

ESTUDO DO EFEITO BH PARA O AÇO BH 220 EM FUNÇÃO DO MODO E DA DIREÇÃO DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA.

Isabela Cristina de Oliveira Alencar, isabelacof@gmail.com¹

Rafael Melo Guimarães, rafaelmelog@hotmail.com¹

Maria Teresa Paulino Aguilar, teresa@ufmg.br²

Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br¹

Wellington Lopes, wellingtonlopes@deii.cefetmg.br¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253 Nova Suíça, Belo Horizonte/MG, CEP: 30421-169

²Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte/MG, CEP: 31270-901

Resumo: O endurecimento de um aço provocado pela restrição à movimentação das linhas de discordâncias, conhecido como efeito bake hardening depende de diversas variáveis, dentre as quais, a quantidade de pré-deformação adotada antes da execução do tratamento térmico que visa simular a operação de cura da pintura praticada no ambiente da indústria automotiva e a direção de solicitação mecânica (anisotropia). Considerando esses aspectos, este trabalho apresenta o estudo do efeito BH para o aço BH 220 pré-deformado de aproximadamente 1%, 2% e 3% de deformação efetiva em tração e em cisalhamento para amostras retiradas a 0° e a 90° da direção original de laminação. Os resultados indicaram influências do efeito BH de acordo com o modo e quantidade de pré-deformação, além da direção de solicitação mecânica.

Palavras-chave: aço BH220, propriedades mecânicas e efeito BH.

1. INTRODUÇÃO

A indústria automobilística vem, ao longo dos anos, alterando o formato, designer e projetos de fabricação dos veículos, isto surtiu um crescimento nas exigências com relação à estampabilidade a que são submetidas às chapas para fabricação de carrocerias de automóveis. Assim como aumentou a procura pelo aumento da eficiência energética dos automóveis e, recentemente, as pressões por redução do nível de emissão de poluentes, determinam um esforço para reduzir o peso dos veículos. Isso pode ser obtido com o uso de aços de alta resistência. De acordo com Colpaert (2008), esses aços são comumente classificados pela composição química (aços carbono, aços baixa liga, dentre outros), pela aplicação e pelas características microestruturais (aços austeníticos, aços dual phase, por exemplo),.

Os aços ultra-baixo de carbono (LC) tem servido como base para o desenvolvimento de novas classes de aços altamente moldáveis, de elevada resistência. Este grupo deve a sua combinação de elevada conformabilidade e alta resistência ao uso de endurecíveis em solução sólida (SSS) e do controle do tamanho de grão. Os aços ultra-baixo carbono e alguns aços endurecíveis pela cura da pintura (BH) são bons exemplos de novos tipos de aço que atendem as necessidades dos projetos automotivos modernos. A adição de elementos de liga, tais como micro nióbio, em conjunto com os elementos como fósforo, manganês e silício, juntamente com tamanho de grão, produziram alguns aços com alta resistência e boa conformação. A adição do nióbio em excesso, mais do que é necessário para estabilizar o carbono, resulta em um aço que não é apenas livre de interstícios (interstitial free - IF), mas também contém boa dispersão de precipitados finos que contribuem para a resistência à tração através de uma estrutura de grãos refinados, bem como endurecimento por precipitação, (Senuma, 2000).

Os aços de baixo e extra-baixo carbono (IF) são a maior parte dos aços empregados para embalagens, e, aços equivalentes empregados na indústria automobilística. Em sua maioria possuem estrutura ferrítica, com uma pequena porção de cementita ou perlita, (Colpaert, 2008). Conforme citado por Dias (2011) e Arnab (2016), os aços *bake hardening* (BH) são comumente aplicados no setor automobilístico para conformação de membros externos do veículo, como painéis, portas, pilares, dentre outros,. Esses aços se apresentam macios antes do tratamento térmico, facilitando assim sua conformabilidade. Após o tratamento térmico, que ocorre durante a cura na pintura (temperatura de 120°C a 170°C), aumentam assim seu limite de resistência, (Lora, 2009 e Dias, 2011). Outra característica desses aços é o fato de apresentarem boa estampabilidade antes, e ótima resistência mecânica após o tratamento térmico, sendo esta sua principal vantagem, o aumento do limite de escoamento após a cura da pintura. A essa vantagem ocasionada devido ao tratamento de cozimento, damos o nome de *efeito bake hardening*.

