

EFEITO DAS DEFORMAÇÕES CÍCLICA E MONOTÔNICA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM AÇO LIVRE DE INTERSTICIAIS

Tâmisa Eleutério Silva ⁽¹⁾; Wellington Lopes ⁽²⁾; João Paulo Eleutério Silva ⁽²⁾; Augusto Cesar da Silva Bezerra ⁽²⁾; Elaine Carballo Siqueira Corrêa ⁽²⁾

⁽¹⁾ Gerdau Aços Especiais; ⁽²⁾ CEFET/MG

CEFET/MG - Departamento de Engenharia de Materiais, Av. Amazonas 5253 - Nova Suíça - Belo Horizonte - MG, Brasil, CEP: 30.421-169

E-mail: elaine@deii.cefetmg.br

Resumo

Trabalhos desenvolvidos com diferentes materiais mostraram que seu comportamento mecânico quando submetidos a esforços múltiplos e cíclicos diferencia-se do observado em carregamento monotônico. Nesse contexto, o efeito das deformações cíclica e monotônica, associadas a uma pré-deformação, na dureza e na resistência à compressão foi investigado para o aço livre de intersticiais com tamanhos médios de grão iniciais distintos. Para compreender como tais esforços promovem “amaciamento” e/ou “endurecimento” do aço com tamanhos de grão distintos, foram realizados ensaios de compressão com magnitudes, deformação total e pré-deformações diferentes. Os resultados evidenciaram que, independente da condição de deformação, o aço com menor tamanho de grão apresentou maior resistência mecânica. Observou-se que com deformação monotônica, a resistência mecânica dos materiais se intensifica à medida que a magnitude da deformação aumenta. Entretanto, quando deformados ciclicamente, magnitudes menores, pré-deformações cíclicas e maior número de ciclos levaram ao aumento de dureza e resistência à compressão dos materiais.

Palavras-chave: *aço livre de intersticiais; deformação cíclica; encruamento*

INTRODUÇÃO

Grande parte dos processos de conformação mecânica é realizada a frio, ou seja, a uma temperatura na qual não é possível que ocorra recristalização e/ou recuperação no metal. Quando um material é trabalhado a frio ocorre um aumento na resistência mecânica com a deformação, fenômeno chamado de encruamento ⁽¹⁾.

Para avaliar os fenômenos que ocorrem durante o processamento de um produto e quais as variáveis críticas e de influência associadas a estes fenômenos, é necessário saber qual tipo de carregamento está sendo executado ^(2,3). Diversas vezes, ao processar um material metálico, o esforço aplicado a este é múltiplo, ou seja, o material experimenta durante a conformação mecânica esforços distintos como tração, compressão e cisalhamento. Além de esforços múltiplos, o material pode ser submetido também a esforços cíclicos/ sequenciais, uma vez que processos como, por exemplo, a laminação utilizam várias etapas de deformação sequenciais para atingir seu objetivo final, sendo que nem sempre estas sequências, denominadas passes, são executadas em uma mesma direção no material.

Estudos realizados em materiais metálicos submetidos a esforços múltiplos e cíclicos demonstraram que o comportamento mecânico do metal submetido a estas condições pode divergir daquele esperado quando comparados a condições de solicitações monotônicas ^(4, 5).

O aço livre de intersticiais (aço IF – *interstitial free*) é um metal amplamente empregado na indústria automobilística que, ao passar pelo processo de conformação mecânica, é submetido a deformações de naturezas diversas que podem promover alterações no seu comportamento mecânico em relação àquele previsto nos ensaios monotônicos. Grande parte destas alterações, dependendo do chamado caminho de deformação empregado, estará associada tanto ao fenômeno de encruamento quanto a mecanismos distintos ^(4, 5).

Diante deste contexto, neste trabalho foi avaliada a evolução do encruamento no aço livre de intersticiais (IF), com distintos tamanhos médios de grão, submetidos à deformação cíclica e monotônica em diferentes magnitudes, a fim de verificar como tal processamento mecânico interfere em sua resistência mecânica.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do estudo foi utilizado o aço IF, cuja composição química (%)

em peso) é descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do Aço IF-Ti

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	Nb	N
% em peso	0,005	0,015	0,17	0,015	0,009	0,075	0,050	0,004	0,0014

Corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados por eletroerosão a fio em formato cúbico com 10mm de aresta.

