

CARACTERIZAÇÃO DOS AÇOS DP600 E DP780 PARA USO NA CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Gabriel Grazziotin, ggabrielgrazziotin@gmail.com¹

Juliano Boeira Ercolani, julianoercolani@hotmail.com¹

Lucas Rodrigo Kehl, lucasrkehl@gmail.com¹

Luciano Aparecido Kempinski, luciano.kempinski@erechim.ifrs.edu.br²

Alexandre da Silva Rocha, alexandre.rocha@ufrgs.br¹

¹UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43807 – Centro de Tecnologia. Bairro Agronomia 91509-900. Porto Alegre, RS – Brasil.

²IFRS, R. Domingos Zanella, 104 – Bairro Três Vendas, 99700-000. Erechim, RS - Brasil

Resumo: Na indústria automobilística a procura por materiais com grande resistência mecânica e baixo peso sempre foram uma grande área de estudo. Em razão disso, os aços Dual Phase (DP) foram desenvolvidos. Esses aços possuem microestrutura ferrítica-martensítica, que conferem ao aço a dureza necessária para sua aplicação automobilística. O objetivo do presente trabalho é comparar a aplicabilidade de chapas de aço DP600 e DP780 na estampagem. Para isso foram realizados ensaios mecânicos de tração, análise de dureza superficial, anisotropia, ensaio Erichsen e desgaste abrasivo pelo ensaio de abrasão com roda de borracha. Os resultados mostram que o DP780 requer uma força maior para se deformar e mesmo assim tem um alongamento menor que o DP600, fenômeno observado no Ensaio de Tração. Também, o DP600 teve um Índice Erichsen maior, mostrando melhor estampabilidade. Procura-se com esse estudo uma caracterização desses aços, podendo-se assim avaliar qual deles terá uma melhor utilização na conformação de chapas.

Palavras-chave: Conformação Mecânica, Estampagem, DP600, DP780, Caracterização

1. INTRODUÇÃO

Os aços Dual Phase são compostos por uma fase predominante dútil, a ferrita, com ilhas dispersas de martensita. Esta microestrutura é obtida a partir de um resfriamento controlado das fases ferrita e austenita, transformando a austenita em martensita. A presença destas duas fases proporciona propriedades ao aço que contribuem a uma deformação uniforme e alta resistência mecânica. A Fig (1) demonstra uma típica microestrutura de um aço Dual Phase (de la Concepción, 2015).

Ferrite-Martensite DP

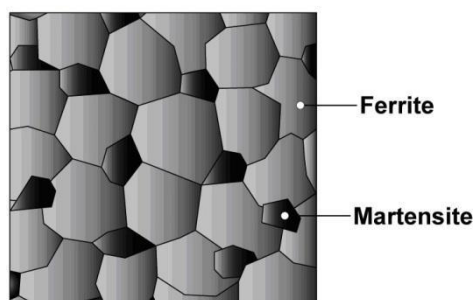


Figura 1 - Ilustração da microestrutura de um aço DP. Fonte: www.worldautosteel.org.

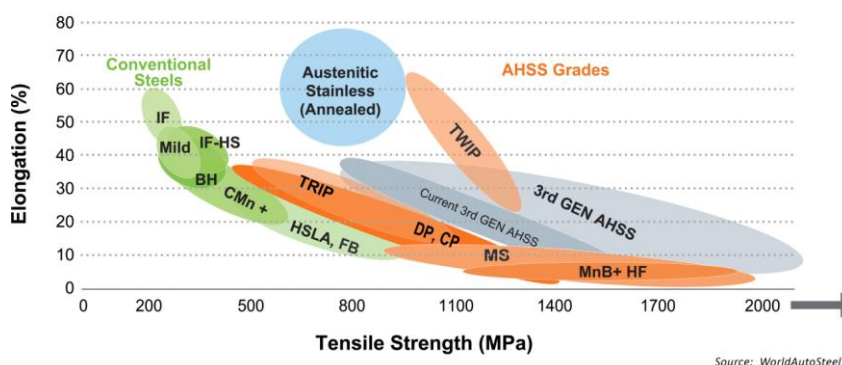


Figura 2 - Gráfico comparativo das famílias dos aços. Fonte: www.worldautosteel.org.