Aços BH possuem átomos de carbono em solução sólida, estes aços apresentam uma matriz basicamente ferrítica, contendo sempre um percentual mínimo de carbono em solução sólida (menor que 25ppm) com interações entre as discordâncias e os solutos intersticiais, (Dias, 2011). Associado à presença de carbono e/ou nitrogênio em solução sólida, que impedem a movimentação das discordâncias através da segregação de átomos intersticiais, assim temos o envelhecimento por deformação estática, (Lora, 2009).

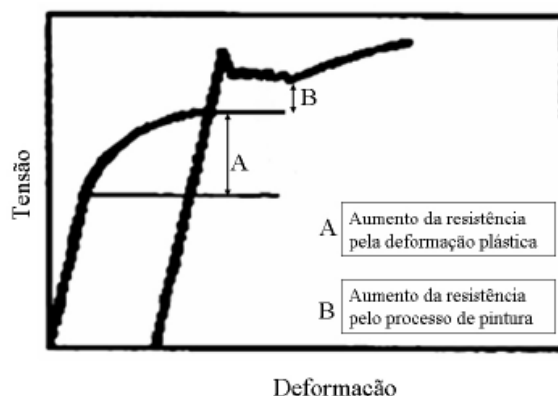


Figura 1 – Comparação da resistência mecânica antes e após a pintura – efeito BH.
Lora, (2009)

Conforme ilustrado na Figura 01 acontece um ganho de resistência mecânica através do encruamento ocasionado durante a estampagem. E um novo ganho de dureza após a obtenção do *efeito bake hardening* durante o processo de pintura, geralmente a uma temperatura de 170°C, (Lora, 2009).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste artigo foi o aço BH220 a partir de amostras retiradas a 0° e a 90° da direção original de laminação, DL, das chapas. Esse tipo de aço é comumente aplicado em empresas automobilísticas, devido a sua excelente estampabilidade e boa resistência mecânica após a cura da pintura com composição química de acordo com o exibido na Tab.(1).

Tabela 1. Composição química do aço BH 220

% p	C	Mn	Al	P	S
BH220	0,06 máx	0,7 máx	0,02 min	0,08	0,03 máx

A caracterização mecânica desse material foi feita a partir da realização de ensaio de dureza Vickers com a utilização de um microdurômetro Vickers Shimadzu HMV 2T com carga de 200gf mediante preparação micrográfico com uso do embutimento a frio feito com acrílico autopolimerizante, lixamento e polimento mecânicos em lixadeiras e politrizes Arotec, utilizando lixas de mesh 120, 240, 400, 600 e pasta de diamante com granulometria de 9µm e 3µm. Posteriormente as amostras foram atacadas com Nital 2% e observadas ao microscópio óptico Fortel com sistema de aquisição de imagens Kontrol M713.

A caracterização mecânica do aço BH220 continuou com a realização de ensaios de tração em uma máquina de ensaios universais Instron 5582 com sistema de aquisição de dados *Blue Hill2* e extensômetro do tipo agulhas, adotando-se taxa de deformação inicial igual a 0,001/s. Esse material foi então pré-deformado em tração de 1%, 2%, 3% e 4% de deformação verdadeira para ambas as direções de solicitação mecânica para posterior tratamento térmico em forno do tipo mufla Magnus, sendo o aço BH220 aquecido a 180°C durante tempo de encharque de 20 minutos com posterior resfriamento ao ar.

De modo análogo, fez-se a pré-deformação de 1,20%, 2,25%, 3,20% e 4,25% das amostras retiradas a 0° da direção de laminação (DL) e de 1,21%, 2,09%, 3,10% e 4,08% de amostras retiradas a 90°DL de deformação efetiva em cisalhamento para comparar com os dados obtidos em tração. Esse ensaio foi realizado em um dispositivo adaptado à máquina universal de ensaios Instron 5582, fazendo uso do mesmo sistema de aquisição de dados e extensômetro, com taxa de deformação também igual a 0,001/s.

Os valores de pré-deformação praticados em tração e em cisalhamento foram escolhidos a partir de consulta feita em norma específica (ABNT NBR 5915-4, 2013).

O efeito BH total foi calculado a partir da diferença entre o tensão decorrente do trabalho a frio (WH) e a tensão limite de escoamento após o tratamento térmico subtraída da tensão de fluxo após a pré-deformação (BH), conforme apresentado na Eq.(1):

$$BH_{TOTAL} = (WH - BH) \quad (1)$$

sendo:

WH = (Tensão de fluxo ao término da pré-deformação - Tensão limite de escoamento material como recebido);

BH = (Tensão limite de escoamento após o tratamento térmico - Tensão de fluxo ao término da pré-deformação).

