

# AVALIAÇÃO DO AMACIAMENTO DE UM AÇO ESTRUTURAL SAE 4340 UTILIZANDO ENSAIOS DE TORÇÃO A QUENTE<sup>1</sup>

Armando Marques<sup>2</sup>  
Rafael Agrizzi de Souza<sup>3</sup>  
Mario Roberto Bellini Tasca<sup>4</sup>  
Luciana Nogueira<sup>5</sup>  
Marcelo Lucas Pereira Machado<sup>6</sup>

## Resumo

Foram realizados ensaios de torção a quente com dupla deformação em um aço estrutural SAE 4340. A temperatura do ensaio e a taxa de deformação foram mantidas constantes em 1.050°C e 0,2 s<sup>-1</sup> respectivamente, variou-se a deformação aplicada de (0,2 e 0,4) e o tempo entre passes (1 s, 5 s e 40 s). As amostras foram aquecidas até a temperatura de 1.200°C e mantidas nessa temperatura por 180 s (encharque) para completa homogeneização. A seguir foram resfriadas a uma taxa média 1°C/s até a temperatura de deformação. A avaliação das características de amaciamento estático e metadinâmico do material foi feita a partir das curvas de escoamento plástico. Verificaram-se características similares de amaciamento nas duas deformações ensaiadas, com a fração amaciada crescendo com o tempo entre passes e com o aumento da deformação. Observou-se que houve refinamento dos grãos para o material que foi submetido a uma deformação de 0,4.

**Palavras-chave:** Torção a quente; Fração de amaciamento; SAE 4340.

## EVALUATION OF THE SOFTENING OF A STRUCTURAL STEEL SAE 4340 USING THE HOT TORSION TEST

### Abstract

Tests were performed with double hot torsion deformation in structural steel SAE 4340. The test temperature and strain rate were kept constant at 1,050°C and 0.2 s<sup>-1</sup> respectively, was varied to applied strain (0.2 and 0.4) and the time between passes (1 s, 40 s and 5 s). The samples were heated to a temperature of 1,200°C and maintained at this temperature for 180 seconds (soaking) to complete homogenization. The following were cooled at an average rate of 1°C/s until the temperature of deformation. Evaluation of the softening characteristics of the static and metadynamic material were made from plastic flow curves. There have similar softening characteristics on both strains tested, with the softened fraction increasing with time between passes and with increasing deformation. It was observed that there refinement of grain to material that has been subjected to a deformation of 0.4.

**Key words:** Hot torsion; Fraction of softening; SAE 4340.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Mecânico; Prof. Coordenadoria do Curso Técnico em Mecânica; Aluno do Programa de Pós-Graduação em Eng. Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal de Educação do Espírito Santo (IFES), Vitória, ES, Brasil.

<sup>3</sup> Eng. Mecânico; Mestrando em Eng. Metalúrgica e de Materiais, IFES, Brasil.

<sup>4</sup> Eng. de Materiais. Mestrando em Eng. Metalúrgica e de Materiais, IFES, Brasil.

<sup>5</sup> Bolsista de Iniciação Científica e Estudante do Curso de Eng. Metalúrgica, IFES, Brasil.

<sup>6</sup> Prof. Dr. e Titular, Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, IFES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Em busca da melhoria da qualidade e da redução dos custos de produção, e visando uma melhor competitividade no mercado da indústria metalúrgica, diversos processos de fabricação de materiais têm sido bastante estudados.<sup>(1)</sup>

Atualmente nos processos de laminação existe a preocupação não apenas na redução da seção do material, mas também na sua microestrutura, pois a mesma vai conferir ao produto final suas principais propriedades mecânicas. E desta forma o conhecimento dos mecanismos que atuam durante o processo de laminação a quente é de suma importância para a melhoria da qualidade do produto final, bem como para a elaboração de melhores tempos entre passes. E para isso é importante compreender a relação entre o endurecimento e o amaciamento durante a deformação.<sup>(2)</sup>

Quando um material é deformado a quente, além dos aspectos relacionados à resistência mecânica e a ductilidade, ocorrem também variações microestruturais importantes durante e após o processamento. Estas variações devem ser observadas de forma bastante criteriosa, já que a microestrutura final dos aços é um dos principais fatores que irá determinar seu comportamento mecânico.<sup>(1)</sup>

