



## EFEITO DOS PARÂMETROS TERMOMECAÑICOS NA DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO CRÍTICA DA TRANSFORMAÇÃO DA FERRITA INDUZIDA POR DEFORMAÇÃO

Cristiano P. Del Carro<sup>1\*</sup> e Marcelo Lucas P. Machado<sup>2</sup>

1 – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Vitória, ES.

[cristiano.pessotti@gmail.com](mailto:cristiano.pessotti@gmail.com)

2 -. Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Vitória, ES

### RESUMO

*Neste trabalho investigou-se a influência dos parâmetros termomecânicos na determinação da deformação de início da transformação da ferrita induzida por deformação. As amostras do aço AISI 1020 foram submetidas a ensaios de torção a quente na faixa de temperatura de 900°C – 580°C, a uma deformação de 2,0 e taxa de deformação de 0,6 s<sup>-1</sup>. Os ensaios de taxa de deformação foram conduzidos a taxas de até 0,9 s<sup>-1</sup>. As deformações críticas para o início do DIFT e DRX foram determinadas pelo método da dupla diferenciação e observado que o valores diminuíram com a redução da temperatura de deformação e da taxa de deformação. Ambos os mecanismos são iniciados em todas as condições experimentais, no qual a quantidade de deformação para iniciar o DIFT foi sempre menor que o DRX.*

**Palavras-chave:** Transformação da ferrita induzida por deformação; Deformação crítica; Torção a quente; Transformação de fase.

### INTRODUÇÃO

O aprimoramento da resistência dos materiais metálicos partiu do entendimento dos defeitos cristalinos: discordância, lacunas (substitucional e intersticial), adição de elementos de liga e contornos de grãos, e a influência da interação entre estes no nível da resistência, resultando em uma relação que abrangia densidade de defeitos e propriedades mecânicas. Por outro lado, os métodos de reforço mencionados possuem contribuições diferentes em materiais laminados a quente, entretanto, o refino do grão é o único método para melhorar, simultaneamente, a resistência e a tenacidade do material<sup>(1)</sup>.

Sabe-se que as transformações dinâmicas no estado sólido possuem grande influência na obtenção de grãos ultrafinos (UFG) e no controle da microestrutural final. Dentre as principais transformações, a saber, a recristalização dinâmica (DRX), encontra-se a transformação da ferrita induzida por deformação (DIFT). Ambos são mecanismos de suavização da tensão de fluxo, portanto, levam a diminuição na taxa de endurecimento líquido durante o processo de laminação. Dessa forma, o conhecimento da deformação na qual inicia o DIFT e a interação com os parâmetros termomecânicos são de considerável importância industrial<sup>(2)</sup>. Diante deste,

o presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito dos parâmetros termomecânicos na determinação da deformação crítica do DIFT.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O material investigado no presente estudo foi um aço simples de baixo carbono AISI 1020 cuja composição química é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (porcentagem em peso) do aço utilizado.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0,212	0,136	0,534	0,015	0,013	0,020	0,001	0,008	0,002	0,003

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de torção foram usinados a partir de uma barra redonda com diâmetro de 3/4". As dimensões finais apresentam comprimento útil de 20 mm e diâmetro útil de 5 mm. Os ensaios de torção a quente foram realizados em uma máquina horizontal INSTRON 55MT. Para avaliação da temperatura de deformação, as amostras foram inicialmente aquecidas a uma taxa de 3°C/s até a temperatura de 1130°C, na qual foram mantidas por 5 min. As amostras foram resfriados aplicando uma taxa de 1°C/s até as temperaturas de deformação em um range de 900°C – 580°C, submetidas a uma deformação de 2,0 e taxa de deformação de 0,6 s<sup>-1</sup>. Os ensaios da taxa de deformação foram realizadas a 0,3, 0,6 e 0,9 s<sup>-1</sup>, na temperatura de 800°C e deformação de 2,0. As temperatura crítica de processamento foram determinadas pelo método de múltiplas deformações em resfriamento contínuo:  $T_{nr}$  = 1068°C,  $A_{r3}$  = 754°C e  $A_{r1}$  = 622°C. A temperatura  $A_{e3}$  é igual a 840°C, sendo determinada pelo modelo matemático desenvolvido por KHAIRA e JENA<sup>(3)</sup>.

