

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA TAXA DE DEFORMAÇÃO EM UM AÇO ESTRUTURAL SAE 4340 E SAE 1518 UTILIZANDO ENSAIOS DE TORÇÃO A QUENTE¹

Luciana Nogueira²
 Mariana Bertoneceli Silva²
 Helder Keitaro Ambo²
 Marcelo Lucas Pereira Machado³
 Armando Marques⁴
 Mario Roberto Bellini Tasca⁵

Resumo

Foram feitos corpos de prova dos aços SAE 4340 e SAE 1518 e os submetemos a ensaios na máquina de torção a quente do Instituto Federal do Espírito Santo. Aqueceram-se até uma temperatura de 1200°C e mantidas nessa temperatura por 3 minutos, para homogeneização depois resfriaram-se a uma taxa de 1°C/s até a temperatura de deformação. Utilizou-se duas metodologias, primeiro a temperatura foi mantida constante em 1100°C e a taxa de deformação variou, e depois a taxa de deformação manteve-se constante e a temperatura variou. O objetivo foi avaliar a tensão de escoamento média do material, o cálculo da fração de amaciamento de modo a relacionar as influências dos parâmetros termomecânicos que ocorrem durante o processo de deformação a quente; tais como: recristalizações estática e dinâmica, tensão de escoamento e microestrutura.

Palavras-chave: Torção a quente; Laminação; Fração de amaciamento.

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND STRAIN RATE ON A STRUCTURAL STEEL SAE 4340 AND SAE 1518 USING A HOT TORSION TEST

Abstract

It's made specimens of steels SAE 4340 and SAE 1518 that underwent tests on the hot torsion testing equipment in the Federal Institute of Espírito Santo. Those specimens were heated until 1200°C and keeping at this temperature for 3 minutes to alloyed homogenization. After this they were cooled at a rate of 1°C/s until the test temperature. Two methods were used, on the first one; the temperature was kept at 1100°C and changed the strain rate, and after the strain rate was keep constant and changed the temperature. The aim is to assess the mean flow stress of the material, calculate the fractional softening and then relate those with the influence of thermomechanical parameters that occur during the hot forming; such as: static and dynamic recrystallization, mean flow stress and microstructure.

Key words: Hot torsion; Fractional softening; Rolling mill.

¹ Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.

² Bolsista de Iniciação Científica e Estudante do Curso de Eng. Metalúrgica do IFES

³ Professor Doutor e Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica – IFES

⁴ Engenheiro Mecânico. Professor da Coordenadoria do Curso Técnico em Mecânica. Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do IFES, Vitória-ES

⁵ Engenheiro de Materiais. Aluno de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica -IFES, Vitória-ES

1 INTRODUÇÃO

Os principais processos industriais de conformação a quente são a laminação, a extrusão e o forjamento. Esses processos podem ser caracterizados em termos das variáveis relevantes à simulação por torção a quente sendo essas, em geral, a temperatura, a deformação, a taxa de deformação e o tempo entre deformações.⁽¹⁾

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. A etapa de acabamento, durante o processo de laminação de tiras a quente é realizada com curtos tempos de espera entre passes. Sendo o intervalo entre passes pequenos, a recristalização estática poderá não se completar, podendo ter o acúmulo de deformação de um passe para o outro e, conseqüentemente, o processo passa a ser controlado pela recristalização dinâmica ou metadinâmica. Uma técnica experimental capaz de reproduzir estas condições de processamento e que permite investigar os mecanismos que estão operando é o ensaio de torção a quente, através das curvas de escoamento plástico e do acompanhamento microestrutural. Com ensaios de torção a quente pode-se realizar seqüências de passes impondo parâmetros de processamento tais como a temperatura de reaquecimento, a taxa de resfriamento, a quantidade de deformação, a taxa de deformação e o tempo de espera entre passes.

Analisando a evolução da curva de escoamento plástico em conjunto com observações microestruturais pode-se determinar o mecanismo de amaciamento dominante em cada uma das etapas de processamento, permitindo assim, determinar os eventos característico da laminação a quente e projetar seqüências de deformações que aperfeiçoam o processamento.⁽²⁾

A laminação é um exemplo de trabalho mecânico a quente, sendo uma etapa de extrema importância, pois é através dela que se obtêm as formas adequadas dos produtos em aço para uso comercial (chapas, perfis, barras).⁽³⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material Utilizado

Foi utilizado um aço do tipo SAE 4340 e do tipo SAE 1518, cujas composições químicas estão apresentadas no Quadro 1 seguinte. A análise química foi realizada utilizando um espectrômetro *Oxford Instruments*, modelo *Foundry-Master Pro* do laboratório de redução do IFES.

