

ANÁLISE DO PROCESSO DE DOBRAMENTO DOS AÇOS HSLA S700MC E AHSS S900MC

ANALYSIS OF THE BENDING PROCESS OF HSLA S700MC AND AHSS S900MC STEELS

ANÁLISIS DEL PROCESO DE DOBLADO DE ACEROS HSLA S700MC Y AHSS S900MC

Valtenês de Souza Bossle

Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil
E-mail: valtenes.bossle@gmail.com

Lirio Schaeffer

Doutor em Engenharia de Conformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil
E-mail: schaefer@ufrgs.br

Matheus Henrique Riffel

Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil
E-mail: matheus.riffel@ufrgs.br

Rafael Pandolfo da Rocha

Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil
E-mail: rafael.pandolfo@ufrgs.br

Juliano Cantarelli Toniolo

Doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), Brasil
E-mail: juliano.toniolo@caxias.ifrs.edu.br

Resumo

Os aços HSLA S700MC e AHSS S900MC vêm sendo utilizados cada vez mais em substituição aos aços convencionais e se verifica que quanto ao comportamento mecânico, há uma necessidade de melhor entendê-los. Este trabalho tem como objetivo, avaliar equações matemáticas para o cálculo da Deformação Verdadeira nas fibras externas da zona de dobramento, do Retorno Elástico e da Força de dobramento que ocorrem no processo de dobra em V livre para estes dois aços, através dos métodos analítico de cálculo e da simulação computacional, comparando com resultados obtidos por meio de análise experimental. Utilizou-se 4 punções, variando-se para cada um deles, a distância entre os suportes da matriz e o deslocamento do punção. Verificou-se através da análise

experimental, valores diferentes para a Deformação Verdadeira nas fibras externas da zona de dobramento. No entanto, apesar dos materiais terem propriedades mecânicas distintas, verificou-se que os valores obtidos através dos métodos analíticos de cálculo são os mesmos para os dois aços. Enquanto que a previsibilidade do Fator Retorno Elástico através do método analítico variou de 0,5% a 6,5% e para Força de Dobramento a variação foi de 10,0% a 38,3%.

Palavras-chave: Aço S700MC; aço S900MC; deformação verdadeira; retorno elástico; simulação computacional.

Abstract

HSLA S700MC and AHSS S900MC steels have been increasingly used to substitute conventional steels, and further understanding of mechanical behaviors is needed. This study aims to evaluate mathematical equations for calculating the True Strain in the outer fibers of the bending zone, Springback and Bending Force that occur in the Air Bending process for these two steels, using the analytic methods of calculation and computer simulation, comparing them to the results obtained by means of experimental analysis. Four punches were used, varying the distance between the die supports and the punch displacement for each one of them. Experimental analysis revealed different True Strain values in the outer fibers of the bending zone. However, despite the materials having distinct mechanical properties, the values obtained through analytical calculation methods were found to be the same for both steels. While the predictability of the Springback Factor through the analytical method varied from 0.5% to 6.5% and for Bending Force the variation was from 10.0% to 38.3%.

Keywords: S700MC steel; S900MC steel; true strain, springback; computer simulation.

Resumen

Los aceros HSLA S700MC y AHSS S900MC se utilizan cada vez más como sustitutos de los aceros convencionales, y se ha observado la necesidad de comprender mejor su comportamiento mecánico. Este trabajo tiene como objetivo evaluar ecuaciones matemáticas para calcular la deformación real en las fibras externas de la zona de flexión, la recuperación elástica y la fuerza de flexión que se producen en el proceso de flexión en V libre para estos dos aceros, mediante métodos de cálculo analítico y simulación computacional, comparándolos con los resultados obtenidos mediante análisis experimental. Se utilizaron cuatro punzones, variando la distancia entre los soportes de la matriz y el desplazamiento del punzón en cada uno. El análisis experimental reveló diferentes valores de deformación real en las fibras externas de la zona de flexión. Sin embargo, a pesar de que los materiales presentan propiedades mecánicas distintas, los valores obtenidos mediante métodos de cálculo analítico resultaron ser los mismos para ambos aceros. Mientras que la predictibilidad del factor de retorno elástico mediante el método analítico osciló entre el 0,5 % y el 6,5 %, y para la fuerza de duplicación la variación fue del 10,0 % al 38,3 %.

Palabras clave: Acero S700MC; acero S900MC; deformación real; recuperación elástica; simulación

por computadora.

1. Introdução

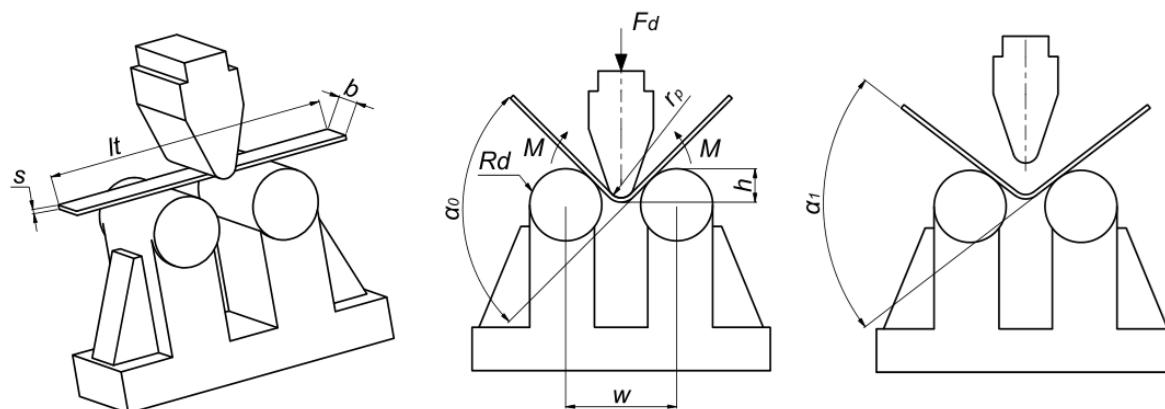
O Aço de Alta Resistência e Baixa Liga (HSLA) S700MC, assim como o Aço Avançado de Alta Resistência (AHSS) S900MC possibilitam a diminuição da espessura e consequente redução de peso sem afetar a segurança e a resistência da peça, devido a maior resistência (SSAB, 2023). São aços estruturais laminados a quente com Tensões de escoamento (σ_e) mínimas de 700 MPa e 900 MPa respectivamente, permitem a fabricação de peças mais leves e mais resistentes (USIMINAS, 2023). São aplicados em uma ampla variedade de componentes como por exemplo, em peças de gruas de torre, implementos rodoviários e agrícolas, chassis e longarinas extra leves, fureiros, lanças de guindastes, bem como componentes estruturais em geral, peças estas utilizadas no carregamento de cargas (ULSAB, 2023). Um dos desafios do processo de conformação mecânica de chapas metálicas de aços de alta resistência é conseguir a previsibilidade da Deformação Verdadeira na zona de dobra, do Fator de Retorno Elástico e da Força de dobramento (Farsi; Arezoo, 2011).

