

# ENSAIOS ISOTERMICOS COM DUPLA DEFORMAÇÃO DO AÇO IF POR TORÇÃO A QUENTE\*

Helder Keitaro Arçari Ambo<sup>1</sup>  
Marcelo Lucas Pereira Machado<sup>2</sup>

## Resumo

Aços IF (Interstitial Free) são materiais com grande capacidade de serem conformados a frio, normalmente na forma de chapas, utilizados na indústria automobilística na fabricação de carrocerias de automóveis e outros componentes similares. Neste artigo foi realizado ensaio isotérmico de dupla deformação com objetivo de determinar a fração de amaciamento que ocorre no intervalo entre passes e o parâmetro de amaciamento<sup>4</sup>. O método para obter estes dados foi utilizando software da Instron em conjunto a máquina de torção e o forno de indução. Os resultados obtidos foram de grande importância no estudo para avaliar o comportamento do material quanto aos fenômenos metalúrgicos e termomecânicos envolvidos, ou seja, se ocorre recuperação, recristalização dinâmica entre outros processos de restauração do material quando submetido a forças externas em elevadas temperaturas.

**Palavras-chave:** Torção a Quente; Aço IF; Restauração; Dupla Deformação.

## ISOTHERMAL TEST WITH DOUBLE STAIN OF THE IF STEEL BY HOT TORSION

### Abstract

IF (Interstitial Free) steels are highly cold formed materials, usually in the form of sheets, used in the automotive industry in the manufacture of automobile bodies and other similar components. In this paper, a double deformation isothermal test was carried out in order to determine the breaking-in fraction that occurs in the interval between passes and the break-in parameter. The method for obtaining this data was using Instron's software in conjunction with the torsion machine and the furnace. induction. The results obtained were of great importance in the study to evaluate the behavior of the material regarding the metallurgical and thermomechanical phenomena involved, that is, if recovery occurs, dynamic recrystallization among other processes of restoration of the material when submitted to external forces at high temperatures.

**Keywords:** Hot torsion; Steel IF; Recovery; Double Strain.

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Metalúrgica no Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória - ES - Brasil

<sup>2</sup> Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo, Coordenador do Programa de Mestrado Propemm do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia.

## 1 INTRODUÇÃO

Aços IF representa a composição com ultra baixo carbono e nitrogênio, com o adição de elementos formadores de carbeto e nitreto como titânio e nióbio para controle do refino de grão, ou seja, um aço de matriz ferrítica livre de elementos intersticiais<sup>2</sup>. O processo de conformação a quente consiste, inicialmente, em aquecer o material até a temperatura de encharque para a austenitização, realizar deformações programadas nas etapas de desbaste e de acabamento e em seguida promover o resfriamento controlado do material. Os principais processos industriais de conformação a quente são a laminação, a extrusão e o forjamento. Uma técnica experimental capaz de reproduzir estas condições de processamento é o ensaio de torção a quente. Com esses ensaios, pode-se realizar sequencias de passes impondo parâmetros de processamento tais como a temperatura de reaquecimento, a taxa de resfriamento, a quantidade de deformação e taxa de deformação<sup>1</sup>.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado no trabalho foi um aço IF (estabilizado com Ti) produzido no Laminador de Tiras a Quente, cuja composição química encontra-se na tabela 1.

Tabela 1- Composição Química do aço IF.

Elementos (% em Peso)									
C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Nb	Ti	Mo
≤ 0,005	≤ 0,011	≤ 0,109	≤ 0,0108	≤ 0,005	≤ 0,0597	≤ 0,0103	~0,0077	≤ 0,0394	≤ 0,0055

Os corpos de prova foram usinados a partir de uma chapa de 15,88 x 1.500 x 500 mm, com diâmetro útil de 5 mm e comprimento útil de 20 mm, conforme representado na figura 1. O dimensionamento dos corpos de prova foi otimizado para atender a capacidade de máximo torque do equipamento de torção e obter maiores taxas de deformação.

