



AVALIAÇÃO DA POTENCIAL UTILIZAÇÃO DE AÇO DP250/450 EM SUBSTITUIÇÃO AOS AÇOS REFOSFORADO OU HSLA EM PAINÉIS INTERNOS AUTOMOTIVOS ESTAMPADOS¹

Jetson Lemos Ferreira²
José Osvaldo Amaral Tepedino³

Resumo

A potencial utilização de aço *dual phase* da classe de 450 MPa de resistência mecânica (DP250/450), com revestimento do tipo HDG GI, em painéis internos de reforço foi avaliada em termos de propriedades mecânicas em tração e de ensaios de estampabilidade, tendo como referência o comportamento de aços refosforado (REFOSF260/380) e HSLA (HSLA340/420), normalmente utilizados nessa aplicação. O aço DP250/450 exibiu maior capacidade de estiramento e maior propensão ao aumento de resistência após processos de conformação (efeito WH) e de cura de pintura (efeito BH) do que os aços refosforado e HSLA. De um modo geral, a capacidade de embutimento e estiramento de flange (expansão de furo) do aço DP250/450 foi igual à do aço REFOSF260/380 e superior à do aço HSLA340/420. No entanto, o aço *dual phase* apresentou menor capacidade de expansão na condição de furo puncionado em relação ao aço refosforado. Foi observado que o aço *dual phase* é propenso ao fenômeno de retorno elástico, sendo que contramedidas podem ser adotadas durante a estampagem para a minimização desse efeito deletério.

Palavras-chave: DP450; Aço *dual phase*; Aço HSLA; Aço refosforado.

EVALUATION OF THE POTENTIAL USE OF DP250/450 STEEL AS SUBSTITUTE REPHOSPHORED AND HSLA STEELS IN FORMING AUTOMOTIVE INNER PANELS

Abstract

The potential use of the dual phase 450 MPa steel grade (DP250/450), HDG GI, in reinforcement inner panels was evaluated by tensile properties and forming tests in comparison with the behavior of rephosphorized (REPHOSP260/380) and HSLA (HSLA340/420) steels, normally used in this application. The DP250/450 steel exhibited larger stretching capacity and larger propensity to work hardening and bake hardening effects than rephosphorized and HSLA steels. In general, the drawing and the stretching flange capacity (hole expansion) of the DP250/450 steel was similar to the REPHOSP260/380 steel and major than the HSLA340/420 steel. However, the dual phase steel presented smaller hole expansion capacity in punching condition than the rephosphorized steel. It was observed that the dual phase steel is prone to the springback phenomenon and countermeasures during forming can be taken to minimize this deleterious effect.

Key words: DP450; Dual phase steel; HSLA steel; Rephosphorized steel.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga, MG.



1 INTRODUÇÃO

Apesar de serem chamados de aços avançados de alta resistência, os aços *dual phase* já eram conhecidos no início da década de 80. A aplicação desses materiais nos automóveis da época variavam em função da classe de resistência, conforme sugerido pelo estudo de pesquisadores da Kawasaki Steel (Figura 1).⁽¹⁾

Proposta do uso	Redução de peso - Resistência à indentação		Redução de peso	Redução de peso - Melhoria da segurança		Redução de peso
Parte do Veículo	Painel externo		Painel interno	Partes estruturais		Pequenas partes
Exemplo	Capô, Portas	Peças de reforço (embut. profundo)	Porta interna	Barras das portas - Pára-choques	Rodas	Suporte de motor
Ductilidade	●	○	●	○	●	○
Embutimento	○	●	○	○	○	○
Estiramento	●	○	●	○	○	○
Estiramento de flange	○	○	○	○	●	○
Dobramento				●		○
Rigidez	●	●	○	○	○	○
Resistência à indentação	●	●	○	○	○	○
Pintura	●	●	○	○	○	○
Soldabilidade a pontos	●	●	●	●	○	○
Soldabilidade por flash butt	○	○	○	○	●	○
Soldabilidade a arco	○	○	○	○	○	○
Fadiga	○	○	○	○	●	○
Impacto	○	○	○	●	○	○
Limite de resistência (MPa)	400-500	400-500	400-500	>600	>550	

○ ● ● → Grau de importância

Figura 1. Grau de importância de propriedades mecânicas de aços para aplicações automotivas, bem como, faixas de limite de resistência necessárias para essas aplicações.⁽¹⁾

No caso do aço DP250/450, considerado de baixa resistência mecânica entre as várias classes de aços *dual phase*, a utilização proposta era em painéis externos e/ou painéis internos, em virtude de seu limite de resistência. Com essa aplicação visava-se ganho na resistência à indentação dos painéis e, conseqüentemente, uma potencial redução de massa desses componentes automotivos.⁽¹⁾ No entanto, limitações quanto à sua utilização, tais como elevado retorno elástico e baixa capacidade de estiramento de flange fizeram com que essa potencial aplicação não se tornasse realidade.