A Fig. (2) faz uma comparação das famílias de aços em relação à sua Tensão de Escoamento (eixo das abcissas) e da sua Deformação (eixo das ordenadas). Observa-se que os aços DP tem maior resistência mecânica que os aços de alta resistência de baixa liga (HSLA), além de ter maiores deformações. Além disso, tem um limite de escoamento próximo aos aços Twip, que são novos no mercado e também muito utilizados na indústria automobilística.

No presente trabalho, serão analisados resultados de experimentos visando concluir para quais aplicações os aços DP600 e DP780 teriam melhor desempenho.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos apresentados a seguir foram realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os ensaios de Tração, Erichsen e Anisotropia foram feitos em uma máquina de ensaios universal EMIC modelo DL60000 com capacidade de 600 kN. Já o ensaio de Abrasão foi feito num abrasômetro de acordo com a norma ASTM G-65 e, as microdurezas foram medidas em um microdurômetro com ponta de diamante piramidal.

2.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um experimento que gera tensões uniaxiais na chapa de onde podem ser calculados valores como a tensão de escoamento, tensão máxima, tensão de ruptura e também a deformação máxima. Os corpos de prova utilizados nos ensaios tinham dimensões de 250 mm de comprimento com 20 mm de largura. A chapa do DP600 possuía uma espessura de 1,5 mm, já o DP780, tinha 1 mm. Cada ensaio foi realizado em três corpos de prova (Schaeffer, 2016).

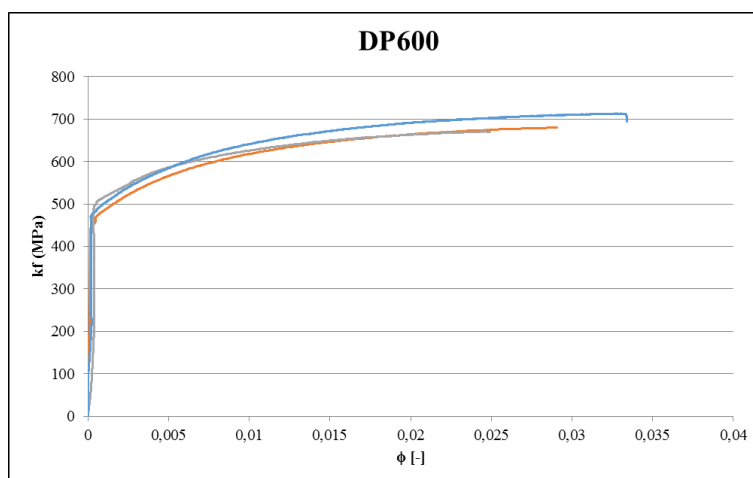


Figura 3 - Resultado do ensaio de tração com eixos de Tensão (MPa) vs. Deformação Verdadeira (ϕ) para os três corpos de prova do aço DP600.

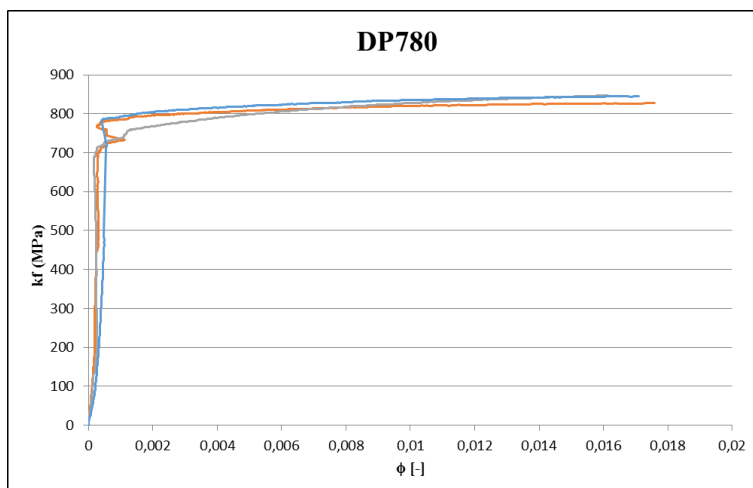


Figura 4 - Resultado do ensaio de tração com eixos de Tensão (MPa) vs. Deformação Verdadeira (ϕ) para os três corpos de prova do aço DP780.

