

AUMENTO DO LIMITE DE ESCOAMENTO DE UM AÇO MULTIFÁSICO DEVIDO AO ENVELHECIMENTO POR DEFORMAÇÃO E EFEITO TRIP

R.M. Anazawa^{1,2*}; A.J. Abdalla¹; T.M. Hashimoto²; M.S. Pereira²; G.R. Carrer²; C.C.A. Elisei²; C.A.R.P. Baptista³

¹CTA, Instituto de Estudos Avançados, 12.231-970, São José dos Campos, SP, Brazil

²UNESP, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 12.516-410, Guaratinguetá, SP, Brazil

³USP, Escola de Engenharia de Lorena, 12.602-810, Lorena, SP, Brazil

Recebido: 18 de outubro, 2007; Revisado: 11 de março, 2008

Palavras-chave: aço 300M, limite de escoamento, envelhecimento por deformação, aço multifásico.

RESUMO

O envelhecimento por deformação à temperatura ambiente associado ao efeito TRIP (Transformation Induced Plasticity) no aço 300M com microestrutura multifásica (ferrita, bainita, martensita e austenita retida), foi estudado após ser submetido a tratamentos térmicos intercríticos e isotérmicos. As condições de pré-deformação utilizadas resultaram em transformação da austenita retida em martensita (efeito TRIP). Os resultados obtidos para o limite de escoamento foram surpreendentes, ocorrendo um aumento de até 87%, não tendo referências na literatura sobre esse fenômeno para esse tipo de aço.

ABSTRACT

Strain ageing at room temperature associated to TRIP (Transformation Induced Plasticity) effect in 300M steel with multiphase microstructure (ferrite, bainite, martensite and retained austenite), was studied after intercritical and isothermal heat treatments. The pre-deformation conditions used, resulted in transformation of the retained austenite in martensite (TRIP effect). The results obtained for the yield strength were in a surprising increase of up to 87%, doesn't have references in the literature on that phenomenon for that type of steel.

1. INTRODUÇÃO

O envelhecimento por deformação em ligas de aços é um fenômeno que provoca variação nas propriedades com o tempo à temperatura ambiente, sendo o processo acelerado pela elevação da temperatura. O envelhecimento das ligas é observado pela variação das suas propriedades. Assim, por exemplo, tem-se o aumento da dureza, do limite de escoamento, da resistência à tração e diminuição do alongamento, da estrição e da condutividade térmica [1, 2]. Qualquer causa que dificulte o movimento das discordâncias estará produzindo o endurecimento de um metal ou liga. Assim, a deformação e a diminuição do tamanho dos grãos são fatores de endurecimento. As causas que deter-

minam o envelhecimento das ligas podem ser, dentre outras, a ordenação de uma solução sólida desordenada, a formação de soluções sólidas, o aparecimento de novas fases ou a precipitação de uma solução sólida supersaturada. A formação de uma solução, com teores crescentes de soluto, provoca o endurecimento, ao criar as atmosferas de Cottrell [3] de átomos de soluto em torno das discordâncias. A precipitação de partículas de segunda fase vão também dificultar o movimento das discordâncias, e o endurecimento vai depender, principalmente, das distâncias entre essas partículas. Após a formação de solução sólida, o envelhecimento pode ser provocado de duas formas: permanência à uma temperatura conveniente por um determinado tempo ou, envelhecimento após deformação plástica. A deformação plástica provoca a instabilidade da solução sólida intersticial, porque os átomos intersticiais não acompanham os movimentos bruscos das discordâncias produzidos pela deformação plástica. Os átomos movem-se atraídos pelos defeitos reticulares no sentido de readquirirem o equilíbrio perdido. Essa precipitação atua como se os átomos estivessem supersaturando a matriz, produzindo o envelhecimento [4].

Envelhecimento por deformação é um tratamento em que a resistência de um aço é aumentada, e a ductilidade é diminuída com o aquecimento, em temperaturas relativamente baixas, do aço previamente deformado a frio. Este estudo é de grande relevância nos aços 300M, pois estes são utilizados para fins estruturais e em elementos aeroespaciais [5]. A redução da ductilidade a níveis críticos poderia comprometer a segurança do componente.

