

Análise do retorno elástico no processo de dobramento em “V” em aços de alta resistência

Analysis of springback in V-bending process in high resistance steels

DOI:10.34117/bjdv8n4-320

Recebimento dos originais: 21/02/2022

Aceitação para publicação: 31/03/2022

Rafael Pandolfo da Rocha

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço: Rua Glicério P. de Carvalho, 81, bairro Coxilha, Santa Vitória do Palmar, RS
Brasil CEP: 96230-000

E-mail: rafael.pandolfo@ufrgs.br

Matheus Henrique Riffel

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço: Rua Glicério P. de Carvalho, 81, bairro Coxilha, Santa Vitória do Palmar, RS
Brasil CEP: 96230-000

E-mail: matheus.riffel@ufrgs.br

Halston José Mozetic

Pós-Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço: Rua Glicério P. de Carvalho, 81, bairro Coxilha, Santa Vitória do Palmar, RS
Brasil CEP: 96230-000

E-mail: halston.mozetic@ufrgs.br

Lirio Schaeffer

Prof. Dr. Ing., do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço: Rua Glicério P. de Carvalho, 81, bairro Coxilha, Santa Vitória do Palmar, RS
Brasil CEP: 96230-000

E-mail: schaeffer@ufrgs.br

RESUMO

Embora sejam empregados na indústria automobilística massivamente, para fins de fabricação de veículos mais leves e resistentes, os aços avançados de alta resistência (AHSS), mais especificamente, os aços bifásicos, ou Dual Phase, possuem pouca referência na literatura quanto ao seu comportamento mecânico, sobretudo quando analisado o fenômeno de recuperação elástica, ou Springback, oriundo dos processos de conformação mecânica. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar a

influência dos parâmetros de dobra, em especificamente, o efeito do deslocamento do punção no retorno elástico em tiras de aço de alta resistência. Foram realizados, assim, quatro tipos de ensaios de dobramento em matriz “V”, os quais se diferenciavam entre si em função dos deslocamentos realizados pelo punção, empregando, assim, tiras metálicas provenientes dos aços DP600 e DP780. Nesse aspecto, foram analisados o desenvolvimento da força de dobra e do retorno elástico nesses quatro processos de dobramento, com vistas a comparar aos resultados previstos pelas formulações constantes na literatura e, se atendida certa previsão nos resultados, validá-las para os processos executados, bem como para os materiais empregados. Para esses dois aços, notou-se que, a partir de 10 e até 20 mm de deslocamento, a força aplicada pelo punção tinha uma tendência a se reduzir, o que era previsto por formulação. No entanto, assim que assumida a posição de 23 mm, a força acrescia-se abruptamente, motivada em função do contato com o fundo da abertura da matriz. À medida em que o deslocamento do punção aumentava, reduzia-se, em contrapartida, os raios de dobra e os ângulos de abertura das tiras metálicas conformadas. O desenvolvimento do retorno elástico esteve, por sua vez, interligado à força aplicada, de forma que, para os processos em que o carregamento aplicado era superior, menor era a intensidade desse fenômeno.

Palavras-chave: aços bifásicos, dual phase, dobramento de chapas, retorno elástico.

ABSTRACT

Although massively employed in the automotive industry for the purpose of manufacturing lighter and sturdy vehicles, the advanced high-strength steels (AHSS), more specifically the two-phase steels, or Dual Phase, have little reference in the literature to its mechanical behavior, especially when analyzing the phenomenon of Springback, originating from the processes of mechanical conformation. As a result, this paper aims to analyze the influence of bending parameters, in particular, the effect of punch displacement on springback in high strength steel strips. Therefore, four types of bending tests were performed in die “V”, which differed according to the displacements made by the punch, thus using metallic strips from the DP600 and DP780 steels. In this regard, the development of bending force and springback in these four folding processes were analyzed, with a view to comparing with the results predicted by the formulations in the literature and, if given certain prediction in the results, validating them for the executed processes, as well as for the materials employed. For these two steels, it was noticed that, from 10 and up to 20 mm of displacement, the force applied by the punch had a tendency to decrease, which was foreseen by formulation. However, once the 23 mm position was taken, the force was added abruptly, motivated by the contact with the bottom of the die opening. As the displacement of the punch increased, the bending radius and the opening angles of the conformal metal strips were reduced. The development of springback was, in turn, connected to the force applied, so that, for the processes in which the load applied was superior, less was the intensity of this phenomenon.

Keywords: two-phase steels, dual phase, sheet folding, springback.