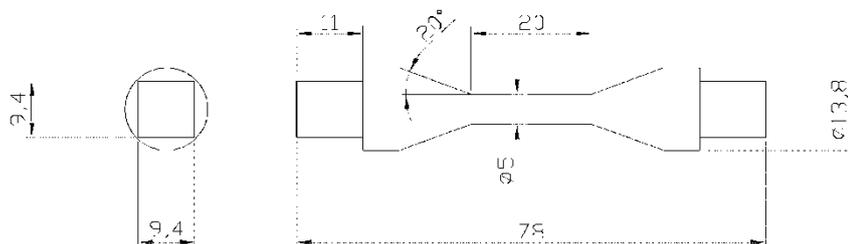


Figura 1- Desenho Esquemático do Corpo de Prova.

Na figura 2 mostra o desenho esquemático dos equipamentos utilizados para a coleta de dados durante a deformação do corpo de prova.

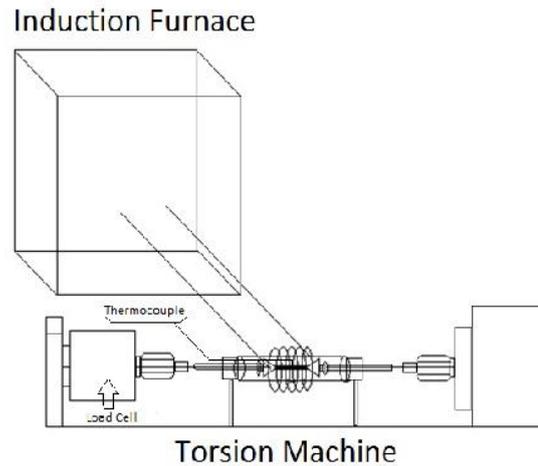


Figura 2 – Desenho esquemático dos equipamentos do laboratório de Conformação IFES.

Por meio do Ensaio Isotérmico é possível traçar as curvas de escoamento plástico, onde podemos avaliar o comportamento mecânico do material variando alguns parâmetros de processo, como temperatura e taxa de deformação e deformação.

Esse tipo de ensaio é utilizado para investigar os fenômenos metalúrgicos que ocorrem no intervalo entre passes durante a conformação mecânica<sup>3</sup>. Nesses ensaios os testes são interrompidos após a primeira deformação mantendo-se a amostra na mesma temperatura por diferentes intervalos entre passes ( $t_{ip}$ ), em seguida os corpos de prova são deformados com deformação idêntica a anterior. Na figura 3 são mostradas curvas típicas de ensaios isotérmicos com dupla deformação.

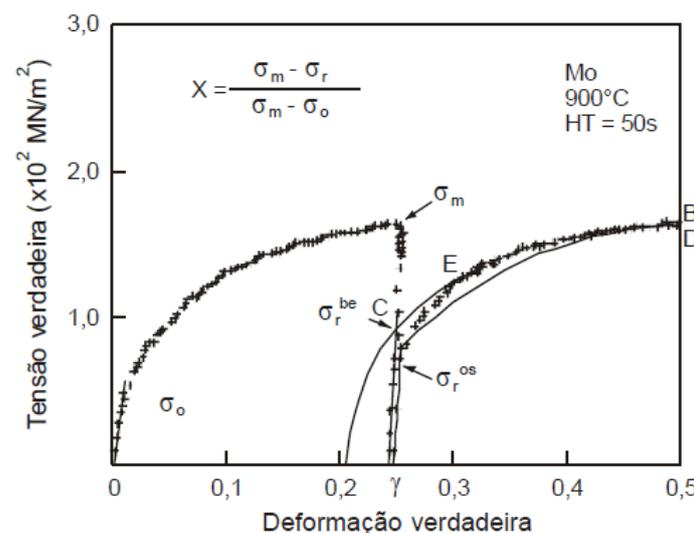


Figura 3 - Curvas de escoamento plástico obtidas em ensaio com duas deformações

## 2.1 Método para Cálculo da Fração de Amaciamento

Os ensaios interrompidos com duas deformações permitem determinar a fração de amaciamento que ocorre no intervalo entre passes, calculando-se o parâmetro de amaciamento (PA), como mostrado na equação 1 <sup>3</sup>.

