

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO BH220 COM USO DA TÉCNICA DE CISALHAMENTO

Joyce Christine Ribeiro, Joyce-ribeiro@hotmail.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

Resumo: Este trabalho apresenta a investigação do comportamento mecânico de chapas de aço Bake Hardening BH220 em dois estados: laminado/tratado/cisalhado e laminado/cisalhado/tratado/cisalhado com a condução de tratamento térmico de recozimento a 180°C durante 20 minutos de tempo de encharque. A caracterização mecânica foi realizada com uso da dureza Vickers, tração e da técnica de ensaio mecânico por cisalhamento. Os resultados indicaram a influência do modo de pré-deformação (laminação e laminação/cisalhamento) e da quantidade de pré-deformação em cisalhamento (0,4%, 0,8%, 1,6% e 2,4%) no endurecimento do aço BH220 pelo efeito Bake Hardening, sendo observado que o maior endurecimento ocorreu após a combinação de esforços mecânicos durante a pré-deformação e para o menor valor de pré-deformação.

Palavras-chave: Aço BH220, propriedades mecânicas, efeito BH.

1. INTRODUÇÃO

A busca contínua por aços ultra resistentes, mas ainda assim com uma boa conformabilidade rege a indústria automobilística. Além desta demanda crescente, a indústria de automóveis lida com a exigência de atender inúmeros outros parâmetros, tais como: qualidade, entrega ao mercado de um produto sustentável, seguro e com uma boa relação entre peso e consumo de combustível, o que reflete diretamente no controle restrito das emissões atmosféricas por parte dos órgãos fiscalizadores. Sendo assim, é crescente a demanda por aços com tais características, o que justifica o estudo de técnicas que garantam que conformabilidade esteja aliada à resistência mecânica.

Considerando esse aspecto, os *Bake Hardening Steels* ou simplesmente aços BH constituem uma das opções de aços de boa conformabilidade que suportam uma estampagem moderada, porém com baixa resistência mecânica. Quando submetidos ao tratamento térmico de cura por pintura, o chamado efeito *Bake Hardening*, consegue-se um aumento na resistência do aço sem afetar sua estampabilidade. Baixos limites de escoamento da ordem de 200 MPa são comumente apresentados por estes aços, bem como um aumento de aproximadamente 40 MPa em sua resistência mecânica após o tratamento de envelhecimento pelo efeito BH (Lombardo, 2011). O mecanismo utiliza o princípio do envelhecimento por deformação para promover o aumento do limite de escoamento.

Este resultado é alcançado através de tratamento térmico a baixas temperaturas em aços pré-deformados que, como consequência, implica na movimentação de átomos intersticiais (carbono e nitrogênio) até as discordâncias (Dias, 2011). O gráfico da Fig. (1) mostra como este processo de envelhecimento por deformação pode ser aplicado. No trabalho de Kuang, C., et al (2015) as amostras tratadas a partir de diferentes ciclos de recozimento foram pré-deformadas de 2% e em seguida aquecidas a 180°C durante 20 minutos e o efeito BH foi identificado como sendo a diferença entre a tensão de escoamento após o tratamento térmico e a tensão de fluxo alcançada ao término da pré-deformação de 2% em tração.

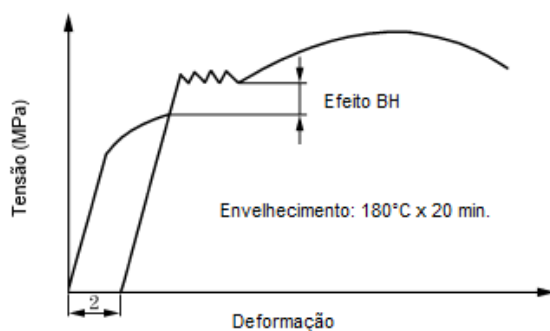


Figura 1. Envelhecimento por deformação (Efeito BH).

