

# CARACTERÍSTICAS DO ENCRUAMENTO DO AÇO TWIP ALTO Mn E BAIXO CARBONO LAMINADO A FRIO E RECOZIDO

Dayanna Moreira Duarte <sup>1</sup>  
Érica Aparecida Silva Ribeiro <sup>2</sup>  
Lorena Freitas Dutra <sup>3</sup>  
Berenice Mendonça Gonzalez <sup>4</sup>  
Dagoberto Brandão Santos <sup>5</sup>

## Resumo

Existe uma atual necessidade da indústria automobilística por materiais que combinem alta conformabilidade, alta resistência mecânica e baixo peso específico a fim de diminuir o consumo de combustíveis e aumentar a segurança dos passageiros. É neste contexto que surge o aço TWIP (*TW*inning *I*nduced *P*lasticity), um aço de alto teor de manganês contendo silício e alumínio (2% a 4%) em sua composição. Sua principal característica é a formação de maclas sob ação de uma tensão. No presente trabalho, investiga-se como as características do encruamento de um aço C-0,06; Mn-25; Al-3; Si-2; Ni-1, com efeito TWIP, laminado a quente e a frio e recozido a temperaturas variáveis entre 600°C e 850°C, influencia as suas propriedades mecânicas. Tal investigação consistiu na obtenção de micrografias ópticas e eletrônicas de varredura (MEV) e na avaliação do tamanho de grão e da fração volumétrica dos grãos recristalizados. Para complementação, foram realizados ensaios de tração. O estudo do encruamento teve a abordagem de Hollomon associada com o critério de Considère. A amostra recozida a 850°C apresenta um expoente de encruamento de 0,55, alongamento total de 66% e limite resistência de 700 MPa.

**Palavras-chave:** Efeito TWIP; Laminação a frio; Recristalização; Encruamento.

## BEHAVIOUR IN THE STRAIN HARDENING OF HIGH Mn AND LOW CARBON TWIP STEEL COLD ROLLING AND ANNEALING

### Abstract

There is a current need for the automotive industry for materials that combine high formability, high strength and low specific weight in order to reduce fuel consumption and increase passenger safety. In this context, appears the TWIP steel (*TW*inning *I*nduced *P*lasticity), defined as a steel with high content of manganese and, yet, silicon and aluminum (2% to 4%) in its composition. Its main feature is the formation of twinning under stress. In this study, it was investigated how the characteristics of hardening work of the steel C-0,06, Mn-25, Al-3, Si-2, Ni-1, with TWIP effect, hot and cold rolling and annealing at temperatures varying between 600°C and 850°C, influences their mechanical properties. This research used optical micrography and scanning electron microscopy (SEM) for assessment of grain size and volume fraction of recrystallized grains. To complement this study, tensile tests were performed. The hardening work study uses the approach of Hollomon associated with the Considère criterion. The sample annealing to 850°C shows a work hardening exponent of 0.55, 66% of total elongation and maximum strength of 700 MPa.

**Key words:** Effect TWIP; Cold rolling; Recrystallization; Strain hardening.

<sup>1</sup>Sócia da ABM, Aluna de Graduação em Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Bloco 2 S. 2632, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: dayanna\_md@hotmail.com

<sup>2</sup>Sócia da ABM, Aluna de Graduação em Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Bloco 2, S. 2632, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: ericaasr@bol.com.br

<sup>3</sup>Sócia da ABM, Aluna de Graduação em Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Bloco 2, S. 2632, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: lolisfd@hotmail.com

<sup>4</sup>Sócio da ABM, Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Bloco 2, S. 2632, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: gonzalez@demet.ufmg.br

<sup>5</sup>Sócio da ABM, Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Bloco 2, S. 2632, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: dsantos@demet.ufmg.br

## I INTRODUÇÃO

*Twinning Induced Plasticity* (TWIP) é um aço de alto teor de manganês contendo em sua composição silício e alumínio (2% a 4%). Este material ostenta uma combinação de alta resistência e uma excepcional plasticidade, além de uma redução de aproximadamente 10% em sua massa específica quando comparado às ligas Fe-C. Tal combinação levou principalmente as indústrias automobilísticas a desenvolverem a aplicação deste produto visando à economia de combustível, segurança do passageiro, redução de peso e diminuição da emissão de gás poluente no meio ambiente.<sup>(1)</sup>