Tratamentos térmicos

O material foi utilizado na condição como recebida (bruta) e na condição recozida. O tratamento térmico de recozimento, realizado em um forno *Brasimet*, foi conduzido na temperatura de 960°C com tempo de encharque de 120 minutos e resfriamento ao forno, tendo sido realizado com a intenção de se obter um tamanho de grão diferente daquele apresentado na condição bruta. Os tamanhos de grão foram analisados posteriormente com auxílio de um software comercial.

Deformação

O processamento mecânico do material por compressão, conduzido em uma em uma máquina *Emic*, foi realizado em corpos de prova cúbicos de 10 milímetros em amostras de ambas as condições de tamanho de grão.

Em termos de deformação monotônica, foram consideradas 4 magnitudes de distintas, sendo elas 5%, 10%; 15% e 30% (Figura 1).

Considerando-se a deformação cíclica, foram estabelecidas três condições distintas (Figura 1). A primeira correspondeu à aplicação de deformação de 5% em cada eixo do corpo de prova, levando a uma deformação total de 15%; a segunda correspondeu à aplicação de uma deformação de 10% em cada um dos três eixos, levando a uma deformação total de 30%; e a terceira correspondeu à deformação de 5% em cada eixo da amostra seguida por uma nova sequência de deformação de 5% em cada eixo da amostra, levando novamente a uma deformação total de 30%.

Por fim, foi realizada uma combinação de 15% de deformação monotônica, seguida de 5% de deformação em cada eixo da amostra, totalizando 30%, conforme indicado na Figura 1.

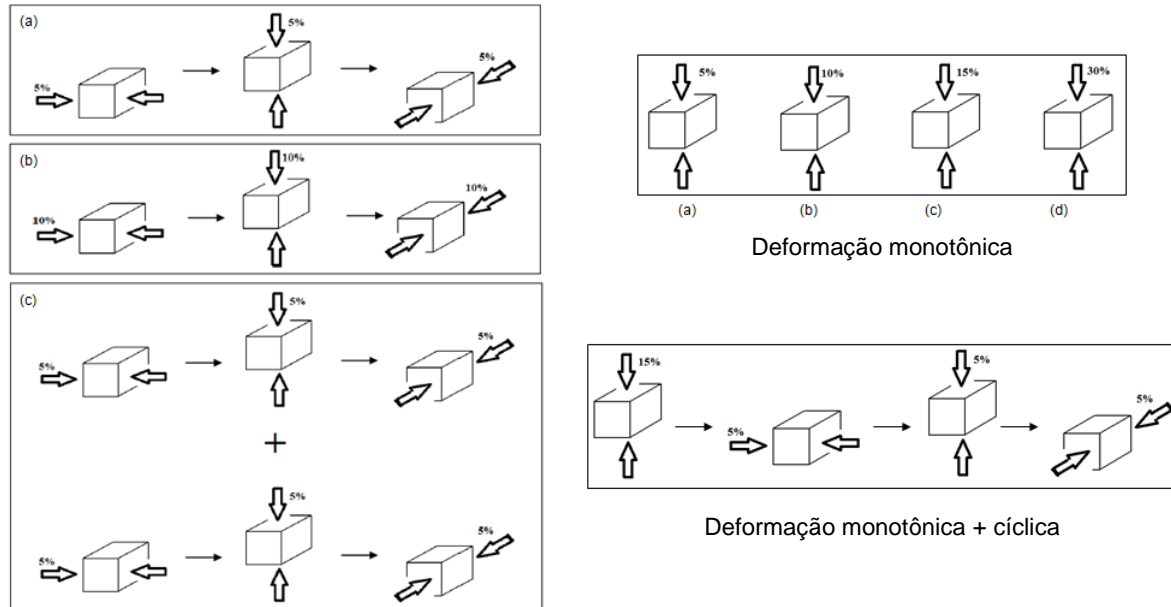


Figura 1. Representação esquemática da deformação monotônica por compressão em diferentes magnitudes.

Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza Vickers foram realizados em um durômetro da marca *Shimadzu*. Foram utilizadas duas amostras para cada condição, tendo sido realizados 7 testes de dureza em cada, com carga de 2kgf e tempo de aplicação de 15s.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentadas as medidas de dureza Vickers e os respectivos desvios padrão para o aço IF com diferentes tamanhos de grão.

Tabela 2. Dureza Vickers do aço IF com diferentes tamanhos de grão

Tamanho de Grão	Dureza (HV)
MAIOR TG	70,5 ± 1,6
MENOR TG	97,5 ± 2,7

Nota-se que a dureza do material com menor tamanho de grão (MENOR TG) é superior a do material com maior tamanho de grão (MAIOR TG), conforme esperado. Uma vez que o material com menor tamanho de grão possui mais contornos de grão e estes funcionam como barreira à movimentação de discordâncias, fontes para nucleação e ainda atuam com mais sistemas de deslizamento que o interior dos grãos, quanto maior o número de contornos de grão maior será o valor de dureza, conseqüentemente, quanto maior o grão, menor o número de contornos de grão e menor a dureza ^(6, 7).

Nas Tabelas 3 e 4 e nas Figuras 2 e 3 são mostrados resultados obtidos para deformação monotônica e cíclica, em termos de dureza e tensão na compressão. Verifica-se que nos materiais deformados monotonicamente (Tabela 3), em geral, a dureza aumenta conforme a magnitude da deformação aumenta. Adicionalmente, observa-se que o menor tamanho de grão apresenta dureza maior quando comparado ao material com maior tamanho de grão. O mesmo pode ser observado quando se avalia a tensão à compressão, como mostrado na Figura 2a.

Tabela 3. Dureza Vickers do aço IF com diferentes tamanhos de grão deformado monotonicamente

Tamanho de Grão	5% Monotônica Dureza (HV)	10% Monotônica Dureza (HV)	15% Monotônica Dureza (HV)	30% Monotônica Dureza (HV)
Maior_TG	110 ± 8	106 ± 5	113 ± 8	144 ± 20
Menor_TG	116 ± 6	115 ± 9	129 ± 9	158 ± 8

Tabela 4. Dureza Vickers do aço IF com diferentes tamanhos de grão deformado ciclicamente

Tamanho de Grão	5% Cíclico Dureza (HV)	5% Cíclico + 5% Cíclico Dureza (HV)	15% Monotônica + 5% Cíclico Dureza (HV)
Maior_TG	107 ± 6	124 ± 10	123 ± 4
Menor_TG	142 ± 9	132 ± 11	128 ± 7

O aumento da dureza com o aumento da magnitude da deformação nos materiais com diferentes tamanhos de grão acontece devido ao encruamento. Quando um material é deformado a frio as discordâncias se movimentam, multiplicam e aumentam a interação entre si e com outros defeitos e descontinuidades presentes no material ⁽⁸⁾. Em função deste aumento de interação, à medida que a deformação vai acontecendo, torna-se mais difícil a movimentação

das discordâncias, o que faz com a tensão necessária para deforma-lo se torne maior. Diante disto, à medida que a magnitude da deformação imposta ao material aumenta, mais resistente a esta deformação ele ficará e, por consequência, sua dureza e resistência mecânica à compressão se tornarão elevadas.

