



ANÁLISE NUMÉRICA DA TRANSFORMAÇÃO DE FASES INDUZIDA POR PLASTICIDADE¹

Emanuelle Barbosa de Mattos²
Luciano Pessanha Moreira³

Resumo

A simulação de um único elemento de um aço inoxidável austenítico com condições de contorno de tração/compressão uniaxial é adotada para a avaliação da influência dos acoplamentos termomecânicos na distribuição de deformações. O comportamento do elemento é descrito por meio de um modelo fenomenológico que considera os efeitos TRIP em função da deformação, taxa de deformação, temperatura e fração volumétrica da martensita transformada. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise numérica dos efeitos dos diferentes acoplamentos termomecânicos no processamento de aços com transformação de fases. Em particular aços que aliam elevados limites de resistência em conjunto com a ductilidade como aços TRIP (*Transformation Induced Plasticity*), os quais têm como efeito direto um aumento na taxa de encruamento retardando a estricção localizada e favorecendo a priori a conformabilidade. As simulações foram realizadas com um código comercial de elementos finitos aberto ao usuário para definição do comportamento material.

Palavras-chave: Efeito TRIP; Acoplamentos termomecânicos; Simulação numérica.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE TRANSFORMATION INDUCED BY PLASTICITY

Abstract

The simulation of a single element of an austenitic stainless steel with boundary conditions of traction / compression test is adopted to evaluate the influence of thermomechanical coupling in the strain distribution. The behavior of the element is described by a phenomenological model that considers the effects on TRIP function of strain, strain rate, temperature and volume fraction of martensite transformed. The objective of this work is to perform a numerical analysis of the effects of different couplings thermomechanical processing of steels with phase transformation. In particular steels which combine high load limits in conjunction with the ductility as the TRIP steels (*Transformation Induced Plasticity*), which have direct effect as an increase in the rate of hardening delaying Yield located and favoring the formability. The simulations were performed with a commercial code of finite element open to the user to define the material behavior.

Keywords: TRIP effect; Thermomechanical couplings; Numerical simulation.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Estudante de Engenharia Mecânica, Bolsista de Iniciação Científica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense

³ Engenheiro Mecânico, D. Sc., Professor Adjunto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br

1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável tem sido amplamente empregado na fabricação de peças de automóveis, utensílios domésticos, eletrodomésticos, embalagens, entre outros por sua resistência à corrosão e excelente aspecto estético. Cada vez surgem mais pesquisas visando melhorar as propriedades mecânicas do mesmo para melhor aproveitamento na indústria em geral.

O aço inoxidável austenítico pode sofrer transformação de fases induzida por plasticidade em processos com baixas temperaturas, chamada de efeito TRIP (*Transformation Induced Plasticity*). A austenita é transformada em martensita quando no material é aplicada uma deformação considerável, ocorrendo tanto na tração quanto na compressão.

Esse efeito está relacionado à estabilidade da austenita, à temperatura, e à velocidade de deformação imposta durante a conformação. A formação de martensita induzida por deformação influencia num aumento da taxa de encruamento, do alongamento uniforme e da conformabilidade, facilitando assim, o processo de estampagem, e aumentando a resistência mecânica.

Serri, Martiny e Ferron⁽¹⁾ afirmam que a cinética desta transformação de fases é baseada na formação de embriões de martensita nas interseções das bandas de cisalhamento. Lei cinética de transformação martensítica resulta da combinação da cinética de formação das bandas de cisalhamento, com a probabilidade de que o cruzamento de uma banda de cisalhamento gere um embrião martensítico.

Iwamoto, Tsuoto e Tomita⁽²⁾ afirmam que a taxa de transformação martensítica induzida por plasticidade em pequenas deformações é menor sob compressão uniaxial que sob tração uniaxial.