Nos aços alto manganês ligados com carbono ou com alumínio e silício, o efeito normalmente encontrado é o TWIP. Sua estrutura austenítica é mantida durante todo o processo de deformação plástica<sup>(1,2)</sup> e sua excelente deformação ( $\epsilon = 95\%$ ) é, exclusivamente, efeito da intensa formação de maclas no interior dos grãos que funcionam como contornos de grãos e agem como barreiras para as deslocamentos. A maclação faz com que a estrutura fique mais fina e, com isto, apresente um alto alongamento total, uma boa resistência mecânica<sup>(3,4)</sup> e grande capacidade de absorção de energia.

O efeito TWIP ocorre em austenita estável, onde a energia livre de Gibbs da reação martensítica é positiva (110 J/mol a 250 J/mol) e a energia de falha de empilhamento é aproximadamente 0,025 J/m<sup>2</sup>. O aumento de ambas as energias deve-se ao alto teor de manganês na presença de alumínio. O manganês é um elemento estabilizador da austenita que inibe a formação de ferrita, já o alumínio, aumenta a energia de falha de empilhamento, o que resulta na formação de maclas durante a deformação. A inexistência de formação de martensita durante a deformação é o que proporciona a este material propriedades mecânicas diferenciadas e com aplicabilidades importantes em processos de fabricação como o de estampagem usado nas indústrias automobilísticas.<sup>(1,2)</sup>

A maioria dos aços austeníticos, tais como os aços inoxidáveis e alto manganês, tem de baixa a moderada energia de falha de empilhamento; entretanto, tendem a formar falhas de empilhamento, maclas e deslocamentos planares na estrutura sob ação de tensões. Estes diferentes defeitos de rede causam uma influência na textura durante a laminação a frio.<sup>(5)</sup>

A elevada taxa de encruamento do aço alto manganês durante a deformação contribui consideravelmente para sua rápida recristalização. A desorientação entre os grãos ou regiões da estrutura e a formação de subgrãos, devido à deformação, aceleram este processo.<sup>(6,7)</sup>

Para alcançar um limite de resistência de 700 MPa e um alongamento uniforme de 50%, é requerida uma estrutura orientada e de grãos finos obtidos pelos processos de laminação e recristalização.<sup>(8)</sup> Dessa forma, o objetivo deste trabalho é complementar o estudo anterior do aço TWIP<sup>(8)</sup> de maneira a proporcionar um estudo do desempenho deste aço nos ensaios de tração.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço em estudo foi fundido em um forno a indução, modelo Power Trak 250-10 R, marca Inductotherm. A fusão e o vazamento foram realizados a 1.558°C e 1.510°C, respectivamente. A composição química do material está listada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química do aço utilizado (% peso)

Elemento	C	Mn	Si	Al	Ni
Teor	0,06	25	2	3	1

A placa fundida foi austenitizada a 1.100°C durante 2 h e, em seguida, laminada a quente à temperatura de 1.100°C, em quatro passes com 50% de redução total. Para laminação a frio, usinou-se o material até o desaparecimento da carepa e a partir daí, promoveu-se uma sequência de 11 passes de forma a ocorrer uma redução total de 45%. O resultado obtido foi uma tira de 7,0 mm de espessura.

Em seguida, o material foi recozido em temperaturas de 600°C, 700°C, 750°C, 775°C e 850°C e resfriado em água. Com base no estudo do comportamento da recristalização,<sup>(8)</sup> foram selecionadas as temperaturas de início da recristalização, 600°C, de término, 850°C, e intermediárias a esta faixa (700°C, 750°C, e 775°C).

O tempo total definido para realizar a recristalização foi de 300 s de encharque para cada temperatura e foi monitorado pelo termopar tipo K. A análise da seção polida foi feita na seção transversal à direção de laminação. A microestrutura das amostras foi caracterizada pelas técnicas de microscopias óptica e eletrônica de varredura, após ataque com reativo Nital 2%. Pela microscopia óptica, foram avaliados o tamanho do grão, com auxílio do software Image Pro Plus<sup>®</sup>, e a fração recristalizada pelo método da contagem por pontos. Para esse método, foram utilizados 36 pontos em cada campo, em um total de 30 campos por amostra, suficientes para obter um erro relativo menor que 5%.