Um dos obstáculos para realização destes estudos esta na dificuldade de se montar uma planta piloto ou interromper a produção para realização dos testes. Uma técnica experimental capaz de reproduzir estas condições processamento e que permite investigar os mecanismos que estão operando é o ensaio de torção a quente, por meio das curvas de escoamento plástico e do acompanhamento microestrutural.<sup>(3)</sup>

O ensaio de torção a quente favorece a análise do material sob deformação, permitindo realizar sequências de passes impondo parâmetros de processamento tais como a temperatura de reaquecimento, taxa de resfriamento, quantidade de deformação, taxa de deformação e o tempo de espera entre passes. Observa-se que os corpos de prova podem sofrer grandes deformações e permitem várias etapas de deformação sem que o teste seja interrompido.<sup>(2,3)</sup>

O aço SAE 4340 é caracterizado como um aço para beneficiamento apresentando alta temperabilidade e a capacidade de alcançar elevada resistência em grandes seções. No estado de temperado e revenido, pode alcançar limite de resistência de até 1.000 MPa. Suas principais aplicações são virabrequins, engrenagens, bielas e eixos sujeitos a grandes esforços.<sup>(4)</sup>

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o fenômeno de amaciamento do aço estrutural SAE 4340 utilizando ensaios de torção a quente com duas deformações e diferentes tempos entre passes. Estes ensaios revelaram que, de fato, houve amaciamento para as duas condições analisadas.

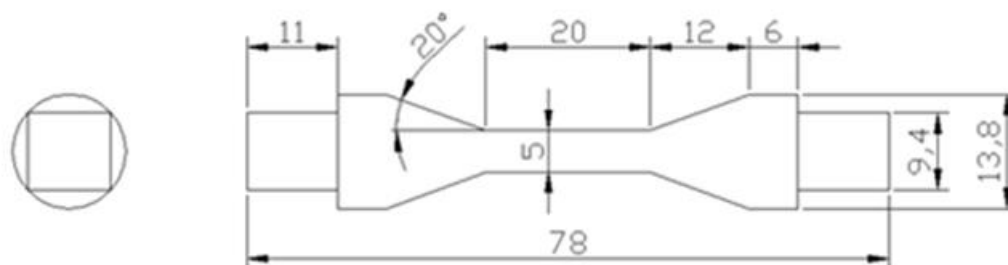
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado o aço estrutural comercial do tipo SAE 4340, cuja composição química está apresentada na Tabela 1. A análise química foi realizada utilizando um espectrômetro Oxford Instruments, modelo Foundry-Master Pro do laboratório de redução do IFES.

**Tabela 1.** Composição química do aço SAE 4340 (% em peso)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni
0,4330	0,7100	0,0129	0,0181	0,2320	0,7310	0,2410	1,6500

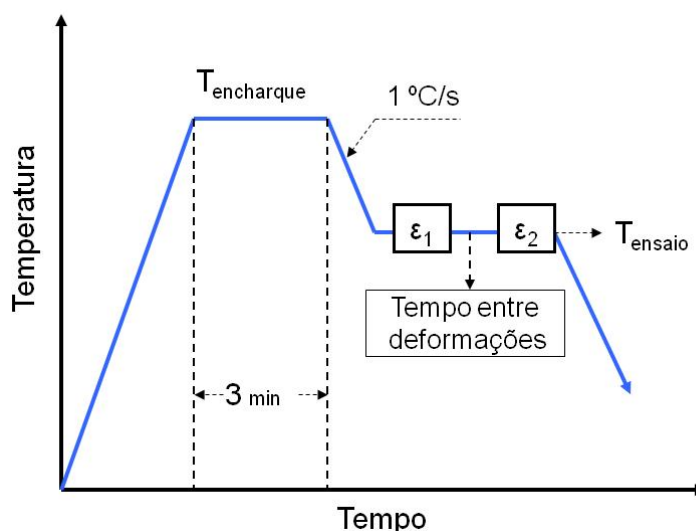
Corpos de prova de torção com diâmetro útil de 5 mm e comprimento útil de 20 mm, foram usinados a partir de barras cilíndricas de 15,88 mm (Figura 1). O dimensionamento dos corpos de prova, diâmetro e comprimento úteis, foram otimizados para atender à capacidade de máximo torque do equipamento de torção e, assim, obter maiores taxas de deformação.



