

ESTUDO DE VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO MATERIAL BH220 EM SUBSTITUIÇÃO AO FEP04 EM PAINEL EXTERNO DE UM AUTOMÓVEL¹

Rafael Fagundes Ferreira²
Jetson Lemos Ferreira³
Sidney Mendonça da Silva⁴
Erick Ribeiro de Faria⁵
Gleyder Oliveira Bustamante⁶

Resumo

A viabilidade de utilização de aço BH220 (0,65 mm de espessura) em substituição ao aço FEP04 (0,75 mm de espessura) em painéis externos automotivos foi avaliada por meio de ensaios de tração, a partir de corpos de prova retirados de diferentes regiões desses componentes nas condições antes e após o tratamento térmico. Os ensaios de tração foram propostos como método de avaliação indireta da resistência à indentação dos painéis. A conformabilidade dos painéis produzidos com os aços utilizados foi avaliada por meio da determinação das deformações impostas durante o processo de estampagem através da construção do diagrama de maior e menor deformação verdadeira. Por meio das análises, constatou-se que é viável a utilização do aço BH220 em substituição ao aço FEP04, pois com o aço *Bake Hardenable* foi possível a estampagem com sucesso do componente, além de ter sido computado ganhos na resistência à indentação do painel e redução de massa desse componente.

Palavras-chave: Estampagem; Aço BH220; Aço FEP04; Redução de massa.

FEASIBILITY STUDY OF THE UTILIZATION OF BH220 STEEL IN SUBSTITUTION OF FEP04 STEEL IN AN EXTERNAL AUTOMOTIVE PANEL

Abstract

The feasibility of the utilization of BH220 steel (0.65 mm) in substitution of FEP04 steel (0.75 mm) in an automotive panel was evaluated by tensile tests from specimens taken of the different regions of these components under the conditions before and after heat treatment. The tensile tests were proposed as an indirect method of evaluation of the dent resistance of the panels. The formability of the panels produced with the used steels was assessed by evaluating the strain imposed during the stamping process by constructing the diagram of major and minor true strain. Through this analysis, was found that is feasible to use BH220 steel instead of FEP04 steel, because with Bake Hardenable steel was possible to stamp the component successfully, and have been computed gains in the dent resistance of the panel and mass reduction of this component.

Key words: Metal forming; BH220 steel; FEP04 steel; Mass reduction.

¹ *Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico, Fiat Automóveis, Betim, MG.*

³ *Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento, Centro de Tecnologia Usiminas, Ipatinga, MG.*

⁴ *Técnico Metalurgista, Gerência de Assistência Técnica, Usiminas, Ipatinga, MG.*

⁵ *Engenheiro Metalurgista, Gerência de Assistência Técnica, Usiminas, Ipatinga, MG.*

⁶ *Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerência de Assistência Técnica, Usiminas, Ipatinga, MG.*

1 INTRODUÇÃO

Atendendo aos requisitos da indústria automotiva, as usinas siderúrgicas têm procurado desenvolver aços de alta conformabilidade e de elevada resistência mecânica. A utilização desses aços em painéis automotivos permite a redução de espessura das chapas, diminuindo o peso dos veículos, contribuindo assim, para reduções de consumo de combustível e de emissão de poluentes para a atmosfera. Os aços laminados a frio com envelhecimento controlado (*bake hardenable*) têm sido muito utilizados pela indústria automobilística para a produção de painéis externos de automóveis. Esses aços caracterizam-se por serem facilmente conformáveis e por apresentarem um aumento de resistência mecânica devido ao fenômeno de envelhecimento, que pode ocorrer durante o tratamento térmico a baixa temperatura, ou no caso das automobilísticas, durante o processo de cura da pintura, após as operações de estampagem. Esse fenômeno de envelhecimento controlado está ligado à presença de átomos de carbono em solução sólida no aço que são deslocados sob o efeito do tratamento térmico (em geral 170°C durante 20 minutos) a fim de bloquear as deslocamentos criadas pela estampagem.⁽¹⁾

Devido ao aumento da resistência do painel final propiciado pelo efeito BH, esses aços oferecem como vantagem a possibilidade de redução da espessura, garantindo uma mesma resistência à indentação das peças (compensação da diminuição da espessura pelo aumento da resistência da peça final).

Este trabalho visa avaliar a substituição de aço *Interstitial Free* (IF), com 0,75 mm de espessura, referente ao grau FEP04, pelo aço *Bake Hardenable* (BH220), com 0,65 mm de espessura, em painel externo automotivo, a partir de análises da estampabilidade das peças com os aços propostos e de resistência mecânica de regiões dos capôs antes e após tratamento térmico, dando como medida indireta a resistência à indentação desses painéis.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Amostras Planas

As amostras planas dos aços BH220 (0,65 mm de espessura) e FEP04 (0,75 mm de espessura) foram caracterizadas por meio de análises de composição química, microestrutural e de propriedades mecânicas em tração. A análise da composição química teve como base as especificações das normas Fiat 52814⁽²⁾ (BH220) e FG52806⁽³⁾ (FEP04). A microestrutura dos aços foi observada em microscópio óptico, após métodos convencionais de preparação metalográfica e ataque com reativo Nital (4%) para o aço BH220 e com solução de H₂SO₄ (5%) + H₂O₂ para o aço FEP04.