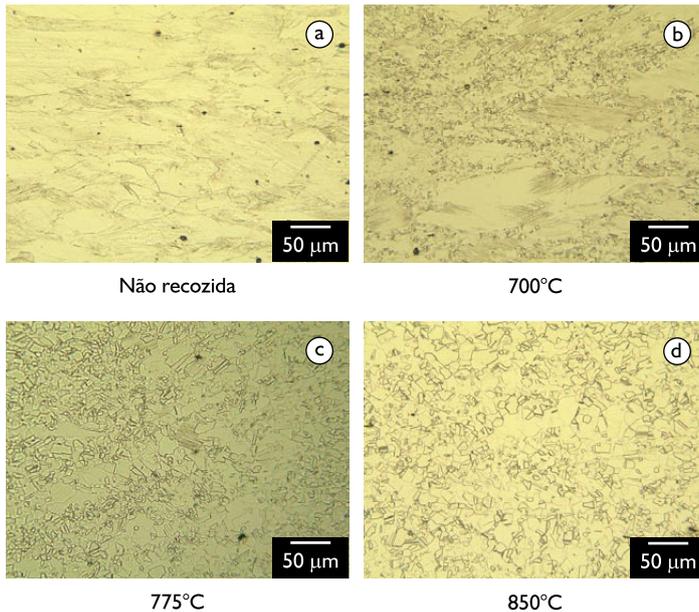
O ensaio de tração foi realizado à temperatura ambiente a uma taxa de deformação de 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup> em uma máquina INSTRON 5582 com extensômetro. Os corpos de prova sub-tamanho foram usinados de acordo com a norma ASTM A-370.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

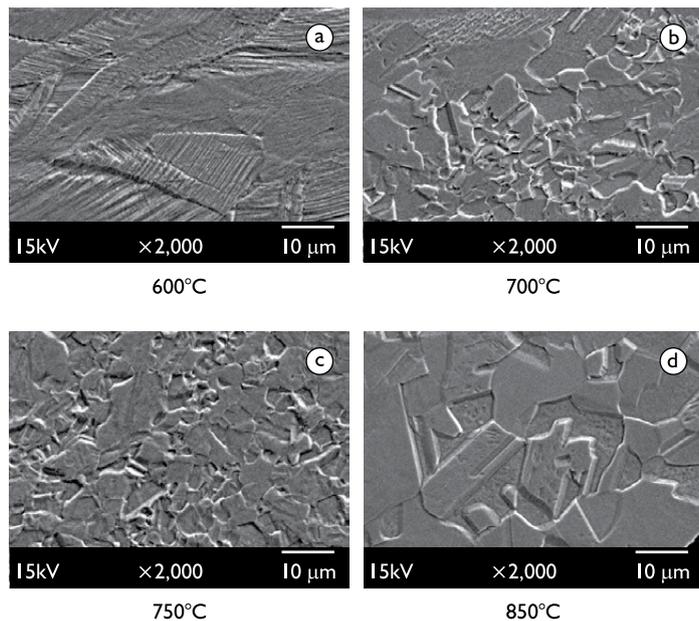
### 3.1 Caracterização Microestrutural

As Figuras 1 e 2 exibem a evolução microestrutural com o aumento da temperatura de recozimento. A recristalização discreta surge no recozimento realizado a 600°C, com o aparecimento de pequenos e poucos grãos recristalizados. A partir de 700°C, tal processo se intensifica atingindo cerca de 15% do material,