**Figura 1.** Desenho esquemático do corpo de prova.

Os ensaios foram realizados utilizando-se uma máquina horizontal de torção a quente Instron, modelo 55MT do laboratório de conformação mecânica do IFES. Para evitar a corrosão, as amostras foram colocadas dentro de um tubo de quartzo com uma pressão positiva de gás Argônio durante o aquecimento por indução. O tubo de quartzo também permite a injeção de gás CO<sub>2</sub>, responsável pelo tratamento de têmpera dos corpos de prova sem a necessidade de retirá-los da máquina de torção. O controle da temperatura foi monitorado com a utilização de um termopar do tipo K (Cromel-Alumel) que foi inserido em um furo na extremidade do corpo de prova localizado logo após a seção útil.

Para investigar as características de amaciamento entre passes utilizou-se o método de ensaios isotérmicos interrompidos com duas deformações. Esse método consiste em se aplicar, através de ensaios mecânicos de deformação a quente, dois passes sucessivos, normalmente com a mesma quantidade de deformação, geralmente baixa, inferior a 0,3.<sup>(5,6)</sup> A Figura 2 mostra esquematicamente o ciclo termomecânico aplicado no ensaio de dupla deformação.



**Figura 2.** Ilustração esquemática do ciclo termomecânico usado nos ensaios de torção com duas deformações.

Através deste método o parâmetro de amaciamento PA (%), é expresso pela Equação 1.

$$PA(\%) = \frac{\bar{\sigma}_m - \bar{\sigma}_r}{\bar{\sigma}_m - \bar{\sigma}_0} \times 100 \quad (1)$$

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 (recarregamento) (Figura 3).

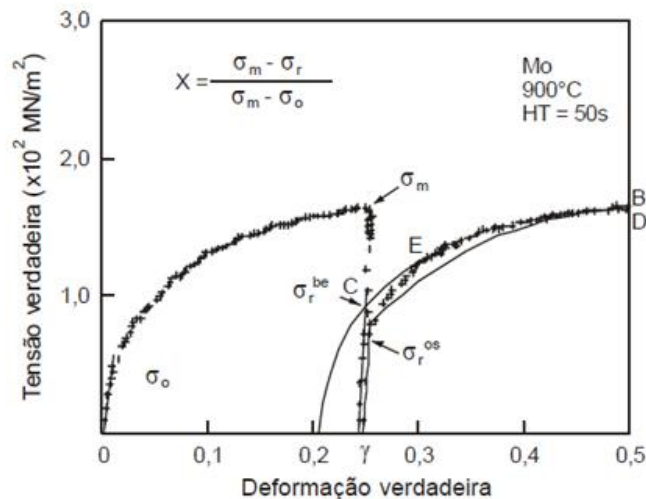
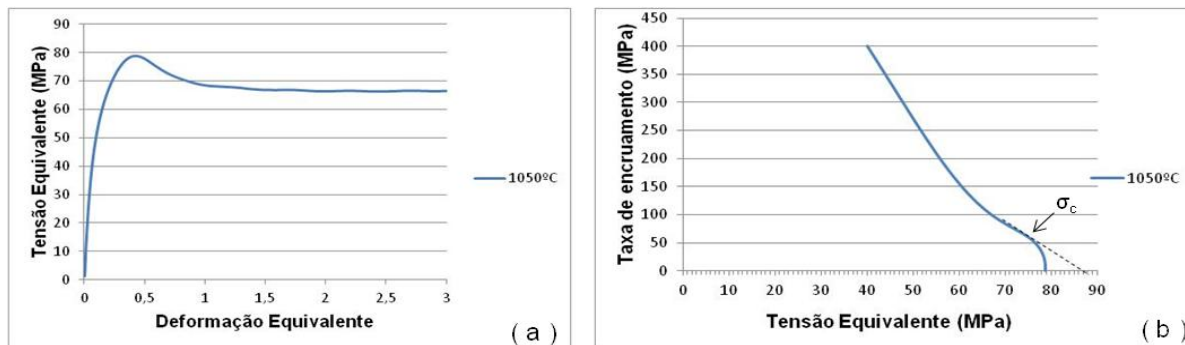


Figura 3. Curvas de escoamento plástico obtidas em ensaio com duas deformações.<sup>(3)</sup>

