

RECRISTALIZAÇÃO EM AÇO C-Mn LAMINADO A FRIO COM 10% DE REDUÇÃO NA ESPESSURA*

Fabiana da Silva Santos¹
Priscila Rodrigues Verneck²
Fagner Ricardo Oliveira Verneck³
Saulo Brinco Diniz⁴
Andersan dos Santos Paula⁵
Mônica Aline Magalhães Gurgel⁶

Resumo

Neste trabalho foram estudados os efeitos da laminação a frio com baixo percentual de redução e a cinética de recristalização em um aço médio carbono e alto manganês. O aço em estudo foi laminado a frio com percentual de redução de 10%, seguido de um tratamento térmico de recozimento nas temperaturas de 650 e 700°C, em tempos de 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. A caracterização microestrutural e avaliação da fração recristalizada foram avaliadas por microscopia óptica e a dureza Vickers (avaliada em um macrodurômetro e um microdurômetro). De acordo com os resultados pode-se observar um efeito combinado de recristalização e crescimento de grão em função da microestrutura parcialmente encruada pelo baixo percentual de redução imposto, que se acentua com aumento do tempo e da temperatura de encharque.

Palavras-chave: Aço carbono-manganês; Laminado a frio; Recristalização; Microscopia óptica; Dureza.

RECRYSTALLIZATION IN C-Mn COLD ROLLED STEEL WITH 10% THICKNESS REDUCTION

Abstract

This work studied the cold rolling with low-level reduction effects and recrystallization kinetics in a medium carbon and high manganese steel. The steel was cold-rolled with a 10% thickness reduction, following by an annealing heat treatment at 650 and 700°C, during 10, 15, 20, 25 and 30 minutes. The microstructural characterization and recrystallized fraction evaluation were evaluated by optical microscopy and Vickers hardness tests (evaluated by a macrodurometer and a microdurometer). According to the results it can be seen a combined effect of recrystallization and grain growth in function of partially work hardening microstructure by low reduction percent imposed, that reinforced with increased of soaking time and temperature.

Keywords: Carbon-manganese steel, cold rolled; Recrystallization; Optical microscopy; Hardness.

¹ Engenheira Metalurgista, Mestranda em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheira Metalurgista, D.Sc., Técnica de Laboratório, EEIMVR/UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

³ Engenheiro de Produção, M.Sc., Engenheiro de Processos, Arcelor Mittal, Juiz de Fora, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Doutorando em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia; e Técnico de Educação - Soldagem, CTS-Solda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁵ Engenheira Metalurgista, D.Sc., Professora Adjunta da SE-4, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro; e orientadora credenciada da PPGEM/UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁶ Engenheira Metalurgista, Mestranda da PPGEM/UFF, Volta Redonda – RJ, Brasil. Contato: saulo_brinco@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A constante busca pelo mercado por aços com elevado padrão de qualidade a preços operacionais competitivos tem intensificado cada vez mais as pesquisas científicas por estes materiais. Logo, os estudos das modificações estruturais / transformações de fase que ocorrem durante as etapas de laminação e tratamentos térmicos de recozimento são extremamente importantes para melhorar cada vez mais as propriedades mecânicas desejadas em determinadas aplicações.

Algumas propriedades, como por exemplo, a resistência mecânica dos aços está associada ao tamanho de grão, dentre outros fatores. Desta forma, com grãos mais finos, há mais contornos de grão para impedir o movimento de discordâncias, e com isso, a resistência mecânica do aço torna-se maior [1].

Após a laminação a frio, ocorre o encruamento da estrutura do aço, e este é mais elevado quanto maior for a quantidade de trabalho a frio realizado. Trabalho a frio que na laminação é representado pelo percentual de redução da espessura da chapa. Após o aço ser submetido à laminação a frio, caso ocorra um aquecimento deste, como por exemplo, durante um tratamento térmico de recozimento para recristalização, o encruamento atua como força motriz, para a recuperação, e caso ainda haja energia suficiente, ocorre a recristalização, no qual após a ocorrência de tal mecanismo, as propriedades mudam significativamente. Com a recristalização a densidade de discordâncias diminui consideravelmente, e todos os efeitos do encruamento são eliminados, e desta forma, a estrutura antes deformada e encruada, dá lugar a novos grãos livres de deformação. Se estes grãos livres de deformação forem expostos à temperatura superiores, ou tempos maiores em uma dada temperatura, que a mínima temperatura ou tempo mínimo requeridos para causar a completa recristalização, ocorrerá um crescimento gradativo do tamanho dos grãos recristalizados [1].

