

ESTUDO DE VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO MATERIAL FERRÍTICO – BAINÍTICO EM SUBSTITUIÇÃO AO *DUAL PHASE*¹

Rafael Fagundes Ferreira²
José Rubens Gonçalves Carneiro³

Resumo

Os aços estruturais utilizados na indústria automobilística atualmente são os livres de intersticiais, microligados, DP (*dual phase*) e FB (ferrítico bainítico). O aço ferrítico-bainítico (FB) é laminado a quente e ultra resistente, com microestrutura constituída de ferrita e bainita com resistência mecânica semelhante ao DP 600. Nesse trabalho, foram realizados ensaios mecânicos e metalográficos para determinação das propriedades dos aços DP 600 e FB 590 e, posteriormente, foi feita a simulação computacional e física da estampagem da peça do reforço do cruscotto. Na simulação computacional, foi utilizado o coeficiente de atrito constante e igual a 0,1. Os resultados da simulação física mostraram a possibilidade de substituição do DP 600 pelo aço FB 590 na produção do componente o que não ficou evidenciado na simulação provavelmente devido a utilização do coeficiente de atrito constante. O aço DP 600 experimentou modificação do coeficiente de encruamento após a cura.

Palavras-chave: Conformação mecânica; Ferrítico bainítico; *Dual phase*; Soldagem.

FEASIBILITY STUDY ON UTILIZATION OF FERRITIC – BAINITIC STEEL IN PLACE OF DUAL PHASE STEEL

Abstract

Structural steels used in the automotive industry are currently free of interstitial elements, these steels are called DP ("dual phase") and FB (ferritic - bainitic). The ferritic - bainitic steel (FB) is hot-rolled, presents high strength and the microstructure consists of ferritic and bainite with mechanical strength similar to DP 600. In this work were accomplished mechanical tests and metallographic analyses for determination of properties of steels DP 600 and FB 590, later was made the FEM simulation and stamping of the dashboard piece. In the simulation, we used the friction coefficient constant and equal to 0.1. The results of the physical simulation (stamping) showed the possibility of substitution of the DP 600 steel to the FB 590 steel in the production of the dashboard. This possibility was not evidenced in the FEM simulation probably due to the use of a constant friction coefficient. The DP 600 steel presented modification in the strain hardening exponent after the cure in the painting process.

Key words: Metal forming; Ferritic-bainitic; Dual-phase; Welding.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Fiat Automóveis.

³ Doutor em Engenharia Metalúrgica, Professor da PUC-MG, Belo Horizonte, MG.



1 INTRODUÇÃO

A busca pela satisfação das exigências do consumidor em termos de desempenho, segurança e funcionalidade do veículo, somada a necessidade de reduzir consumos internos, faz com que a indústria automobilística desenvolva e empregue novas técnicas e soluções como forma de atingir suas demandas.

A partir da década de 90, maiores exigências quanto a emissão de gases e de segurança veicular fizeram com que a indústria automotiva exigisse de sua cadeia de fornecedores o desenvolvimento de soluções que permitissem desenvolver carros mais seguros, ecologicamente corretos e de baixo custo.

Em resposta ao aumento do petróleo ao longo dos últimos quinze anos, os fabricantes de automóveis em todo o mundo têm realizado modificações significativas nos projetos de modo a produzir veículos de baixo custo e de menor consumo de combustível. Além da própria redução das dimensões dos carros, menor peso tem sido alcançado pelo uso de aços de resistência mecânica mais elevada.

Nesse contexto, esforços estão sendo feitos no sentido de se desenvolver e de se aplicar novos aços que combinem boa conformabilidade com elevada resistência mecânica, para a redução de espessura do material sem perda de desempenho, reduzir consumo de combustível e emissão de gás de combustão e especialmente, dar segurança ao passageiro.⁽¹⁾

Os aços de alta resistência (HSS) são definidos como os aços que apresentam limite de escoamento entre 210 MPa e 550 MPa. Acima deste valor de limite de escoamento têm-se os aços de ultra-alta resistência (UHSS).

