

Análise do retorno elástico do aço ASTM A36 em processos de dobra em V em diferentes velocidades e raios de ferramental

Rafael Menezes Nunes ^{1*} 
Henrique André Heine¹

Resumo

O processo de conformação de chapas metálicas, o qual envolve a deformação plástica dos aços, é amplamente empregado na fabricação de uma variedade de peças na construção metal mecânica. Nesse processo, existem alguns fatores que devem ser considerados e analisados, podendo citar como exemplo o retorno elástico do aço. A ocorrência desse fator específico, pode ocasionar divergências dimensionais, impossibilitando o processo seguinte e, conseqüentemente, a perda ou retrabalho do material, acarretando aumento de custos. Ao longo dos anos, a indústria metal mecânica tem se motivado a buscar novos estudos nessa área, a fim de aprimorar os processos de conformabilidade de dobramento das peças na tentativa de prever o retorno elástico causado no processo. O objetivo do estudo é investigar a ocorrência do retorno elástico no aço ASTM A36 durante o processo de conformabilidade de chapas. Os aços utilizados neste estudo possuem uma espessura de 4,75 mm e 6,35 mm, e foram deformados no processo de dobramento no formato em V realizado em diferentes matrizes e velocidades de dobramento. Com os resultados obtidos nesse estudo, foi possível mostrar: quanto maior a velocidade do processo de dobramento, maior é a variação do retorno elástico.

Palavras-chave: Retorno elástico, ensaio de dobramento, aço ASTM A36.

Analysys of ASTM A36 steel spring back in V-bending processes at different speeds

Abstract

The sheet metal forming process, which involves the sheet metal bending process, is widely used in the manufacture of a variety of parts in the metal-mechanical industry. In this process, there are some factors that must be considered and analyzed, such as the spring back of steel. The occurrence of this specific factor, can cause dimensional divergences, making the next process impossible and, consequently the loss of material or reworking. Over the years, the metal-mechanical industry has been motivated to seek new studies, to improve the bending process to control the spring back. The aim of the study is to investigate the occurrence of spring back of ASTM A36 steel during the sheet forming process. The steels have a thickness of 4.75 mm and 6.35 mm and were deformed in the V-shaped bending process. The bending process carried out in different tools and strain rates. With the obtained results in this investigation, it was possible to show with the greater strain rates of the bending process the greater variation of the elastic return has been raise.

Keywords: Spring back, bending test, Steel ASTM A36.

1 Introdução

O processo de dobramento de chapas tem um papel essencial na indústria metal mecânica, e as peças dobradas que apresentam retorno elástico dentro do processo geram um retrabalho no ciclo de produção. A conformação de chapas

metálicas envolve uma série de exigências que a indústria metal mecânica tenta otimizar para reduzir custos de produção e tempo, e, conseqüentemente, aumentar a qualidade do produto [1,2]. Nesse processo, as características dos materiais

¹Laboratório de Transformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

*Autor correspondente: rafael.nunes@ufrgs.br



são importantes para evitar falhas como o retorno elástico fora das especificações, e essas escolhas dependerão de um amplo conhecimento nas variáveis que interferem o comportamento do material frente ao dobramento [3].

Em virtude disso, ao longo dos anos, os pesquisadores têm investigado a ocorrência de falhas no processo de conformação de chapas metálicas. Dentre estas falhas, é verificado o comportamento do retorno elástico, e pode-se perceber que esse processo é influenciado por diferentes parâmetros que ocorrem durante o processo, como por exemplo: forma e dimensão da ferramenta, propriedades dos materiais e espessura da chapa, e pode afetar a qualidade do produto e tornar mais difícil a obtenção da geometria desejada [1-4]. Além disso, a magnitude do retorno elástico e da dobra geralmente não são constantes e podem variar dependendo das condições do dobramento e da distribuição de tensões no material deformado [5,6]. Em razão da ocorrência dessas características Hu et al. mencionaram que os critérios mais importantes na seleção de um material estão relacionados às características da peça como: composição e rigidez.