$$PA(\%) = \left( \frac{\sigma_m - \sigma_r}{\sigma_m - \sigma_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde  $\sigma_m$  é a tensão na primeira interrupção do teste,  $\sigma_0$  é a tensão de início de escoamento plástico na primeira deformação e  $\sigma_r$  a tensão na segunda deformação, conforme mostrado na figura 3.24.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliação do amaciamento/restauração entre passes foram realizados dois tipos de ensaios: o primeiro com deformação de 0,06 abaixo da deformação crítica, para avaliação da recristalização estática e o segundo com deformação de 0,3 acima da deformação crítica para avaliação da recristalização dinâmica<sup>5</sup>. As deformações foram realizadas a 1100°C, a taxa de deformação foi de 0,1 s<sup>-1</sup> e os tempos de espera entre passes foram de 1, 5 e 40 s.

Na figura 4 podem ser vistas as curvas de escoamento plástico obtidas para as deformações abaixo da deformação crítica.

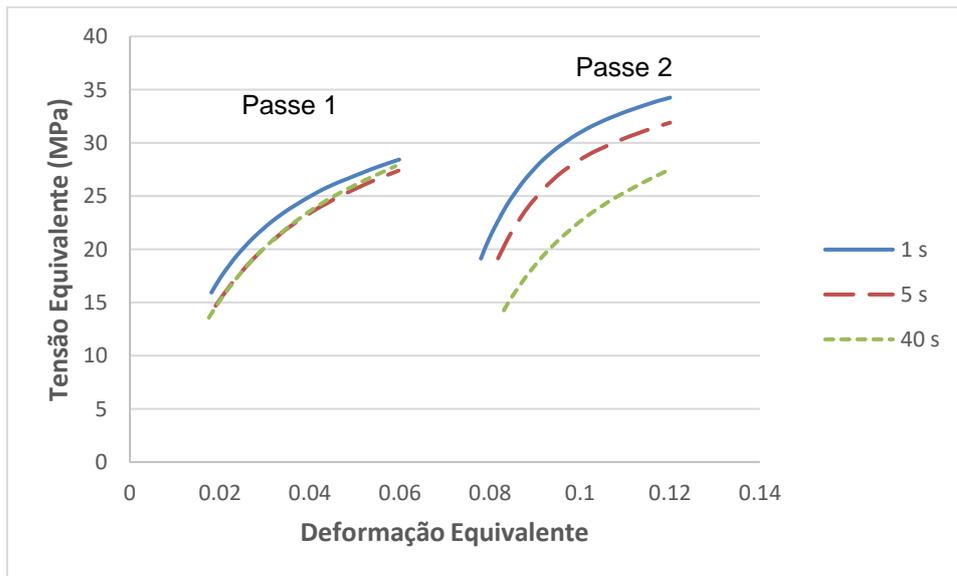


Figura 4 – Curvas de tensão equivalente versus deformação equivalente para parte plástica dos ensaios com duas deformações realizadas a 1100°C, taxa de deformação de 0,1 s<sup>-1</sup>, deformação de 0,06 e tempo entre passes de 1, 5 e 40 s.

Como pode ser observado na figura 4 para intervalo de um segundo entre as deformações não houve amaciamento, pois o tempo de recuperação é curto ocorrendo então um aumento de tensão no segundo de carregamento ( $\sigma_r$ )

Já no intervalo de cinco segundos entre os passes de deformação houve uma redução no segundo passe de carregamento entorno de 2 MPa, mostrando assim o mecanismo de recristalização estática atuando. Já com a espera de quarenta segundo entre os passes de deformação a restauração do aço IF foi praticamente completa.

