

Tema: Estampagem

## AValiação DA CONFORMABILIDADE E DA RESISTÊNCIA À INDENTAÇÃO DOS AÇOS *BH* E *IFHSS* DA CLASSE DE 260 MPa DE ESCOAMENTO\*

Thiago Rangel Bittencourt<sup>1</sup>  
Jetson Lemos Ferreira<sup>2</sup>  
Vicente Tadeu Lopes Bueno<sup>3</sup>

### Resumo

Com a tendência de aumento da complexidade geométrica dos painéis de cobertura dos automóveis, aumento de resistência mecânica e diminuição da espessura dos materiais, a estampagem dessas peças tem tornado cada vez mais difícil. Neste contexto, dois graus de aços que exibem elevada resistência mecânica e boa conformabilidade, têm sido ofertados pela siderurgia à indústria automotiva, o *Bake Hardenable* (BH) e o *Interstitial Free High Strength Steel* (IFHSS). O presente estudo teve como objetivo avaliar aços BH e IFHSS, em termos de propriedades mecânicas, de conformabilidade, de ganho de resistência em função da deformação, envelhecimento e de resistência à indentação, em escala laboratorial. Desse modo, visou-se avaliar sob quais condições de estampagem deve ser decidido o uso do BH ou do IFHSS em aplicações de painéis automotivos. Os aços avaliados, de um modo geral, apresentaram desempenho similar em termos de conformabilidade. O aço BH foi superior ao IFHSS em relação à resistência à indentação. Portanto, o aço BH aparece como uma solução técnica atrativa, comparativamente ao aço IFHSS, quando aplicado em painéis externos (capôs, portas e paralamas) que requerem maior exigência quanto à resistência à indentação.

**Palavras-chave:** Aço IFHSS; Aço BH; Estampagem; Resistência à indentação.

### EVALUATION OF THE FORMABILITY AND DENT RESISTANCE FROM THE *BH* AND *IFHSS* STEELS OF THE 260 MPa YIELD POINT CLASS

#### Abstract

The steel industry has as a challenge, to support the automotive industry to reduce the amount of pollutant emission and increase safety of vehicles, the development of steels of lower thickness, with medium and high mechanical strength. Within this context, two concepts of steel, used on the outer panels for the automotive industry, deserves a special attention, the *Bake Hardenable* (BH) and *Interstitial Free High Strength Steel* (IFHSS). The present study has the objective to evaluate the BH and IFHSS steels in terms of mechanical property, formability, resistance gain due to deformation, aging and dent resistance. The main idea is to identify in which stamping conditions should be decided to use each steel, in outer panels. In general, both steels showed similar performance in terms of formability. BH steel was superior to IFHSS as dent resistance. Therefore, BH appears as an attractive technical solution when compared to IFHSS, when applied in outer panels (hoods, doors and fenders) that requires higher dent resistance.

**Keywords:** IFHSS Steel; BH Steel; Forming; Dent resistance.

<sup>1</sup> Graduado em Engenharia Metalúrgica, UFOP, Assistente Técnico, Gerência Assistência Técnica, Usiminas, Ipatinga, MG, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da EE.UFMG, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Pesquisador, Centro de Tecnologia Usiminas, Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Físico, Doutor, Professor Associado, Depto. Engenharia Metalúrgica e de Materiais, EE, UFMG, Belo Horizonte, MG.

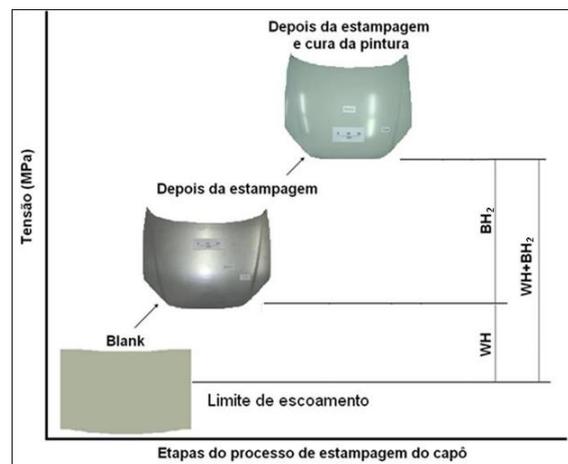
\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

# 1 INTRODUÇÃO

Para atrair mais consumidores e atender requisitos aerodinâmicos, a indústria automotiva vem alterando o design dos painéis externos dos veículos, aumentando a complexidade geométrica destes e, conseqüentemente, tornando mais difícil a estampagem dessas peças. Aliado a isso, a tendência de redução de espessura e de aumento de resistência mecânica dos aços, visando redução do consumo de combustível e de emissão de poluentes, também tem tornado mais complexa a estampagem dos painéis de cobertura.

