
INFLUÊNCIA DA PRÉ-DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NO ENVELHECIMENTO DO AÇO 180 BH

Kriscia E. R. de Souza*

Antonio A. Couto**

Jan Vatavik***

Resumo

Este trabalho analisou a influência da pré-deformação plástica em tração no fenômeno de envelhecimento do aço 180 BH. O ganho de resistência (*bake hardening* – BH) foi determinado aplicando uma deformação inicial de 0%, 1%, 2%, 4%, 6%, 9%, 15% e 20% nos corpos de prova e um tratamento térmico de envelhecimento a 170 °C/20 min. Foi definido que o ganho de resistência se deve ao encruamento (*work hardening* – WH) somado ao efeito BH. Para baixos valores de pré-deformação, o efeito BH é mais pronunciado percentualmente do que o efeito WH. Provavelmente, o aumento de resistência após envelhecimento seja decorrente do endurecimento por solução sólida.

Palavras-chave: Aço 180 BH, pré-deformação, solução sólida.

* Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM).

** Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM).

*** Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM).

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a indústria automobilística é cada vez mais pressionada a cumprir regulamentações no que diz respeito à relação resistência/peso para a fabricação de peças estampadas para painéis externos e reforços que compõem a estrutura de um veículo. Em razão das condições próprias de serviço, a peça acabada deve caracterizar-se por peso relativamente baixo e alta resistência, por estar sujeita a esforços severos e choques repentinos, além de resistência à corrosão adequada (CHIAVERINI, 1990; LAGNEBORG, 1991).

Com isso, o peso do veículo sempre foi encarado como um fator importante, pois as novas exigências e metas de redução de consumo e de emissões de gases aumentam a pressão por veículos mais leves. Uma diminuição de 10% no peso gera uma redução entre 5% e 8% no consumo do veículo, e um abatimento de 100 kg pode resultar em até 12,5 g/km a menos de emissão de CO₂, um auxílio valioso para garantir o cumprimento de novas legislações internacionais de emissões (MIRISOLA, 2009).

O aço 180 BH apresenta características de envelhecimento em estufa e classifica-se conforme o limite de escoamento mínimo de 180 MPa, segundo norma alemã DIN EN 10268. É um aço que combina resistência mecânica e conformabilidade, apresenta baixo limite de escoamento antes da estampagem e aumenta sua resistência mecânica quanto à identificação depois de estampado e pintado mediante processo de pintura sob temperatura (envelhecimento) (WÜEBBELS et al., 2002; DIN EN, 2006).

Esse aço tem auxiliado as montadoras a reduzir o peso da carroceria de seus automóveis. Contudo, nem sempre é aconselhável a utilização desses aços em todas as partes externas do veículo. Estudos recentes sugerem que o envelhecimento cai à medida que a deformação aumenta. Sendo assim, a utilização inapropriada desse aço implica o aumento do custo de fabricação do veículo (SILVA, 2005; OLIVEIRA et al., 2008). Com essa finalidade, há o interesse em estudar especificamente os aços envelhecíveis ao calor e entender melhor a sua aplicabilidade em partes da carroceria, com o propósito de reduzir o peso dos veículos com aumento da eficiência dos motores de combustão interna, o que gerará economia de combustível e aumentará a segurança dos veículos (MAGNABOSCO, 2001).

2 AÇOS *BAKE HARDENING*

Os aços *bake hardening* (BH) caracterizam-se por um acréscimo do limite de escoamento em aproximadamente 35 MPa durante o processo de cura da pintura a 170 °C por 20 minutos. São geralmente aplicados em peças visíveis, tais como portas externas traseiras e dianteiras, capôs externos, para-lamas e tetos, e peças estruturais, como assoalhos, reforços e coluna. A aplicação desse aço permitiu a utilização de chapas mais finas, mais facilmente trabalhadas e com maior resistência do produto final (GORNI, 2008).

Esse aço, depois de estampado e pintado pelo processo de pintura sob temperatura (envelhecimento), apresenta maior resistência mecânica quanto à indentação (problema que ocorre no painel externo quando este recebe algum tipo de choque de um objeto mais rígido, causando um pequeno amassamento no painel menos rígido) e inversão de curvatura do painel externo, de convexa para côncava com a aplicação contínua e gradativa de uma carga (WÜEBBELS et al., 2002).