Neste estudo, visou-se avaliar o potencial para utilização do aço DP250/450 em painéis internos de reforço, em substituição aos aços refosforado e HSLA, que são os materiais normalmente empregados nessa aplicação. Essa avaliação baseou-se na capacidade de estampagem do aço DP250/450 em relação à dos demais aços, em termos de propriedades mecânicas em tração e de ensaios de estampabilidade. As propriedades consideradas mais importantes para a aplicação em painéis internos foram baseadas na recomendação de pesquisadores da Kawasaki Steel⁽¹⁾ (ductilidade, embutimento, estiramento, estiramento de flange, além de propensão ao retorno elástico).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesse estudo foram aços *dual phase* (DP250/450), refosforado (REFOSF260/380) e HSLA (HSLA340/420), todos com espessura nominal de 1,2 mm e revestidos por galvanização a quente GI. Foram realizados análise metalográfica, ensaios de tração e teste de estampagem.

As microestruturas foram analisadas, após ataque com nital 4%, por microscopia eletrônica de varredura (MEV), em seção longitudinal à direção de laminação, a ¼ da espessura dos aços.

As propriedades mecânicas em tração foram avaliadas segundo a norma ASTM A370.⁽²⁾ O coeficiente de encruamento $n_{4\%-6\%}$ 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 4% a 6%. As curvas de $n_{\text{instantâneo}}$ foram obtidas a partir da derivada do gráfico log (tensão verdadeira) x log (deformação verdadeira), plotada em função da deformação verdadeira. O parâmetro de anisotropia de Lankford ($r_{15\%}$) 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, sendo calculados a partir deste, os parâmetros de anisotropia normal (\bar{r}) e planar (Δr).

Os índices *Work Hardening* (WH) e *Bake Hardening* (BH) foram determinados, segundo a norma ASTM A653,⁽³⁾ com 2% de pré-deformação e tratamento a 170°C por 20 minutos. O *Aging Index* (AI) foi determinado com pré-deformação de 8% e com tratamento a 100°C por 1 hora.

Para simulação de operação com predominância do modo de deformação por estiramento foi realizado o ensaio Erichsen, utilizando uma carga de prensa-chapas de 500 kgf. A altura do deslocamento vertical do punção no instante da ruptura foi o resultado deste ensaio. A partir dessa altura e da espessura, os aços foram classificados quanto ao grau de estampagem, segundo a norma NBR 5915.⁽⁴⁾

O valor de razão crítica dos diâmetros (RCD), 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 (cps), que foram conformados sem fraturar, e o diâmetro do punção (100 mm). Para o ensaio foi utilizada uma prensa universal, dotada de matriz sem *drawbead*, com carga de prensa-chapas de 10 tf.

A capacidade de flangeamento dos aços foi avaliada pelo ensaio de expansão cônica de furo (ECF), segundo a norma ISO TS 16630⁽⁵⁾. O furo central dos cps, de 10 mm de diâmetro, foi confeccionado por usinagem e por puncionamento (folga de 12%). A porcentagem de expansão de furo (λ_{ECF}) foi expressa pela relação entre a variação dimensional do furo antes e depois da fratura e o diâmetro inicial do furo.

O método utilizado para o levantamento da Curva Limite de Conformação (CLC) foi o Nakazima, à fratura. A malha utilizada para a medição das deformações foi quadrada, com 2,5 mm de lado, marcada eletroquimicamente na superfície dos cps. Após a estampagem, as deformações foram medidas pelo software ASAME (*Automated Strain Analysis and Measurement Environment*). Na Figura 2 podem ser vistos os cps utilizados para a confecção da CLC do aço DP250/450. Os cps 2, 3 e 4 de todos os aços analisados apresentaram fratura próxima ao *drawbead* (friso), portanto suas deformações não foram avaliadas.

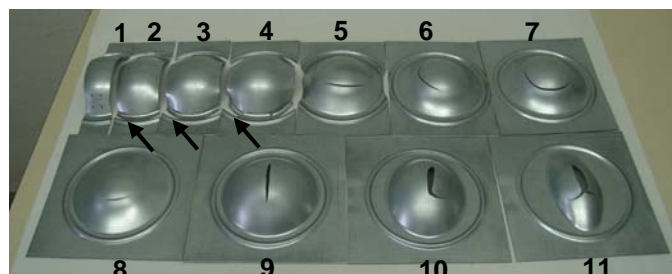


Figura 2. Corpos-de-prova do aço *dual phase* utilizados para o levantamento de Curva Limite Conformação pelo método Nakazima, à fratura. As setas indicam a localização de fratura próxima ao *drawbead*.

A medição das deformações foi realizada para cada cp, sendo obtidas as maiores (ε_1) e menores (ε_2) deformações em região adjacente à fratura e a CLC do material foi a que melhor se ajustou, por interpolação polinomial de 5ª ordem, aos pares de deformação $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$ medidos.

O retorno elástico dos aços foi avaliado pelo *hat channel draw test*, realizado na prensa Roell-Korthauss, utilizando um punção retangular de cabeça chata, com raio de concordância de 10 mm e uma matriz com *drawbead*. O retorno elástico foi avaliado na altura de embutimento de 60 mm, por meio da abertura e do ângulo α formado entre a parede do cp e a parte lateral do punção, a partir da cabeça do punção até posição pré-determinada, neste último, de 50 mm. Essa variação angular do corpo-de-prova em relação à parede do punção foi determinada por fotografias de aspecto, conforme mostrado na figura 3. Foram utilizadas as cargas de prensa-chapas de 500 kgf e 1.200 kgf para a avaliação do efeito dessas no retorno elástico de cada aço.