Um dos grandes problemas do processo de conformação mecânica de chapas de aços de alta resistência era a eliminação de trincas e estrições, devido sua baixa deformabilidade. Com a necessidade de se conseguir controlar a estabilidade e a precisão dimensional, o Retorno Elástico é um dos parâmetros que dificulta este controle. As variações das tensões presentes no dobramento causam o retorno elástico, pois na superfície externa ocorrem tensões de tração, já na superfície interna da dobra a tensão é de compressão (Dieter, 1981). O valor mais elevado de ambas as tensões ocorre na superfície do material e vai diminuindo ao se aproximar do centro da espessura da chapa, tornando-se zero ao chegar no eixo neutro. Nessa região o material cria uma faixa elástica estreita em ambos os lados do eixo neutro e conforme se afasta em direção a superfície obtém-se tensões acima do limite de escoamento, causando a deformação plástica e permanente. Quando o punção se afasta a faixa elástica tende a retornar para sua condição plana original, porém não é possível, devido às restrições causadas pelas

zonas de deformações plásticas (Perka, 2022). A distorção geométrica que prejudica ou impossibilita a montagem de peças é muitas vezes causada pelo Retorno Elástico e é um desafio no projeto (Vorkov, 2018).

Alguns parâmetros do processo de dobramento em V livre como a Espessura da Chapa (s), o Raio do Punção (r_p), a Força de Dobramento (F_d), a Distâncias entre os Apoios (w) e o Deslocamento Máximo do Punção (h), bem como algumas propriedades do material como o Coeficiente de Anisotropia (r), o Índice de encruamento (n), aspectos microestruturais e condições de lubrificação entre outros, influenciam no Retorno Elástico. As expressões analíticas em geral não levam em consideração todos estes parâmetros (Narayanasamy; Padmanabhan, 2012). Na Figura 1 está representado esquematicamente o Dobramento em V livre e os principais parâmetros envolvidos neste tipo de Dobramento (Liyatyalı; Altan, 2001).

Figura 1: Representação do Dobramento em V livre e os parâmetros do processo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Força máxima de dobra ($F_{máx. \text{dobra}}$) ocorre no final do processo, correspondente ao Ângulo antes do retorno elástico (α_0) máximo. No momento em que a ferramenta é retirada liberando a superfície de contato, ocorre a liberação da força e como consequência ocorre o efeito mola, refletindo na mudança do Ângulo após o retorno elástico (α_1) (Aerens; Masselis, 2000; Yang *et al.*, 2011).

Este trabalho tem por objetivo avaliar o emprego de expressões analíticas para determinação da Deformação Verdadeira (φ_x) nas fibras externas da zona de

dobramento, do Retorno Elástico e da Força de dobra que ocorrem no processo de dobramento em V livre para estes dois aços. Este formulismo, por seu baixo custo e rapidez na obtenção de resultados no apoio à realização e otimização de projetos de manufatura tem sido atualmente ainda muito empregado (Arola; Kesti; Ruoppa, 2015).

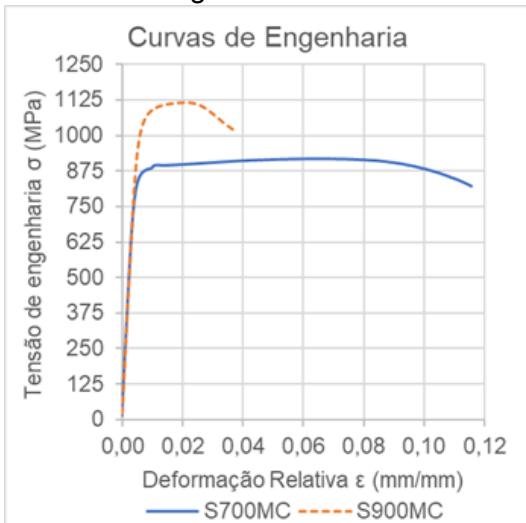
2. Metodologia

2.1 Determinação das propriedades mecânicas

Para determinação das propriedades mecânicas, realizou-se ensaio de tração utilizando chapas de 3,0mm de espessura (s), dos aços S700MC e S900MC. Este ensaio foi realizado para se construir as Curvas de Engenharia e Curvas de Escoamento. As dimensões e geometria utilizadas para os corpos de prova foram do tipo “gravata” e estão de acordo com o requisito da norma ABNT NBR 6892-1:2013, bem como os procedimentos para execução deste ensaio. Para realização do ensaio de tração, foi utilizado um equipamento de ensaio universal marca EMIC de 100 kN.

