

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO E DE FERRAMENTA NA OCORRÊNCIA DO RETORNO ELÁSTICO

Sérgio Fernando Lajarin, espanhol@ufpr.br¹
Paulo Victor Prestes Marcondes, marcondes@ufpr.br² *

Universidade Federal do Paraná, DEMEC, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 CEP 81531-990, Curitiba, Paraná – Brasil.^{1,2}

Resumo. A indústria automotiva procura constantemente reduzir o peso dos veículo com objetivo de diminuir o consumo de combustível e conseqüentemente a emissão de gases poluentes na atmosfera. Uma alternativa explorada é a utilização dos aços de alta resistência avançados (AHSS) que devido a sua microestrutura diferenciada, atinge limites de resistência mais elevados o que permite que chapas mais finas possam ser usadas, reduzindo o peso sem perder no aspecto de segurança. Porém, a sua ampla aplicação na indústria automotiva ainda está limitada devido a desafios na conformabilidade, união de chapas, vida de ferramenta e retorno elástico. O retorno elástico é apontado na literatura como o principal problema que compromete a produção em massa de componentes estruturais com esses aços. Conhecer as causas e parâmetros que atuam na ocorrência do retorno elástico é essencial durante a fase de projeto, para que o retorno elástico possa ser minimizado ou compensado antes da fabricação do ferramental. Porém, esse assunto é pouco discutido na literatura. Devido a isso, o objetivo desse estudo é analisar a influência de parâmetros de ferramenta e de processo na magnitude do retorno elástico após embutimento de chapas metálicas. Foram ensaiados diversos aços automotivos sobre diferentes raios de ferramenta, folga de matriz e força de prensa-chapas. A influência de cada parâmetro no retorno elástico foi quantificada por meio de análise estatística. Por fim, observou-se que o retorno elástico é muito sensível à definição desses parâmetros, principalmente à força de prensa-chapas.

Palavras-chave: retorno elástico, aços AHSS, conformação de chapas.

1. INTRODUÇÃO

A indústria automotiva sofre uma grande pressão para se adequar a exigências ambientais por redução na emissão de gases poluentes na atmosfera. Uma alternativa explorada pela indústria automotiva é a utilização de chapas de aço mais finas nos componentes do veículo para reduzir o peso e conseqüentemente diminuir o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes. Porém, para fabricar componentes com chapas mais finas sem reduzir a resistência e não comprometer aspectos de segurança os fabricantes começaram a substituir os aços convencionais pelos aços de alta resistência (HSS) e os aços de alta resistência avançados (AHSS).

Com os aços convencionais a principal preocupação na conformação de chapas era a eliminação de estrições e trincas durante o processo. Com os aços de alta resistência a ênfase foi transferida para a precisão e consistência dimensional dos produtos, e um dos problemas mais enfrentados é o retorno elástico. Esse fenômeno provoca uma distorção geométrica após a conformação plástica que pode ser prejudicial esteticamente, assim como impossibilitar a montagem dos componentes. Os AHSS, por exemplo, possuem elevada resistência mecânica e um comportamento ainda não totalmente compreendido que dificulta o projeto de ferramentas de conformação eficientes.

Nos últimos anos, várias técnicas experimentais têm sido desenvolvidas para estudar e caracterizar o retorno elástico em chapas metálicas. Chen et al. (2009) usaram o ensaio de dobramento em perfil “U” para analisar alguns parâmetros de ferramenta e processo na ocorrência do retorno elástico em diferentes aços AHSS. Zhang et al. (1997) utilizaram o ensaio de dobramento em perfil “V”. Essas técnicas são atrativas porque propiciam um grande nível de retorno elástico, é de fácil medição, permite estudar a sensibilidade do retorno elástico à relação raio de ferramenta e espessura da chapa (R/t), propriedades mecânicas da chapa e condições de contato. Porém, o inconveniente desses dois ensaios é que eles não imitam condições realísticas da conformação de chapas realizada na indústria. Kuwabara et al. (2004) estudaram o retorno elástico usando o ensaio de dobramento estirado, mas Raabe et al. (2004) menciona que esse ensaio não permite um controle cuidadoso das tensões na chapa durante o dobramento, e não exibem tipicamente o dobramento seguido de dobramento reverso, nem grande deslizamento sobre o raio da ferramenta comum em operações em matrizes. O ensaio que é mais amplamente utilizado no estudo do retorno elástico é o ensaio de embutimento proposto por Makinouchi et al. (1993). Ele permite representar condições de conformação e perfil de componente bastante realístico. Chen et al. (2009) realizaram estudos experimentais analisando a influência do raio de ferramenta no curvamento de parede com diferentes aços AHSS de 1 mm de espessura. Os autores concluíram que a mudança angular e o curvamento de parede são mais pronunciados para raios de ferramenta e espessuras menores. Além disso, observaram que raios maiores que 3

mm tem menor influência no retorno elástico. Liu et al. (2002) estudaram a variação da aplicação da força de prensa-chapas na tentativa de reduzir o fenômeno do retorno elástico, pois segundo os autores, a correta aplicação da força de prensa-chapas é um dos métodos mais eficazes para resolver o problema. Muitos pesquisadores utilizam o ensaio de Makinouchi para estudar o retorno elástico por meio de simulação computacional, como por exemplo et al. (2004), Firat et al. (2008) and Lajarin and Marcondes (2012), porém o entendimento sobre a influência dos parâmetros de processo e de ferramenta na ocorrência do springback ainda não está clara e existem poucos trabalhos que falem sobre o assunto.

Devido a isso a proposta desse trabalho é fazer um estudo estatístico sobre a influência dos parâmetros de processo e de ferramenta na magnitude do retorno elástico. Foi usado o ensaio de Makinouchi e foram escolhidos dois parâmetros de processo e dois de ferramentas que são apontados na literatura como os mais influentes. Os resultados são submetidos a uma análise de variância (ANOVA) e discutidos separadamente para cada um dos cinco materiais de alta resistência testados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Cinco materiais foram ensaiados, sendo um aço convencional de alta resistência e quatro bifásico de diferentes níveis de resistência e fabricantes. Na Tabela 1 são descritas as propriedades mecânicas, espessura e os fabricantes desses materiais.