Em grande parte dos estudos realizados, o processo de recristalização é explorado em condições onde se faz presente uma estrutura de média a altamente deformada, proveniente de um grau significativo de deformação do aço para garantir que a recristalização ocorra de maneira mais acelerada. Desta forma, o presente trabalho (desenvolvido no âmbito do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação de Santos [3]) buscou entendimento do ponto de vista acadêmico como percentuais baixos de redução se comportariam como força motriz para a recristalização de um aço carbono-manganês, do ponto de vista de observar a cinética deste processo vinculada a modificação microestrutural. Tal trabalho teve como base o estudo inicial realizado na dissertação de mestrado de Verneck [2], o qual explorou o mesmo aço nas condições de laminado a frio com percentuais baixos de redução (10 e 30%) e médios (50%) observando a cinética de recristalização em temperaturas de 700 e 750°C com tempos de 10, 20 e 30 minutos para as reduções de 30% e 50%. Porém algumas respostas ficaram pendentes nestes estudos associadas ao comportamento em temperaturas mais baixas (650 e 700°C) e/ou tempos intermediários (15 e 25 minutos) para a redução de 10% na espessura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Para a realização desse estudo foi utilizada uma chapa de aço médio carbono e alto manganês laminado a quente, com uma espessura inicial de 5 mm fornecida pela

Arcelor Mittal Tubarão (CST), a qual apresentava uma dureza média de 116 ± 3 HV [2]. Tal amostra a ser estudada foi laminada a frio (em laminador piloto instalado nos laboratórios do Instituto de Pesquisas e Tecnologia (IPT)) com 10% de redução na espessura, resultando em 4,10 mm de espessura. A composição química do aço em estudo encontra-se apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço em estudo (% em peso)

Elementos Químicos	%
C	0,12
Mn	0,83
N	0,0031
Al	0,04

2.2 Métodos

O tratamento térmico de recozimento para recristalização foi realizado em um forno tipo Mufla, da marca BRASIMET, e o controle de temperatura na zona de inserção da amostra, no interior do forno, foi feito com auxílio de um termopar da marca ICEL Manaus TD-911. Os tratamentos térmicos foram conduzidos inserindo as amostras com forno estabilizado nas temperaturas de encharque de 650 e 700°C, e com manutenção por 10, 15, 20, 25 e 30 minutos, seguido de um resfriamento ao ar.

Após a realização dos tratamentos térmicos, as superfícies das dez amostras foram lixadas e submetidas ao ensaio de dureza Vickers em um macrodurômetro (marca SPECTRU). Foram feitas cinco medidas em cada amostra com uma carga de 60 kgf. Após o devido corte com disco abrasivo as amostras resultantes de cada um dos tratamentos térmicos, em conjunto com a condição laminada a frio, foram embutidas a quente para serem lixadas (lixas de 220, 400, 600, 800, 1000, 1200 e 2500 mesh) e polidas com Alumina (1 μ m e 0,05 μ m). A microestrutura das amostras foi revelada com o reagente Nital 3%. A captura das imagens da microestrutura foi realizada com o auxílio de uma câmera digital (Câmera Evolution LC Color – Media Cybernetics – Modelo PL-A662) conectada a um analisador de imagens (programa Image Pró Plus) e acoplada a um microscópio óptico METALLOVERT – Leitz.

Após a captura das imagens das microestruturas (no aumento de 200X), foi realizada a metalografia quantitativa. Esta etapa consistiu da sobreposição de uma grade na micrografia e foi utilizada a relação que a fração de pontos coincidentes (P_P) é igual à fração volumétrica (V_V). Este método foi utilizado em 5 imagens de cada amostra. A grade utilizada continha 35 pontos e através da sobreposição foi possível a contagem das regiões recristalizadas. Após a obtenção desses valores, foi possível calcular a fração volumétrica recristalizada dividindo-se os números de pontos coincidentes com as regiões recristalizadas pelo número de pontos da grade [4].