O presente estudo analisa acoplamentos termomecânicos através de simulações de um único elemento linear sólido isotrópico, em processo isotérmico, com condições de contorno de tração/compressão uniaxial, implementadas através do método dos elementos finitos, no programa ABAQUS/Standard utilizando um código comercial aberto ao usuário com uma sub-rotina de integração implícita para definição do comportamento do material. São analisadas a deformação axial e sua velocidade, o estado de tensões interno e aplicado e a fração volumétrica de martensita transformada, em relação a valores de temperatura do processo.

São retirados da literatura^(1,3) dados experimentais como curvas de tensão axial-deformação axial e curvas de fração volumétrica de martensita transformada em função da deformação axial, que são comparados com resultados das simulações do modelo estudado.

2 MODELAMENTO

2.1 Equações Constitutivas

O modelo proposto por Tomita e Iwamoto⁽²⁾ foi implantado com auxílio de uma sub-rotina Fortran aberta ao usuário no programa comercial de elementos finitos ABAQUS/Standard. Em primeiro lugar, é realizada uma previsão elástica a partir da lei de elasticidade linear isotrópica de Hooke, a saber,

$$\sigma_{ij}^{teste} = \sigma_{ij}^t + \lambda \Delta \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \Delta \varepsilon_{ij} \quad (1)$$



onde λ e μ são as constantes de Lamè. Adota-se a decomposição aditiva da taxa de deformação total em uma parte elástica “e” e outra parte plástica “p”, ou seja,

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^e + \Delta \varepsilon_{ij}^p \quad (2)$$

Ainda, as componentes de deformação plástica são compostas pelas parcelas de deformação de deslizamento e mudança de forma e dilatação devido aos efeitos de transformação de fases induzida por plasticidade, isto é,

$$\Delta \varepsilon_{ij}^p = \Delta \varepsilon_{ij}^{pdesl} + \Delta \varepsilon_{ij}^{pforma} + \Delta \varepsilon_{ij}^{pdilat} \quad (3)$$

Estas componentes de deformação são definidas por:

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{pdesl} = \Delta \bar{\varepsilon}^{pdesl} F_{,ij} \quad (4)$$

onde é adotada a critério de escoamento com encruamento isotrópico em função das componentes de tensão σ_{ij} e da deformação plástica efetiva de deslizamento $\bar{\varepsilon}^{pdesl}$.

Neste caso, tem-se que:

$$f = F(\sigma_{ij}) - \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}^{pdesl}) \quad (5)$$

e

$$F_{,ij} = \frac{\partial F(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad (6)$$

Por outro lado, a componente da mudança de forma devido aos efeitos da transformação de fases austenita-martensita é definida por:

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{pforma} = R \Delta f_m F_{,ij} \quad (7)$$

onde Δf_m é o incremento da fração volumétrica da martensita e R é um parâmetro que representa a amplitude de mudança de forma. Já a componente da dilatação volumétrica associada com a transformação de fases é dada por:

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{pdilat} = \frac{1}{3} \Delta V \Delta f_m \delta_{ij} \quad (8)$$

onde Δv é a mudança relativa de volume devido à transformação de fases $\gamma \rightarrow \alpha'$.

A cinética desta transformação de fases é baseada na formação de embriões de martensita nas interseções das bandas de cisalhamento sendo descrita por:

$$\Delta f_m = (1 - f_m) A' \Delta \bar{\varepsilon}_\gamma^{pdesl} \quad (9)$$

Onde $\Delta \bar{\varepsilon}_\gamma^{pdesl}$ é a taxa de deformação plástica efetiva de deslizamento da austenita γ (10)

$$A' = A + B \left(\frac{\Delta g}{\Delta \bar{\epsilon}^{pdesl}} \right)$$

Na Eq. (10), os parâmetros A e B são definidos por:

$$A = \alpha \eta p n (f_{sb})^{n-1} (1 - f_{sb}) \quad (11)$$

$$B = \eta \frac{dp}{dg} (f_{sb})^n H(\dot{g}) \quad (12)$$

onde η é uma constante geométrica e n é a orientação das bandas de cisalhamento.