1 INTRODUÇÃO

Os aços bifásicos, ou Dual Phase, constituintes do grupo dos aços avançados de alta resistência (AHSS), estão sendo empregados amplamente no setor automobilístico,

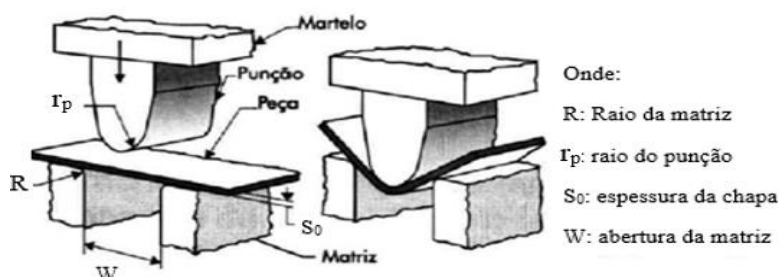
dada a peculiaridade desses em combinar elevada resistência mecânica a uma considerável ductilidade, o que contribui com a redução de peso quando da fabricação de automóveis e, inclusive, com a melhoria à conformabilidade. Embora sejam obtidos por tratamento térmico, não é incomum empregar quaisquer processos de reaquecimento nos aços Dual Phase, sobretudo quando da necessidade de lhes conferir alterações à sua microestrutura e, por conseguinte, ao seu comportamento mecânico [1].

O emprego dos aços avançados de alta resistência na indústria automobilística vem sofrendo uma considerável limitação, motivada por dificuldades em manter a sua precisão dimensional quando conformados. Assim, ressaltam que esse problema se concentra no retorno elástico, sobretudo pela inviabilidade de montar os componentes derivados dos AHSS e, inclusive, por questões estéticas, fatores esses que precisam ser correlacionados com os parâmetros de ferramenta e de processo, bem como levados em conta durante o projeto dos seus produtos [2].

No que tange aos processos de estampagem, o dobramento é considerado como uma operação unitária, a partir da qual elementos retos de chapas são transformados em elementos curvos. Além disso, salienta-se que esse processo é caracterizado pela não-uniformidade e não-homogeneidade da deformação, motivadas pela relação direta estabelecida entre essas e a posição da seção transversal, referenciada a partir da linha neutra da peça [3].

Nesse viés, o dobramento é descrito como o processo em que uma determinada chapa metálica sofre deformação por flexão, proveniente do movimento e da energia oriundos de prensas. Dessa maneira, o formato da peça é obtido pela interação entre punção e matriz específicos [4], conforme demonstrado na figura 1.

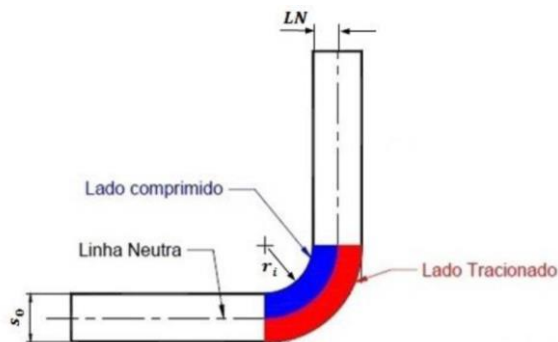
Figura 1: Representação do processo de dobramento. Adaptado de [4].



Quando da realização da operação de dobramento, a chapa é submetida a esforços aplicados em duas direções opostas, a fim de desenvolver a flexão e a deformação

plástica. O resultado desse processo, por sua vez, é a mudança superficial da chapa metálica, a qual passa de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em ângulo, munida de raio de concordância em sua junção [5], conforme pode ser averiguado através da figura 2.

Figura 2: Representação das zonas de tração e compressão). Retirado de [6].



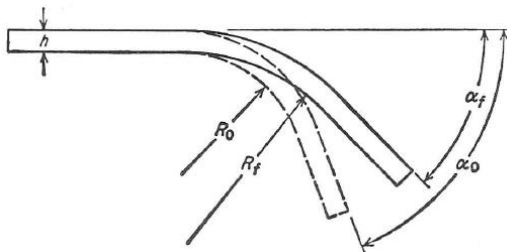
Durante o processo de dobramento, mais precisamente, na seção transversal da região em que está concentrada a dobra, nota-se a existência de duas regiões, a saber: região de deformação elástica e região de deformação plástica. Dessa forma, destaca-se que, embora apresentem características de deformação (elástica e plástica), essas duas regiões são deformadas por esforços trativos e compressivos, cuja localização da zona de tração (+) e de compressão (-), em relação à linha neutra (LN), depende da orientação do esforço aplicado [3].

Em função da realização desse processo de conformação, surge o fenômeno retorno elástico, o qual, também denominado de *springback*, é motivado pela concentração de energia elástica residual no metal conformado, oriunda da deformação não-linear acometida à peça. Desse modo, a energia proveniente do processo fica armazenada durante a sua realização, ao passo que, quando da remoção do esforço aplicado pela ferramenta, a energia residual impõe à peça uma tendência de retorno à sua posição de equilíbrio, como se fosse a sua posição inicial, o que evidencia que o formato final da peça depende, além do contorno da matriz, da energia elástica estocada no material enquanto esse está sendo deformado plasticamente [7].

Caracteriza-se o retorno elástico, ou recuperação elástica, como a variação dimensional que uma determinada peça sofre quando removida a pressão exercida pela ferramenta de dobra, motivada pela redução da deformação total devido à recuperação elástica, cujas representações do ângulo desejado (α_0) e do ângulo efetivamente obtido

(α_f) podem ser averiguadas pela figura 3. Ademais, é notório que fenômeno de recuperação elástica será mais contundente quanto maior for o limite de escoamento, menor o módulo de elasticidade e maior a deformação plástica [8].