A indústria siderúrgica vem disponibilizando ao mercado, aços de maior resistência em relação ao aço *Interstitial Free* (IF), convencionalmente utilizado em painéis de cobertura. Dentre esses materiais disponibilizados, cabem destacar os aços *Bake Hardenable* (BH) e os *Interstitial Free High Strength Steel* (IFHSS), que conjugam elevada resistência e boa estampabilidade [1,2].

Os aços BH se destacam pelo fenômeno de envelhecimento (efeito *Bake Hardening*, BH<sub>2</sub>), no qual, durante o processo de cura da pintura das carrocerias, os átomos intersticiais migram para as deslocções geradas pela deformação plástica, restringindo a mobilidade destas e aumentando a resistência mecânica do painel. É um fenômeno que depende da quantidade e modo de deformação, do tempo, da temperatura e da quantidade de átomos intersticiais [3]. Na Figura 1 é mostrado, de forma esquemática, o aumento de resistência de um capô automotivo propiciado pela deformação (*Work Hardening*, efeito WH) e pelo efeito BH<sub>2</sub>.



**Figura 1.** Ilustração esquemática do aumento do limite de escoamento de um capô automotivo após conformação (WH) e após tratamento térmico de cura da pintura – BH<sub>2</sub> [4].

No caso dos IFHSS, o incremento da resistência mecânica é obtido pelos mecanismos de refino de grão e de endurecimento por solução sólida, sendo este último, seu diferencial em relação aos aços IF convencionais. Para propiciar o endurecimento por solução sólida são adicionados elementos de liga, tais como, o fósforo, o manganês e o silício. O acréscimo da resistência mecânica nesses aços não promove variação significativa dos valores do coeficiente de anisotropia de Lankford e de alongamento [4].

A utilização dos aços BH ou IFHSS em painéis de cobertura tem tido notoriedade, pois estes exibem elevada conformabilidade e propiciam um aumento da rigidez e da resistência à indentação desses componentes. O aumento da resistência à indentação gera uma maior resistência à ocorrência de pequenas impressões no

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

painel provocadas por impacto localizado. Essa característica depende da geometria do painel, da espessura e do limite de escoamento (LE) do material [5].

Os testes de avaliação de conformabilidade podem ser divididos em três categorias. A primeira é a de testes relativos às propriedades básicas do material, em geral, provenientes do ensaio de tração. A segunda envolve os testes simulativos, ou seja, aqueles que visam simular modos específicos de deformação (Ensaio Erichsen - Estiramento, Ensaio Swift - Embutimento, dentre outros). A terceira é a Curva Limite de Conformação (CLC), ensaio que avalia a capacidade máxima de deformação do material sobre diferentes modos de deformação, delimitando as regiões de sucesso e insucesso durante a estampagem do material [4,5].

Um dos testes utilizados para avaliar a resistência à indentação de um painel automotivo consiste em gerar impressões localizadas no material por meio de carregamento dinâmico. O resultado final é a profundidade de penetração da deformação permanente na superfície do painel [4].

O presente estudo teve como objetivo avaliar os aços BH e IFHSS, em termos de propriedade mecânica, de conformabilidade, de ganho de resistência em função da deformação, envelhecimento e de resistência à indentação, em escala laboratorial. Desse modo, visou-se a identificar sob quais condições de estampagem deve ser decidido o uso do BH ou do IFHSS em aplicações de painéis de cobertura de automóveis.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os aços utilizados são referentes aos graus BH e IFHSS, ambos revestidos a quente com zinco (GI), LE próximo a 260 MPa e espessura visada 0,65 mm. As faixas de propriedades mecânicas especificadas na norma EN 10346 [6] para esses graus de aço são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Especificação de propriedades mecânicas dos graus BH e IFHSS da norma EN 10346 [6]

	Orientação	LE (MPa)	LR (MPa)	AL <sub>80%</sub>	n <sub>10-20%</sub>	r <sub>15%</sub>	BH <sub>2</sub> (MPa)
BH260	90°	260 - 320	360 - 440	≥28	-	-	≥35
IFHSS260	90°	260 - 320	380 - 440	≥30	≥0,16	≥1,4	-

As propriedades mecânicas foram avaliadas por tração através do resultado médio de três corpos de prova da norma EN 10002 [7], com base de medida para avaliação do alongamento de 80 mm (AL<sub>80%</sub>). Os corpos de prova foram confeccionados com comprimento disposto a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação. O expoente de encruamento da equação de Hollomon (n<sub>10-20%</sub>) foi determinado pelo coeficiente angular da curva gerada pela relação dos logarítmicos da tensão e da deformação verdadeira, na faixa das deformações de engenharia de 10% a 20%. O coeficiente de anisotropia de Lankford (r<sub>15%</sub>) foi determinado após a deformação de engenharia na direção do comprimento de 15%, pela razão das deformações verdadeiras nas direções da largura e da espessura.