As propriedades mecânicas dos aços foram avaliadas tendo como base as especificações das normas Fiat 52814⁽²⁾ e FG52806.⁽³⁾ A confecção dos corpos de prova e a execução dos ensaios de tração foram feitas segundo a norma UNI EM 10002-1.⁽⁴⁾ Adicionalmente, para a caracterização dos aços quanto à anisotropia, as propriedades mecânicas foram avaliadas a partir de corpos de prova com orientações de 0°, de 45° e de 90° em relação à direção de laminação. Foram determinados os coeficientes de Lankford linear (R), normal (R) e planar (Δr). Avaliou-se também o expoente de encruamento ($n_{10-18\%}$), entre as deformações de engenharia de 10% e 18%, sendo que este índice denota a capacidade dos aços em distribuir as deformações ao longo de seu volume.⁽⁵⁾

Os valores de WH (*Work Hardening*), de BH2 (*Bake Hardening* com pré-deformação de 2% em tração uniaxial) e do ganho WH + BH2 (índice BH) do aço BH220, conforme recomendação da norma FIAT 52814⁽²⁾ (Figura 1), foram determinados para a avaliação das características dos aços quanto ao fenômeno metalúrgico de envelhecimento.

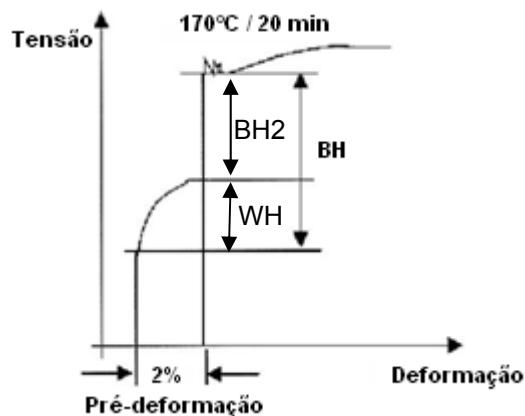


Figura 1. Representação esquemática da metodologia empregada para a determinação do índice *Bake Hardening* (BH) segundo a norma FIAT 52814.⁽²⁾

2.2 Painéis Estampados e Estampados/ Tratados Termicamente

O componente automotivo escolhido para as análises foi um capô (Figura 2). O material normalmente utilizado em sua produção é o aço FEP04, com 0,75 mm de espessura.



Figura 2. Capô de um automóvel estampado com o material normal de produção: aço FEP04.

As deformações impostas durante a estampagem, em diferentes regiões de capôs confeccionados com os materiais BH220 e FEP04 foram avaliadas pelo equipamento AutoGrid Compact. Na Figura 3a são mostradas as regiões onde as deformações foram avaliadas (R1 a R5). Para a avaliação das deformações, o *software* do AutoGrid Compact utiliza como referência uma malha quadrada com 2,5 mm de lado marcada nos *blanks* antes da estampagem. Através das alterações dimensionais da malha, são calculadas as deformações e estas são plotadas em diagramas de maior (ϵ_1) e menor (ϵ_2) deformação.

Propriedades mecânicas em tração de regiões dos capôs estampados e estampados/tratados termicamente (R1 a R5 da Figura 3b) foram avaliadas por meio de corpos de prova *subsize* da norma ASTM A 370.⁽⁶⁾