Os aços avançados de alta resistência incluem os aços bifásicos (DP), aços de plasticidade induzida por transformação (TRIP), os de fases complexas (CP-“Complex Phase”) e os martensíticos (Mart).⁽²⁾ Esses aços exibem alto limite de escoamento com boa conformabilidade, combinando elevada capacidade de deformação como resultado de uma baixa razão elástica (razão entre os limites de escoamento e resistência).

A utilização do aço ferrítico-bainítico (FB) nos automóveis proporciona a redução de peso e, em alguns casos, a redução de custo, devido a sua elevada resistência mecânica e menor custo de fabricação.

Devido às suas características, os aços FB são produzidos visando atender principalmente o segmento de rodas automotivas (leves e pesadas), embora sejam usados em outros componentes, como, por exemplo, as “longarinas”, “travessas soto pavimento”, “túnel central”, “coluna B”, “braço oscilante” e “caixas de roda”, conforme mostrado na Figura 1.

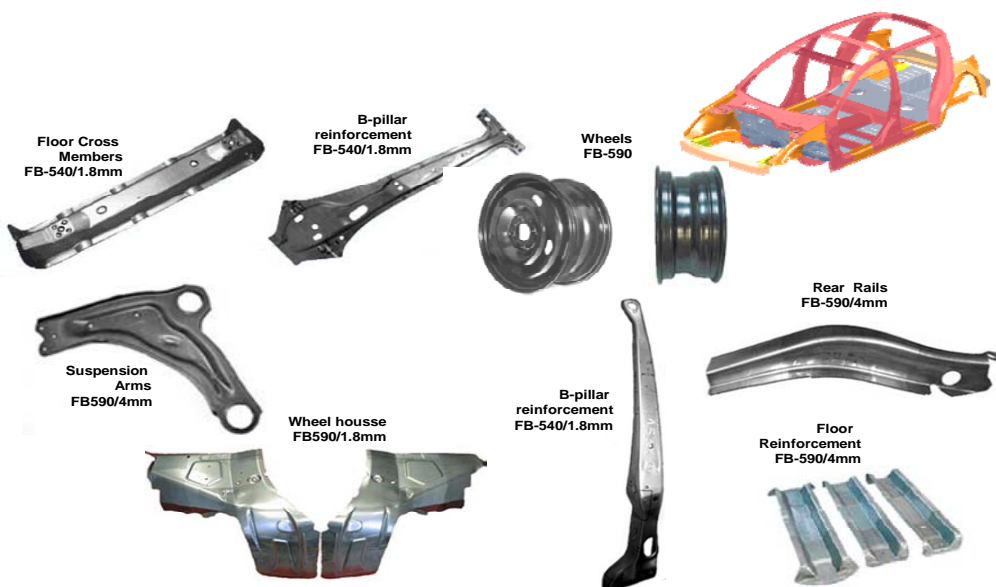


Figura 1: Exemplos de aplicações dos aços FB.

Os aços FB são laminados a quente, endurecidos por transformação de fase, com microestrutura constituída de ferrita e bainita, e endurecimento adicional por precipitação, através da adição de microligantes tais como nióbio. Esses aços apresentam baixo teor de carbono, manganês próximo a 1,40%, além da adição de nióbio para evitar problemas na soldagem e garantir conformabilidade de diferentes peças com geometria complexa.

Este trabalho visa estudar a estampabilidade de chapas de 2,2 mm de espessura em aços DP 600 e FB 590 na substituição do componente utilizado em diferentes modelos de carro de passeio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais Utilizados

As propriedades dos materiais ensaiados foram levantadas através de análise química, ensaios mecânicos e metalográficos.