Posteriormente foi conduzida a análise da dureza Vickers com uso de um microdurômetro, com o intuito de avaliar a alteração das propriedades quanto ao nível de homogeneidade promovido com o efeito da recristalização do aço estudado na condição laminada a frio com 10% de redução na espessura, e confrontar com os resultados da dureza medidos em um macrodurômetro. Para este ensaio foi utilizado um microdurômetro da marca SPECTRU, com carga de 125 g com tempo de permanência de 18 segundos, e foram realizadas 10 medidas por amostra na superfície resultante da preparação metalográfica após ataque.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 é apresentada a microestrutura da amostra como recebida, laminada a frio com 10% de redução na espessura, sem o Tratamento Térmico de Recozimento para Recristalização. É possível observar na imagem uma microestrutura constituída de grãos ferríticos (regiões claras) com vestígios de perlita (regiões escuras). Segundo a caracterização explorada no âmbito da Dissertação de Mestrado de Verneck [2], o qual descreve uma microestrutura constituída de grãos ferríticos equiaxiais e alguns vestígios de perlita. Comparando a condição laminada a frio em estudo com a condição prévia laminada a quente [2], é possível perceber a modificação microestrutural promovida pela laminação a frio com tão somente 10% de redução na espessura, onde se observa a obtenção de uma microestrutura com granulação heterogênea, com perda do aspecto equiaxial associada a presença de deformação plástica mais significativa em partes dos grãos (com evidencia da presença de bandas de deformação) e outros aparentemente sem efeito aparente da deformação. O que seria explicado pela diferença de orientação entre os grãos, no qual uns são mais bem orientados do que outros para se deformarem neste estágio de início da deformação plástica, em função da orientação dos seus respectivos sistemas de deslizamento em relação a tensão externa aplicada, de modo a maximizar a tensão cisalhante resultante, bem como a resistência mecânica dos grãos vizinhos que pode vir a restringir sua deformação por sua mudança de forma [5].

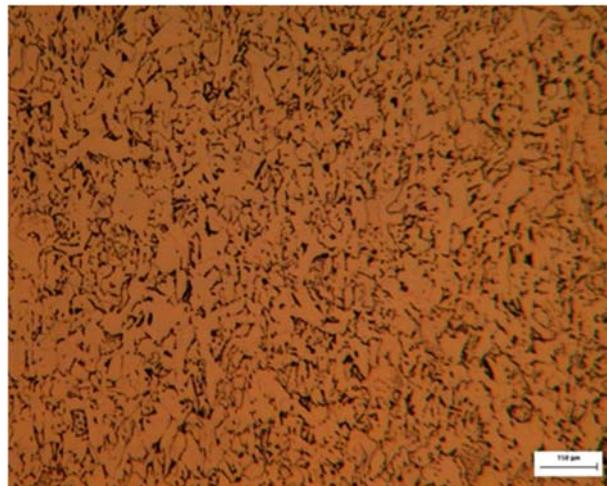


Figura 1. Microestrutura do aço na condição como recebida para estudo neste projeto, laminada a frio com 10% de redução na espessura, obtida por microscopia ótica. Aumento 200x. Nital 3%.

Na Figura 2 são retratadas as microestruturas das amostras resultantes do tratamento térmico de recozimento para recristalização a 650°C nos tempos de 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. Pode-se observar por estas imagens a evolução do processo de recristalização que promoveu o gradual decréscimo do caráter da heterogeneidade da distribuição, granulometria e morfologia dos grãos com aumento do tempo de tratamento térmico.