Já o efeito TRIP (Transformation Induced Plasticity) [6-9] é responsável pelo acréscimo significativo do alongamento total e conseqüentemente da ductilidade destes aços. O aumento da ductilidade uniforme é atribuído ao processo de acomodação plástica nas vizinhanças das placas de martensita, ou seja, durante o processo de deformação de um aço multifásico, que contém austenita retida à temperatura ambiente, a transformação da austenita em martensita ocorre progressivamente, resultando em um aumento nos valores de alongamento. Este processo é denominado plasticidade induzida por transformação (Transformation Induced Plasticity), ou efeito TRIP. É

* anazawa@ieav.cta.br

precisamente esta transformação martensítica por deformação induzida que é responsável pelo excelente equilíbrio de resistência-ductilidade apresentada pelos aços TRIP [10]. Nos aços multifásicos 300M a presença de uma fração volumétrica de austenita retida acima de 5% influencia nas propriedades mecânicas do aço e contribui para o aumento da ductilidade e da tenacidade. Tratamentos isotérmicos na faixa entre 320 e 400°C mostraram-se eficientes para a formação de uma fração de austenita acima de 10% [11].

Este trabalho tem como objetivo o estudo da influência do envelhecimento por deformação à temperatura ambiente associado ao efeito TRIP de um aço tipo AISI 300M, com microestrutura multifásica (ferrita, bainita, martensita e austenita retida) obtida após ser submetido a tratamentos térmicos intercríticos e isotérmicos.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Estudou-se um aço de ultra-alta resistência, o 300M, utilizado na confecção de envelopes motores (propulsores) do Veículo Lançador de Satélites (VLS) e alguns veículos de sondagem, os quais fazem parte do Programa Espacial Brasileiro. A sua composição química é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço 300M (% em massa).

Elementos de liga	% em massa
C	0,39
S	0,0005
P	0,009
Si	1,78
Mn	0,76
Cr	0,76
Ni	1,69
Mo	0,40
Al	0,003
V	0,08
Cu	0,14

Os corpos-de-prova receberam um tratamento inicial de recozimento pleno para eliminar os efeitos de laminação. Foram aquecidos a 900°C, mantido por 2 horas e resfriados ao forno até a temperatura ambiente. O primeiro lote foi mantido na condição de recozido. Os outros lotes foram submetidos ao seguinte roteiro de tratamentos térmicos:

- **Condição A:** aquecimento a 900°C, mantido por 1 hora, transferido para um forno a 320°C, mantido por 20 minutos e resfriado em óleo (IT320°C);
- **Condição B:** aquecimento a 900°C, mantido por 1 hora, transferido para um forno a 350°C, mantido por 17 minutos e resfriado em óleo (IT350°C);
- **Condição C:** aquecimento a 900°C, mantido por 1 hora, transferido para um outro forno a 370°C,

mantido por 23 minutos e resfriado em óleo (IT370°C);

- **Condição D:** aquecimento a 900°C, mantido por 1 hora, transferido para um outro forno a 400°C, mantido por 30 minutos e resfriado em óleo (IT400°C);
- **Condição E:** aquecimento a 760°C, mantido por 15 minutos e resfriado em óleo (IC760°C) e
- **Condição F:** tratamento de têmpera e revenimento convencional (TRC): aquecimento na temperatura de 900°C por 1 hora, resfriado em óleo e aquecimento na temperatura de 200°C por 2 horas.

O esquema da Figura 1 representa os ciclos de tratamentos térmicos que foram aplicados nos corpos-de-prova.

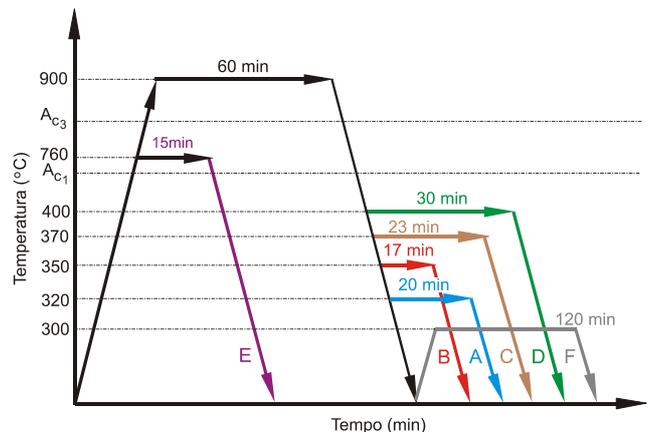


Figura 1 – Gráfico esquemático dos tratamentos térmicos aplicados.