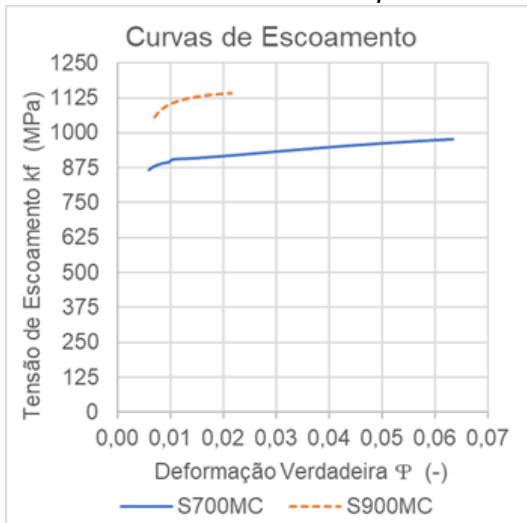
Na Figura 2 se apresenta o gráfico das Curvas de Engenharia dos aços S700MC e S900MC. Verificou-se através dos resultados do ensaio de tração que, as Tensões de escoamento (σ_e) foram de 861,5 MPa para o aço S700MC e 1048,4 MPa para o aço S900MC. Já a Tensão máxima (R_m), foi 919,8 MPa para o aço S700MC e 1117,4 MPa para o aço S900M, com respectivamente deformações relativas (ϵ) de 6,3% e 2,0%. É importante ressaltar, conforme mostrado na Figura 2, a baixa deformabilidade do aço S900MC. Na Figura 3 estão representadas as curvas de escoamento dos aços S700MC e S900MC.

Figura 2: Gráfico das curvas de Engenharia $\sigma \times \varepsilon$.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Figura 3: Gráfico das curvas de Escoamento $k_f \times \varphi$.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As curvas de escoamento dos dois aços foram determinadas utilizando-se os dados de força e áreas instantâneas obtidas durante o ensaio de tração, considerando-se somente a zona de deformação plástica uniforme.

Determinou-se as equações de escoamento dos aços S700MC e S900MC seguindo o proposto por LUDWIG-HOLLOMONN, utilizando-se os dados da Tensão máxima (R_m) e da respectiva Deformação Relativa (ε) correspondentes a este ponto. Após, se calculou as Tensões verdadeiras (k_f) e Deformações Verdadeiras (φ), através das Equações 1 e 2 (Lange, 1985).

$$k_f = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \text{Eq. 1}$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad \text{Eq. 2}$$

Utilizou-se a Equação 3 (Lange, 1985) de Ludwik-Hollomon, onde inseriu-se os valores do Índice de encruamento (n), Deformação Verdadeira (φ) e Tensão verdadeira (k_f), correspondentes ao ponto de Tensão máxima (R_m) e da respectiva Deformação Relativa (ε), para então determinar os valores da Constante de Resistência do material (C) destes dois materiais. Desta forma se determinou as Equações 4 e 5, que descrevem as curvas de escoamento destes dois aços.

Equação de Ludwik-Hollomon	$kf = C \cdot \varphi^n$	Eq. 3
S700MC	$kf = 1160,2 \cdot \varphi^{0,061}$	Eq. 4
S900MC	$kf = 1233,3 \cdot \varphi^{0,020}$	Eq. 5

2.2 Métodos de Análises

2.2.1 Análise Experimental do Processo de Dobramento

Para o experimento de dobramento, foram fabricados 36 corpos de prova do aço S700MC e 36 do aço S900MC, utilizando chapas com espessura (s) de 3mm.

Conforme orienta a norma EN 10149-2, para chapa de aço S700MC e Espessura da chapa (s) de 3mm, o Raio mínimo de dobramento (r_{min}) é 1,5s (4,5mm). Já para chapa de aço S900MC e com Espessura da chapa (s) de 3mm, o Raio mínimo de dobramento (r_{min}) é 3,5s (10,5mm), sendo estas orientações para Ângulos antes do retorno elástico (α_0) $\leq 90^\circ$, para este dois aços (EN 10149-2, 2013).

Para os dois aços, utilizou os mesmos Raios dos Puncões (r_p), 3, 6, 9 e 12mm, sendo que para cada punção trabalhou-se com 9 corpos de prova, com o objetivo de comparar os valores de Deformação Verdadeira (φ_x) na região externa de dobramento e Fator do Retorno Elástico (K) entre os dois aços estudados.

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros fixos utilizados no experimento de dobramento em V livre.

Tabela 1: Parâmetros fixos utilizados no experimento de Dobramento em V livre.

Ângulo antes do retorno elástico (α_0)	90°
Velocidade do punção (V)	10 mm/min
Espessura da chapa (s)	3mm
Largura da chapa ou da peça (b)	30mm
Comprimento da chapa ou da peça (L)	210mm
Raio dos suportes da Matriz (R_d)	25mm

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Distância entre os suportes da matriz (w) foi determinada através da Equação 6, a qual é adaptada da norma ABNT NBR 7438: 2022.

$$w = (2 * r_p) + (3 * s) + (2 * R_d) \quad \text{Eq. 6}$$

Os valores do Deslocamento Máximo do Punção (h) foram obtidos através de representação geométrica, utilizando-se o software INVENTOR, onde se representou os 4 Raios do Punção (r_p) e o Ângulo de dobramento antes do retorno elástico (α_0) de 90°.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores de Distância entre os suportes da matriz (w) e Deslocamento Máximo do Punção (h) para cada Raio do Punção (r_p).

Tabela 2: – Valores de Deslocamento Máximo do Punção (h) e Distância entre os suportes da matriz (w) para cada Raio do Punção (r_p).

Material	Raio do Punção r_p (mm)	Distância entre os suportes da matriz (w)	Deslocamento Máximo do Punção (h)
S700MC e S900MC	3	65	20
	6	71	21
	9	77	23
	12	83	25

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para análise experimental, utilizou-se máquina de ensaio universal marca EMIC de 600 kN para realizar o experimento de dobramento em V livre, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4: Experimento de dobramento em V livre de um dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para cada Raio do Punção (r_p), variou-se a Distância entre os suportes da

matriz (w) e o Deslocamento Máximo do Punção (h), sendo igual para todas as representações, o Raio dos suportes da Matriz (R_d) e a Espessura da chapa (s). A Figura 1 é a representação esquemática do experimento de dobramento em V livre.