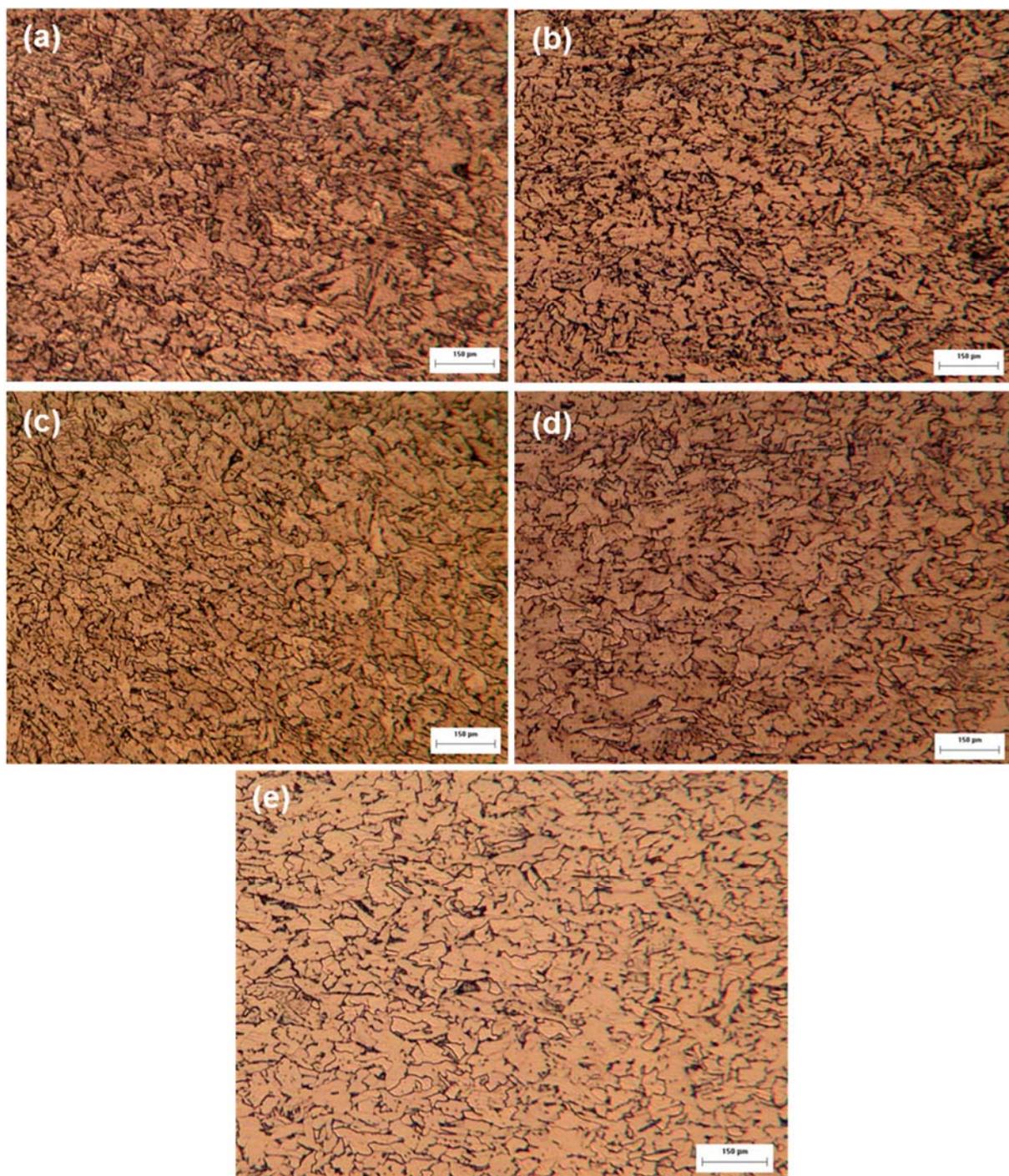


Figura 2. Microestruturas das amostras resultantes do tratamento térmico de recozimento para recristalização a 650°C obtida por microscopia óptica: a) 10 min. b) 15 min. c) 20 min. d) 25 min. e) 30 min. Aumento 200x. Nital 3%.

Na Figura 3 são retratadas as microestruturas das amostras resultantes do tratamento térmico de recozimento para recristalização a 700°C nos tempos de 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. Diferentemente do que foi observado no recozimento a 650°C (Figura 2), não são tão marcantes os detalhes que diferenciam imagens das microestruturas quanto a evolução do processo de recristalização a 700°C. Ou seja, em termos do caráter de heterogeneidade da distribuição granulometria e morfologia dos grãos com aumento do tempo de tratamento térmico não segue uma evolução padronizada.