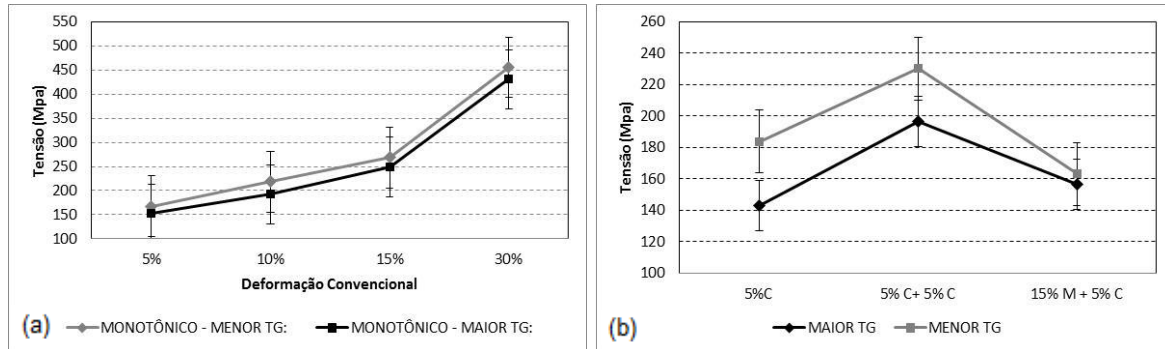


Figura 2. Evolução da resistência mecânica à compressão do aço IF com diferentes tamanhos de grão (a) deformado monotonicamente e (b) deformado ciclicamente.

Considerando os resultados de deformação cíclica (Tabela 4 e Figura 2b), observa-se que, para o material com maior tamanho de grão, à medida que a deformação total (ϵ_{total}) aumenta, maior é o valor de dureza. Entretanto, não se verifica alteração significativa desta propriedade em função do caminho de deformação aplicado, sendo encontrado praticamente o mesmo valor de dureza para as amostras deformadas ciclicamente em 5% em dupla sequência e em combinação de deformação monotônica 15% e cíclica 5%.

Para a condição de menor tamanho de grão, comportamento distinto foi observado. Amostras deformadas ciclicamente em 5% em dupla sequência apresentam dureza superior àquelas deformadas ciclicamente em 5% uma única vez e àquelas deformadas em combinação de esforço monotônico e cíclico.

Avaliando-se a influência do tamanho de grão na dureza do aço IF deformado ciclicamente observa-se que para em todas as condições de deformação, quanto menor o tamanho de grão, maior a dureza.

Em termos da resistência à compressão em cada etapa de deformação de cada uma das condições (Figura 3), as mesmas constatações obtidas a partir da análise da dureza podem ser aplicadas.