Como as tensões de fluxo de escoamento ( $\sigma_0$  e  $\sigma_r$ ) são definidas de modo convencional, para um desvio (*off set*) de deformação elástica de 0,2% o método citado é comumente denominado de dupla deformação *off set*.<sup>(7)</sup>

Nesse trabalho foram utilizadas duas metodologias, na primeira foram aplicadas duas deformações sucessivas de ( $\epsilon_1 = 0,2$ ), deformação esta menor que a deformação crítica para início da recristalização dinâmica ( $\epsilon_c = 0,29$ ), com o objetivo de analisar o efeito da recuperação estática entre os passes. Já na segunda, foram aplicadas duas deformações sucessivas ( $\epsilon_1 = 0,4$ ), maior que a deformação crítica para início da recristalização dinâmica ( $\epsilon_c = 0,29$ ), a fim de analisar os efeitos da recristalização metadinâmica entre os passes. Nos dois casos a taxa de deformação foi mantida constante em  $0,2 \text{ s}^{-1}$ .

A deformação crítica para início da recristalização dinâmica ( $\epsilon_c$ ) foi definida por meio da curva taxa de encruamento versus deformação equivalente ( $\theta \times \sigma$ ), onde  $\theta$  é a taxa de encruamento definida pela derivada  $d\sigma/d\epsilon$  e  $\sigma$  a tensão equivalente. No ponto de inflexão da curva ( $\theta \times \sigma$ ) (Figura 4b) se obtém a tensão crítica ( $\sigma_c$ ), pois esta inflexão evidência uma mudança no comportamento onde só acontece a recuperação dinâmica. Com esse valor retorna-se à curva tensão equivalente versus deformação equivalente ( $\sigma \times \epsilon$ ) (Figura 4a), e é obtida a deformação crítica.<sup>(8,9)</sup> Estas curvas foram obtidas através de ensaios isotérmicos contínuos na temperatura de  $1.050^\circ\text{C}$ .



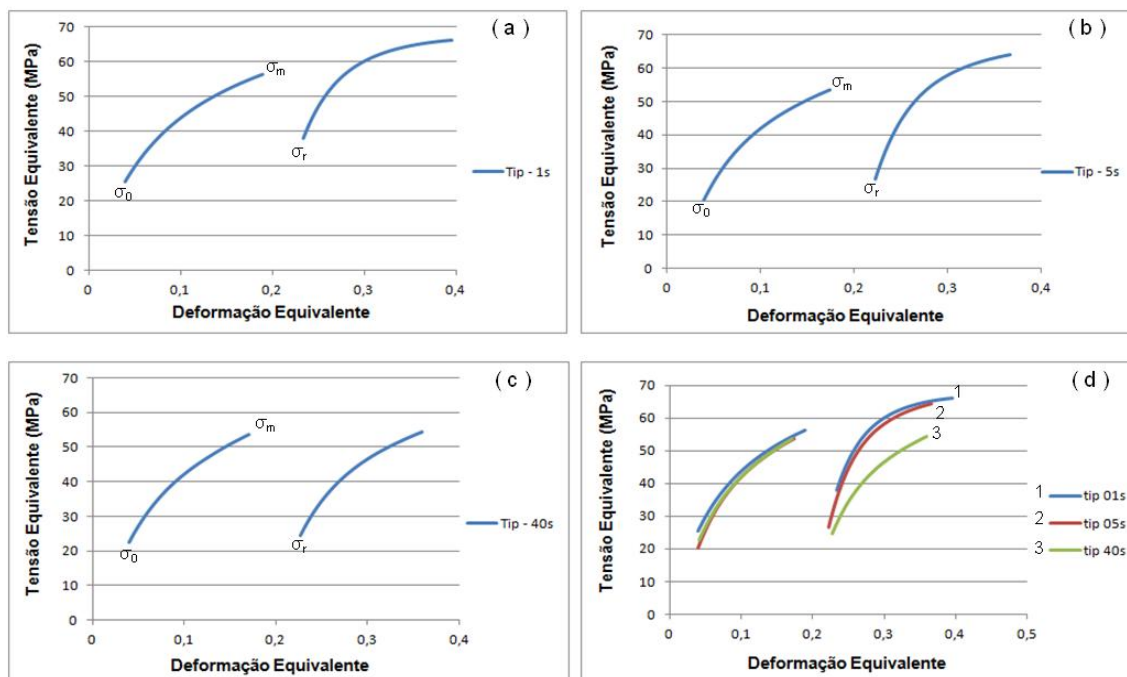
**Figura 4.** Curvas de escoamento plástico obtidas através ensaio de torção a quente: (a) tensão equivalente versus deformação equivalente; e (b) taxa de encruamento versus tensão equivalente.