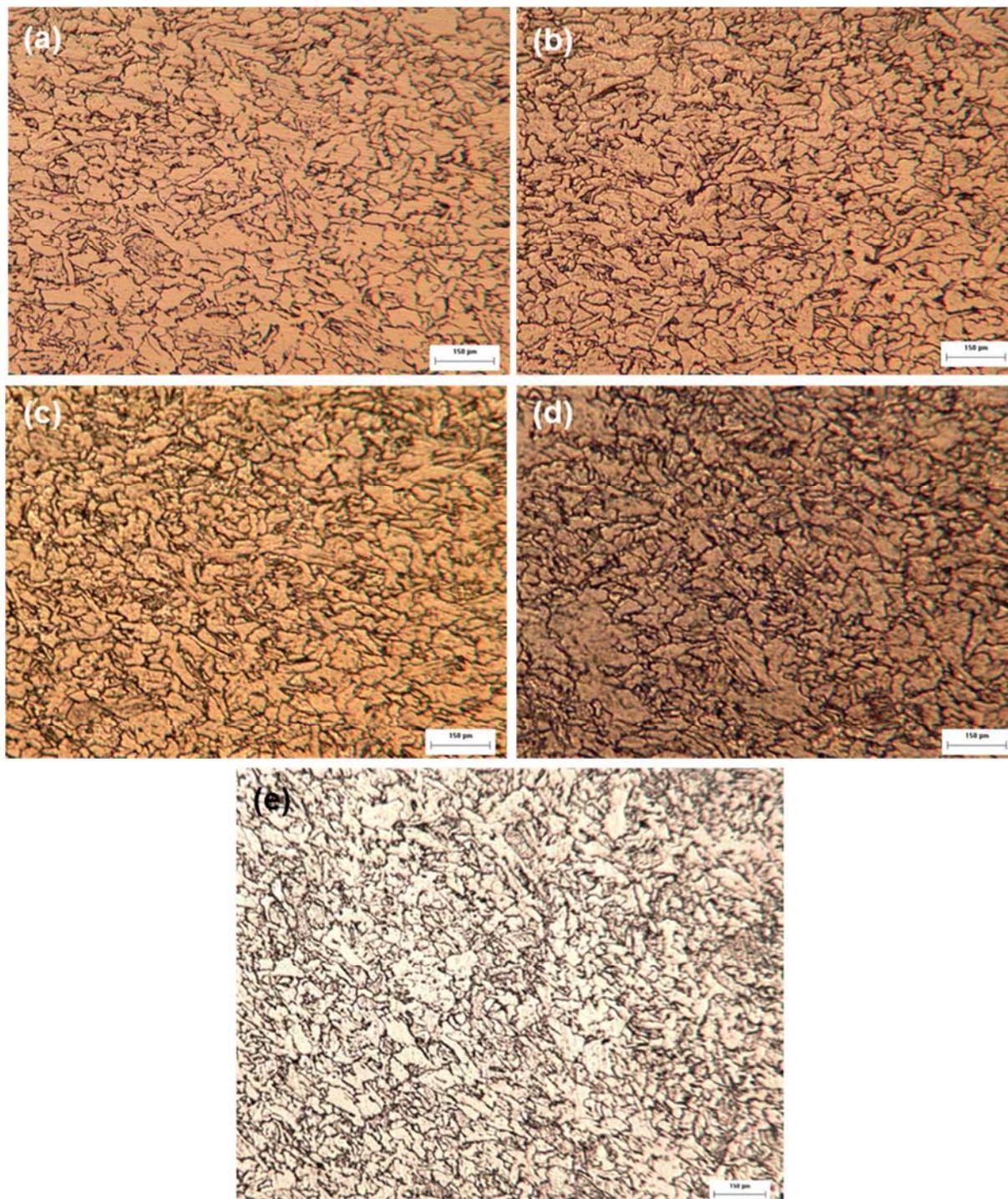


Figura 3. Microestruturas das amostras resultantes do tratamento térmico de recozimento para recristalização a 700°C obtida por microscopia ótica: a) 10 min. b) 15 min. c) 20 min. d) 25 min. e) 30 min. Aumento 200x. Nital 3%.

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 4 é possível perceber que as frações recristalizadas das amostras para tempos de encharques próximos são relativamente iguais, só podendo ser evidenciada uma diferença mais significativa na fração recristalizada, quando se compara dois tempos mais distantes de tratamento térmico, como por exemplo 10 e 30 minutos, porém quando se compara a fração recristalizada para temperaturas distintas, pode-se observar que os valores são diferentes apesar de terem similaridades em comportamento. É possível

perceber o quanto as frações recristalizadas são distintas de acordo com os tempos de recozimento, o que vem a corroborar com as leis da recristalização [6], ou seja, quanto maior a temperatura e/ou o tempo de recozimento, maior deve ser a fração recristalizada.