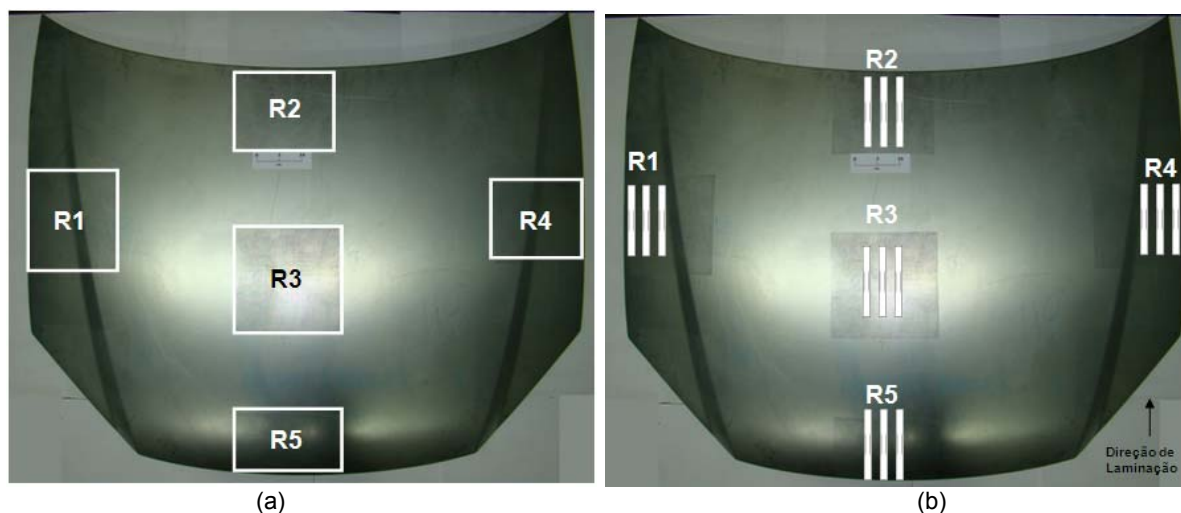


Figura 3. Regiões dos capôs estampados onde foram avaliadas as deformações e as propriedades mecânicas em tração. (a) Regiões de avaliação das deformações; e (b) regiões de avaliação das propriedades mecânicas

A resistência à indentação dos capôs foi avaliada, de forma indireta, por meio da relação proposta por Hodgins,⁽⁷⁾ que mostra que a carga necessária para propiciar uma indentação permanente em um painel automotivo (P) é proporcional ao limite de escoamento (LE) e ao quadrado da espessura (e) (Equação 1).

$$P = k \cdot LE \cdot e^2 \quad (1)$$

Sendo k uma constante que depende da geometria do painel.

Portanto, comparando as cargas necessárias para uma indentação permanente dos painéis dos capôs confeccionados com os aços BH220 e FEP04, pode-se determinar qual material apresentou a maior capacidade de resistir a este tipo de impressões. Para isso, levaram-se em consideração os limites de escoamento das regiões avaliadas (Figura 3) e as espessuras reais dessas regiões.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização das Amostras Planas

As composições químicas obtidas para os aços BH220 e FEP04 são mostradas na Tabela 1. Pode-se afirmar que as composições químicas dos aços encontram-se dentro das especificações de seus respectivos graus.

Tabela 1. Análise de composição química dos aços avaliados (% p/p)

Aço	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti
BH220	0,0019	0,70	0,01	0,040	0,009	0,056	0,002
FEP04	0,0014	0,09	0,01	0,011	0,015	0,042	0,060
Especificação BH220	≤0,06	0,15-0,70	≤0,5	0,05-0,09	≤0,03	0,02-0,07	-
Especificação FEP04	≤0,02	≤0,35	-	≤0,02	≤0,02	0,01-0,1	≤0,3

O material FEP04 é um aço IF extra baixo C com adição Mn, sendo que nesse aço visou-se a remoção do C em solução sólida através da precipitação de carbonitretos de Ti. O aço BH220, por sua vez, é um material de concepção subestequiométrica, na qual foi utilizado o Nb para a estabilização parcial do C.

O aspecto microestrutural das amostras analisadas é mostrado na Figura 4. As microestruturas das amostras dos aços BH220 e FEP04 são formadas por grãos ferríticos equiaxiais, típicas de seus respectivos graus de aços. O tamanho de grão ferrítico médio das amostras avaliadas também pode ser considerado normal para os graus de aço em questão (Tabela 2).

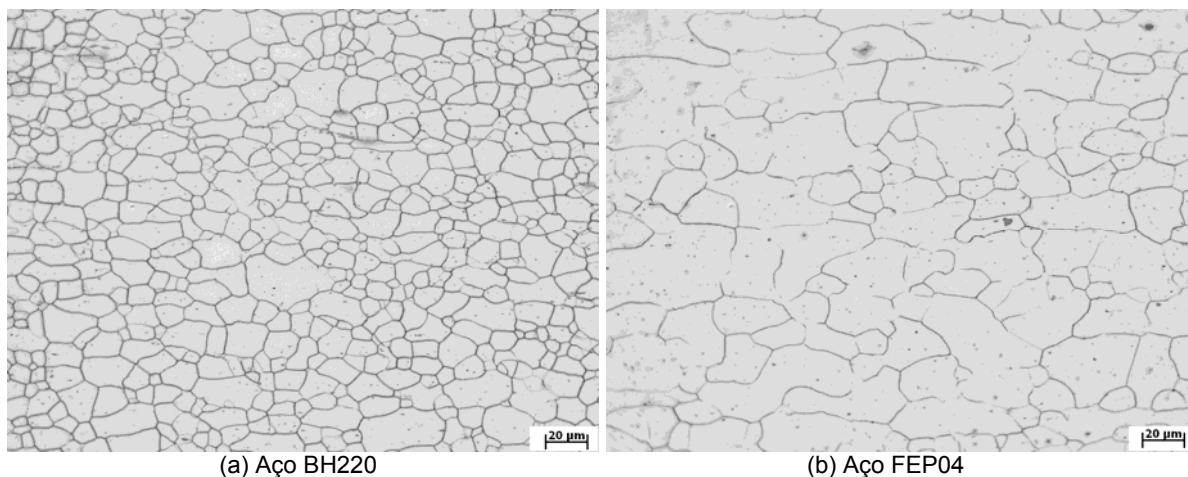


Figura 4. Aspecto microestrutural das amostras dos aços analisados. Aumento original: 500x.