A fração volumétrica das bandas de cisalhamento é descrita por:

$$\Delta f_{sb} = (1 - f_{sb}) \alpha \Delta \bar{\epsilon}^{pdesl} \quad (13)$$

onde o parâmetro α define a taxa de formação de bandas de cisalhamento definido em função da temperatura T , do fator de triaxialidade de tensões Σ e da taxa de deformação por:

$$\alpha = (\alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 - \alpha_4 \Sigma) \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pdesl}}{\dot{\epsilon}_\gamma} \right)^m \quad (14)$$

onde m e $\Delta \epsilon_\gamma$ são a sensibilidade à velocidade de deformação plástica e uma velocidade de deformação de referencia ao passo que α_i ($i=1,4$) são constantes do material. A força motriz da transformação de fases é definida pelo parâmetro g dependente da temperatura, do estado de tensões

$$g = -T + g_1 \Sigma \quad (15)$$

com g_1 constante. Ainda, o parâmetro p na Eq. (10) define a possibilidade de formação das bandas de cisalhamento por meio de uma distribuição Gaussiana:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \int_{-\infty}^g \exp \left[-\frac{(g' - g_0)^2}{2\sigma_g^2} \right] dg' \quad (16)$$

onde σ_g é o desvio padrão.

O regime de carregamento plástico é verificado na seguinte condição:

$$f = F(\sigma_{ij}^{teste}, \bar{\epsilon}^{pdesl} |^t) - \bar{\sigma}^t \geq 0 \quad (17)$$

Caso contrário, ou seja, para $f < 0$ o regime de deformações é puramente elástico.

Na Eq. (17) a superfície de escoamento de transformação é descrita pela seguinte função de escoamento

$$F(\sigma_{ij}) = \sqrt{3[J_2 - k(J_3 / J_2^{1/2})]} \quad (18)$$

onde

$$\Delta k = (1 - k)c_k \Delta \epsilon^{pdesl} \quad (19)$$

Uma vez verificada a condição da Eq. (17), prossegue-se com a correção plástica para atualizar o estado de tensão, ou seja,

$$\sigma_{ij}^{t+\Delta t} = \sigma_{ij}^{teste} - \lambda \Delta \epsilon_{kk}^{dilat} \delta_{ij} - 2\mu \Delta \epsilon_{ij}^p \quad (20)$$

Na Eq. (17) $\bar{\sigma}$ é uma medida de tensão efetiva definida por meio de uma lei de mistura onde se supõe que as fases são submetidas a uma mesma deformação plástica, a saber,

$$\bar{\sigma} = f_m \bar{\sigma}_m + (1 - f_m) \bar{\sigma}_a \quad (21)$$

onde a tensão de escoamento em cada fase “i” (a – austenita, m – martensita) é descrita por:

$$\bar{\sigma}_i = \sigma_{yi} + c_{1i} [1 - \exp(-c_{2i} \bar{\epsilon}^{pdesl})]^{c_{3i}} \quad (22)$$

com

$$\sigma_{yi} = c_{4i} \exp(-c_{5i} T) \quad (23)$$

onde c_{1i} , c_{2i} ... c_{5i} são parâmetros do material.

Finalmente, a descrição do comportamento plástico é completada por meio da relação entre as grandezas efetivas tensão-deformação definida por:

$$\Delta \bar{\sigma} = H(\bar{\sigma}) \Delta \bar{\epsilon}^{pdesl} \quad (24)$$

onde o módulo plástico é dado por:

$$H(\bar{\sigma}) = f_m H(\bar{\sigma}_m) + (1 - f_m) H(\bar{\sigma}_a) + (\bar{\sigma}_m - \bar{\sigma}_a)(1 - f_m) A' \quad (25)$$

com



$$H(\bar{\sigma}_m) = \frac{\partial \bar{\sigma}_m}{\partial \bar{\epsilon}^{pdest}} \quad (26)$$

$$H(\bar{\sigma}_a) = \frac{\partial \bar{\sigma}_a}{\partial \bar{\epsilon}^{pdest}}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado para realizar a simulação foi o de elementos finitos, com um código comercial aberto ao usuário (Abaqus/Standard) através de uma sub-rotina de integração implícita. A simulação foi realizada com um único elemento com condições de contorno de tração/compressão uniaxial.