Figura 3: Representação do retorno elástico. Retirado de [8].



É notório que o acréscimo da tensão de escoamento do material, sobretudo dos aços avançados de alta resistência (AHSS), contribui para redução da conformabilidade das chapas e, em contrapartida, aumenta o seu respectivo retorno elástico. Ademais, ressalta-se que o fenômeno de recuperação elástica depende da combinação de uma série de parâmetros de processo, a saber: propriedades dos materiais, temperatura, formas e dimensões das ferramentas, condições de atrito e de contato, bem como da espessura e do comprimento das amostras do material, dentre outros aspectos do processo de dobra [9].

No entanto, salienta-se que o retorno elástico depende, além do limite de escoamento do material e do processo de dobramento, do raio de dobramento, de forma que, quanto menor o raio de dobra, menor serão as forças elásticas e, conseqüentemente, menor o retorno elástico [10]. Ademais, considera-se que a determinação do retorno elástico através do método de tentativa e erro é mais apropriada para encontrar o perfil adequado da matriz. Concomitantemente, é dito que, além de reduzir o raio de curvatura para uma dimensão menor do que a desejada, outros fatores, como, por exemplo, a conformação a altas temperaturas e o calçamento do punção ao fundo da matriz, auxiliam na redução do retorno elástico [8].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 AMOSTRAS

Em concordância com a norma ABNT NBR ISO 7438:2016, foram selecionadas 12 amostras de aço DP600 e 12 de aço DP780, com dimensões de 250 mm de comprimento e 20 mm de largura. No entanto, no tocante à espessura, é imprescindível destacar que o aço DP600 apresentava uma espessura de 1,5mm, enquanto a espessura do

aço DP780 era de 1mm, materiais esses que, por sua vez, assumiram o formato de tiras. Ademais, conforme constam das tabelas 1 e 2, foram extraídos as propriedades mecânicas desses aços em trabalhos científicos, com vistas a encontrar um valor médio dessas informações e, conseqüentemente, adotá-lo quando da realização dos cálculos teóricos de força de dobra e de retorno elástico.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço DP600. Adaptado de [1], [11] e [12].

Aço DP600			
Autores	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento Máximo (%)
Tigrinho (2011)	385	602	23
Martins (2015)	388	631	16,8
Tepedino (2014)	368	633,3	26,3
Média	380,3	622,1	22,03

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço DP780. Adaptado de [13], [14] e [15].

Aço DP780			
Autores	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento Máximo (%)
Caetano (2015)	464	791	13,4
Pereira, Bustamante e Ferreira (2015)	437	841	17,6
Faria Neto (2015)	604,9	864,43	23,73
Média	502	832,1	18,24

Ademais, é notório que a determinação das propriedades mecânicas desses aços bifásicos, por intermédio da revisão de três autores constantes da literatura, pode culminar em imprecisão quando da realização dos cálculos da força e do raio mínimo de dobra. Justifica-se tal assertiva com base na prerrogativa de que, para cada lote de material, há oscilações das propriedades mecânicas, evidenciando, assim, a necessidade de realização dos ensaios de tração, o que não fora executado em função da quantidade de amostras limitada desses aços.

No tocante ao Módulo de Young, ou Módulo de Elasticidade (E), mais especificamente, para os aços DP's adotados, é estimado em 200 GPa [9].

2.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO EM V

Desse modo, esses aços Dual Phase foram submetidos ao processo de dobramento em matriz "V", processo esse que fora conduzido na máquina universal de ensaios, a EMIC DL 10000, com capacidade de carga de, no máximo, 100 kN. Os dados coletados

de deslocamento e de força aplicada pelo punção são coletados pelo software da máquina, o Tesc 3.04. Por sua vez, o ferramental adotado fora um punção metálico (figura 4) e uma matriz de madeira (figura 5), para fins de execução dos processos de dobra.

Figura 4: Representação do punção metálico. Vista frontal (a) e Lateral Esquerda (b).