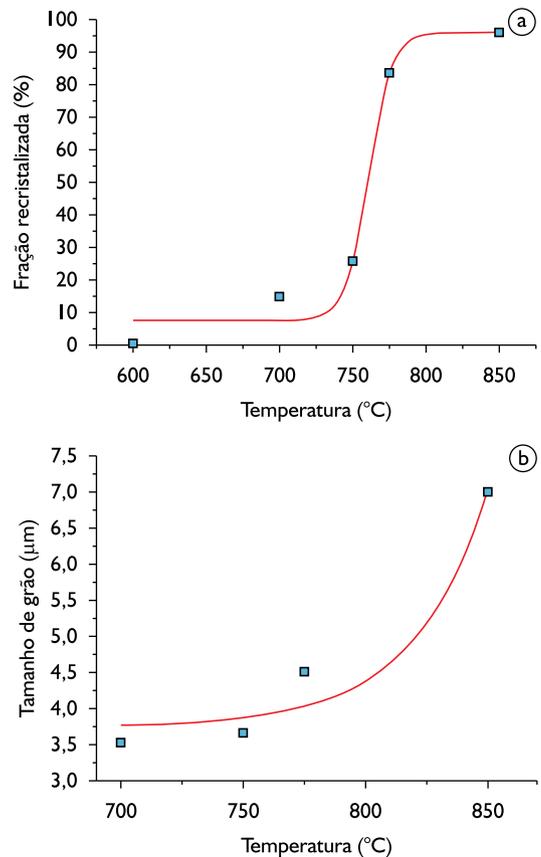
(Figura 3a). Para o recozimento a 775°C, nota-se a quase totalidade de grãos recristalizados (Figura 1c), em um total de mais de 80% (Figura 3a). Portanto, percebe-se que o aumento da temperatura de recozimento ocasiona o aumento da fração recristalizada, totalizando-se 100% de grãos recristalizados a 850°C. Para temperaturas de recozimento a 850°C, ressalta-se o crescimento dos grãos (Figura 3b), que possuem o dobro do tamanho dos grãos na temperatura de 700°C.



**Figura 1.** Micrografias ópticas do aço TWIP recozido em diferentes temperaturas.



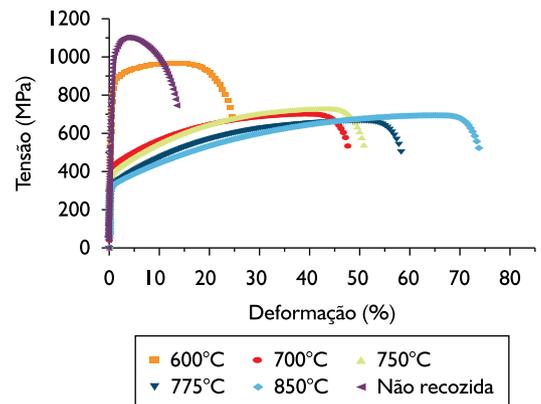
**Figura 2.** Micrografias eletrônicas de varredura do aço TWIP recozido em diferentes temperaturas.



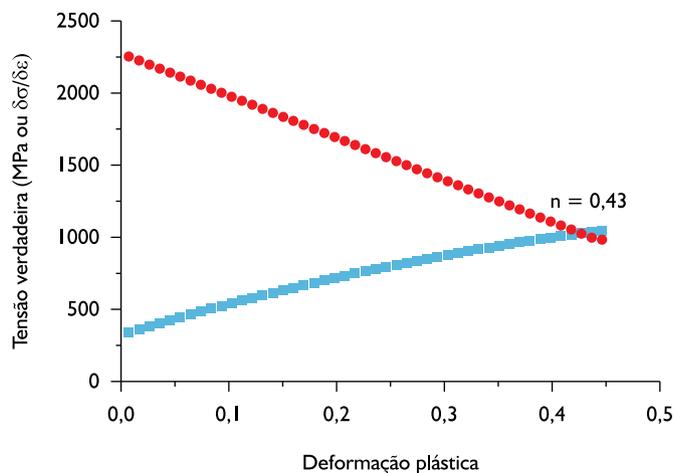
**Figura 3.** Porcentagem dos grãos recristalizados a) e tamanho dos grãos; b) de acordo com a temperatura de recozimento.