Para avaliar o efeito da temperatura de deformação e da taxa de deformação na deformação crítica do DIFT, foi aplicado o método da dupla diferenciação<sup>(4)</sup>. A análise dos dados das curvas tensão/deformação foram delimitados até um ponto logo após a tensão de pico ( $\sigma_p$ ). Com o objetivo de eliminar a influência dos ruídos e flutuações presentes nos dados experimentais foi aplicado um polinômio de nona ordem.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas  $-(d\theta/d\sigma)$  versus a tensão equivalente para a variação da temperatura de deformação e taxa de deformação são apresentadas na Figura 1. Em todos os ensaios realizados observa-se três pontos de inflexão nas curvas e a presença de dois pontos mínimos, sendo o primeiro associado ao início do DIFT e o segundo ao início do DRX<sup>(5)</sup>. A partir dos pontos mínimos foi possível determina a tensão crítica e sua respectiva deformação crítica. Na Figura 2 é possível observar o efeito da temperatura de deformação e da taxa de deformação na deformação crítica do DIFT e DRX. Em geral, para todas as condições, nota-se que a deformação crítica do DIFT é menor do que o DRX.

As dependências da deformação crítica em função da temperatura de deformação exibem uma tendência crescente da deformação crítica do DIFT para o aumento da temperatura (Figura 2a). Pode-se explicar esse comportamento em relação a temperatura  $A_{e3}$ , uma vez que, nas temperaturas superiores a  $A_{e3}$  (900°C e 855°C) é exigido maiores deformações para fornecer a força motriz necessária para a transformação dinâmica da ferrita<sup>(5)</sup>. Por outro lado, em temperaturas menores que  $A_{e3}$  (800°C – 580°C), devido a maior densidade de defeitos intragranulares e a redução no tamanho de grão, é esperado um aumento na energia de deformação armazenada na austenita, logo, reduzindo a energia de ativação necessária para a nucleação da ferrita induzida por deformação<sup>(6)</sup>.

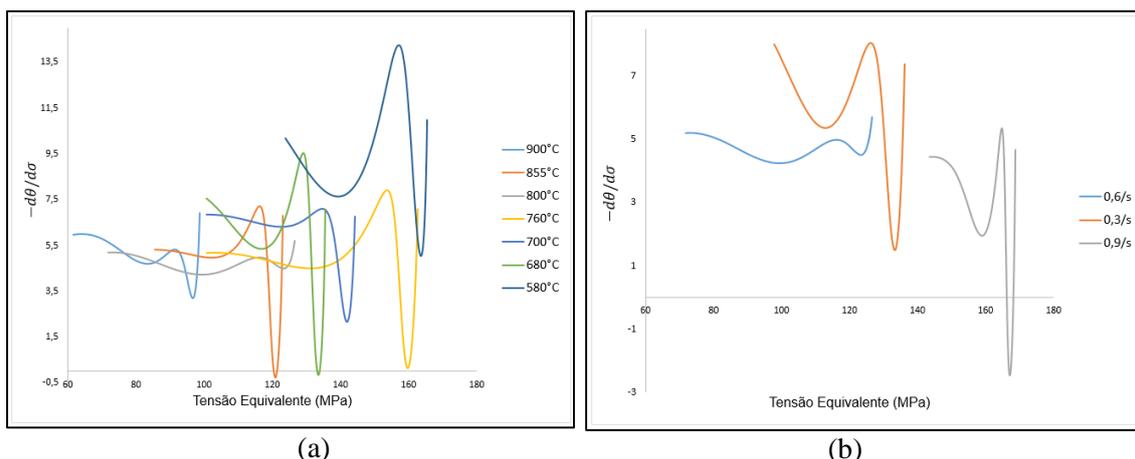


Figura 1: Dependência das curvas  $-(d\theta/d\sigma)$  vs  $\sigma_{eq}$  em função da temperatura de deformação (a) e taxa de deformação (b).