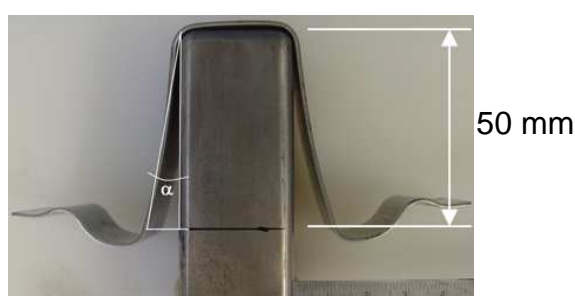


Figura 3. Representação da metodologia utilizada para a determinação do valor de retorno elástico, dado pelo desvio angular α .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura do aço DP250/450, visualizada na Figura 4(a), é composta por grãos equiaxiais de ferrita e partículas de segunda fase (martensita), dispostas predominantemente nos contornos de grão ferríticos. Os aços REFOSF260/380 e HSLA40/420 apresentam microestrutura composta por grãos equiaxiais de ferrita, com segunda fase composta de perlita e de precipitados, Figuras 4(b) e 4(c), respectivamente.

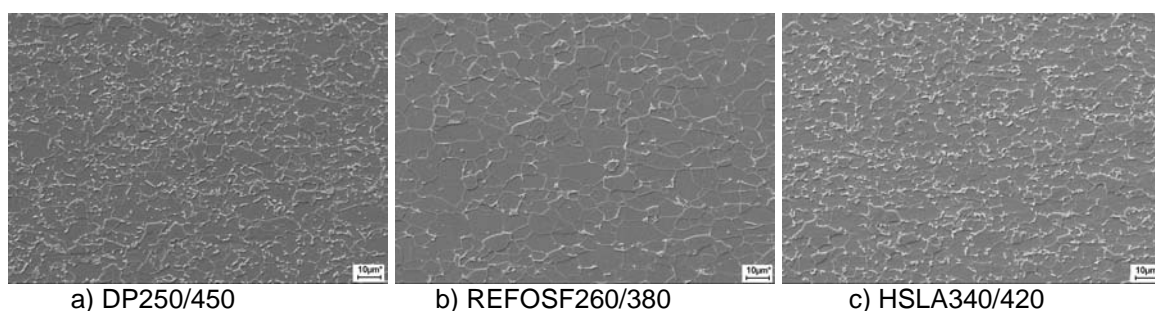


Figura 4. Microestruturas de amostras dos aços estudados, MEV.

Na Tabela 1 são apresentados os valores de espessura (Esp.), limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), razão elástica (LE/LR) e alongamento total (Al_{Total}), sendo este último avaliado com base de medida de 50 mm.

Tabela 1. Propriedades mecânicas em tração dos aços analisados

Aço	Esp (mm)	Orientação ^(*)	LE (MPa)	LR (MPa)	LE/LR	Al _{Total} (%)
DP250/450	1,26	90°	314	502	0,6	33,2
		45°	306	491	0,6	34,5
		0°	301	490	0,6	33,8
REFOSF260/380	1,15	90°	311	418	0,7	33,7
		45°	304	421	0,7	31,2
		0°	314	423	0,7	32,8
HSLA340/420	1,20	90°	427	503	0,8	31,7
		45°	418	491	0,9	32,6
		0°	411	500	0,8	31,0

(*) Orientação do comprimento do cp em relação à direção de laminação.

Na Figura 5 podem ser vistas curvas de tensão x deformação típicas dos aços analisados, obtidas por ensaio em tração em cps com comprimento disposto transversalmente à direção de laminação.

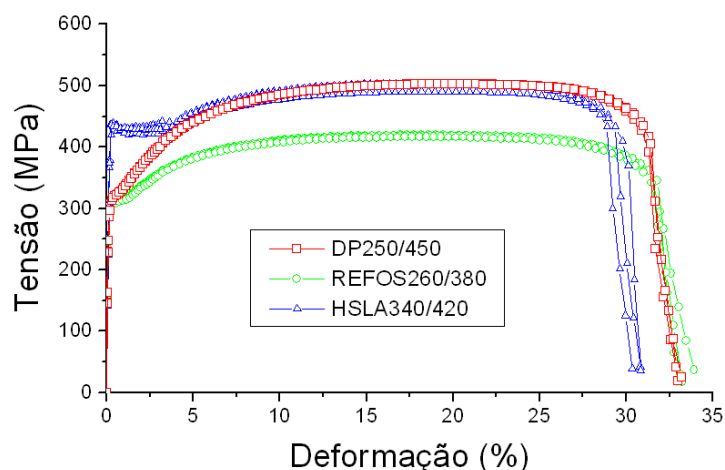


Figura 5. Curvas tensão x deformação obtidas a partir de cps retirados com comprimento orientado transversalmente à direção de laminação.