A ocorrência do efeito BH requer um valor de tensão maior para provocar a continuidade da deformação ao material, sendo isso reconhecido como um método de endurecimento, como aplicado durante a cura da pintura em veículos. Parker, J. D., et al (2002) afirmam que este procedimento não necessita de etapas adicionais, ou seja, a cura

por pintura não impacta no custo da produção, além de permitir um aumento considerável na resistência final do aço para deformações complexas.

Com o objetivo de quantificar o efeito *Bake Hardening* é necessário definir alguns parâmetros, tais como: composição química, quantidade de deformação plástica e as condições adotadas para o tratamento térmico. Em termos de composição e microestrutura, os aços submetidos ao efeito BH consistem em uma matriz ferrítica com menos de 35ppm de carbono dissolvido (Dias, 2011). Destaca-se ainda que para alcançar o aumento da tensão de escoamento no aço submetido ao efeito *Bake Hardening* torna-se necessário que exista uma concentração suficiente de solutos no aço para que estes fixem as discordâncias (Baker et al, 2002).

Por fim, deve-se considerar que o material tenha sido pré-deformado, pois existe correlação entre a quantidade de pré-deformação plástica imposta ao material e o efeito BH alcançado. Chakraborty, et al (2016) consideram que o tratamento BH em aços com pré-deformações de 1 % a 5% ocasiona um aumento no limite de escoamento além de afetar ainda a ductilidade, levando a uma diminuição na mesma para altos valores de pré-deformação, em função das condições iniciais do material e das condições adotadas para a realização do tratamento térmico (escolha do tempo de encharque e temperatura de aquecimento) de modo a possibilitar o endurecimento do aço.

Considerando esses aspectos, este trabalho apresenta o estudo do endurecimento por efeito *Bake Hardening* do aço BH220 a partir da deformação em laminação e cisalhamento, com diferentes valores de pré-deformação neste último modo de deformação plástica e tratamento térmico realizado a 180°C durante 20 minutos com posterior resfriamento ao ar. Os resultados com relação à evolução da resistência em função dessas variáveis serão exibidos a seguir.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O material empregado neste trabalho foi o aço BH220, cuja composição química é apresentada 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

Neste caso, foram utilizadas amostras em dois estados: uma no estado recebido, com deformação efetiva em laminação de 1% e outra no estado laminado e cisalhado com diferentes valores de pré-deformação, além da deformação efetiva de 1% em laminação.

A caracterização microestrutural do aço foi feita utilizando-se a técnica de microscopia ótica (MO), com uso do microscópio óptico Fortel e sistema de aquisição de imagens Kontrol M713. O objetivo desta caracterização foi avaliar a distribuição da matriz ferrítica deste aço no estado como recebido.

Com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico e, posteriormente, o efeito BH, as amostras de aço foram laminadas a frio com uso do laminador FRÖHLING, com cilindros de laminação de 200 mm de diâmetro, velocidade de rotação do cilindro de 6,25 mm/minuto, sendo adotado um valor fixo de deformação efetiva de 1%.

Outro modo de deformação adotado para o aço BH220 foi o cisalhamento mediante a utilização de um dispositivo adaptado à máquina universal de ensaios Instron 5582, sendo todos os ensaios realizados sob taxa de deformação igual a 0,001/s. As amostras foram submetidas a percentuais de pré-deformação efetiva de 0,4% a 2,4%.

As amostras somente laminadas de 1% e as laminadas e cisalhadas foram em seguida tratadas termicamente em um forno do tipo mufla Magnus a 180°C durante 20 minutos com resfriamento subsequente ao ar.

Como método de avaliação da resistência mecânica inicial do aço BH220 fez-se a dureza das amostras em um microdurômetro Shimadzu modelo HMV 2T, com penetrador Vickers, utilizando uma carga de 300 gf e tempo de indentação de 15 segundos. Já 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 menos a 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)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização mecânica do aço BH220

Apesar do pequeno valor de deformação praticado na laminação verificou-se que a deformação efetiva de 1% foi suficiente para endurecer o aço BH220 quando comparado ao estado inicial do mesmo. A dureza média encontrada na amostra no estado recebido foi de $120,3 \pm 3,13$ HV enquanto que no estado laminado foi de $131,5 \pm 4,7$ HV, observando-se assim a ocorrência do endurecimento por encruamento devido à realização da laminação a frio.