O efeito BH é uma difusão controlada que resulta da migração de átomos de carbono e nitrogênio em solução na rede para as discordâncias, formando a Atmosfera Cottrel. Com isso, será necessária a aplicação de uma tensão maior para fazer que a discordância se livre da atmosfera ou se mova junto com os átomos. A difusão desses átomos é função do tempo, da temperatura e da quantidade de átomos em solução presente no material. O tamanho de grão e densidade de discordâncias também pode influenciar nesse processo (MACHADO, 2005; ZHANG et al., 2008).

Um método de medida do aumento de resistência do material devido ao efeito BH consiste em subtrair a resistência mecânica do aço para uma determinada porcentagem de deformação do menor patamar do limite de escoamento após o tratamento em estufa a 170 °C por 20 minutos. A Figura 1 mostra esquematicamente o mecanismo e esse método para uma pré-deformação de 2%.

2.1 Relação do ensaio de tração com estampagem profunda

Para mensurar o grau de deformação de uma peça estampada, poderá ser utilizado um pedaço de chapa deste aço previamente gravado eletroquimicamente com círculos ou quadrados. Depois de esta chapa ter sido deformada, medem-se as alterações nos formatos dos círculos ou quadrados com um equipamento fotográfico que transfere os valores para o computador por meio de um software apropriado como mostrado na Figura 2. Esses valores percentuais medidos na peça deverão estar abaixo da curva limite de conformação, indicando que o produto está na zona de segurança (ASAME TECHNOLOGY LLC, 2010).

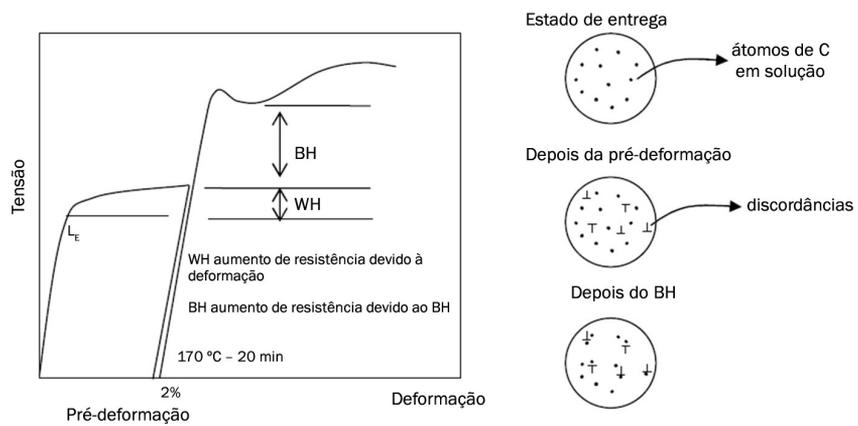


Figura 1 Ilustração esquemática mostrando o mecanismo de envelhecimento por deformação e o método de medida do aumento de resistência do material devido ao efeito BH.

Fonte: Kantovicki (2000/2001).

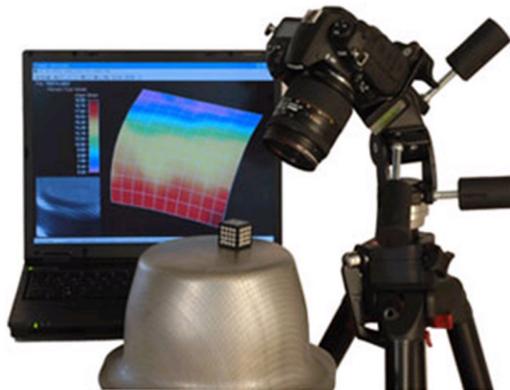


Figura 2 Equipamento que mede as deformações após estampagem.

Fonte: Asame Technology LLC (2010).

Uma das maneiras mais simples de simular em laboratório a estampagem profunda é por ensaio de tração, com corpos de prova gravados em círculos ou quadrados. Nesse ensaio uniaxial, só é possível demonstrar o embutimento profundo. A Figura 3 mostra um exemplo de um corpo de prova com a gravação desde o momento inicial do ensaio até a ruptura (ASAME TECHNOLOGY LLC, 2010).

