

DESENVOLVIMENTO DE AÇOS ISOTRÓPICOS COM CARACTERÍSTICAS DE *BAKE HARDENABILITY*¹

João Francisco Batista Pereira²
Roberta Oliveira Rocha³

Resumo

Experiências conduzidas para avaliar o aumento da resistência mecânica de painéis externos produzidos com aços isotrópico e *bake hardening*, de grau de resistência similar, mostraram a existência de uma deformação crítica ϵ_c , abaixo da qual, painéis produzidos com o aço *bake hardening* apresentam melhor desempenho influenciado pelo valor BH. Para deformações superiores a ϵ_c , painéis mais rígidos são obtidos com o aço isotrópico, em razão de sua maior capacidade de encruamento. Avaliações da conformação em painéis externos de veículos mostraram que a deformação não é homogênea, e pode variar numa faixa ampla em função da região no painel, de forma que o desempenho do aço isotrópico nos locais de deformação inferior a ϵ_c , e do aço *bake hardening* naqueles de deformação superior a ϵ_c não é o ideal. Esse trabalho apresenta os resultados do estudo que permitiu incorporar, num mesmo aço, as características de isotropia e *bake hardenability* possibilitando assim um novo produto que permite otimizar a resistência mecânica de painéis externos de veículos sob qualquer nível de deformação.

Palavras-chave: Aços de alta resistência; Aços isotrópicos; Aços *bake hardening*.

¹ Contribuição Técnica ao 42º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos; 25 a 28 de Outubro de 2005, Santos, SP, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerência do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento de Produtos da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheira Metalurgista, D.Sc., Gerência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços isotrópico^(1,2) e *bake hardening*^(3,4) são materiais de média/alta resistência, destinados ao mercado automotivo, e que oferecem significativas vantagens para a produção de componentes. São adequados, principalmente, para peças estampadas de grande superfície (painéis de cobertura), embora possam ser aplicados a painéis internos e peças estruturais. A diferença entre esses produtos está na concepção; enquanto o aço isotrópico constitui-se de um material de baixo carbono, acalmado com alumínio e microligado ao Ti, o aço *bake hardening* é um material de carbono mais baixo que o isotrópico ($C < 0,02\%$), desgaseificado a vácuo, acalmado com alumínio e refosforado. Essa diferença na concepção é responsável por aspectos bastantes distintos do comportamento desses aços. Enquanto que no isotrópico o desempenho é fundamentado no fluxo uniforme, determinado por uma baixa anisotropia planar ($-0,15 < \Delta r < 0,15$), além de alto coeficiente de encruamento (n), no *bake hardening* esse desempenho é derivado de um coeficiente de anisotropia normal (r) relativamente elevado e da capacidade de envelhecer por deformação, que permite a painéis produzidos com esse aço aumentar de resistência durante o processo de cura da pintura.

Nesse trabalho é feito um estudo comparativo entre esses dois aços e desenvolvido um produto que incorpora as características de ambos.

2 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AÇOS ISOTRÓPICO E *BAKE HARDENING*

Amostras dos aços isotrópico e *bake hardening* de espessura 0,70 mm e de resistências mecânicas similares, Tabela 1, foram usadas na conformação de um painel externo real, Figura 1. O tamanho dos *blanks* foi de 1370 mm x 1820 mm.

Tabela 1. Propriedades mecânicas na direção transversal a de laminação.

Aço	LE (MPa)	LR (MPa)	Al(%) BM=50mm	n	r	BH ^(*) (MPa)
Isotrópico	233	339	41,5	0,225	1,11	-
<i>Bake Hardening</i>	213	322	38,4	0,119	2,35	35

(*) 2% pré-deformação em tração – 170°C x 20 min.

Quatro painéis foram produzidos a partir de *blanks* marcados com malhas de círculos utilizando-se uma prensa hidráulica de 1000 toneladas. Na Figura 1 são mostradas as 10 regiões analisadas em cada painel. As regiões de 1 a 7 são de áreas planas onde foi avaliado o aspecto rigidez, enquanto as demais, de 8 a 10, envolvem um nível mais acentuado de deformação e, por isso, foram avaliadas através de Diagramas Limite de Conformação (DLC). Dos quatro painéis produzidos, dois, um de cada aço, foram submetidos ao tratamento de cura da pintura.

