

ESTUDO DO EFEITO BH PARA O AÇO BH180 EM FUNÇÃO DA PRÉ-DEFORMAÇÃO E DIREÇÃO DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA

Luís César dos Santos, luicesar02@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

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 devido ao efeito *bake hardening* depende, dentre outros fatores, da quantidade de pré-deformação aplicada antes da realização do tratamento térmico com posterior recarregamento. Neste trabalho, avaliou-se a quantidade de pré-deformação no aço BH180, valores estes de 0,5%; 2%; 4%; 6% e 12% de deformação efetiva em tração, em amostras a 0° e a 90° em relação a direção original de laminação (DL). Os resultados mostraram que não houve efeito significativo da anisotropia no valor BH, sendo que o efeito BH para as duas direções tem maior parcela no endurecimento total do aço BH180 até 2% de pré-deformação. Nota-se uma participação maior do endurecimento por encruamento no endurecimento total do aço BH180 com o aumento da pré-deformação para ambas direções de ensaio após 2% de deformação efetiva.

Palavras-chave: aço BH180, pré-deformação e efeito BH

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda da indústria automobilística para utilização de materiais que possibilitem a redução do peso dos carros, menor consumo de combustível bem como no aumento da segurança dos veículos, levou ao estudo de uma nova variedade de aços que pudesse atender as novas condições de serviço (Baker, 2002; Souza et al., 2010; Ramazani et al., 2014).

Dentre eles, os aços *bake hardening* ou endurecíveis pela cura da pintura se encaixam nessa classe de materiais desenvolvidos nas últimas décadas. De acordo com Chen et al. (2013) os aços BH apresentam inicialmente um valor para a tensão limite de escoamento que o caracteriza com boa conformabilidade e, depois de um processo de cura da pintura (tratamento térmico a temperatura entre 170° e 200° por cerca de 20min), apresentem um acréscimo na resistência a indentação.

O tratamento térmico, o qual o aço BH180 é submetido, possibilita a difusão do carbono em solução sólida para as discordâncias geradas durante a conformação do componente, sendo essa interação entre solutos intersticiais e discordâncias a responsável pelo ganho em resistência mecânica, mais especificamente na tensão de fluxo após o material ser conformado e tratado termicamente (BHADESHIA et al., 2008; KUANG et al., 2015a; KUANG et al., 2015b).

O aumento da resistência mecânica devido ao efeito *bake hardening* é comumente avaliado por meio de testes de tração, sendo ele relacionado dentre outros fatores, a quantidade de deformação aplicada antes do tratamento térmico, que simula a operação de cura da pintura aplicada na indústria automobilística em termos de temperatura e tempo.

O presente trabalho teve o intuito de avaliar o valor BH de acordo não só com a quantidade de pré-deformação aplicada, mas também com a direção de retirada das amostras em relação a direção original de laminação, a 0°DL e 90°DL. Para isso, foi adotado como método de ensaio, assim como diferentes autores que caracterizaram o efeito *bake hardening* (Wang et al, 2011b; Souza et al, 2010; Kuang et al, 2014a; Kilic et al, 2015; Seth et al, 2015), o ensaio de tração.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi o aço BH180 de composição química correspondente a Tabela (1) e tamanho de grão de acordo com o número ASTM de tamanho de grão (ASTM E112) igual a 8. O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal de ensaios Instron 5982, com sistema de aquisição de dados Blue Hill 3, utilizando-se extensômetro Instron modelo 2630-106 com abertura máxima de 25mm.

Primeiramente fez-se a caracterização mecânica do aço BH180 mediante ensaio de tração para amostras retiradas a 0°DL e a 90°DL. Nessa etapa, teve-se o intuito de avaliar os valores das propriedades mecânicas de LE (Limite de escoamento (MPa)), LRT (Limite de resistência a tração (MPa)) e AU (Alongamento uniforme (%)) tanto a 0°DL

quanto a 90°DL, a partir de curvas de tensão convencional em função da deformação convencional. O valor de LE para cada direção foi usado como referência para o estudo do efeito *bake hardening* de acordo com a pré-deformação aplicada.