Os aços DP 350/600 e DP450/780 tem alongamento uniforme maior que o HSLA 420/490, mostrando a excelente combinação de bom alongamento e alta resistência tão interessante para indústria automotiva. O aço DP750/980 teve um bom alongamento de 10.4% para um aço com LR de 934 MPa. Todos os aços apresentaram pequena anisotropia.

Tabela 1. Propriedades mecânicas e espessuras dos materiais.

Material	Fornec.	Espessura (mm)	LE 0.2% (MPa)	LR (MPa)	Al. U. (%)	Al. T. (%)	E (GPa)	n	Δr	r
HSLA 420/490	A	1.50	415	542	12.3	17.5	208	0.116	-0,237	0,897
DP 350/600-A	A	1.57	395	620	14.9	20.0	206	0.149	0,285	0,819
DP 350/600-B	B	2.06	387	605	15.8	23.0	207	0.188	-0,377	0,909
DP 450/780	B	1.96	488	741	12.7	17.0	205	0.164	-0,365	0,931
DP 750/980	A	1.52	828	934	7.0	10.4	208	0.078*	-0,134*	0,971*

* Obtido em $\epsilon = 0.06$

A

Figura 1 mostra o comportamento das curvas tensão-deformação dos materiais ensaiados. Os aços DP apresentaram maior encruamento inicial do que o HSLA420/490 e depois se estabilizou. Os aços DP 350/600 dos fabricantes A e B apresentaram comportamento plástico diferente, apesar de serem de graus semelhantes. O DP 350/600-B apresentou um leve patamar de escoamento enquanto que o DP 350/600-A mostrou um grande encruamento inicial.

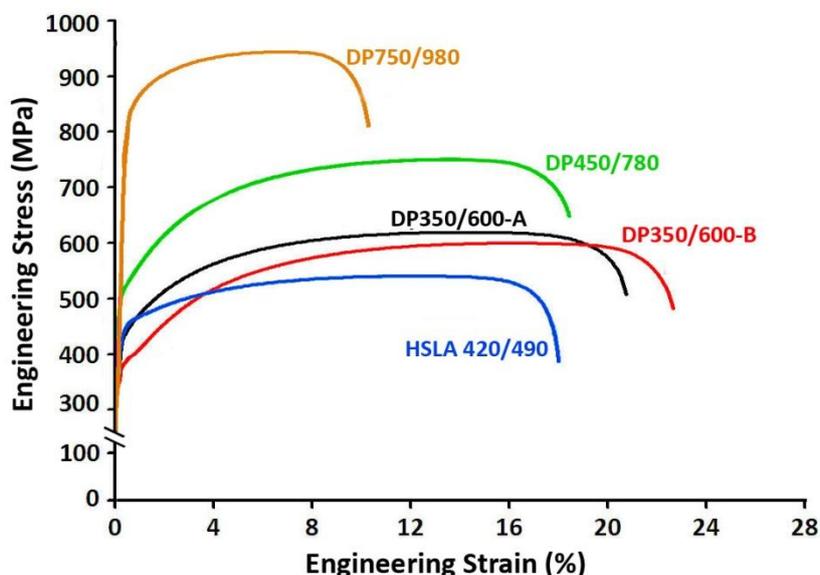


Figura 1. Dados de tensão-deformação verdadeira dos materiais ensaiados

2.2. Ensaio de embutimento

Os ensaios de embutimento foram feitos usando uma ferramenta de perfil-chapéu proposta por Makinouchi *et al.* (1993) na conferência NUMISHEET'93, (Figura 2a). Ela conforma a chapa em um perfil de canal que é bastante comum em componentes estruturais de veículos e que são bastante propícios ao retorno elástico.

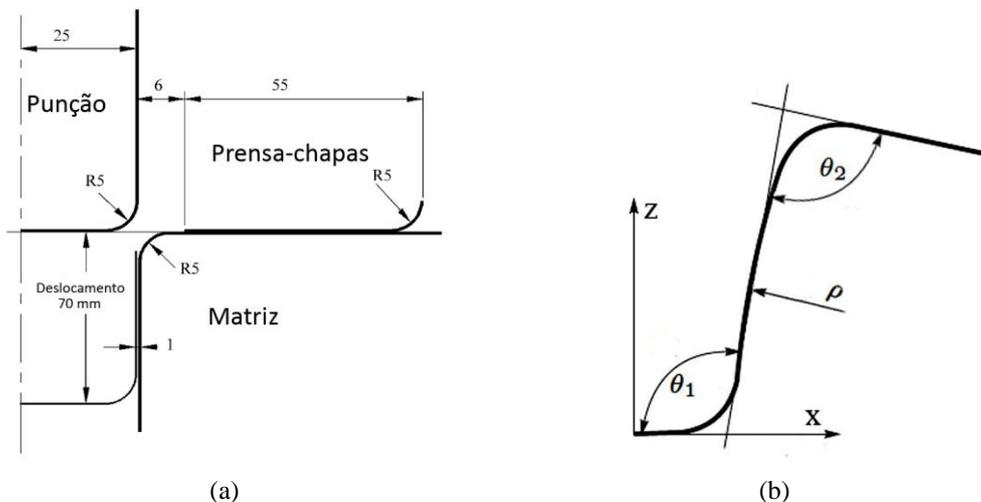


Figura 2 - Benchmark da NUMISHEET'93, em (a) ferramenta de embutimento, (b) medições de retorno elástico feitas nos corpos de provas, (Fonte: Makinouchi *et al.* 1993).

Para estudar a influência dos parâmetros de ferramenta e de processo na ocorrência do retorno elástico foi proposto um planejamento fatorial 2^3 , para cada material. Na Tabela 2 pode ser visto os três parâmetros escolhidos com dois níveis cada um.

O raio da ferramenta e a folga da matriz são apontados na literatura como os dois parâmetros de ferramenta que mais influenciam no retorno elástico, enquanto que a força de prensa-chapas (FPC) é o parâmetro de processo que mais influenciam (Livatyali *et al.*, 2002; Carden *et al.*, 2002; Sadagopan e Urban, 2003; Chen e Koç, 2007).