Tabela 2. Tamanho de grão ferrítico médio das amostras analisadas

Aço	Tamanho de grão ferrítico médio ASTM E112 ⁽⁸⁾
BH220	10
FEP04	8

Na Tabela 3 são mostradas as propriedades mecânicas em tração de amostras planas dos aços analisados. Os valores em negrito dessa tabela (orientação transversal à direção de laminação) devem ser os utilizados para comparação com as especificações das normas FIAT para os graus BH220 e FEP04. As propriedades mecânicas dos aços avaliados encontram-se dentro dos valores especificados para os respectivos graus de aço.

Tabela 3. Propriedades mecânicas obtidas em ensaio de tração e especificadas dos aços avaliados

Aço	Orientação ^(I)	LE (MPa)	LR (MPa)	AI (%) BM 80 ^(II)	n _{10-18%}	R _{15%}	\bar{R} ^(III)	ΔR ^(IV)
BH220	90°	239	353	35,7	0,201	2,182	1,858	0,230
	45°	241	359	36,5	0,199	1,743		
	0°	235	358	35,6	0,209	1,764		
FEP04	90°	178	292	45,6	0,245	2,824	2,250	0,463
	45°	183	300	43,5	0,239	2,019		
	0°	171	293	45,2	0,243	2,139		
Especificação BH220	90°	200-270	305-400	≥ 32	≥ 0,15	≥ 1,6	-	-
Especificação FEP04	90°	140-210	270-350	≥ 38	≥ 0,18	≥ 1,6	-	-

(I) Orientação do corpo de prova em relação à direção de laminação; (II) alongamento total avaliado com base de medida (BM) de 80 mm; (III) $\bar{R} = \frac{1}{4}(R_{0^\circ} + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ})$; e (IV) $\Delta R = \frac{1}{2}(R_{0^\circ} + R_{90^\circ} - 2R_{45^\circ})$.

Na Tabela 4 e Figura 5 é mostrado o aumento de resistência de amostras planas dos aços avaliados, em relação ao limite de escoamento, devido aos efeitos WH e

BH₂ para uma pré-deformação em tração de 2% e tratamento térmico posterior a 170°C por 20 minutos, de acordo com a norma FIAT 52814.⁽²⁾

Tabela 4. Resultados de limite de escoamento e de tensão após pré-deformação de 2% dos aços avaliados, além do valor BH₂ e do índice BH para o aço BH220, conforme recomendação e especificação da norma FIAT 52814⁽²⁾

Aço	Limite de escoamento (MPa)	Tensão após 2% de pré-deformação (MPa)	Valor BH ₂ (MPa)	Índice BH BH ₂ + WH (MPa)	Especificação do índice BH FIAT – 52814 ⁽¹⁾ (MPa)
BH220	239	283	27	310	Mínimo 280
FEP04	178	215	CNA	CNA	-

* CNA: Condição não avaliada

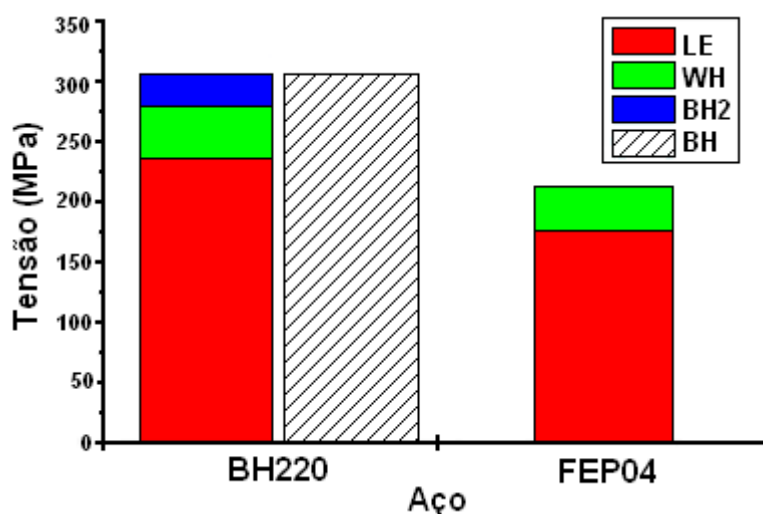


Figura 5. Somatório do limite de escoamento e do efeito WH para o aço FEP04 e, além desses, o valor BH₂ avaliado após pré-deformação de 2% por tração e tratamento térmico (170°C por 20 minutos), indicando assim o índice BH segundo a norma FIAT 52814⁽²⁾ para o aço BH220.