Comparando as curvas tensão x deformação dos aços *dual phase* e refosforado, verifica-se que estes podem ser considerados da mesma classe de escoamento. Os aços *dual phase* e HSLA podem ser considerados da mesma classe de resistência. Em termos de alongamento total, observa-se que todos os aços avaliados apresentam uma elevada ductilidade (>30%), sendo que o aço *dual phase* e o refosforado apresentaram alongamentos similares e maiores do que o do aço HSLA340/420.

Os valores dos coeficientes de encruamento, além dos parâmetros de anisotropia de Lankford, normal e planar, podem ser vistos na tabela 2. Em negrito são destacados os menores valores de $r_{15\%}$ para cada aço, que doravante será denominado de $r_{\text{mínimo}}$.



Tabela 2. Resultados de valor $n_{4\%-6\%}$, $r_{15\%}$, \bar{r} e Δr de amostras dos aços analisados

Aço	Orientação ^(*)	$n_{4\%-6\%}$	$r_{15\%}$	\bar{r}	Δr
DP250/450	90°	0,225	1,101	0,986	-0,034
	45°	0,227	1,003		
	0°	0,231	0,838		
REFOSF260/380	90°	0,180	1,485	1,201	0,329
	45°	0,188	1,036		
	0°	0,187	1,246		
HSLA340/420	90°	0,207	1,015	0,944	-0,173
	45°	0,214	1,031		
	0°	0,195	0,701		

(*) Orientação do comprimento do cp em relação à direção de laminação.

Na Figura 6 pode ser vista a curva do valor $n_{\text{instantâneo}}$ dos cps retirados transversalmente à direção de laminação e um gráfico resumo dos parâmetros de anisotropia avaliados.

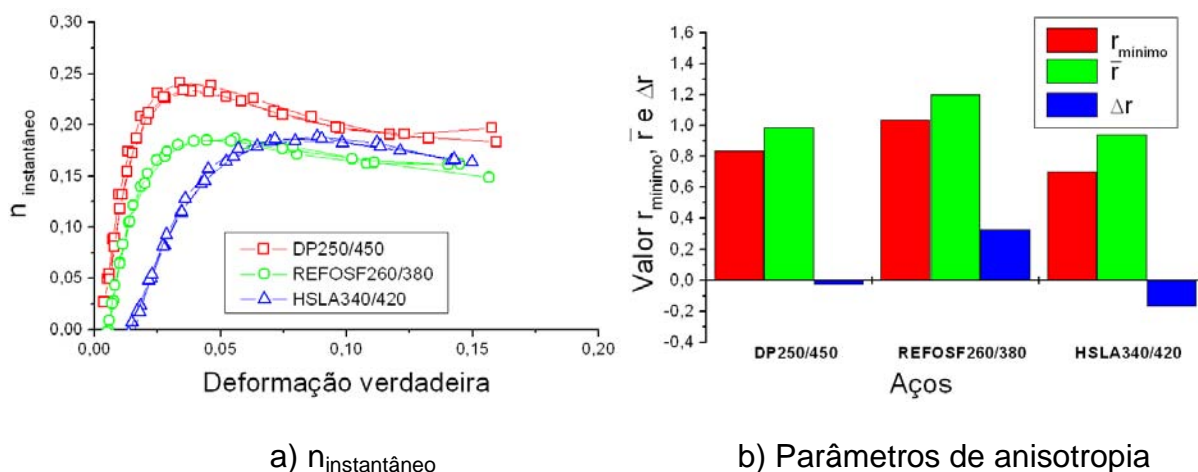


Figura 6. a) Curvas de coeficientes de encruamento instantâneo e b) resultados de parâmetros de anisotropia linear mínimo, normal e planar de amostras dos aços analisados.

Verifica-se que o aço *dual phase*, independentemente da faixa de deformação avaliada, apresentou maiores coeficientes de encruamento que os demais aços analisados. A maior capacidade de encruamento do aço *dual phase*, visualizada pelo seu maior valor n e, também, pela sua menor razão elástica, indica que esse aço apresenta maior resistência à ocorrência de estrição localizada, pelo fato da melhor distribuição das deformações ao longo do material.

O parâmetro $r_{\text{mínimo}}$ do aço *dual phase* exibiu valor intermediário entre o dos aços refosforado e HSLA. Este parâmetro relaciona-se fortemente com a orientação de fratura ao longo do perímetro do furo em ensaios de expansão de furo e com a altura de refilo de copos formados por operações de embutimento profundo. O refilo é o processo de corte para eliminação de rebarbas, sendo sua altura compreendida do fundo do copo estampado até o menor vale ao longo do perímetro deste, quanto mais alta melhor.

O parâmetro \bar{r} do aço *dual phase* apresentou valor similar ao do aço HSLA340/420 e inferior ao do aço REFOSF260/380. A maximização do parâmetro \bar{r} é interessante em estampagem, uma vez que esse parâmetro relaciona-se diretamente com a capacidade de embutimento dos aços.

O aço *dual phase* apresentou uma elevada isotropia devido ao valor do parâmetro Δr , em módulo, ser bem próximo de 0. Conforme relatado por Whiteley em citação de Klein,⁽⁶⁾ materiais isotrópicos são menos propícios ao orelhamento, em virtude de distribuírem as deformações de forma mais homogênea ao longo das direções. Com isso, um menor tamanho de *blanks* pode ser utilizado.