Quadro 1 – Composição química do aço SAE 4340 e do aço SAE 1518

	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Mo	%Ni	%Al	%Cu
SAE 4340	0,4330	0,7100	0,0129	0,0181	0,2320	0,7310	0,2410	1,6500	-	-
SAE 1518	0,2080	1,2480	-	-	0,1870	0,0760	0,0130	0,0380	0,0420	0,0640

2.2 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova de torção foram usinados a partir de barras cilíndricas de 15,88mm, com diâmetro útil de 5mm e comprimento útil de 20mm, como representado na 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.

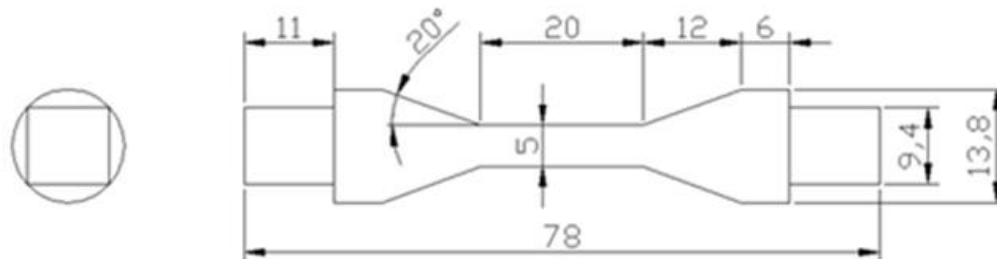


Figura 1 - Desenho esquemático do corpo de prova.

2.3 Experimentos

Todos os ensaios foram realizados utilizando-se uma máquina horizontal de torção a quente INSTRON, modelo 55MT do laboratório de conformação mecânica do IFES. Colocou-se um tubo de quartzo de aproximadamente 40 mm com injeção de argônio e gás CO₂ para criar uma atmosfera inerte durante o ensaio, ocasionar o tratamento térmico de têmpera e evitar a corrosão do corpo de prova. Colocou-se uma bobina de cobre com forno de indução em volta do tubo de quartzo para que a temperatura no corpo de prova seja mais homogênea e o controle de temperatura foi feita através de um termopar do tipo K (Cromel-Alumel) inserido na extremidade do corpo de prova, minimizando quaisquer erros do ensaio.

Foram realizados dois experimentos: ensaios isotérmicos e contínuos e ensaios isotérmicos interrompidos com duas deformações.

2.3.1 Ensaios isotérmicos e contínuos

Aqueceram-se os corpos de prova até a temperatura de 1.200°C a uma taxa média de 2°C/s, e mantidos nesta temperatura por um período de 3 minutos, a seguir resfriados com uma taxa média de 1°C/s até a temperatura de ensaio e mantidos nesta temperatura por 1 minuto para eliminação dos efeitos de gradientes térmicos antes do início da deformação.

A taxa de deformação utilizada foi de 0,2s⁻¹, e deformação máxima de 3, com as temperaturas de ensaio decrescendo de 1.150°C à 800°C em intervalos de 50°C. Após a deformação as amostras foram temperadas utilizando gás CO₂, com o objetivo de congelar o tamanho do grão austenítico para análise microestrutural.

2.3.2 Ensaios isotérmicos interrompidos com duas deformações

Para se descobrir o que ocorre nos intervalos entre os passes na conformação mecânica, é feito ensaios isotérmicos interrompidos com duas deformações.

Os ensaios foram interrompidos após uma deformação ($\epsilon = 0,2$) menor do que a deformação crítica obtida no ensaio de torção a quente que foi de 0,24 ($\epsilon_c=0,24$) para o aço SAE 4340 e de 0,35 ($\epsilon_c=0,35$) para o aço SAE 1518, visando observar os efeitos das recristalizações estáticas.