Como mostrado por Tekaslan et al. [7] e Fonseca e Reguly [8] é necessário padronizar os processos para obter produtos de qualidade. O efeito da espessura da chapa de aço, dos parâmetros de velocidade e o ângulo de matriz de dobra, serão discutidos nesta seção.

Portanto, é importante compreender o comportamento do retorno elástico da matéria prima, no processo de dobramento em formato “V”, com o intuito de diminuir o retrabalho no processo de dobramento. Este entendimento pode garantir os ângulos adequados para se atingir as dimensões desejadas, bem como diminuir o tempo e o custo da mão de obra para realizar o processo.

O estudo proposto refere-se a uma investigação experimental do comportamento do retorno elástico em função de parâmetros significativos que inclui: espessura da chapa, raio de punção e velocidade nos processos de dobra utilizando uma matriz de geometria em V. O Material utilizado nesta investigação são chapas de aço HLSA grau ASTM A36.

Foi encontrada uma pequena variação do retorno elástico com velocidade aumentada a partir de uma matriz de ângulo maior. Isto representa uma melhora nos processos subsequentes de montagem e na qualidade do acabamento destas estruturas.

2 Materiais e métodos

Nesse trabalho foram utilizadas chapas de aço ASTM A36 com espessura de 4,75 mm e 6,35 mm para todos os ensaios realizados: ensaio de tração, dobramento e retorno elástico. A Tabela 1, mostra as propriedades mecânicas do material, de acordo com as informações do fabricante.

2.1 Ensaio de tração

Foram utilizadas amostras de aço ASTM A36 para a realização do ensaio de tração (comprimento de 200 mm x 22 mm largura, conforme mostra a Figura 1) com o objetivo de determinar as curvas de tensão x deformação.

A máquina universal de testes EMIC DL com capacidade de 6000 KN foi utilizada para os experimentos a fim de obter os valores de carga X deslocamento que posteriormente foram transformados em tensão X deformação. Foram utilizadas seis amostras com espessura de 4,75 mm e, da mesma forma, nos aços de 6,35 mm. As chapas de aço foram fixadas no suporte do equipamento e, em seguida, iniciou-se o processo de alongamento. Para realizar o gráfico de tensão x deformação foi utilizada a Equação 1, e a tensão de escoamento foi calculada a partir da Equação 2. A medição dos parâmetros foi realizada a partir do software do equipamento.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \left[N / mm^2 \right] \quad (1)$$

Equação matemática para calcular a tensão em N/mm².

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} (100\%) \quad (2)$$

Equação matemática para realizar o cálculo da deformação relativa.

2.2 Ensaio do processo de dobramento

Para o ensaio de dobramento, foram utilizados corpos de prova de 250mm de comprimento e 40mm de largura e duas diferentes espessuras conforme Tabela 1 e Tabela 2. Para os corpos de prova de 4,75 mm e 6,35 mm foram utilizados três modelos de matrizes: V30, V40 e V50. As matrizes possuem abertura de W = 30 mm; 40 mm e 50 mm, respectivamente conforme mostrado na Figura 2. Para a espessura de 4,75 mm, foi utilizado os modelos de matrizes V30 e V40 e duas velocidades.

Tabela 1. Descrição do material. MPa: Mega Pascal; mm: milímetros

Aço	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (% mm)
ASTM A36	250	400 - 550	18 - 20