As amostras retiradas para análise química têm seção de 42x42mm e foram lixadas com óxido de alumínio em granulometria de 40 mesh. A análise dos elementos Mn, Si, P, Cu, Al, e B foram obtidos por espectrometria de emissão ótica em equipamento marca ARL 3560, enquanto que a análise dos elementos C e S foram feito por combustão/infravermelho, equipamento Horiba.

Os corpos de prova para análise metalográfica foram preparados segundo processo convencional. Os corpos-de-prova foram observados em um microscópio óptico, marca Olympus modelo V-ND 25-2, após ataque com reativo de Le Pêra com a seguinte concentração: 30 ± 2 ml do reagente (1% de metabissulfito de sódio em água).

O mais comum e tradicional dos testes para definir algumas propriedades mecânicas é o ensaio de tração. A norma Fiat 52815 (2004)⁽³⁾ especifica os valores de propriedades mecânicas que estão indicados respectivamente na Tabela 1.

Tabela 1. Especificação dos aços utilizados nos ensaios⁽³⁾

Aço	Tensão de resistência (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Espessura (mm)
Dual Phase (DP 600)	Mínimo 590.	340 a 440	Mínimo 20.	2,2
Ferrítico Bainítico (FB 590)	Mínimo 590.	440 a 620	Mínimo 14.	2,2

Os corpos de prova e os ensaios de tração foram realizados segundo norma UNI EN 10002-1.⁽⁴⁾ Os corpos-de-prova foram extraídos das chapas formando ângulos de 0° em relação ao sentido de laminação. No ensaio de tração, determinou-se os valores de tensão de resistência (σ_R), tensão de escoamento (σ_{esc}) e alongamento (Δl) através das equações 1, 2 e 3:

$$\sigma_R = \frac{P_m}{S_0} \quad \text{Equação 1}$$

$$\sigma_{esc} = \frac{P_{esc}}{S_0} \quad \text{Equação 2}$$

$$\Delta l = \frac{l_{ff} - l_0}{l_0} \quad \text{Equação 3}$$

onde, P_m é a carga máxima, P_{esc} é a carga de escoamento do material em uma deformação a 0,2 %, l_{ff} é o comprimento final do corpo de prova após ensaio de tração e l_0 é o comprimento inicial (base de medida) do corpo de prova antes do ensaio.

Foi possível calcular os valores de K (coeficiente de resistência) e de n (coeficiente de encruamento), na expressão:⁽⁵⁾

$$\sigma_v = K * e_v^n \quad \text{Equação 4}$$

a partir da regressão linear obtida através dos valores de tensão real e deformação real. Quanto maior o grau de encruamento, maior o grau de homogeneização das deformações, isto é, o material distribui melhor as deformações ao longo de seu volume, conforme Eglan.⁽⁶⁾

Foi definido que a peça a ser estampada seria o reforço do cruscotto (Figura 2). O componente utiliza o material DP 600 com 2,2 mm de espessura.



Figura 2: Reforço do cruscotto estampado com o material normal produção: DP 600.

Nesta parte do estudo, visou-se a realização de testes de simulação física semelhantes àqueles que ocorrem durante processo de estampagem. Os valores de propriedades mecânicas obtidos no ensaio de tração foram inseridos nos programas de simulação virtual Dynaform e no Proengineer. O coeficiente de atrito utilizado foi constante e igual a 0,1.

Foram estampados oito pares de Scatolamento do Cruscotto com o material proposto FB 590.