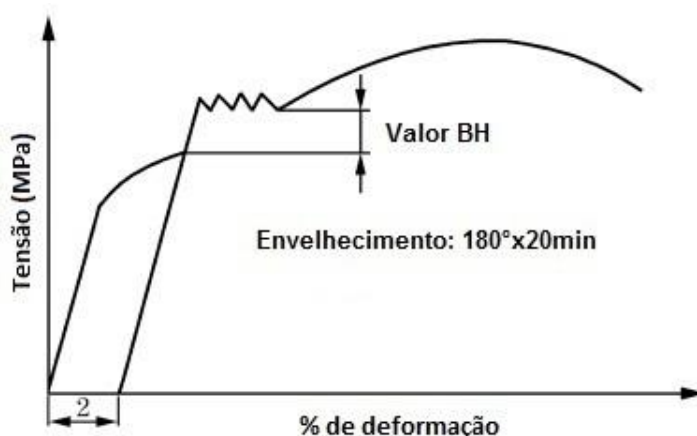
Tabela 1: Composição química aço BH180 via espectroscopia por emissão óptica

Composição Química Aço BH180					
%C	%Mn	%Al	%P	%S	%Si
0,0150	0,280	0,0569	0,0140	0,0209	0,0287

O efeito *bake hardening* é considerado a diferença entre o valor de tensão de fluxo após realização do tratamento térmico de envelhecimento por deformação (LE_2) e o valor de tensão de fluxo para a pré-deformação aplicada anterior ao tratamento térmico (LE_1) (ABNT 5915-4), como indicado na Equação (1). Graficamente, o valor BH, resultado da ocorrência do efeito *bake hardening* é medido da maneira indicada na Figura (1).

$$BH = LE_2 - LE_1 \quad (1)$$

Figura 1: Valor BH devido a realização do tratamento térmico de efeito *bake hardening*



Assim como o valor BH, é possível medir a quantidade de endurecimento por encruamento (WH) de acordo com a pré-deformação aplicada, mediante diferença entre a tensão de fluxo no valor de pré-deformação escolhido (LE_f) e o valor do limite de escoamento do material (LE), como descrito na Equação (2).

$$WH = LE_f - LE \quad (2)$$

Para investigar a possível influência da anisotropia no valor BH para o aço BH180 foi realizado valores de pré-deformações de 0,5%; 2,0%; 4,0%; 6,0% e 12% de deformação efetiva, para ambas direções, a 0°DL e a 90°DL. A escolha dos valores de pré-deformação foi baseada em trabalhos que mostram ganhos significativos de resistência mecânica pelo efeito BH até valores de pré-deformação de aproximadamente 10,0% de deformação (Souza et al., 2010; Wang et al., 2011b; Kuang et al., 2014a), sendo o endurecimento associado com o equilíbrio entre discordâncias móveis e a formação das atmosferas de Cottrell, (KUANG et al., 2015b). Após a pré-deformação as amostras a 0°DL e 90°DL foram submetidas a um tratamento térmico em um forno mufla Magnus a 180°C durante 20 minutos com posterior resfriamento ao ar, com o intuito de simular o processo de cura da pintura feito na indústria automotiva. Com a realização do tratamento térmico as amostras serão recarregadas também mediante ao ensaio de tração.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Propriedades Mecânicas aço BH180

A realização de ensaios de tração no estado como recebido a 0°DL e a 90°DL obteve os seguintes resultados para as propriedades mecânicas de acordo com o indicado na Tabela (2).

Tabela 2: Propriedades mecânicas aço BH180 em amostras a 0°DL e a 90°DL.

Propriedades Mecânicas em Tração – Recebido			
Direção	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)
0°	210,50 ± 2,12	324,81 ± 3,75	20,75 ± 0,35
90°	197,50 ± 0,08	312,40 ± 1,19	19,50 ± 2,83

É possível observar diferenças nos valores das propriedades mecânicas em função da direção em que as mesmas foram medidas. Destaca-se entre as propriedades mecânicas medidas o fato de o valor de LE ser maior para amostras tracionadas na direção 0°DL do que a 90°DL, constatando a anisotropia do material.

3.2 Efeito BH de acordo com a pré-deformação e direção de solicitação mecânica

As curvas de fluxo que representam o processamento em tração de acordo com os valores de pré-deformação adotados estão representadas na Figura (2), para amostras tracionadas a 0°DL e pela Figura (3), para amostras tracionadas a 90°DL.

Figura 2: Curvas tensão efetiva em função da deformação efetiva para amostras tracionadas a 0°DL.