De posse desses procedimentos fez-se então o estudo da influência do modo de deformação plástica (tração e cisalhamento), da direção de solitação mecânica (0° e 90° da direção de laminação original das chapas) e da quantidade de pré-deformação (1%, 2%, 3% e 4%). Os resultados serão apresentados nos próximos itens.

3. RESULTADOS e DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Mecânica do aço BH220

A dureza Vickers do aço BH220 no estado inicial ficou na faixa de valor entre $120,3 \pm 3,13$ HV, já as principais propriedades mecânicas desse aço medidas a 0° e 90° da direção original de laminação, DL, são apresentadas na Tab.(2). Os resultados confirmam as características de um aço Bake Hardening do tipo BH220.

Tabela 2. Principais propriedades mecânicas do aço BH220 no estado como recebido.

Resumo das Propriedades Mecânicas			
Direção	Tensão limite de escoamento, LE (MPa)	Tensão limite de resistência a tração, LRT (MPa)	Alongamento uniforme, AU (%)
0°DL	$227,33 \pm 4,62$	$352,57 \pm 1,64$	$24,73 \pm 0,20$
90°DL	$231,00 \pm 3,60$	$348,66 \pm 1,09$	$23,60 \pm 0,40$

3.2 Caracterização Microestrutural do aço BH220

A Fig. (2) exibe a fotomicrografia do aço BH220 no estado inicial, indicando a presença de apenas um constituinte: a ferrita, como esperado para aços do tipo *Bake Hardening*, (Silva e Pereira, 2012).

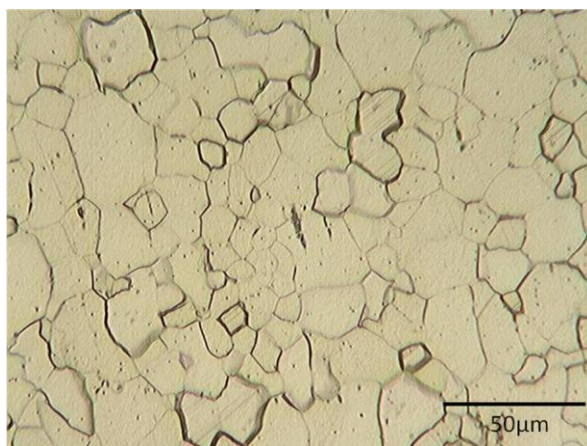


Figura 2 – Fotomicrografia do aço BH220 no estado inicial.

3.3 Estudo do efeito *Bake Hardening* em tração

As curvas de tensão-deformação efetiva em tração para os quatro valores de pré-deformação adotados neste modo de deformação plástica são exibidas na Fig.(3). Pode-se perceber para as amostras ensaiadas a 0°DL, Fig. (3a), que o maior endurecimento por efeito BH aconteceu para o menor valor de pré-deformação, ou seja, de 1%, sendo inclusive maior que o endurecimento decorrente do encruamento para essa quantidade de pré-deformação. Para os demais valores de deformação em tração nota-se o decréscimo contínuo do endurecimento por efeito *Bake Hardening* para valores de pré-deformação maiores que 1%, enquanto o endurecimento promovido por efeito *work-hardening* manteve-se crescente com o acréscimo da quantidade de pré-deformação em tração.

Para as amostras retiradas a 90°DL, Fig. (4), verifica-se que o aço BH220 conseguiu endurecimento por efeito BH pouco menor que o detectado a 0°DL, além de esse fenômeno ter ocorrido para um valor maior de pré-deformação:

3%. A dependência do efeito BH com a quantidade de pré-deformação é relacionada com habilidade de o material em formar a atmosfera de Cottrell que se forma durante a realização do tratamento térmico, restringindo ainda mais a movimentação das linhas de discordâncias que o experimentado durante a pré-deformação do material, (Durrenberger, 2011).