3 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A composição química obtida dos aços DP 600 e FB 590 estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Análise química encontrada nos aços avaliados

Material	C	Mn	Al	Si	P	S	Cu	B
DP 600	0,122	1,470	0,039	0,330	0,021	0,003	0,017	0
FB 590	0,100	1,470	0,035	0,203	0,017	0,006	0,018	0

Observa-se que os aços são de baixo carbono e teor mais alto em manganês o que aumenta a temperabilidade. A microestrutura foi uniforme e refinada ao longo da espessura. O principal constituinte do aço DP 600 é a martensita, contendo, ainda, ferrita, bainita e austenita retida (Figura 3).⁽⁷⁾

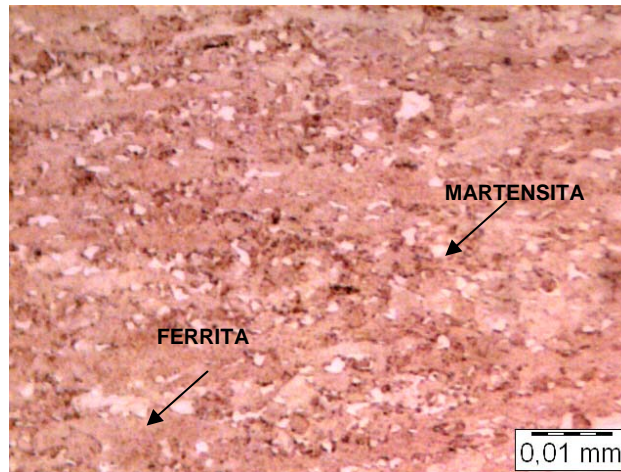


Figura 3: Amostra do DP 600, ataque LePera, aumento de 500x, revelando a presença das fases.

A Figura 4 apresenta uma amostra de FB 590 com matriz ferrítica e martensita/austenita retida. A bainita é identificada com a ajuda do MEV devido principalmente ao tamanho de grão. Ao observar a microfotografia, pode se perceber pequenos pontos pretos disseminados na matriz ferrítica, a qual pode se deduzir que se trata da bainita.

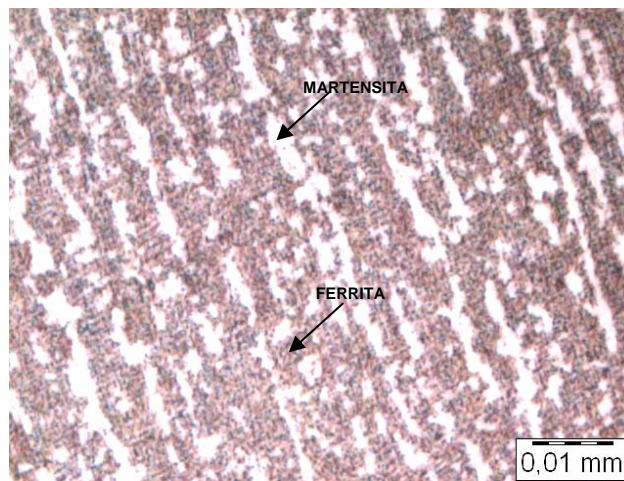


Figura 4: Amostra do FB 590, ataque LePera, aumento de 1000x, revelando a presença das fases.

As curvas tensão x deformação verdadeira dos materiais no estado de fornecimento estão mostradas na Figura 5.