A fração de amaciamento foi calculada conforme descrito na seção 3.8 e o resultado pode ser visto na tabela 2. Para efeito de cálculos considerou-se que o material se recristalizou completamente quando a fração de recristalização atingiu um valor  $X \geq 95\%$ .

Tabela 2 – Fração de Amaciamento calculada para as curvas de escoamento plástico nos ensaios isotérmicos interrompidos com duas deformações a 1100°C, com duas deformações de 0,06 e taxa de deformação de 0,1 s<sup>-1</sup>.

**Ensaio isotérmico com duas deformações de 0,06 e taxa de deformação de 0,1 s<sup>-1</sup>**

<b>Tempo entre passes (tip)</b>	<b>1s</b>	<b>5s</b>	<b>40s</b>
<b>Fração de Amaciamento (%)</b>	57,14%	71,42%	96,47%

Na tabela 14 a fração de amaciamento nos tempos de 1 e 5 segundos são de 57,14% e 71,42%, isso mostra que o mecanismo de recristalização estática está atuando restaurando parte da deformação entre os passes . Conforme esperado quanto maior o intervalo entre passes, maior é a fração de amaciamento (X). A deformação aplicada nos ensaios da figura 48 foram inferiores a deformação crítica do aço IF, atuando com isso apenas recristalização estática na temperatura de 1100°C Com o tempo entre passe de 40 segundos o aço IF amaciou recristalizando completamente

Na figura 5 mostra o conjunto de ensaios realizados a uma deformação de 0,3, que é suficiente para iniciar a recristalização dinâmica. As curvas de escoamento plástico podem ser vistas na figura 49, onde observa-se que houve amaciamento do material a partir de 5 segundos entre passes e a tensão de recarregamento ( $\sigma_r$ ) apresentou pequenas variações. Como a deformação aplicada (0,3) é maior que a deformação crítica (0,06) para início da recristalização dinâmica nessa temperatura, pode-se inferir que a recristalização se inicia no primeiro passe e continua no intervalo entre passes caracterizando a recristalização metadinâmica.

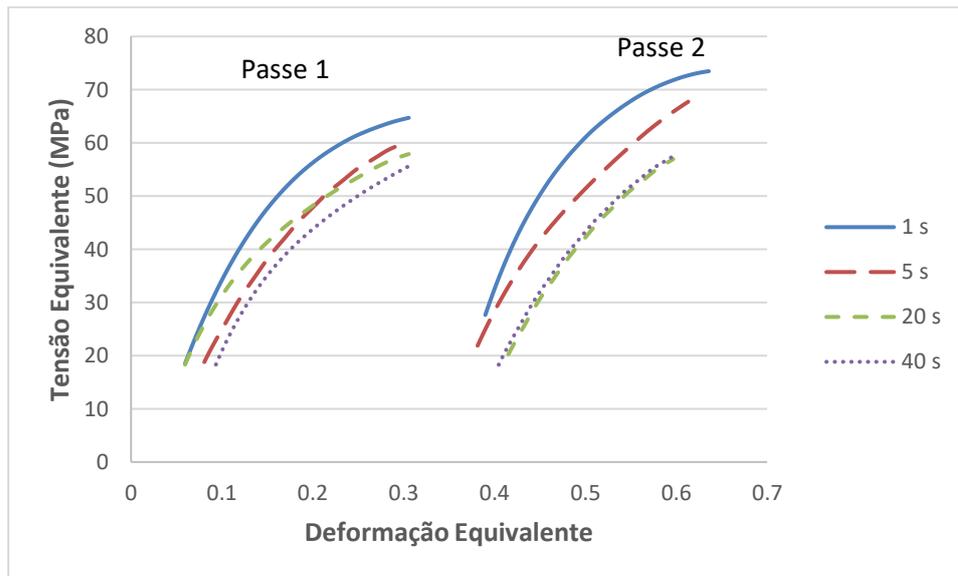


Figura 5 – Curvas de tensão equivalente versus deformação equivalente para parte plástica dos ensaios com duas deformações realizadas a 1100°C, taxa de deformação de 0,1 s<sup>-1</sup>, deformação de 0,3 e tempo entre passes de 1, 5, 20 e 40 s.