A Tab.(2) exibe as propriedades mecânicas do aço BH220 no estado como recebido avaliadas a partir do ensaio de tração, enquanto a Tab.(3) apresenta a análise da resistência mecânica avaliado em cisalhamento para as amostras na condição de estado laminado/cisalhado/tratadas termicamente/cisalhadas em função da quantidade de pré-deformação.

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

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

Tabela 3. Tensão limite de escoamento em cisalhamento em função da pré-deformação aço BH220.

Parâmetro	Propriedades Mecânicas				
	Condição				
Percentual de pré-deformação	Laminado 1%	Laminado 1% e Cisalhado 0,4%	Laminado 1% e Cisalhado 0,8%	Laminado 1% e Cisalhado 1,6%	Laminado 1% e Cisalhado 2,4%
Tensão Limite de Escoamento Cisalhante (MPa)	180	210	240	240	250

Percebe-se o aumento da resistência mecânica devido ao encruamento com a aumento do percentual da pré-deformação em cisalhamento além da própria deformação em laminação. Tais valores de deformação em cisalhamento foram escolhidos de modo similar aos comumente praticados em tração, como é o caso no trabalho de Zhang, J., et al (2008) em que pré-deformações de 0 a 10% em tração foram submetidas aos aços TRIP e DP e, similarmente, no trabalho de Chakraborty, et al (2016) em que as amostras do aço DP 590 foram pré-deformadas de 1% até 5% em tração. Ambos os trabalhos exibem endurecimento máximo para valores reduzidos de deformação, em torno de 2%.

3.2. Caracterização microestrutural dos estados iniciais do aço BH220

Nas Fig. (2) são apresentadas as fotomicrografias das amostras no estado recebido e laminado, respectivamente.

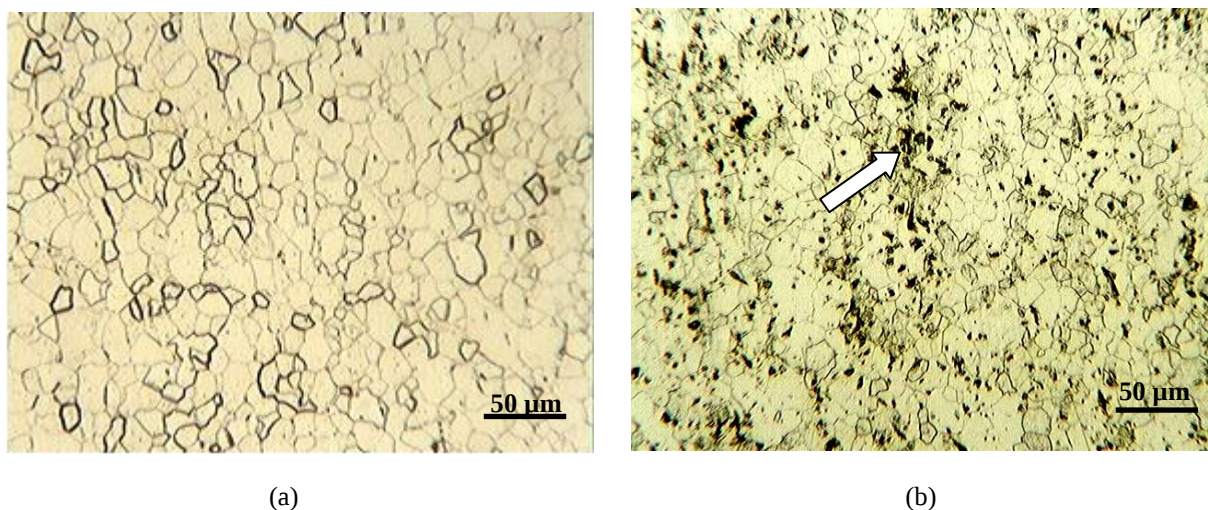


Figura 2. Fotomicrografias do aço BH220 no estado recebido (a) no estado laminado (b).