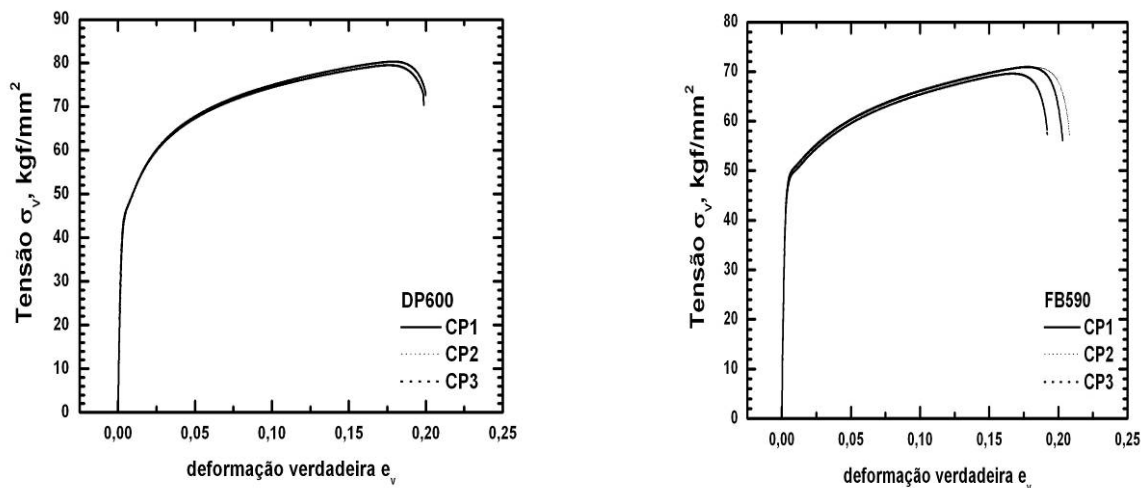


Figura 5: Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira. Espessura 2,2 mm.

A Tabela 3 mostra as propriedades mecânicas obtidas dos aços DP 600 e FB 590.

Tabela 3. Resultados médios encontrados em ensaio de tração

Propriedades	DP 600 Estado de fornecimento	DP 600 Após pré-deformação e forno	FB 590 Estado de fornecimento
Tensão de resistência (MPa)	664 ± 5	664 ± 4	590 ± 2
Tensão de escoamento (MPa)	436 ± 2	583 ± 3	459 ± 3
Alongamento (%)	23 ± 1	19 ± 1	23 ± 1

A partir da regressão linear dos valores experimentais da tensão em função da deformação verdadeira no campo plástico, foram calculados os valores de $\ln(K)$ e de n para o aço DP 600 (em estado de fornecimento e após pré-deformação a 2% e cura ao forno por 170° C) e FB 590 (somente em estado de fornecimento), conforme indicado na Figura 6.

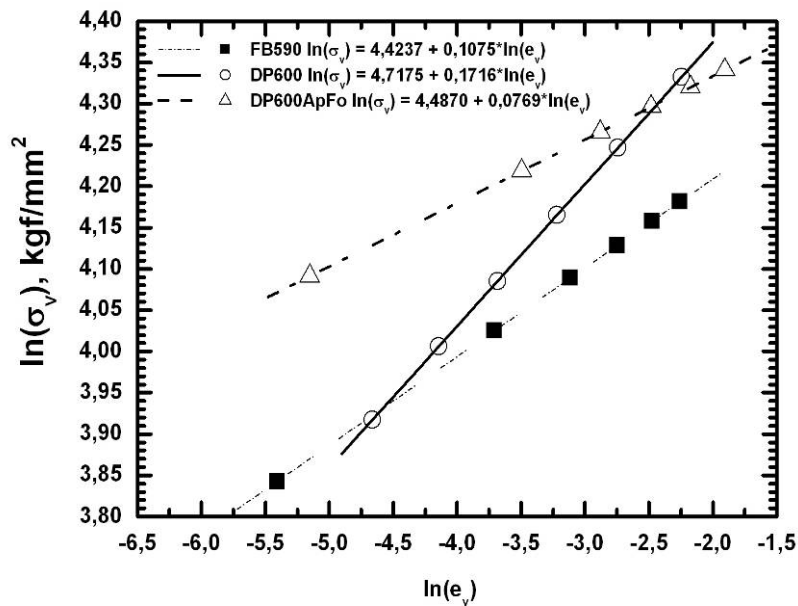


Figura 6: Regressão linear da curva tensão x deformação verdadeira.