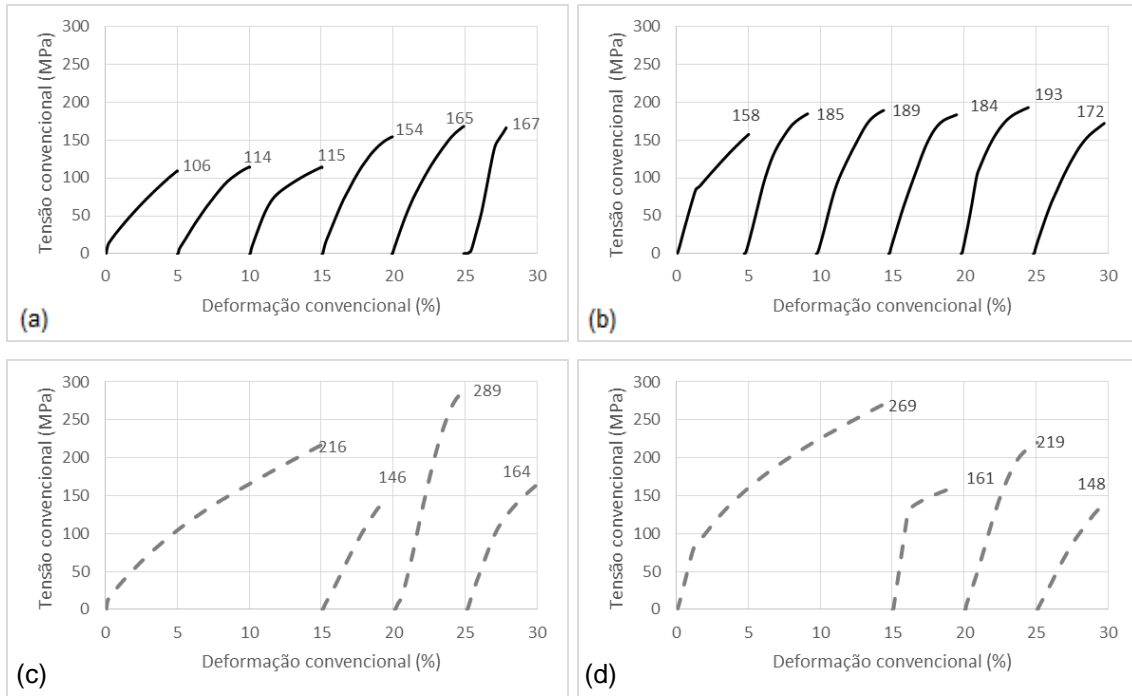


Figura 3. Evolução da resistência mecânica à compressão do aço IF com diferentes tamanhos de grão (a) MAIOR TG - 5% cíclico + 5% cíclico; (b) MENOR TG - 5% cíclico + 5% cíclico; (c) MAIOR TG - 15% monotônica + 5% cíclico; (d) MENOR TG - 15% monotônica + 5% cíclico.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que, aparentemente, a condição de maior tamanho de grão não sofreu efeito de alteração de caminho de deformação, uma vez que para uma mesma deformação total, valores similares de resistência mecânica foram encontrados. Uma vez que esta condição apresentava maior susceptibilidade à deformação por possuir menos contornos de grão e, portanto, menos barreiras à movimentação das discordâncias, infere-se que a magnitude e sequência das deformações impostas não tenham sido capazes de atingir o estado de estagnação do encruamento nas etapas da deformação cíclica e, conseqüentemente, promover o amaciamento do material quando alterados os eixos de deformação.

Quando um material é deformado em um único eixo, ou seja, monotonicamente, as estruturas de células formadas pelo aumento de interação entre as discordâncias encontram-se ativas no sentido da deformação ⁽⁹⁾. Estas estruturas formadas durante a deformação abrigam a história de deformação atual do material em nível microscópico e reflete as características do processo de deformação que as criou. Após uma alteração no caminho de deformação, representada neste caso pela alteração do eixo de deformação, a estrutura de discordâncias anteriormente formada torna-se instável sob um novo carregamento,

uma vez que a sua morfologia não é mais favorável, e degenera-se promovendo nova deformação ⁽⁹⁾. Como consequência desta degeneração o material torna-se susceptível a deformação novamente, mesmo quando submetido a tensões menores, o que, aparentemente, não ocorreu nas amostras de maior tamanho de grão deformadas ciclicamente, mas ocorreu nas amostras de menor tamanho de grão deformadas ciclicamente, o que pode ser verificado avaliando-se a resistência mecânica à compressão destes materiais (Figura 2b e Figura 3).

Comparando-se os materiais deformados 5% ciclicamente em ciclo único e ciclo duplo, verifica-se que as amostras deformadas em dois ciclos apresentam valores de dureza e resistência à compressão superiores àqueles obtidos nas amostras deformadas em ciclo único. Isto evidencia que embora as amostras deformadas 5% ciclicamente possam sofrer amaciamento como consequência da alteração de caminho de deformação, um segundo ciclo de deformação volta a encruar o material, conforme evidenciado na Figura 2a e Figura 3. Avaliando-se comparativamente os resultados das amostras deformadas ciclicamente 5% em duas seqüências e das amostras deformadas por combinação de esforço monotônico e cíclico é possível avaliar a influência da pré-deformação na resistência mecânica do aço IF com diferentes tamanhos de grão. Verifica-se que, considerando o primeiro ciclo de deformação de 5% e a deformação monotônica de 15% como pré-deformações, a deformação prévia cíclica resulta em maiores valores de dureza e resistência à compressão (Figura 4).