A FPC de 2,5 kN para o nível 1 é o valor padrão do ensaio proposto por Makinouchi *et al.* (1993) e o valor de 12.5 kN para o nível 2 foi definido após ensaios preliminares. As folgas entre a matriz e o punção foram definidas sobre influência do trabalho de Sadagopan e Urban (2003). O raio da ferramenta (matriz/punção) de 5 mm é o valor padrão da ferramenta proposta por Makinouchi *et al.* (1993). Porém, a espessura de chapa utilizada nos ensaios com essa ferramenta é geralmente de 0.78 mm o que resulta em uma relação raio/espessura (r/t) de 6.5 mm. Para manter muito próxima essa relação com as chapas de 1.5 mm e 2 mm usadas nesse trabalho, foi definido o raio no nível 2 com 10 mm (r/t de 6.6 mm para as chapas de 1.5 mm). Na Tabela 3 são apresentados os arranjos dos parâmetros que foram adotados nos 8 ensaios, conforme proposto pelo planejamento fatorial 2^3 .

Outros parâmetros e condições de ensaio foram mantidas fixas, tais como: ensaio sem lubrificação, velocidade do punção com 10 mm/s, deslocamento do punção 70 mm, dimensão do corpo de prova de 35x300 mm com comprimento maior na direção de laminação.

Tabela 2 – Parâmetros de processo e ferramenta com dois níveis.

Factor	Parameter	Level 1	Level 2
A	Força de prensa-chapas (kN)	2.5	12.5
B	Folga entre punção e matriz	1.2 t	1.5 t
C	Raio de ferramenta (mm)	5	10

t =espessura da chapa

Tabela 3 - Matriz das condições experimentais do embutimento de canal.

Ensaio	Parameters		
	A (Força de prensa-chapas)	B (Folga)	C (Raio de ferramenta)
E1	2,5	1.2 t	5
E2	12,5	1.2 t	5
E3	2,5	1.5 t	5
E4	12,5	1.5 t	5
E5	2,5	1.2 t	10
E6	12,5	1.2 t	10
E7	2,5	1.5 t	10
E8	12,5	1.5 t	10

2.3. Procedimento de medição e técnica de análise dos dados

Após a operação de embutimento o perfil dos corpos de prova foi digitalizado em um escâner com resolução de 600 dpi (pontos por polegada). As imagens digitalizadas pelo escâner foram inseridas em um aplicativo CAD onde foram feitas três medidas de retorno elástico; (i) a mudança angular na parede (θ_1), (ii) mudança angular no flange (θ_2) e (iii) o raio de curvamento de parede (ρ), seguindo procedimento relatado em Makinouchi et al. (1993)(Figura 2b).

O valor do θ_1 , θ_2 e ρ de todas as amostras foram analisadas estatisticamente usando Análise de Variância (ANOVA) para identificar quais variáveis apresentam significativa influencia nos resultados. A análise de significância foi feita usando o valor de p . Ele é definido como a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema quanto aquela observada em uma amostra, assumindo verdadeira a hipótese nula. Um fator p de 5% foi adotado para identificar o valor médio com diferenças estatísticas significativas entre os fatores (Scheaffer and McClave, 1996).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Aço HSLA420/490

Na Figura 3 é mostrado os resultados de retorno elástico no θ_1 , θ_2 e ρ . Os valores de θ_1 e θ_2 mais próximos de 90° e resultados de ρ maiores indicam os melhores resultados, com menor retorno elástico. Nos três casos houve grande diferença entre os melhores e piores resultados, $9,2^\circ$ no θ_1 , 10° no θ_2 e acima de 1000 mm no ρ . Isto indica que a combinação dos parâmetros para cada condição ensaiada influenciou grandemente os resultados. Entretanto, para saber a real influência de cada parâmetro os resultados foram submetidos à ANOVA.

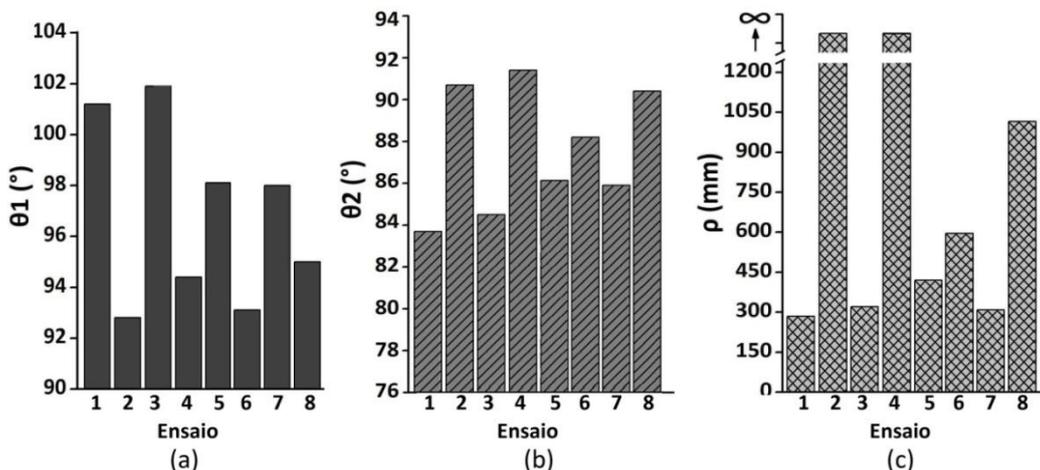


Figura 3 – Retorno elástico após embutimento com o aço HSLA420/490; (a) θ_1 , (b) θ_2 e (c) ρ .

De acordo com a ANOVA apresentada na Tabela 4 a força de prensa-chapas, folga e o raio de ferramenta tiveram significativa influência nos resultados. Entretanto, uma regra estatística diz que não se pode considerar o efeito principal de um parâmetro quando ele está envolvido em uma interação também significativa. Devido a isso, todas as interações significativa nos resultados do θ_1 , θ_2 e ρ foram analisadas de forma cruzada e está ilustrada na

Figura 4.

Tabela 4 – Valor de p da análise de variância dos resultados de embutimento.