As propriedades dos aços analisados relacionadas a condições de envelhecimento natural (AI) e após cura de pintura de automóveis (BH), bem como o ganho de resistência promovido pelo processo de pré-deformação (WH), podem ser vistas na Figura 7.

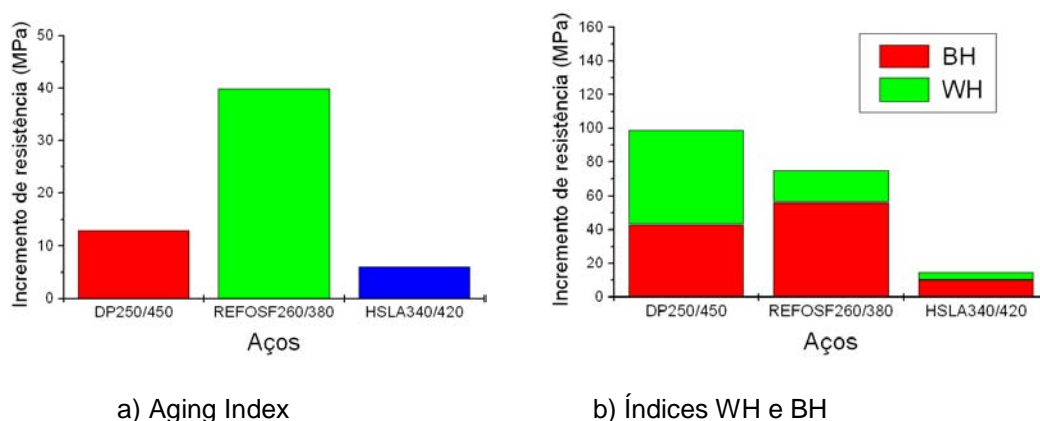
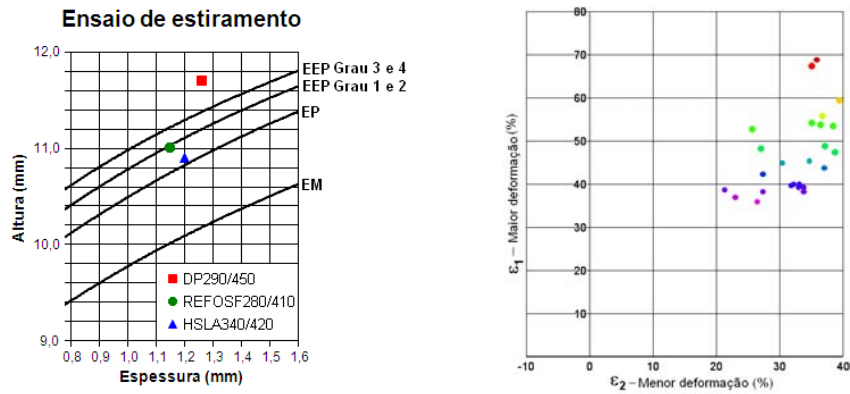


Figura 7. a) Aumento de resistência mecânica, após ensaio para a determinação do a) Aging Index e b) índices WH e BH.

O AI, que indica a propensão dos aços ao envelhecimento durante o tempo compreendido entre sua produção e utilização, foi o menor no aço *dual phase* dentre os aços avaliados. O envelhecimento, nessa condição, acarreta em aumento de resistência e, em alguns casos, no aparecimento de linhas de distensão na superfície do painel estampado. Segundo Tanikawa, Hosoya e Koike⁽⁷⁾ o valor máximo de AI para indicar que o material apresenta satisfatória resistência ao envelhecimento é de 30 MPa. Portanto, o aço DP250/450 pode ser considerado de boa resistência ao envelhecimento.

Os efeitos WH e BH, diferentemente do efeito AI, são considerados benéficos, pois neste caso os incrementos de resistência ocorrem durante a estampagem (WH) e após a cura da pintura do componente (BH). O aumento de resistência propiciado pelo somatório de BH e WH do aço *dual phase* foi de aproximadamente 100 MPa, o que corresponde a um aumento de 32% em relação ao limite de escoamento inicial. Esse aumento para os aços refosforado e HSLA foi de 24% e 4%, respectivamente. Os resultados do ensaio de estiramento, também conhecido como ensaio Erichsen, podem ser vistos na Figura 8.



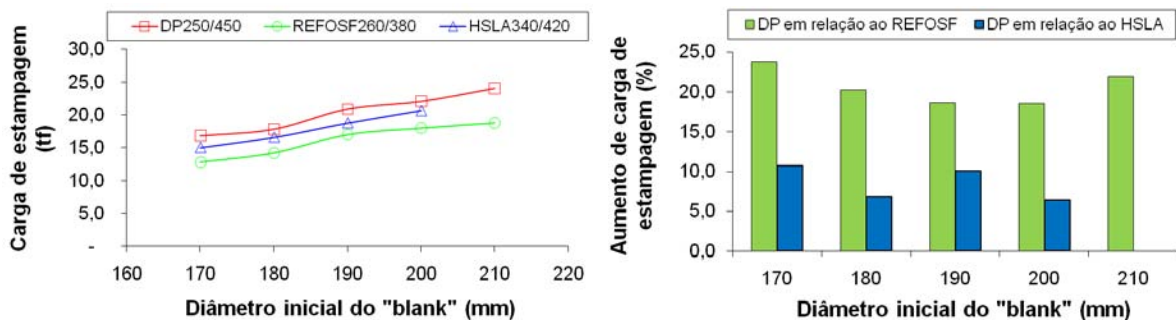
a) Classificação de estampagem b) Pares de deformação $\epsilon_1 \times \epsilon_2$ na fratura
Figura 8. Classificação dos aços analisados quanto à estampagem, segundo a NBR 5915⁽⁴⁾ e pares de deformação na região de fratura do cp.