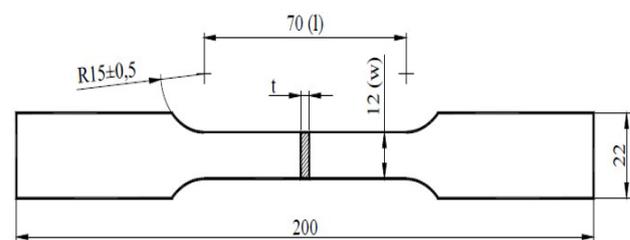
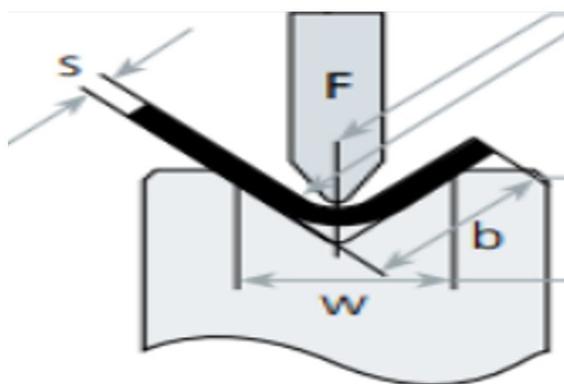
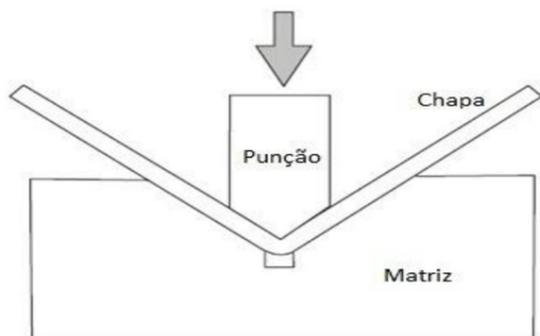


Figura 1. Desenho dos corpos de prova para o ensaio de tração.

Tabela 2. Descrição e parâmetros do ensaio experimental da chapa 4,75mm. mm: milímetros; mm/s: milímetros por segundo

Ensaio 1			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + Matriz	Velocidade
1	4,75 mm	R4 e V30	10 mm/s
2	4,75 mm	R4 e V30	10 mm/s
3	4,75 mm	R4 e V30	10 mm/s
Ensaio 2			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
4	4,75 mm	R4 e V30	15 mm/s
5	4,75 mm	R4 e V30	15 mm/s
6	4,75 mm </td <td>R4 e V30</td> <td>15 mm/s</td>	R4 e V30	15 mm/s
Ensaio 3			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
7	4,75 mm	R4 e V40	10 mm/s
8	4,75 mm	R4 e V40	10 mm/s
9	4,75 mm	R4 e V40	10 mm/s
Ensaio 4			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
10	4,75 mm	R4 e V40	15 mm/s
11	4,75 mm	R4 e V40	15 mm/s
12	4,75 mm	R4 e V40	15 mm/s

**Figura 2.** Distância W das matrizes.**Figura 3.** Figura esquemática do processo de dobramento.

Na espessura de 6,35 mm as matrizes utilizadas foram a V40 e V50 e com duas velocidades, conforme indicado na Tabela 3. Na Figura 3 é mostrado a esquemática do processo de dobramento em V que foi realizado.

Para a realização dos ensaios descritos acima, foi utilizado uma máquina de dobramento marca LVD®, com capacidade de 170 toneladas. O processo de dobra foi dividido em duas etapas; i) primeiramente, o punção se moveu para baixo até atingir a conformação completa do aço, em seguida, a medição inicial do ângulo foi realizada; ii) no segundo estágio, o punção retornou e a medição do ângulo final foi realizada. Os experimentos foram repetidos 3 vezes seguindo o padrão em cada ensaio. Para calcular o valor do fator K após o processo de dobramento, foi utilizado a Equação 3.

$$K = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (3)$$

Fórmula matemática para calcular o fator K da chapa de aço.

3 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios realizados.

3.1 Curva de deformação de tensão

O ensaio de tração foi realizado para obter a curva tensão x deformação e demais propriedades mecânicas. Foi possível verificar que a tensão da chapa de aço (Figura 4) está em conformidade técnica com as normas da ASTM e com os dados fornecidos pelo fabricante. O ponto máximo da região plástica do aço é atingido em uma tensão de 254 MPa na chapa 4,75 mm, e 246 MPa na chapa 6,35mm. Na sequência, inicia-se o processo de deformação elástica até o ponto de fratura, de 529 MPa para 4,75mm e 466 MPa para o aço de espessura 6,35 mm.

