

EFEITO DA ADIÇÃO DE Cr E Si NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO MULTIFÁSICO LAMINADO A FRIO¹

Fábio Dian Murari²

Ivan de Castro²

Túlio Magno Füzessy de Melo³

Resumo

Foi avaliado o efeito da adição dos elementos Cr e Si nas propriedades mecânicas em tração de um aço multifásico laminado a frio de baixo teor de C. Avaliou-se, também, a influência desses elementos nos coeficientes de anisotropia normal médio, valor \bar{r} , e planar, Δr , e nos parâmetros associados ao envelhecimento por deformação, valores *Bake Hardening* (BH) e *Aging Index* (AI). 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, para as condições utilizadas, que a adição de Cr provocou o aumento do limite de resistência e não resultou em mudança de limite de escoamento e dos coeficientes de anisotropia. Observou-se, ainda, que a adição desse elemento reduziu o alongamento total e a susceptibilidade ao envelhecimento por deformação. A adição de Si, por sua vez, provocou o aumento do coeficiente de anisotropia planar e dos valores de limite de escoamento e de limite de resistência, sem resultar em decréscimo de alongamento total. Não foi observada influência do Si, para a faixa avaliada, nos parâmetros associados ao envelhecimento por deformação.

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

THE EFFECT OF Cr AND Si ADDITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF A COLD ROLLED MULTIPHASE STEEL

Abstract

The effects of Cr and Si additions on the mechanical properties of a low C multiphase steel were evaluated. The influence of Si and Cr additions on the values of anisotropy coefficients, r value and Δr , and on strain aging parameters, Bake Hardening value and Aging Index, were also 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 tensile strength was increased with the addition of Cr and the yield strength and anisotropy coefficients were not affected. The Cr addition also decreased the ductility and the susceptibility to strain aging of the steel. The planar anisotropy coefficient and the yield and tensile strengths increased with the addition of Si, without decreasing the ductility. The parameters of strain aging were not influenced by the Si addition.

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

¹ Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos – Curitiba, PR, 17 a 20 de outubro de 2006.

² Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga (MG).

³ Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, M.Sc., Dr. - Ing., 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, 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), alto coeficiente de encruamento (DP, TRIP), elevados 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, eventualmente, austenita retida (γ_r).

Os aços multifásicos são fabricados, na sua maior parte, como laminados a frio e recozidos continuamente. 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 a se obter a estrutura característica de cada aço.

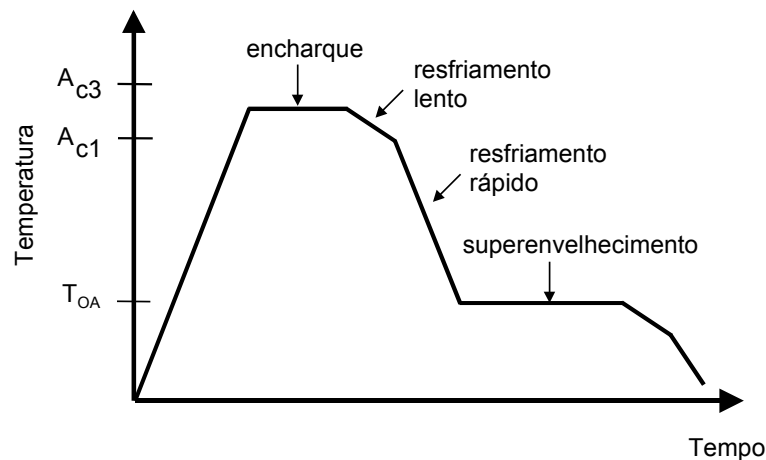


Figura 1. Ciclo esquemático de recozimento contínuo para a produção de aços multifásicos laminados a frio. A_{c1} e A_{c3} são as temperaturas de início e final de transformação da austenita durante o aquecimento, respectivamente.

Tradicionalmente, são utilizadas concepções à base de C e Mn para a produção de aços multifásicos via recozimento contínuo. O teor de C determina a quantidade de austenita formada na temperatura de encharque e também é o responsável pela dureza e morfologia do segundo constituinte. A adição de Mn 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⁾ Além de Mn, adições de Cr e Si também têm sido empregadas. O Cr, além de aumentar a temperabilidade da austenita, confere à ferrita um endurecimento por solução sólida inferior ao obtido com a adição de elementos como Mn, P e Si,⁽⁴⁾ o que contribui para a redução da razão elástica. O Si

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 C para a austenita.⁽⁵⁾

Neste estudo foi avaliado o efeito da adição de Cr e Si nas propriedades mecânicas em tração de um aço multifásico laminado a frio de baixo teor de C. Avaliou-se, também, a influência desses elementos nos coeficientes de anisotropia normal médio, valor \bar{r} , e planar, Δr , e nos parâmetros associados ao envelhecimento por deformação, valores *Bake Hardening* (BH) e *Aging Index* (AI).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

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 C, Mn, P, S, Al e N nos 3 lingotes.