ANOVA para θ_1	HSLA420/490	DP350/600-A	DP350/600-B	DP450/780	DP750/980
(A) Força de prensa-chapa	0.000000	0.000000	0.000003	0.000000	0.000000
(B) Folga	0.000641	0.441193	0.062289	0.285138	0.035273
(C) Raio	0.000042	0.120703	0.735942	0.069652	0.002040
A x B	0.004199	0.045030	0.426295	0.848371	0.423594
A x C	0.000006	0.037590	0.086242	0.009972	0.048364
B x C	0.451614	0.441193	0.787046	0.390189	0.000004
A x B x C	0.184932	0.779634	0.547142	0.390189	0.028601
ANOVA para θ_2	HSLA420/490	DP350/600-A	DP350/600-B	DP450/780	DP750/980
(A) Força de prensa-chapa	0.000000	0.000005	0.000125	0.000001	0.000000
(B) Folga	0.021538	0.049547	0.618682	0.444054	0.002270
(C) Raio	0.807908	0.007142	0.172365	0.000088	0.000134
A x B	0.079217	0.348031	0.022969	0.176363	0.052390
A x C	0.000285	0.017320	0.069152	0.105932	0.037152
B x C	0.686342	0.789749	0.368188	0.837517	0.000115

A x B x C	0.069555	0.789749	0.202103	0.105932	0.222843
ANOVA para ρ	HSLA420/490	DP350/600-A	DP350/600-B	DP450/780	DP750/980
(A) Força de prensa-chapa	0.000305	0.000000	0.000659	0.000918	0.000046
(B) Folga	0.754771	0.392181	0.168705	0.530830	0.001355
(C) Raio	0.023455	0.324004	0.022339	0.077537	0.004705
A x B	0.941785	0.553236	0.041968	0.905333	0.001276
A x C	0.012744	0.135748	0.086583	0.898535	0.002385
B x C	0.222881	0.330382	0.093188	0.769968	0.000508
A x B x C	0.110178	0.296486	0.017789	0.586773	0.001896

No θ_1 , θ_2 e ρ a interação mais significativa foi AC e a

Figura 4 mostra o comportamento dessa interação. Nos três retorno elásticos medidos, θ_1 , θ_2 e ρ , a alteração na força de prensa-chapa de 2.5 kN para 12.5 kN influenciou grandemente o resultado, principalmente quando usado raio de ferramenta de 5 mm ($r/t = 3.3$). No θ_1 houve também a interação AB como significativa, porém, neste caso, a significância foi influenciada pela força de prensa-chapas e não pela folga. O fator que efetivamente mais influenciou os melhores resultados nos três casos de retorno elástico foi a força de prensa-chapas de 12.5 kN. Quando essa condição foi usada houve menor variação nos resultados e na média apresentou menor retorno elástico para o aço HSLA420/490.

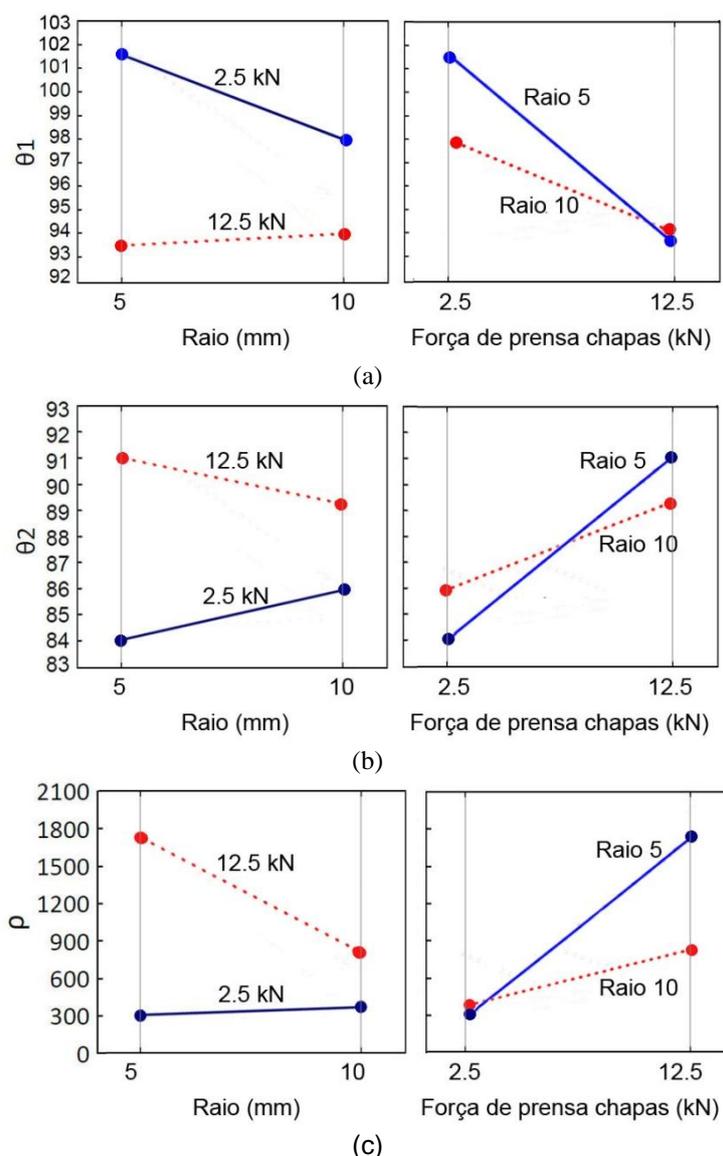


Figura 4 – Interações mais significativas com aço HSLA420/490: (a) AC no θ_1 , (b) AC no θ_2 e (e) AC no ρ .

3.2. Aço DP350/600-A

Na

Figura 5 é ilustrado o resultado com o aço DP350/600-A. A diferença entre os melhores e piores resultados foram de 11.3° no θ_1 , 9.7° no θ_2 e 762 no ρ .

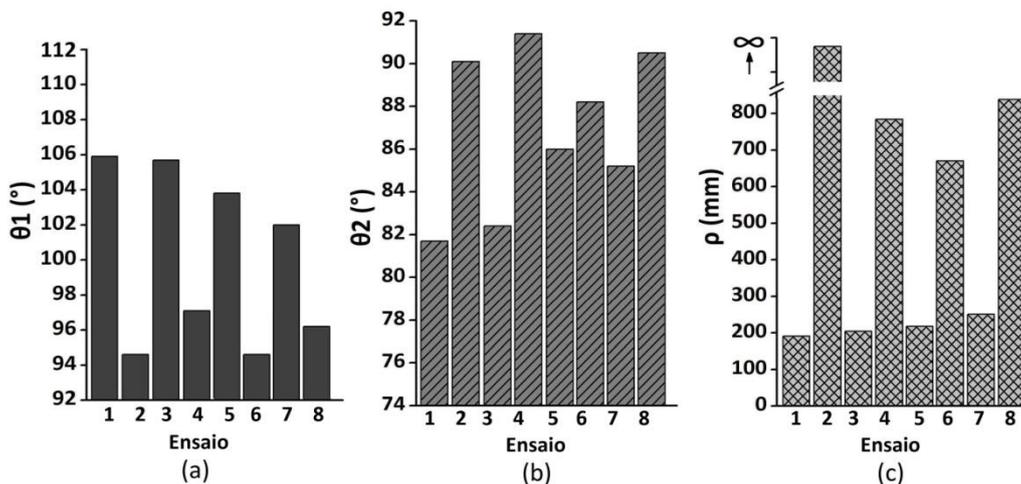


Figura 5 – Springback after deep drawing with DP350/600-A steel; (a) θ_1 , (b) θ_2 e (c) ρ .