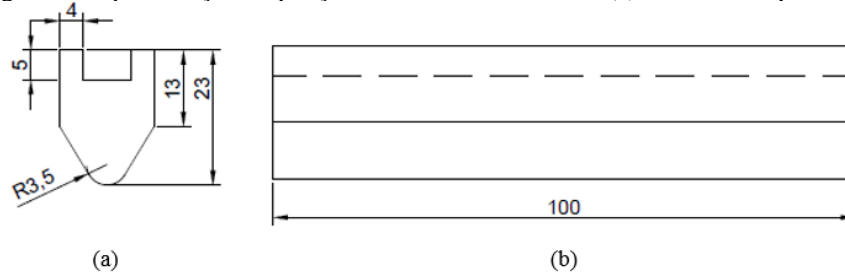
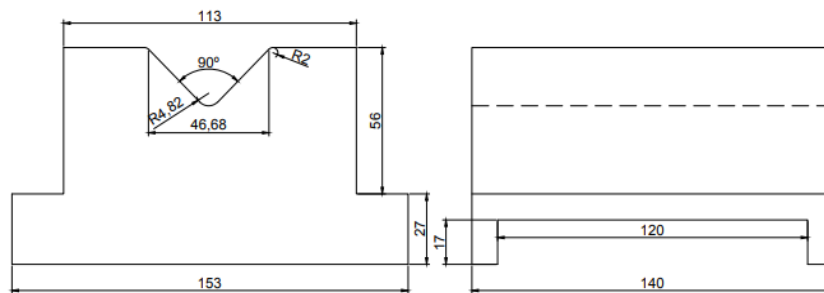
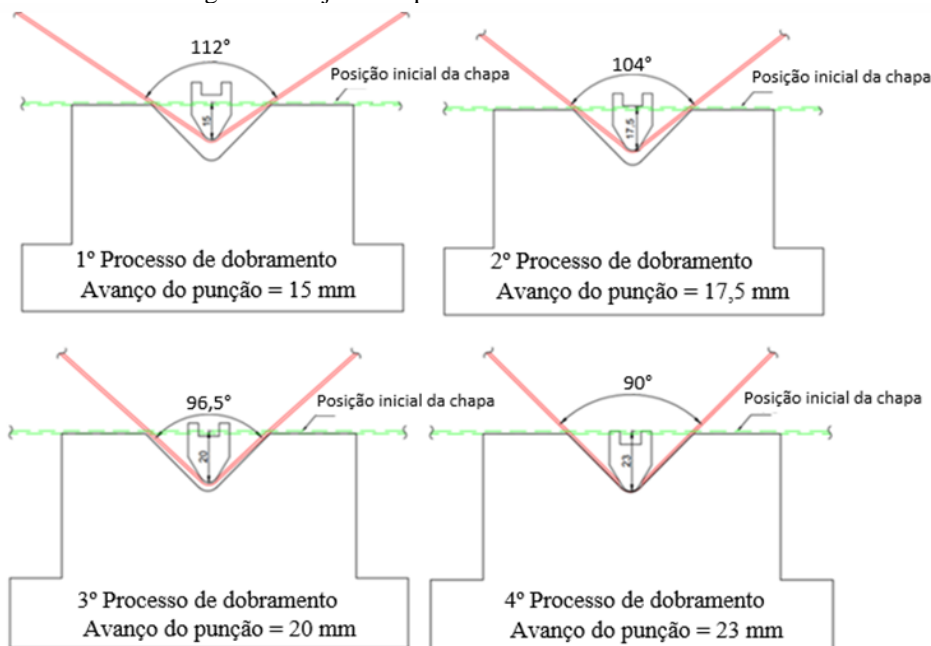


Figura 5: Representação da matriz de madeira. Vista frontal (a) e Lateral Esquerda (b).



Sendo assim, o desenvolvimento dos processos de dobramento em “V” foram em divididos em quatro etapas distintas, diferenciadas entre si através dos quatro deslocamentos verticais assumidos pelo punção (15 mm, 17,5 mm, 20 mm e 23 mm), de forma que, para cada valor de deslocamento, eram realizados três ensaios de dobramento para cada aço Dual Phase. Nesse aspecto, procedeu-se os processos de dobra, primeiramente, às amostras de aço DP600, ao passo que, quando concluídas as quatro etapas de dobra, iniciou-se o processo de dobramento para o aço DP780, processos que respeitaram à ordem crescente dos avanços do punção, cuja representação do projeto dos dobramentos a serem realizados e de seus respectivos ângulos de abertura podem ser vistos através da figura 6.

Figura 6: Projeto dos processos de dobramento em V.



Todavia, é de suma importância destacar que, nos processos de dobramento em “V” executados, a limitação do deslocamento vertical do punção foi determinada e programada por intermédio do software da EMIC, o Tesc 3.04, de forma que, quando atingido o valor programado, a máquina cessava o deslocamento. Destaca-se que os dobramentos foram realizados com uma velocidade do punção de 20 mm/min, a fim de que não sejam promovidos quaisquer empelinhos à deformação plástica do material.

2.3 METODOLOGIA DE CÁLCULO APLICADA

Com a finalidade de prever o comportamento dos aços bifásicos quando submetidos ao processo de dobramento, através de formulações constantes da literatura, foram determinadas as variáveis indispensáveis à realização dos cálculos, de acordo com as tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Variáveis das tiras de aço DP600.

Processo	Deslocamento do Punção (h)	Ângulo interno de dobra (α)	Ângulo externo de dobra ($\beta/2$)	Largura da chapa (b)	Espessura da chapa (S0)	Distância entre apoios (W)	Raio do punção (rp)	Coefficiente de atrito (μ)	Tensão de Escoamento (σ_e)	Módulo de Elasticidade (E)
1º Processo de dobra	15 mm	112°	34°	20 mm	1,5 mm	46,68 mm	3,5 mm	0,1	380,3 MPa	210 GPa
2º Processo de dobra	17,5 mm	104°	38°	20 mm	1,5 mm	46,68 mm	3,5 mm	0,1	380,3 MPa	210 GPa
3º Processo de dobra	20 mm	96,5°	41,75°	20 mm	1,5 mm	46,68 mm	3,5 mm	0,1	380,3 MPa	210 GPa
4º Processo de dobra	23 mm	90°	45°	20 mm	1,5 mm	46,68 mm	3,5 mm	0,1	380,3 MPa	210 GPa

Tabela 4 – Variáveis das tiras de aço DP780.