As expressões matemáticas envolvendo a tensão verdadeira (σ_v) em função da deformação verdadeira (e_v) para o aço DP 600 e FB 590 foram:

- Aço DP 600 (estado de fornecimento): $\ln(\sigma_v) = 4,7175 + 0,1716 \cdot \ln(e_v)$;
- Aço FB 590 (estado de fornecimento): $\ln(\sigma_v) = 4,4237 + 0,1075 \cdot \ln(e_v)$;
- Aço DP 600 (após cura): $\ln(\sigma_v) = 4,4870 + 0,0769 \cdot \ln(e_v)$;

Essas relações médias foram, posteriormente, usadas na simulação do processo de estampagem.⁽⁸⁾

Ao analisar as características mecânicas encontradas em ensaio de tração, verificaram-se semelhanças nos resultados da Tensão de escoamento e alongamento dos aços FB 590 e DP 600 no estado de fornecimento (Tabela 3).

A simulação virtual foi realizada com os valores de tensões de escoamento no valor máximo especificado em norma (Tabela 1), ou seja, na situação mais crítica dos materiais. Foi simulada somente a etapa de repuxo da estampagem. Conforme observado na simulação do material DP 600 (Figura 7) nas condições máximas de tensão de escoamento do material observa-se que a condição do repuxo apresentou ruptura no canto do raio que pode ser solucionada com um alívio de raio. Utilizando o material FB 590 nas condições de tensão de escoamento máxima, observou-se que, no repuxo, a peça, também, apresentou ruptura maior que a simulação do aço DP 600 (Figura 8).

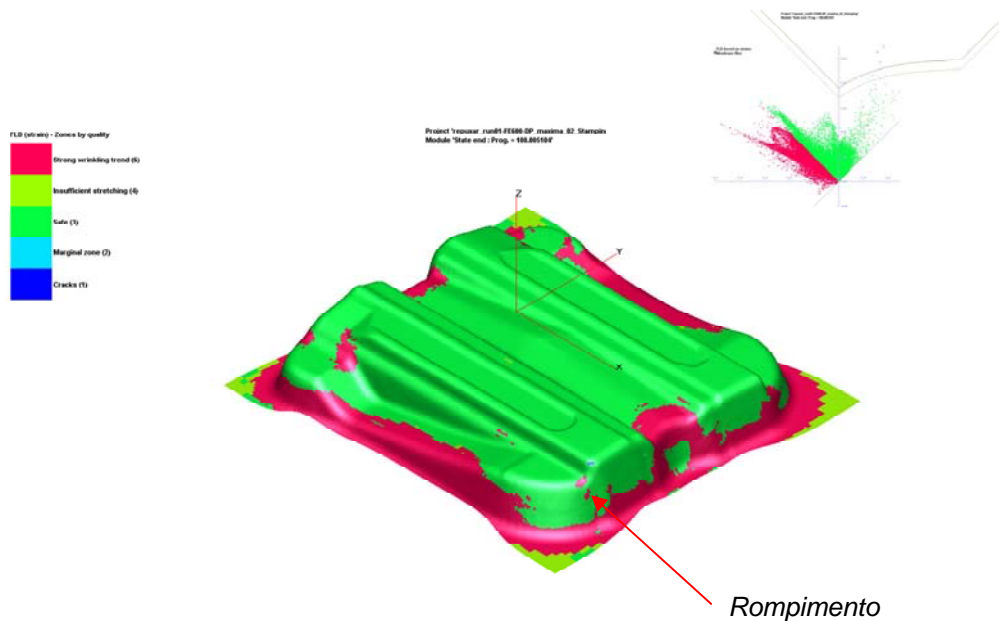


Figura 7: Avaliação virtual de estampagem do aço DP 600 (material normal produção).