A análise do nível das deformações nas regiões R8, R9 e R10, Figura 2, mostra que em nenhuma delas ocorreu ruptura, estando todas as deformações abaixo da região de segurança. É mostrado, ainda, que nessas regiões predomina a deformação por estiramento (quadrante direito da curva). É de se esperar, portanto, que materiais que possuam maior valor n , caso do aço isotrópico, apresentem um melhor desempenho na conformação, o que pode ser comprovado considerando-se a menor proximidade das deformações à curva de segurança (linha tracejada).

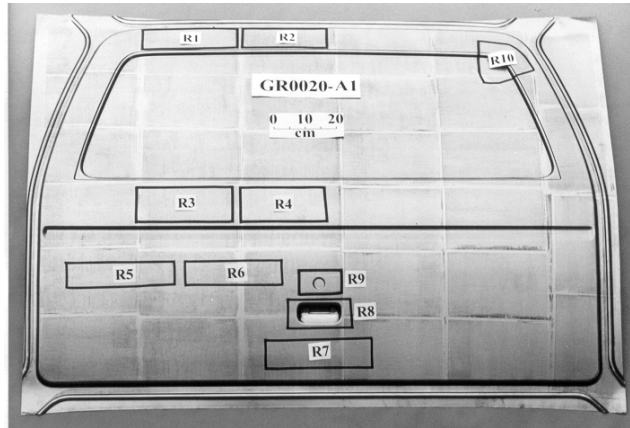
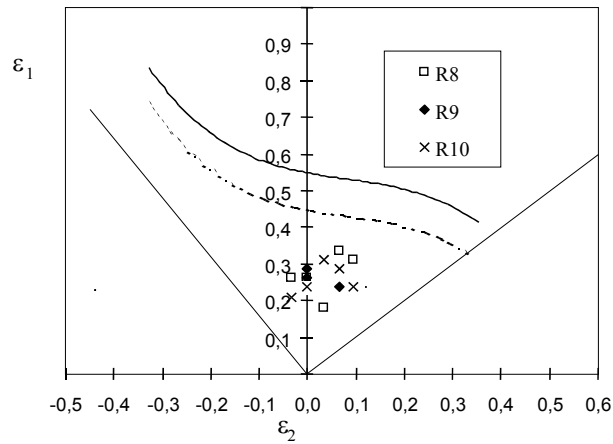
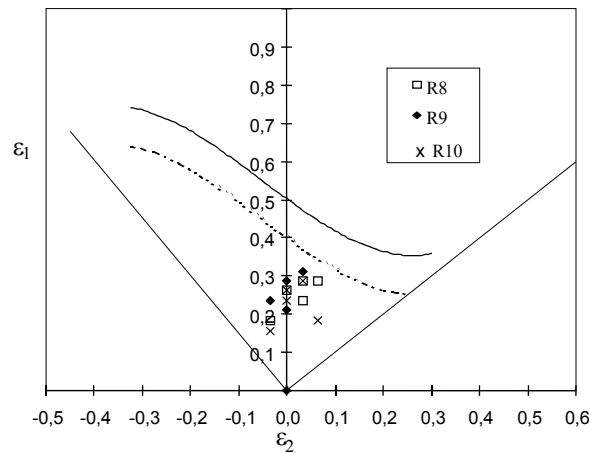


Figura 1. Foto do painel mostrando as regiões avaliadas.



(a) Isotrópico



(b) Bake Hardening

Figura 2. Diagramas Limite de Conformação mostrando as deformações referentes as regiões R8, R9 e R10.

Os valores de resistência à tração dos painéis como estampados (def.) e com tratamento térmico de cura da pintura (t.t.), além da deformação equivalente real média por região, medida em corpos-de-prova retirados nas regiões R1 a R7, são mostrados

na Tabela 2. São mostrados ainda os valores do limite de escoamento medidos na chapa em direção perpendicular à de laminação (LE_{90}).

Tabela 2. Valores de resistência a tração nas regiões R1 a R7 em painéis somente estampados e com tratamento térmico de cura da pintura.

Aço	LE_{90} (MPa)	R1		R2		R3		R4		R5		R6		R7	
		0,60%		0,00%		1,90%		1,60%		0,80%		0,30%		0,10%	
		def.	t.t.	def.	t.t.	def.	t.t.	def.	t.t.	def.	t.t.	def.	t.t.	def.	t.t.
Isotrópico	233	243	245	230	233	272	275	264	267	248	251	240	243	238	237
Bake Hardening	213	250	264	210	240	289	291	282	281	248	256	237	245	234	247

Conforme pode ser observado, de um modo geral, a resistência mecânica do painel, medida nas sete regiões analisadas, varia com a deformação imposta à região, sendo aproximadamente igual à da chapa na região R2 (0% deformação) e atingindo seu maior valor na região R3 (1,9% de deformação).