Outro valor encontrado no ensaio, foi o alongamento relativo de 26,9% para 4,75 mm e 24,2% para 6,35 mm. A partir da curva tensão-deformação foi possível medir a tensão de

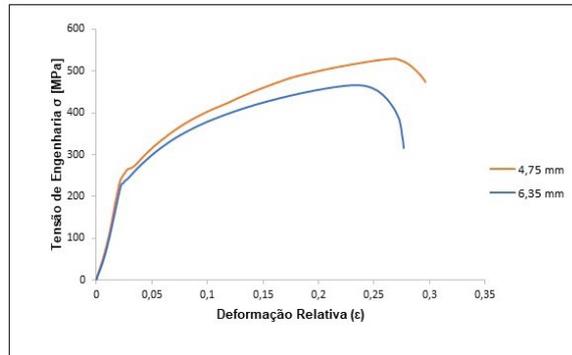


Figura 4. Comparação da curva tensão-deformação em chapas de aço de 4,75 mm e 6,35 mm. Curva laranja refere-se a espessura de 4,75 mm e a curva azul refere-se a espessura de 6,35 mm.

escoamento para a espessura de 4,75 mm e 6,35 mm o qual gerou uma tensão de 265 MPa 245 MPa respectivamente, conforme mostrado na Tabela 4. A variação média encontrada foi de 0,05% para a chapa de aço de 4,75 mm e de 0,02% para chapa de aço de 6,35 mm.

3.2 Retorno elástico dos processos de dobra

A Tabela 5 mostra o retorno elástico experimental do aço 4,75 mm e 6,35 mm de espessura, em diferentes matrizes “V”, utilizando duas velocidades (10 mm/s - 15 mm/s) para um punção padrão de raio de 4mm na ponta. Na Figura 5 foi possível verificar que quanto maior o ângulo da matriz, e aumentando a velocidade no processo, maior será o retorno elástico. Na Figura 6, é possível verificar que quanto maior o ângulo de abertura da matriz, maior será o retorno elástico (fator K). Nos processos de dobramento de chapas metálicas, quanto menor for o retorno elástico, mais assertivo será o processo.

Tabela 3. Descrição e parâmetros do ensaio experimental da chapa 6,35 mm. mm: milímetros; mm/s: milímetros por segundo

Ensaio 5			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + Matriz	Velocidade
13	6,35 mm	R4 e V40	10 mm/s
14	6,35 mm	R4 e V40	10 mm/s
15	6,35 mm	R4 e V40	10 mm/s
Ensaio 6			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
16	6,35 mm	R4 e V40	15 mm/s
17	6,35 mm	R4 e V40	15 mm/s
18	6,35 mm	R4 e V40	15 mm/s
Ensaio 7			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
19	6,35 mm	R4 e V50	10 mm/s
20	6,35 mm	R4 e V50	10 mm/s
21	6,35 mm	R4 e V50	10 mm/s
Ensaio 8			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
22	6,35 mm	R4 e V50	15 mm/s
23	6,35 mm	R4 e V50	15 mm/s

Tabela 4. Variações durante o ensaio de tração

Material (mm)	Tensão de escoamento σ_{esc} (MPa)	Tensão máxima $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Alongamento δ (%)
4,75	265	475	26,9%
6,35	245	470	24,2%

Tabela 5. Valores obtidos após o processo de dobra

Análise	Espessura (mm)	Punção e Matriz	Velocidade (mm/s)	Valor Teórico	Valor Experimental	Erro Relativo
1	4,75	R4 e V30	10	0,9999	0,9931	0,68%
	4,75	R4 e V30	15	0,9999	0,9927	0,72%
2	4,75	R4 e V40	10	0,9999	0,9813	1,86%
	4,75	R4 e V40	15	0,9999	0,9796	2,03%
3	6,35	R4 e V40	10	0,9999	0,9790	2,09%
	6,35	R4 e V40	15	0,9999	0,9844	1,55%
4	6,35	R4 e V50	10	0,9999	0,9750	2,49%
	6,35	R4 e V50	15	0,9999	0,9716	2,83%

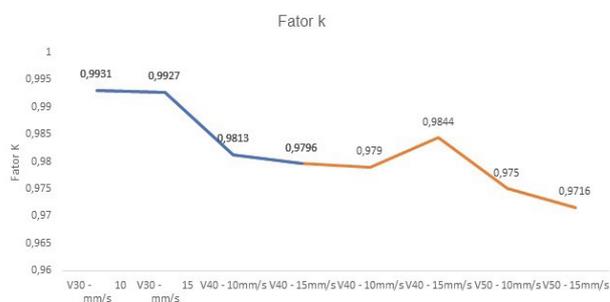


Figura 5. Variação do retorno elástico (fator K) em decorrência do ângulo de abertura da matriz e velocidade.