A análise de variância apontou que no θ_1 e no θ_2 a interação mais significativa foi AC. A

Figura 6 mostra o comportamento dessas interações. Em ambos os casos a alteração na força de prensa-chapa teve grande influência nos resultados para ambas as condições de raio utilizado. A influência do raio de ferramenta nos resultado foi pequena, principalmente no θ_1 . Na magnitude do ρ não houve interação significativa entre as variáveis.

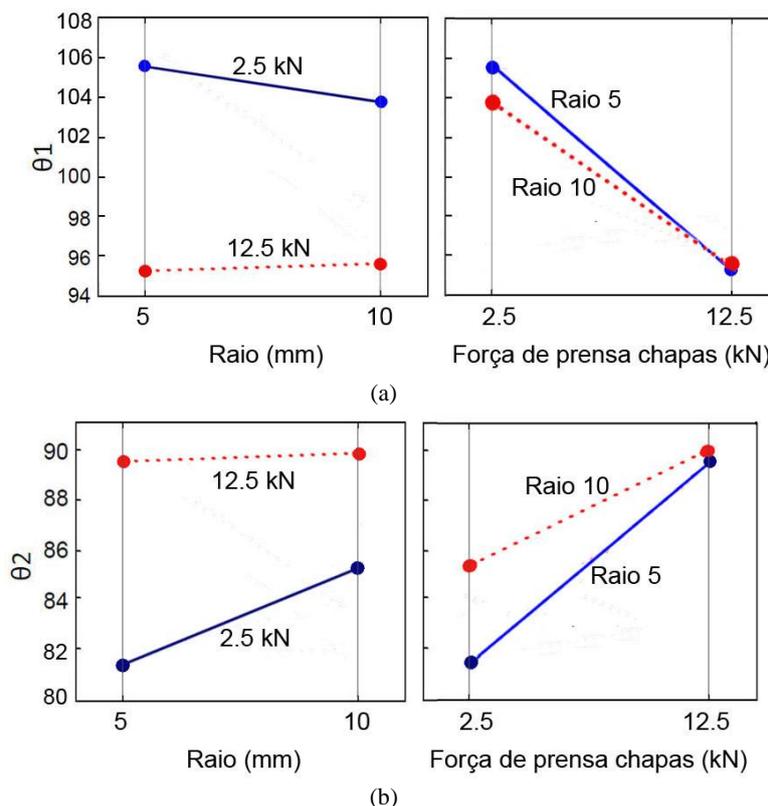


Figura 6 - Interações mais significativas com aço DP350/600-A: (a) AC no θ_1 e (b) AC no θ_2 .

3.3. Aço DP350/600-B

Na

Figura 7 são apresentados os resultados do retorno elástico medido após o embutimento do aço DP350/600-B. A diferença entre o menor e o maior resultado foi de 5.7° no θ_1 , 5.5° no θ_2 e acima de 1000 mm no ρ . Pode ser observado que essas diferenças entre os resultados das 8 condições ensaiadas foram pequenas se comparadas as diferenças dos aços HSLA420/490 e DP350/600-A. Isso mostra que a influência da combinação dos parâmetros no resultado foram menores, e além disso, isso pode ser explicado pelos valores menores de retorno elástico apresentado por esse aço – o menor retorno elástico entre os materiais ensaiados.

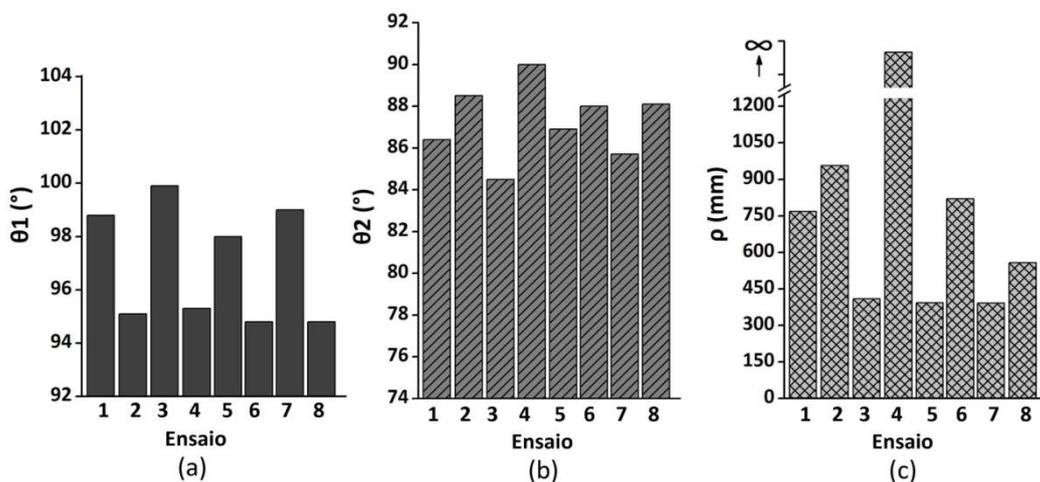


Figura 7 – Springback after deep drawing with DP350/600-B steel; (a) θ_1 , (b) θ_2 e (c) ρ .

De acordo com a análise de variância não houve interação significativa no θ_1 , porém a força de prensa-chapas isoladamente apresentou grande significância nos resultados. No entanto no θ_2 e no ρ a interação mais significativa foi AB. A

Figura 8 mostra o comportamento dessas interações. No θ_2 a alteração na força de prensa-chapa usando folga de 1.5t alterou o resultado 4.5° e com folga de 1.2t em 2°. Os parâmetros que influenciaram os melhores resultados no θ_2 foi a força de prensa-chapas de 12.5 kN com folga de 1.5t.