3.2 Avaliação da Estampabilidade e da Resistência à Indentação Indireta dos Capôs

Os pares de deformação ϵ_1 e ϵ_2 da região 5 (região mais crítica) dos painéis estampados com aços BH220 e FEP04 são mostrados, respectivamente (Figuras 6 e 7). De um modo geral, as maiores deformações (ϵ_1) em todas as regiões avaliadas dos capôs estampados com ambos os aços foram similares e bastante baixas, indicando assim que os materiais são adequados para a conformação do componente. As deformações em ϵ_1 (maior deformação) dos painéis não passaram de 0,15 quando estampado com aço BH220 e de 0,13 quando conformado com o aço FEP04. As deformações em ϵ_2 (menor deformação) dos painéis variaram de aproximadamente -0,13 a 0,04, independente do substrato utilizado. Os modos de deformação predominantes dessas regiões avaliadas para ambos os aços são de embutimento ($\epsilon_1 > 0$ e $\epsilon_2 < 0$), de deformação plana ($\epsilon_1 > 0$ e $\epsilon_2 = 0$) e de estiramento (ϵ_1 e $\epsilon_2 > 0$).

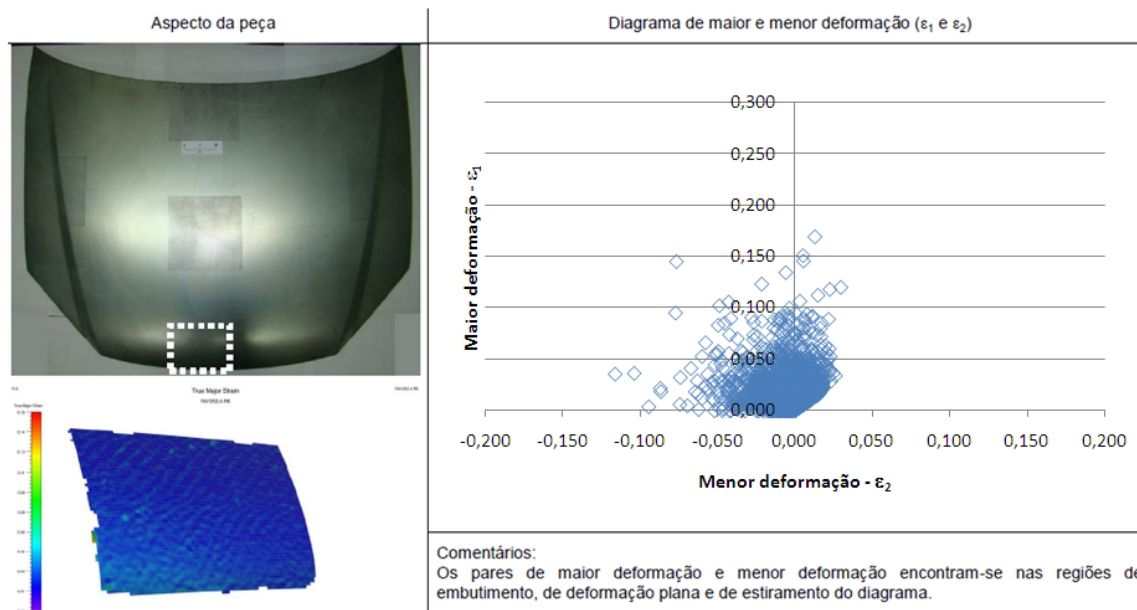


Figura 6. Aspecto da peça capô confeccionado com aço BH220 e, em detalhe, a região 5 (R5) da Figura 3, além do diagrama com as maiores e menores deformações dessa região.