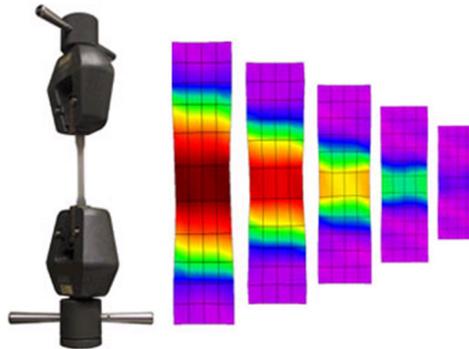


Figura 3 Corpo de prova com gravação eletroquímica.

Fonte: Asame Technology LLC (2010).

Quando a chapa é deformada por tração, os círculos são distorcidos passando à forma elíptica (embutimento profundo). Pode ser observado na Figura 4 o mecanismo da estampagem profunda, em que as linhas circulares são relativas ao formato inicial, e a linha oval, ao formato final deformado. Após ter todas as medidas das linhas circulares e ovais, é possível calcular as porcentagens de deformação como mostrado na Figura 4. A porcentagem dada do ensaio de tração deve ser igual à porcentagem da estampagem.

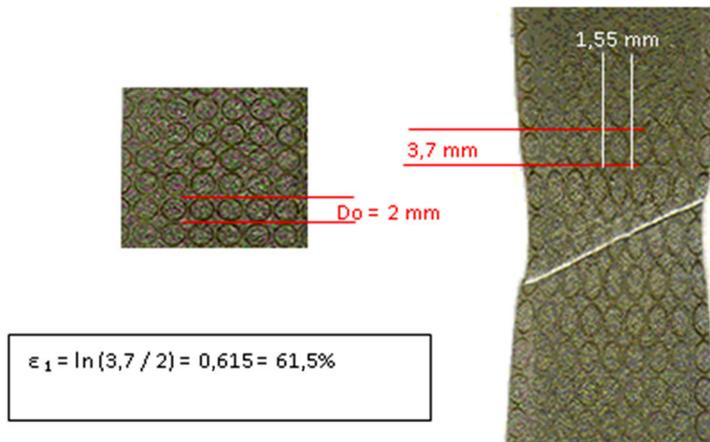


Figura 4 Chapa com grade de círculos com 2 mm de diâmetro e demonstração dos cálculos realizados.

Fonte: Asame Technology LLC (2010).

3 PARTE EXPERIMENTAL

O aço 180 BH foi submetido à análise da composição química para verificar se está de acordo com as especificações da norma DIN EN 10268. Para o dimensionamento e formato dos corpos de prova, foi utilizada a norma ABNT NBR 6673 (1981) que também descreve o ensaio de tração. Para a aplicação das pré-deformações, utilizaram-se 27 corpos de prova do aço 180 BH, que foram divididos em oito lotes com três corpos de prova identificados com as letras A, B e C, visando à ordenação da realização dos ensaios, assim como à respectiva porcentagem de pré-deformação (0%, 1%, 2%, 4%, 6%, 9%, 15% e 20%). Os três corpos de prova restantes foram identificados apenas com as letras A, B e C e usados para ensaio de tração convencional para referência.

Os corpos de prova pré-deformados e os não deformados foram envelhecidos em estufa aquecida e estabilizada a 170 °C por 20 minutos. Após o envelhecimento, os corpos de prova foram retirados da estufa e espalhados ao ar para esfriamento natural. A seguir os corpos de prova foram ensaiados em tração para conclusão dos ensaios, porém sem a necessidade de levá-los até a ruptura, pois o importante nessa segunda parte do ensaio é o valor do limite de escoamento após o envelhecimento. A análise metalográfica foi realizada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), antes e depois da realização do ensaio de tração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise química do aço 180 BH é apresentada na Tabela 1, com porcentagens dos elementos na faixa de composição nominal desse aço. Os resultados dos ensaios de tração convencional para o aço 180 BH não previamente deformado são apresentados na Tabela 2.