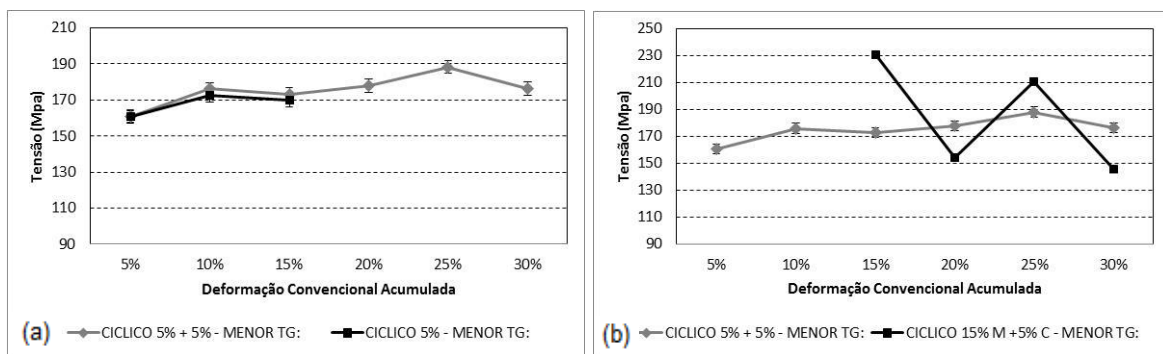


Figura 4. Evolução da resistência mecânica à compressão do aço IF com diferentes tamanhos de grão deformado ciclicamente. (a) Efeito do duplo ciclo e (b) efeito da pré-deformação.

O “amaciamento” ou “endurecimento” é dependente da magnitude de pré-deformação, pois os arranjos de discordâncias formados durante a primeira fase de carregamento, função da magnitude desta deformação, irão atuar como uma

barreira adicional para a ativação do movimento de discordâncias no sentido do novo carregamento, resultando no aumento da resistência mecânica ^(10,11). Uma vez que o material submetido ao duplo carregamento irá, na segunda sequência de deformação, ter os esforços aplicados nas mesmas direções que o ciclo anterior e que os resquícios das alterações sofridas em cada um dos eixos ainda estarão presentes, mesmo que não atuando com mesma efetividade, as barreiras à movimentação das discordâncias na segunda sequência de deformação será consideravelmente maior do que na segunda. Comparando-se com a deformação monotônica, que é efetuada em um único eixo, constata-se que as barreiras serão menos influentes nesta última, uma vez as deformações realizadas nos dois eixos distintos daquele no qual a pré-deformação monotônica foi aplicada, não terão histórico de deformação para superar, apenas as estruturas celulares criadas pela pré-deformação monotônica. Assim sendo, espera-se que os materiais submetidos à pré-deformação cíclica apresentem dureza mais elevada do que aqueles submetidos à pré-deformação monotônica, como observado.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de dureza Vickers das amostras de aço IF com diferentes tamanhos de grão e magnitudes de deformação total de 30%, considerando-se esforços monotônicos, cíclicos e combinados (monotônico seguido de cíclico).

Tabela 5. Comparação da dureza Vickers do aço IF com diferentes tamanhos de grão submetidos à deformação total de 30%

Tamanho de Grão	30% Monotônico Dureza (HV)	5% Cíclico + 5% Cíclico Dureza (HV)	15% Monotônica + 5% Cíclico Dureza (HV)
Maior_TG	144 ± 20	124 ± 10	123 ± 4
Menor_TG	158 ± 8	132 ± 11	128 ± 7

Verifica-se que para o aço IF com maior tamanho de grão submetido à deformação total de 30% (ϵ_{total}), a dureza resultante do processamento monotônico é superior àquelas encontradas nas amostras submetidas à deformação cíclica, independentemente do caminho de deformação aplicado. Contrariamente àquilo que havia sido constatado quando comparados os valores de dureza de todas as condições cíclicas, o efeito da alteração de caminho de deformação é percebido no material com tamanho de grão maior. Para a condição de tamanho de grão menor a mesma relação entre tipo de deformação e dureza é verificada. No que diz respeito

à influência do tamanho de grão, verificou-se em todas as condições de processamento mecânico, menor valor de dureza nas amostras de maior tamanho de grão e maior valor de dureza nas amostras de menor tamanho de grão.

Analisando-se especificamente as amostras do material com maior tamanho de grão verifica-se que embora o efeito da alteração de caminho de grão esteja presente, este efeito é causado apenas pelo tipo de deformação (monotônica ou cíclica), não ficando evidente relação entre a resistência mecânica do material com o caminho de deformação em si (sequência de deformação). Considerações análogas podem ser feitas avaliando-se a evolução da resistência à compressão destes materiais em cada uma das condições de processamento (Figura 5).