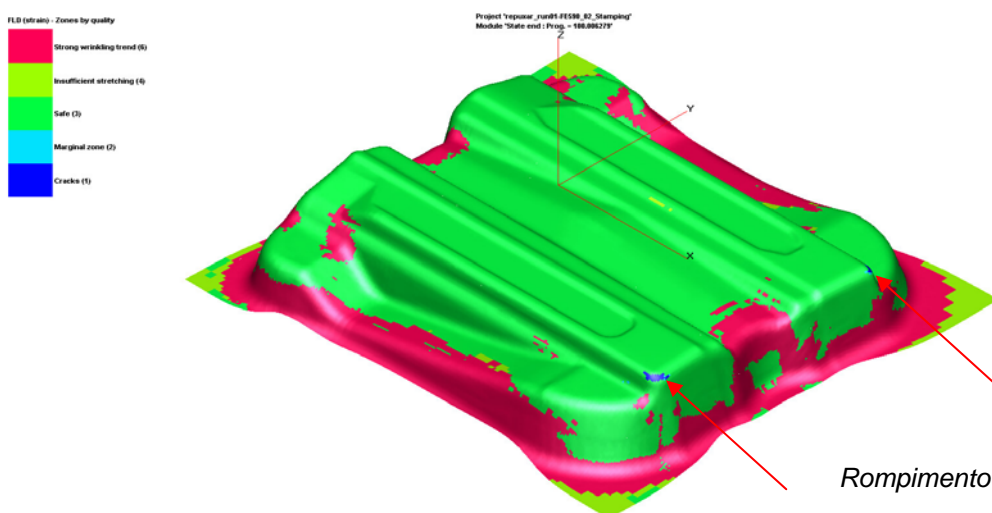


Figura 8: Avaliação virtual de estampagem do aço FB 590 (material proposto).

Com a utilização do coeficiente de atrito constante de 0,1 pode-se ter imprecisão na modelagem. Portanto, mesmo com resultados negativos na avaliação virtual, foi realizada a estampagem do material FB 590, conseguindo no fim do processo a estampagem completa do componente (Figura 9).

Os componentes estampados com o material proposto foram avaliados e todas as peças passaram pela análise dimensional.



1 - Repuxo



2 - corte



3 - calibrar



4 - Furar - separar



Figura 9: Estampagem do componente com o material FB 590.

5 CONCLUSÃO

- Observou-se durante o processo de estampagem que a conformação do FB 590 no componente avaliado foi similar ao atual produção (DP 600), a ponto de não ter que modificar as configurações do ferramental de prensas;
- O material FB 590 (laminado a quente) pode substituir o DP 600 (laminado a frio) para esse componente trazendo benefício da redução de custo em torno de 5% por tonelada do material. Essa redução de custo deve-se a ausência do processo de laminação a frio existente na fabricação do FB 590;

Agradecimentos

Os autores agradecem o grupo ArcelorMittal pela disponibilidade dos materiais ensaiados, a Tower Automotive pela realização das simulações virtuais e físicas e a Fiat por disponibilizar os resultados metalúrgicos.



REFERÊNCIAS

- 1 OZTURK, F.; TOROS, S.; KILIC, S. Tensile and spring-back behavior of DP600 advanced high strength steel at warm temperatures Journal of Iron and Steel Research International v.16(6), p. 41-46, nov. 2009.
- 2 ULSAB-AVC Program, 2001. Technical Transfer Dispatch 6, 05-01-2001, ULSAB-AVC Body Structures Materials.
- 3 NORMA 52815, 2004, "Lamiere e Nastri di Acciaio multifase ed ultra-altoresistenziali laminati a caldo ed a Freddo", Fiat Auto Normazione, 03a ed., Turim.
- 4 Norma UNI EN 10002-1, 2004, "Metallic Materials – Tensile Testing – part 1: Method of test at ambient temperature",
- 5 MIQUERI, F.R. Comportamento do crescimento de trinca por fadiga de um aço ABNT1016 laminado a quente e soldado por GMAW. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. 2006.
- 6 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.
- 7 MURARI, F. Cinética de envelhecimento de aços Dual Phase de baixa resistência mecânica laminados a frio. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2009.
- 8 BERGNER, F.; ZOUHAR, G. A New Approach to the Correlation between the Coefficient and the Exponent in the Power Law Equation of Fatigue Crack Growth International Journal of Fatigue v.12, p. 229-239, 2000.