A Deformação Verdadeira (φ_x) na região externa da dobra foi determinada por meio do método da visioplasticidade por malha, amplamente empregado em estudos de conformação plástica. Antes da realização dos ensaios de dobramento, foram gravadas malhas circulares regulares com Diâmetro inicial (d_0) de 2,5mm na superfície dos corpos de prova, localizadas na região que posteriormente foi submetida à máxima deformação. Após o dobramento, esses círculos deformaram-se em elipses, cujo alongamento no eixo principal foi medido com auxílio de uma grade flexível de medição. A deformação verdadeira (φ_x), foi então calculada a partir da razão entre os comprimentos inicial e final do eixo maior da elipse, assumindo-se condição de deformação plana na zona analisada, conforme metodologia consolidada na literatura técnica.

O Ângulo após o Retorno Elástico (α_1) foi obtido por meio da medição geométrica do ângulo final da peça após a completa retirada da carga do punção. O Ângulo antes do retorno elástico (α_0) foi previamente fixado em 90°. Após o descarregamento, o Ângulo após o Retorno Elástico (α_1) foi medido diretamente no corpo de prova dobrado utilizando instrumento de medição angular de precisão. A partir desses valores, o Fator de Retorno Elástico (K) foi determinado conforme a Equação 7, proposta por Dieter (1981), sendo definido como a razão entre o Ângulo após o retorno elástico (α_1) e o Ângulo antes do retorno elástico (α_0), metodologia amplamente adotada em ensaios de dobramento em V livre (Schaeffer; Nunes; Brito, 2017; Rodrigues; Martins, 2010).

$$K = \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \quad \text{Eq. 7}$$

A Força máxima de dobra ($F_{máx. \, dobrada}$) foi extraída diretamente do sistema de aquisição de dados da máquina universal de ensaios utilizada nos experimentos. Durante o ensaio, foram registrados continuamente os valores de força em função

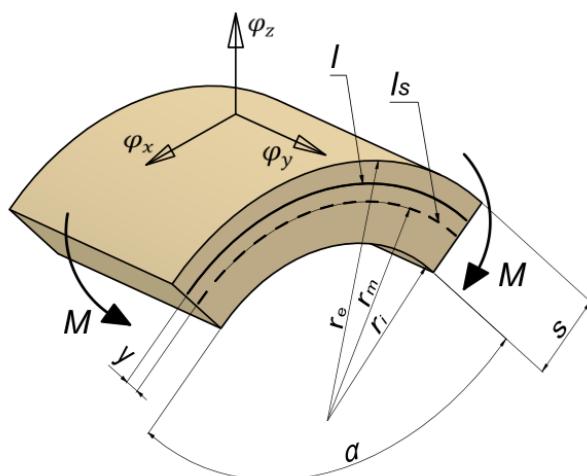
do deslocamento do punção. A Força máxima de dobra ($F_{máx. \ dobra}$) foi identificada como o maior valor registrado imediatamente antes do início do descarregamento, correspondente ao final do curso do punção e ao ângulo de dobramento imposto. Esse valor foi considerado representativo da A Força máxima de dobra ($F_{máx. \ dobra}$) para cada condição experimental analisada.

2.2.2 Métodos Analíticos de cálculos

Para realização dos cálculos analíticos através de equacionamento matemático, se utilizou os mesmos parâmetros da análise experimental.

As Deformações Verdadeiras (φ_x) na zona externa de dobramento e na direção do comprimento (x) da chapa, conforme mostrado na Figura 5, foram calculadas através das Equações 8 proposta por Lange (1985) e 9 proposta por Hosford e Caddel (2010), que correlacionam a Espessura da chapa (s), o Raio do punção (r_p), o Raio de dobramento da linha média (r_m), a Posição das fibras na chapa dobrada (y) como sendo $s/2$, o Comprimento do arco dobrado (l_s) e do Comprimento da fibra (l) localizados na posição y (Hosford; Caddell, 2011).

Figura 5: Representação da região de dobra e variáveis envolvidas no cálculo da Deformação Verdadeira (φ).



Fonte: Adaptado Hosford; Caddell, 2011.

A Deformação Verdadeira (φ_y) na direção da Espessura da chapa (s) e a Deformação Verdadeira (φ_z) na direção da largura da chapa ou da peça (b), não

foram levadas em conta neste trabalho. Considerou-se uma deformação plana, onde $\varphi_y = \varphi_x$ e $\varphi_z = 0$ (Vorkov V, et al., 2017).

$$\varphi_x = \ln \sqrt{1 + \frac{s}{r_p}} \quad \text{Eq. 8}$$

$$\varphi_x = \ln \left(1 + \frac{s}{2r_m} \right) \quad \text{Eq. 9}$$

Já para o cálculo do Raio de dobramento da linha média (r_m), necessário para a determinação da Deformação Verdadeira (φ_x), se utilizou a Equação 10 (Rocha, et al., 2022).

$$r_m = r_p + \frac{s}{2} \quad \text{Eq. 10}$$

Para determinar os valores do fator de retorno elástico analítico (K), pode-se usar a Equação 11 proposta por Dieter (1981). Onde s é definido como espessura, b a largura da chapa ou da peça, o E módulo de elasticidade do material, o r_p Raio do Punction e M é o Momento de dobramento que depende da Força de Dobramento (F_d) e da Distância entre os suportes da matriz (w).

$$K = 1 - \frac{12M(r_p + 0,5 \cdot s)}{E \cdot b \cdot s^3} \quad \text{Eq. 11}$$

Para se determinar a Distância entre os suportes da matriz (w), se utilizou a Equação 6, adaptada da norma NBR 7438 (2022). Já o Momento de dobramento (M) foi calculado usando-se a Equação 12 proposta por Martins e Rodrigues (2010).

$$M = \frac{F_d \cdot w}{4} \quad \text{Eq. 12}$$

E para a Força de Dobramento (F_d), dentre as encontradas na literatura se utilizou a Equação 13, proposta por SSAB (2021).