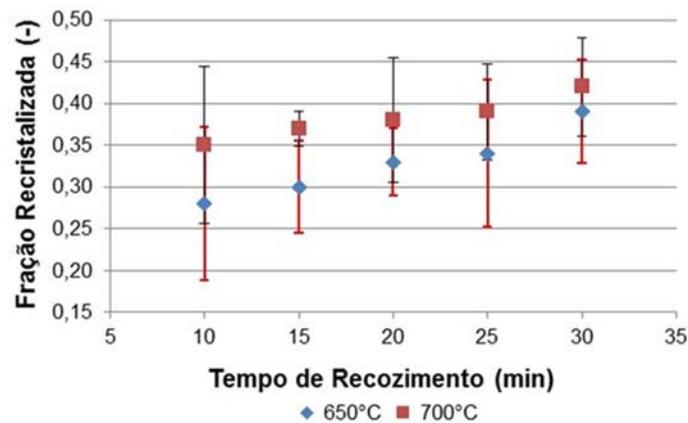


Figura 4. Fração Recristalizada das amostras recozidas a 650°C e 700°C nos seguintes tempos: 10, 15, 20, 25 e 30 minutos.

Ao se comparar os valores de dureza da amostra laminada a quente (média 116 HV e desvio padrão 3 HV) [2] com o valor da dureza da condição como recebida laminada a frio - LF (Figura 5 – média 171 HV e desvio padrão 20 HV), pode-se comprovar o endurecimento do material ocasionado pelo encruamento resultante da deformação associada a 10% de redução na espessura por meio do trabalho mecânico a frio. Comportamento este que vem a corroborar com o aspecto microestrutural de grão mais refinado da condição estrutural laminada a frio e tal heterogeneidade microestrutural, caracterizada pelo maior valor do desvio padrão.

A dureza (gráficos apresentados na Figura 5) das amostras submetidas ao tratamento térmico decresce com o aumento do tempo de encharque no recozimento a 650°C (Figura 5a) e a 700°C (Figura 5b), ou seja, seu comportamento é inverso ao da fração recristalizada, como era esperado pelo fato da formação e crescimento dos grãos recristalizados em maior fração com aumento do tempo de recozimento, que promove um decréscimo da dureza e resistência mecânica do material. Além das medidas de dureza quanto a valores médio e desvio padrão obtidas no microdurômetro, na Figura 5 também são apresentadas as medidas de dureza obtidas com o macrodurômetro para o recozimento a 650°C e 700°C. Dessa maneira é possível observar que os valores dos desvios-padrão quanto a dureza, obtidas no microdurômetro são maiores que os obtidos no macrodurômetro. Sendo assim, as medidas realizadas com o microdurômetro puderam melhor retratar a transição quanto ao caracter heterogêneo para o caracter homogêneo da microestrutura que se faz presente na evolução da recristalização com o aumento do tempo de recozimento a 650°C (Figura 2) e a 700°C (Figura 3), e comparada ao que se tem na condição somente laminada a frio – LF (Figura 1). Ainda é importante ressaltar que o nível de encruamento imposto pela redução de 10% da espessura é baixo quando comparado aos valores de dureza obtidos por Verneck [2] com reduções da ordem 30 e 50% na espessura (média 170 HV e desvio padrão 5 HV, e média 206 HV e desvio padrão 5 HV, respectivamente, resultados das medidas em um microdurômetro). Característica esta que contribui para explicar o motivo pela qual a dureza da amostra LF é inferior aos valores apresentados pelas amostras recozidas em ambas temperaturas, principalmente aquelas medidas com um

microdurômetro (Figura 5). Um outro fator que provavelmente contribuiu para o incremento na dureza das amostras recozidas foi a presença de grãos deformados e não deformados na estrutura laminada a frio, refletindo assim na formação de aglomerados de grão recristalizados com uma dimensão inferior a condição como recebida.