TABELA 1

Composição química do aço 180 BH utilizado neste trabalho

Elementos	Aço 180 BH Porcentagem
Carbono	0,007
Manganês	0,227
Fósforo	0,032
Enxofre	0,013
Alumínio	0,066
Titânio	0,001

Fonte: Elaborada pelos autores.

TABELA 2

Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração de corpos de prova do aço 180 BH sem pré-deformação e não envelhecidos

Identificação do corpo de prova	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
A	343	213	41,5
B	336	207	38,9
C	336	210	41,5
Média	338,33	210	40,63

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os cálculos de ganho de resistência mecânica em porcentagem e em MPa decorrentes dos efeitos BH e WH foram determinados a partir da diferença da resistência mecânica obtida nos ensaios de tração antes e depois da pré-deformação e do envelhecimento (170 °C/20 min). A seguir, são mostradas as equações 1, 2 e 3 utilizadas no cálculo do BH_0 , BH_n e WH.

$$BH_0 = L.E_2 \text{ (após envelhecimento)} - L.E_1 \text{ (antes do envelhecimento)} \quad (1)$$

$$BH_n = L.E_2 \text{ (após envelhecimento)} - L.R_1 \text{ (antes do envelhecimento)} \quad (2)$$

$$WH = L.R_1 \text{ (antes do envelhecimento)} - L.E_1 \text{ (antes do envelhecimento)} \quad (3)$$

No cálculo do ganho de resistência mecânica referente a 0 de pré-deformação (BH_0), foi determinada a diferença entre os valores de limite de escoamento antes e depois do envelhecimento (Equação 1). O efeito BH para uma determinada porcen-

tagem de pré-deformação (BH_n) é calculado pela diferença entre o limite de escoamento do corpo de prova pré-deformado a $n\%$ ($n = 1\%, 2\%, 4\%, 6\%, 9\%, 15\%$ e 20%) em tração após envelhecimento e a tensão resultante da porcentagem de deformação $n\%$ em tração antes do envelhecimento (Equação 2). O efeito WH é obtido pela diferença entre a tensão resultante para uma determinada porcentagem de deformação $n\%$ ($n = 1\%, 2\%, 4\%, 6\%, 9\%, 15\%$ e 20%) no ensaio de tração e o limite de escoamento, ambos antes do envelhecimento (Equação 3).

Após a realização dos ensaios de tração, os resultados foram aplicados nas equações 1, 2 e 3, sendo possível obter os valores do ganho de resistência mecânica pelos efeitos BH e WH. A Figura 5 mostra os ganhos de resistência mecânica (MPa) pelos efeitos BH e WH em razão da porcentagem de pré-deformação antes do envelhecimento. Como era esperado, ocorre um aumento crescente do efeito WH com o aumento da porcentagem de pré-deformação antes do envelhecimento. De maneira geral, à medida que é aumentada a porcentagem de pré-deformação, também ocorre um aumento crescente no ganho de resistência mecânica pelo efeito BH após o envelhecimento a $170\text{ °C}/20\text{ min}$.

O ganho de resistência mecânica pelo efeito BH no aço pré-deformado acima de 1% foi superior a 40 MPa . Segundo a norma DIN EN 10268, o valor mínimo de ganho de resistência mecânica deve ser de 35 MPa . Nas porcentagens de pré-deformação de 15% e 20% , o ganho de resistência mecânica pelo efeito BH foi acima de 80 MPa . Esse ganho pelo efeito BH somado ao ganho pela deformação plástica faz que esse aço de boa conformabilidade obtenha resistência mecânica em torno de 400 MPa após o envelhecimento. Além disso, nessas porcentagens, os aços BH podem substituir os aços de baixa liga e alta resistência como HC260LA e HC300LA, com um menor custo.