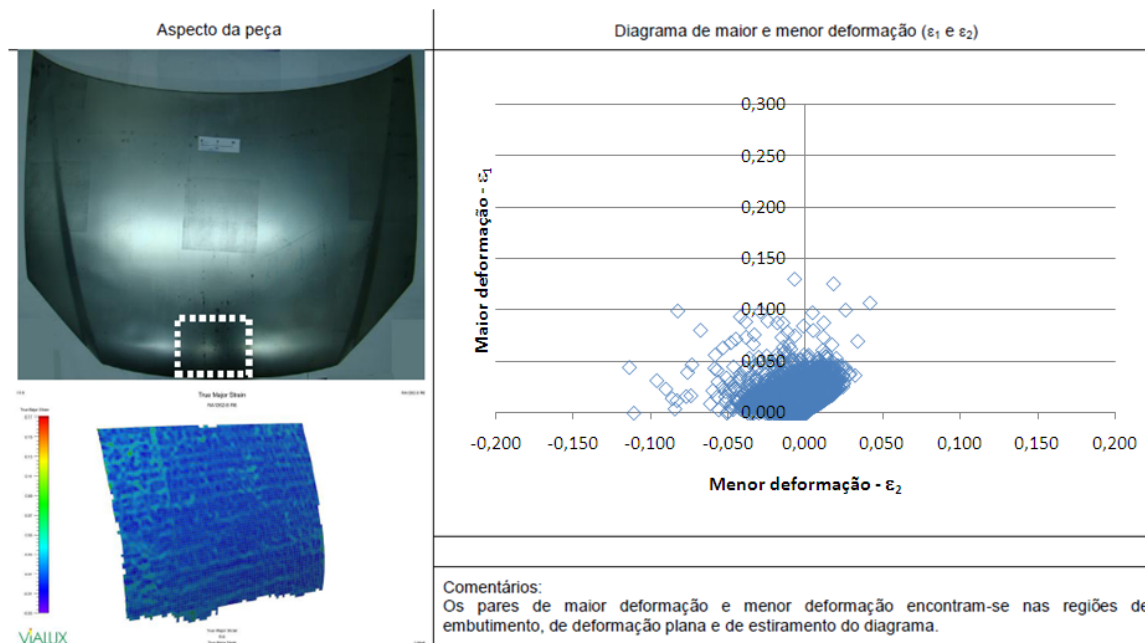


Figura 7. Aspecto da peça capô confeccionado com aço FEP04 e, em detalhe, a região 5 (R5) da Figura 3, além do diagrama com as maiores e menores deformações dessa região.

Na Tabela 5 e nas Figuras 8 e 9 são mostrados os resultados de limite de escoamento (LE) de corpos de prova retirados em diferentes regiões dos capôs estampados (CE) e do capô estampado/tratados termicamente (CET), além dos efeitos WH e BH. Nota-se que, em quaisquer das regiões analisadas, o limite de escoamento do capô na condição final do aço BH220 (CET) foi da ordem de 100 MPa superior ao obtido para o painel na condição final do aço FEP04 (CE). A condição final como painel estampado (CE) para o aço FEP04, diferentemente da adotada para o aço BH220 (CET), foi considerada, pois aquele aço não apresenta efeito BH. Outra observação importante que pode ser extraída dos resultados é que quando menores encruamentos propiciados pelo processo de conformação (efeito WH) são empregados, o ganho de resistência pelo efeito BH (no caso de

aço BH220) se torna mais proeminente (notadamente, regiões 2 e 3). Ao passo que quando o efeito WH é mais pronunciado, o efeito BH se torna bastante baixo.

Tabela 5. Valores de limite de escoamento (LE), além dos efeitos *Work Hardening* (WH) e *Bake Hardening* (BH) avaliados em diferentes regiões dos capôs estampados (CE) e estampados/tratados termicamente (CET) com aços BH220 e FEP04

Aço	Região	LE CE (MPa)	LE CET (MPa)	WH (MPa)	BH (MPa)
BH220	R1	342	343	107	1
	R2	286	313	51	27
	R3	326	337	91	11
	R4	340	344	105	4
	R5	342	346	107	5
FEP04	R1	234	CNA	63	CNA
	R2	216	CNA	45	CNA
	R3	240	CNA	69	CNA
	R4	236	CNA	65	CNA
	R5	244	CNA	73	CNA

* CNA: Condição não avaliada.