O índice *Work Hardening* (WH), que simula o encruamento devido à deformação plástica [4], foi determinado de acordo com a norma EN 10325 [8], pela diferença entre as tensões a 2% de deformação e de escoamento do material. O índice *Bake Hardening* (BH<sub>2</sub>), que representa o aumento de resistência propiciado pelo tratamento de cura da pintura do painel automotivo (envelhecimento), foi determinado pela diferença entre a tensão de escoamento após tratamento térmico

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

(170°C por 20 minutos) e a tensão obtida na pré-deformação de 2%. Os índices BH<sub>2</sub> e WH foram determinados por meio do valor médio do resultado de três avaliações. Para a simulação da operação com predominância do modo de deformação por estiramento foi realizado o Ensaio Erichsen, utilizando uma carga de prensa chapas de 500 kN. A altura do deslocamento vertical do punção no instante da ruptura foi o resultado deste ensaio. A partir dessa altura e da espessura da amostra, os aços foram classificados quanto ao grau de estampagem, segundo a norma NBR 5915 [9]. O valor da Razão Limite Estampagem (RLE), resultado do Ensaio Swift, que avalia a capacidade do material de ser deformado em condições de embutimento, foi determinado por meio da razão entre o diâmetro máximo dos corpos de prova (CP), que foram conformados sem fraturar, e o diâmetro do punção (50 mm). Nesse ensaio foi utilizada uma matriz sem *drawbead*, com carga de prensa chapas de 20 kN. Para ambos os ensaios de estampagem foram utilizados os resultados médios de três amostras.

O levantamento das CLC's foi baseado no método de Nakazima, com deformações até a estricção do material, utilizando como referência os procedimentos experimentais descritos na norma ISO 12004 [10]. A malha utilizada para a medição das deformações foi quadrada, com 2,5 mm de lado, marcada eletroquimicamente na superfície dos corpos de prova. Na Figura 2 é mostrado o aspecto geométrico de corpos de prova utilizados para o levantamento das CLC's. Após a estampagem, as deformações foram analisadas utilizando o *software* AutoGrid. A medição das deformações foi realizada para cada CP, sendo obtidas as maiores ( $\epsilon_1$ ) e menores ( $\epsilon_2$ ) deformações verdadeiras em região adjacente à fratura. A CLC foi levantada por interpolação polinomial de 5ª ordem, a partir dos pares de deformação  $\epsilon_1 \times \epsilon_2$  medidos.



**Figura 2.** Aspecto geométrico de corpos de prova do método de Nakazima utilizados para o levantamento das Curvas Limite de Conformação.

Os corpos de prova utilizados na avaliação do ganho de resistência em função da deformação, envelhecimento e no ensaio de resistência à indentação foram cortados nas dimensões de 100 x 350 mm, sendo estampados por um punção de cabeça chata, com 200 mm de diâmetro e com carga de prensa chapas de 650 kN, de forma a restringir, ao máximo, o fluxo de material para dentro da cavidade da matriz. Utilizou-se como lubrificante, entre o punção e a amostra, uma película de polietileno com 0,15 mm de espessura, recoberta com uma fina camada de óleo. A profundidade de estampagem das amostras foi de 20 mm, de forma a propiciar uma deformação equivalente no domo do corpo de prova, por embutimento, visando

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

0,08 a 0,10. Essa faixa de deformação foi proposta, pois trata-se de uma deformação típica de um painel exposto automotivo.

A resistência à indentação de um painel automotivo é fortemente influenciada pela espessura e resistência mecânica do material [11]. Com isso, os ganhos de resistência propiciados durante o processo de estampagem (efeito WH) e envelhecimento durante cura da pintura (efeito BH<sub>2</sub>) exibem grande importância para a maximização da rigidez do painel automotivo. Para caracterizar o ganho de resistência, propiciado pela estampagem das amostras do ensaio de resistência à indentação, foram retirados destas amostras corpos de prova *sub-size* da norma ASTM A370 [12], conforme Figura 3. A partir da diferença dos limites de escoamento das amostras conformada e plana, obteve-se o efeito WH e pela subtração dos limites de escoamento das amostras estampada e tratada termicamente e somente conformada determinou-se o efeito BH<sub>2</sub>. Para cada condição (amostras plana, conformada e estampada/tratada termicamente) foi utilizado o resultado médio de três corpos de prova *sub-size*.



**Figura 3.** Locais onde os corpos de prova *sub-size* da norma ASTM A370 foram retirados das amostras do ensaio de avaliação do ganho de resistência propiciado pelos efeitos WH e BH.