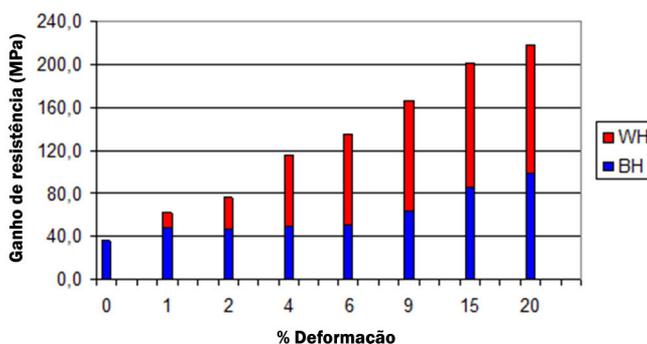


Gráfico 1 Valores de ganho de resistência mecânica pelos efeitos BH e WH em razão da porcentagem de pré-deformação.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores dos ganhos de resistência pelos efeitos BH e WH foram somados, e, então, calcularam-se as respectivas porcentagens do ganho de resistência para os dois efeitos. Após esses cálculos, os ganhos de resistência percentual dos efeitos BH e WH em razão da porcentagem de pré-deformação antes do envelhecimento foram plotados no Gráfico 2. Nota-se, nos gráficos 1 e 2, que o ganho de resistência mecânica relativo pelo efeito BH é significativo para até 2% de pré-deformação, com uma condição otimizada para 1% de pré-deformação. Para percentuais de pré-deformação acima de 2% antes do envelhecimento, o efeito relativo do ganho de resistência mecânica pelo efeito BH parece estabilizar-se num patamar de aproximadamente 40%. Esses resultados concordam com a literatura, com o ganho relativo de resistência mecânica pelo efeito BH diminuindo e se estabilizando à medida que a pré-deformação plástica aumenta antes do envelhecimento.

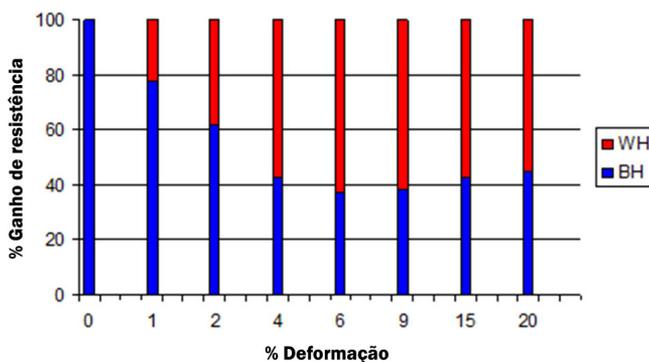


Gráfico 2 Porcentagens dos ganhos de resistência pelos efeitos BH e WH em razão da porcentagem de pré-deformação.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As micrografias observadas por microscopia óptica do aço 180 BH antes e depois do envelhecimento a 170 °C/20 min são apresentadas nas figuras 5a e 5b, respectivamente. Nas figuras 6a e 6b, são mostradas as micrografias na mesma condição das figuras 5a e 5b, observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Como era esperado, não foi possível observar modificações microestruturais no aço 180 BH antes e depois do envelhecimento, obviamente decorrente da baixa temperatura de envelhecimento. O provável mecanismo de aumento de resistência mecânica do aço 180 BH decorrente do envelhecimento está relacionado à formação da Atmosfera Cottrell que dificulta a movimentação das discordâncias.



Figura 5 Micrografias observadas por microscopia óptica (a) antes e (b) depois do envelhecimento a 170 °C/20 min.

Fonte: Elaborada pelos autores.

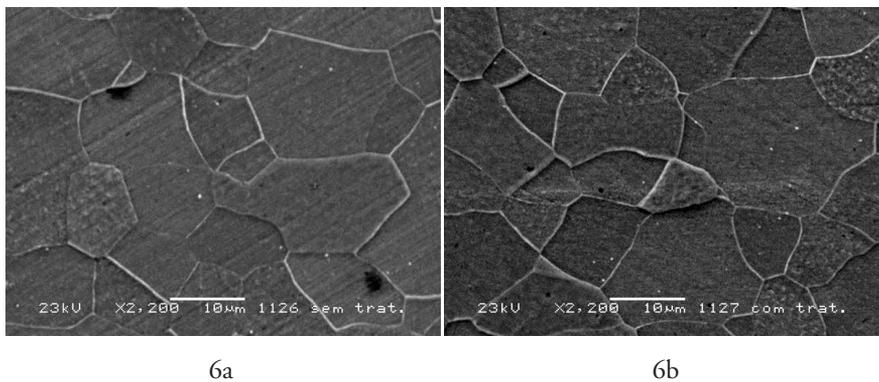


Figura 6 Micrografias observadas por microscopia eletrônica de varredura (a) antes e (b) depois do envelhecimento a 170 °C/20 min.