Processo	Deslocamento do Punção (h)	Ângulo interno de dobra (α)	Ângulo externo de dobra ($\beta/2$)	Largura da chapa (b)	Espessura da chapa (s0)	Distância entre apoios (W)	Raio do punção (rp)	Coefficiente de atrito (μ)	Tensão de Escoamento (σ_e)	Módulo de Elasticidade (E)
1º Processo de dobra	15 mm	112°	34°	20 mm	1 mm	46,68 mm	3,5 mm	0,1	502 MPa	210 GPa
2º Processo de dobra	17,5 mm	104°	38°	20 mm	1 mm	46,68 mm	3,5 mm	0,1	502 MPa	210 GPa
3º Processo de dobra	20 mm	96,5°	41,75°	20 mm	1 mm	46,68 mm	3,5 mm	0,1	502 MPa	210 GPa
4º Processo de dobra	23 mm	90°	45°	20 mm	1 mm	46,68 mm	3,5 mm	0,1	502 MPa	210 GPa

Com a finalidade de estimar a força de dobra (F_d) necessária para o processo, prevê-se a necessidade de associar as variáveis do processo de dobra, a exemplo do raio do punção (r_p) e o ângulo externo no dobramento (β), concomitantemente aos parâmetros fixos, a saber: espessura (s_0) e largura (b) da chapa, bem como a distância entre os apoios (W), a tensão de escoamento do material (σ_e) e o coeficiente de atrito ($\mu=0,1$) [6], parâmetros esses correlacionados na equação 1.

$$F_d = \frac{\sigma_e \cdot b \cdot s_0^2 \cdot \cos \frac{\beta_1}{2} \left(\cos \frac{\beta_1}{2} + \mu \cdot \text{sen} \frac{\beta_1}{2} \right)}{W - 2 \cdot (r_p + s_0) \cdot \text{sen} \frac{\beta_1}{2} + \mu \cdot s_0 \cdot \cos \frac{\beta_1}{2}} \quad (1)$$

Por sua vez, para determinação do raio mínimo de dobra (r_{min}), é necessário considerar a espessura da chapa (s_0), bem como o percentual de alongamento máximo da chapa quando submetida a ensaios de tração ($Al\%$) [5], conforme descreve a equação 2.

$$r_{min} = \frac{50 \cdot s_0}{Al\%} - \frac{s_0}{2} \quad (2)$$

Quantifica-se a recuperação elástica com base num fator de retorno elástico (K), o qual, inclusive, está atrelado ao módulo de elasticidade do material (E), à largura (b) e à espessura da tira (s_0), bem como ao momento de dobramento (M_z) e ao raio de dobramento (r) [10], conforme demonstrado pelas formulações 3, 4 e 5.

$$K = \frac{\alpha_0}{\alpha_f} \quad (3)$$

$$K = 1 - \frac{12 \cdot M_z \cdot (r - 0,5 \cdot s_0)}{E \cdot b \cdot s_0^3} \quad (4)$$

$$M_z = \frac{F_d \cdot W}{4} \quad (5)$$

3 RESULTADOS

3.1 FORÇA DE DOBRA

Conforme pode ser averiguado pelas figuras 7 e 8, são representadas as forças de dobra para cada processo executado, em função do deslocamento do punção. Destaca-se que esses dados foram coletados pelo software da Emic (Tesc 3.04) e, posteriormente, inseridos no MS Excel para representação gráfica.

Figura 7: Força de dobra efetiva para cada processo de dobramento empregado para DP600.