Os dados experimentais de tensão e deformação axial e de fração volumétrica de martensita transformada utilizados para a discussão em relação às simulações foram retirados do artigo de Serri, Martiny e Ferron.⁽¹⁾

O material utilizado nas simulações foi o aço inoxidável austenítico 304, isotrópico, com condições de contorno de tração/compressão uniaxial. Os Parâmetros do material, apresentados na tabela abaixo, foram retirados do artigo de Iwamoto e Tsuta.⁽³⁾

Tabela 1: Parâmetros do material

E	Módulo de Elasticidade	193.0 (GPa)
ν	Coeficiente de Poisson	0.333
M	Sensibilidade à taxa de deformação	0.0058
$\dot{\epsilon}_\gamma$	Taxa de deformação de referência	$5.0 \times 10^{-4} (\text{s}^{-1})$
Δv	Mudança relativa de volume devido à transformação	0.02
η	Constante Geométrica	9.23
N	Orientação das Bandas de Cisalhamento	4.5
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$	Constantes da equação (14)	$-1.9 \times 10^{-4}, 2.42 \times 10^{-2}, 14.6, 7.15$
σ_g	Desvio Padrão	107.7
g_0	Constante da equação (16)	-147.4
g_1	Constante da equação (15)	75.4
$C_{1a}, C_{2a}, C_{3a}, C_{4a}, C_{5a}$	Constantes das equações (22) e (23)	1254.0, 0.89, 0.63, 1124.0, 0.0063
$C_{1m}, C_{2m}, C_{3m}, C_{4m}, C_{5m}$	Constantes das equações (22) e (23)	1624.0, 14.8, 3.13, 7348.0, 0.021

Fonte: Parâmetros retirados do artigo de Iwamoto e Tsuta⁽³⁾

As simulações realizadas são isotérmicas, e as temperaturas estudadas foram de 128 K, 213 K, 273 K, 298 K e 353 K, possibilitando assim, analisar a dependência que a transformação martensítica induzida por plasticidade possui da temperatura em que ocorre o processo.

Tomita e Iwamoto⁽⁴⁾ dizem que a transformação martensítica induzida por plasticidade depende fortemente da temperatura. Serri, Martiny e Ferron⁽¹⁾ declaram que o volume de fração martensítica transformada diminui de acordo com o aumento

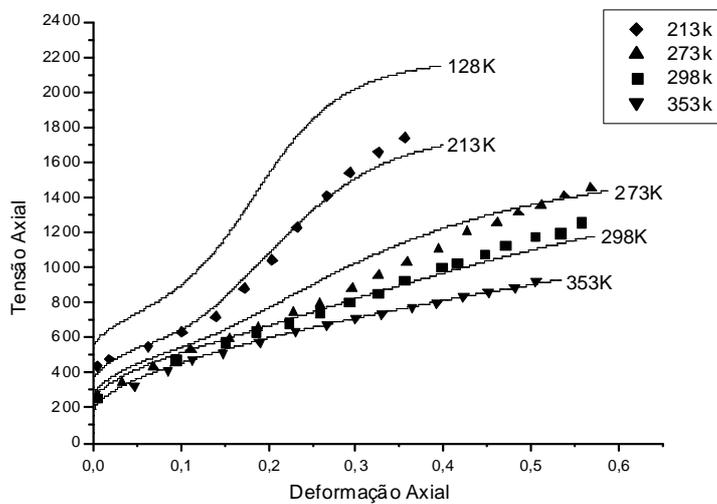


da temperatura do processo. Essa dependência da temperatura na transformação será verificada através das simulações isotérmicas em diferentes temperaturas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