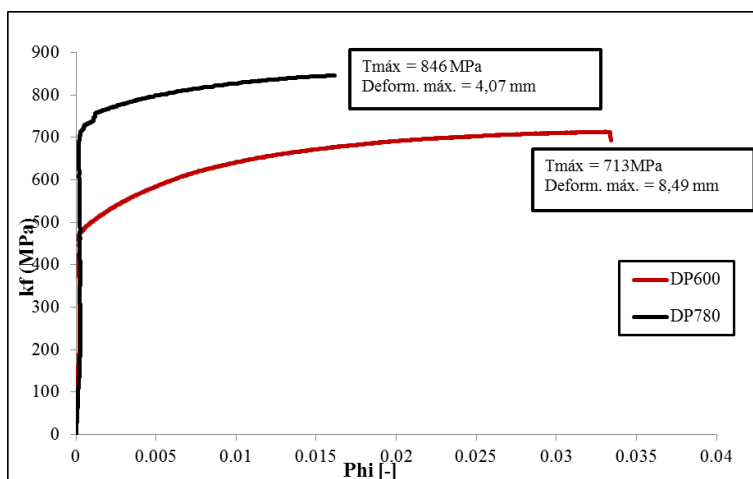


Figura 5 – Comparação do resultado do ensaio de tração dos dois aços.

Observa-se que no eixo das ordenadas a unidade é MPa para o k_f (Tensão de Escoamento) e o eixo das abscissas é adimensional, onde o ϕ é um resultado de logaritmo. Esses valores foram calculados a partir de dados de força e deslocamento (deformação) fornecidos pela máquina de ensaios. O k_f é calculado pelo quociente da força pela área instantânea, que é calculada utilizando a Lei de Constância de Volume. Já a deformação verdadeira ϕ , é calculada pelo logaritmo natural $\ln(L/L_0)$, onde L é o comprimento instantâneo (250 mm + deformação) e L_0 é o comprimento inicial.

Nas Figuras 3 e 4 é possível ver que as curvas obtidas nos três corpos de prova ficaram muito próximas, permitindo afirmar que os resultados são confiáveis e possuem uma boa reprodutibilidade. A Fig. (5) apresenta a comparação entre as curvas que indicaram maiores valores de tensão. Assim, nota-se que a chapa de DP600 apresenta maior alongamento com menores tensões aplicadas. Era esperado que o aço DP780 exigisse uma força maior devido a sua microestrutura com maior quantidade de martensita.

2.2 Ensaio Erichsen

O ensaio Erichsen tem como principal objetivo avaliar a estampabilidade do material. Um punção com cabeça esférica estira uma chapa para dentro de uma matriz até que ocorra ruptura. O resultado do ensaio é o Índice Erichsen, a altura do “copo” formado pelo estiramento da chapa (Schaeffer, 2016). O ensaio é sempre feito em três corpos de prova com dimensões de 90 mm x 90 mm e espessura 1 mm para o DP780, e o DP600 com 1,5 mm de espessura. As Fig. (6) e (7) mostram os resultados.

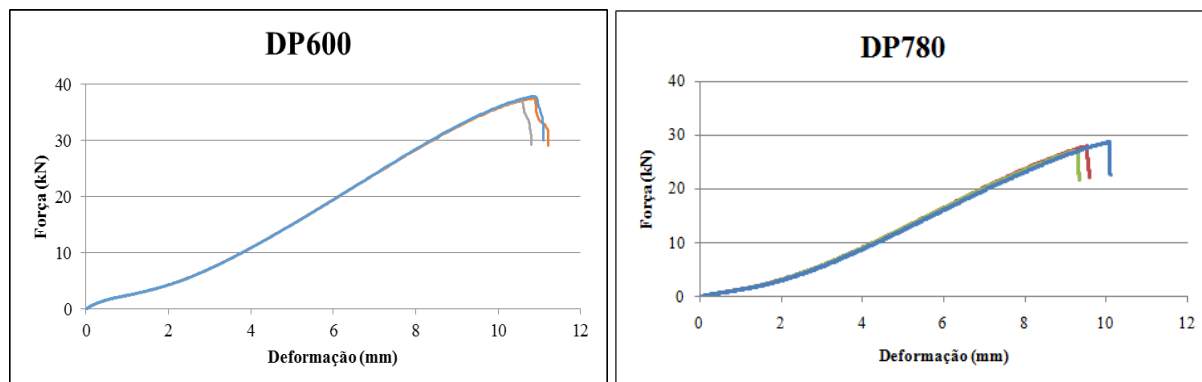


Figura 6 – Resultados dos ensaios para os dois aços.