Os corpos de prova foram aquecidos até 1.200°C a uma taxa média de 2°C/s, e mantidos nessa temperatura durante 3 minutos, em seguida resfriados até a temperatura de ensaio a uma taxa média de 1°C/s e mantidos nesta temperatura por 1 minuto para eliminação dos gradientes térmicos antes do início da deformação. A temperatura de ensaio foi mantida constante em 1.050°C, e o tempo entre passes variando em intervalo de 1 s, 5 s, e 40 s.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada ensaio foram obtidas as curvas de escoamento plástico que podem ser vistas nas Figuras 5 e 6.

Com base nas curvas de escoamento plástico, com deformação abaixo da deformação crítica (Figura 5), observa-se que à medida que o tempo entre passes aumenta, a tensão de recarregamento ( $\sigma_r$ ) diminui. Isto ocorre porque o tempo entre passes é suficiente para que a recuperação e a recristalização estática restaurem o material, provocando assim amaciamento significativo após a deformação a quente.



**Figura 5.** Ensaios isotérmicos com duas deformações realizados a 1.050°C, taxa de deformação 0,2 s<sup>-1</sup>, deformação 0,2 e tempo entre passes ( $t_{ip}$ ) de: (a) 1 s; (b) 5 s; e (c) 40 s. Sendo (d) curva de comparação entre todos os tempos.

Analisando a Figura 5d, observamos que no primeiro passe as curvas de escoamento plástico estão muito próximas, sobrepondo umas as outras tal como deveria ser, pois as condições de deformação foram as mesmas. Na segunda deformação as curvas de escoamento plástico apresentam um decréscimo na tensão para os tempos entre passes maiores, sendo que isto ocorre, pois nesse caso, há tempo suficiente entre os passes para que a recuperação estática restaure o material.<sup>(3)</sup>

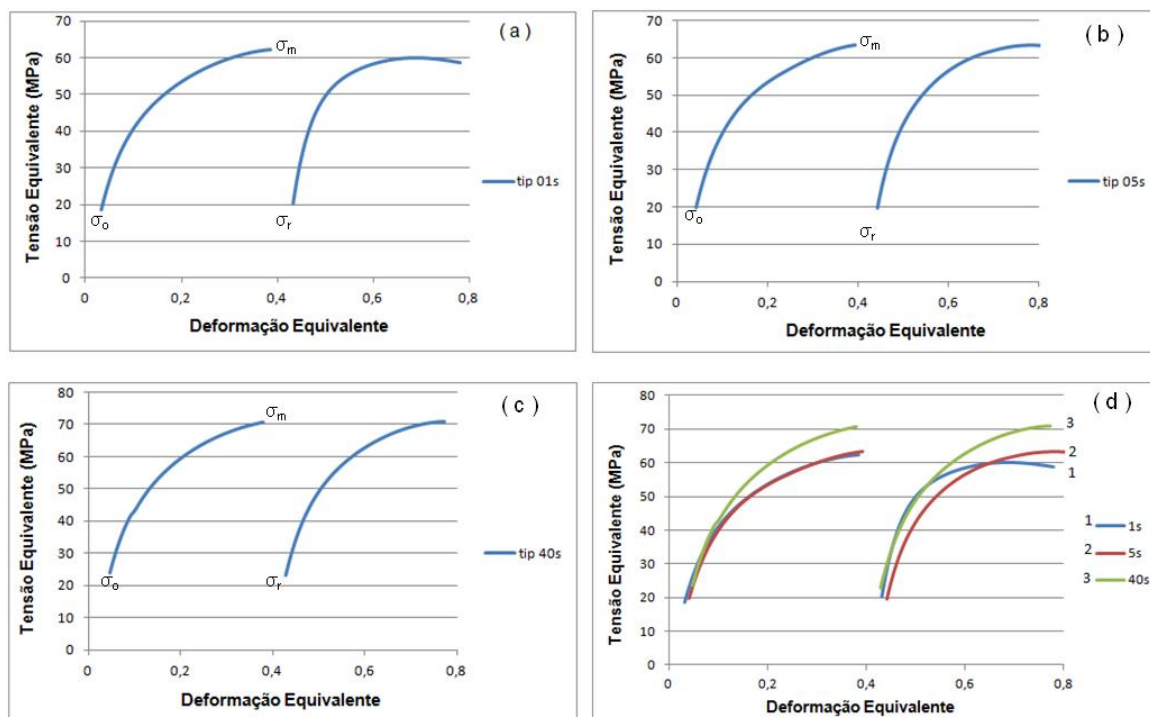
No objetivo de quantificar esta fração de amaciamento entre deformações calculou-se o parâmetro de amaciamento como descrito na Equação 1. A Tabela 2 mostra os valores obtidos para os diferentes tempos entre passes.