Os corpos de prova foram aquecidos até 1200°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 1050°C e tempo entre passes variando em intervalo de 1, 5, e 40 para o aço SAE 4340 e com taxa de deformação de 0,4 s⁻¹ e tempos de espera entre passes de 1 segundo, 5 segundos e 15 segundos e temperatura de 850°C para o aço SAE 1518.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio Isotérmicos Contínuos

As condições de realização destes ensaios foram descritas no item 2.3.1. As curvas de escoamento plástico são representadas em dois gráficos, um representando os ensaios com diferentes taxas de deformação e temperatura constante (Figuras 3 e 4) e outro com diferentes temperaturas e taxa de deformação constante (Figuras 5 e 6).

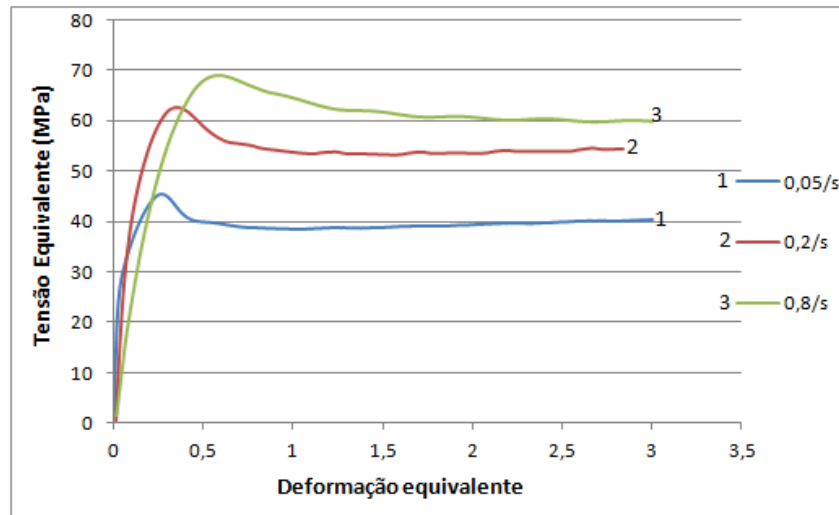


Figura 3: Gráfico dos ensaios isotérmicos na temperatura de 1100°C com diferentes taxas de deformação para o aço SAE 4340.

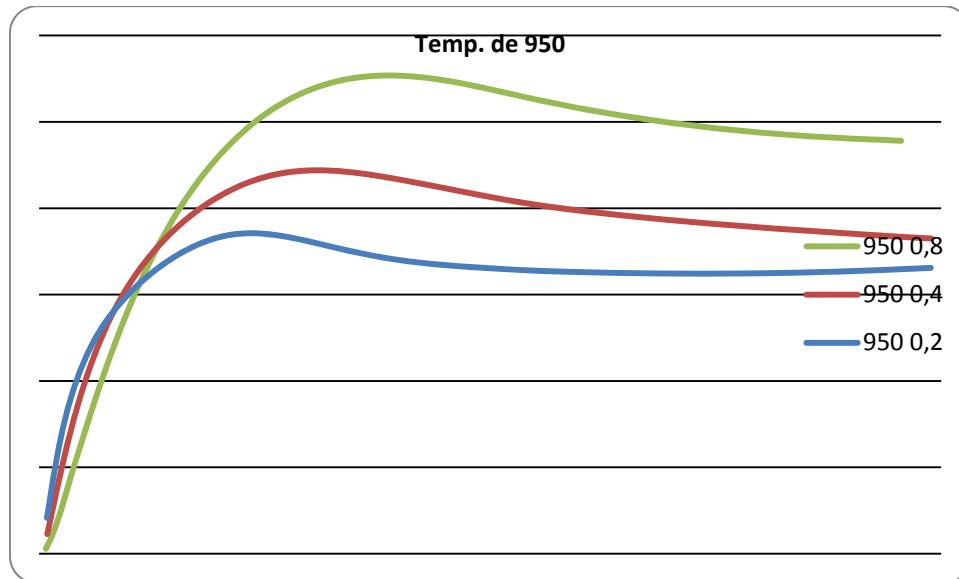


Figura 4: Gráfico dos ensaios isotérmicos 950°C com diferentes taxas de deformação para o aço SAE1518.

