

CARACTERÍSTICAS DO ENCRUAMENTO DO AÇO TWIP LAMINADO A FRIO E RECOZIDO¹

Dayanna Moreira Duarte²
Érica Aparecida Silva Ribeiro²
Maira Cristina Costa²
Berenice Mendonça Gonzalez³
Dagoberto Brandão Santos³

Resumo

A atual e crescente 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) definido como um aço de alto teor de manganês e contendo, ainda, silício e alumínio (2 a 4%) em sua composição. Sua principal característica é a formação de maclas sob ação de uma força. 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 avaliação do tamanho de grão e da fração volumétrica dos grãos recristalizados. Para complementação deste estudo, foram realizados ensaios de tração. O estudo do encruamento teve a abordagem de Hollomon combinada com a análise de Jaoul-Crussard. A amostra recozida a 850°C apresentou um expoente de encruamento de 0,55, alongamento total de 70% e limite resistência de 700 MPa.

Palavras-chave: Efeito TWIP; Recozimento; Laminação a frio; Recristalização; Encrimento.

WORK HARDENING CHARACTERISTICS OF TWIP STEEL COLD ROLLING AND ANNEALING

Abstract

There are a current and growing 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 investigate how the characteristics of work hardening of the steel C-0, 06, Mn-25, Al-3, B-2, Ni 1, with TWIP effect, hot and cold rolling and annealing at temperatures varying between 600 and 850°C, influences their mechanical properties. This research used optical micrographs and scanning electron (SEM) for assessment of grain size and volume fraction of recrystallized grains. To complement this study, tensile tests were performed. The work hardening behavior took the approach of Hollomon combined with the analysis of Jaoul-Crussard. The sample annealing to 850°C showed an work hardening exponent of 0.55, 70% of total elongation and maximum strength of 700 MPa.

Key words: Effect TWIP; Annealing; Cold rolling; Recrystallization; Work hardening.

¹ Contribuição técnica ao 46° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Sócia da ABM - Aluna de graduação em Engenharia Metalúrgica no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da UFMG.

³ Sócio da ABM - Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais Escola de Engenharia da UFMG.

1 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. 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.⁽¹⁾

Nos aços contendo aproximadamente 25% Mn, o efeito normalmente encontrado é o TWIP. Sua estrutura austenítica é mantida durante todo o processo de deformação plástica,^(1,2) 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 deslocções, fazendo com que a estrutura fique mais fina e, com isto, apresente, apesar do alto alongamento, uma boa resistência mecânica^(3,4) 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 25 mJ/m². O aumento de ambas as energias deve-se ao alto teor de Mn na presença de Al. O manganês é um elemento estabilizador da austenita que inibe a formação de ferrita já o alumínio por sua vez aumenta a energia de falha de empilhamento, o que resulta na formação de maclas durante a deformação. A não 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.^(1,2)

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 deslocções planares na estrutura. Estes diferentes defeitos de rede causam uma influência na textura durante a laminação a frio.⁽⁵⁾ A extensiva formação de maclas é observada em aços alto manganês ligados com carbono ou ligados com alumínio e silício.⁽⁴⁾

A elevada taxa de encruamento do aço alto Mn 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.^(6,7)

Para alcançar um limite de resistência de 700 MPa e um alongamento uniforme de 50%, é requerido uma estrutura orientada e de grãos finos onde os processos de laminação e recristalização são responsáveis.⁽⁸⁾ Dessa forma, o objetivo deste trabalho é complementar o estudo anterior do aço TWIP⁽⁸⁾ de forma a proporcionar um estudo do desempenho deste aço nos ensaios de tração.

2 MATERIAL 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, foi aquecida a temperatura de 1.100°C para laminação a quente, em quatro passes com 50% de redução total em sua espessura. Para laminação a frio, usinou-se o material até o desaparecimento da carepa e a partir daí, promoveu-se uma seqüência de 11 passes de forma a ocorrer uma redução total em espessura de 45%. O resultado obtido foi uma tira de 7 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. O tempo total definido para realizar a recristalização foi de 300 s de encharque para cada temperatura e foi monitorado pelo termopar tipo K (Figura 1). A análise da seção polida foi feita na seção transversal à direção de laminação. A microestrutura das amostras recozidas foi caracterizada por microscopia óptica e eletrônica de varredura, ataque com reativo nital 2%. Através da microscopia óptica foi avaliada a fração recristalizada pelo método da contagem por pontos, em um total de 200 pontos por amostra, o tamanho do grão, com auxílio do software Image Pro Plus® e amaciamento.