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

Aço	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	N
CMn	≤ 0,15	≤ 2,00	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,01	≤ 0,05	≤ 0,02	≤ 0,005
CMnCr							0,30	
CMnSi			0,30				≤ 0,02	

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 3,0 mm, sendo então laminadas a frio até a espessura final de 0,7 mm. Após estas etapas, o material foi tratado termicamente em máquina *Gleeble*, visando à simulação do ciclo de recozimento contínuo, sendo empregada uma temperatura de encharque de 780°C e uma temperatura de superenvelhecimento de 260°C. Na seqüência, foram realizados ensaios de tração em corpos-de-prova retirados a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação para determinação das propriedades mecânicas e dos coeficientes de anisotropia, de acordo com as normas ASTM A370/97⁽⁶⁾ e ASTM E517/2000,⁽⁷⁾ respectivamente, e análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Determinou-se, também, a quantidade de austenita retida por meio de difratometria de raios-X.

O valor BH foi obtido pela aplicação de pré-deformação em tração de 2% seguida de tratamento térmico a 170°C por 20 minutos. Para a obtenção do AI, aplicou-se uma pré-deformação de 8% e o tratamento térmico foi realizado a 100°C durante 60 minutos. Foram avaliados corpos-de-prova transversais à direção de laminação e os parâmetros BH e AI foram calculados valendo-se da diferença entre o limite de escoamento inferior após o envelhecimento e a tensão correspondente à pré-deformação aplicada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 é mostrado o aspecto microestrutural típico dos aços avaliados. Pode-se observar para o aço CMn, Figuras 2(a) e 2(d), uma distribuição complexa de constituintes, onde percebe-se a presença de martensita e bainita, dispersas em matriz ferrítica de granulação fina ($< 10 \mu\text{m}$) e heterogênea. Analisando-se as Figuras 2(b) e 2(e) e 2(c) e 2(f) percebe-se que as adições de Cr e de Si favoreceram a formação de martensita, confirmando a tendência encontrada na literatura.^(4,5)

As análises realizadas por difratometria de raios-X mostraram a presença de γ_r (3,62%) na microestrutura do aço com adição de Si, Figura 3. Para os demais, embora detectada, a γ_r apresentou-se em quantidade inferior a 1%, valor mínimo determinável pela técnica utilizada.