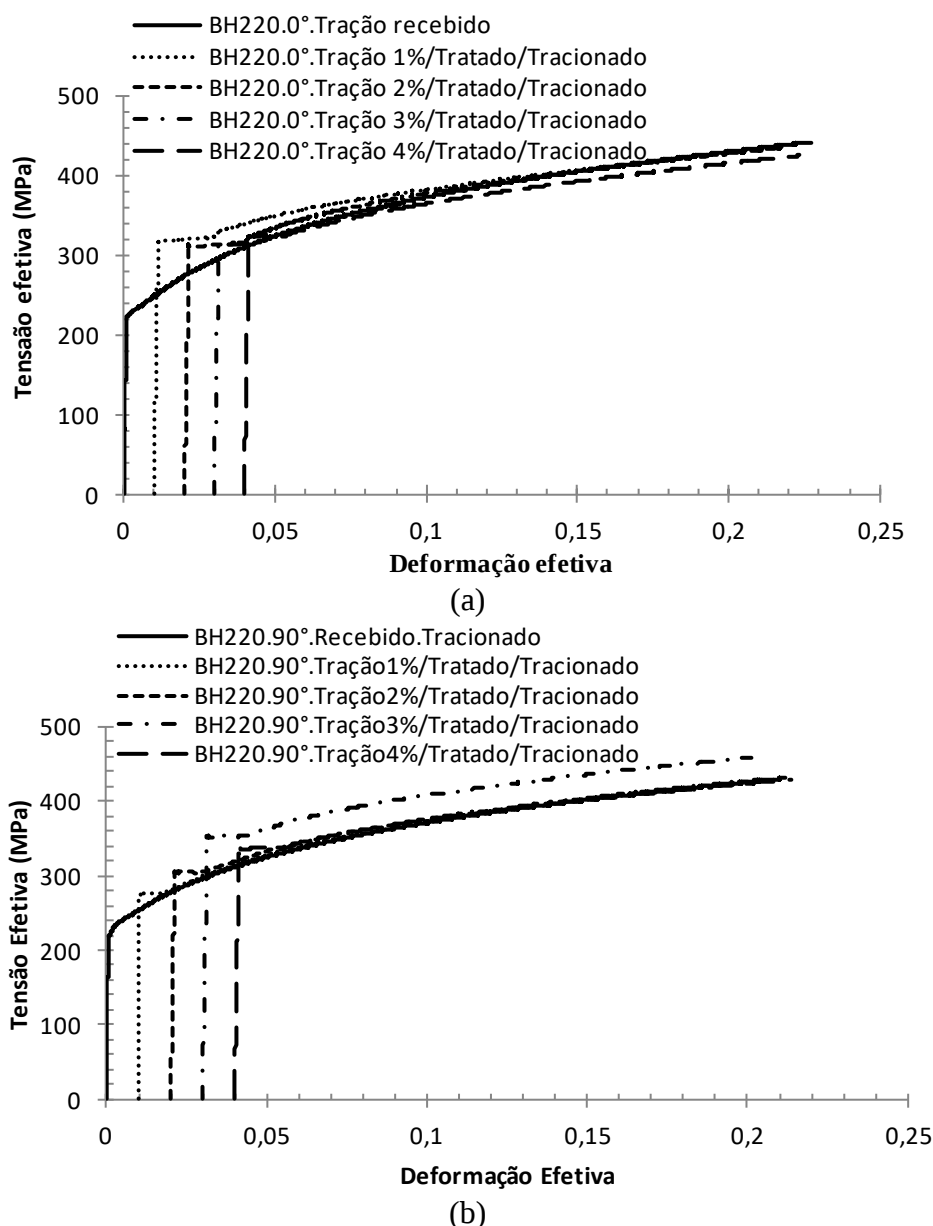


Figura 3 – Curvas tensão-deformação efetiva em tração para diferentes valores de pré-deformação:

a) 0°DL e b) 90°DL.

A Fig.(4) exibe a variação dos valores do endurecimento total do aço BH220, do endurecimento decorrente do envelhecimento pelo efeito BH e do aumento da resistência mecânica provocado pelo encruamento, WH. Nota-se agora a influência da direção de solicitação mecânica na magnitude e na dependência do endurecimento por efeito BH com a quantidade de pré-deformação em tração. Para ambas as direções nota-se o aumento contínuo do endurecimento por encruamento com o aumento da quantidade de pré-deformação, mas conforme observado na Fig.(3), percebe-se que o endurecimento total do aço BH220 foi praticamente o mesmo para as duas direções de solicitação, embora tal efeito tenha acontecido para valores distintos de pré-deformação (1% a 0°DL e 3% a 90°DL), sendo observado ainda o decréscimo contínuo do endurecimento por efeito BH a 0°DL para valores de pré-deformação em tração maiores que 1%, enquanto a 90°DL esse decréscimo do efeito *Bake Hardening* foi decrescente apenas a partir de 3% de pré-deformação em tração.

Das (2015) avaliaram amostras do aço BH220, a influência de mudanças nos valores de taxa de deformação e da quantidade de pré-deformação em tração, explicando que acima de um determinado valor de deformação ou taxa de

deformação que o arranjo subestrutural assumido pelo aço BH220, como a redução da densidade de linhas de discordâncias assim como mecanismos que reestruturam as mesmas, promovendo como consequência, a redução do efeito BH.