A resistência à indentação dos corpos de prova foi medida em um dispositivo desenvolvido no Centro de Tecnologia da Usiminas, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 4. Nesse dispositivo, uma esfera de aço é posicionada no centro do corpo de prova e uma massa (2,7 kg) é nele projetado, em queda livre, de determinada altura (249 mm), provocando uma indentação permanente. A energia de impacto propiciada no ensaio é de aproximadamente 6,5 J, que visa simular batidas de pequenas pedras na lataria, de chuva de granizo, dentre outras. O resultado do ensaio refere-se ao valor médio de profundidade de indentação permanente de duas amostras. Menor valor de penetração, representa uma maior capacidade do material de absorver a energia sem sofrer deformações permanentes [13]. A metodologia adotada foi baseada nas recomendações do *Auto/Steel-Partnership Program Standardized Dent Resistance Project Team (ASP)* [13]. Os resultados foram determinados por meio do valor médio do resultado de duas avaliações, para cada condição avaliada, sem e com tratamento térmico, simulando o processo de cura de pintura (170°C por 20 minutos).

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

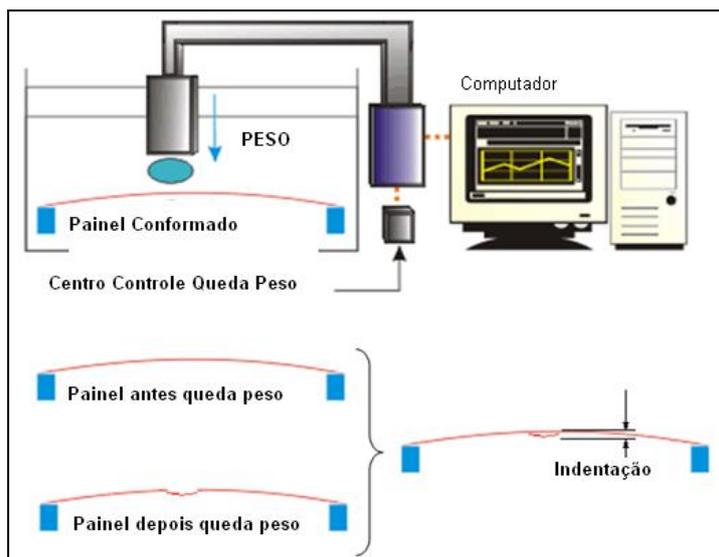


Figura 4. Representação esquemática do dispositivo utilizado para avaliação da resistência à indentação de corpos de prova confeccionados com os materiais avaliados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Propriedades Mecânicas em Tração

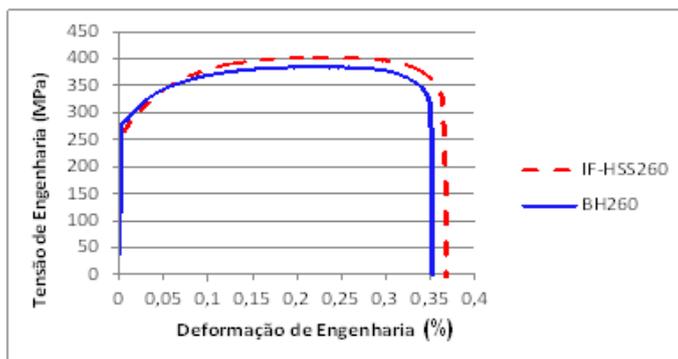
Os resultados dos ensaios de tração para os aços BH e IFHSS, são mostrados na tabela 2. Comparando as tabelas 1 e 2, verifica-se que as propriedades mecânicas dos aços avaliados encontram-se dentro dos valores especificados na norma EN 10346 [6] para seus respectivos graus.

Comparando as curvas tensão x deformação dos aços BH e IFHSS, figura 5, nota-se que esses materiais podem ser considerados da mesma classe de escoamento e de resistência. Os aços avaliados exibiram elevada ductilidade, sendo que o aço IFHSS apresentou valores de alongamento total, expoente de encruamento e coeficientes de anisotropia de Lankford ligeiramente maiores que os do aço BH. O aço BH se destacou em relação ao IFHSS, conforme esperado, em relação à propensão ao envelhecimento, exibindo valor BH dentro da especificação da norma EN 10346 [6].