Um outro aspecto avaliado, Tabela 2, foi a influência do tratamento térmico de cura da pintura na resistência dos painéis. Os resultados mostram, conforme esperado, que no aço isotrópico a resistência mecânica é pouco ou nada afetada pelo tratamento. Já no aço *bake hardening*, o valor BH, medido pela diferença da resistência mecânica entre painéis tratados termicamente e painéis deformados, é dependente da quantidade de deformação, Figura 3, sendo em torno de 35 MPa para deformação 0% (R2) e caindo a zero para deformação equivalente superior a 1,5%. Esse resultado pode ser associado ao maior número de deslocações livres envolvidas na deformação com predominância de expansão biaxial⁽⁵⁾, o que torna necessário uma maior quantidade de átomos intersticiais para que o envelhecimento ocorra.

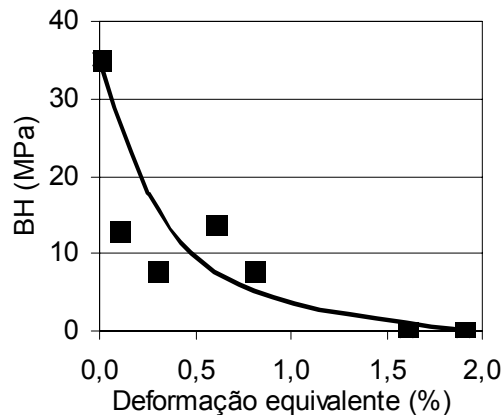


Figura 3. Influência da pré-deformação em expansão biaxial medida no painel no valor BH.

Uma vez demonstrado, Figura 3, que o efeito BH só é efetivo para pequenas deformações, e, que painéis reais, quase sempre, envolvem deformações de intensidade variável foi investigado o efeito da quantidade de deformação no aumento da rigidez.

Tomando os valores de tensão e deformação equivalentes da Tabela 2, convertidos para tensão e deformação reais, e relacionando-os através do logaritmo da Equação (1)⁽⁶⁾, pode-se determinar os valores de K e n para cada material. É possível,

então, por extrapolação das equações obtidas, prever a resistência de um painel, produzido com qualquer desses aços, usando uma ampla faixa de deformações. O resultado é mostrado na Figura 4.

$$\sigma = \sigma_0 + k \varepsilon^n \quad (1)$$

onde :

- σ Tensão equivalente real (resistência do painel)
- σ_0 Limite de escoamento do aço
- k Constante plástica de resistência
- ε Deformação real equivalente
- n Coeficiente de encruamento

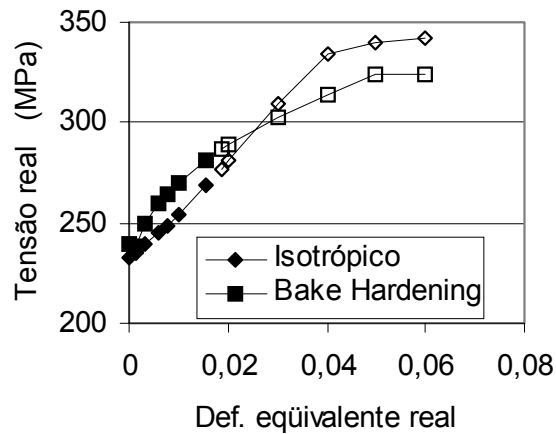


Figura 4. Variação da resistência do painel em função da deformação. Os pontos claros são extrapolações.

A figura mostra a existência de uma deformação crítica ε_c , dada pela interseção das duas curvas, e que no presente caso é da ordem de 3%, abaixo da qual, painéis produzidos com o aço *bake hardening* apresentam maior resistência, influenciada pelo valor BH. Para deformações superiores a ε_c , painéis mais rígidos são obtidos com o aço isotrópico, em razão de sua maior capacidade de encruamento.