Fonte: Elaborada pelos autores.

5 CONCLUSÃO

O estudo da influência da pré-deformação plástica no envelhecimento do aço 180 BH aplicado em carrocerias automotivas permitiu concluir que:

- Ocorre um aumento crescente do efeito WH com o aumento da porcentagem de pré-deformação antes do envelhecimento.

- À medida que é aumentada a porcentagem de pré-deformação, ocorre um aumento crescente no ganho de resistência mecânica pelo efeito BH após o envelhecimento.
- O ganho percentual de resistência mecânica pelo efeito BH é significativo para até 2% de pré-deformação, com uma condição otimizada para 1% de pré-deformação.
- O ganho percentual de resistência mecânica pelo efeito BH tende a se estabilizar à medida que a pré-deformação plástica aumenta antes do envelhecimento.

INFLUENCE OF PRE-PLASTIC DEFORMATION ON AGING 180 BH STEEL

Abstract

This work analyzed the influence of pre-plastic deformation in tensile testing by aging phenomenon of 180 BH steel. The gain in strength (bake hardening – BH) was determined through an initial strain of 0%, 1%, 2%, 4%, 6%, 9%, 15% and 20% in the test specimen and aging treatment at 170 °C/20 minutes. It was determined that the gain of strength is due the work hardening (WH) plus the BH. From the results for low initial strain the BH percentage effect is more pronounced than the WH effect. It is possible that the increase of strength by aging is due to solid solution hardening.

Keywords: 180 BH steel, pre-deformation, solid solution.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR 6673. *Produtos planos de aço: determinação das propriedades mecânicas a tração: método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

ASAME TECHNOLOGY LLC. Disponível em: <<http://www.asametech.com/asame.html>>. Acesso em: 20 mar. 2010.

CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. 6. ed. ampl. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1990.

DIN EN 10268:2006-02 – Cold rolled steel flat products with high yield strength for cold forming – Technical delivery conditions, Oct. 2006.

GORNI, A. A. Estudo analisa principais propriedades dos aços usados na indústria automotiva. *Corte & Conformação*, v. 3, n. 33, p. 22-31, jan. 2008.

KANTOVISCKI, A. R. Estudios de la aplicación industrial de los aceros de alta resistencia – *Relatório de Trabalho Supervisionado. SEAT/Volkswagen*. Barcelona, 2000/2001.

LAGNEBORG, R. New steels and steel applications for vehicles. *Materials & Design*, v. 12, n. 1, p. 3-14, Feb. 1991.

MACHADO, F. A. *Influência do grau de deformação e do tratamento “Bake Hardening” na propagação de trinca por fadiga em dois aços bifásicos usados em rodas automobilísticas*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)–Universidade Estadual de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MAGNABOSCO, R. Aço ARBL para fabricação de rodas automotivas – microestruturas, comportamento mecânico e vida em fadiga. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA – COBEM, 16., 2001, Uberlândia. *Proceedings...* Uberlândia: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2001.

MIRISOLA, M. As vantagens da redução de peso nos veículos. *Engenharia Automotiva e Aeroespacial – SAE Brasil*, São Paulo, v. 9, n. 40, p. 74, out./nov./dez. 2009.

OLIVEIRA, A. C. L. et al. Otimização das condições de processo e da composição química do material 180BH por meio de modelamento termodinâmico. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 45., 2008, Porto de Galinhas. Porto de Galinhas, 2008.

SILVA, A. T. Investigação sobre as vantagens de usar aços envelhecíveis em estufa (com efeito BH) em peças estruturais da carroceria do veículo. *SAE Technical Paper* N. 2005-01-4025, 2005.

WÜEBBELS, T. et al. The effects of room temperature aging on subsequent bake-hardening of automotive sheet steels. *SAE Technical Paper* 2002-01-0041, 2002.

ZHANG, J. et al. Bake hardening behavior of TRIP and DP steels. *Journal of University of Science and Technology*, Beijing, v. 15, n. 2, p. 132, Apr. 2008.

Contato

Kriscia E. R. de Souza
e-mail: krisciarosa@uol.com.br