Estudos realizados com outros modos de deformação plástica, como a investigação do efeito de diferentes valores de pré-deformação em tração, em estado plano ou biaxial na resistência à fadiga de aços DP revelaram uma redução do efeito BH nesses materiais como consequência do modo de deformação que afetou a evolução estrutural assumida por esses aços, (Fredriksson, 1989).

Por fim, deve-se destacar a influência da orientação cristalográfica preferencial assumida pelo aço BH220, o que explica em parte, as diferenças em termos de comportamento mecânico apresentadas a 0°DL e a 90°DL.

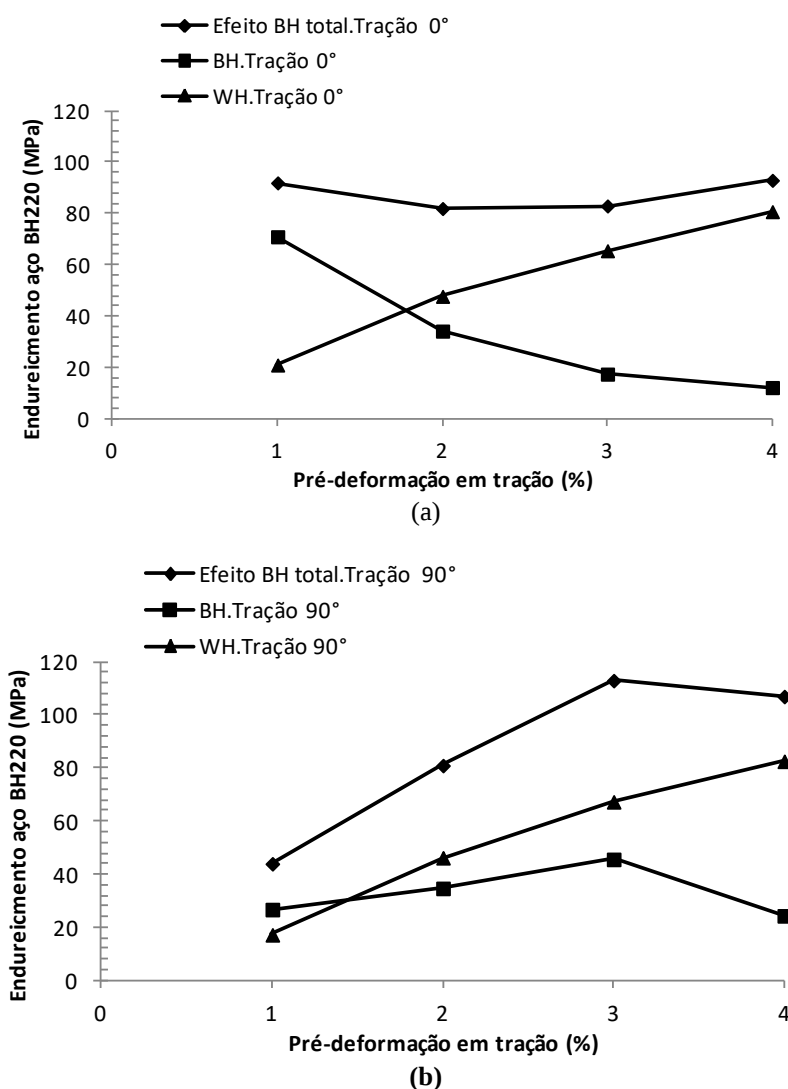


Figura 4 – Gráficos do efeito BH em tração para diferentes valores de pré-deformação:

a) 0°DL e b) 90°DL.

3.4 Estudo do efeito *Bake Hardening* em cisalhamento

De modo similar ao praticado para as amostras avaliadas para o esforço de tração, a Fig.(5) apresenta as curvas de tensão-deformação efetiva em cisalhamento para as amostras pré-deformadas a 0°DL, Fig. (5a), e a 90°DL, Fig. (5b), para os quatro valores de pré-deformação em cisalhamento, ou seja, de 1,20%, 2,25%, 3,20% e 4,25% a 0°DL e de 1,21%, 2,09%, 3,10% e 4,08% a 90°DL. Deve-se explicar que os valores de pré-deformação em cisalhamento foram diferentes devido ao método de medição da deformação cisalhante, o qual depende da variação angular sofrida pelos respectivos corpos de prova.