De posse dos dados da figura 5 foi feito uma tabela calculando a fração de amaciamento foi calculada conforme visto na tabela 3.

Tabela 3 – Fração de Amaciamento calculado para as curvas de escoamento plástico nos ensaios isotérmicos interrompidos com duas deformações a 1100°C, com duas deformações de 0,3 e taxa de deformação de 0,1 s<sup>-1</sup>.

Ensaio isotérmico com duas deformações de 0,3 e taxa de deformação de 0,1 s <sup>-1</sup>				
Tempo entre passes (tip)	1s	5s	20s	40s
Fração de Amaciamento (%)	78,68%	95,65%	99,09%	100%

Observa que tabela 3 para todos os intervalos entre passes a recristalização foi completa a partir de 5 segundos entre as deformações. Com intervalo de 1 segundo não houve recristalização completa do aço IF, no entanto, o grau de amaciamento do material é superior do que visto na tabela 3. Mostrando que o grau de deformação no aço influencia quanto na taxa de restauração das propriedades mecânicas.

Nota-se que o amaciamento com deformação acima da deformação crítica é bem mais acentuado do que abaixo da deformação crítica, pois o mecanismo de recristalização dinâmica e recuperação dinâmica restaura as propriedades mecânicas do aço IF.

A figura 6 apresenta os resultados da fração de amaciamento para as deformações de 0,06 e 0,30.

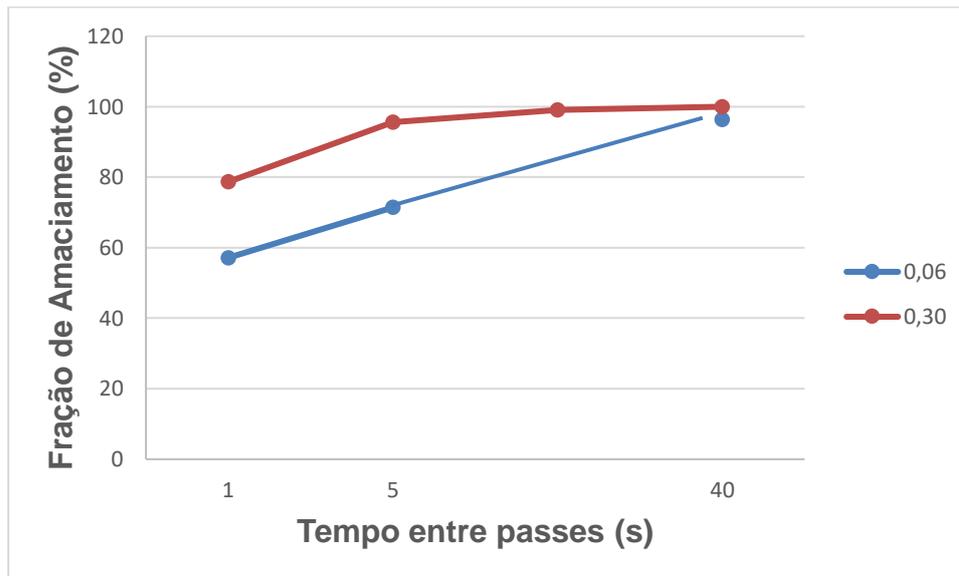


Figura 6 – Gráfico da fração de amaciamento versus o tempo entre passes para os ensaios com duas deformações realizados a 1100°C, taxa de deformação de  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , deformações de 0,06 e 0,30 e tempo entre passes de 1, 5, 20 e 40 s.

Com base no gráfico da figura 6, observa-se que para a deformação de 0,30, maior que a deformação crítica, houve maior amaciamento em todos os intervalos entre passes. Isso mostra que deformações maiores potencializam os mecanismos de restauração para uma mesma temperatura de deformação

## 5.5 METALOGRAFIA DOS ENSAIOS INTERROMPIDOS COM DUAS DEFORMAÇÕES

Foram realizadas análises microestruturais dos corpos de prova após os ensaios com o objetivo de revelar o tamanho de grão austenítico. Nas figuras 7 e 8 é possível verificar as metalografias obtidas.