Observa-se nas Figuras 3 e 4 que as curvas de tensão equivalente em função da deformação equivalente para uma temperatura de 950°C apresentam um comportamento típico de materiais que se recristalizam dinamicamente, ou seja, a tensão aumenta com a deformação até atingir um pico caindo logo a seguir até um estado estacionário. Quanto maior for a taxa de deformação maior será a tensão de pico e também há um deslocamento nas curvas para a direita. Este comportamento pode ser observado em estudos realizados para outros aços através de ensaios de torção.⁽⁴⁻⁶⁾

Na Figura 5 pode-se ver um aumento da tensão de pico a medida que a temperatura decresce, e mostra similaridade com outros estudos realizados através de ensaio de torção a quente.^(2,5,7) Este é um comportamento esperado visto que a densidade e distribuição de discordâncias, assim como a energia armazenada na deformação são fatores que dependem diretamente da temperatura durante a deformação do metal.⁽⁷⁻⁹⁾ Com o decréscimo da temperatura a mobilidade das discordâncias diminui, causando o aumento da tensão e um deslocamento das curvas para a esquerda mostrando que existe um encruamento mais fácil do material.

Vê-se que para as temperaturas menores que 900°C, o comportamento das curvas de escoamento plástico apresentam uma forma particular, inicialmente ocorre um endurecimento brusco em um curto período de deformação até atingir um pico de tensão. Ocorrendo em seguida uma diminuição contínua na tensão, sendo esta uma região de amaciamento dinâmico sem a presença do estado estacionário.

Para as temperaturas maiores que 950°C, observa-se que as curvas de escoamento plástico apresentam um comportamento típico de materiais que se recristalizam dinamicamente. Inicialmente há um aumento da tensão de escoamento plástico com a deformação até atingir um valor de pico, e em seguida ocorre uma diminuição da tensão até um estado estacionário.

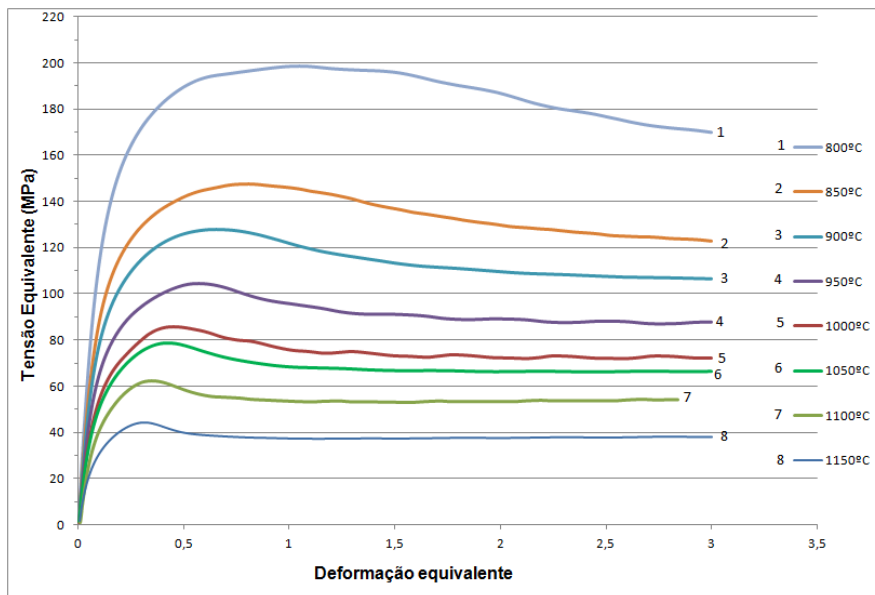


Figura 5: Diferentes temperaturas são representadas e a taxa de deformação constante para o aço SAE 4340.

3.2 Ensaios Isotérmicos Interrompidos Com Duas Deformações

Nestes ensaios, as amostras foram aquecidas até 1200°C e mantidas nesta temperatura por 3 minutos e resfriadas continuamente a 1°C/s até a temperatura de ensaio, onde eram ensaiadas isotermicamente com duas deformações consecutivas, de acordo com o descrito no item 2.3.2.

Foram realizados ensaios com deformação de 0,2 abaixo da deformação crítica para recristalização dinâmica. A deformação foi mantida nos dois passes, com taxa de deformação de 0,2 s⁻¹ e tempos de espera entre passes de 1 segundo, 5 segundos e 40 segundos e temperatura de 1050°C para o aço SAE 4340 e com taxa de deformação de 0,4 s⁻¹ e tempos de espera entre passes de 1 segundo, 5 segundos e 15 segundos e temperatura de 850°C para o aço SAE 1518 .