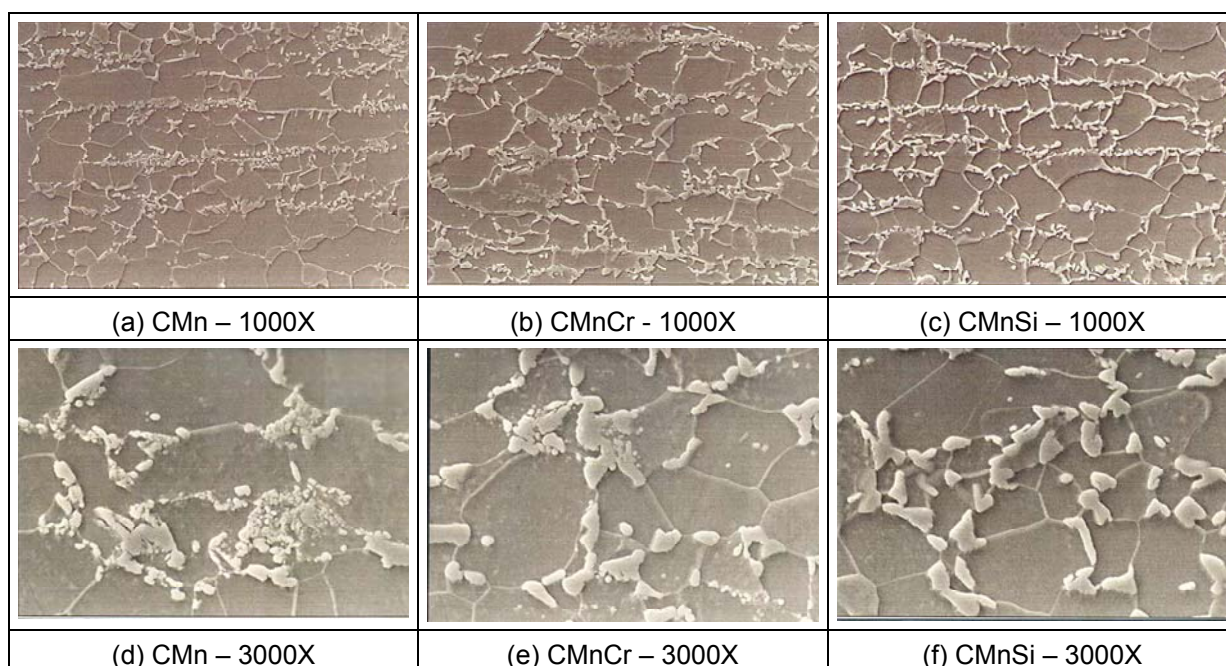


Figura 2. Aspectos típicos das microestruturas dos aços avaliados. Microscopia eletrônica de varredura. Ataque: nital 4%.

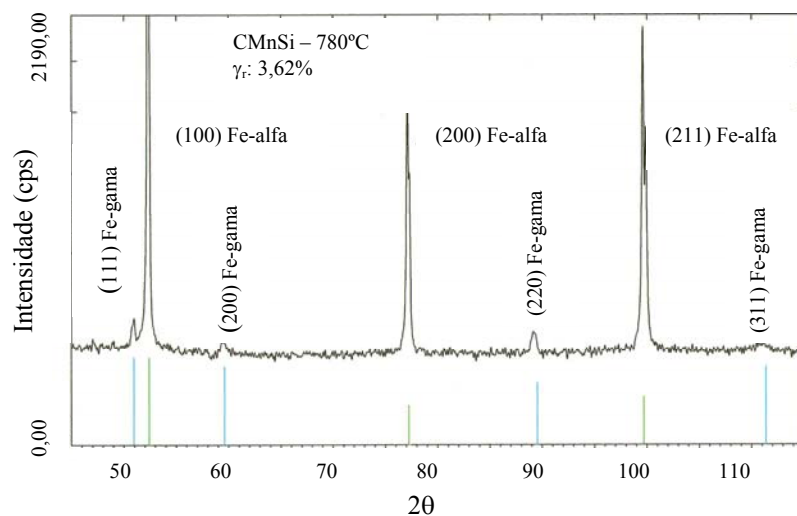


Figura 3. Resultado da determinação de γ_r na microestrutura do aço CMnSi.

O aspecto das curvas tensão de engenharia (S) versus deformação de engenharia (e) para os três aços avaliados pode ser observado na Figura 4. Pode-se notar que a transição entre os regimes elástico e plástico ocorre de maneira contínua, em todos os casos, efeito que pode ser associado à grande quantidade de deslocações móveis produzidas nas interfaces ferrita/martensita, devido à expansão de volume e à deformação cisalhante que acontecem durante a transformação da austenita para martensita no resfriamento.⁽⁸⁾ Observa-se, também, que as adições de Cr e Si aumentaram a taxa de encruamento nos momentos iniciais da deformação, como pode ser verificado pela inclinação da curva de escoamento, efeito que também se deve ao aumento da quantidade de deslocações geradas nas interfaces matriz/segundo constituinte.

Um dos conceitos utilizados para explicar o encruamento baseia-se na idéia das deslocações se empilharem nos planos de deslizamento, quando bloqueadas por barreiras do cristal. Estes empilhamentos produzem uma tensão de reação que se opõe à tensão aplicada no plano de deslizamento. Partículas microscópicas de precipitados e também átomos solutos podem agir como barreiras, no entanto, as barreiras mais efetivas surgem quando as deslocações que se movimentam em planos de deslizamento que se interseccionam combinam-se umas com as outras produzindo novas deslocações, as quais não se encontram em direções de deslizamento. Estas deslocações de baixa mobilidade são chamadas deslocações bloqueadas ou deslocações imóveis. Uma vez que estas deslocações bloqueadas não se encontram no plano de deslizamento de baixa tensão cisalhante, elas atuam como barreiras à movimentação das outras deslocações, até que a tensão atinja um nível suficientemente alto capaz de romper o bloqueio.⁽⁹⁾ Como nos aços multifásicos, de maneira geral, a quantidade inicial de deslocações é elevada, devido à presença de interfaces ferrita/martensita, rapidamente atinge-se um estágio no qual a quantidade de deslocações imóveis geradas é muito alta, o que torna o movimento das deslocações móveis cada vez mais restrito. Isso explica a significativa redução da taxa de encruamento com a deformação, observada na Figura 4 para os aços avaliados.