O ensaio de tração foi realizado a temperatura ambiente a uma taxa de deformação de 10^{-3} s^{-1} 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

Durante o recozimento, a temperatura do material foi controlada através de um Termopar para garantir que o tempo de encharque seja 300 s. A Figura 1 mostra o perfil térmico obtido para recozimento a 850°C.

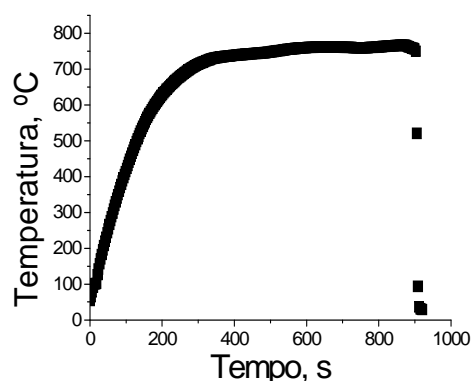
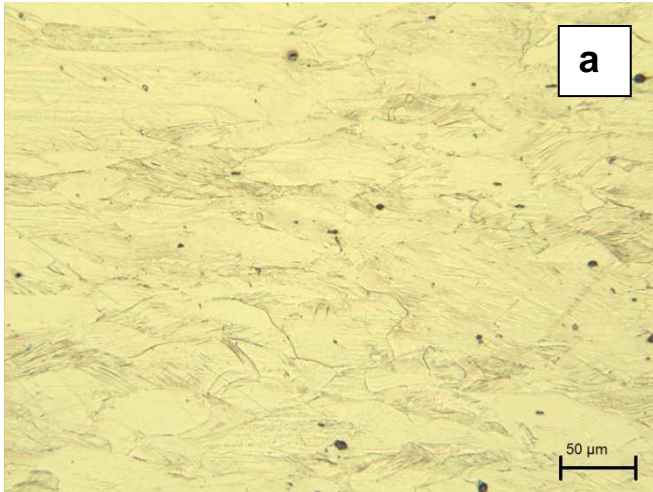


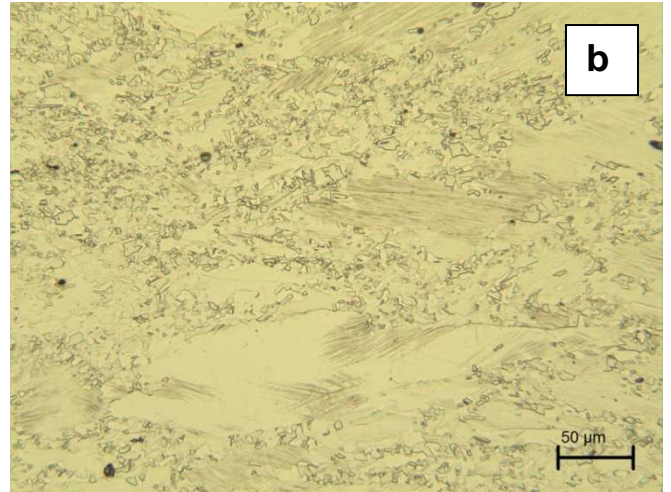
Figura 1. Perfil do aquecimento e encharque utilizado no recozimento a 850°C.

3.1 Caracterização Microestrutural

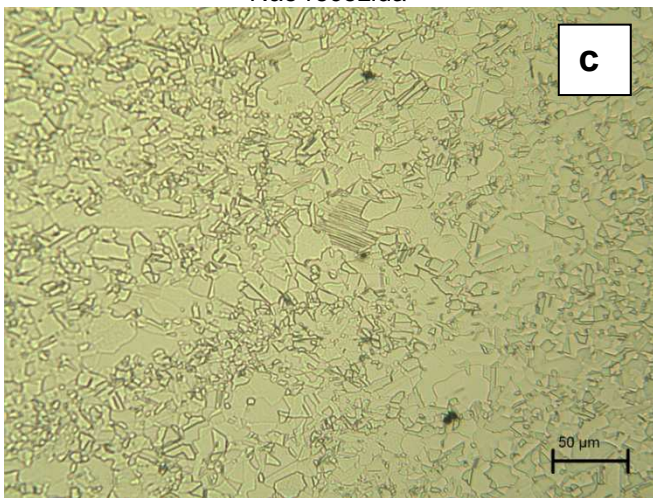
As Figuras 2, 3 e 4 permitem acompanhar a evolução da recristalização de acordo com a temperatura de recozimento.