Com este tipo de experimento é possível investigar os fenômenos de amaciamento que ocorrem nos intervalos entre passes em sequências de deformações. A fração de amaciamento que ocorre entre os passes, foi determinada pelo parâmetro de amaciamento PA (%), que é expresso pela equação 1:⁽²⁾

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

Onde σ_m é a tensão na primeira interrupção do teste, σ_0 é a tensão de início de escoamento plástico na primeira deformação e σ_r a tensão na segunda deformação. Para cada ensaio foram obtidas as curvas de escoamento plástico que podem ser vistas nas Figuras 6 e 7.

Observa-se no caso dos ensaios com deformação de 0,2 abaixo deformação crítica, que a tensão de recarregamento da segunda deformação da Figura 6-a (tempo de passe igual a 1s) está muito superior da tensão de recarregamento da primeira deformação para o aço SAE 4340. Já na Figura 6-b (com um tempo de passe maior, 5s), essa diferença diminui, mostrando que o material amaciou mais do que a situação anterior. É visto também uma completa recristalização na figura 6-c, que corresponde a um tempo de passe maior (40s), pois as tensões de

recarregamento tanto na primeira deformação, quanto na segunda deformação, são de mesmo módulo. Esses fenômenos também ocorrem no aço SAE1518, que podem ser vistos nas Figuras 7-a, 7-b. Na Figura 7-c ocorre também uma recristalização completa como na figura 6-c, entretanto o tempo de passe é de 15 s. Por fim, a Figura 6-d compara todos os fenômenos ocorridos no aço SAE 4340 em uma só imagem.

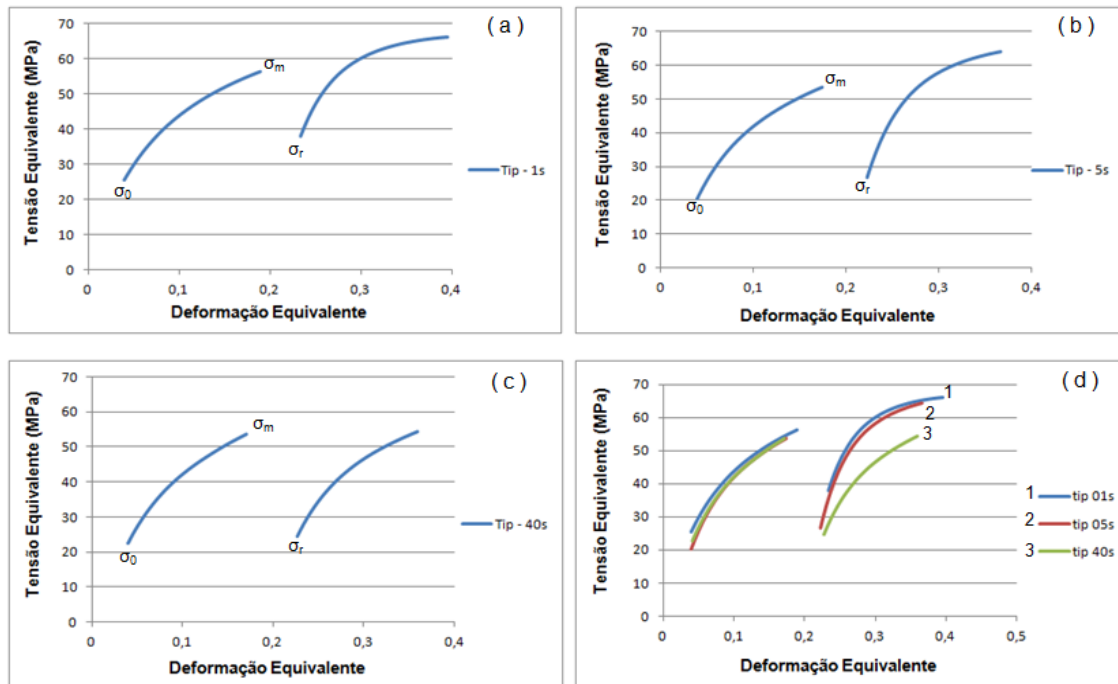


Figura 6: Ensaios isotérmicos com duas deformações realizados a 1050°C do aço SAE 4340, taxa de deformação 0,2 s⁻¹, deformação 0,2 e tempo entre passes (t_p) de: (a) 1s, (b) 5s e (c) 40s. Sendo (d) curva de comparação entre todos os tempos.