Para o estudo do envelhecimento foram utilizados dois lotes de corpos-de-prova para cada tratamento térmico. No primeiro foi aplicada uma pré-deformação (3 a 5%) na região de deformação uniforme. Foram pré-deformados corpos-de-prova, de cada condição estudada até σ_D (tensão de pré-deformação) e armazenados à temperatura ambiente por 226 dias. Após esse período, os corpos-de-prova foram ensaiados à tração até a ruptura, obtendo-se novos valores de limite de escoamento. O segundo lote também permaneceu à temperatura ambiente pelo mesmo período, porém, este não foi pré-deformado e em seguida ensaiados à tração. O equipamento utilizado para esses ensaios foi uma máquina MTS 810.23 com célula de carga com capacidade de 250 kN. Nos ensaios de tração foram avaliadas as seguintes propriedades mecânicas: o limite de escoamento (σ_e), o limite de resistência (σ_{res}) e alongamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os corpos-de-prova foram submetidos a uma deformação plástica uniforme que induziu a transformação da austenita retida em martensita, por efeito TRIP. A quantificação da fração volumétrica da austenita retida inicial e final foi feita por meio de medidas magnéticas [12]. Comparando-se as frações volumétricas iniciais e finais tem-se o valor da

austenita retida transformada. A Tabela 2 apresenta todos esses valores e também o percentual da austenita retida transformada após estiramento das condições A a F.

Tabela 2 – Valores de frações volumétricas iniciais, finais, transformada e percentual da austenita retida para cada tratamento térmico.

Tratamento Térmico	Fração volumétrica de austenita retida inicial (%)	Fração volumétrica de austenita retida final (%)	Fração volumétrica de austenita retida transformada (%)	Percentual da fração volumétrica de austenita retida transformada (%)
Recozido	9,2	6,1	3,1	33,7
IT320°C	13,7	10,7	3,0	21,9
IT350°C	23,7	12,3	11,4	48,1
IT370°C	24,6	15,4	9,2	37,4
IT400°C	26,1	7,7	18,4	70,5
IC760°C	4,6	2,9	1,7	36,9
TRC	3,1	2,8	0,3	9,7

As curvas de tensão versus deformação estão representadas nas Figuras 2 a 8, onde σ_e é o limite de escoamento antes do envelhecimento, σ'_e é o limite de escoamento após o envelhecimento e σ_D é a tensão de pré-deformação correspondente a deformação por estiramento de 3 a 5%. A curva A representa o ensaio de tração de corpo-de-prova sem pré-deformação para as condições A a F, observando-se uma ausência de limite de escoamento definido e elevada capacidade de encruamento e deformação uniforme. A curva B1 representa o ensaio de tração do corpo-de-prova submetido a uma pré-deformação em tração sem o surgimento de estricção, para desenvolver o efeito TRIP. A curva B2 representa uma nova curva de ensaio de tração da mesma condição de tratamento térmico após deformação e envelhecimento, levado até a ruptura. Para o material pré-deformado, além do decréscimo no valor do alongamento, observa-se também a presença de aumento do limite de escoamento, tornando-se bem definido e um decréscimo na capacidade de encruamento, característicos da influência da martensita induzida por deformação (efeito TRIP) no comportamento mecânico do aço. Pode notar que a curva B1 tem praticamente o mesmo comportamento da curva A até a deformação a que foi realizado o ensaio, indicando que as mudanças nas propriedades mecânicas, observadas após pré-deformação em tração estão associadas à martensita induzida por deformação e posterior envelhecimento.

A Tabela 3 apresenta os valores de limite de escoamento (σ'_e), limite de resistência à tração (σ'_{res}) e alongamento obtidos nos ensaios de tração para corpos-de-prova pré-deformados e envelhecidos.

A Tabela 4 apresenta os novos limites de escoamento para o corpo-de-prova deformado e percebe-se que tiveram um aumento elevado em todos os tratamentos.

A Figura 9 apresenta os resultados do limite de escoamento do corpo-de-prova sem pré-deformação (σ_e) e do limite de escoamento do mesmo corpo-de-prova após envelhecimento (σ'_e).