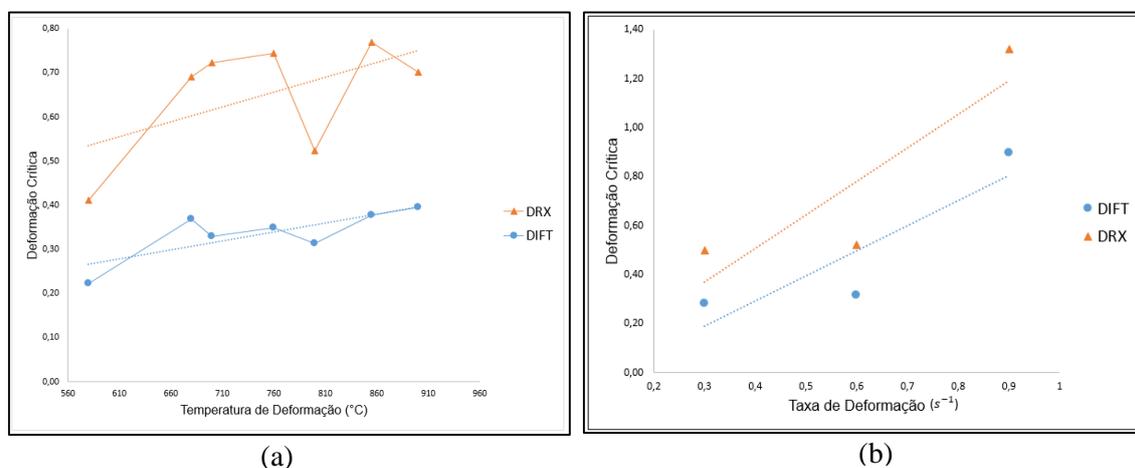


Figura 2: Dependência da deformação crítica do DIFT e DRX em função da temperatura de deformação (a) e taxa de deformação (b).

Para os valores de deformação crítica do DRX nota-se uma tendência aproximadamente constante, na qual ocorre um aumento da deformação crítica até a temperatura  $Ae_3$ , em seguida, uma redução nos valores (Figura 2a). O aumento nos valores até  $Ae_3$  deve-se ao comportamento convencional do DRX a elevadas temperaturas em que, um alto parâmetro  $Z$  maximiza a iniciação do DRX. Contudo, assim como foi observado por ZHAO et al.<sup>(7)</sup>, verifica-se uma redução na deformação crítica do DRX para baixas temperaturas. Partindo do pressuposto que um menor tamanho de grão inicial aumenta a ocorrência do DRX, os autores explicam que o comportamento não convencional deve-se ao refino do grão de ferrita promovido pela transformação induzida por deformação e a alta fração transformada, resultando no aumento da cinética do DRX. Dessa forma, pode-se dizer que para a aceleração da cinética DIFT a baixas temperaturas, reduziu a deformação crítica do DRX, contudo, é necessário maiores estudos para analisar a influência do fenômeno.

Observa-se que a deformação para início do DRX e DFIT apresenta um aumento para maiores taxas de deformação, contudo, entre as taxas de 0,3 e 0,6/s nota-se uma baixa variação nos valores, por outro lado, a taxa de  $0,9 \text{ s}^{-1}$  apresentou um aumento exponencial na deformação crítica de ambos os mecanismos (Figura 2b). Quando comparado a deformação crítica para o DIFT entre as taxas de 0,3 e  $0,9 \text{ s}^{-1}$ , este último apresentou um aumento de três vezes superior ao primeiro ( $\dot{\epsilon}_{CDIFT} = 0,28$  para 0,3/s e  $\dot{\epsilon}_{CDIFT} = 0,90$  para 0,9/s), ao passo que, para o DRX

houve um aumento de 2,5 vezes sobre a taxa de deformação inicial ( $\dot{\epsilon}_{c_{DRX}} = 0,50$  para 0,3/s e  $\dot{\epsilon}_{c_{DRX}} = 1,32$  para 0,9/s). Entretanto, deve-se observar que, embora a deformação para iniciar o DIFT seja maior em taxas de deformação mais alta, o tempo exigido para atingir a deformação será reduzido. Percebe-se que, comparado ao DRX, há maior influência da taxa de deformação sobre a deformação crítica do DIFT.

### Efeito do grau do polinômio na determinação da deformação crítica

O método da dupla diferenciação requer a aplicação de um polinômio para ajustar as curvas de fluxo e reproduzir com precisão os pontos de inflexão<sup>(2)</sup>. Portanto, foi avaliado o efeito da ordem do polinômio na sensibilidade do método, bem como a influência nos valores de deformação crítica encontrado. Para tal propósito, utilizou-se dos dados da curva de fluxo da amostra deformada a 760°C, no qual analisou a ordem no intervalo de 15 a 2. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.