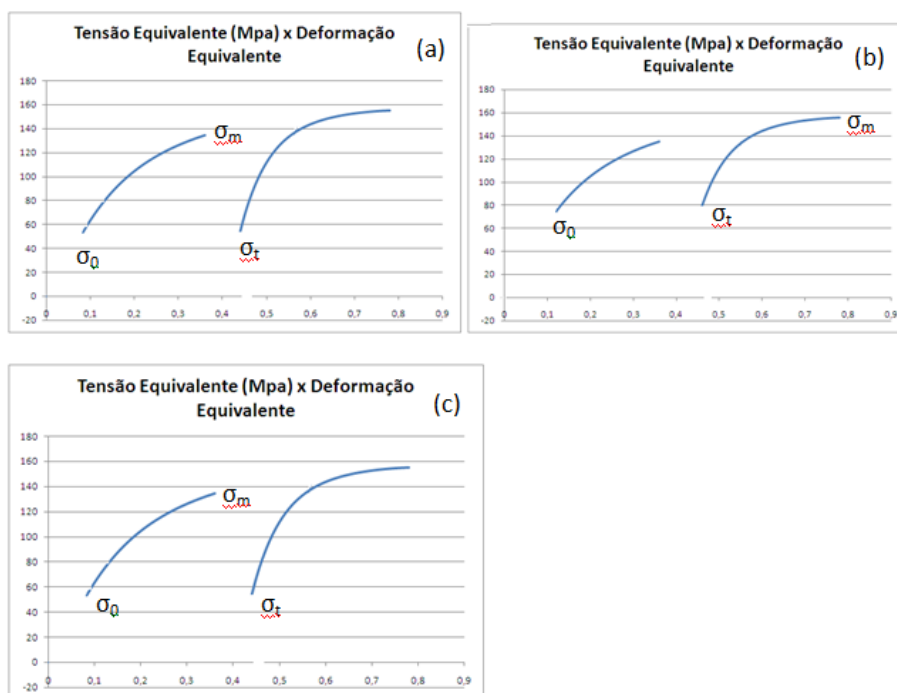


Figura 7: Ensaios isotérmicos com duas deformações realizados a 850°C do aço SAE 1518, taxa de deformação 0,4 s⁻¹, deformação 0,2 e tempo entre passes (t_p) de: (a) 1s, (b) 5s e (c) 15s.

Com base nas curvas de escoamento plástico mostrado nas Figuras 6 e 7, observa-se que à medida que o tempo entre passes aumenta, a tensão de recarregamento (σ_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. Podemos observar ainda que não houve recristalização total, uma vez a fração de recristalização não chegou a 95%.

4 CONCLUSÃO

Nos ensaios isotérmicos e ensaios isotérmicos com dupla deformação dos aços SAE 4340 e SAE 1518 e nos ensaios isotérmicos na temperatura de 1.100° e 950°C respectivamente ambos os materiais recristalizam dinamicamente e foi possível observar um aumento da tensão de pico à medida que a temperatura decresce. Para os ensaios isotérmicos de dupla deformação têm-se que quanto maior o tempo entre passes, menor a tensão de pico dos materiais estudados. Também tem-se que os materiais que foram submetidos a uma deformação de 0,2, se recristalizam estaticamente nos intervalos entre os passes.

REFERÊNCIAS

- 1 BARBOSA, R. **Simulação de processos industriais a partir do ensaio de torção a quente**, Minas Gerais, Brasil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1989.
- 2 REGONE, W. **Simulação da laminação a quente de um aço livre de intersticiais (if) através de ensaios de torção**, São Paulo, FAPESP, 2001.
- 3 FERRAZ, H. **Aço na construção civil**, São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005.
- 4 CHO, S. H.; YOO, C. Y. **Hot rolling simulations of austenitic stainless steel**. *Journal of Materials Science*, v. 36, p. 4267-4272, Abril 2001.
- 5 GEITTENS, A. R. **Análise do comportamento mecânico de um aço carbono processado na região intercrítica**. São Paulo: UFSCAR, 2001.
- 6 BALANCIN, O. **Estudo da Deformação a Quente de um Aço Microligado ao Nióbio por Compressão Plana**, Universidade federal do Rio de Janeiro - UFRJ p. 25, 1981.
- 7 BARCELOS, M. V. **Ensaio de torção a quente em aço estrutural**. Vitória: IFES, 2011.
- 8 PADILHA, A. F.; SICILIANO JR, F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. 3º. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- 9 CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 7º. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.