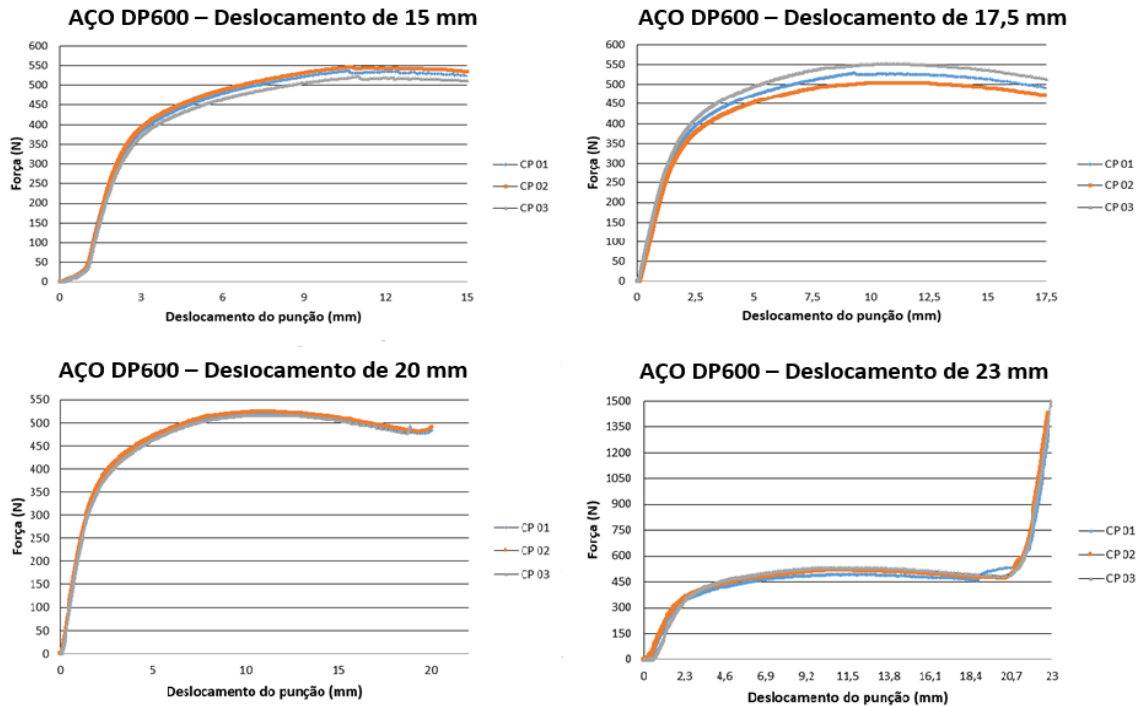
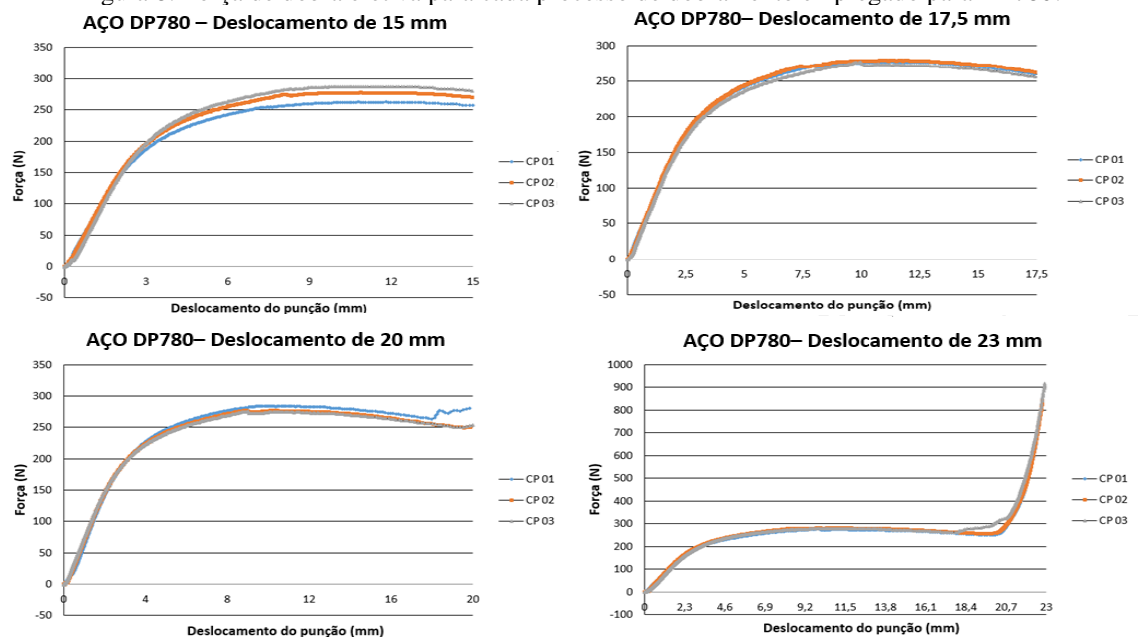


Figura 8: Força de dobra efetiva para cada processo de dobramento empregado para DP780.



Nesse aspecto, percebeu-se que a equação 1, destinada a previsão da força de dobra para os processos de dobramento executados, não é apropriada aos processos de dobramento em V, sobretudo quando voltada aos aços bifásicos, conforme o percentual de erro demonstrado nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Percentual de erro entre as forças medidas e calculadas para o Aço DP600.

Processo	Deslocamento do Punção (mm)	Força - Lange (1990, apud FREES,2017) (N)	Força média aferida pela máquina (N)	Erro (%)
1º Processo de dobra	15	304,7	520	41,40
2º Processo de dobra	17,5	281,9	500	43,62
3º Processo de dobra	20	258,3	490	47,29
4º Processo de dobra	23	237	1480	83,99

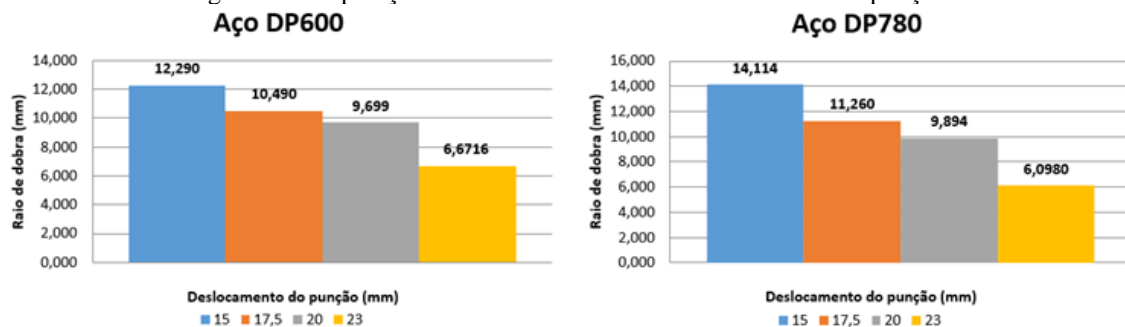
Tabela 6 – Percentual de erro entre as forças medidas e calculadas para o Aço DP780.