Tabela 2. Resultados dos ensaios de tração dos aços avaliados

	Orientação	LE <sub>(MPa)</sub>	LR <sub>(MPa)</sub>	AL <sub>80</sub> (%)	n <sub>10-20%</sub>	r <sub>15%</sub>	BH <sub>(MPa)</sub>
BH260	90°	281	383	33,8	0,190	1,900	35
	45°	273	381	35,5	0,190	1,510	-
	0°	277	395	29,9	0,200	1,550	-
IFHSS260	90°	262	402	36,6	0,210	2,140	1
	45°	252	394	40,4	0,220	1,830	-
	0°	249	408	38,0	0,220	1,430	-

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

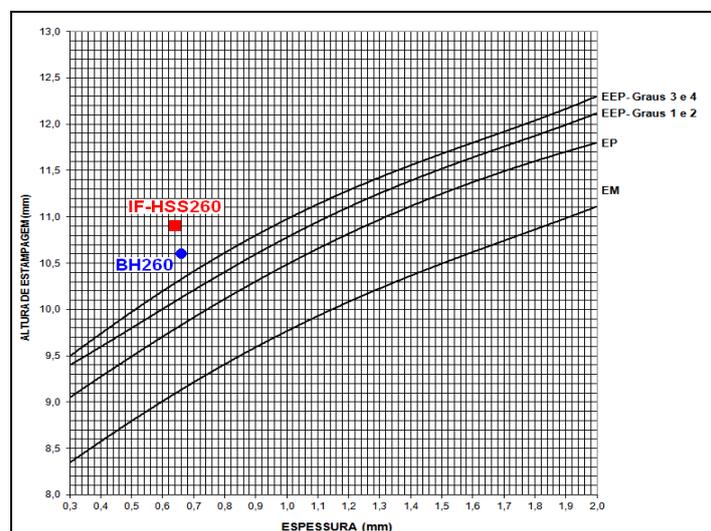


Fonte: Centro de Tecnologia Usiminas – Unidade Ipatinga.

Figura 5. Curva tensão de engenharia x deformação de engenharia das amostras avaliadas.

### 3.2 Conformabilidade

A Figura 6 mostra o resultado da avaliação da capacidade de estiramento dos aços por meio do Ensaio Erichsen. Os resultados, relação entre a altura de estampagem e espessura (figura 6), para ambos os aços ficaram situada acima da curva correspondente ao grau EEP-Grau 3 e 4. Dessa forma, os aços foram classificados com excelente estampabilidade. O aço IFHSS apresentou um resultado ligeiramente melhor no ensaio, pois a altura de estampagem foi superior, que pode ser atribuída ao seu maior valor do expoente de encruamento, quando comparado ao do aço BH. Resultados semelhantes foram obtidos por Ferreira [4] e Menegaz [14], os quais relataram que o fator mais importante para a maximização da capacidade de estiramento foi o atraso da ocorrência da estricção durante estampagem, tendo relação direta com a capacidade de distribuir deformação, que é avaliada pelo expoente de encruamento.



Identificação	Índice Erichsen	Classificação quanto à estampagem
BH260	10,6 mm	EEP-Grau 3 e 4
IFHSS260	10,9 mm	EEP-Grau 3 e 4

Fonte: Centro de Tecnologia Usiminas – Unidade Ipatinga.

Figura 6. Resultados do Ensaio de Estiramento Erichsen, que auxiliaram na classificação dos aços quanto à estampagem, segundo a norma NBR 5915 [9].

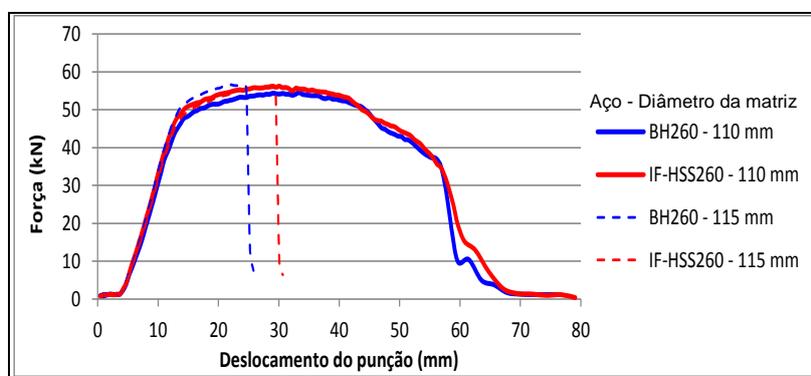
\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Os aços avaliados exibiram igual capacidade de embutimento, conforme mostrado nos resultados de Razão Limite de Estampagem (tabela 3). Contudo, na figura 7, pode ser observado que, para o diâmetro de matriz igual a 115 mm (linhas tracejadas), o aço IFHSS apresentou um deslocamento do punção até a ocorrência da fratura ligeiramente maior demonstrando exibir maior capacidade de embutimento em relação ao aço BH. Rabelo [4] observou fato semelhante em seu estudo comparativo dos aços BH220 e IFHSS220, no qual atribuiu esse comportamento ao maior coeficiente de anisotropia do aço IFHSS, pois esta propriedade mecânica relaciona-se diretamente com a capacidade de embutimento do material.