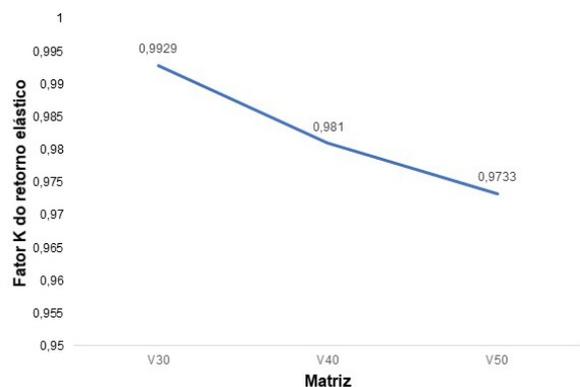


Figura 6. Variação do retorno elástico (fator K) em decorrência do ângulo de abertura da matriz.

5 Discussão

As chapas utilizadas nos processos de conformação são caracterizadas pela ductibilidade e conformação, e, geralmente, não apresentam elevados valores para as propriedades mecânicas. Isso se deve pelo fato de que a carga exigida desse material ser muito baixa, geralmente o próprio peso [9]. Segundo Bruschi et al. [10], o material a ser utilizado neste processo deve seguir alguns requisitos mínimos que incluem uma maior facilidade de conformação, boa soldabilidade; superfície sem defeitos. É esperado que os valores dos materiais empregados neste processo, bem como os métodos dos testes empregados para determinar o comportamento do material, estejam de acordo com padrões previstos em normas técnicas.

Para fins estruturais, previamente, os ensaios de tração do aço ASTM A36 apresentam propriedade mecânica com limites de escoamento (fase elástica), limite de resistência (fase plástica) e alongamento percentual [11]. A partir das medidas da curva tensão-deformação encontradas no ensaio de tração, foi possível observar que o valor entre as amostras acordou com os valores de referência, conforme previstos, do material ASTMA36, o que caracteriza um material de boa reprodutibilidade. Nos valores encontrados durante o ensaio de tração, a tensão de escoamento obteve valores com uma baixa diferença entre as amostras testadas, ficando a tensão de escoamento mínima em 250 MPa e a tensão máxima em

280 MPa nos ensaios de espessura de 4,75mm. O alongamento médio ficou em 26,9%, que, de acordo com a literatura, é esperado, uma vez que quanto maior o alongamento maior a facilidade de deformar o material [12].

Para a espessura de 6,35 mm a tensão mínima de escoamento encontrado foi de 245 MPa e um alongamento médio de 24,2%. A tensão máxima ficou em 475 MPa e 470 MPa para os corpos de prova de 4,75 mm e 6,35 mm respectivamente, sendo valores próximos dos padrões pré-estabelecidos pela norma ABNT [13-20]. Importante mencionar que o corpo de prova apresente um limite de resistência maior que o mínimo especificado para o metal de base, que é de 400 MPa [14].

O retorno elástico do aço apresentou valores significativos durante o ensaio de dobramento, com uma variação maior do fator K, quando utilizado uma matriz de ferramenta de ângulo de abertura maior. Com as diferentes velocidades utilizadas no processo, foi encontrado uma leve variação, resultando um valor de retorno elástico (fator K) superior, quando utilizado uma velocidade de punção maior. Para Lal et al. [15] sabe-se que o retorno do aço afeta a dimensão e as formas do material, ocasionado pela remoção da carga da ferramenta punção, gerando então à recuperação elástica do material. Este fenômeno é, geralmente, determinado pelo ângulo de dobra da chapa de aço. Quanto maior o ângulo de dobra maior o retorno elástico [16].