O aço *dual phase* analisado apresentou a maior capacidade de estiramento dentre os aços avaliados, sendo classificado como de estampagem extra profunda graus 3 e 4 (EEP-Graus 3 e 4), de acordo com a norma NBR 5915.⁽⁴⁾ Os aços refosforado e HSLA foram classificados como sendo de estampagem profunda (EP). As deformações medidas nos locais de fratura de um dos cps do aço *dual phase* desse ensaio situaram-se no campo de estiramento, conforme esperado (ϵ_1 e $\epsilon_2 > 0$). A capacidade de embutimento dos aços, expressa pelo valor de RCD e pela altura máxima de refile, é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3. Valor de razão crítica de diâmetros dos aços analisados e altura máxima de refile

Aço	Valor RCD	Altura máxima de refile (mm)
DP250/450	2,1	83,7
REFOSF260/380	2,1	83,3
HSLA340/420	2,0	74,2

Na Figura 9 são mostrados os valores de força máxima de estampagem, durante o ensaio RCD, obtidos para os diferentes diâmetros dos cps e a comparação das cargas de estampagem do aço DP250/450 em relação às dos demais aços avaliados.



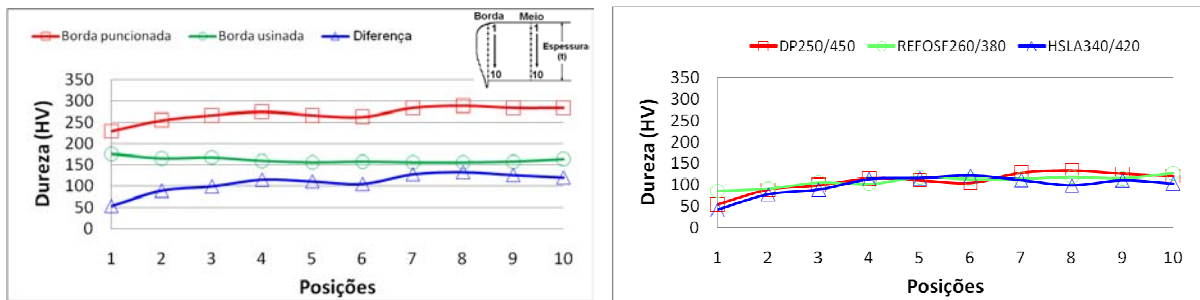
a) Força exercida no ensaio RCD b) Aumento percentual de carga

Figura 9. Força máxima de estampagem exercidas no ensaio RCD dos aços avaliados e aumento percentual dessa carga de estampagem do aço *dual phase* (DP) em relação à dos aços refosforado (REFOSF) e HSLA.

Nota-se que os aços *dual phase* e refosforado apresentaram capacidade similar de deformação sob embutimento e superior à do aço HSLA, em virtude dos valores

RCD obtidos. A carga máxima de estampagem registrada para o aço *dual phase* foi cerca de 20% superior à do aço refosforado e em torno de 8% maior do que a do aço HSLA. Apesar dos aços DP250/450 e HSLA340/420 apresentarem limites de resistência similares, o aço de *dual phase* necessita de maiores cargas para ser conformado em operação de embutimento, em virtude de sua maior capacidade de encruamento.

Os perfis de dureza de cps do ensaio de expansão de furo do aço *dual phase*, avaliados ao longo da espessura e próximo à borda de corte de furos, confeccionados por usinagem e puncionamento, podem ser vistos na Figura 10(a). A diferença entre as durezas (gradiente) avaliadas nas bordas de corte usinada e puncionada dos furos dos cps dos aços avaliados pode ser vista na Figura 10(b).