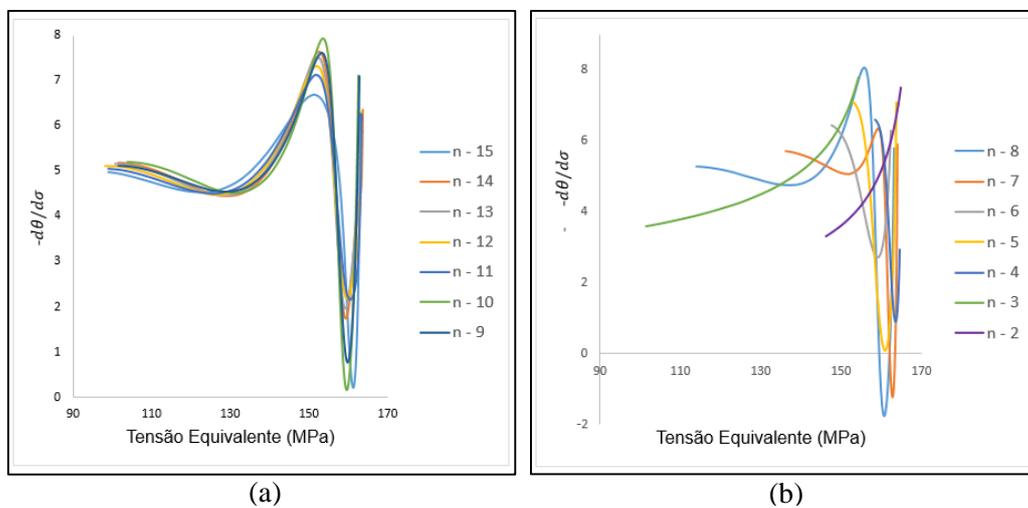


Figura 3: Efeito da ordem do polinômio no método da dupla diferenciação: (a) ordem de 15 a 9; (b) ordem de 8 a 2.

A partir da Figura 3b, nota-se que os polinômios de ordem 2 e 3 são incapazes de detectar qualquer ponto de inflexão, enquanto que, para os polinômios de grau 4, 5 e 6 é possível identificar o ponto mínimo do DRX, mas não identifica o ponto mínimo do DIFT. Contudo, desde que a ordem seja igual ou superior a 7 (Figura 3a), ambos os pontos mínimos de inflexão são facilmente detectados. Com base nos valores de tensão associado aos ponto de inflexão, foi possível avaliar a influência da ordem do polinômio nos valores de deformação crítica (Figura 4). Observa-se que o efeito no valor real de deformação apresenta uma baixa variação, de tal forma que, para ambos os mecanismo, a precisão foi de  $\pm 0,02$ , logo os valores encontrados são, aproximadamente, constantes independente da ordem do polinômio aplicado, conforme apresentado na Figura 4. Entretanto, nota-se um maior grau de precisão nos valores encontrados para um polinômio de ordem maior ou igual a 9 que, nesses casos, apresentaram um grau de certeza de  $\pm 0,005$  e  $\pm 0,009$  para o DIFT e DRX, respectivamente.

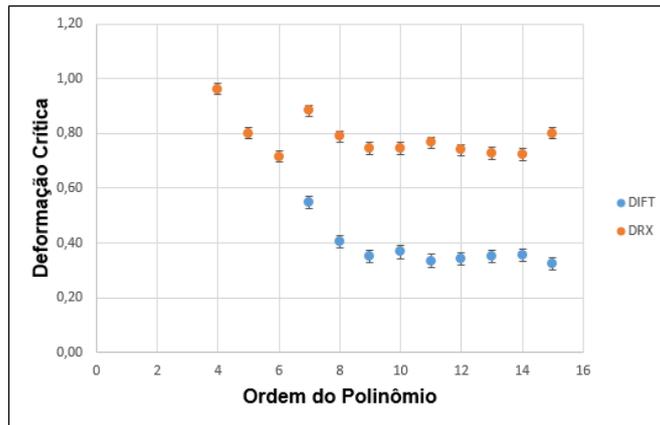


Figura 4: Dependência do valor da deformação crítica em função do grau do polinômio.