Pela análise da Fig.2 é possível identificar a presença de ferrita em ambos os estados do aço BH220, recebido e deformado em laminação, não apresentando nesta última condição, mudanças significativas na microestrutura, considerando ainda que a quantidade de deformação efetiva em laminação foi de apenas 1%. No entanto, é possível perceber algumas contaminações (assinaladas em branco na Fig.2(b)) decorrente do processo de preparação metalográfica por lixamento e polimento mecânicos.

3.3. Estudo do efeito *Bake Hardening* em função do modo e quantidade de deformação plástica

3.3.1 Rota Laminado 1%/Tratado/Cisalhado

A observação do gráfico da Fig. (3) permite afirmar que a deformação prévia por laminação a frio de 1% foi suficiente para provocar o endurecimento do aço BH220 por efeito *Bake Hardening*, quando se compara com a condição do estado inicial desse mesmo material (condição recebido/cisalhado).

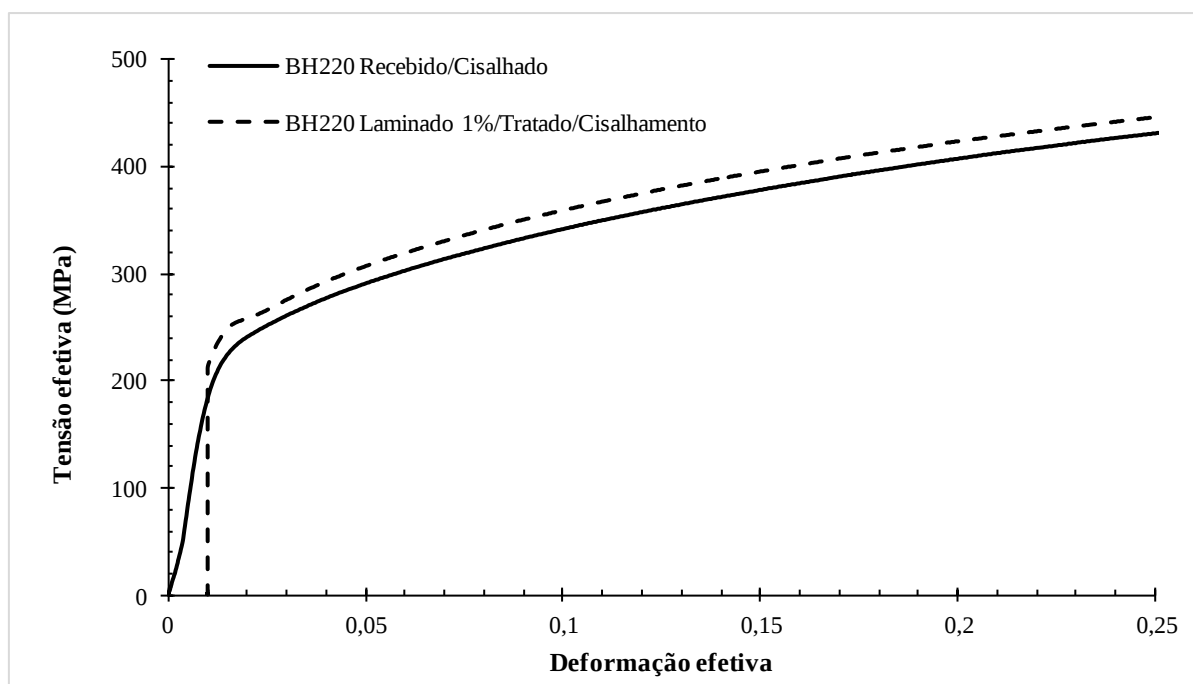


Figura 3. Gráfico tensão-deformação efetiva para o estado como recebido e laminado 1%/tratado/cisalhado para o aço BH220

Já para a rota composta por laminação 1%/cisalhamento/tratamento térmico/cisalhamento, Fig.(4), verificou-se que o endurecimento devido ao efeito BH para essa condição de deformação plástica foi maior que o observado na rota laminação 1%/tratamento térmico/cisalhamento, ou seja, isso indica a influência do cisalhamento adotado durante a pré-deformação do aço BH220 como método de deformação que auxiliou no endurecimento por efeito BH desse aço.