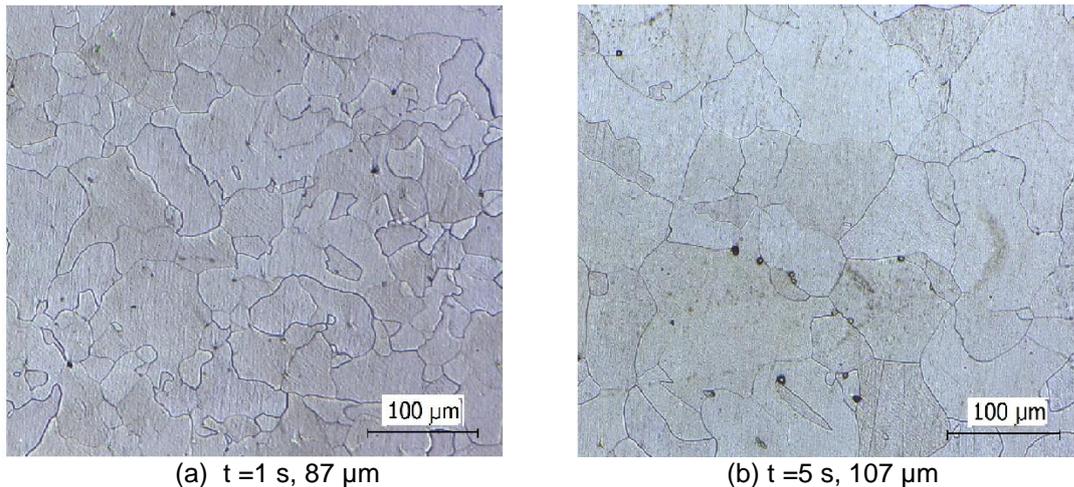
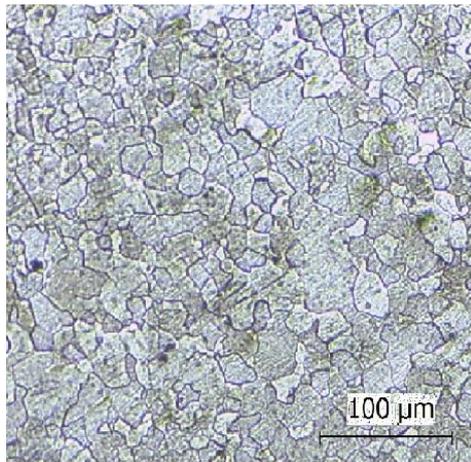


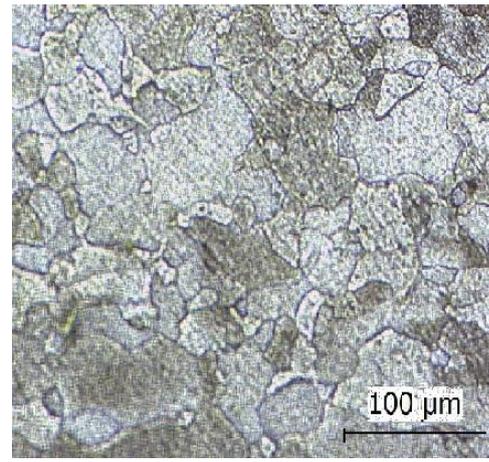
Figura 7 - Metalografia das amostras dos ensaios com duas deformações realizados a 1100°C, taxa de deformação de 0,1 s<sup>-1</sup>, deformação de 0,06 e tempo entre passes de 1 e 5 s (região austenítica): (a) 1 s Aumento de 200X, (b) 5 s Aumento de 200X. Ataque com nital.