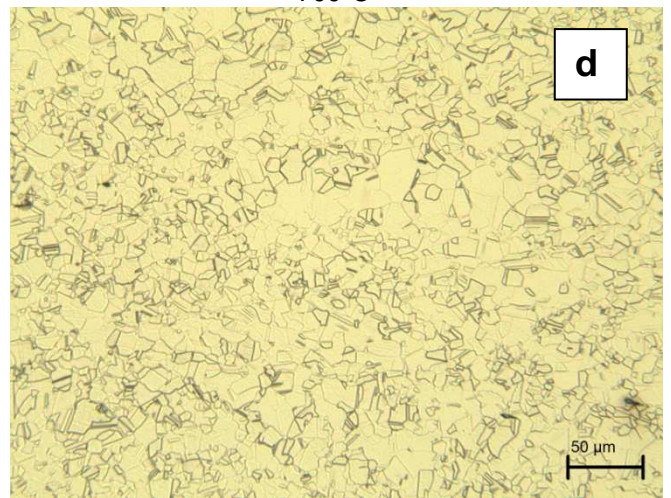
Não recozida



700°C

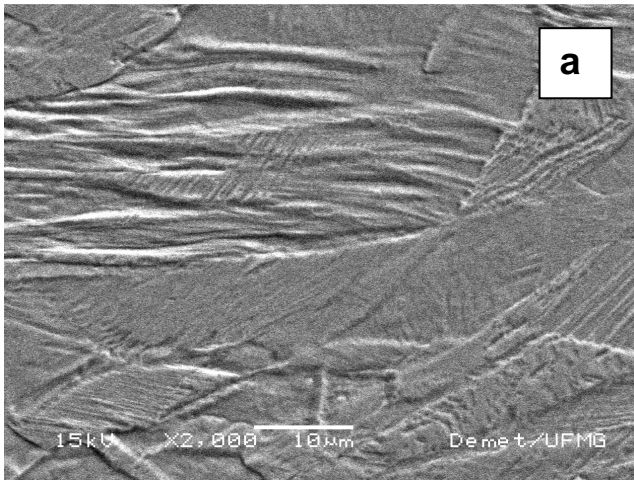


775°C

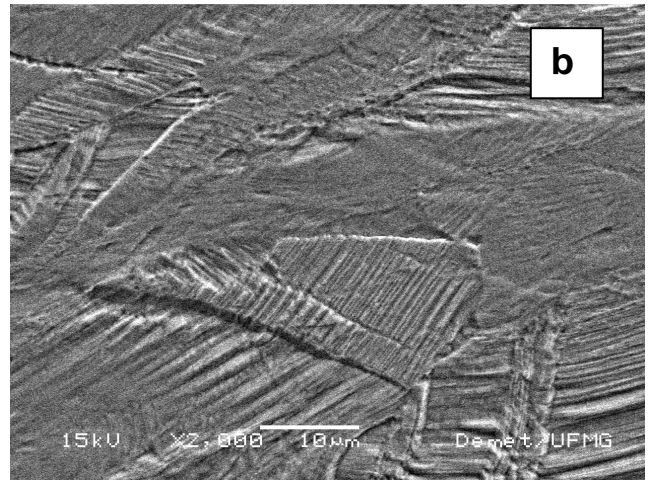


850°C

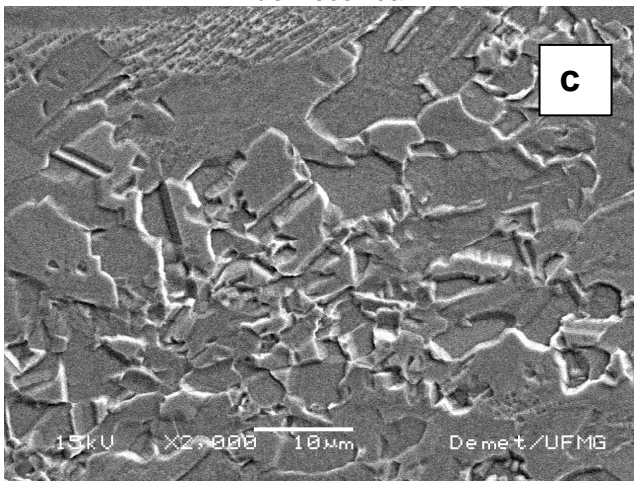
Figura 2. Micrografias ópticas do aço TWIP recozido em diferentes temperaturas.