De forma geral, conforme mencionado anteriormente, à medida que o material é deformado monotonicamente, a interação entre as discordâncias e os defeitos estruturais, bem como a sua multiplicação, fazem com que a deformação se torne mais difícil, resultando no encruamento do material ⁽⁸⁾. Isto é o que acontece com o aço IF deformado monotonicamente 30% em todas as condições. Por outro lado, os materiais submetidos à deformação cíclica passam pelo processo de amaciamento que, conforme mencionado anteriormente, está associado à mudança ortogonal no sentido de deformação que faz com que novos sistemas de deslizamento, anteriormente inativos, sejam ativados e “destruam” a estrutura de discordâncias geradas no ciclo anterior, promovendo o amaciamento do material ^(11,12). Assim sendo, conforme observado, espera-se que materiais deformados monotonicamente apresentem dureza superior do que aqueles deformados ciclicamente.

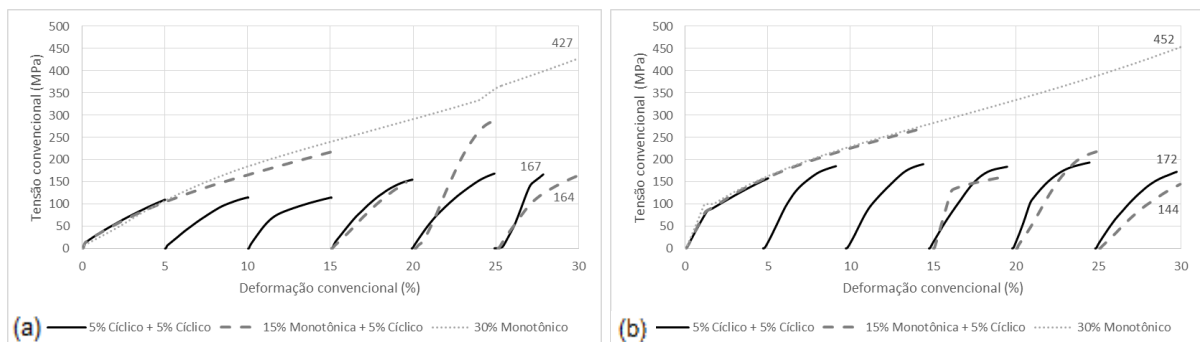


Figura 5. Comparativo da evolução da resistência mecânica à compressão do aço IF com diferentes tamanhos de grão submetidos a ϵ_{total} de 30% - (a) MAIOR TG (b) MENOR TG.

No que diz respeito ao efeito de tamanho de grão, verificou-se que, conforme o esperado, o material com menor tamanho de grão apresentou maior dureza, uma vez que possui mais barreiras a movimentação das discordâncias.

CONCLUSÃO

- Considerando o aço IF com tamanhos de grão distintos, verificou-se que o material apresenta maior dureza quanto menor for o seu tamanho de grão e que à medida que a magnitude de deformação aumenta, o valor de dureza é elevado.

- Mediante a deformação cíclica, independentemente da magnitude de esforço aplicado ou do caminho de deformação imposto, os materiais com menor tamanho de grão apresentaram a dureza e resistência mecânica à compressão mais elevada e o material com maior tamanho de grão a dureza e resistência mecânica à compressão menos elevada.