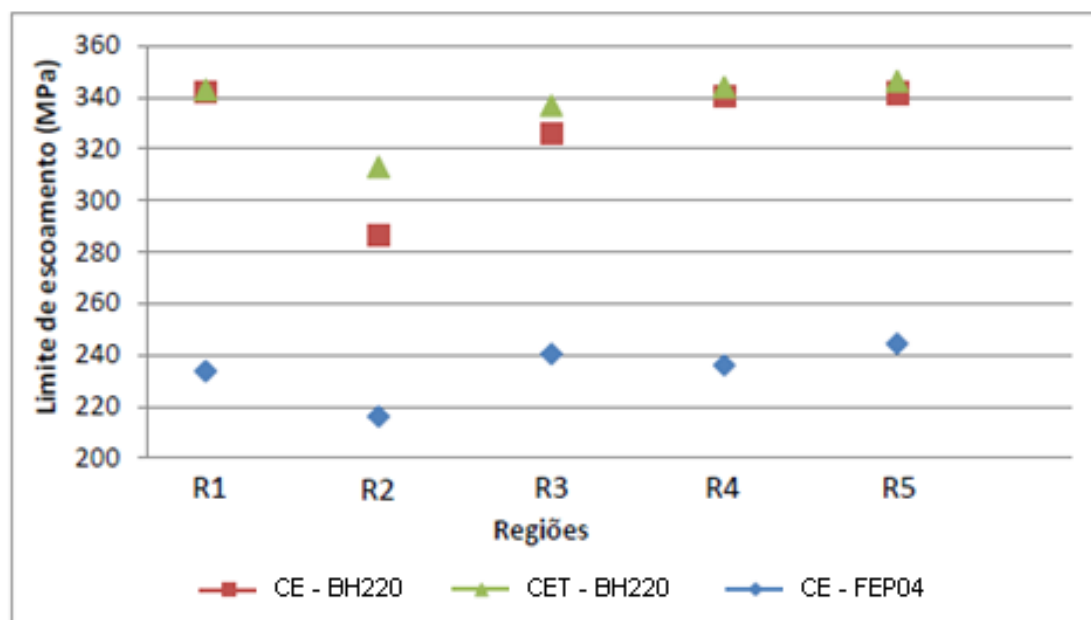


Figura 8. Valores de limite de escoamento avaliados em diferentes regiões dos capôs estampados (CE) e estampados/tratados termicamente (CET) com aços BH220 e FEP04.

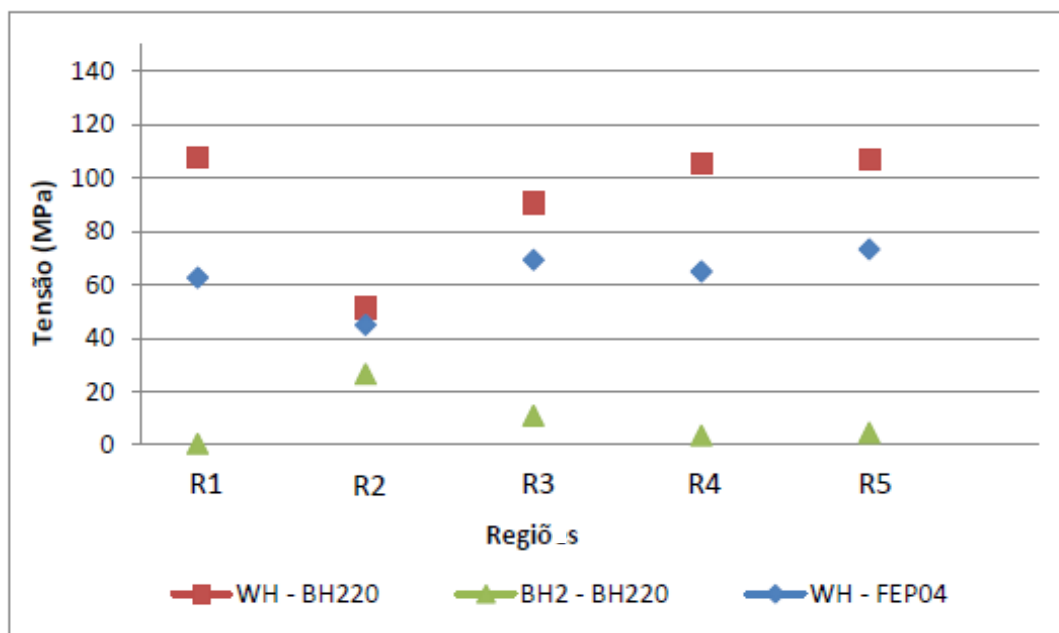


Figura 9. Valores dos efeitos WH e BH avaliados em diferentes regiões dos painéis estampados e estampados/tratados termicamente com aços BH220 e FEP04.

Na Tabela 6 e Figura 10 são mostrados os resultados das cargas necessárias para propiciar uma indentação permanente, obtidos por meio de cálculo baseado na equação proposta por Hodgins, 2001⁽⁷⁾ (Equação 1). Percebe-se que o aço BH220 apresentou comportamento superior ao do aço FEP04 independentemente da região avaliada, no que se refere à resistência à indentação indireta. Nas regiões 2 e 3, onde o encruamento do material propiciado pelo processo de estampagem foi baixo, o efeito BH contribuiu de forma decisiva para tornar similar a resistência à indentação dos aços.

Tabela 6. Carga para propiciar uma indentação permanente, estimada por meio da Equação 1, de diferentes regiões dos painéis estampados e estampados/tratados termicamente com aços BH220 e FEP04

Aço	Região	Espessura (mm)	LE (MPa)	P (MPa x mm ²)
BH220	R1	0,606	343	126
	R2	0,610	313	116
	R3	0,608	337	125
	R4	0,606	344	126
	R5	0,610	346	129
FEP04	R1	0,720	234	121
	R2	0,730	216	115
	R3	0,720	240	124
	R4	0,720	236	122
	R5	0,720	244	126