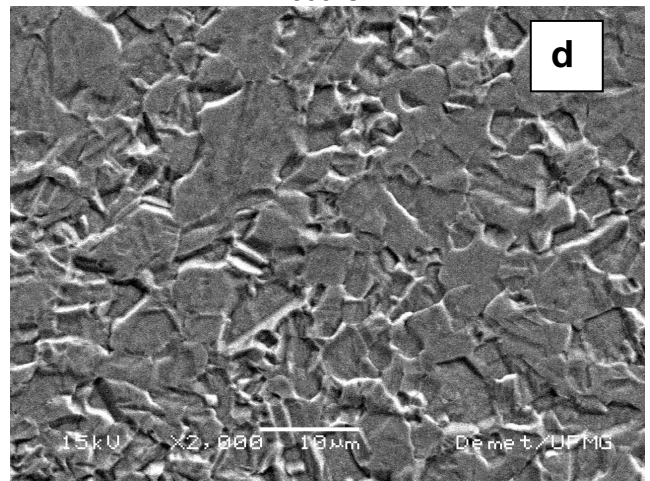
Não Recozida



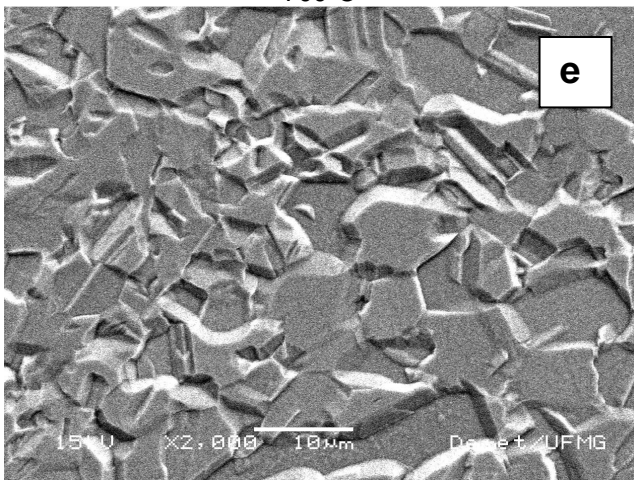
600°C



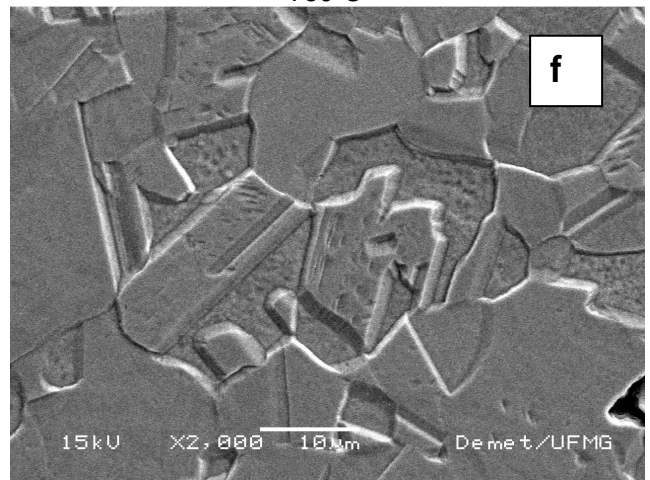
700°C



750°C



775°C



850°C

Figura 3. Micrografias eletrônicas de varredura do aço TWIP recozido em diferentes temperaturas.