- Em termos de comportamento mecânico, a partir da deformação cíclica em diferentes magnitudes e caminhos de deformação obteve-se três informações distintas: i) O aço IF, independentemente do tamanho de grão, quando submetido a um mesmo caminho de deformação, mas com magnitudes diferentes, apresenta maior resistência mecânica na condição de menor esforço; ii) quando submetido a esforços de mesma magnitude, mas em mono e duplo ciclo apresenta maior resistência mecânica para o duplo ciclo, pois o segundo ciclo encrua o primeiro e iii) quando submetido a deformação cíclica de mesma ϵ_{total} , mas com pré-deformações distintas, apresenta maior resistência mecânica quando a pré-deformação é aplicada ciclicamente e não monotonicamente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP, ao CEFETMG, à Gerdau Aços Especiais Pindamonhangaba e ao IPT pelo apoio financeiro para execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 PEETERS B, SEEFELDT M, TEODOSIU C, KALIDINDI SR, VAN HOUTTE P, AERNOUDT E. Work-hardening/softening behaviour of bcc polycrystals during changing strain paths: I. an integrated model based on substructure and texture evolution and its prediction of the stress-strain behavior of an IF steel during two-stage strain paths. *Acta Materialia*. 2001;49:1607-1679.
- 2 URANGA P, GUTIERREZ I, LOPEZ B. Determination of recrystallization kinetics from plane strain compression tests. *Materials Science & Engineering A*. 2013;578: 174-180.
- 3 YE W, GALL R, SAINDRENAN G. A study of the recrystallization of an IF steel by kinetics models. *Materials Science & Engineering*. 2002A; 332: 41-46.

- 4 ARMSTRONG PE, HOCKETT JE. Large strain multidirectional deformation of 1100 aluminum at 300 K. *J. Mech. Phys. Solids.* 30:37–58.
- 5 CORRÊA ECS, AGUILAR MTP, SILVA EMP, CETLIN PR. The effect of sequential tensile and cyclic torsion straining on work hardening of steel and brass. *Journal of Materials Processing Technology.* 2003;142: 282-288.
- 6 SAINATH G, CHOUDHARY BK, CHRISTOPHER J, SAMUEL EI, MATHEW M D. Applicability of Voce equation for tensile flow and work hardening behavior of P92 ferritic steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping.* 2015;132-133;1-9.
- 7 XIONG R, PENG H, WANG S, SI H, WEN Y. Effect of stacking fault energy on working hardening behavior in Fe-Mn-Si-C high manganese steel by varying silicon and carbon contents. *Materials and Design.* 2015;85:707-714.
- 8 NAN Y, NING Y, LIANG H, GUO H, YAO Z, FU MW. Work-hardening effect and strain-rate sensitivity behavior during hot deformation of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy. *Materials & Design.* 2015;82: 84-90.
- 9 VIATKINA EM, BREKELMANS WAM, GEERS MGD. A crystal plasticity based estimate for forming limit diagrams from textural inhomogeneities. *Journal of Materials Processing Technology.* 2005;168: 211-218.
- 10 CORREA ECS, AGUILAR MTP, SILVA EMP, CETLIN PR, VALLE PE, REZENDE JL. Influence of strain path in the mechanical properties of drawn aluminum alloy bars. *Journal of Materials Processing Technology.* 1998;80-81:376-379.
- 11 BOERS SHA, SCHREURS PJG, GEERS MGD, LEVKOVITSHV, WANG J, SVENDSEN B. Experimental characterization and model identification of directional hardening effects in metals for complex strain path changes. *International Journal of Solids and Structures.* 2010;47:1364-1374.
- 12 SCHMITT JH, SHEN EL, RAPHANEL JL. A parameter for measuring the magnitude of a change of strain path: validation and comparison with experiments on low carbon steel. *International Journal of Plasticity.* 1994;10;535-531.

EFFECT OF CYCLIC AND MONOTONIC STRAIN ON MECHANICAL PROPERTIES OF AN INTERSTITIAL FREE STEEL

ABSTRACT

Investigations performed with several materials showed that the mechanical behavior of a metal during cyclic straining is different from that observed in monotonic deformation. In this paper, the effects of cyclic and monotonic compression deformation in the hardness and the strength of an interstitial free steel was evaluated. In this case, two grain sizes were considered in the analysis. Compression tests involving distinct deformation magnitude, pre-straining and total deformation values were employed in the experiments. The results showed that, regardless of the applied deformation mode, materials with smaller grain size have higher hardness. Additionally, as a result of monotonic deformation, it was observed that the strength of the material intensifies as the magnitude of deformation increases. Considering cyclic straining, in general, smaller deformation magnitudes, cyclic pre-deformation and a greater number of cycles led to an increase in hardness of the material.

Key-words: interstitial free steel, cyclic strain, work hardening