**Tabela 3.** Resultados do ensaio de Razão Limite de Estampagem (RLE)

Identificação	Diâmetro matriz crítica (mm)	Índice RLE
BH260	110	2,2
IFHSS260	110	2,2

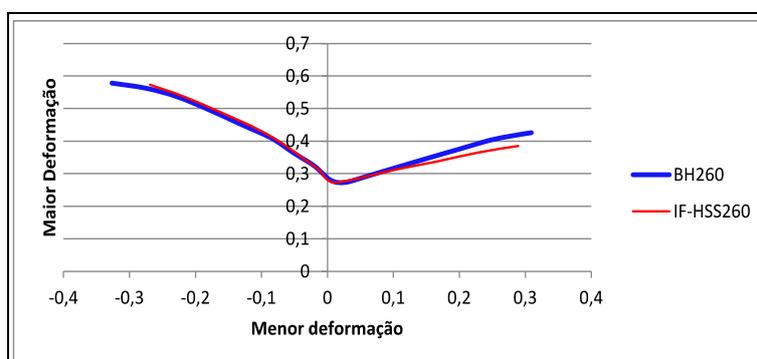
Fonte: Centro de Tecnologia Usiminas – Unidade Ipatinga.



Fonte: Centro de Tecnologia Usiminas – Unidade Ipatinga.

**Figura 7.** Curvas de escoamento do Ensaio Swift para os aços avaliados, utilizando matrizes com diâmetros de 110 mm (curvas contínuas) e de 115 mm (curvas pontilhadas).

As Curvas Limite de Conformação (CLC) dos aços avaliados estão apresentadas na figura 8. Corroborando os resultados de conformabilidade anteriores, verificou-se que os aços apresentam capacidade de deformação similar, independente do modo de deformação avaliado (embutimento, deformação plana e estiramento).



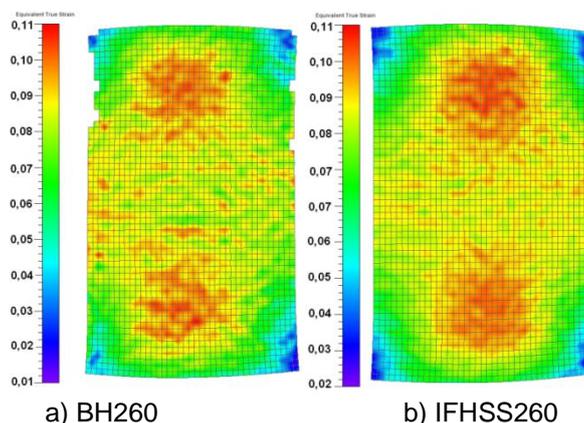
Fonte: Centro de Tecnologia Usiminas – Unidade Ipatinga.

**Figura 8.** Curvas Limite de Conformação dos aços avaliados, levantadas à estricção pelo método de Nakazima.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

### 3.3 Avaliação do Ganho de Resistência por Deformação e Envelhecimento

Na Figura 9 são mostrados os mapas de deformação equivalente dos corpos de prova utilizados para avaliação do ganho de resistência mecânica propiciado pela deformação e envelhecimento, bem como para a medição da resistência à indentação. Observa-se que, no centro das amostras, as deformações equivalentes variaram entre 0,08 e 0,11, representando assim as deformações típicas de painéis externos automotivos, conforme proposto no estudo (0,08 a 0,10).



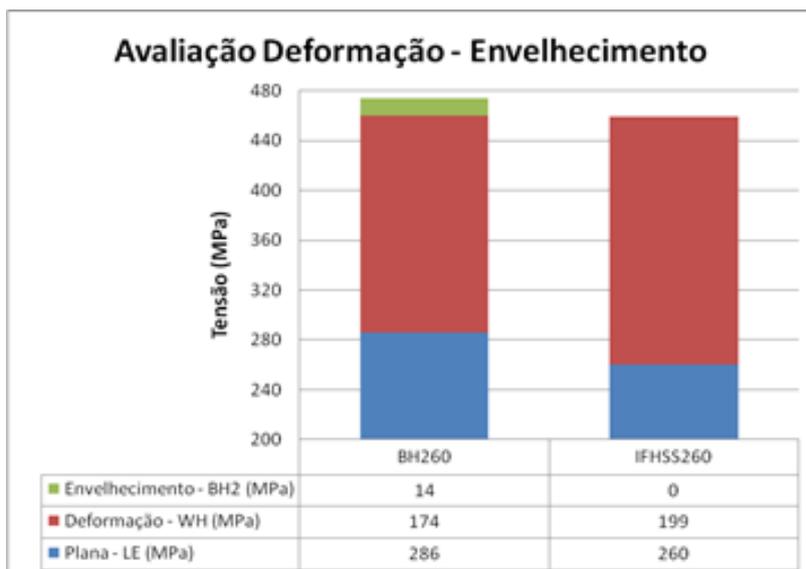
Fonte: Centro de Tecnologia Usiminas – Unidade Ipatinga.