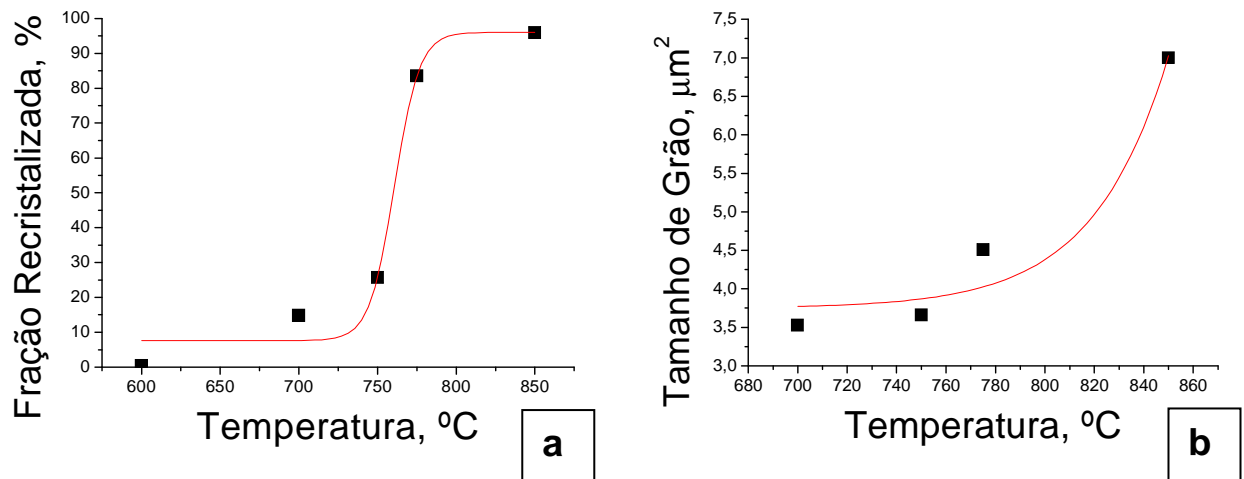


Figura 4. Porcentagem dos grãos recristalizados (a) e tamanho dos grãos (b) de acordo com a temperatura de recozimento.

As Figuras 2 e 3 exibem a recristalização discreta que 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 20% do material, (Figura 4a). Para o recozimento a 775°C, nota-se a quase totalidade de grãos recristalizados (Figuras 2c e 3e), em um total de mais de 85% (Figura 4a). Para temperaturas de recozimento superiores a 850°C, ressalta-se o crescimento dos grãos (Figura 4b), que são aproximadamente 50% maior nesta temperatura do que no recozimento a 600°C.

3.2 Propriedades Mecânicas

Os resultados de tração são apresentados na Figura 5 e uma comparação do expoente de encruamento (Figura 6) do limite de resistência e do alongamento físico é apresentado na Figura 7.

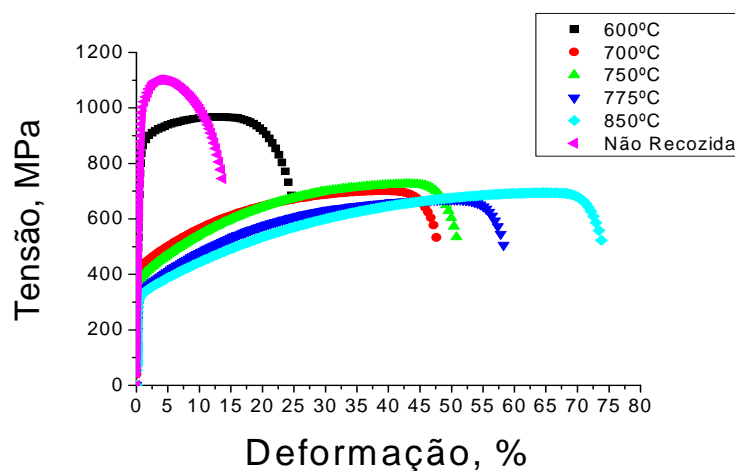


Figura 5. Curava de tensão deformação convencionais do aço TWIP.

A Figura 5 mostra como o aumento da fração recristalizada corresponde a uma queda no limite de resistência em detrimento ao aumento da deformação no aço TWIP. A amostra que não foi recozida apresentou um limite de resistência de 1.100 MPa e 15% de deformação. Já a mostra recozida a 850°C obteve um limite de resistência de 700 MPa e uma deformação de 75%.

O aço TWIP é constituído basicamente por austenita (Figuras 2 e 3). Quando o material é deformado, no ensaio de tração, as maclas de deformação surgem dentro das maclas de recozimento.⁽⁹⁾ Dessa forma, a maclação é responsável pelo aumento da plasticidade do material. E essa ductilidade aumenta à medida que a temperatura de recozimento aumenta, porque a fração recristalizada e consequentemente o número de maclas de recozimento disponíveis para serem ocupadas também aumenta. Com isso, a existência de mais locais disponíveis permite que ocorra maior quantidade de maclação no processo de deformação e dessa forma, a ductilidade do material aumenta.