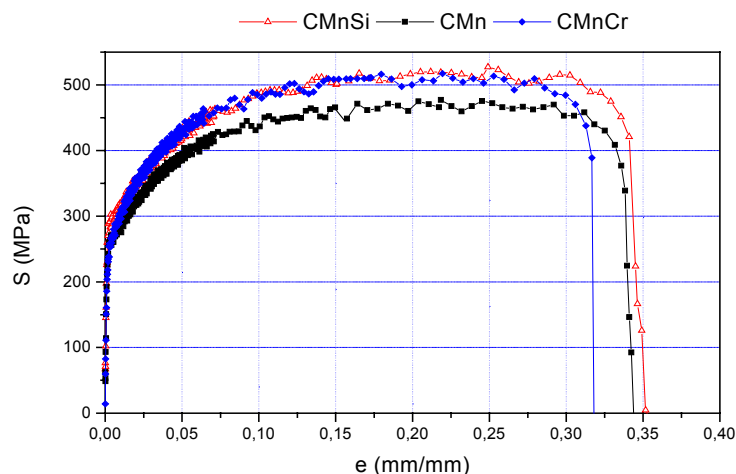


Figura 4. Comportamento mecânico, em tração, dos diferentes aços avaliados. Velocidade de deformação: $0,003 \text{ s}^{-1}$. Base de medida: 25 mm. Direção longitudinal.

Na Figura 5 são apresentados os valores de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e de alongamento total para os três aços avaliados. Observa-se que a adição de Cr provocou o aumento de LR e não exerceu influência no LE. Esse

comportamento pode ser creditado ao aumento da fração volumétrica de martensita, em relação ao aço CMn, e ao baixo efeito de endurecimento por solução sólida conferido pelo Cr.⁽⁴⁾ Verifica-se, também, que a adição de Cr provocou a redução do alongamento total, fato que também pode ser associado ao aumento da fração de martensita. Resultados semelhantes foram obtidos por Kim et al.⁽¹⁰⁾

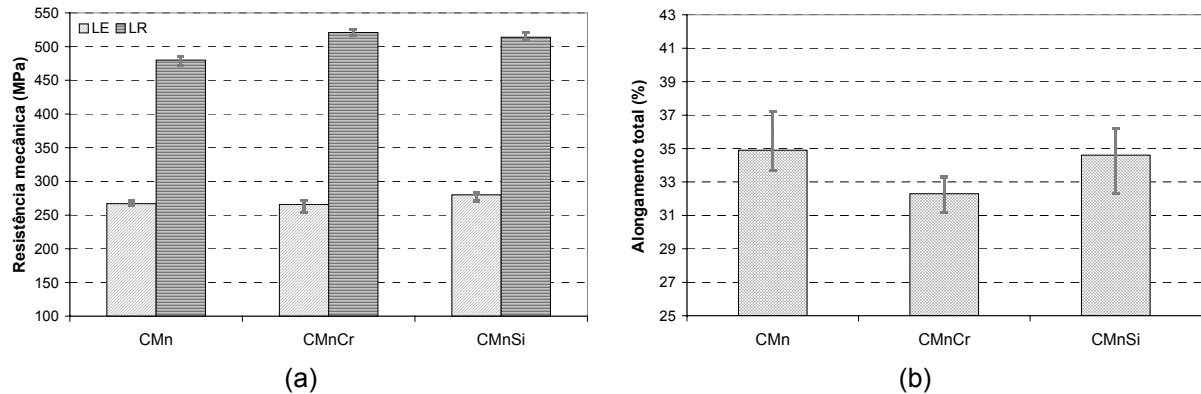


Figura 5. Propriedades mecânicas obtidas em tração para os aços avaliados. Base de medida: 25 mm.