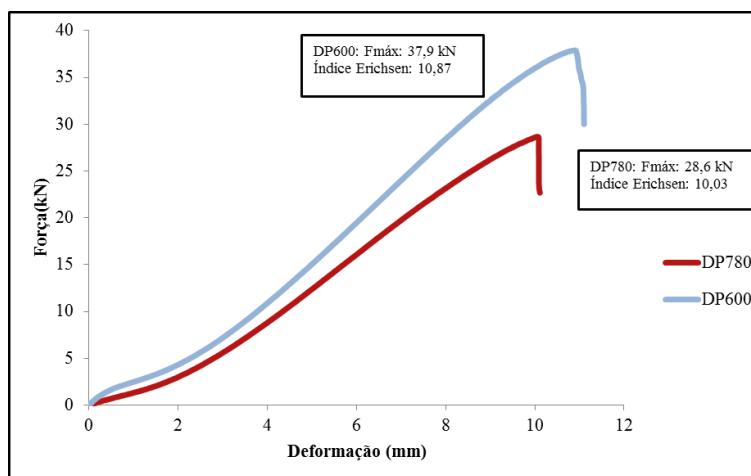


Figura 7 – Comparação dos Índices Erichsen de cada material.

Os gráficos da Fig. (6) mostram os resultados das curvas obtidas no ensaio Erichsen para cada corpo de prova e mostram valores médios muito semelhantes, tanto que as curvas ficaram sobrepostas. Isso também mostra que os resultados foram bons e podem ser aceitos. Já na Fig. (7), foram selecionados os maiores valores de Índice Erichsen entre os três corpos de prova. Observa-se que o DP600 deforma mais sem romper e exerce uma força maior.

Tendo em vista que a espessura do DP600 é maior que a do DP780 (DP600 com 1,5 mm e DP780 com 1 mm) o resultado observado no Erichsen pode ser atribuído a este fato. Maiores espessuras, quando submetidas a tensões biaxiais, exigem maiores forças para se deformarem. Contudo, o DP600 mesmo com uma espessura igual ao DP780 deve ter um melhor desempenho na estampagem.

O valor do Índice Erichsen corresponde à deformação no ponto de força máxima porque neste ponto, a chapa começa a sofrer deformação de sua espessura e em seguida sofre a ruptura.

2.3 Ensaio de Anisotropia

Os coeficientes de anisotropia são muito importantes na caracterização de uma chapa porque eles descrevem como são as deformações do material quando passar um processo de estampagem. O coeficiente de anisotropia (r) é calculado pela relação entre deformação na largura e deformação na espessura. A Fig. (8) mostra em um desenho esquemático o cálculo de deformações e o cálculo do coeficiente de anisotropia.

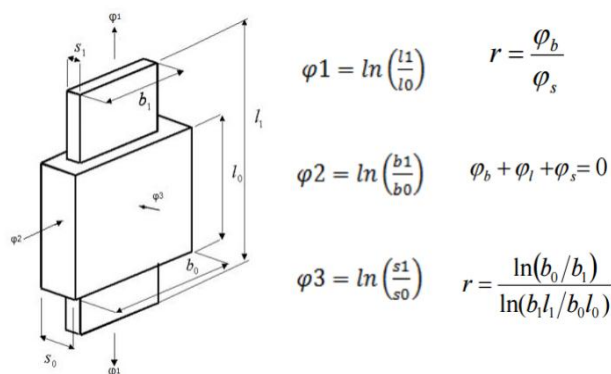


Figura 8. Esquema do cálculo de deformações e do coeficiente de anisotropia (r) (Schaeffer, 2016).

Sabendo que s representa a espessura e b representa a largura, valores de r maiores que 1 significam que a deformação na espessura é menor que na largura, o que é bom. Já valores de r menores que 1, mostram que a espessura se deforma mais que a largura, ou seja, ela afina. Desta forma, entende-se que valores ideais para o coeficiente de anisotropia são valores maiores que 1 ou próximos de 1, que representam uma deformação homogênea entre largura e espessura.