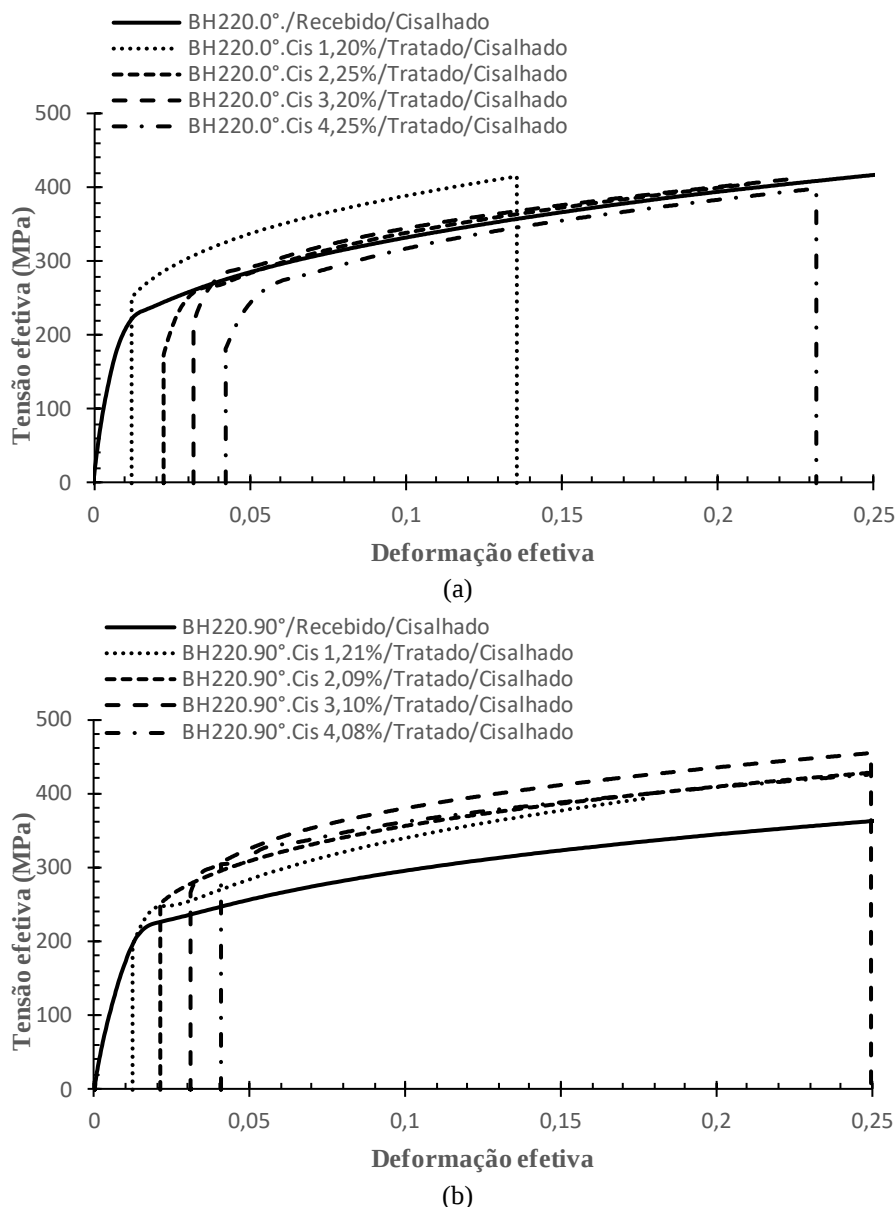


Figura 5 – Curvas tensão-deformação efetiva em cisalhamento para diferentes valores de pré-deformação:

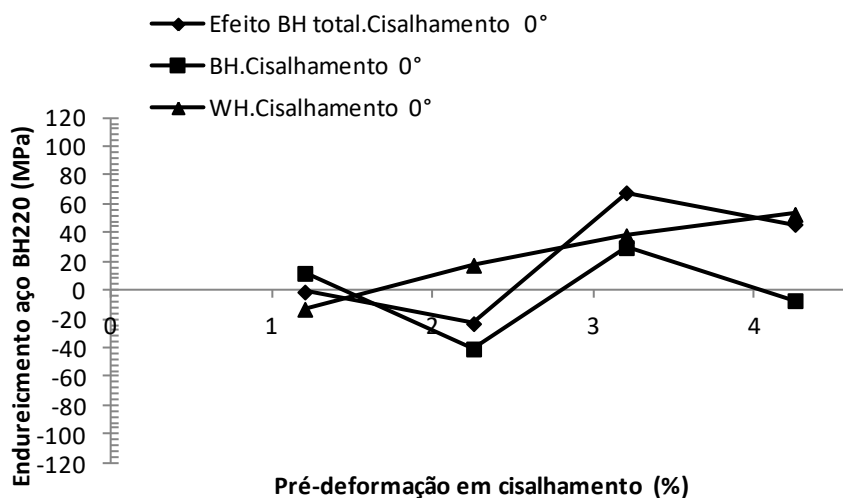
a) 0°DL e b) 90°DL.