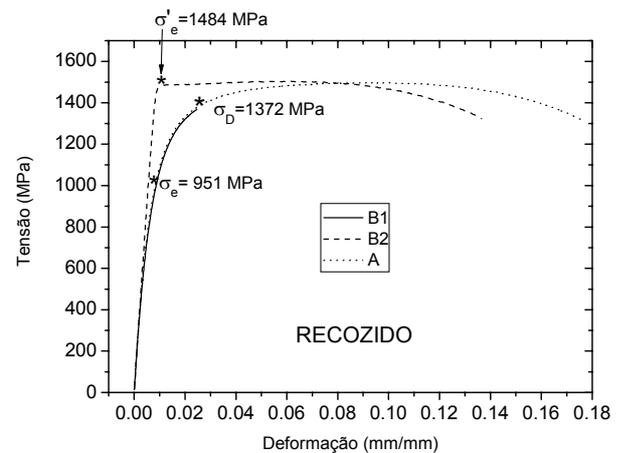


Figura 2 – Curva Tensão versus Deformação para o aço recozido.

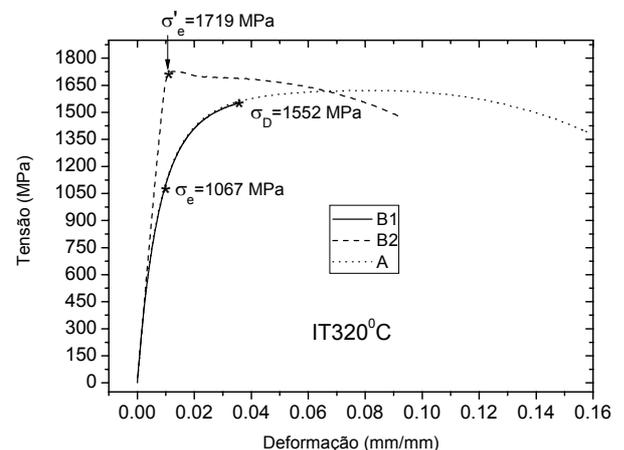


Figura 3 – Curva Tensão versus Deformação para o aço no tratamento IT320°C.

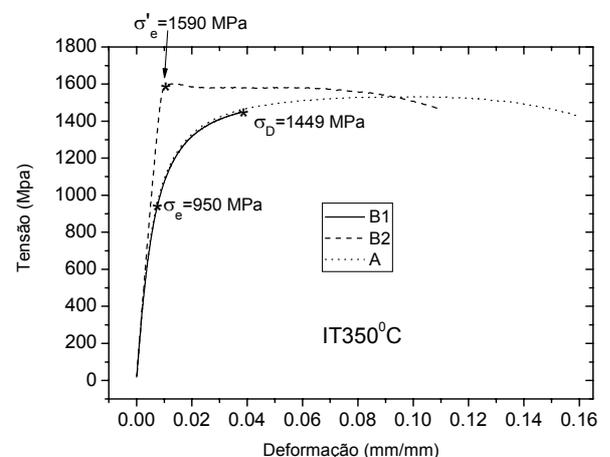


Figura 4 – Curva Tensão versus Deformação para o aço no tratamento IT350°C.

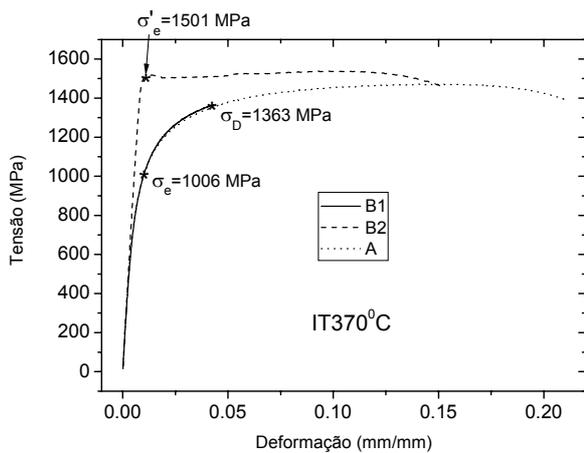


Figura 5 – Curva Tensão versus Deformação para o aço no tratamento IT370°C.

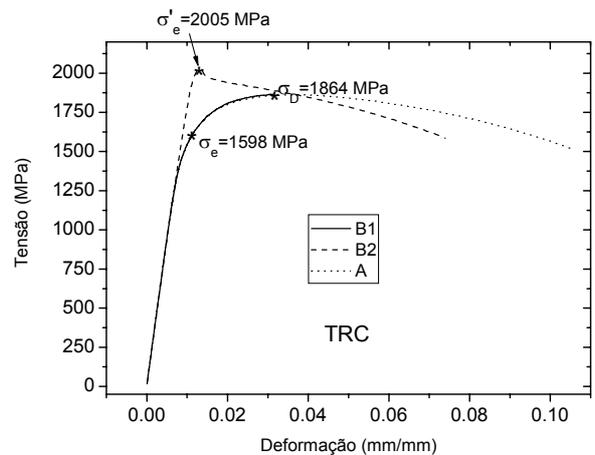


Figura 8 – Curva Tensão versus Deformação para o aço no tratamento de têmpera e revenimento convencional (TRC).

