durante o recozimento, ao aumento da fração volumétrica do segundo constituinte e à redução da fração de ferrita recristalizada. Observou-se, também, aumento do LR, fato que foi relacionado à maior quantidade de segundo constituinte formado e ao menor tempo de revenimento da martensita durante a etapa de superenvelhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANDRADE, S. L.; TAISS, E. J. M.; ROSA, L. K. ULSAB – AVC: o aço no automóvel do futuro. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 57., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 2002. 1 CD-ROM, p. 721-731.
- 2 MESPLONT, C.; VANDEPUTTE, S.; DE COOMAN, B. C. Microstructure – properties relationships in complex phase cold-rolled high strength steels. In: MWSP CONFERENCE, 43., 2001, Charlotte, NC. **Proceedings...** S.l.p.: ISS, VOL. XXXIX, 2001, v. 39, p. 359-371.
- 3 LASDAY, S. B. Continuous annealing and aging process produces high strength dual phase steel sheet for automobile manufacturing. **Industrial Heating**, p. 22-23, Oct. 1982.
- 4 BLECK, W. . In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRIP-AIDED HIGH STRENGTH FERROUS ALLOYS, 1988, Ghent, Belgium. **Proceedings...** GRIPS' Sparkling World of Steel, Ghent, Belgium, 1998. v.1.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A-370 – 97a**: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. Philadelphia.
- 6 CASTRO, I.; MELO, T. M. F. Influência do teor de Si nas propriedades mecânicas de um aço C-Mn com efeito TRIP. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 59., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 2004. 1 CD-ROM, p. 2903-2911.
- 7 KIM, S.; REICHEL, U.; DAHL, W. Effect of bainite on the mechanical properties of dual phase steels. **Steel Research**, v.58, n. 4, p. 186-190, 1987.
- 8 PICHLER, A.; TRAJNT, S.; PAULI, H.; MILDNER, H.; SZINYUR, J.; BLAIMSCHEIN, M.; STIASZNY, P.; WERNER, E. Processing and properties of cold-rolled TRIP steels. In: MWSP CONFERENCE, 43., 2001. **Proceedings...** S.n.t.: ISS, 2001. V.39, p. 411-434.

THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND OF ANNEALING PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF MULTIPHASE STEELS⁽¹⁾

Fábio Dian Murari⁽²⁾
Túlio Magno Füzessy de Melo⁽³⁾
Fernando de Souza Costa⁽⁴⁾

Abstract

The effects of silicon and manganese additions and of annealing temperature and processing speed on the mechanical properties of multiphase steels 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 ductility was substantially increased with the addition of silicon. The yield and tensile strengths increased and the ductility decreased with the addition of manganese. The yield and tensile strengths decreased and the ductility increased with the increase of the annealing temperature. The mechanical resistance increased and the ductility decreased with the increase of the processing speed.

Key-words: Multiphase steels; Ultra high strength steels; Continuous annealing.

(1) *Technical Contribution to the 60th Annual Congress of Brazilian Society for Metallurgy and Materials (ABM) – Belo Horizonte, MG, Brazil, July 25 – 28, 2005.*

(2) *Metalurgical Engineer, M.Sc., Usiminas Research and Development Center; Ipatinga, MG, Brazil.*

(3) *ABM Member, Mechanical Engineer, M.Sc., Dr.- Ing., Usiminas Research and Development Center; Ipatinga, MG, Brazil.*

(4) *ABM Member, Physicist, Usiminas Research and Development Center; Ipatinga, MG, Brazil.*