Segundo Hu et al. [17] o maior retorno elástico do aço foi evidenciado na medida que o ângulo das matrizes era maior. Para Bresciani et al. [18] os fatores determinantes para o aumento do retorno elástico são, curvatura de dobramento, aumento da espessura da chapa e do ângulo de dobramento favorecem maiores níveis de deformação plástica. De forma similar, conforme esperado, o resultado obtido a partir do ensaio de dobramento evidenciou que quanto maior a abertura de matriz utilizada, maior era o retorno elástico.

Wang et al. [16] determinaram que 75% dos testes são capazes de produzir um ângulo final de dobra próximo ao ângulo de dobra inicial, quando comparado com uma velocidade mais baixa, à medida que a velocidade do punção foi aumentada, os ângulos de dobra foram aumentados, portanto a velocidade do punção foi determinante no retorno elástico. A partir deste pressuposto, o teste de dobramento confirmou que quanto maior a velocidade punção (10 e 15 mm/s) maior foi o ângulo de dobra, resultado este esperado conforme [16].

Segundo Silva et al. [19], o alto efeito do retorno elástico está relacionado com o elevado índice de resistência a tração, sendo necessário uma alta tensão para ocasionar a deformação plástica, e, conseqüentemente, uma maior tensão residual elástica, gerando um efeito maior de retorno elástico. Isto é esperado encontrar a partir de valores nos ensaios de tração e deformação.

O fator K medido neste estudo foi obtido com uma retenção de 10 segundos no ângulo 1, e, em seguida, o ângulo 2 foi medido após a chapa estar dobrada. Este resultado corrobora com relatos da literatura, no qual espera-se que a força após os processos de dobra resulte

na diminuição no ângulo de curva de dobramento [15]. Como consequência, a deformação plástica ocorre em uma região de dobra devido à pressão do punção, e aumenta à medida que a espessura da chapa aumenta. Este resultado encontrado foi semelhante ao de [20,21]. Ainda, segundo Aydin et al. [21] é esperado um aumento tanto do ângulo de dobra quanto da quantidade de tensão na aplicados na região de dobra. O ensaio de dobramento realizado neste estudo comprovou que o comportamento da área de deformação implica diretamente no seu processo, bem como no ângulo final, o que pode ser comparado com os estudos realizados por [22]. Logo, o valor do ângulo é um fator determinante para adquirir uma forma desejada em uma chapa de aço que está em processo de dobramento [13-23].

6 Conclusão

A partir dos resultados obtidos é possível concluir:

- O retorno elástico é dependente de fatores, incluindo espessura do material, velocidade de dobramento e ângulo de abertura da matriz, que implicam diretamente no bom desempenho do produto;
- Parâmetros que envolvem, tanto espessura do material quanto velocidade de conformação no processo e ferramentas utilizadas, são algumas características indicadas pela literatura como essenciais dentro deste processo;

- Conforme aumentam as alterações das variáveis (velocidade, espessura e ângulo), o fator K do retorno elástico também aumenta;
- A combinação desses fatores interfere diretamente no desempenho do fator K;
- O teste de tração permitiu a medição dos valores de tensão de escoamento, limite de resistência e alongamento, apresentando resultados de acordo com os valores pré-determinados pelas características do aço ASTM A36;
- O aprimoramento de todos os parâmetros influencia o bom desempenho e determinação dos melhores parâmetros de dobra do aço ASTM A36 permitindo o controle do retorno elástico para níveis desejáveis;
- Ao aumentar a espessura do material, a velocidade e o ângulo de abertura da matriz, o retorno elástico aumenta, o que mostra que as variáveis de processo afetam diretamente o retorno elástico e podem ser controladas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro na pesquisa processo 431693/2018-8 Chamada MCTIC/CNPq Nº 28/2018, também agradecem a UFRGS e ao PPGE3M pelo apoio prestado.