**Tabela 2.** Parâmetro de amaciamento PA (%) calculado para as curvas de escoamento plástico nos ensaios de deformação isotérmicos com duas deformações de 0,2 e taxa de deformação de 0,2 s<sup>-1</sup>

Ensaio de deformação isotérmicos a 1.050°C com duas deformações de 0,2 e taxa de deformação de 0,2 s <sup>-1</sup>			
Tempo entre passes (tip)	1 s	5 s	40 s
Parâmetro de amaciamento PA (%)	60	80	94

Estes valores estão de acordo com o que foi observado nas curvas tensão equivalente versus deformação equivalente, podendo ser constatados também em outros trabalhos.<sup>(2,3,7)</sup>

Com base nas curvas de escoamento plástico, com deformação acima da deformação crítica (Figura 6), observa-se que à medida que o tempo entre passes aumenta, tem-se um maior amaciamento do material.



**Figura 6.** Ensaio isotérmicos com duas deformações realizados a 1.050°C, taxa de deformação 0,2 s<sup>-1</sup>, deformação 0,4 e tempo entre passes (tip) de: (a) 1 s; (b) 5 s; e (c) 40 s. Sendo (d) curva de comparação entre todos os tempos.

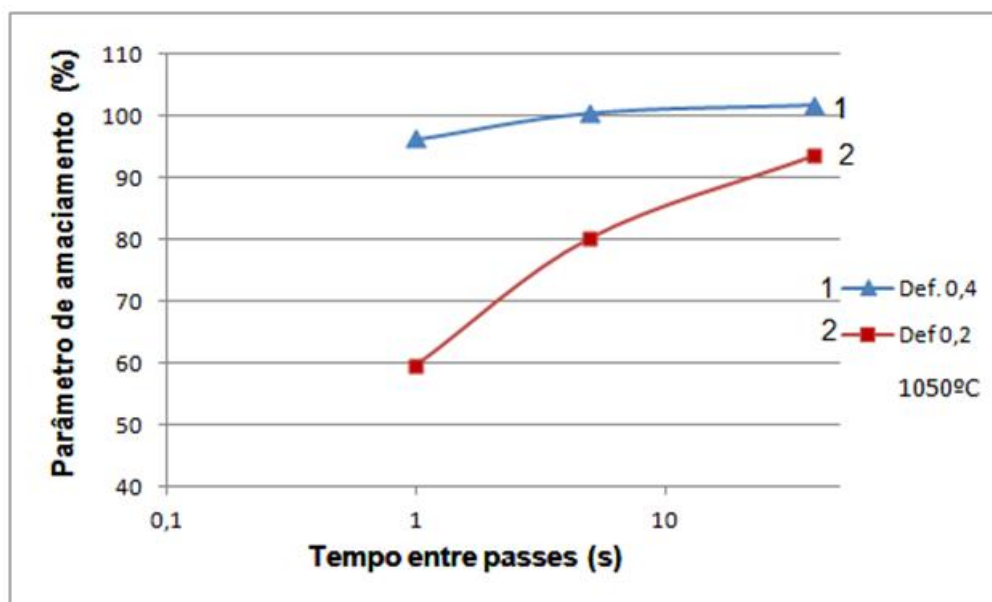
Observa-se na Figura 6d, que as curvas de escoamento plástico para o primeiro passe seguem o mesmo padrão das curvas mostradas na Figura 5d. Na segunda deformação podemos verificar um aumento da tensão à medida que o tempo entre passes aumenta. Para todos os tempos entre passes houve amaciamento do material e a tensão de recarregamento ( $\sigma_r$ ) apresentou pequenas variações. Como a deformação utilizada no ensaio (0,4) é maior que a deformação crítica para início da recristalização dinâmica (0,29) para essa temperatura, pode-se inferir que a recristalização dinâmica se inicia no primeiro passe, e no intervalo entre passes tem-se a recristalização metadinâmica.