3 DESENVOLVIMENTO DO AÇO ISOTRÓPICO COM CARACTERÍSTICAS DE *BAKE HARDENABILITY*

Conforme evidenciado anteriormente, Figura 4, o melhor desempenho de um ou outro tipo de aço é determinado pela intensidade da deformação aplicada. Além disso, na maioria dos painéis automotivos, a deformação não é homogênea, e pode variar em amplas faixas dependendo da região no painel. Um exemplo disso é mostrado na Figura 5, que apresenta um capô real, em desenho esquemático, mostrando os valores de deformação percentual medidos a partir de malhas de círculo gravadas eletroliticamente na superfície da chapa, anterior à conformação.

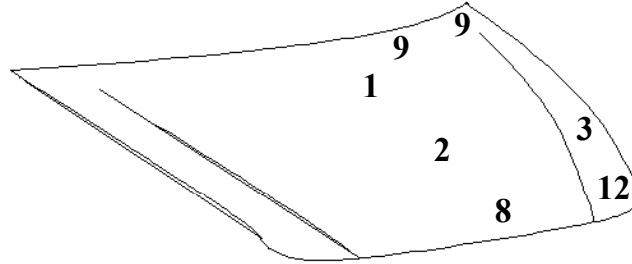


Figura 5. Desenho esquemático de um capô real mostrando os valores de deformação, em porcentagem, medidos em cada região.

Considerando tais aspectos, foram realizadas experiências em escala piloto, visando desenvolver um produto, que reunisse em uma única composição química, as características de isotropia e *bake hardenability*. A Figura 6 reproduz, de forma esquemática, os resultados da Figura 4. O novo produto, o aço IsoBH, deverá apresentar comportamento semelhante ao do isotrópico em relação à deformação e aumento de resistência devido ao envelhecimento por deformação (BH).

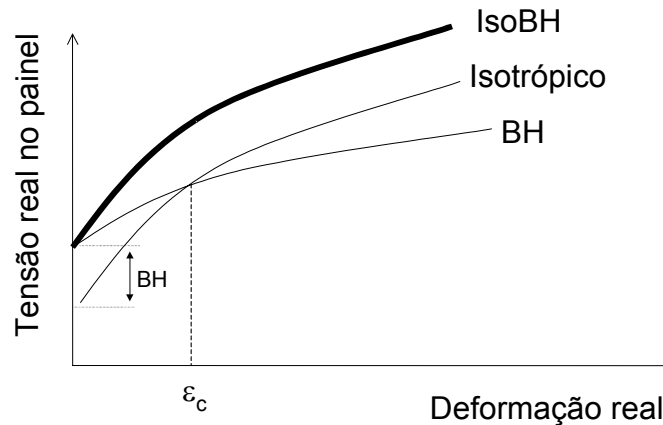


Figura 6. Comportamento dos aços isotrópicos, BH e IsoBH em função da deformação no painel. Os valores de tensão incorporam o aumento de resistência devido ao valor BH.

A partir de uma composição química básica para a produção de aços isotrópicos foram testadas diferentes composições experimentais cujos intervalos de variação avaliados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Composição química por faixas dos aços avaliados (% em massa).

C	Mn	Al	Ti
0,004 ~ 0,020	0,15 ~ 0,35	0,020 ~ 0,080	0,008 a 0,03

Esses aços foram laminados a quente e a frio e recozidos em caixa a 720°C por 10 horas.

A variação das propriedades mecânicas, Δr e BH, Figura 7, mostra que teores de carbono da ordem do limite máximo de solubilidade na ferrita permitem a obtenção de um aço isotrópico ($-0,15 < \Delta r < 0,15$), com características de *bake hardenability* (BH > 30 MPa).