No ρ a alteração na força de prensa-chapa influenciou menos os resultados quando usada folga de 1.2t, entretanto com a folga de 1.5 a diferença foi maior. Os parâmetros que influenciaram os melhores resultados no ρ foram a força de prensa-chapa de 12.5 kN e folga de 1.5t.

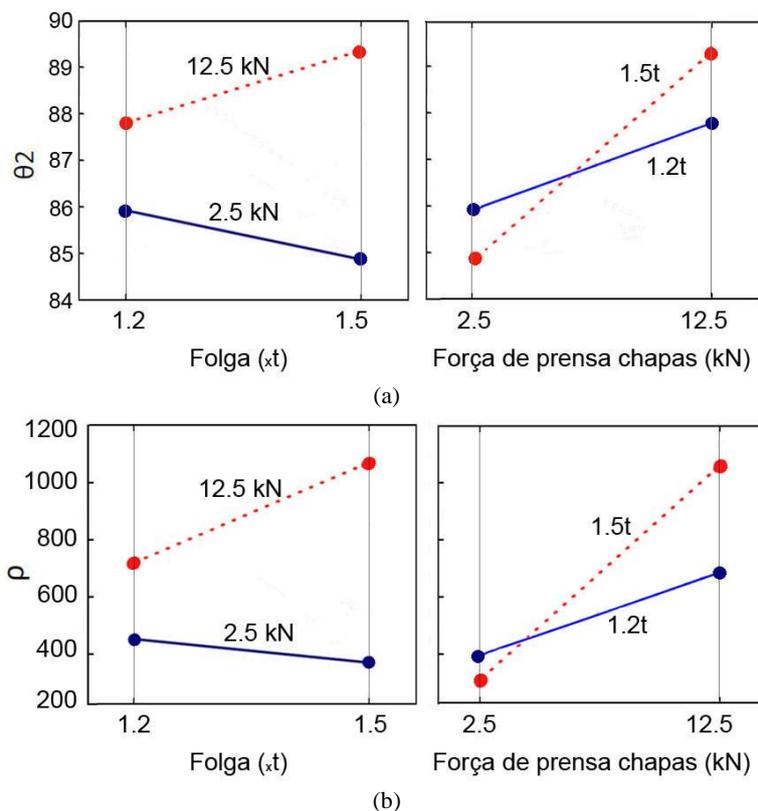


Figura 8 - Interações mais significativas com aço DP350/600-B: (a) AB no θ_1 e (b) AB no θ_2 .

3.4. Aço DP450/780

Na

Figura 9 são mostrados os resultados do retorno elástico medido após embutimentos com o aço DP450/780. Os resultados de retorno elástico do DP450/780 não apresentaram grandes variações entre os 8 ensaios. Ou seja, foi pouco

sensível a escolha das variáveis ensaiadas. A diferença entre o menor e o maior resultado foi de 8.3° no θ_1 , 5.8° no θ_2 e apenas 180 mm no ρ .

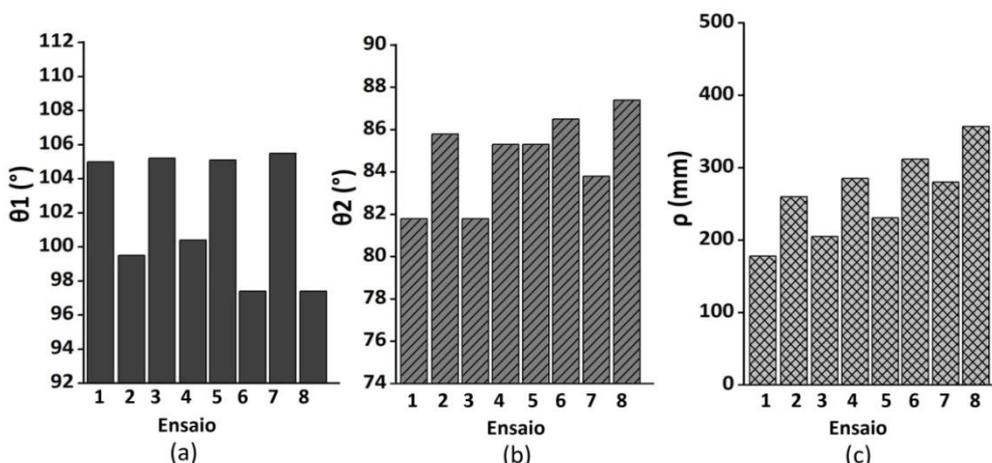


Figura 9 - Springback after deep drawing with DP450/780 steel; (a) θ_1 , (b) θ_2 e (c) ρ .

No θ_1 , θ_2 e ρ o parâmetro que teve maior significância nos resultados, isoladamente foi a força de prensa-chapas. Interação significativa houve apenas de AC para o θ_1 . Entretanto, conforme pode ser visto na

Figura 10 o resultado foi influenciado pela força de prensa-chapas e não pelo raio. A alteração na força de prensa-chapas de 2.5 kN para 12.5 kN influenciou uma variação de mais de 7° usando raio de 10 mm e de 5° usando raio 5 mm.

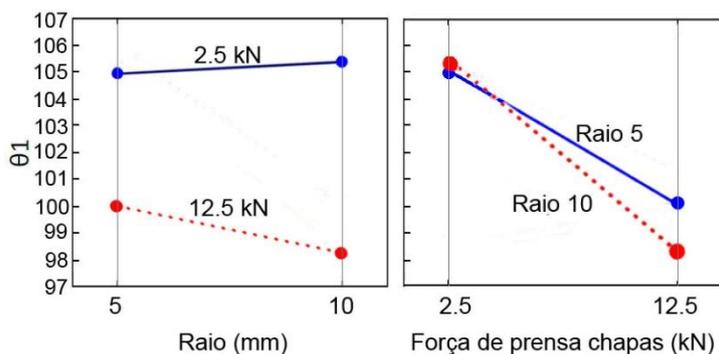


Figura 10 – Interação significativa com o aço DP450/780.