Para quantificar a fração de amaciamento entre deformações foi calculado o parâmetro de amaciamento como descrito na Equação 1. A Tabela 3 mostra os valores obtidos para os diferentes tempos entre passes.

**Tabela 3.** Parâmetro de amaciamento PA (%) calculado para as curvas de escoamento plástico nos ensaios de deformação isotérmicos com duas deformações de 0,4 e taxa de deformação de  $0,2\text{ s}^{-1}$

Ensaio de deformação isotérmicos a $1.050^\circ\text{C}$ com duas deformações de 0,4 e taxa de deformação de $0,2\text{ s}^{-1}$			
Tempo entre passes (tip)	1 s	5 s	40 s
Parâmetro de amaciamento PA (%)	96	100	100

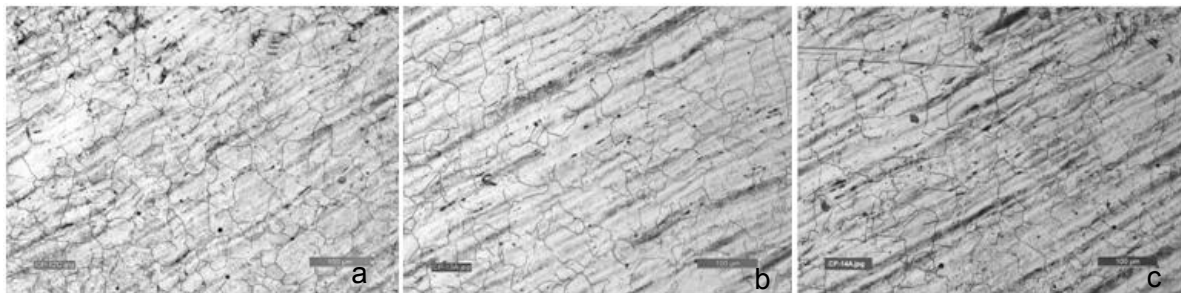
A Figura 7 apresenta os resultados da fração de amaciamento para as deformações de 0,2 e 0,4. Com base nas curvas apresentadas nesse gráfico, fica evidente que a deformação tem um efeito significativo no amaciamento do material e que a recristalização dinâmica é muito mais efetiva do que a estática para uma mesma temperatura de deformação.



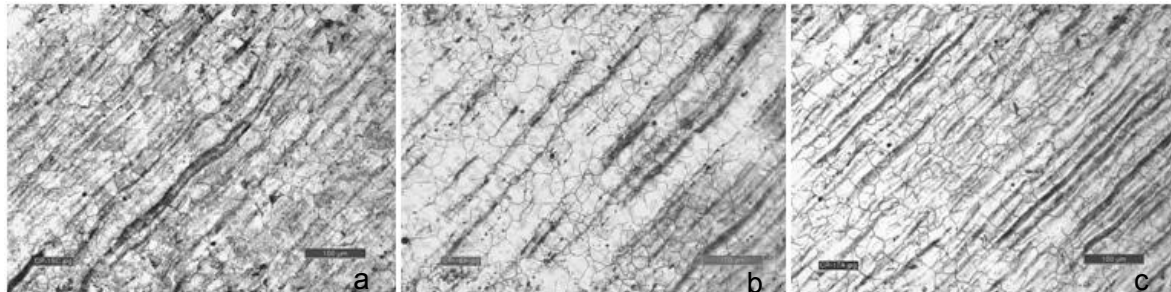
**Figura 7.** Gráfico do parâmetro de amaciamento versus tempo entre passes para temperatura de  $1.050^\circ\text{C}$ , deformação 0,2 e 0,4 e taxa de deformação de  $0,2\text{ s}^{-1}$ .

Após os ensaios, os corpos de prova foram resfriado rapidamente com  $\text{CO}_2$ , com o objetivo de revelar o tamanho do grão austenítico. O ataque químico foi feito por meio de uma solução aquosa de ácido pícrico contendo 1% de HCl aquecido entre

85° e 90°, o tempo de ataque variou de 60 s a 120 s. Nas Figuras 8 e 9, é possível observar as metalografias feitas nos corpos de prova após a deformação de 0,2 e 0,4 respectivamente.