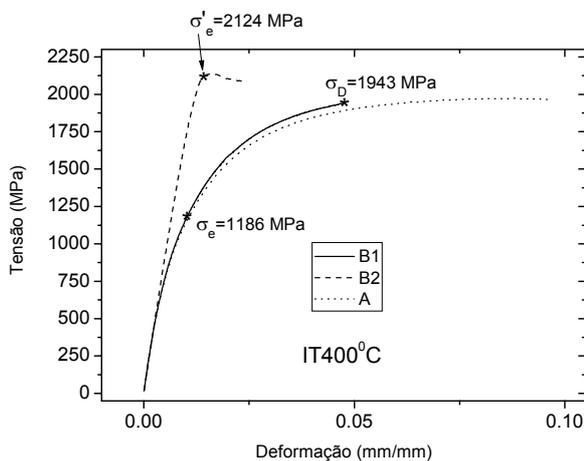


Figura 6 – Curva Tensão versus Deformação para o aço no tratamento IT400°C.

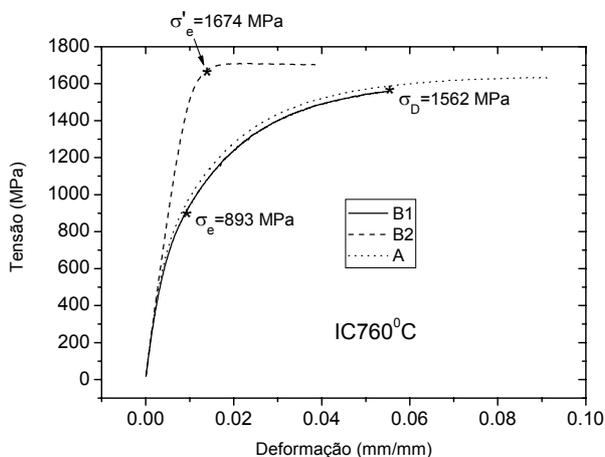


Figura 7 – Curva Tensão versus Deformação para o aço no tratamento IC760°C.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço 300M para corpos-de-prova deformados e envelhecidos.

Tratamento Térmico	σ'_e (MPa)	σ'_{res} (MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)
Recozido	1484	1496	7,9	35,3
IT320°C	1719	1731	6,7	31,1
IT350°C	1590	1595	9,7	28,1
IT370°C	1501	1511	13,0	25,5
IT400°C	2124	2144	7,0	2,9
IC760°C	1674	1708	7,3	1,7
TRC	2005	2018	5,8	29,3

Tabela 4 – Valores de σ_e , σ'_e , σ_D e percentual do aumento do limite de escoamento.

Tratamento Térmico	σ_e (MPa)	σ'_e (MPa)	σ_D (MPa)	Percentual do aumento do limite de escoamento (%)
Recozido	951	1484	1372	56,0
IT320°C	1067	1719	1552	61,1
IT350°C	950	1590	1449	67,4
IT370°C	1006	1501	1363	49,2
IT400°C	1186	2124	1943	79,1
IC760°C	893	1674	1562	87,4
TRC	1598	2005	1664	25,5

Os aumentos significativos do novo limite de escoamento podem ser explicados pelo aumento da fração volumétrica da martensita, provocada pela transformação da austenita por deformação plástica (efeito TRIP) e também pelo envelhecimento por deformação, à temperatura ambiente, por 226 dias.

Pelos gráficos da Figura 10, o alongamento aumenta em função da temperatura até próximo de 370°C, depois diminui drasticamente. A redução no alongamento para o aço tratado a 400°C (IT400°C) está associado a dois fenômenos:

- a) a alta tensão de pré-deformação aplicada provocou a transformação de 70,5% da austenita retida

em martensita (efeito TRIP), fase dura que não se deformará no ensaio de tração, e

- b) a temperatura de 400°C propicia a precipitação de carbonetos em aços contendo manganês, níquel ou cromo e impurezas como o fósforo, como é o caso do aço 300M [13].