A troca do esforço de tração para o de cisalhamento alterou as respostas apresentadas pelo aço BH220 quanto ao efeito BH. Neste último tipo de esforço é possível perceber agora que o maior endurecimento por efeito BH ocorreu para o valor de pré-deformação igual a 3,20% (29,85MPa), embora também ocorrido endurecimento pouco significativo para o menor valor de pré-deformação, 1,20% (1MPa).

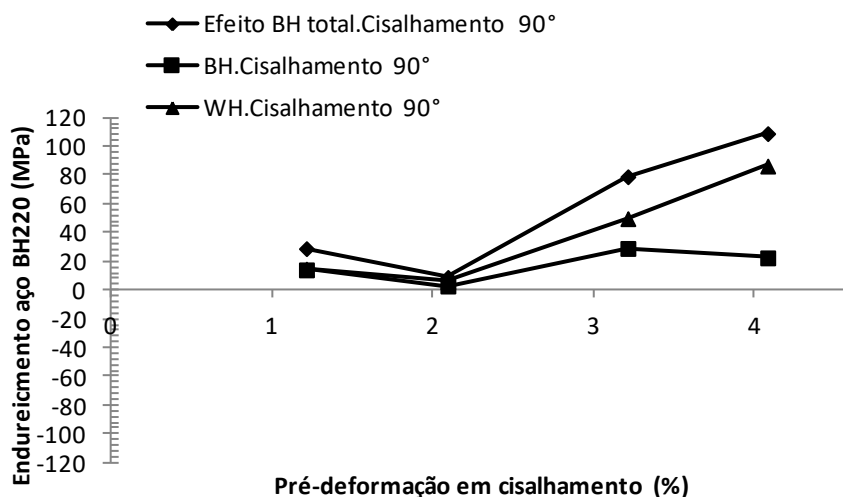
As respostas apresentadas a 90°DL foram as que mais se assemelharam com os resultados obtidos em tração, para essa mesma direção de solicitação mecânica, quando também se percebeu o maior endurecimento para valor de pré-deformação de 3,10% (29,15MPa), mas esse endurecimento foi crescente com o acréscimo do valor de pré-deformação em cisalhamento.

Por fim, percebe-se pela análise da Fig.(6) que a magnitude do endurecimento alcançado pelo aço BH220 sob o esforço cisalhante foi menor (máximo de 29,85MPa para pré-deformação de 3,20% a 0°DL) que o alcançado sob tração (máximo de 71,00MPa para pré-deformação de 1,00% a 0°DL).

Esses resultados revelam novamente a influência do modo e da quantidade de pré-deformação, além da direção de solicitação mecânica no endurecimento por efeito BH do aço BH220. Neste caso, estudos com aço com baixíssimo teor de carbono (0,0032 a 0,0036% em peso) revelaram a influência da segregação de P nos contornos de grão na obtenção da textura de recozimento decorrente do tratamento térmico necessário ao envelhecimento desse aço, afetando a escolha da temperatura e do tempo de encharque para se alcançar as melhores respostas do efeito BH e da textura do material, (Zhang *et al.*, 2017).



(a)



(b)

4. CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a influência do modo de sollicitação mecânica (tração e cisalhamento), da quantidade de pré-deformação (deformação efetiva de 1%, 2%, 3% e 4%) e da direção de sollicitação mecânica (amostras retiradas a 0° e a 90° da direção original de laminação) no endurecimento do aço BH220. Os resultados indicaram:

- o maior endurecimento foi alcançado para o esforço de tração (1,00% a 0°DL) quando comparado com o ensaio de cisalhamento (3,20% a 0°DL);
- o maior endurecimento foi detectado para as amostras retiradas a 0°DL, para ambos os modos de sollicitação mecânica;
- o acréscimo do endurecimento por efeito *Bake Hardening* ocorreu até o valor de pré-deformação de 3% para as amostras testadas por tração e por cisalhamento a 90°DL e foi decrescente, desde o primeiro valor de pré-deformação para as amostras ensaiadas a 0°DL em tração; enquanto a 0°DL em cisalhamento oscilou de acordo com o valor de pré-deformação;
- os resultados indicaram de modo geral a influência do modo de sollicitação mecânica (tração e cisalhamento), da quantidade de pré-deformação (anterior ao tratamento térmico) e da direção de sollicitação mecânica (0° e 90° DL) no endurecimento do aço BH220, sendo notado o maior endurecimento para o esforço de tração, pré-deformado de 1% em amostras retiradas a 0° DL.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEFET-MG pela concessão de bolsas de mestrado e à FINEP pelo apoio financeiro à instituição.

6. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5915-4; 2013, “Chapas e bobinas de aço laminadas a frio. Parte 4: Aços endurecíveis em estufa”, 3 páginas.

Arnab, Chakraborty; Manashi, Adhikary; Venugopalan, T; Virender, Singh; Tarun, Nanda; Kumar, B. Ravi., 2016, “Effect of ferrite-martensite interface morphology on bake hardening response of DP590 steel”, *Materials Science & Engineering, A* 676, pp. 463–473.

Colpaert, H., 2008, “Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”, 4 ed. São Paulo/SP, Blücher, 672p.

Das, Anindya; Tarafder, Soumitro; Sivaprasad, S; Chakrabarti, Debalay. 2015, “Effect of strain rate on bake hardening response of BH220 steel”, *EPJ Web of Conference*, V. 94, ed. 01037, pp. 1–5.

Dias, G. C. B., 2011, “Estudo do efeito Bake Hardening nos aços BH 180 e 220 Galvanizados pelo Processo de Imersão a Quente”, Tese. Universidade de São Paulo: Guaratinguetá, 270p.

Durrenberger, L., Lemoine, X., Molinari, A., 2011, “Effects of pre-strain and bake hardening on the crash properties of a top-hat section”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 211, pp. 1937-1947.

Fredriksson Melander, A; Hedman, M., 1989, “Influence of prestraining and ageing on the fatigue properties of a dual phase sheet steel with tensile strength of 410 MPa”, *Scand J Metall*, v.18, pp.155–165.

Lora, F., 2009, “Caracterização das Propriedades Mecânicas Tecnológicas do Aço BH180 e BH220 e o Cálculo do coeficiente de Atrito no Processo de Estampagem Profunda”, *Contribuição Técnica ao 64º Congresso Anual da ABM*, Belo Horizonte/MG, 13 a 17 de Julho, pp. 1-10.

Silva, E.A., Pereira, M.S., 2012, “Comparação dos efeitos microestruturais entre o aço Bhohtido por tratamento térmico eo aço IF de alta resistência quanto ao efeito *springback*”, *Contribuição Técnica à VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamentos Térmicos*, Atibaia/SP, 17 a 20 de Junho, pp. 112-123.

Senuma, T., 2000, “Physical metallurgy of modern high strength steel sheets”, *ISIJ International*, v. 41, pp. 520-532.

Zhang Xiliang, Liu; Tao, Liu; Xiaoyan, Li; Yongde, Zhang Hongna., 2017, “Effect of P addition on texture evolution of Ti + V- bearing ultra-low carbon bake hardening steel”, *Materials Science&Engineering*, v. 682A, pp. 629-635.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

STUDY THE INFLUENCE OF MODE AND DIRECTION OF MECAHNICALL EFFORTS ON THE BH EFFECT OF BH220 STEEL

Isabela Cristina de Oliveira Alencar, isabelacof@gmail.com¹

Rafael Melo Guimarães, rafaelmelog@hotmail.com¹

Maria Teresa Paulino Aguilar, teresa@ufmg.br²

Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br¹

Wellington Lopes, wellingtonlopes@deii.cefetmg.br¹

¹Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253 Nova Suíça, Belo Horizonte/MG, CEP: 30421-169

²Federal University of Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte/MG, CEP: 31270-901

Abstract: *The hardening due to the restriction to the dislocation movement occurred by the Bake Hardening effect depends on the several variables, such as, the amount of .of pre-strain used during the heat treatment similar to the paint cure temperature in the automotive industry and the direction of mechanical effort (anisotropy). Considering theses aspects, this work presents the study of BH effect of BH220 steel prestrained up to 1%, 2%, 3% and 4% of effective strain in samples retired at 0° and 90° of original rolling direction by tensile and shearing tests. The results indicated the influence of mode and amount of prestrain and direction on the BH effect*

Palavras-chave: *aço BH220, propriedades mecânicas e efeito BH.*