Observa-se na figura 7 e a tabela 2, que para uma deformação de 0,06 abaixo da deformação crítica (somente recristalização estática) e com taxa de deformação de 0,1 s<sup>-1</sup>, ocorre aumento do tamanho de grão austenítico com o aumento do tempo entre passe de 1 segundo para 5 segundos. A fração de amaciamento para o intervalo de 5s é em torno de 70% enquanto para intervalo 1s a fração é de 57% o intervalo de tempo explica o crescimento de grão

Para o material que sofreu uma deformação de 0,3, acima da deformação crítica (recristalização dinâmica) e taxa de deformação de 0,1 s<sup>-1</sup>, nota-se na figura 52 que o tamanho de grão austenítico no intervalo de 5 segundos entre passes foi maior do que o obtido para o intervalo de 1 segundo. Observe-se neste caso um maior refino de grão comparado com a figura 8. Isso pode ser explicado pela ocorrência de recristalização dinâmica e deformação maior, conforme mostrado na e tabela 3, seguida de crescimento de grão.



(a) 1s, 47 μm



(b) 5s, 95 μm

Figura 8 - Metalografia das amostras dos ensaios com duas deformações realizadas a 1100°C, taxa de deformação de  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , deformação de 0,3 e tempo entre passes de 1 e 5 s (região austenítica): (a) 1 s - Aumento de 200X, (b) 5 s - Aumento de 200X. Ataque com nital,

Utilizando-se as figuras 7 e 8, foram observados que os mecanismos de restauração do tamanho de grão em deformações acima da crítica (recristalização dinâmica) são mais efetivos do que deformações abaixo da crítica (recristalização estática). Isto foi verificado por meio do crescimento do grão entre passes.

Para tempos de 5 segundos entre passe e deformação 0,30 o grão cresce mais rápido do que na deformação de 0,06. Ou seja, para deformações de 0,30 o crescimento médio do grão entre passes foi de 48 micrometros, enquanto para deformações de 0,06 o crescimento médio foi de 20 micrometros.

#### 4 CONCLUSÃO

1 - As temperaturas críticas de processamento obtidas pelo ensaio de torção quente em resfriamento contínuo,  $T_{nr} = 935^\circ\text{C}$ ,  $Ar_3 = 830^\circ\text{C}$  e  $Ar_1 = 750^\circ\text{C}$  apresentaram valores próximos aos encontrados na literatura.

2 - Para temperaturas acima de  $950^\circ\text{C}$  ( $T_{nr}$ ), o principal mecanismo de restauração é a recristalização dinâmica. Isto foi confirmado através da forma da curva de

escoamento plástico. Abaixo dessa temperatura as curvas o mecanismo restauração foi a recuperação dinâmica

3 – Nos ensaios interrompidos com duas deformações ocorreu amaciamento estático para todos os intervalos entre passes de deformação de 0,06 , abaixo da deformação crítica, e a fração de amaciamento aumentou com o aumento do intervalo entre passes

4 – Para o material que sofreu deformação de 0,30 , acima da deformação crítica (recristalização dinâmica), a recristalização foi completa para todos os intervalos entre passes acima de 20 segundos.

### **Agradecimentos**

Ao IFES pela utilização da máquina de torção, a FAPES por subsidiar a bolsa do mestrado e ao Dr. Marcelo Lucas Pereira Machado pelo apoio e esclarecimento de dúvidas durante a pesquisa.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 Oudin A., EBSD analysis of a Ti-IF steel subjected to hot torsion in the ferritic region, *Materials Science & Engineering*, 2008, pp 72-79
- 2 Hodgson P. D., Grain size effect on the warm deformation behavior of a Ti-IF steel, *Materials Science and Engineering A367*, 2004, pp 282-294.
- 3 Tasca M. R. B., Análise do comportamento mecânico do aço SAE 1518 através de ensaios de torção a quente, *PROPEMM- IFES*, 2013, pp 163
- 4 Callister, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 8. ed. [S.l.]: LTC, 2012.
- 5 Padilha, A. F.; Siciliano JR., F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. *ABM*, n. 3, 2005.