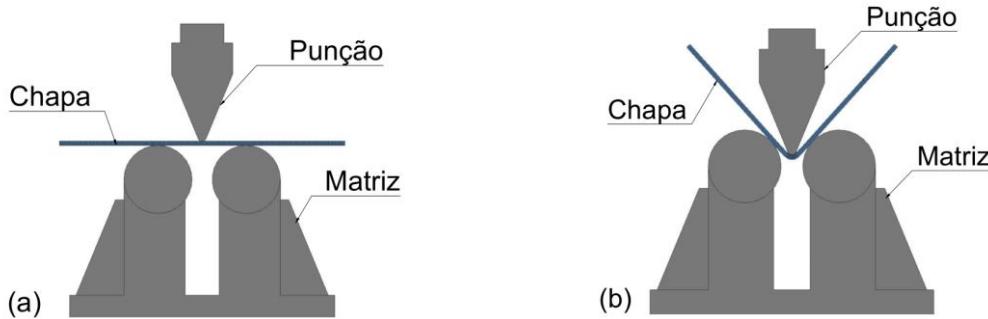
$$F_d = \frac{R_m \cdot b \cdot s^2}{(w - R_d - r_p)} \quad \text{Eq. 13}$$

2.2.3 Simulação computacional

O processo de dobramento em V foi simulado por meio do software Simufact Forming 15® (MSC Software Company, Hexagon), utilizando o método dos elementos finitos para a determinação dos campos de tensão e deformação ao longo da conformação. Adotou-se uma formulação elastoplástica adequada a grandes rotações e deformações moderadas, com discretização do tipo casca espessada (solid-shell), permitindo a integração das variáveis mecânicas em múltiplos pontos ao longo da espessura da chapa. As ferramentas foram consideradas rígidas, e o contato entre ferramenta e peça foi modelado por meio de uma lei de atrito de Coulomb, com coeficiente de atrito constante $\mu = 0,1$. A Velocidade do punção (V) foi fixada em 19,5 mm/s, conforme condições típicas de processos industriais de dobramento. (Fu; Mo; Chen, 2010).

O comportamento plástico do material foi descrito pelo modelo constitutivo de Ludwik–Hollomon, no qual a tensão de escoamento evolui em função da deformação plástica equivalente segundo uma lei do tipo potência, ajustada a partir de dados experimentais. Essa abordagem permite representar adequadamente o encruamento do material e sua influência na força de dobramento, bem como na distribuição de tensões ao longo da espessura. O retorno elástico foi avaliado durante a etapa de descarregamento da simulação, sendo governado pelas propriedades elásticas e pelo histórico de deformação plástica imposto durante o processo. A Figura 6 ilustra as posições inicial (a) e final (b) do punção, de acordo com procedimentos consolidados na literatura de simulação numérica de processos de conformação (Fu; Mo; Chen, 2010) (Altan; Tekkaya, 2012; Hosford; Caddell, 2011).

Figura 6: Representação das posições inicial (a) e final (b) do punção.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Com os resultados obtidos através dos ensaios de tração, inseriu-se no software as propriedades mecânicas dos aços S700MC e S900MC, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades mecânicas inseridas no software *SIMUFACT*.

Parâmetros	Material	
Material da geratriz	S700MC	S900MC
Tensão de Escoamento de engenharia σ_e (MPa)	861,5	1048,4
Tensão Máxima, R_m (MPa)	919,8	1117,4
Índice de Anisotropia, r (-)	1,61	1,78
Densidade, ρ (g/cm ³)	7,85	7,85
Módulo de Elasticidade, E (GPa)	201,5	200,7
Coeficiente de Poisson, v (-)	0,285	0,270
Coeficiente de Resistência C (MPa)	1160,2	1233,3
Índice de Encruamento n (-)	0,061	0,020
Coeficiente de atrito (μ)	0,1	

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Foram realizadas 4 simulações de dobramentos do aço S700MC e 4 do aço S900MC, com o objetivo de estimar a Deformação Verdadeira (φ_x) na zona externa de dobramento e o Fator de Retorno Elástico (K) (Ledentsov, et al., 2010).

Os punções e a matriz foram considerados como objetos rígidos e não-deformáveis, enquanto que as chapas foram consideradas objetos elastoplásticos. Adotou-se tamanho geral de malha 1mm, tipo de elementos Hexahedral, gerador de malha Sheetmesh, quantidade de elementos 18900 e utilizando 3 elementos longo da espessura.

Para as simulações, se considerou os mesmos Raios do Punção (r_p), as mesmas Distâncias entre os Apoios (w) e os mesmos Deslocamentos de punção

(h) utilizados no experimento de dobramento.

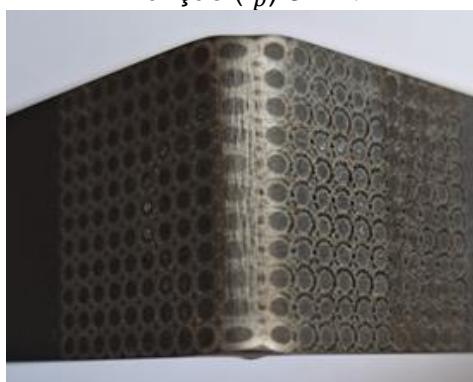
3. Resultados

3.1 Análise Experimental

Para o aço S700MC, na região externa de dobra no grupo dos corpos prova com Raio do Punção (r_p) 3mm, abaixo do mínimo especificado pela norma EN 10149-2 (mínimo 4,5mm), constatou-se que não ocorreram trincas.