Processo	Deslocamento do Punção (mm)	Força - Lange (1990, apud FREES,2017) (N)	Força média aferida pela máquina (N)	Erro (%)
1º Processo de dobra	15	176,5	270	34,63
2º Processo de dobra	17,5	163	258	36,82
3º Processo de dobra	20	149,3	265	43,66
4º Processo de dobra	23	136,7	890	84,64

3.2 RAIOS DE DOBRA E ÂNGULO DE ABERTURA

No tocante ao raio de dobra, verificou-se que esse está, de forma geral, interligado ao deslocamento do punção, uma vez que, à medida em que o deslocamento do punção aumenta, reduz-se a intensidade do raio de dobra, conforme figura 9.

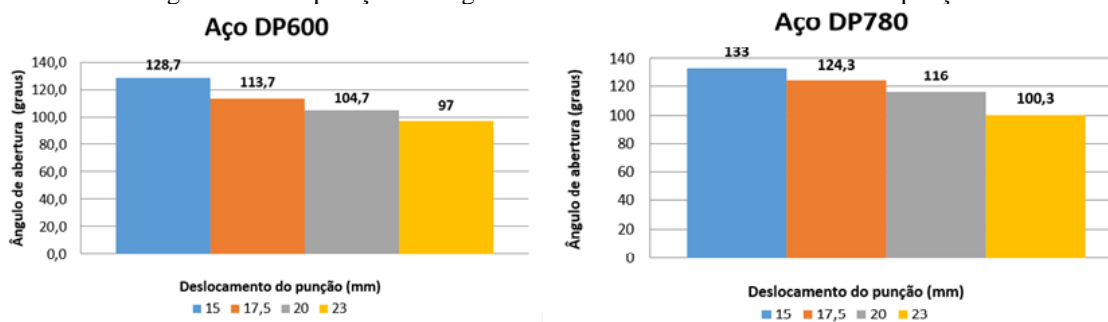
Figura 9: Comparação do raio de dobra com o deslocamento da punção.



Por intermédio da equação 2, foram mensurados os raios mínimo de dobra para os aços DP600 e DP780, sendo esses 2,65 mm e 2,24 mm, respectivamente. Conforme sintetizado na figura 9, averigua-se que a faixa de raio de dobra obtida varia de 6 a 14 mm e que, portanto, não se encontra aquém aos valores do raio mínimo de dobra, fazendo com que a hipótese de propagação de trinca e/ou fratura seja descartada. Tal assertiva é, ainda, validada pelos resultados experimentais, de tal modo que não foram constadas trincas na região do raio de dobra das amostras.

Por sua vez, o comportamento do ângulo de abertura em função do deslocamento do punção pode ser observado pela figura 10. Dessa forma, notou-se que, à medida que o deslocamento do punção aumenta, reduz-se o ângulo de abertura.

Figura 10: Comparação do ângulo de abertura com o deslocamento do punção.



3.3 RETORNO ELÁSTICO

A determinação do fator do retorno elástico efetivo deu-se pelo quociente entre o ângulo de projeto, ou o ângulo de abertura, e o ângulo em que a peça permanece efetivamente quando findado o processo de dobra (equação 3). Em contrapartida, o fator de retorno elástico teórico deu-se pela equação 4, cuja comparação entre o teórico e o efetivo pode ser contemplada pelas tabelas 7 e 8, constando-se, assim, que a equação 4 é apropriada para previsão do fator de retorno elástico, dado que o percentual de erro entre esses é inferior a 10%.

Tabela 7 – Comparação do fator de retorno elástico efetivo com o teórico para os aços DP600.

Amostra	Deslocamento do Punção (mm)	Fator de Retorno Elástico Efetivo	Fator de Retorno Elástico - Schaeffer (2016)	Erro (%)
CP01	15	0,868	0,941	7,7
CP02	15	0,868	0,941	7,7
CP03	15	0,875	0,941	7,0
Média Geral		0,870	0,941	7,5
CP01	17,5	0,912	0,952	4,2
CP02	17,5	0,912	0,952	4,2
CP03	17,5	0,920	0,952	3,3
Média Geral		0,915	0,952	3,9
CP01	20	0,928	0,957	3,0
CP02	20	0,919	0,957	4,0
CP03	20	0,919	0,957	4,0
Média Geral		0,922	0,957	3,7
CP01	23	0,918	0,913	0,6
CP02	23	0,918	0,913	0,6
CP03	23	0,947	0,913	3,6
Média Geral		0,928	0,913	1,6

Tabela 8 – Comparação do fator de retorno elástico efetivo com o teórico para os aços DP780.