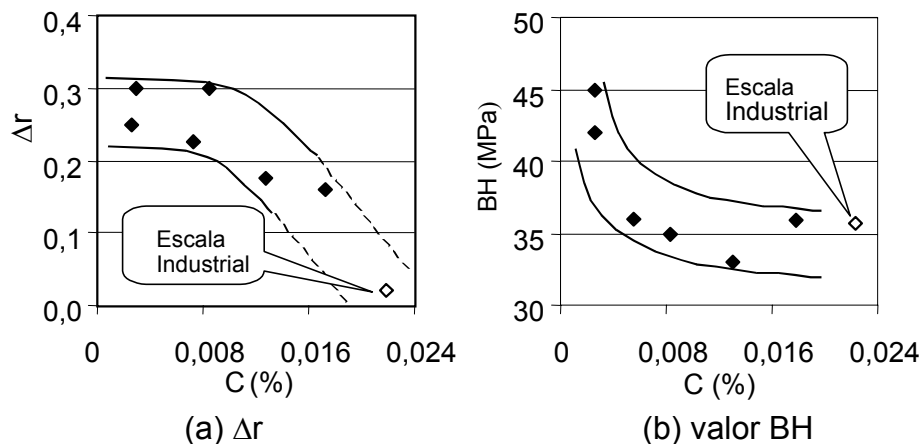


Figura 7. Variação das propriedades mecânicas (a) Δr e (b) BH. O valor indicado nos gráficos corresponde ao resultado de uma experiência industrial realizada.

A partir dos dados obtidos em escala piloto foram produzidas corridas em escala industrial cujos resultados são mostrados na tabela 4.

Tabela 4. Composição química (% em peso) e propriedades mecânicas na direção transversal à de laminação do aço IsoBH produzido em escala industrial.

LE (MPa)	LR (MPa)	Al (%) BM = 80 mm	r	Δr	BH ^(*) (MPa)
241	346	37	1,1	0,02	36

(*) 2% pré-deformação em tração – 170°C x 20 min.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foi mostrado que se a deformação real é inferior a 3%, painéis produzidos com o aço *bake hardening* apresentam maior resistência mecânica, que é fortemente influenciada, para pequenas deformações, pelo valor BH. Para deformações superiores a 3%, o material isotrópico é o mais indicado em razão de sua maior capacidade de encruamento.

A existência de uma deformação crítica, que funcionaria como um divisor do desempenho dos dois aços é uma consequência do mecanismo principal de aumento de resistência de cada um dos aços. Em relação ao aço *bake hardening*, esse mecanismo está relacionado ao aprisionamento das deslocações móveis, geradas na conformação, pelos átomos de carbono difusível, durante o tratamento de cura da pintura (envelhecimento por deformação)^(3, 4). A intensidade do envelhecimento, e por consequência a deformação crítica, são então dependentes do teor de carbono difusível e do número de deslocações móveis, sendo o valor BH uma medida do carbono difusível. Nesse estudo, foi verificada uma deformação crítica da ordem de 3%. Esse valor, contudo, reflete as condições do aço avaliado cujo valor BH é da ordem de 35 MPa, podendo variar, para outros aços, em função do valor BH.

A deformação crítica pode também ser afetada por aumento ou diminuição da capacidade de encruamento do aço isotrópico. Contudo, esse parâmetro é mais sensível a alterações da composição química⁽²⁾, que só é adotada quando se deseja obter outros níveis de resistência mecânica, mantidas, evidentemente, as condições de processamento.

Em relação ao desenvolvimento do novo aço⁽⁷⁾ que reúne isotropia e *bake hardenability* num mesmo produto, foi observada uma sensibilidade bastante forte dos parâmetros Δr e valor BH com a variação do teor de carbono do aço. A influência do carbono na textura dos aços é bastante conhecida. O aumento do teor de carbono interfere com a recristalização, determinando o aparecimento de texturas indesejáveis para a estampabilidade (r), além do enfraquecimento de texturas do tipo $\{111\}\langle uvw \rangle$ ^(8,9). Esse enfraquecimento talvez possa ser responsabilizado pela diminuição do Δr , uma vez que esse parâmetro está associado ao balanço entre as componentes $\{111\}\langle 110 \rangle$ e $\{112\}\langle 110 \rangle$.

Da mesma forma que o Δr , o parâmetro BH cai com o aumento do teor de carbono. Essa queda é atribuída^(10, 11) ao maior número de sítios para a precipitação do carbono (surgimento da cementita em temperaturas mais altas, durante o resfriamento, com o aumento do carbono). Contudo, em nenhum caso analisado, o valor é inferior a 30 MPa, mínimo a partir do qual um aço passa a ser considerado como possuidor de *bake hardenability*.

5 CONCLUSÕES

Experiências realizadas em escala real objetivando avaliar o desempenho de dois aços de mesma resistência mecânica, um isotrópico e um *bake hardening*, no aumento de resistência mecânica de um painel automotivo externo mostrou que:

- Existe uma deformação crítica, ε_c , abaixo da qual, os painéis produzidos com o aço *bake hardening* apresentaram maior resistência mecânica, influenciada pelo valor BH;
- Para deformações superiores a ε_c , painéis mais resistentes foram obtidos com o aço isotrópico em razão de sua maior capacidade de encruamento;

Considerando que a deformação em painéis de veículos não é homogênea e que pode variar em ampla faixa, foram realizadas experiências em escala piloto que permitiram incorporar, num mesmo produto, as características de isotropia e *bake hardenability*. O novo produto permite otimizar a resistência mecânica de painéis externos de veículos sob qualquer nível de deformação.