Com base nos resultados experimentais apresentados no artigo, observa-se que o aço S900MC apresentou comportamento sensível ao raio de dobramento imposto, em conformidade com as recomendações normativas. Na região externa da dobra, os corpos de prova submetidos a Raio do Punção (r_p) inferior ao mínimo especificado pela norma EN 10149-2 (3,5 s, correspondente a 10,5 mm para chapas de 3 mm, evidenciaram a ocorrência de fissuras quando utilizado Raio do Punção (r_p) de 3 mm, conforme ilustrado na Figura 7. Esse comportamento está associado à elevada deformação verdadeira concentrada nas fibras externas da dobra, típica de aços AHSS com menor ductilidade. Por outro lado, não foram observadas trincas nos corpos de prova dobrados com raios de punção de 6, 9 e 12 mm, indicando que, para esses valores, a deformação imposta permanece dentro do limite de conformabilidade do material, garantindo a integridade geométrica e estrutural das peças dobradas.

Figura 7: Ocorrência de fissuras na região externa dobrada do aço S900MC para Raio do Punção (r_p) 3mm.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após o experimento de dobramento, conforme representado na Figura 8,

verificou-se os valores de Deformação Verdadeira (φ_x) na direção do comprimento da chapa, na zona externa da região dobrada dos corpos de prova, utilizando-se a grade de medir Deformações.

Figura 8: Verificação da Deformação Verdadeira (φ_x) da região externa dobrada.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para os dois aços estudados neste trabalho, observou-se através dos resultados do experimento que, quanto maior o Raio do Punção (r_p), menor é o Fator de Retorno Elástico (K).

Na Tabela 4 se apresenta a Média (MA) e o Desvio Padrão (DP) para cada Raio do Punção (r_p), dos valores experimentais da Deformação Verdadeira (φ_x) na zona externa de dobra, do Fator do Retorno Elástico (K), e da Força de Dobramento (F_d), para os dois aços estudados.

Tabela 4: Valores experimentais da Média (MA) e Desvio Padrão (DP) da Deformação Verdadeira (φ_x), Fator de Retorno Elástico (K) e Força de Dobramento (F_d).

Material	Raio do Punção r_p (mm)	Deformação Verdadeira φ_x (-)		Fator de Retorno Elástico K (-)		Força de dobramento F_d (N)	
		Média MA	Desvio Padrão DP	Média MA	Desvio Padrão DP	Média MA	Desvio Padrão DP
S700MC	3	0,36	0,009	0,909	0,005	7422	364,5
	6	0,25	0,005	0,898	0,003	5945	171,0
	9	0,18	0,004	0,897	0,003	6032	211,8
	12	0,12	0,004	0,892	0,001	7083	131,6
S900MC	3	0,44	0,018	0,912	0,001	10411	207,9
	6	0,23	0,005	0,901	0,001	11122	248,5
	9	0,17	0,005	0,880	0,001	10100	205,5
	12	0,14	0,004	0,872	0,005	9156	142,3

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.2 Método analítico de cálculo

Para os dois aços, os valores da Deformação Verdadeira (φ_x) na zona externa de dobramento foram calculados através das Equações 8 e 9. Já o Raio de dobramento da linha média (r_m) foi calculado através da Equação 10. Os valores do Fator de Retorno Elástico (K), do Momento de dobramento (M) e da Força de Dobramento (F_d), foram calculados através das Equações 11, 12 e 13 e estão apresentados respectivamente na Tabela 5.

Tabela 5: Valores analíticos da Deformação Verdadeira (φ_x), Raio de dobra da linha média (r_m), Fator de Retorno Elástico (K), Momento de dobramento (M) e Força de Dobramento (F_d).

Material	Raio do Punção r_p (mm)	Deformação Verdadeira φ_x (-)		Raio de dobra da linha média r_m (mm), Eq. 10	Fator Retorno Elástico K (-), Eq. 11	Momento de dobramento M (N.mm), Eq. 12	Força de dobramento F_d (N), Eq. 13
		Eq. 8	Eq. 9				
S700MC	3	0,35	0,29	4,5	0,969	94142	5793
	6	0,20	0,18	7,5	0,947	95120	5359
	9	0,14	0,13	10,5	0,925	95961	4985
	12	0,11	0,11	13,5	0,903	96692	4660
S900MC	3	0,35	0,29	4,5	0,960	120461	7413
	6	0,20	0,18	7,5	0,932	121712	6857
	9	0,14	0,13	10,5	0,904	122789	6379
	12	0,11	0,11	13,5	0,876	123725	5963

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3 Simulação Computacional

Na Figura 9 está representado simulação numérica computacional fornecida pelo software da Deformação Verdadeira (φ_x) do aço S700MC para Raio do punção (r_p) de 3mm. Se verifica que a máxima Deformação Verdadeira (φ_x) com valor de 0,33, está localizada nos cantos da superfície externa da região de dobramento (cor vermelha).

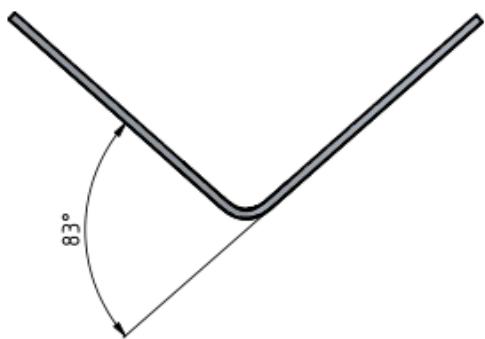
Figura 9: Simulação numérica computacional da Deformação Verdadeira (φ_x) do aço S700MC para Raio do punção (r_p) de 3mm.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na Figura 10 está representado a simulação numérica computacional do ângulo após o retorno elástico (α_1) do aço S700MC para Raio do punção (r_p) de 9mm. A geometria da chapa dobrada, foi gerada pelo software SIMUFACT FORMING 15® e posteriormente transferida para o software INVENTOR, onde se verificou o Ângulo após o Retorno Elástico (α_1) de 83°.

Figura 10: Simulação numérica computacional do Ângulo após o retorno elástico (α_1) do aço S700MC para Raio do punção (r_p) de 9mm.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na Tabela 6 estão apresentados os valores da simulação computacional para Deformação Verdadeira (φ_x) na região externa de dobra, Fator do Retorno Elástico

(K), e Força de Dobramento (F_d).