**Figura 8.** Microestrutura do aço SAE 4340 deformado em ensaio isotérmico interrompido com duas deformações, temperatura de deformação 1.050°C, deformação 0,2, taxa de deformação 0,2 s<sup>-1</sup> e tempo entre passes: (a) 1 s; (b) 5 s; e (c) 40 s.



**Figura 9.** Microestrutura do aço SAE 4340 deformado em ensaio isotérmico interrompido com duas deformações, temperatura de deformação 1.050°C, deformação 0,4, taxa de deformação 0,2 s<sup>-1</sup> e tempo entre passes: (a) 1 s; (b) 5 s; e (c) 40 s.

Analisando a Figura 8, para uma deformação de 0,2 é possível observar uma tendência de crescimento dos grãos com o aumento do tempo entre passes, evidenciando que houve apenas amaciamento estático durante os intervalos. Isto confirma os resultados apresentado na Tabela 2, onde podemos observar um aumento no valor do parâmetro de amaciamento para os tempos entre passes maiores.

Para o material que sofreu uma deformação de 0,4 (Figura 9), acontece o contrário. Pode-se observar que há uma tendência de refinamento do grão à medida que o tempo entre passes aumenta, tal fato se justifica, pois o material sofreu uma deformação acima da deformação crítica e se recristalizou dinamicamente no primeiro passe e continuou a se recristalizar metadinamicamente. Como em todos os tempos entre passes o amaciamento foi maior que 95%, houve recristalização total do material. Pode-se concluir que o aumento da tensão vista na Figura 6, foi provocado pelo refinamento dos grãos do material.

#### 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho ensaios de torção a quente com duas deformações foram feitos com o objetivo de determinar o parâmetro de amaciamento do aço estrutural SAE 4340. Nesse sentido, a partir da análise das curvas de escoamento plástico obtidas nestes ensaios, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- o material que foi submetido a uma deformação de 0,2, se recuperou estaticamente nos intervalos entre os passes. Enquanto que com uma



deformação de 0,4 houve recristalização dinâmica durante a deformação e recuperação metadinâmica nos intervalos entre os passes;

- houve amaciamento do material nas duas condições de ensaio. No entanto a fração de amaciamento cresceu com a deformação e o tempo entre passes;
- a cinética de amaciamento metadinâmico é mais rápida do que a estática, isto pode ser visto na Figura 7; e
- para o material que sofreu deformação de 0,4, houve refinamento dos grãos.

Assim, conclui-se que o aço estudado possui boa capacidade de amaciamento entre passes durante sua laminação industrial.

## REFERÊNCIAS

- 1 GEITTENS, A. R. **Análise do comportamento mecânico de um aço carbono processado na região intercrítica**. São Paulo: UFSCAR, 2001.
- 2 CHO, S. H.; YOO, C. Y. Hot rolling simulations of austenitic stainless steel. **Journal of Materials Science**, v. 36, p. 4267-4272, Abril 2001.
- 3 REGONE, W. **Simulação da laminação a quente de um aço livre de intersticiais (IF) através de ensaio de torção**. São Paulo: UFSCAR, 2001.
- 4 AÇOS VILLARES. Manual de produtos para construção Mecânica:aços para beneficiamento, n. 2<sup>a</sup>, 1991.
- 5 KILBER, J.; SCHINDLER, I. Recrystallization/precipitation behaviour in microalloyed steels. **Journal of Materials Processing and Technology**, v. 60, n. 1, p. 597-602, jun 1996.
- 6 ANDRADE, H.L.; JONAS, J.J. Effect of molybdenum, niobium and vanadium on static recovery and recrystallization on solute strengthening in microalloyed steels. **Metallurgical Transactions A**, v. 14A, n. 10, p. 1967-77, Oct 1983.
- 7 MARRA, K. M.; FUZESSY DE MELO, T. M. Avaliação do amaciamento estático a quente e a morno de um aço silicioso. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 46-50, jul.-set. 2008.
- 8 PADILHA, A. F.; SICILIANO JR, F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. 3<sup>o</sup>. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- 9 M. SHABAN, B. EGHBALI. Determination of critical conditions for dynamic recrystallization of a microalloyed steel. **Materials Science and Engineering**, v. 527, p. 4320-4325, junho 2010.