Amostra	Deslocamento do Punção (mm)	Fator de Retorno Elástico Efetivo	Fator de Retorno Elástico - Schaeffer (2016)	Erro (%)
CP01	15	0,842	0,877	3,98
CP02	15	0,842	0,877	3,98
CP03	15	0,842	0,877	3,98
Média Geral		0,842	0,877	3,98
CP01	17,5	0,832	0,907	8,27
CP02	17,5	0,839	0,907	7,53
CP03	17,5	0,839	0,907	7,53
Média Geral		0,836	0,907	7,78
CP01	20	0,839	0,917	8,49
CP02	20	0,825	0,917	10,06
CP03	20	0,832	0,917	9,28
Média Geral		0,832	0,917	9,28
CP01	23	0,900	0,834	7,33
CP02	23	0,891	0,834	6,41
CP03	23	0,900	0,834	7,33
Média Geral		0,897	0,834	7,02

4 CONCLUSÃO

No tocante à previsão da força de dobra através da equação, constatou-se que essa é inaplicável aos processos de dobra com aços bifásicos, dado que os resultados dessa se encontram defasados a, no mínimo, 30% para os aços DP600 e DP780. Além disso, quanto à força de dobra promovida durante os ensaios, percebe-se que, durante os deslocamentos do punção de 15, 17,5 e 20 mm, para os aços DP600 e DP780, a força de dobra manteve-se, consideravelmente, constante, ao passo que, quando se direcionando à posição de 23 mm, a força cresceu-se demasiadamente.

Averiguou-se que os raios de dobra para as tiras de aço DP600 e DP780 reduziram-se com o aumento do deslocamento do punção, redução essa que, de certa

forma, foi equivalente a esses dois aços bifásicos. Se considerados os raios mínimo de dobra, constata-se que o material não tem possibilidade de fraturar e/ou trincar, dado que os raios aferidos encontram-se em maior módulo.

O ângulo de abertura, por sua vez, reduziu-se à medida em que aumentava o deslocamento do punção. No tocante ao retorno elástico, notou-se que esse é, significativamente, sensível à força aplicada pelo punção. Dessa forma, para os processos de dobra em que foram empregadas forças maiores, mais especificamente, no quarto processo de dobra, o retorno elástico apresentava uma tendência de atenuar-se para os aços DP600 e DP780.

REFERÊNCIAS

MARTINS, S. C. S.. Análise da microestrutura e do comportamento mecânico de aços bifásicos das classes de resistência de 600 MPa e de 1000 MPa revenidos e deformados plasticamente. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

LAJARIN, S. F.; MARCONDES, P. V. P.. Influência dos parâmetros de processo e de ferramenta na ocorrência do retorno elástico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Curitiba. Anais eletrônicos. Itaitiaia: Abcm, 2013.

FERREIRA, R. A. S.. Conformação plástica: fundamentos metalúrgicos e mecânicos I / prefácio de Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira. - 2. ed. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2010.

SANTOS, R. A. dos. Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processos de dobramento de aços de alta resistência. 2013. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MORO, N. ; AURAS, A. P.. Processos de Fabricação: Conformação mecânica II – Extrusão, Trefilação e Conformação de Chapas. Apostila Curso Técnico de Mecânica Industrial. 2006. Centro Federal de educação.

FREES, M. V. da S.. Avaliações sobre o processo de dobramento de aço NBR 6656 LNE 380. 2017. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ARAÚJO, D. D.. Estudo do Springback na conformação mecânica de segmentos toroidais em chapas grossas. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2007.

DIETER, G. E.. Metalurgia Mecânica. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. Traduzido por Antonio Sergio de Sousa e Silva, Luiz Henrique de Almeida, Paulo Emilio Valadao de Miranda.

MARTINS, M. S.; SCHAEFFER, L.. Avaliação do Retorno Elástico em Chapas de Aço Bifásicos através do Processo de Dobramento. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 5., 2015, Porto Alegre. Poster contributions. RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p. 1 - 9.

SCHAEFFER, L. Manufatura por conformação mecânica. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016.

TIGRINHO, L. M. V.. Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões. 2011. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

TEPEDINO, J. O. A.. Aplicação de Curvas Limite de Conformação na previsão de rupturas em bordas de peças estampadas. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CAETANO, R. A.. Avaliação da Conformabilidade do Aço Transformation Induced Plasticity (TRIP780) Eletro galvanizado e Dual Phase (DP780) Galvanizado Por Imersão a Quente. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

PEREIRA, J. F. B.; BUSTAMANTE, G. O.; FERREIRA, R. F.. Aços TRIP– Características e Aplicação. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM - INTERNACIONAL, 70., 2015, Rio de Janeiro. Proceedings... . [S.I.]: ABM Week, 2015. p. 1095 – 1104.

FARIA NETO, A. dos R. de. Aços avançados de alta resistência: avaliação da microestrutura e propriedades dos aços DP 600 e DP 780. 2015. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2015.