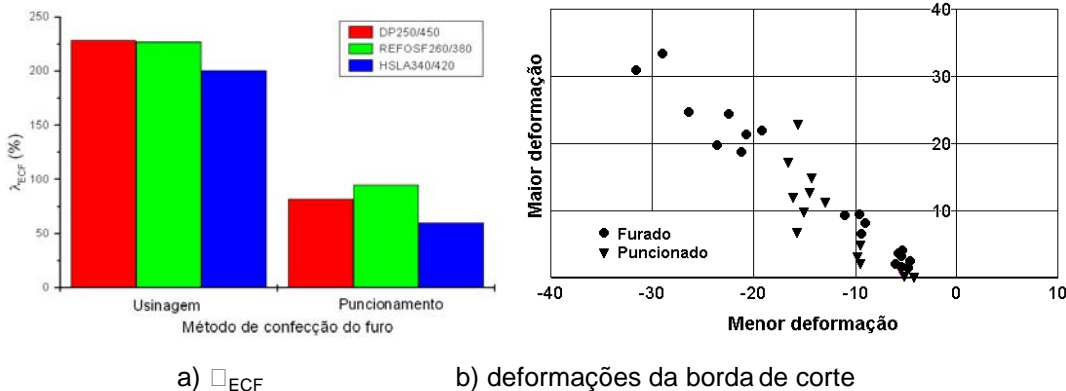
a) Aço DP250/450

b) Diferença de dureza

Figura 10. a) Perfil de dureza do aço DP250/450 avaliada ao longo da espessura, em regiões próximas da borda do furo confeccionado por usinagem e puncionamento e b) comparação da diferença de dureza entre cps usinados e puncionados dos aços avaliados.

Observa-se que a dureza avaliada na borda puncionada apresentou maiores valores do que a usinada, sendo que os maiores valores de dureza foram observados na região de fratura da borda de corte puncionada. A diferença de dureza entre as bordas de corte dos furos usinados e puncionados dos cps de expansão de furo dos aços avaliados apresentaram valores similares, indicando que a operação de puncionamento dos furos acarretou em encruamento similar em todos os aços.

Na Figura 11 podem ser vistos os resultados dos ensaios de expansão ECF, nas condições de furo usinado e por puncionado, além dos pares de maior e menor deformação avaliados na adjacência da borda de corte.



a) λ_{ECF}

b) deformações da borda de corte

Figura 11. a) Resultado do ensaio de expansão de furo (λ_{ECF}), em cps com furo confeccionado por usinagem e puncionamento; b) deformações medidas na borda de furos usinados e puncionados.

A capacidade de expansão de furo dos cps com furo usinado foi bastante superior a dos cps com furo puncionado, independentemente do aço avaliado. O aço *dual phase* apresentou valor de λ_{ECF} similar ao do aço refosforado, para a condição de



furo usinado. Na condição de furo puncionado, os valores de do aço *dual phase* foram intermediários aos dos aços refosforado e HSLA. Os pares de deformação avaliados na borda do furo (Figura 11b), situaram-se em região de embutimento ($\epsilon_1 > 0$ e $\epsilon_2 < 0$), indicando assim forte relação com parâmetro de anisotropia, em especial $r_{\text{mínimo}}$.

Constatou-se que o método utilizado para a confecção do furo (usinagem e puncionamento) impactou a dureza avaliada na região da borda do furo, causando influência direta na capacidade de estiramento de flange. Para o aço *dual phase* a queda no parâmetro λ_{ECF} , devido ao processo de puncionamento de furo, foi de 64%. Para os aços refosforado e HSLA essas quedas foram de 58% e 70%, respectivamente. Conclui-se daí a importância da utilização de um processo de confecção de furo que maximize a capacidade de estiramento de flange.

As Curvas Limite de Conformação dos aços analisados podem ser vistas na Figura 12.

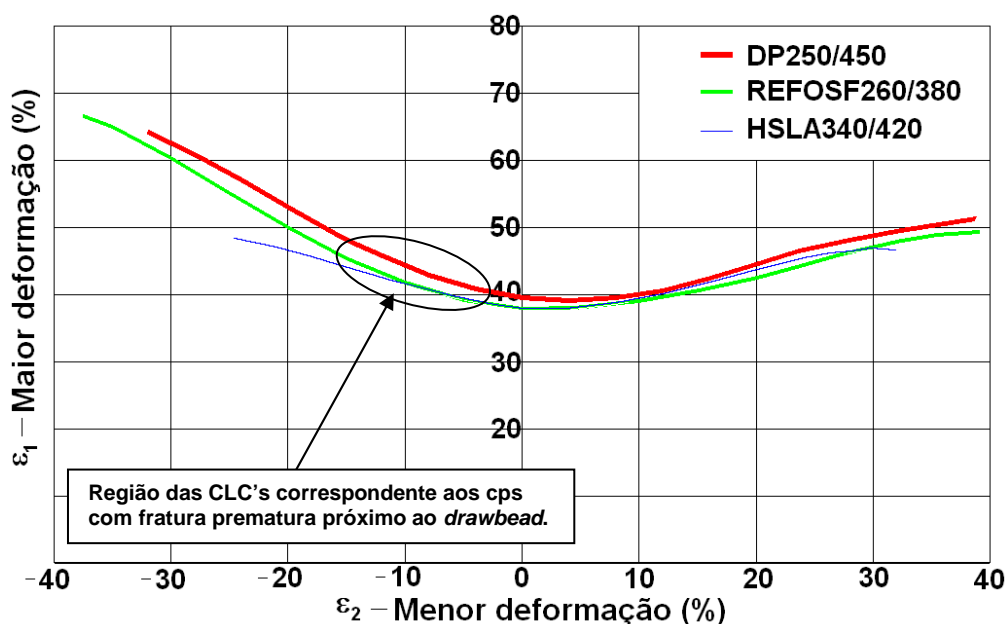


Figura 12. Curvas Limite de Conformação dos aços analisados.