Outro importante parâmetro é o coeficiente de anisotropia planar (Δr), que tem relação com o orelhamento da chapa quando passa por um processo de estampagem profunda, ou embutimento. O orelhamento normalmente é um acúmulo de deformações causado por uma má regulação do prensa-chapas. Para valores mais distantes de 0 (podem ser negativos), maior a tendência ao orelhamento (Schaeffer, 2016).

O ensaio é realizado com três corpos de prova para cada direção de laminação (0° , 45° e 90°). Os corpos de prova (CP) têm dimensões de 200 mm de comprimento e 20 mm de largura. Inicialmente foi determinado que todos sofreriam uma deformação no seu comprimento de 5%, ou seja, 10 mm. Após isto, eram feitas medidas de largura e espessura dos corpos ensaiados com auxílio de paquímetro digital e micrômetro, e os dados utilizados nos cálculos. Calcula-se um “ r ” e um “ Δr ” para cada direção de laminação e enfim calcula-se uma média. A média dos valores de “ r ” é chamada de coeficiente de anisotropia normal (r_m), que indica a habilidade de uma chapa resistir ao afinamento. As Eq. (1) e (2) mostram como calcular r_m e Δr (Schaeffer, 2016).

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (1)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (2)$$

As Tab. (1) e (2) mostram os resultados dos ensaios para os dois materiais.

Tabela 1. Resultados de anisotropia para o DP600.

DP600									
Ângulo (°)	CP01			CP02			CP03		
	0	45	90	0	45	90	0	45	90
Espessura Inicial (mm)	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
Espessura Final (mm)	1,470	1,460	1,460	1,460	1,470	1,460	1,460	1,470	1,470
Largura Inicial (mm)	20,620	20,550	21,180	20,700	20,860	21,170	20,390	20,850	20,210
Largura Final (mm)	20,150	20,100	20,750	20,190	20,420	20,700	20,060	20,400	19,830
Coef. de Anisotropia - r	1,14129	0,81917	0,75886	0,92296	1,05524	0,83065	0,60368	1,08001	0,93956
Coef. de Anisotropia Normal - r_m	0,8846250			0,9660199			0,9258135		
Coef. de Anisotropia Planar - Δr	0,1309064			-0,1784334			-0,3083853		

Tabela 2. Resultados de anisotropia para o DP780

DP780									
Ângulo (°) Espessura Inicial (mm) Espessura Final (mm) Largura Inicial (mm) Largura Final (mm) Coef. de Anisotropia - r Coef. de Anisotropia Normal – r_m Coef. de Anisotropia Planar – Δr	CP01			CP02			CP03		
	0	45	90	0	45	90	0	45	90
	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	0,950	0,990	0,960	0,970	0,990	0,960	0,970	0,980	0,960
	20,860	20,550	20,230	20,550	20,550	20,210	20,800	19,750	20,280
	20,050	20,170	19,900	20,270	20,120	19,830	20,310	19,380	19,810
	0,77211	1,85711	0,40289	0,45041	2,10407	0,46498	0,78267	0,93611	0,57440
	1,2223075			1,2808816			0,8073226		
	-1,2696069			-1,6463739			-0,2575678		

Observando os três corpos de prova do DP600, os corpos de prova tiveram valores dos coeficientes muito próximos, validando o experimento. Já no DP780, o corpo de prova 3 (CP03) teve um resultado diferente dos demais. Contudo, o resultado foi aceito, já que é esperada uma variação entre as amostras. A Tab. (3) apresenta a média dos Coeficientes Normal e Planar dos três corpos de prova obtidos para o ensaio de anisotropia.

Tabela 3. Comparação dos Coeficientes de anisotropia normal e planar médios das amostras.