Referências

- 1 Bakhshi-Jooybari M, Rahmani B, Daezadeh V, Gorji A. The study of spring-back of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes. *Materials & Design*. 2009;30(7):2410-2419.
- 2 Tekkaya AE. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;103(1):14-22.
- 3 Reddy P, Reddy G, Prasad P. A review on finite element simulations in metal forming. *International journal of engineering research International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2012;2(4):2326-2330.
- 4 Jamli MR. Finite element analysis of springback process in sheet metal forming. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*. 2017;11(1(1):75-84.
- 5 Farsi MA, Arezoo B. Bending force and spring-back in v-die-bending of perforated sheet-metal components. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2011;33(1):45-51.
- 6 Nanu N, Brabie G. Analytical model for prediction of springback parameters in the case of U stretch-bending process as a function of stresses distribution in the sheet thickness. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012;64(1):11-21.
- 7 Tekaslan Ö, Şeker U, Özdemir A. Determinar a quantidade de retorno elástico da chapa de aço tem 0,5 mm de espessura em matrizes de dobra. *Materiais e Design*. 2006;27(3):251-258.
- 8 Fonseca E, Reguly A. The use of the ultrasound measurement technique for the evaluation of mechanical properties of the ASTM A36 steels. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2011;33(2):212-217.
- 9 Chiaverini V. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamento térmicos, principais tipos. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais; 2008.
- 10 Bruschi S, Altan T, Banabic D, Bariani PF, Brosius A, Cao J, et al. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals*. 2014;63(2):727-749.

- 11 Quadros GN. Análise dos fatores influenciadores na não conformidade dimensional do processo de dobramento [Trabalho de Conclusão de Curso]. Bento Gonçalves: Universidade de Caxias do Sul; 2020.
- 12 Menon M. Estudo de ensaios mecânicos laboratoriais para a determinação de planos de ações para o controle de qualidade [Trabalho de Conclusão de Curso]. Francisco Beltrão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná; 2020.
- 13 ASTM International. ASTM A36/36M. Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2008. 4 p.
- 14 Ferrari M, Neves MDM, Panão JN. Análise das propriedades mecânicas de juntas de aço carbono estrutural soldadas pelo processo arco submerso com os arcos simples e duplo (Tandem-Arc). 2019; Soldagem & Inspeção, 24.
- 15 Lal RK, Choubey VK, Dwivedi JP, Kumar S. Study of factors affecting Springback in sheet metal forming and deep drawing process. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(2):4353-4358.
- 16 Wang A, Zhong K, El Fakir O, Liu J, Sun C, Wang L-L et al. Springback analysis of AA5754 after hot stamping: experiments and FE modelling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;89(5-8):1339-1352.
- 17 Hu J, Marciniak Z, Duncan J, editors. *Mechanics of sheet metal forming*. USA: Elsevier; 2002.
- 18 Bresciani E Fo, Silva IB, Batalha GF, Button ST, Ettore et al. *Conformação plástica dos metais*. 6. ed. Campinas: EPUSP; 2011. 254 p.
- 19 Silva ÉA, Silva JWJ, Sampaio NAS, Faye JP, Alexis J, Abdalla AJ Estudo dos modelos de encruamento em aços automotivos por meio do método de elementos finitos e da técnica de difração de elétrons retro espalhados. *Research, Social Development*. 2020;9(2):e44911535.
- 20 Suyuti MA, Iswar M, Nur R. Effect of punch parameters on springback for mild carbon steel in A V-Shape bending process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;541(1):012015.
- 21 Aydin K, Karaağaç İ, Uluer O. The formability and springback characterization of laser-welded DP-HSLA sheets. *Applied Physics. A, Materials Science & Processing*. 2019;125(8):525.
- 22 Fang Z, Jiang Z, Wei D, Liu X. Study on springback in micro V-bending with consideration of grain heterogeneity. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;78(5-8):1075-1085.
- 23 Huang Y, Leu, D. Effects of process variables on v-die bending process of steel sheet. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1998;40(7):631-650.

Recebido em: 18 Maio 2021

Aceito em: 24 Set. 2021