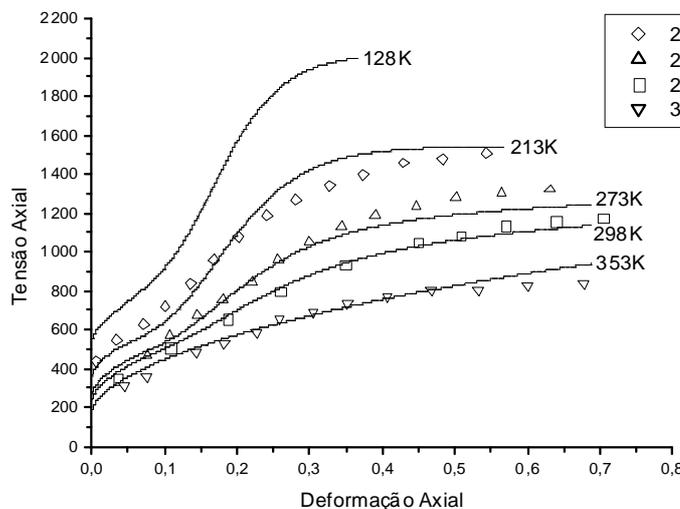
As simulações foram realizadas utilizando o programa Abaqus/Standart com elementos lineares sólidos com integração implícita, denominado C3D8 na terminologia do programa.

O comportamento do material sob tração e compressão foi simulado aplicando as condições apropriadas de deslocamento para os nós de um único elemento sólido. A tensão axial é demonstrada como uma função da deformação ao longo do eixo de tração na Figura 1, e ao longo do eixo de compressão na Figura 2, para diferentes temperaturas.



Fonte: Pontos experimentais retirados da referência ⁽¹⁾ para comparação.

Figura 1: Curvas tensão-deformação para tração uniaxial em diferentes temperaturas.

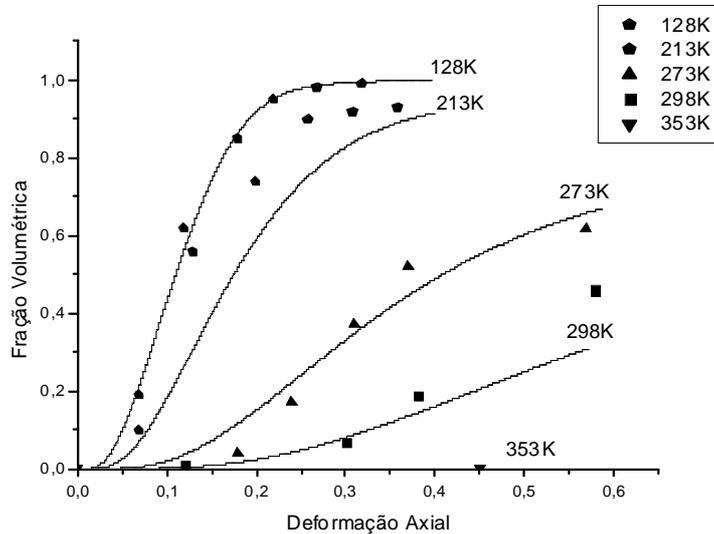


Fonte: Pontos experimentais retirados da referência ⁽¹⁾ para comparação.

Figura 2: Curvas tensão-deformação para compressão uniaxial em diferentes temperaturas.