Tabela 6: Valores da simulação numérica computacional da Deformação Verdadeira (φ_x), Fator de Retorno Elástico (K) e Força de Dobramento (F_d).

Material	Raio do Punção r_p (mm)	Deformação Verdadeira φ_x (-)	Fator de Retorno Elástico K (-)	Força de dobramento F_d (N)
S700MC	3	0,33	0,936	6963
	6	0,23	0,930	6505
	9	0,17	0,923	6410
	12	0,12	0,921	6370
S900MC	3	0,31	0,939	10770
	6	0,21	0,922	10548
	9	0,16	0,904	10230
	12	0,13	0,898	8538

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

4. Discussão

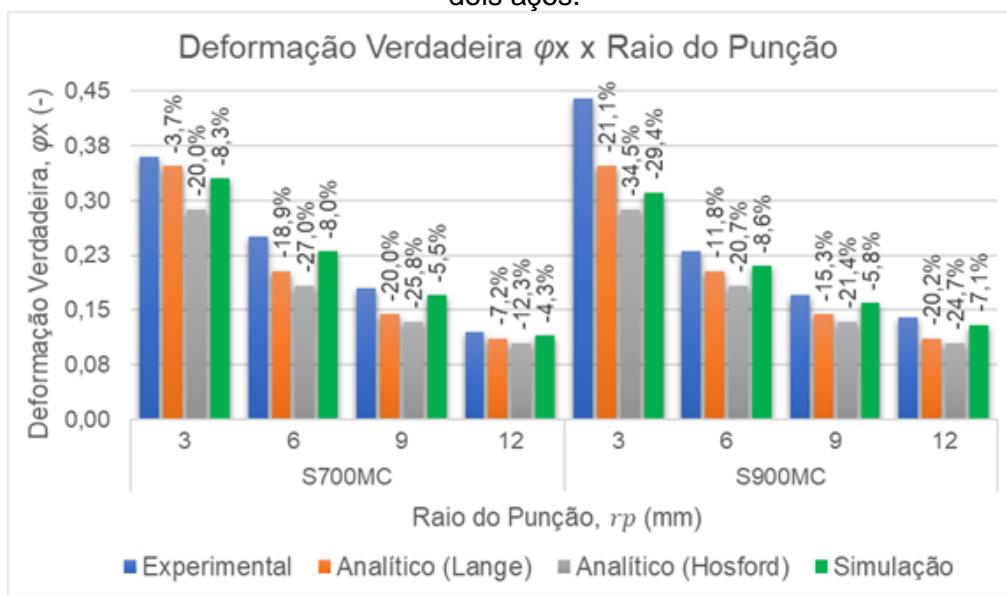
Os valores experimentais das Deformações Verdadeiras (φ_x) na zona externa de dobramento considerados como referência neste trabalho, assim como os valores analíticos e os obtidos através da simulação computacional, estão representados na Figura 11.

De acordo com os resultados do experimento apresentados no gráfico da Figura 11, para diferentes valores de Raio do Punção (r_p), Distância entre os suportes da matriz (w) e Deslocamento Máximo do Punção (h), se obteve diferentes valores da Deformação Verdadeira (φ_x), da mesma forma ocorreu com o métodos analítico de cálculos e simulação numérica computacional. No entanto, apesar dos dois materiais terem propriedades mecânicas diferentes, se verifica para o método analítico que os valores calculados através das Equação 8 e apresentados na Tabela 5, são os mesmos para os dois aços, pois os parâmetros considerados nesta equação são a espessura da chapa (s) e o Raio do Punção (r_p). Assim como também se observou para os valores calculados através da Equação 9 e apresentados na Tabela 5, pois os parâmetros considerados nesta equação são a espessura da chapa (s) e o Raio de dobramento da linha média (r_m). Sendo que para ambas equações, os valores divergiram significativamente em relação aos

valores experimentais.

Observou-se para os corpos de prova que apresentaram fissuras do aço S900MC na região externa de dobra com Raio do Punção (r_p) de 3mm, que a Deformação Verdadeira (φ_x) ficou elevada, possivelmente devido a ruptura associada ao alongamento do material na zona da superfície externa de dobra.

Figura 11: Relação entre Deformação Verdadeira (φ_x) e Raio do Punção (r_p) para os dois aços.

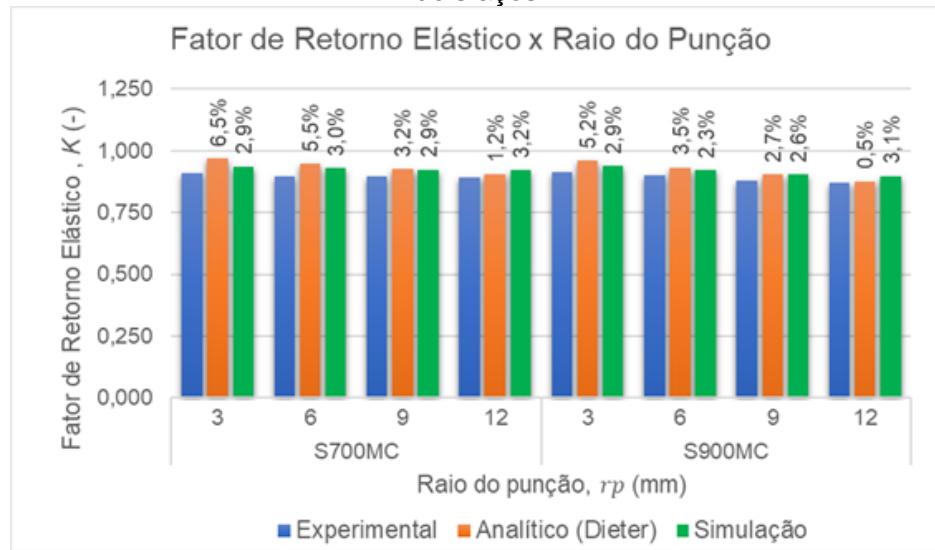


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

No gráfico da Figura 12 estão apresentados os valores do Fator de Retorno Elástico (K), obtidos através dos métodos analítico de cálculos e simulação computacional em comparação a análise experimental, onde se verifica que os percentuais de erro ficaram abaixo de 10%.