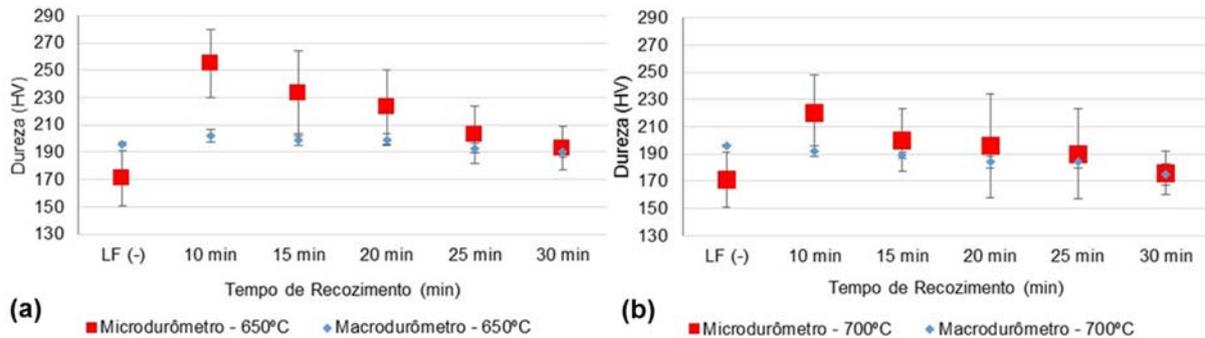


Figura 5. Dureza média e respectivo desvios padrão das amostras recozidas a (a) 650°C e (b) 700°C nos seguintes tempos: 10, 15, 20, 25 e 30 minutos, medidas obtidas com o microdurômetro e com o macrodurômetro Vickers.

Ao comparar os dados deste presente trabalho com os dados apresentados na dissertação de Verneck [2] (redução de 30% seguido de um tratamento térmico de recozimento para recristalização a uma temperatura de 700°C com tempos de encharque de 10, 20 e 30 minutos), verifica-se que os valores de dureza obtidos por Verneck [2] foram menores, porém os valores de fração recristalizada são superiores no presente trabalho. Quando se compara com os resultados do tratamento térmico realizado a 650°C neste trabalho com os resultados do tratamento térmico realizado a 700°C de Verneck [2], observa-se valores similares de fração recristalizada, porém a dureza apresenta valores superiores, onde deveria ser menor a fração recristalizada para ambas as temperaturas estudadas neste trabalho, pois o percentual de redução é de somente 10% comparado aos 30% de Verneck [2]. Esperava-se que com um percentual menor de redução e num nível tão baixo, menor seria a fração recristalizada numa mesma temperatura e tempos de encharque, e ainda haveria a possibilidade da retenção de grão somente recuperados. Logo, os valores de dureza medidos por Verneck [2] em sua dissertação, são inferiores para a condição de 30% de redução quando comparados aos resultados deste presente trabalho para 10% de redução nos tempos similares a 700°C. Ao verificar os valores de desvios padrão nota-se que os mesmos são maiores que os encontrados por Verneck (tempos de encharque de: 10 minutos – dureza e desvio padrão: 179 e 4 HV / 20 minutos – dureza e desvio padrão: 180 e 11 HV / 30 minutos – dureza e desvio padrão: 144 e 7 HV), associando a isto uma maior heterogeneidade microestrutural para as amostras recozidas a partir de amostras com menor percentual de redução na espessura na laminação a frio.

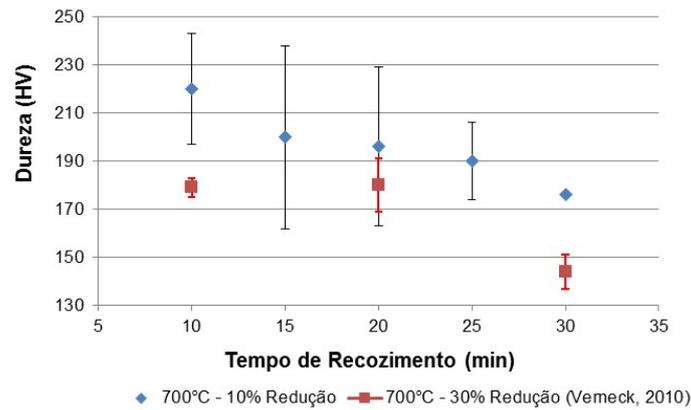


Figura 6. Comparação da dureza média das amostras recozidas a 700°C com percentual de redução de 10% nos seguintes tempos: 10, 15, 20, 25 e 30 minutos e dados de Verneck [2] 700°C com percentual de redução de 30% nos seguintes tempos: 10, 20 e 30 minutos, medidas obtidas com o microdurômetro.