3.5. Aço DP750/980

Na Figura 11 são apresentados os resultados do retorno elástico medido após o embutimento com o aço DP750/980. Houve grande variação nos resultados dos 8 ensaios. A diferença entre o menor e o maior resultado foi de 18.2° no θ_1 , 13° no θ_2 e acima de 1800 no ρ . Isso mostra que o aço DP750/980 foi bastante sensível a combinação dos parâmetros usados nos ensaios.

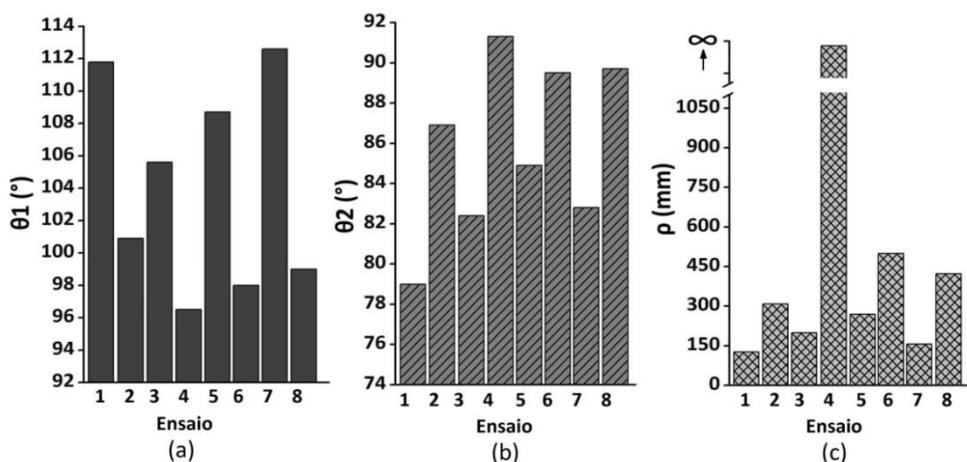


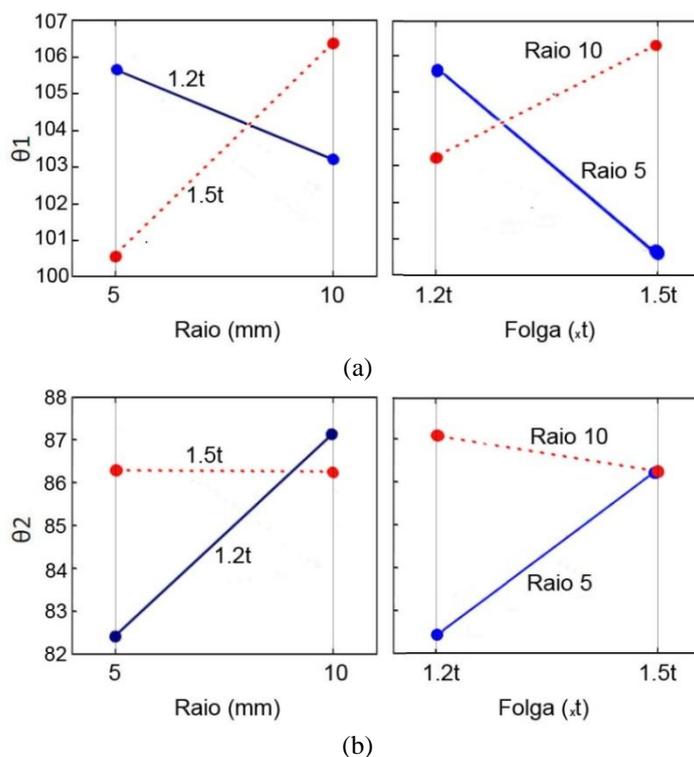
Figura 11 - Springback after deep drawing with DP750/980 steel; (a) θ_1 , (b) θ_2 e (c) ρ .

De acordo com a análise de variância, todos os parâmetros apresentaram influência significativa nos resultados do θ_1 e θ_2 e no ρ . Assim como houve diversas interações significativas, entretanto, a interação mais significativa nas três regiões medidas foi o BC. A Figura 12 mostra o comportamento dessa interação.

No θ_1 a alteração na folga influenciou significativamente o resultado para ambos os raios. Quando o raio de 5 foi usado a alteração da folga provocou variação de 5° no resultado e pro raio de 10 mm a alteração foi de 3°. O interessante foi a influência cruzada nos resultados. Mais precisamente, quando a folga aumentou para 1.5t o θ_1 diminui com raio de 5 mm e aumentou com raio de 10 mm. Os fatores que mais influenciaram os melhores resultados no θ_1 foi a folga de 1.5t e o raio de 5 mm.

No θ_2 a alteração na folga influenciou significativamente apenas quando o raio de 5 mm foi usado, alterando em 3.5° o resultado. A alteração no raio não provocou alteração no resultado quando usada a folga de 1.5t. Os fatores que influenciaram os melhores resultados no θ_2 foi a folga de 1.2t e raio de 10 mm, oposto da atuação no θ_1 .

Assim como aconteceu com o θ_2 , no ρ a alteração na folga teve significativa influência apenas quando o raio de 5 mm foi usado. A alteração no raio teve significativa influência apenas quando a folga de 1.5t foi usada. Outra interação significativa no ρ foi AB, fortemente influenciado pela folga. Com isso, os fatores que influenciaram os melhores resultados no ρ foram a folga de 1.5t, raio de 5 mm, associado com a força de prensa-chapas de 12.5 kN.



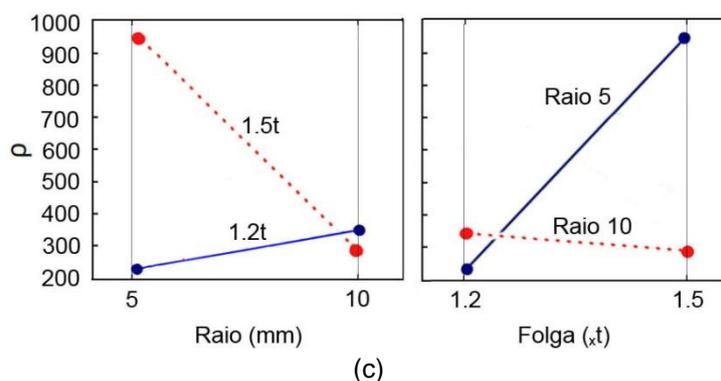


Figura 12 - Principais interações dos fatores no aço DP750/980: (a) BC no θ_1 (b) BC no θ_2 , e (c) BC no ρ .