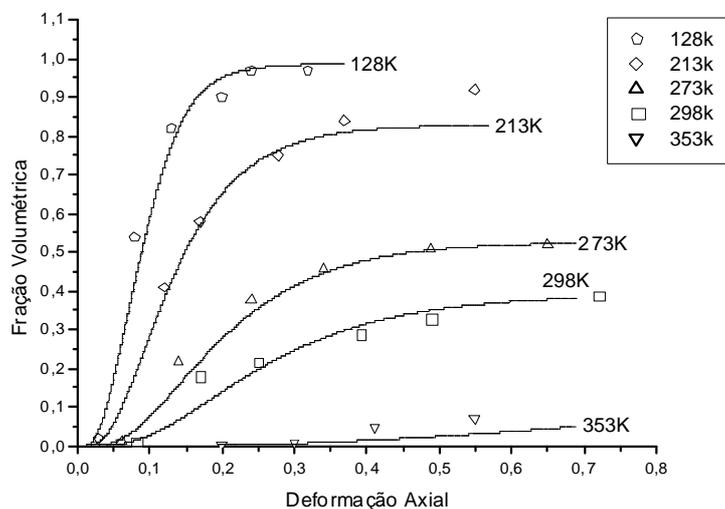


A fração volumétrica de martensita transformada é demonstrada como uma função da deformação ao longo do eixo de tração na Figura 3, e ao longo do eixo de compressão na Figura 4, para diferentes temperaturas.



Fonte: Pontos experimentais retirados da referência ⁽¹⁾ para comparação.

Figura 3: Curvas de fração volumétrica de martensita transformada em relação à deformação para tração uniaxial em diferentes temperaturas.



Fonte: Pontos experimentais retirados da referência ⁽¹⁾ para comparação.

Figura 4: Curvas de fração volumétrica de martensita transformada em relação à deformação para compressão uniaxial em diferentes temperaturas.

Foram observados diversos fatores que influenciam o estado de tensões, entres eles, a força motriz da transformação martensítica g , que é diretamente proporcional ao fator de triaxialidade Σ , enquanto que a fração volumétrica de martensita transformada é inversamente proporcional ao fator de triaxialidade Σ . Com isso, verifica-se que a evolução da fração martensítica possui uma dependência inversa ao estado de tensões, com uma maior taxa de transformação



martensítica em pequenas deformações de compressão, mas com uma fração martensítica mais baixa em grandes deformações que no caso da tração, confirmando assim a colocação de Iwamoto, Tsuto e Tomita.⁽³⁾

Observa-se que os níveis de tensão para grandes deformações tendem a ficar ligeiramente menores para a compressão, devido à assimetria imposta durante o escoamento.

E que as tensões axiais (trativa e compressiva), e principalmente a fração volumétrica de martensita transformada diminui de acordo com que a temperatura do processo aumenta.

Além disso, observa-se que as curvas analisadas estão em função da deformação ao longo do eixo de tração ou compressão, o que inclui a componente de deformação dilatacional.

As curvas tensão axial-deformação axial, e fração volumétrica de martensita transformada-deformação axial (Figuras 1-4) possuem uma boa precisão, comparadas com os dados retirados da literatura,⁽¹⁾ desconsiderando a aproximação das deformações efetivas.

5 CONCLUSÃO

Foram analisados os efeitos da temperatura e da deformação no estado de tensões e na formação da fração volumétrica de martensita transformada. Conclui-se que a intensidade da deformação influencia na evolução da fração martensítica, que o tipo de esforço a grandes deformações (trativo ou compressivo) influencia na fração limite de martensita transformada, e que a temperatura mantida no processo influencia inversamente na tensão gerada e na fração volumétrica transformada. Os resultados condizem com o previsto na literatura de referência.

Agradecimentos

Emanuelle Barbosa de Mattos e Luciano Pessanha Moreira agradecem ao CNPQ financiamento de bolsa de Iniciação Científica no âmbito do programa PIBIC.

REFERÊNCIAS

- 1 SERRI, J., MARTINY, M., FERRON, G., Finite element analysis of the effects of martensitic phase transformation in TRIP steel sheet forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 47, p. 884-901, 2005.
- 2 IWAMOTO, T., TSUTA, T., TOMITA, Y., Investigation on deformation mode dependence of strain-induced martensitic transformation in TRIP steels and modeling of transformation kinetics. *International Journal of Mechanical Sciences*, v 40, p. 173–182, 1998.
- 3 IWAMOTO, T., TSUTA, T., Computational simulation of the dependence of the austenitic grain size on the deformation behavior of TRIP steels. *International Journal of Plasticity*, v. 16, p. 791–804, 2000.
- 4 TOMITA, Y., IWAMOTO, T., Constitutive modeling of TRIP steel and its application to the improvement of mechanical properties. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 37, p. 1295–1305, 1995.