Com isso se comprova que o material em estudo com apenas 10% de redução possui maior heterogeneidade microestrutural. Tal comportamento era esperado devido ao menor potencial de recristalização atribuído a 10% de redução na espessura quando comparado a 30%. Ressaltando também que somente 10% de redução na espessura após a laminação a frio gera uma mistura de grãos deformados que não chegaram a recristalizar, ou seja, apenas recuperaram; e outros que a deformação foi tamanha que alcançaram o potencial para a recristalização em função da quantidade de energia de deformação armazenada. Por outro lado, os grãos que não chegaram a se deformar na laminação a frio, devido a sua orientação cristalográfica, tiveram potencial para crescimento de grão nas temperaturas e tempos do tratamento térmico de recozimento adotados.

De acordo com os gráficos, apresentados na Figura 5, que mostram o perfil de dureza (medidas obtidas com o microdurômetro, principalmente) das amostras recozidas a 650°C e 700°C, é possível observar que quanto maior o tempo de encharque menor é a dureza apresentada. Além disso, é possível perceber, de maneira indireta, os efeitos da temperatura de encharque na cinética de recristalização, onde o processo em todo intervalo de tempo estudado a 650°C apresenta-se similar ao intervalo entre 10 e 15 minutos associados a 700°C, comportamento este vinculado ao decréscimo da dureza. No entanto acima de 15 minutos para 700°C a redução da dureza torna-se mais suave, indicando que estes tempos superiores revelam uma maior avanço do processo de recristalização para a condição de tratamento a 700°C quando comparada a de 650°C. Reforçando que a metodologia empregue (microscopia óptica) para avaliação da fração recristalizada para amostras com tão baixo percentual de deformação não foi adequada para retratar tal evento.

4 CONCLUSÃO

De acordo com os dados apresentados e discutidos, conclui-se que:

(i) a condição laminada a frio contribuiu para o endurecimento por encruamento associada um misto de grão com aspecto deformado e outros ainda com aspecto equiaxial revelando a não deformação dos mesmos. Tal heterogeneidade microestrutural confirmada pelo aumento do desvio padrão dos valores de dureza da condição laminada a frio comparada à laminada a quente;

(ii) a fração recristalizada não foi 100%, mesmo avaliando intervalos de tempos maiores do tratamento térmico de recozimento para recristalização em ambas as temperaturas de recozimento (650 e 700°C);

(iii) foi observado também, que a dureza das amostras para as temperaturas de 650°C e 700°C decresceu conforme aumentou o tempo de recozimento, sendo menores para um mesmo tempo e para a maior temperatura de recozimento. Sendo notória a grande diferença ao comparar a dureza da amostra como recebida (laminada a frio com 10% de redução) com as amostras que foram submetidas ao recozimento. O que revela o potencial de recristalização nas condições de tratamento térmico adotado a partir da condição encruada e levanta indícios quanto à cinética de recristalização.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CST pela doação do aço, ao IPT pela laminação piloto, e EEIMVR/UFF pela infraestrutura laboratorial para as presentes análises.

REFERÊNCIAS

- 1 Dieter G. Metalurgia Mecânica. 2ª Edição. Editora Guanabara Dois; 1981.
- 2 Verneck FRO. Cinética de Recristalização de Aços Carbono-Manganês. Dissertação de Mestrado, UFF, Volta Redonda/RJ, Brasil, 2010.
- 3 Santos FS, Influência da Taxa de Resfriamento e Aquecimento na Transformação Martensítica em Liga de NiTi, Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, UFF, Volta Redonda/RJ, Brasil, 2014.
- 4 Oliveira SC. Análise quantitativa da recristalização primária no ferro puro. Dissertação de Mestrado, UFF, Volta Redonda/RJ, Brasil, 2009.
- 5 Reed-Hill RE. Princípios de Metalurgia Física. 2ª Edição. Editora Guanabara Dois; 1982.
- 6 Padilha AF, Siciliano Jr F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. 3ª Edição, Revisada e Ampliada. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM; 2005.