### 3.2 Propriedades Mecânicas

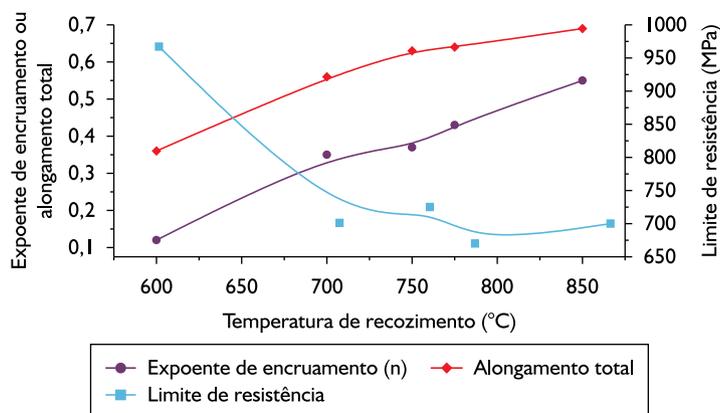
Os resultados do ensaio de tração são apresentados na Figura 4. Uma comparação do expoente de encruamento (Figura 5), do limite de resistência e do alongamento total é apresentada na Figura 6.



**Figura 4.** Curva de tensão deformação convencionais do aço TWIP.



**Figura 5.** Demonstração do cálculo do expoente de encruamento para a amostra recozida a 775°C.



**Figura 6.** Variação do expoente de encruamento, do alongamento total e do limite de resistência com a temperatura de recozimento.

A Figura 4 mostra como o aumento da temperatura de recozimento corresponde a uma queda no limite de resistência, com consequente aumento da ductilidade no aço TWIP. A amostra que não foi recozida apresenta um limite de resistência de 1.100 MPa e 14% de alongamento total. Já para a amostra recozida a 850°C obtém-se um limite de resistência de 700 MPa e um alongamento total de 66%.

O aço TWIP é constituído basicamente por austenita (Figuras 1 e 2). Quando o material é deformado, no ensaio de tração, as maclas de deformação aparecem dentro dos grãos e aumentam durante a deformação.<sup>(2,9)</sup> Esse processo é responsável pelo aumento da ductilidade do material. Isso porque, com o aumento da temperatura, maior será a fração de grãos recristalizados, o que disponibiliza mais locais para a formação das referidas maclas.

O valor considerável do limite de resistência desse material é devido ao poder de atuação das maclas de deformação como contornos de grão, o que ocasiona maior dificuldade no processo de escorregamento.<sup>(10)</sup>

Existem alguns métodos adotados para o cálculo do expoente de encruamento,  $n$ , correspondente à Equação 1 de Hollomon, associada com o critério Considère (de estricção), Equação 2.<sup>(4,11)</sup> A Figura 5 exemplifica o método utilizado neste estudo:

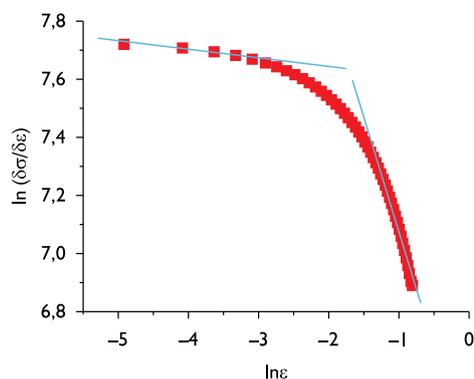
$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

$$\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} = \sigma \quad (2)$$

em que:  $K$  é o coeficiente de resistência,  $n$  é o expoente de encruamento,  $\varepsilon$  é a deformação verdadeira e  $\sigma$  é a tensão verdadeira.

A partir da Figura 6, pode-se inferir uma tendência de aumento do expoente de encruamento e do alongamento total com o aumento da temperatura, enquanto o limite de resistência tende a diminuir. O limite de resistência decresce, para a faixa de recozimento estudada, e permanece praticamente inalterado a partir de 775°C. Em oposição, o expoente de encruamento cresce para essa mesma faixa. O alongamento total, por sua vez, cresce para temperaturas de recozimento na faixa estudada.

A Figura 7 corresponde a uma combinação da análise de Jaoul-Crussard e a abordagem de Ludwick.<sup>(11)</sup> A presença de duas inclinações permite inferir que a primeira reta está relacionada com a deformação por escorregamento; já a segunda, além do escorregamento, ocorre também a maclação. A interseção dessas retas corresponde à deformação verdadeira de 0,14 e à deformação convencional de 15% (Figura 4). Pode-se inferir que, a partir desse valor de deformação, predomina o processo de maclação na deformação plástica.<sup>(12)</sup> Por sua vez, esse resultado é coerente com o alongamento total de cerca de 14% obtido para o aço não recozido, ou seja, o material laminado a frio já possui uma fração significativa de maclas de deformação, o que impediria a maclação por deformação durante o ensaio de tração. Dessa forma, com 15% de alongamento, o mecanismo dominante é o de escorregamento por deslocamentos.