O valor considerável do limite de resistência deste material é devido ao poder de atuação das maclas de deformação como contornos de grão, o que proporciona maior dificuldade no processo de escorregamento.⁽¹⁰⁾

Existem alguns métodos adotados para o cálculo do coeficiente de encruamento, n , o método adotado neste trabalho corresponde a equação de Hollomon associada com o critério Considère (de estrição) e a análise de Jaoul-Crussard.^(4,11) A Figura 6 exemplifica o método que foi utilizado neste estudo.

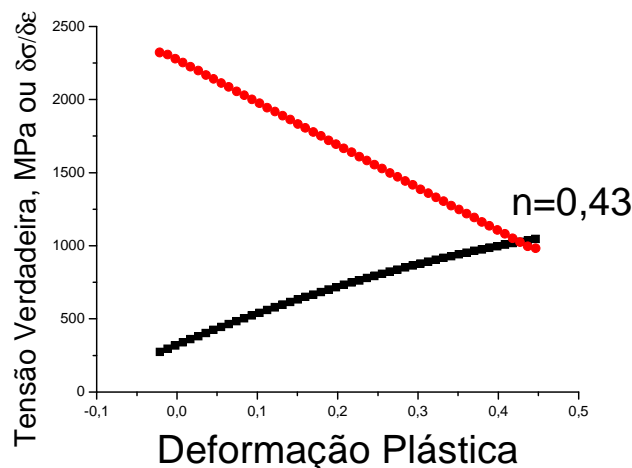


Figura 6. Demonstração do cálculo do expoente de encruamento para a amostra recozida a 775°C.

A partir da Figura 7, pode-se inferir uma tendência de aumento do expoente de encruamento e do alongamento físico com o aumento da temperatura, enquanto o limite de resistência tende a diminuir. O limite de resistência decresce para a faixa de recozimento estudada, com exceção de um pequeno aumento em 850°C. Em oposição, o expoente de encruamento cresce para essa mesma faixa. O alongamento total, por sua vez cresce para temperaturas de recozimento entre 600°C e 750°C, para o intervalo 750 até 850°C o alongamento cresce com uma inclinação menor.

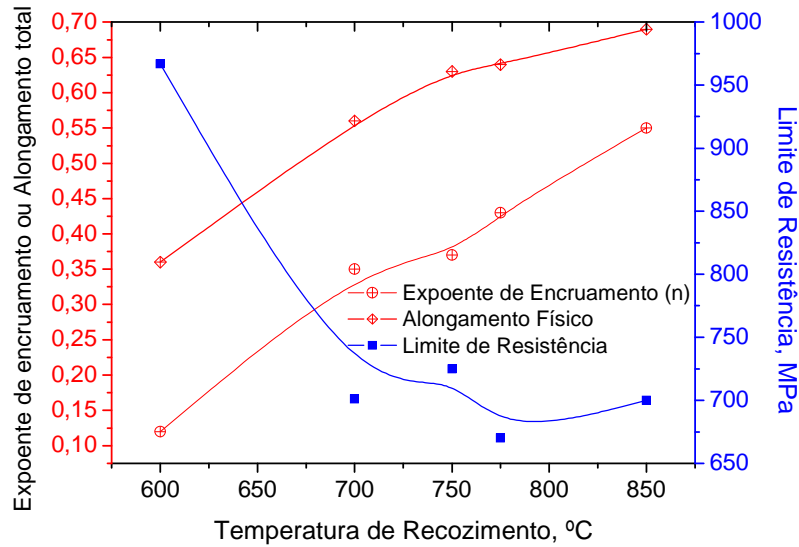


Figura 7. Variação do expoente de encruamento, do alongamento e do limite de resistência com a temperatura de recozimento.