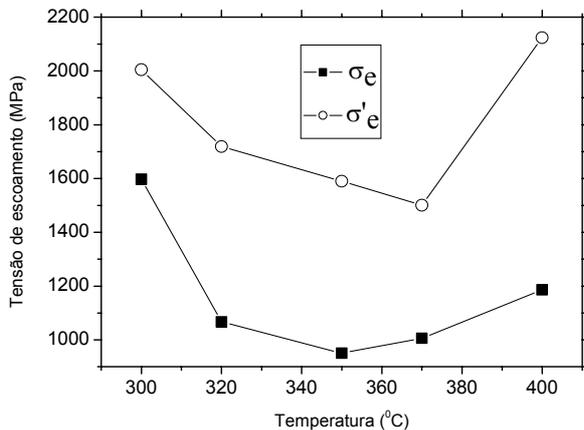


Figura 9 - Resultados de σ_e e σ'_e em função da temperatura.

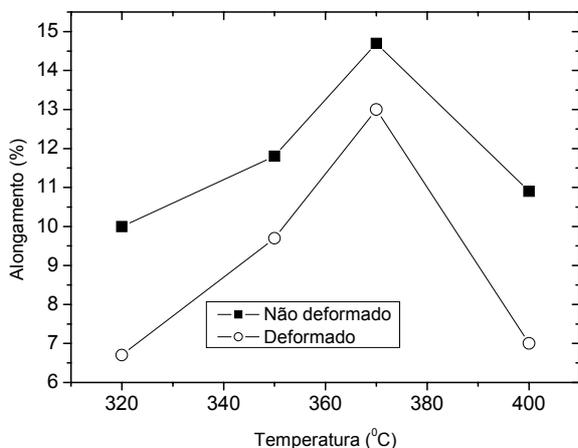


Figura 10 – Curva de alongamento versus temperatura do aço 300M.

4. CONCLUSÕES

Em relação ao envelhecimento por deformação à temperatura ambiente, por um período de 226 dias, foi observado o seguinte:

1. sem a aplicação de pré-deformação não ocorre o envelhecimento para nenhuma condição microestrutural estudada, e
2. com a aplicação de uma pré-deformação (3 a 5%) na região plástica ocorreu envelhecimento para todas as condições microestruturais estudadas. Este efeito foi avaliado devido ao aumento no limite de escoamento após o envelhecimento por deformação.

O aumento no limite de escoamento observado após o envelhecimento por deformação chegou em até 87%. Este valor foi associado a dois fatores: ao efeito TRIP e ao envelhecimento, formação de atmosferas de Cottrell em torno de discordâncias e contornos de grão.

REFERÊNCIAS

1. ABDALLA, A.J.; HASHIMOTO, T.M.; PEREIRA, M.S.; HEIN, L.R.O., *Materials Science and Technology* 15 (1999) 1167.
2. SILVA, A.P., *Estudo da transformação da austenita induzida por deformação, em um aço AISI 4340 com estrutura multifásica*, 125p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.
3. REED-HILL, R.E.; ABBASCHIAN, R., *Physical Metallurgy Principles*, 3 ed., Boston PWS Pub. Co., 926 p., 1994.
4. COLOMBAROLI, W.; CASTRO, O.E., *Metallurgia* 26 (1970) 771.
5. BOSCOV, J.; PALMÉRIO, A., *The Brazilian Satellite Launcher (VLS)*. Montreal: 42nd Congress of the International Astronautical Federation, October 5-11, 1991.
6. ZACKAY, V.F., *Transactions ASM* 60 (1967) 252.
7. BLECK, W., *Using the TRIP effect – The dawn of a promising group of cold formable steels*, Int. Conf. on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys, ed. B.C. Cooman, GRIPS, Ghent, p.3-23, 2002.
8. JACQUES, P.J.; GIRAULT, E.; HARLET, Ph.; DELANNAY, F., *ISIJ International* 41 (2001) 1061, 2001.
9. HULKA, K., *Materials Science Forum* 414-415 (2003) 101.
10. FURNÉMONT, Q.; KEMPF, M.; JACQUES, P.J.; GÖKEN, M.; DELANNAY, F., *Materials Science and Engineering A* 328 (2002) 26.
11. TOMITA, Y.; OKAWA, T., *Materials Science and Engineering A* 172 (1993) 145.
12. ANAZAWA, R.M., *Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300M com microestrutura multifásica*, 193p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.
13. CALLISTER, JR., W.D., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 6 ed. New York: John Wiley & Sons, 871p, 2005.