	DP600	DP780
r_m	0,9254	1,1035
Δr	-0,1186	-1,05784

A partir dos resultados vistos na Tabela 3 nota-se que o valor do coeficiente de anisotropia normal dos dois aços são próximos de 1, mostrando que as deformações na espessura e na largura são muito próximas. Também é possível observar que há uma grande diferença entre os coeficientes de anisotropia planar dos materiais. Os valores negativos podem ser aceitos normalmente devido ao sinal negativo presente na Eq. (2). Foi visto que os valores dos seus coeficientes de anisotropia normais ficaram muito próximos e, sabendo que este coeficiente relaciona a deformação na largura com a deformação na espessura, os dois aços demonstram ter um pequeno afinamento da espessura em relação à largura durante um processo de estampagem, tendo em vista que os dois coeficientes ficaram próximos de zero. Contudo, é importante notar que o coeficiente normal do DP600 é menor que 1, ou seja, a espessura sofre uma deformação maior que na largura; por outro lado, no caso do DP780 foi o oposto. Fazendo uma análise do coeficiente de anisotropia planar, observa-se que o aço DP780 tem uma alta tendência ao orelhamento, enquanto o DP600 tem uma tendência bem menor. Isto é devido a distância dos valores de Δr de zero. Quanto maior a distância, maior a tendência ao orelhamento.

2.4 Medidas de Microdureza Vickers

Antes de fazer o Ensaio de Abrasão foram feitas medidas da microdureza das chapas. É esperado que o aço DP780 tenha uma dureza maior devido a maior presença da fase martensita na sua microestrutura. Foram feitas quinze medidas aleatórias no plano da chapa, utilizando carga de 500g. A Tab. (4) mostra os resultados das médias feitas a partir das medições.

Tabela 4. Valores médios de microdureza dos aços DP600 e DP780.

	Microdureza (HV0,5)
DP600	216
DP780	271

Os resultados obtidos foram conforme o esperado. Houve uma diferença nos valores de microdureza de aproximadamente 20,33%. Com isso, a chapa metálica do aço DP780 deve ter maior resistência à abrasão devido a sua maior dureza superficial.

2.5 Ensaio de Abrasão

A máquina utilizada neste ensaio foi desenvolvida no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM). O Ensaio de Abrasão com roda de borracha envolve um corpo de prova e areia com granulometria e fluxo controlados. A areia passa entre a roda girando em contato com o corpo de prova, aplicando uma força na superfície e provocando um desgaste com a areia. O corpo de prova é preso em um braço de alavanca que tem um peso na outra extremidade, empurrando o corpo de prova contra a roda de borracha. O tipo de ensaio utilizado foi o Tipo B (Norma ASTM G-65, 2013), que tem um tempo de duração de 10 minutos com velocidade angular de 200 rpm (Kempski, 2016). A Fig. (9) mostra a máquina utilizada no ensaio.



Figura 9. Abrasômetro com roda de borracha localizado no Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS (LdTM).

Os corpos de prova utilizados neste ensaio têm formato de bloco. Adaptando-os para realizar a abrasão em chapas, corpos de prova das chapas com dimensão próxima de 25 mm x 60 mm dos aços DP600 e DP780 foram cortados e, em seguida foram colados na superfície, conforme a Fig. (10), que mostra um corpo de prova antes e depois do ensaio.

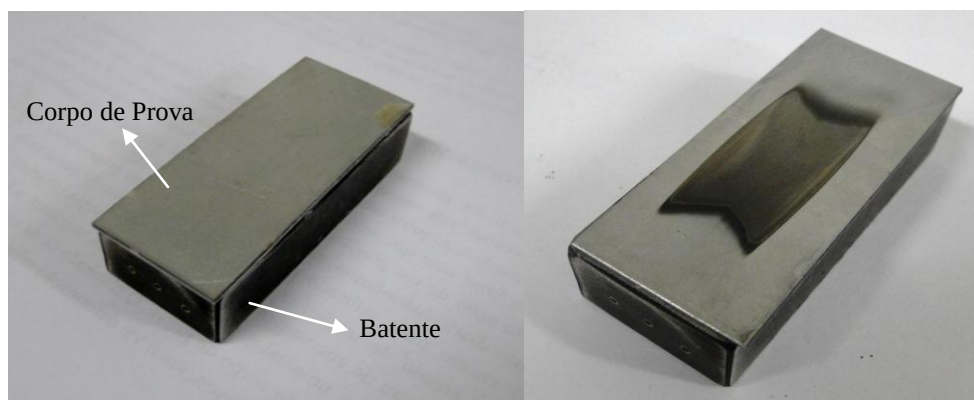


Figura 10. Corpo de prova antes e depois do ensaio e abrasão.