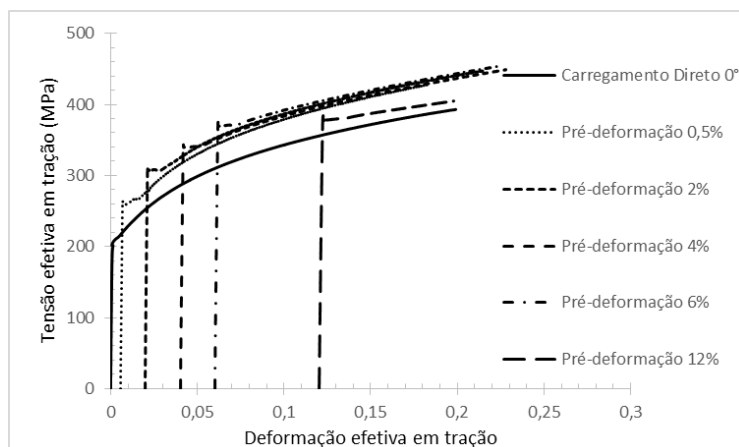
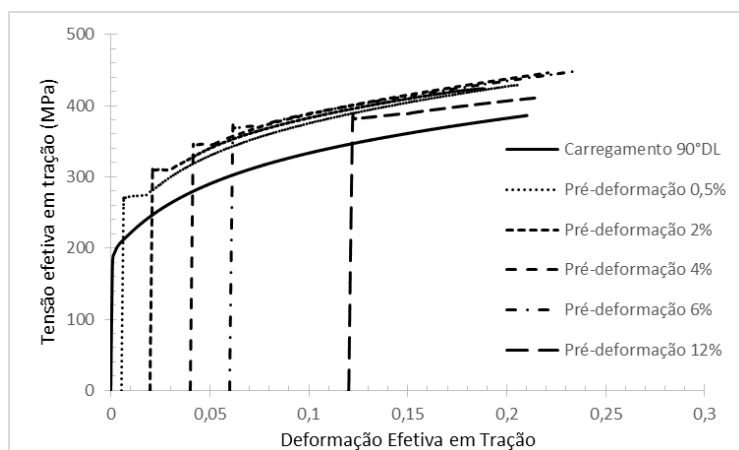


Figura 3: Curvas tensão efetiva em função da deformação efetiva para amostras tracionadas a 90°DL.



Os valores obtidos de acordo com a pré-deformação aplicada para o valor BH e o encruamento podem ser constatados na Tabela (3) para ambas as direções de ensaio. Um gráfico de tendências que demonstra o comportamento do aumento da resistência mecânica por efeito *bake hardening* (BH) e pelo encruamento (WH) pode ser constatado mediante Figura (4), para amostras a 0°DL e pela Figura (5) para amostras a 90°DL.

Tabela 3: Aumento da resistência mecânica pelo efeito *bake hardening* (BH) e o encruamento do material (WH) de acordo com a pré-deformação e direção.

Direção	Ganho em Resistência Mecânica					
	Pré-deformação (%)	Valor BH (MPa)	WH (MPa)	Total (MPa)	%BH	%WH
0°	0,5	53,44 ± 7,31	2,90 ± 0,04	56,33	94,85	5,15
	2	55,20 ± 2,24	42,99 ± 0,40	98,19	56,21	43,79
	4	58,10 ± 1,63	75,28 ± 0,76	133,39	43,56	56,44
	6	56,52 ± 9,58	98,77 ± 1,91	155,29	36,40	63,60
	12	19,27 ± 5,85	145,37 ± 3,59	164,64	11,70	88,30
90°	0,5	57,08 ± 4,28	10,62 ± 0,02	67,71	84,30	15,70
	2	55,65 ± 6,57	48,77 ± 1,98	104,42	53,29	46,71
	4	56,41 ± 3,11	83,05 ± 2,14	139,47	40,45	59,55
	6	57,87 ± 4,28	106,64 ± 0,96	164,51	35,17	64,83
	12	37,33 ± 8,23	147,96 ± 1,04	185,29	20,14	79,86

Figura 4: Tendência do valor BH e do encruamento WH com a quantidade de pré-deformação a 0°DL.