Dessa forma, de modo geral, assim como também foi observado em trabalhos anteriores<sup>(2,8)</sup>, pode-se considerar que os valores das deformações críticas para o DIFT e DRX são independentes da ordem do polinômio utilizado no método da dupla diferenciação. Por outro lado, observa-se a influência do grau do polinômio na presença dos pontos mínimos de inflexão e, conseqüentemente, na identificação da deformação crítica. Ou seja, para um polinômio de ordem 7 ou superior, nota-se os três pontos de inflexão na curva, ao passo que, para polinômio de ordem inferior verifica-se apenas um ponto ou a ausência de qualquer inflexão.

## CONCLUSÕES

No presente estudo foi possível constatar que, desde que a ordem do polinômio seja alta o suficiente, dois pontos mínimos de inflexão são identificados nas curvas  $-(d\theta/d\sigma)$  referente à deformação crítica do DIFT e DRX, respectivamente. Nota-se que o grau do polinômio utilizado para suavizar a curva de fluxo possui pouca influência na determinação da deformação crítica. Para a faixa de temperatura de deformação investigada a deformação crítica do DIFT foi menor do que a deformação crítica do DRX. Em temperatura menores que  $Ae_3$ , a deformação crítica do DRX reduziu para menores temperaturas, apresentando um comportamento não convencional. O aumento da taxa de deformação resultou em maiores deformações para iniciar o DIFT.

## REFERÊNCIAS

1. **Artigos de periódicos:** DONG, H.; SUN, X. Deformation Induced Ferrite Transformation. **Ultra-Fine Grained Steels**, p. 86–136, 2009.
2. **Artigos de periódicos:** GHOSH, C.; BASABE, V. V.; JONAS, J. J. Determination of the critical strains for the initiation of dynamic transformation and dynamic recrystallization in four steels of increasing carbon contents. *Steel Research International*, v. 84, n. 5, p. 490–494, 2013.
3. **Artigos de periódicos:** KHAIRA, H.; JENA, A. On modeling of the  $Ae_3$  temperature of steel. p. 151–162, 1996.
4. **Artigos de periódicos:** POLIAKT, E. I.; JONASS, J. J. ( *It.* v. 44, n. 1, p. 127–136, 1996.
5. **Artigos de periódicos:** GHOSH, C.; ARANAS, C.; JONAS, J. J. Dynamic transformation of deformed austenite at temperatures above the  $Ae_3$ . *Progress in Materials Science*, v. 82, n. February, p. 151–233, 2016.

6. **Artigos e periódicos:** BELADI, H. et al. The evolution of ultrafine ferrite formation through dynamic strain-induced transformation. *Materials Science and Engineering A*, v. 371, n. 1–2, p. 343–352, 2004.
7. **Artigos e periódicos:** ZHAO, L. et al. Combination of dynamic transformation and dynamic recrystallization for realizing ultrafine-grained steels with superior mechanical properties. *Scientific Reports*, v. 6, n. 1, p. 39127, 14 dez. 2016.
8. **Artigos e periódicos:** GOTTSTEIN, G. et al. Prediction of the critical conditions for dynamic recrystallization in the austenitic steel 800H. *Materials Science and Engineering: A*, v. 387–389, n. 1- 2 SPEC. ISS., p. 604–608, dez. 2004.

## **EFFECT OF THERMOMECHANICAL PARAMETERS IN THE DETERMINATION OF CRITICAL STRAIN OF DEFORMATION INDUCED FERRITE TRANSFORMATION**

### **ABSTRACT**

*In this work the effect of thermomechanical parameters in the determination the strain at the beginning of the deformation induced ferrite transformation was investigated. The samples of AISI 1020 steel were subjected to hot torsion tests in the temperature range of 900°C – 580°C, at a strain of 2.0 and strain rate of 0.6 s<sup>-1</sup>. Strain rate tests were conducted at rates up to 0.9 s<sup>-1</sup>. The critical strains for the beginning of DIFT and DRX were determined by the double differentiation method and it was observed that the values decreased with the reduction of temperature and strain rate. Both mechanisms are initiated under all experimental conditions, in which the amount of strain to initiate DIFT was always less than DRX.*

**Keywords:** Deformation induced ferrite transformation; Critical strain; Hot torsion test; Phase transformation *Inserir*.