Nota-se ainda que o endurecimento por efeito BH foi maior para o menor valor de pré-deformação praticado em cisalhamento, ou seja, 0,4% de deformação efetiva em cisalhamento, para em seguida reduzir com o acréscimo da quantidade de pré-deformação em cisalhamento. Neste caso, a saturação do efeito BH para o aço BH220 quando pré-deformado em cisalhamento ocorreu para o valor de pré-deformação de 2,4%, quando se observou amaciamento.

Por fim, verifica-se ainda que a combinação de esforços mecânicos utilizados durante a pré-deformação, laminação e cisalhamento, possibilitou um acréscimo da quantidade de deformação plástica capaz de provocar o endurecimento por efeito *Bake Hardening* do aço BH220, quando comparada com a adoção de um único modo de pré-deformação.

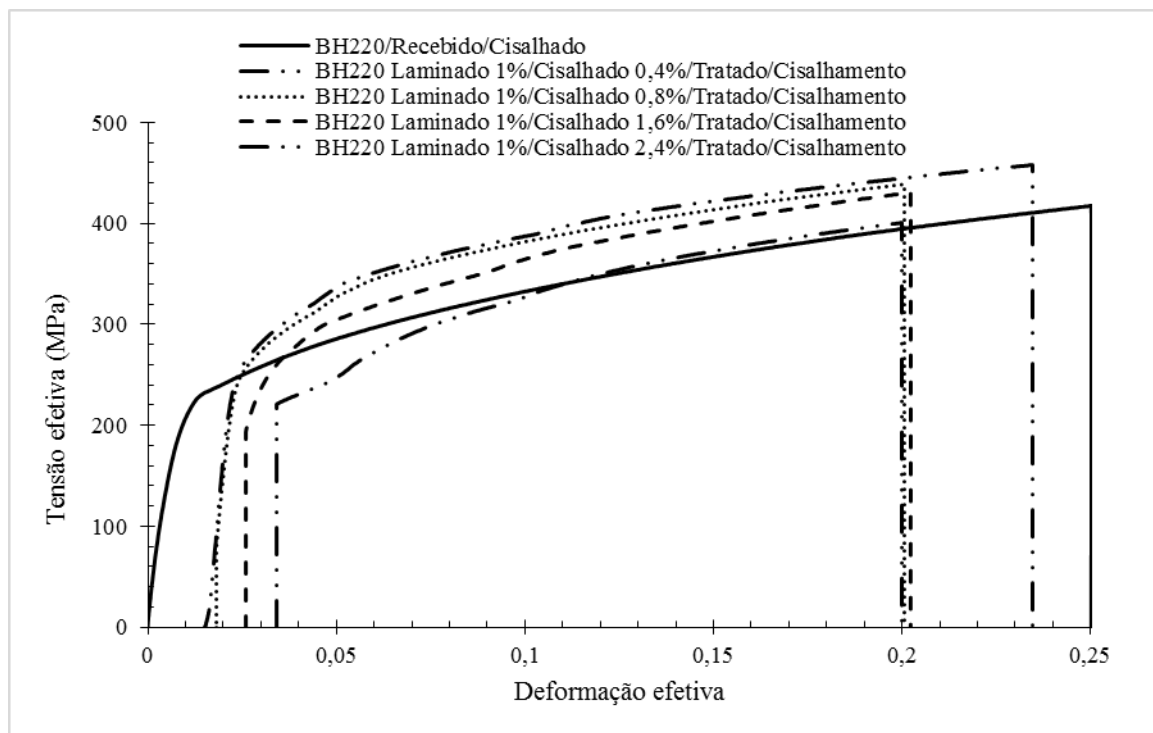


Figura 4. Gráfico curvas tensão-deformação efetiva para a rota laminação/cisalhamento/tratamento térmico/cisalhamento para o aço BH220.