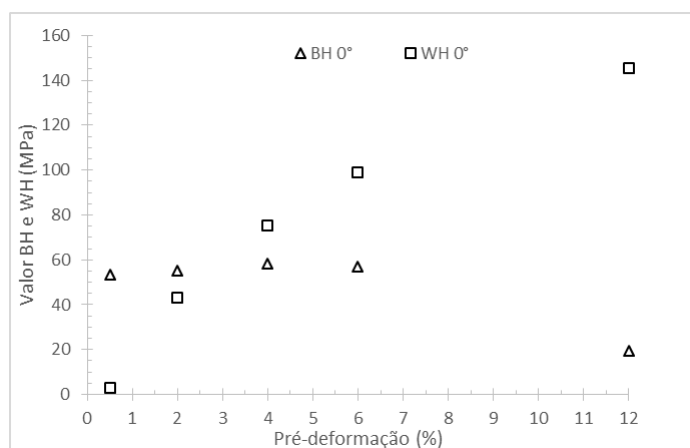
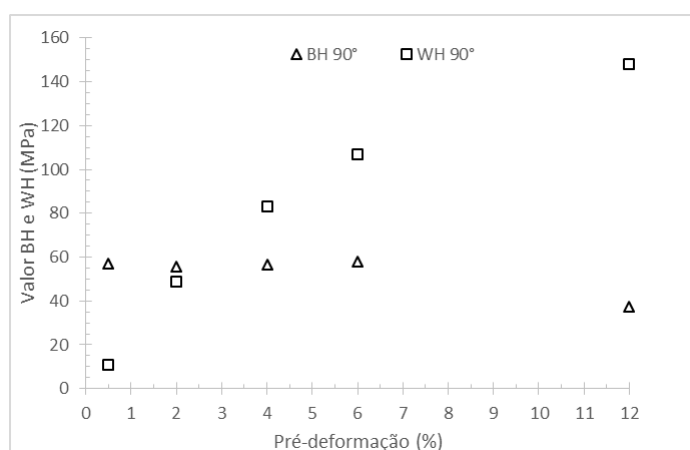


Figura 5: Tendência do valor BH e do encruamento WH com a quantidade de pré-deformação a 90°DL.



Verifica-se que o valor BH mantém-se estável em torno de 55MPa, para as amostras retiradas a 0°DL e pré-deformadas de até 6% de deformação efetiva, fato este também observado por Souza et al. (2010). No entanto, quando o valor de pré-deformação aumenta para 12% de deformação efetiva, a queda no valor BH é considerável, chegando a valores próximos de 20MPa. Essa queda no valor BH pode ser devido ao desbalanceamento entre a densidade de linhas discordâncias e a quantidade de carbono disponível para a formação das atmosferas de Cottrell, de acordo com a quantidade de pré-deformação aplicada. Isto pode acarretar na limitação do ancoramento das discordâncias geradas durante pré-deformação, como mencionado por Kuang et al. (2014a) e Kuang et al. (2014b).

Para amostras retiradas a 90°DL e pré-deformadas até 6% de deformação efetiva, observa-se um comportamento análogo em termos de valor BH quando comparado com os resultados identificados para as amostras tracionadas a 0°DL, com valores próximos de endurecimento por efeito *bake hardening* para as mesmas quantidades de pré-deformação em torno de 55MPa. Isso demonstra que não foi possível identificar efeitos de anisotropia para o valor BH em amostras pré-deformadas em tração de até 6% de deformação efetiva.

Assim como observado para amostras tracionadas a 0°DL de 12% de deformação efetiva, as amostras tracionadas a 90°DL da mesma quantidade de pré-deformação também apresentaram uma queda considerável no valor BH, chegando a valores de 35MPa, que também pode ser explicado pelo mencionado por Kuang et al. (2014a), ou seja, a limitação de carbono em solução sólida para o travamento das discordâncias geradas na pré-deformação.

Pode-se afirmar assim que para valores de pré-deformação de até 6% de deformação efetiva para as direções a 0°DL e a 90°DL que existe um equilíbrio entre atmosferas de Cottrell formadas e aprisionamento de discordâncias geradas na pré-deformação (WANG et al., 2011b).

É possível notar, como esperado, o aumento do endurecimento por encruamento do material (WH) à medida que o valor de pré-deformação cresce para ambas direções de ensaio, sendo observado um encruamento maior para amostras tracionadas a 90°DL do que a 0°DL.

Em termos de endurecimento total, percebe-se que para ambas as direções de ensaio que o efeito *bake hardening* foi responsável por parcela maior do endurecimento até pré-deformações de 2%, enquanto que para valores de pré-deformação maiores, o encruamento torna-se o maior responsável pelo aumento da resistência mecânica, fato esse também observado por Souza et al. (2010).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve o intuito de avaliar o valor BH de acordo com a quantidade de pré-deformação e a direção de aplicação do ensaio de tração, onde constatou-se que:

- a) o aço BH180 apresentou um acréscimo do endurecimento devido ao efeito *bake hardening* para valores de pré-deformação em tração variando de 0,5% a 6,0%, culminando com uma queda desse aumento de resistência para o maior valor de pré-deformação, de 12%.
- b) em termos de endurecimento total, foi constatado que o aumento da resistência mecânica devido ao efeito *bake hardening* teve maior contribuição para valores de pré-deformação de até 2% de deformação efetiva, para ambas direções de ensaio, tendo o encruamento como o maior responsável pelo endurecimento nos valores de pré-deformação maiores.
- c) para as condições de deformação plástica e tratamento térmico adotadas neste trabalho pode-se afirmar que a anisotropia não influenciou de modo significativo na ocorrência do efeito *bake hardening*.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES 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