Por meio de Curvas Limite de Conformação verificou-se que, de um modo geral, os aços apresentam características similares de estiramento e de deformação plana ($\epsilon_1 > 0$ e $\epsilon_2 = 0$). Para a condição de embutimento, observou-se que o aço HSLA exibiu capacidade ligeiramente inferior do que os aços DP250/450 e REFOSF260/380. Como Curvas Limite de Conformação são normalmente utilizadas como critério de fratura em simulações numéricas de processos estampagem, os aços, de um modo geral, podem ser considerados similares.

Na Figura 13 é mostrado o perfil dos cps dos aços avaliados no *hat channel draw test*, visando à avaliação da propensão destes ao fenômeno de retorno elástico. Pode ser observado também uma comparação dos perfis de cps, desse ensaio, do aço *dual phase*, mostrando o efeito da carga de prensa-chapas no ângulo de retorno elástico.

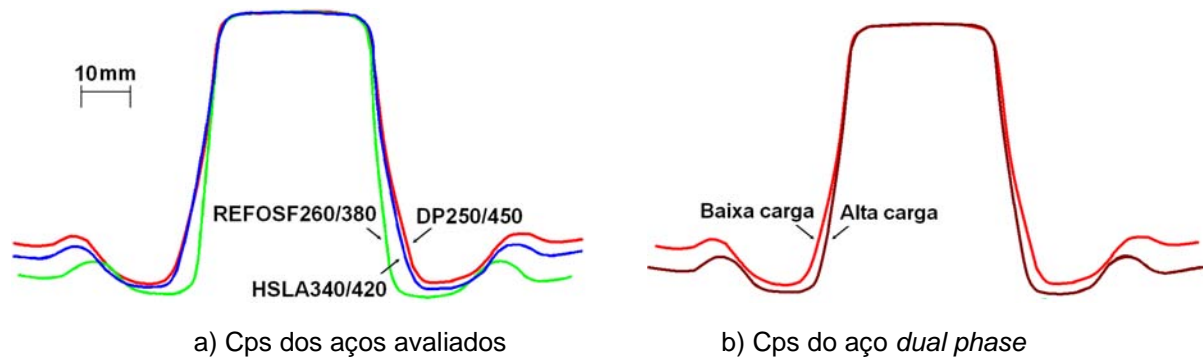


Figura 13. a) Comparação do perfil dos cps dos aços avaliados no *hat channel draw test* e b) comparação dos perfis de cps do aço *dual phase* submetidos à alta e baixa carga de prensa-chapas.

O aço *dual phase* apresentou maior ângulo de retorno elástico, do que os aços refosforado e HSLA, visualizado pelo desvio angular dos cps (ângulo α da figura 3). De modo geral, grandes retornos elásticos são indesejáveis em operações de estampagem, pois provocam um desvio do formato requerido para a peça. Com o aumento da carga de prensa-chapas de 500 kgf (baixa carga) para em torno de 1200 kgf (alta carga) foi obtida uma considerável redução do retorno elástico. Essa redução foi de 17% para o aço *dual phase*, de 35% para o refosforado e para o aço HSLA de 25%.

4 CONCLUSÃO

O aço DP250/450 pode substituir com vantagens os aços REFOSF260/380 e HSLA340/420 em condições de estampagem submetidas, predominantemente, a estiramento. Em condições de embutimento a substituição dos aços refosforado e HSLA pelo aço *dual phase* pode ser processada sem prejuízos em conformação e conferindo ganhos em caso de substituição ao aço HSLA. As cargas necessárias para a estampagem do aço *dual phase* foram superiores às dos demais aços avaliados. Em virtude da capacidade de expansão do furo puncionado do aço *dual phase* ter sido inferior a do refosforado, a troca recomendada de material, nessa condição, seria pelo aço HSLA340/420. O aço *dual phase* apresentou a maior susceptibilidade ao fenômeno de retorno elástico. No entanto, verificou-se que contramedidas podem ser adotadas durante o processo de estampagem para a minimização desse efeito deletério, tal como, o aumento da carga de prensa-chapas.

REFERÊNCIAS

- 1 KAWASAKI STEEL CORP. Cold rolled dual phase high strength steels with low yield strength. CHLY 40-100, CHIBA, 1980, 35 p.
- 2 NORMA ASTM A 370. Test methods and definitions for mechanical testing of steel products - ASTM (The American Society for Testing and Materials), Última Edição: 2007.
- 3 NORMA ASTM A 653. Specification for steel sheet, zinc-coated (Galvanized) or zinc-iron alloy-coated (Galvannealed) by the hot-dip process. ASTM (The American Society for Testing and Materials), Edição 2009; Revisão A.
- 4 NORMA NBR 5915. Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Última edição: 2008.
- 5 TECHNICAL SPECIFICATION (ISO TS 16630). Metallic materials - Method of hole expanding test. First Edition, 2003.



- 6 KLEIN, LUIS NELSON TEIXEIRA – Conformação na prensa – Fascículo de informação técnica nº6, USIMINAS, 1984.
- 7 TANIKAWA, K.; HOSOYA, Y.; KOIKE, T. – Strain aging properties of extra-low carbon bake hardenable cold rolled steel sheets – NIKK Technical Review, n. 72, 1965.