Estes resultados mostram a influência do modo e da quantidade de pré-deformação (laminação e cisalhamento) no aumento da resistência mecânica do aço BH220. Quando a pré-deformação foi realizada apenas com a laminação a frio, o endurecimento do aço BH220 por efeito *Bake Hardening* ocorreu quando comparada com a condição de estado inicial desse material (vide Fig.(3) e Tab.(3)), mas quando a pré-deformação em laminação recebeu a adição do cisalhamento como método de pré-deformação nota-se a redução gradual do endurecimento por BH com o acréscimo da quantidade de pré-deformação em cisalhamento.

Com o objetivo de detalhar os valores do endurecimento proveniente do efeito *Bake Hardening* (BH) e do encruamento (WH), a Tab.(3) apresenta os valores desses índices em função da quantidade de pré-deformação em laminação e em cisalhamento utilizada neste trabalho.

Tabela 3. Efeito BH em função da condição do aço BH220

Condição	WH (MPa)	BH (MPa)	BH total (MPa)
Laminado 1%/Tratado/Cisalhado (<i>Ref. Cisalhamento monotônico</i>)	21,40	17,60	39,00
Laminado 1%/Cisalhado 0,4%/Tratado/Cisalhado	-135,40	158,40	23,00
Laminado 1%/Cisalhado 0,8%/Tratado/Cisalhado	-68,30	77,30	9,00
Laminado 1%/Cisalhado 1,6%/Tratado/Cisalhado	-20,34	33,34	13,00
Laminado 1%/Cisalhado 2,4%/Tratado/Cisalhado	31,34	-49,34	-18,00

Os resultados mostrados na Tab.(3) indicam que o endurecimento proveniente do encruamento (WH) começou a ocorrer para o valor de pré-deformação em cisalhamento de 1,6%, em substituição ao endurecimento por efeito *Bake Hardening* (BH) que para este valor de pré-deformação apresentou redução do seu valor.

Com o objetivo de indicar a tendência de comportamento mecânico do aço BH220 em função da condição desse material, é mostrada na Fig. (5) a evolução do efeito BH total em função do modo adotado para a deformação plástica desse material. Pode-se observar novamente que o maior endurecimento do aço BH220 aconteceu quando foi feita a combinação dos modos de pré-deformação (laminação e cisalhamento) e para o menor valor de deformação em cisalhamento (0,4%).

Tais resultados são compatíveis com a literatura (Zhang, J., *et al*, 2008; Chakraborty, *et al* 2016) e explicados pela formação da atmosfera de Cottrell. Sabe-se que a presença de discordâncias na estrutura cristalina resulta em tensão residual naquela região que promovem o endurecimento do material. A movimentação destas discordâncias causa deformações plásticas no material. A formação da atmosfera de Cottrell ocorre durante o tratamento térmico uma vez que os átomos intersticiais de carbono, presentes na microestrutura, segregam para as discordâncias formando, assim, a

atmosfera de Cottrell. Sendo assim, na deformação posterior ao tratamento térmico é necessário maior tensão para movimentar estas discordâncias. (Zhang, J., *et al*, 2008).