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, **ABNT 5915-4**, Chapas e bobinas de aço laminados a frio Parte 4: Aços endurecíveis em estufa, 2013.
- ASTM International, **ASTM E112-13**, Standard Test Methods for determining Average Grain Size, West Conshohocken, 2013.
- BHADESHIA, H. K. D. H; DAS, S; SINGH, S. B; MOHANTY, O. N. Understanding the complexities of bake hardening. **Materials Science and Technology**, v. 24, n. 1, p. 107-11, 2008.
- BAKER, L. J; DANIEL, S. R; PARKER, J. D. Metallurgy and processing of ultralow carbon bake hardening steels. **Materials Science and Technology**, v. 18, n. 1, p. 355-368, 2002.
- CHEN, Y. L; LAN, S; ZHAO, A. I; KUAI, Z; LI, B. H; LIU, G. M. Effects of rolling parameters on texture and formability of high strength ultra-low carbon BH steel. **Journal of Iron and Steel Research**, v. 20, n. 6, p. 75-81, 2013.
- KILIC, S; OZTURK, F; SIGIRTMAC, T; TEKIN, G. Effects of pre-strain and temperature on bake hardening of TWIP900CR steel. **International Journal of Iron and Steel Research**, v. 22, n. 4, p. 361-365, Mar. 2015.
- KUANG, C. F; ZHANG, S. G; LI, J; WANG, J; LIU, H. F. Effects of pre-strain and baking parameters on the microstructure and bake-hardening behavior of dual phase steel. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 21, n. 8, p. 766-781, Ago. 2014a.
- KUANG, C. F; LI, J; ZHANG, S. G; WANG, J; LIU, H. F. Effects of quenching and tempering on the microstructure and bake hardening behavior of ferrite and dual phase steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 613, p. 178-183, Jul. 2014b.

KUANG, C. F; ZHANG, S. G; LI, J; WANG, J; PEI, L. Effects of temper rolling on the bake hardening behavior of low carbon steel. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 22, n. 1, p. 32-36, Jan. 2015a.
KUANG, C. F; WANG, J; LI, J; ZHANG, S. G; LIU, H. F; YANG, H. L. Effects of continuous annealing on microstructure and bake hardening behavior of low carbon steel. **Journal of Iron and Steel Research**, v. 22, n.2, p. 163-170, 2015b

RAMAZANI, A; BRUEHL, S; GERBER, T; BLECK, W; PRAHL, U. Quantification of bake hardening effect in DP600 and TRIP700 steels. **Materials and Design**, v. 57, p.479-486, 2014.

SETH, P. P; DAS, A; BAR, H. N; SIVAPRASAD, S; BASU, A; DUTTA, K. Evolution of dislocation density during tensile deformation of BH220 steel at different pre-strain conditions. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 24, n. 7, p. 2779-2783, Jul. 2015.

SOUZA, K. E. R; COUTO, A. A; VATAVUK, J; OLIVEIRA, B. O. S. R; AGUIAR, A. A. Influência da pré-deformação plástica no envelhecimento do aço 180 BH. 19º Congresso brasileiro de Engenharia e Ciencia dos Materiais – CBCiMAT, 2010. Campos do Jordão, **Anais...** Campos do Jordão, CBCiMAT, 2010, p. 7203-7210.

WANG, H; SHI, W; HE, Y. L; LIU, P. P; LI, L. Variation of solute distributions during deformation and bake hardening phenomenon in ultra-low carbon bake hardening steels. **Journal of Materials Science**, v.46, p. 5916-5924, 2011b.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

EFFECT OF PRE-STRAIN AND LOADING DIRECTION ON THE BAKE-HARDENING EFFECT OF BH180 STEEL

Luís César dos Santos, luicesar02@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: The hardening due to the bake hardening effect depends, among the others factors, the pre-strain applied before the heat treatment and reloading. In this work, evaluated the amount of pre strain in the BH180 steel, as 0,5%; 2,0%; 4,0%; 6,0% and 12% of effective deformation in tension, in samples of 0° and 90° the original rolling direction (RD). The results showed us anyone meaning effect of anisotropy on the BH value, although the BH effect to the two directions get the major part of total hardening of BH180 steel up to 2% of pre strain. Noticed the major part of work hardening in the total hardening of BH180 steel with the increase of pre strain to both directions of testing after 2% of effective deformation.

Key-words: BH180 steel, pre-strain and BH effect.