**Figura 9.** Deformações equivalentes, avaliadas por meio do *software* AutoGrid, dos corpos de prova utilizados para avaliação da influência dos efeitos WH e BH<sub>2</sub> e da resistência à indentação. (a) BH260 e (b) IFHSS260.

Os ganhos de resistência mecânica avaliados por tração a partir de corpos de prova *sub-size* retirados das amostras estampadas e tratadas termicamente, em escala laboratorial, estão apresentados na figura 10. Observa-se que o aço IFHSS (WH: 199 MPa) teve uma capacidade maior de encruar durante deformação em relação ao aço BH (WH: 174 MPa). Nos trabalhos realizados por Rabelo [4] e Christen et al. [5], para uma faixa de deformação de 8% a 10%, foi constatada a predominância do efeito WH do aço IFHSS220 em relação ao BH220, o que corrobora os resultados do presente estudo. Esse comportamento pode ser explicado devido ao maior coeficiente de encruamento ( $n_{10-20\%}$ ) do aço IFHSS.

Após as amostras serem submetidas ao tratamento térmico, simulando a cura de pintura, o aço IFHSS não apresentou diferença em termos de ganho de resistência, ao passo que o aço BH apresentou uma elevação no LE de 14 MPa. Esse ganho de resistência pelo efeito *Bake Hardening* fez com que a resistência final do aço BH260 fosse 15 MPa superior à do aço IFHSS260. Dessa forma, painéis automotivos, que utilizam aço BH, tendem a apresentar ganho de resistência mecânica ligeiramente maior, devido ao efeito do tratamento de cura da pintura da peça final.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Fonte: Centro de Tecnologia Usiminas – Unidade Ipatinga.

**Figura 10.** Resultados dos ensaios de tração para avaliação do ganho de resistência mecânica por deformação e envelhecimento.

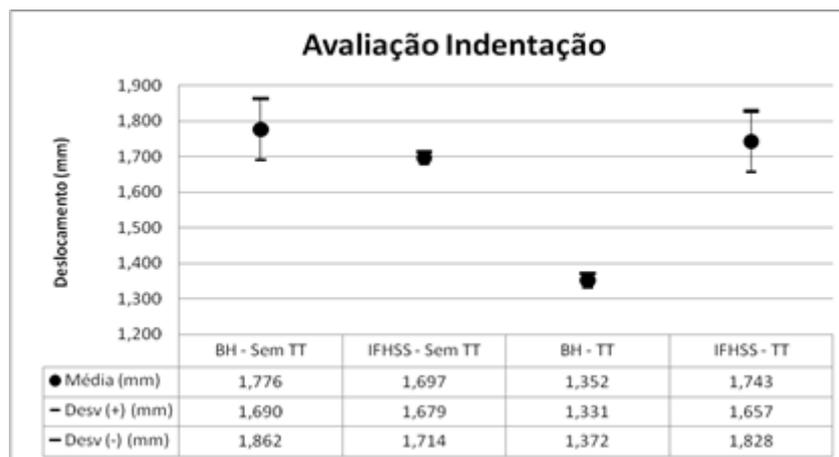
### 3.4 Avaliação da Resistência à Indentação

A Figura 11 mostra a profundidade de penetração do indentador (deformação permanente) nos ensaios de resistência à indentação dos aços BH e IFHSS, sem e com tratamento térmico simulando a cura da pintura de painéis automotivos.

Para a condição sem tratamento térmico, a diferença em torno de 5% dos resultados de deformação permanente dos aços avaliados não é considerada significativa em função do desvio padrão dos resultados. Portanto, os aços BH e IFHSS, para a condição sem tratamento térmico, em relação à resistência à indentação, podem ser considerados similares. Esse resultado justifica-se pelo fato dos materiais apresentarem similares espessuras (figura 6) e somatório de LE inicial e WH (figura 10). Pois, de acordo com Thomas e Hodgins [11], a força necessária para gerar uma impressão permanente é diretamente proporcional ao limite de escoamento e o quadrado da espessura do material ( $P = LE \times E^2$ ).

Após os corpos de prova serem submetidos ao tratamento térmico, a deformação permanente do aço BH foi inferior à do aço IFHSS (diferença em torno de 22%), mostrando assim, que o aço BH apresenta uma maior resistência à indentação. O aumento da resistência à indentação do aço BH pode ser atribuído ao efeito *Bake Hardening*, que propiciou o ganho de resistência mecânica mostrado na figura 10.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Fonte: Centro de Tecnologia Usiminas – Unidade Ipatinga.