Os conjuntos dos batentes (corpos de prova em forma de bloco) com as chapas foram pesados antes e depois dos ensaios, de forma que fosse calculada a perda volumétrica utilizando a densidade do material, previamente calculada utilizando o princípio de Arquimedes. Foram confeccionados quatro corpos de prova para cada material ensaiado. A perda volumétrica é calculada pela Eq. (3), conforme norma ASTM G-65 (2013).

$$Perda\ Volumétrica\ (mm^3) = \frac{massa\ perdida\ (g)}{densidade\ (\frac{g}{cm^3})} \cdot 1000 \quad (3)$$

A Fig. (11) mostra os resultados do ensaio de abrasão das chapas.

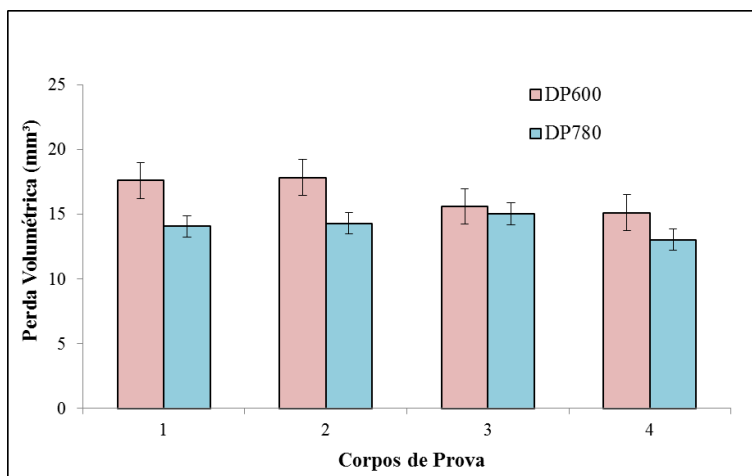


Figura 11. Resultados da Perda Volumétrica de cada corpo de prova do Ensaio de Abrasão.

Observa-se que a perda volumétrica do DP780 sempre foi menor do que o DP600. Fazendo uma analogia com a microdureza medida e a perda volumétrica por abrasão, a Fig. (12) mostra um gráfico de colunas que mostra essas duas grandezas para os dois aços. Os valores de perda volumétrica são uma média dos quatro corpos de prova de cada aço.

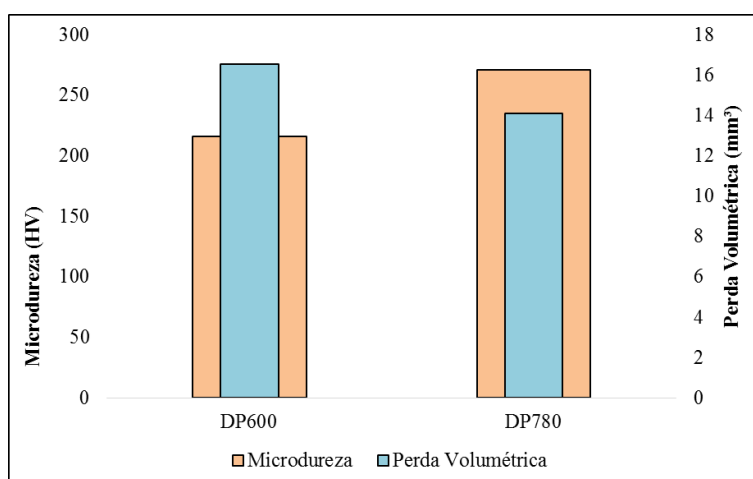


Figura 12. Análise de microdureza junto com perda volumétrica.

Em todos os corpos de prova o DP780 teve um desgaste menor que o DP600. Esse resultado mostra que, quando em contato com a ferramenta de estampagem, o DP780 deverá exigir uma força maior de conformação, contudo, em uma condição a seco, provocará um desgaste abrasivo maior na ferramenta e também no próprio plano da chapa. A Fig. (12) permitiu concluir que quanto maior a microdureza, menor o desgaste que o material sofrerá; e quanto menor a microdureza, maior o desgaste.