**Figura 7.** Análise de Jaoul-Crussard e a equação de Ludwick combinadas para recozimento a 775°C.

## 4 CONCLUSÕES

O aumento da temperatura de recozimento no aço TWIP corresponde a um aumento de ductilidade para a faixa de temperatura estudada neste trabalho (até 850°C).

O aço TWIP recozido a 850°C apresentou melhor desempenho mecânico: limite de resistência superior a 700 MPa e 70% de alongamento total. O expoente de encruamento equivale a 0,55.

O efeito TWIP, que ocorre na formação de maclas durante a deformação, é responsável pelo resultado de deformação de média a alta.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapemig, processo número TEC APQ-3318-5.07/07 e ao CNPq, processo número 476377/2007-2, pelo apoio financeiro à execução desta pesquisa e concessão de bolsas de pesquisa aos autores.

## REFERÊNCIAS

- 1 ALLAIN, S. *et al.* Modeling of mechanical twinning in high manganese content austenitic steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 387-9, p. 272-6, Dec. 2004.
- 2 VERCAMMEN, S. *et al.* Cold rolling behavior of an austenitic Fe-30Mn-3Al-3Si TWIP-steel: the importance of deformation twinning. *Acta Materialia*, v. 52, n. 7, p. 2005-12, Apr. 2004.
- 3 FROMMEYER, G.; BRUX, U.; NEUMANN, P. Supra-ductile and high-strength manganese-TRIP/TWIP steels for high energy absorption purposes. *ISIJ International*, v. 43, n. 3, p. 438-46, Mar. 2003.
- 4 BOUAZIZ, O.; GUELTON, N. Modeling of TWIP effect on work-hardening. *Materials Science and Engineering A*, v. 319-21, p. 246-9, Dec. 2001.
- 5 ADLER, P. H.; OLSON, G. B.; OWEN, W. S. Strain hardening of hadfield manganese steel. *Metallurgical Transactions*, v. 17A, n. 10, p. 1725-37, Oct. 1986.
- 6 GRASSEL, O. *et al.* Phase transformation and mechanical properties of Fe-Mn-Si-Al TRIP-steels. *Journal of Physique IV*, v. 7, n. C5, p. 383-8, Nov. 1997.
- 7 RIOS, P. R. *et al.* Nucleation and growth during recrystallization. *Materials Research*, v. 8, n. 3, p. 225-38, Sep. 2005.
- 8 DUARTE, D. M.; RIBEIRO, E. A. S.; SANTOS, D. B. Comportamento mecânico do aço alto Mn e baixo C laminado a frio e recozido apresentando efeito TWIP. In: CONGRESSO DA ABM, 64., 2009, Belo Horizonte, MG. *Anais...* São Paulo: ABM, 2009. p. 1-10.
- 9 MI, Z. L. *et al.* Influence of cold rolling reduction on microstructure and mechanical properties of TWIP steel. *Acta Materialia*, v. 20, n. 6, p. 441-7, Dec. 2007.
- 10 HUA, D. *et al.* Microstructures and mechanical properties of Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels. *Journal of Iron and Steel Research*, v. 13, n. 6, p. 66-77, Nov. 2006.
- 11 DIETER, G. E. *Mechanical metallurgy*. Japan: McGraw-Hill Kogakusha, 1976. cap. 9, p. 329-74.
- 12 ZHANG, X. *et al.* Deformation microstructure of TRIP/TWIP Steels at the early deformation stages. In: ESOMAT 2009 - EUROPEAN SYMPOSIUM ON MARTENSITIC TRANSFORMATIONS, 8., Prague, Czech Republic. *Proceedings...* Disponível em: <[http://www.esomat.org/index.php?option=com\\_toc&url=/articles/esomat/abs/2009/01/contents/contents.html](http://www.esomat.org/index.php?option=com_toc&url=/articles/esomat/abs/2009/01/contents/contents.html)>. Acesso em: 5 dez. 2009.

Recebido em: 15/12/2009

Aceito em: 30/06/2010