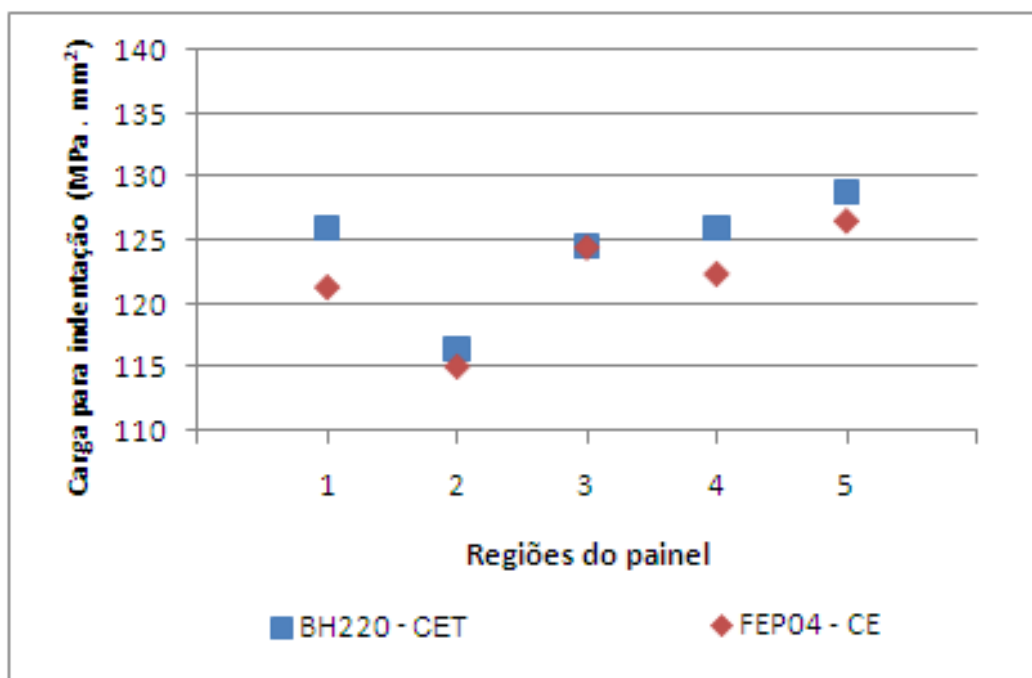


Figura 10. Carga para propiciar uma indentação permanente estimada por meio da proporcionalidade com o limite de escoamento e com quadrado da espessura obtida em diferentes regiões dos painéis estampados (CE) e estampado/tratados termicamente (CET) com aços BH220 e FEP04.

4 CONCLUSÃO

O índice BH do aço BH220 avaliado (310 MPa), que contempla a soma dos valores dos efeitos WH e BH2, encontra-se dentro da especificação da norma FIAT 52814,⁽²⁾ sendo superior em torno de 100 MPa ao obtido para o aço FEP04 utilizando a mesma metodologia de ensaio.

Os pares de deformações (ϵ_1 e ϵ_2), em todas as regiões avaliadas dos capôs estampados com ambos os aços foram similares e bastante baixos, indicando assim que os materiais são adequados para a conformação do componente.

Avaliando qualquer região analisada do capô, o limite de escoamento de corpos de prova retirados do componente na condição final para o aço BH220 (painel estampado/tratado termicamente) foi da ordem de 100 MPa superior ao obtido para o painel na condição final do aço FEP04 (capô estampado), mesma diferença obtida no ensaio de envelhecimento das chapas planas.

Quanto à resistência à indentação avaliada de forma indireta, pode-se afirmar que o aço BH220 apresentou melhores resultados que o aço FEP04, sendo que em regiões de baixo encruamento o efeito BH do aço BH220 foi determinante para o aumento da resistência à indentação.

Portanto, é possível a utilização do material BH220 com espessura de 0,65 mm no lugar do aço FEP04 de 0,75 mm de espessura no capô do automóvel. A proposta permite reduzir aproximadamente 1,5 kg no peso do *blank*, propiciando assim uma redução em torno de 13% no peso do painel.

REFERÊNCIAS

- 1 BORGES, R. Aços com envelhecimento controlado: Efeito do modo e da quantidade de pré-deformação. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.

- 2 NORMA 52814. *High-Resistance Steel Sheets and Strips with Yield Point of 180 to 300 MPa*. Fiat Auto Normazione, 03a ed., Turim, 2004.
- 3 NORMA FG52806. *Low Carbon Steel Sheet and Strip*. Fiat Auto Normazione, 02a ed., Turim, 2009.
- 4 Norma UNI EN 10002-1. *Metallic Materials – Tensile Testing – part 1: Method of test at ambient temperature*. 2004.
- 5 SERGIO EGLAN SILVEIRA NETTO. Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio grande do Sul, 2004.
- 6 ASTM. A 370. *Test methods and definitions for mechanical testing of steel products*. Edição 2011.
- 7 HODGINS, B. *The Numerical Prediction of the Dent Resistance of Medium Scale Aluminum Structural Panel Assemblies*. Thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Mechanical Engineering -Waterloo, Ontario, Canada, 2001.
- 8 ASTM. E 112. *Test methods for determination average grain size*. Edição 2010.