3 CONCLUSÕES

Ao final de todos os experimentos, foi possível concluir que os dois DP's têm comportamentos muito diferentes quando conformados.

No Ensaio de Tração foi possível observar que o DP780, que tem maior quantidade de martensita (fase menos dútil), precisa de uma força maior e se deforma menos que o DP600. Contudo, os dois aços têm uma deformação elástica muito pequena. O fenômeno oposto foi observado no Ensaio Erichsen: o DP600 precisou de uma força maior e teve o Índice Erichsen também maior, mostrando uma maior capacidade de estampagem.

O DP600 mostra ter melhores condições para ser estampado analisando os resultados obtidos no ensaio de anisotropia. Pelos valores obtidos para os coeficientes, ele tem menor tendência ao orelhamento e pequena deformação da espessura.

Nos ensaios para analisar a resistência ao desgaste, os resultados de microdureza foram conforme esperados. O DP780, por ter uma maior presença de martensita, fase mais dura e menos dútil, teve uma microdureza aproximadamente 20,33% maior que o DP600. Com este resultado foi esperado que no ensaio de abrasão o DP780 tivesse um rendimento melhor; e foi o que aconteceu. Em todos corpos de prova o DP780 apresentou um menor desgaste abrasivo, observado pela perda de volume.

Ao fim, conclui-se que devido às características muito distintas das duas chapas, o estudo individual da aplicação de cada uma delas é de extrema importância para que se tenha o melhor desempenho possível. Para componentes que não possuem dobras com ângulos muito pequenos e geometrias com copos de pequena profundidade, por exemplo, é indicado que o DP780 seja utilizado. Também, peças que passarão por altas tensões e atuação de grandes forças têm como melhor escolha de material o DP780. Agora, geometrias com grandes áreas de deformação oriundas da estampagem, pequenos ângulos de dobra e que passam por processos de embutimento, o DP600 mostra ser a melhor opção.

4 AGRADECIMENTOS

O autor e os coautores do presente trabalho agradecem pela contribuição e apoio financeiro da CAPES e do CNPq.

5 REFERÊNCIAS

- de la Concepción, V., 2015, “Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of dual phase steels”, *Procedia Materials Science* 8, p. 1047 – 1056.
www.worldautosteel.org
Schaeffer, L., 2016, “Manufatura por Conformação Mecânica”, Imprensa Livre. Porto Alegre.
Kempski, L.A., 2016, “Desgaste abrasivo do aço DINX100CrMoV8-1-1 nitretado a plasma pelo método de abrasão com roda de borracha”, INOVTEC – Sapucaia do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.
ASTM G-65, 2001, “Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus”

6 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

CHARACTERIZATION OF THE DP600 AND DP780 STEEL SHEET FOR METAL FORMING APPLICATION

Gabriel Grazziotin, ggabrielgrazziotin@gmail.com¹

Juliano Boeira Ercolani, julioercolani@hotmail.com¹

Lucas Rodrigo Kehl, lucasrkehl@gmail.com¹

Luciano Aparecido Kempinski, luciano.kempinski@erechim.ifrs.edu.br²

Alexandre da Silva Rocha, alexandre.rocha@ufrgs.br¹

¹UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43807 – Centro de Tecnologia. Bairro Agronomia 91509-900. Porto Alegre, RS – Brasil.

²IFRS, R. Domingos Zanella, 104 – Bairro Três Vendas, 99700-000. Erechim, RS - Brasil

Abstract: In the automotive industry the search for materials with great mechanic resistance and low weight has always been a great field of study. Due to this necessity, the Dual Phase Steels (DP) has been developed. These steels have a ferritic-martensitic microstructure, which provides its necessary hardness to its automotive application. The main objective of this study is to compare the performance of the DP600 and DP780 steels in stamping processes. For that, mechanical tests were realized, such as tensile, Erichsen, anisotropy, diamond pyramid hardness analysis and abrasive wear with rubber wheel test. The results show that the DP780 requires higher strength to deform and even so has a smaller elongation than the DP600, phenomenon observed in the Tensile Test. Plus, the DP600 had a higher Erichsen Index, showing better drawability. A detailed characterization is the goal of this project, giving conditions to determine which of the steels should have better results for sheet metal forming processes.

Palavras-chave: Metal Forming, Stamping, DP600, DP780, Characterization.