A Figura 8 corresponde a uma combinação da análise de Jaoul-Crussard e a abordagem de Ludwick.⁽¹¹⁾

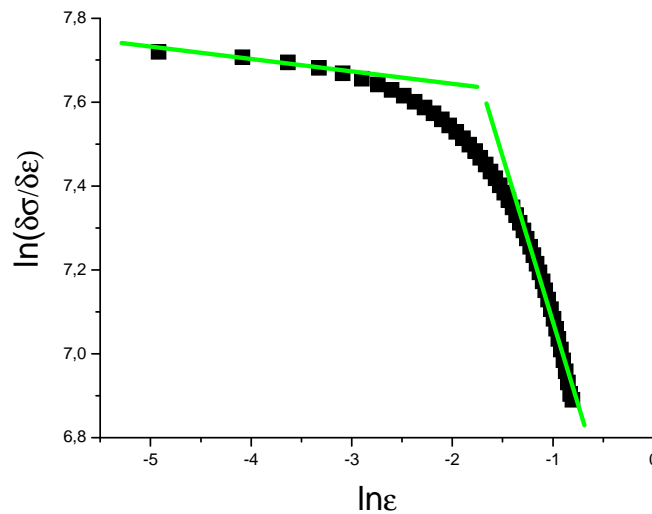


Figura 8. Análise de Jaoul-Crussard combinada com a equação de Ludwick para o recozimento a 775°C.

A curva apresenta duas inclinações, conforme a ilustração (Figura 8). Uma possível interpretação é que a primeira reta esteja relacionada com a deformação por deslizamento, já na segunda, além do deslizamento ocorria também a maclação. O ponto entre essas retas corresponde à deformação verdadeira de 0,14. Esse valor equivale à deformação convencional de 15% (Figura 5). Assim, é possível inferir que a partir desse valor de deformação inicia-se o processo de maclação na deformação plástica deste material. Por sua vez, esse resultado é coerente com o alongamento total de cerca de 15% 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 esse nível de alongamento, 15%, estaria atuando apenas o mecanismo de escorregamento de deslocações.

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 é $n = 0,55$.
- 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 a 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.; CHATEAU, J.P.; DAHMOUNB, D.; BOUAZIZ, O. Modeling of mechanical twinning in high manganese content austenitic steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 387–389, p. 272–276, 2004.
- 2 VERCAMMEN, S.; BLANPAIN, B.; DE COOMAN, B.C.; WOLLANTS, P. Cold rolling behavior of an austenitic Fe–30Mn–3Al–3Si TWIP-steel: the importance of deformation twinning. *Acta Materialia*, v. 52, p. 2005–2012, 2004.
- 3 FROMMEYER, G.; BRÜX, U.; NEUMANN, P. Supra-Ductile and High-Strength Manganese-TRIP/TWIP Steels for High Energy Absorption Purposes. *ISIJ International*, v. 43, n. 3, p. 438–446, 2003.
- 4 BOUAZIZ, O.; GUELTON, N. Modeling of TWIP effect on work-hardening. *Materials Science and Engineering A*, v. 319–321, p. 246–249, 2001
- 5 ADLER, P.H.; OLSON, G.B.; OWEN, W.S.; Strain Hardening of Hadfield Manganese Steel. *Metallurgical Transactions*, v. 17A, p 1725-1737, 1986.
- 6 GRASSEL, O.; FROMMEYER, G.; DERDER, C.; HOFMANN, H. Phase Transformation and Mechanical Properties of Fe–Mn–Si–Al TRIP-steels. *Journal of Physique IV*, v. C5, p. 383–388, 1997.
- 7 RIOS, P.R.; JUNIOR, F. S.; SANDIN, H. R.Z.; PLAUT, R. L.; PADILHA, A. F. Nucleation and Growth During Recrystallization. *Materials Research*, v. 8, n. 3, p. 225-238, 2005.
- 8 DUARTE, D.M.; RIBEIRO, E.A.S.; SANTOS, D.B. Caracterização microestrutural e mecânica do aço Mn-25Al-3Si-3Ni-1 com efeito TWIP e laminado a frio e recozido. *Anais 64º Congresso da ABM*, 2009.
- 9 MI, Z. L.; TANG, D.; DAI, Y.J.; WANG, H.Q.; LI, S.S. Influence of cold rolling reduction on microstructure and mechanical properties of TWIP steel. *Acta Metallurgica*, v. 20, n. 6, p. 441-447, 2007.
- 10 HUA, D.; ZHENG-YOU, T.; WEI, L.; MEI, W. DAN, S. Microstructures and Mechanical Properties of Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP Steels. *Journal of Iron and Steel Research*, v. 13(6), p. 66-77, 2006.
- 11 DIETER, G.E. *Mechanical Metallurgy*. 2 ed, p. 329-374, 1976.