**Figura 11.** Resultado do ensaio de indentação por impacto dos aços avaliados, com e sem tratamento térmico.

## 4 CONCLUSÕES

Os aços avaliados apresentaram propriedades mecânicas que atendem integralmente as especificações da norma EN 10346.

Quanto à conformabilidade, avaliada através dos ensaios de estiramento e embutimento, verificou-se que os aços podem ser considerados similares. Contudo, o aço IFHSS exibiu desempenho ligeiramente superior ao aço BH em ambos os modos de deformação, reflexo dos maiores valores do expoente de encruamento e coeficiente de anisotropia do aço *Interstitial Free High Strength*.

A similaridade em termos de estampabilidade dos aços foi comprovada por meio das Curvas Limite de Conformação, que exibiram poucas diferenças, tanto no formato quanto no posicionamento. Cabe ressaltar, que essa similaridade era esperada em função da proximidade entre os coeficientes de encruamento e espessura dos aços.

Avaliando os resultados em tração (ganho de resistência mecânica por deformação e envelhecimento) de amostras retiradas de um painel conformado em escala laboratorial, observou-se que os aços avaliados após estampagem apresentaram LE similares. No entanto, após tratamento térmico, o aço BH apresentou valores finais de LE superiores aos do IFHSS, atribuído ao efeito *Bake Hardening* do aço BH.

Pode-se concluir que o tratamento térmico foi fundamental para garantir uma maior resistência à indentação para o aço BH em relação ao IFHSS, devido ao incremento da tensão de escoamento, ocorrido pelo efeito *Bake Hardening*.

Com isso, pode-se afirmar que devido à similaridade dos aços em termos de conformabilidade, aliada à maior resistência à indentação do aço BH, este último aparece como uma solução técnica mais atrativa em relação ao IFHSS, quando aplicado em painéis externos automotivos (capôs, portas e para-lamas) com deformações equivalentes por embutimento entre 8% e 11%.

## Agradecimentos

Agradecemos ao apoio e disponibilidade da Usiminas em viabilizar o trabalho. Os autores agradecem também a CAPES/PROEX.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## REFERÊNCIAS

- 1 Ulsab-Avc Consortium – Technical Transfer Dispatch # 6. – ULSAB-AVC Body Structure Materials, Appendix III, 2001.
- 2 Pereira JB. A substituição do aço comum por aços de media/alta resistência (BH e Isotrópico) em painéis de cobertura. In: Anais do 38º Seminário de Laminação de processos e produtos laminados e revestidos; 24 a 26 de outubro, 2001; Florianópolis, Brasil. São Paulo: ABM; 2001.
- 3 Christen JL, Rubianes JM, Col A. Bake hardening steels for automotive outer body panels: correlation between the BH measurement and the dent resistance. In: Advanced Body Concept & Development; 1997; Toronto, Canada. IBEC 97; 1997. p.53-58.
- 4 Ferreira JL, Tepedino JO. Avaliação da potencial utilização de aço DP250/450 em substituição aos aços Refosforado ou HSLA em painéis internos automotivos estampados. In: Anais do 65º Congresso Anual; 26 a 30 de julho de 2010; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM; 2010.
- 5 Rabelo GB. Avaliação comparativa de aços livres de intersticiais (IF) e aços endurecíveis por envelhecimento na cura da pintura (BH) da classe de 220 MPa de limite de escoamento [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Escola de Engenharia Metalúrgica e Minas, UFMG; 1999.
- 6 European Committee for Standardization. EN 10346:2000: Continuously hot-dip zinc coated low carbon steels strip and sheet for cold forming – Technical delivery conditions. Bruxelas; 2000.
- 7 European Committee for Standardization. EN 10002-1:2001: Metallic materials tensile testing – part 1: method of test at ambient temperature. Bruxelas; 2001.
- 8 European Committee for Standardization. EN 10325: Steel - Determination of yield strength increase by the effect of heat treatment (Bake-HardeningIndex). Bruxelas; 1998.
- 9 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5915: Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem. Rio de Janeiro; 2008.
- 10 International Organization for Standardization. ISO 12004-2: Metallic materials-sheet and strip-determination of forming limit curves, Part 2: Determination of forming-limit curves in laboratory. Geneva; 2008.
- 11 Thomas D, Hodgins B. The numerical prediction of panel dent resistance incorporating panel forming strain [master's thesis]. Ontario: Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo; 2001.
- 12 American Society for Testing and Materials. ASTM 370-11: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken; 2009.
- 13 Auto/Steel Partnership Program Standardized Dent Resistance Project Team 2000. Standardized Dent Resistance Test Project Team Final Report. Southfield; 2001.
- 14 Menegaz GB. Estampabilidade de chapas de aço com recobrimento superficial [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Escola de Engenharia Metalúrgica e Minas, UFMG; 2003.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.