REFERÊNCIAS

- 1 ZIMNIK, W.; FREIER, K.; BUNGE, H. J. Factors Influencing Planar Anisotropy of Batch-Annealed Cold Strip - Steel Research 64, 1993, n° 8/9.
- 2 BLECK W. Mechanical Properties and Formability of Isotropic Steels – International Symposium for LC and ULC Sheet Steels, Aachen, 1998, Vol 1, pp.: 277-287.
- 3 YAMAZAKI, K.; HORITA, T.; UMEHARA, Y.; MORISHITA, T. Manufacturing condition and automotive use of bake hardening steel sheets - microalloyed HSLA Steels, Chicago, Illinois, USA, Sept, 1988.
- 4 PEREIRA, J. F. B. e NAVES, R. L. Aços Bake Hardening - Aspectos do Desenvolvimento na Usiminas - 2º Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais da ABM, Outubro, 1997.
- 5 PEREIRA, J. F. B.; BORGES, R. N. e GONZALEZ, B. M. Influência do Modo e da Quantidade de Pré-Deformação na Resistência Final de Painéis Automotivos Produzidos com um Aço Bake Hardenable. In: Seminário de Laminação da Colam - ABM, Novembro, 1994.
- 6 USIMINAS, Conformação na Prensa – Fascículo de Informação Técnica, Outubro, 1984.
- 7 PI - 0302782 - Aço Laminado a Frio Para Fabricação de Peças Conformadas de Alta Resistência Mecânica e Seu Processo de Produção - João Francisco Batista Pereira e Roberta de Oliveira Rocha.
- 8 ICHIYAMA, T.; IOSHIDA, T.; EJIMA, M. and MATSUMURA, O. Effect of Carbon Content on Primary Recrystallization Texture in Fe-Al-N Alloys - Transactions ISIJ 15(2), p.69~78, 1975.
- 9 HOSOYA, Y., MAGATAKI, Y. Probable Mechanism on the Recrystallization Texture Formation in IF Steels - 37th MWSP Conf. Proc., ISS, Vol. XXXIII, 1996, pp. : 915~925.
- 10 HANAI, S.; TAKEMOTO, M.; TOKUNAGA, Y.; MIZUYAMA, Y. Effect o grain size and solid solution strengthening elements on the bake hardenability of low carbon aluminum-killed steels – Transactions ISIJ 24(1) p. 17 ~23, 1984.
- 11 TETSU TO HAGANE – JIS p. 191, 1968. Artigo em japonês.

DEVELOPMENT OF BAKE HARDENABLE ISOTROPIC STEEL¹

João Francisco Batista Pereira²
Roberta Oliveira Rocha³

Abstract

Experiments done on the evaluation of strengthening of cover panels produced from Isotropic and Bake Hardening steels of same strength level showed the existence of a critical strain ε_c , above which, panels produced with the Bake Hardening steel present improved performance influenced by the BH value. For strain levels higher than ε_c , stiffer panels are obtained with the Isotropic steel as a result of its superior work hardenability. Evaluations of strain levels in cover panels of vehicles show that the strain path is not homogenous and could vary in a large range which is dependent on the location on the panel. Therefore the performance of the bake hardening steel in regions of strain levels higher than ε_c and that one of Isotropic steel in regions of strain levels lower than ε_c could not be the ideal. This paper presents the results of a new steel that incorporates, in the same product, the isotropy characteristics and bake hardenability. This new material allows to optimize the mechanical strength of vehicles outer panels under any strain level.

Key words: High strength steels; Isotropic steels; Bake hardening steels

¹ Paper presented at 42th Rolling Processes, Rolled and Coated Products Seminar of ABM; Santos, SP, October 25 to 26, 2005.

² Member of ABM; Metallurgical Engineer, M.Sc., Research and Development Center, Usiminas, Ipatinga, MG, Brazil.

³ Metallurgical Engineer, D.Sc., Metallurgy and Quality Assurance Department, Usiminas, Ipatinga, MG, Brazil.