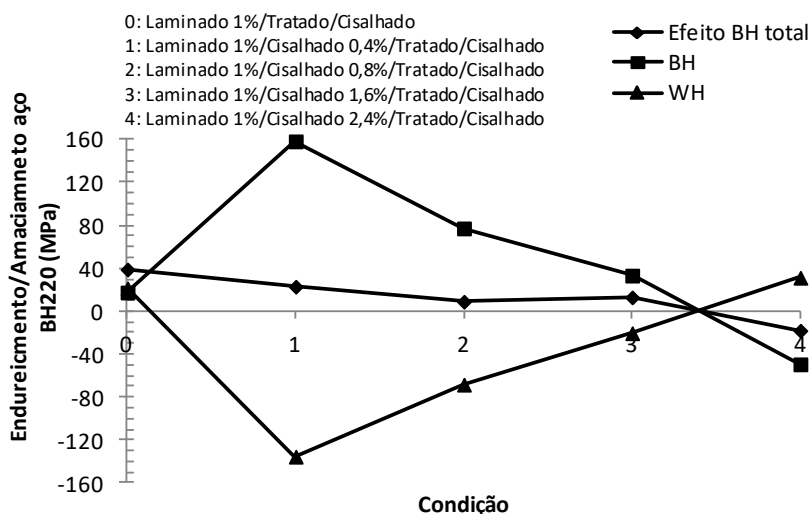


Figura 5. Gráfico efeito BH total em função da condição do BH220.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feito o estudo da influência do modo usado para a pré-deformação do aço BH220 (laminação e cisalhamento) e da quantidade de pré-deformação em cisalhamento (0,4%, 0,8%, 1,6% e 2,4% de deformação efetiva em cisalhamento) no endurecimento desse material quando tratado termicamente a 180°C durante 20 minutos. Os resultados indicaram:

- a influência do modo e da quantidade de pré-deformação no endurecimento por efeito *Bake Hardening* do aço BH220;
- a ocorrência do maior endurecimento por efeito *Bake Hardening* quando foi feita a combinação dos esforços de pré-deformação compostos pela laminação a frio e pelo menor valor de pré-deformação em cisalhamento, ou seja, de 0,4% de deformação efetiva.

Estas informações possuem grande relevância para a indústria automobilística, já que a obtenção de uma rota de deformação definida bem como parâmetros quantitativos experimentalmente testados garantem rapidez na decisão quanto aos ensaios térmicos e mecânicos adequados a este material o que, consequentemente, irá otimizar sua aplicação e reduzir o custo em termos de estudos de técnicas adequadas.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Baker et al. Metallurgy and processing of ultralow carbon bake Hardening steels. *Materials Science and Technology*, v. 18, n. 4, pp. 355-368, Mar. 2002.
- Baker, L., J., Daniel, S., R, Parker, J., D. Metallurgy and Processing of Ultralow Carbon Bake Hardening Steels. *Materials Science and Technology*. 2002; Vol. 18.
- Dias, G. C. B. Estudo do efeito “Bake Hardening” nos aços BH 180 e 220 galvanizados pelo processo de imersão a quente. 2011. 98f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
- Lombardo, S. Estudo do envelhecimento após deformação em um aço complex phase. 146f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
- Kuang, C., Wang, J., Li, J., Zhang, S., Liu, H., Yang, H. Effect of Continuous Annealing on Microstructure and Bake Hardening Behavior of Low Carbon Steel. *Science Direct*. 2015; Vol. 22 (2), pp. 163-170.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

STUDY OF MECHANICAL BEHAVIOR OF BH220 STEEL USING SHEARING TEST TECHNIQUE

Joyce Christine Ribeiro, Joyce-ribeiro@hotmail.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: This work presents the investigation of mechanical behavior of BH220 steel, Bake Hardening steel in two conditions: rolled/heat treated/sheared and rolled/ sheared/head treated/sheared with annealing conducted at 180°C during 20 minutes. The mechanical characterization was analyzed by Vickers hardness, tensions and shearing tests. The results indicated the influence of the mode used by pre-strain of BH220 steel (rolling and rolling/shearing) and the amount of pre-strain in shearing tests (0.5%, 0.8%, 1.6% e 2.4%) on the hardening of this material by Bake Hardening effect. The higher hardening detected was observed for the route composed by rolling and shearing as modes used for pre-straining and for the smaller value of pre-straining in shearing.

Key-words: BH220 steel, mechanical properties and BH effect.