A adição de Si, Figuras 5(a) e 5(b), provocou o aumento dos valores de LE e de LR, sem resultar em decréscimo de alongamento total. Esses resultados estão de acordo com os trabalhos de Castro e Melo⁽¹¹⁾ e de Saleh e Priestner.⁽¹²⁾ O aumento de resistência mecânica com a adição de Si pode ser creditado ao aumento da fração volumétrica de martensita e ao endurecimento da matriz ferrítica por solução sólida. A presença de γ_r (3,62%) na microestrutura do aço CMnSi, provavelmente, contribuiu para a manutenção do alongamento total no nível observado e para o aumento do LR. Esse comportamento pode ser associado à transformação de γ_r em martensita, durante o ensaio de tração (efeito TRIP). Deste modo, foi possível obter 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.

De acordo com a Figura 6, as adições de Cr e Si não influenciaram o valor \bar{r} , o qual situou-se dentro da faixa encontrada na literatura⁽⁸⁾ para aços multifásicos laminados a frio. A adição de Si provocou a elevação do coeficiente de anisotropia planar, o que é indicativo de maior susceptibilidade à formação de orelhas em caso de operações de embutimento profundo.

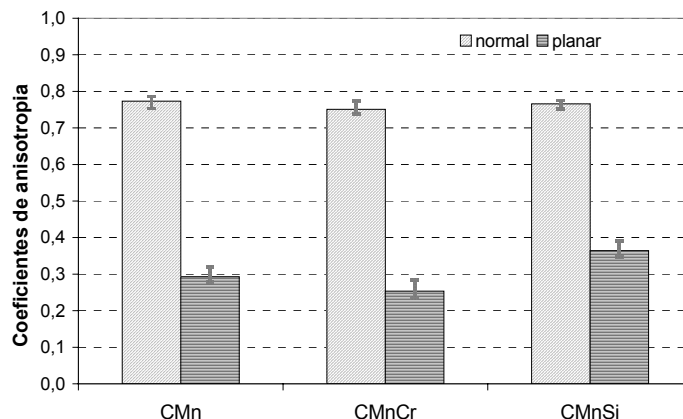


Figura 6. Influência das adições de Cr e Si nos parâmetros de estampabilidade dos aços avaliados.

Na Figura 7 são mostrados os resultados dos ensaios para a determinação dos valores BH e AI. Conforme se pode observar, a adição de Cr reduziu a susceptibilidade ao envelhecimento, o que se deve, provavelmente, à redução de C em solução sólida da ferrita por meio de precipitação de carbonetos dos tipos $(Cr, Fe)_7C_3$ ou $(Cr, Fe)_{23}C_6$, conforme relatado por LESLIE.⁽¹³⁾ Com relação à adição de Si, não se observa qualquer tendência para a faixa utilizada. De acordo com a literatura,^(14,15) são necessários valores de AI < 30 MPa para que se tenha garantia de resistência ao envelhecimento à temperatura ambiente pelo menos por um período de 180 dias. Nesse aspecto, apenas o aço com adição de Cr atendeu a esse requisito. Quando o AI é menor que 20 MPa, o aço é considerado praticamente não envelhecível. Ao valor máximo de 30 MPa para o AI é associado um valor BH máximo de 50 a 60 MPa para aços *Bake Hardenable* convencionais, faixa que é bem superior àquela observada na Figura 7 para os aços analisados. Esses resultados indicam que a relação entre esses dois parâmetros precisa ser melhor avaliada para o caso específico de aços multifásicos como aqueles avaliados no presente trabalho.

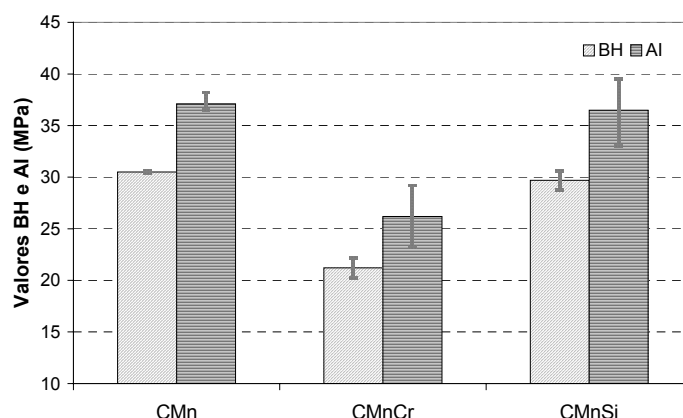


Figura 7. Influência das adições de Cr e Si nos parâmetros de envelhecimento dos aços avaliados.

4 CONCLUSÕES

A adição de Cr provocou o aumento de LR e não exerceu influência no LE. Esse comportamento pode ser creditado ao aumento da fração volumétrica de martensita e ao baixo efeito de endurecimento por solução sólida conferido pelo Cr.