4. DISCUSSÃO

Na seção anterior foram apresentados os resultados de cada material separadamente e discutido brevemente a influência dos fatores nos resultados. Nos cinco materiais testados o parâmetro que mais exerceu influência nos resultados do θ_1 , θ_2 e ρ foi a força de prensa-chapas. A alteração de 2.5 kN para 12.5 kN influenciou significativamente todos os resultados, sendo que a força de prensa-chapas de 12.5 kN influenciou os melhores resultados, ou seja, com menor retorno elástico. No processo de embutimento, a chapa metálica escorrega se deformando plasticamente sobre o raio da ferramenta. Durante essa deformação existem tensões compressivas atuando na região da chapa em contato com o raio da matriz e tensões de tração na região oposta. Quando a maior força de prensa-chapas foi usada, ela restringiu mais fortemente o escorregamento da chapa sobre o raio da matriz, direcionando as tensões no sentido longitudinal da parede do corpo de prova, induzindo ao estiramento da chapa. Com isso a recuperação elástica nos raios foi menor e o encurvamento da parede também.

O raio da ferramenta teve efeito principal significativo em alguns casos onde o aço era de menor espessura, como por exemplo o HSLA420/490, DP350/600-A e o DP750/980. Em todos os casos o raio de 5 mm ($r/t= 3.3$ mm) influenciou os melhores resultados. Esse resultado concorda com Chen *et al.* (2009) que verificou que o raio de 5 mm produz menor retorno elástico e também com Sadagopan e Urban (2003) que verificaram que raios menores produzem menor retorno elástico na parede do corpo de prova e também menor curvamento de parede. O embutimento da chapa sobre o raio menor da ferramenta produz maior deformação plástica sobre o raio, gerando menores tensões elásticas a serem liberadas após o descarregamento.

A folga entre matriz e punção foi o parâmetro de menor influência nos resultados. Ela apareceu com efeito principal significativo nos resultados com o aço DP750/980 e em associações significativas com esse mesmo aço e com o DP350/600-B. Em todos os casos a folga maior de 1.5t influenciou os melhores resultados. Com o aço DP750/980 que é o material de maior resistência entre os estudados e com espessura de 1.5 mm a folga maior, influenciou os melhores resultados, sempre associada com o raio de 5 mm.

5. CONCLUSÃO

Entre os parâmetros de processo e de ferramenta testados, a força de prensa-chapas foi o parâmetro que mais influenciou os resultados do retorno elástico. A maior força de de prensa-chapas influenciou os melhores resultados pois restringiu mais fortemente o escorregamento da chapa sobre o raio da matriz, forçando o estiramento da chapa. O raio da ferramenta e a relação (r/t) também tiveram influencia significativa em alguns resultados. O raio menor com ($r/t= 3.3$ mm) influenciou os melhores resultados pois produziu maior deformação plástica e menores tensões elásticas na região de dobra. Entre os parâmetros testados a folga na matriz foi o de menor influência, sendo que quando houve influência significativa a folga de 1.5t induziu os melhores resultados.

6. REFERÊNCIAS

- Carden W.D., Geng I. M., Matlock D. K., Wagoner r. H., 2002, "Measurement of springback", Int. J. Mech. Sci., Vol. 44, pp. 79-101.
- Chen F-K., Liu S-W., Chiang T-S., Hsu K-M., Pan Y-R. 2009, "Die design for stamping automotive structural parts with advanced high strength steel sheets", IDDRG 2009 International Conference, Golden, CO, USA.
- Chen P., Koç M., 2007, "Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels", J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 190, pp.189-198.
- Firat M., Kaftanoglu B., Eser O., 2008, "Sheet metal forming analyses with an emphasis on the springback deformation", J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 196, pp. 135-148.
- Kuwabara, T., Asano, Y., Ikeda, S., Hayashi, H., 2004, "An evaluation method for springback characteristics of sheet metals based on a stretch bending test." In Kergen R., Kebler L., Langerak N., Lenze F.-J., Janssen E., and Steinbeck G., editors, Proceedings of IDDRG 2004. Forming the Future. Global Trends in Sheet Metal Forming, pp. 55-64, Sindelfingen, Germany.

- Zhang, L.C., Lu, G., Leong, S.C., 1997, "V-shaped sheet forming by deformable punches". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63(1-3), pp.134–139.
- Lajarin, S. F., Marcondes, P. V. P., 2012, "Influence of computation parameters and nonlinear unloading behavior on springback simulation". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (Impresso)*.
- Liu, G., Lin, Z., Xu, W., Bao, Y. 2002, "Variable blankholder force in u-shaped part forming for eliminating springback error". *J. of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 120(1-3), pp. 259–264.
- Livatyali, H., Altan, T., 2001, "Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods: Part 1. Experimental investigations". *J. of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 117(1-2), pp. 262–268.
- Makinouchi, A., Yamamura, N., Kuwabara, T., 2002, "Springback simulations for stretch-bending and drawbending processes using the static explicit FEM code, with an algorithm for canceling non-equilibrated forces", in *Proc. 5th Int. Conf. NUMISHEET2002*, edited Y. Yang et al., Jeju Island, Korea, pp. 25-30.
- Raabe, D., Roters, F., Barlat, F., Chen, L-Q., 2004, "Continuum Scale Simulation of Engineering Materials, Fundamentals – Microstructures" – *Process Applications*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA.
- Sadagopan, S., Urban, D., 2003, "Formability Characterization of a New Generation of High Strength Steels", *American Iron and Steel Institute*.
- Scheaffer, R.L., McClave, J.T., 1996, "Probability and Statistics for Engineers". *International Thomson Publishing, Belmont*.
- Xu, W.L., MA, C.H., Li, C.H., Feng, W.J., 2004 "Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming". *J. of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 151(1-3), pp. 217–222.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

ELASTIC BEHAVIOR OF ADVANCED HIGH STRENGTH BIPHASIC STEEL

Sérgio Fernando Lajarin, espanhol@ufpr.br¹

Paulo Victor Prestes Marcondes, marcondes@ufpr.br² *

Universidade Federal do Paraná, DEMEC, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 CEP 81531-990, Curitiba, Paraná – Brasil.^{1,2}

Abstract. *Falta o abstract*

Keywords: *Springback, AHSS steel, Sheet metal forming.*