Verificou-se que a adição desse elemento resultou na redução do alongamento total, fato que também pode ser creditado ao aumento da fração de martensita.

A adição de Si provocou o aumento dos valores de LE e de LR, sem resultar em decréscimo de ductilidade. O aumento de resistência mecânica com a adição de Si pode ser creditado ao aumento da fração volumétrica de martensita e ao endurecimento da matriz ferrítica por solução sólida. A presença de austenita retida na microestrutura do aço CMnSi, provavelmente, contribuiu para a manutenção do alongamento total no nível observado e para o aumento do LR. Esse comportamento pode ser associado à transformação da austenita retida em martensita, durante o ensaio de tração (efeito TRIP). Deste modo, foi possível obter a conjugação de alta ductilidade, através do atraso da fratura causado pela transformação progressiva da austenita retida, com alta resistência final, devido ao aumento da fração de martensita na microestrutura.

As adições de Cr e Si não influenciaram o coeficiente de anisotropia normal médio, o qual situou-se dentro da faixa encontrada na literatura para aços multifásicos. Com relação ao coeficiente de anisotropia planar, verificou-se que a adição de Si provocou a elevação desse parâmetro, o que é indicativo de maior susceptibilidade à formação de orelhas em caso de operações de embutimento profundo.

A adição de Cr reduziu os valores dos parâmetros associados ao envelhecimento por deformação, BH e AI, o que se deve, provavelmente, à retirada de C em solução sólida da ferrita por meio de precipitação de carbonetos do tipo $(Cr, Fe)_7C_3$ ou $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Com relação à adição de Si, não se observou qualquer tendência para a faixa utilizada.

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 LASDAY, S. B. Continuous Annealing and Aging Process Produces High Strength Dual Phase Steel Sheet for Automobile Manufacturing. Industrial Heating. October, p. 22-23, 1982.
- 4 IRIE, T.; SATOH, S.; HASHIGUCHI, K.; TAKAHASHI, I.; HASHIMOTO, O. Metallurgical factors affecting the formability of cold-rolled high strength steel sheets. Transactions ISIJ, Vol. 21, p. 793 – 801, 1981.
- 5 BLECK, W. Using the TRIP effect - the dawn of promising group of cold formable steels. International Conference on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys, Ed. B. C. De Cooman, p. 13 – 23, 2002.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM A- 370 – 97a; Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. ASTM E- 517 – 2000; Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
- 8 LLEWELIN, D. T.; HILLIS, D. J. Dual Phase Steels. Ironmaking and Steelmaking, Vol. 23, No. 6, p. 471-477, 1996.

- 9 ABE, M. Strengthening mechanism in cold-rolled steels. Solid solution, precipitation and fine grain hardening. Private communication of NSC, 2003.
- 10 KIM, S. J.; CHANG, G. L.; LEE, T. H.; OH, C. S. Effect of Cu, Cr and Ni on mechanical properties of 0,15 wt.%C TRIP-aided cold rolled steels. Scripta Materialia, 48, p. 539-544, 2003.
- 11 CASTRO, I.; MELO, T. M. F. Influência do teor de Si nas propriedades mecânicas de um aço C-Mn com efeito TRIP. In: 59º Congresso Anual da ABM, São Paulo – SP, p. 2903 – 2911, julho de 2004,.
- 12 SALEH, M. H., PRIESTNER, R. Retained austenite in dual-phase silicon steels and its effect on mechanical properties. Journal of Materials Processing Technology 113, p. 587-593, 2001.
- 13 LESLIE, W. C. The Physical Metallurgy of Steels. McGraw-Hill International Book Company. Stainless Steels, p. 326-357.
- 14 USHIODA, K.; AKISUE, O.; KOYAMA, K.; HAYASHIDA, T. Metallurgical investigation for producing non-aging deep-drawable low-carbon Al-killed steel sheets by continuous annealing. The Minerals, Metals & Materials Society, p. 261-286, 1992.
- 15 IRIE, T.; SATOH, S.; YASUDA, A.; HASHIMOTO, O. Development of deep drawable and bake hardenable high strength steel sheet by continuous annealing of extra low carbon steel with Nb, Ti and P. In: SYMPOSIUM ON METALLURGY OF CONTINUOUS ANNEALED SHEET STEEL, 1982, Dallas. Metallurgy of Continuous annealed sheet steel; proceedings of ... Warrendale: AIME, p. 155-171, 1982.