Para a análise experimental, assim como para os métodos analítico de cálculo e simulação computacional, se observa que os valores do Fator de Retorno Elástico (K), variaram em função da variação dos parâmetros do experimento de dobramento. Verifica-se que tanto para o aço S700MC, assim como para o aço S900MC, há uma tendência na diminuição do Fator de Retorno Elástico (K), conforme aumenta-se o Raio do Punção (r_p).

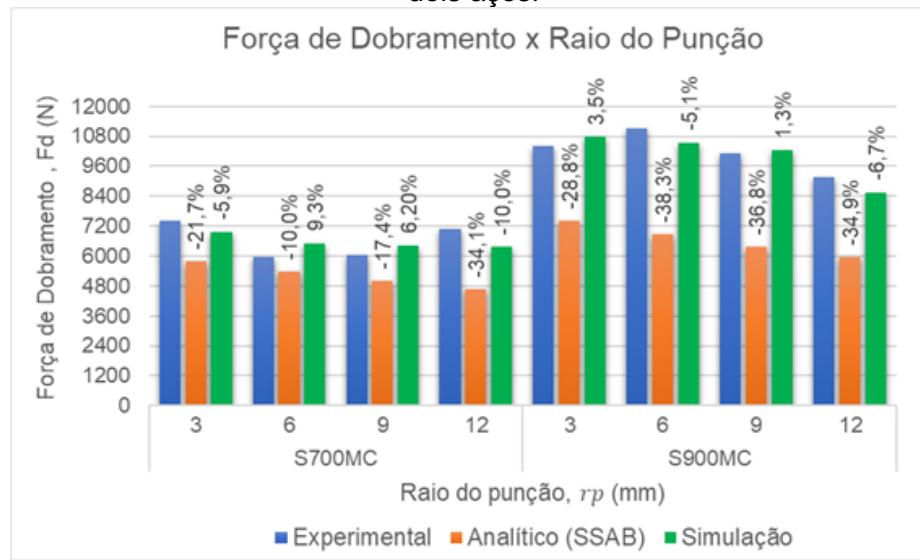
Figura 12: Relação entre Fator de Retorno Elástico (K) e Raio do Punção (r_p) para os dois aços.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

De acordo com os resultados apresentados para Força de Dobramento (F_d), se observa no gráfico da Figura 13 para os dois aços, que os percentuais de diferença ficaram entre -10% a -38,3% para os valores calculados pelos método analítico através da Equação 13 e -5,9% a 10% para simulação numérica computacional, em comparação com a análise experimental.

Figura 13: Relação entre Força de Dobramento (F_d) e Raio do Punção (r_p) para os dois aços.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

5. Lista de Símbolos

Tabela 7: Lista de Símbolos utilizados.

b – Largura da chapa ou da peça	[mm]	M – Momento de dobramento	[N.mm]
C – Constante de resistência	[MPa]	n – Índice de encruamento	[$-$]
d_0 – Diâmetro inicial do círculo	[mm]	r – Índice de anisotropia	[$-$]
E – Módulo de elasticidade	[GPa]	R_d – Raio dos suportes da matriz	[mm]
F_d – Força de dobramento	[N]	R_m – Tensão Máxima	[MPa]
$F_{máx. \, dobra}$ – Força máxima de dobra	[N]	r_m – Raio de dobramento da linha média	[mm]
h – Deslocamento do punção	[mm]	r_{min} – Raio mínimo de dobramento	[mm]
K – Fator de retorno elástico	[$-$]	r_p – Raio do Punção	[mm]
k_f – Tensão Verdadeira	[MPa]	s – Espessura da chapa	[mm]
L – Comprimento da chapa	[mm]	V – Velocidade do punção	[mm/min]
l – Comprimento da fibra	[mm]	w – Distância entre suportes da matriz	[mm]
l_s – Comprimento do arco dobrado	[mm]	y – Posição das fibras na chapa dobrada	[mm]

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Tabela 8: Lista de Símbolos Gregos utilizados.

α_0 – Ângulo antes do retorno elástico	[$^{\circ}$]	ρ – Densidade	[g/cm ³]
α_1 – Ângulo após o retorno elástico	[$^{\circ}$]	σ_e – Tensão de Escoamento de Engenharia .	[MPa]
ε – Deformação Relativa	[$\%$]	φ_x – Deformação Verdadeira dir. comprimento ...	[$-$]
μ – Coeficiente de atrito	[$-$]	φ_y – Deformação Verdadeira dir. largura	[$-$]
ν – Coeficiente de Poisson	[$-$]	φ_z – Deformação Verdadeira dir. espessura	[$-$]

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

6. Conclusão

Para o processo de dobramento em V livre dos aços da norma EN 10149-2 S700MC e S900MC conclui-se que:

De acordo com os resultados calculados para a Deformação Verdadeira (φ_x) na zona externa da dobra, pelo método analítico, utilizando-se as Equações 8 e 9, únicas disponível na bibliografia mundial para o cálculo deste parâmetro para o processo de dobramento em V livre, se verifica que, por considerar somente as variáveis espessura (s), o Raio do Punção (r_p) e o Raio de dobramento da linha média (r_m), não considerando propriedades mecânicas dos materiais, bem como,

pelos valores calculados em relação aos resultados experimentais ficarem entre -12,3% a -27,0% para o aço S700MC e -20,7% a -34,5% para o aço S900MC, a utilização destas equações poderá ocasionar possíveis erros na previsão deste parâmetro para estes dois aços, indicando assim para este processo e para aços de alta resistência, a necessidade de se formular equação para o cálculo da Deformações Verdadeiras (φ_x) na zona externa de dobra.

Para a previsão do Fator de Retorno Elástico (K) através do método analítico de cálculos para esses dois aços, é indicada a utilização da Equação 11, pois os resultados verificados em relação a análise experimental, ficaram muitos próximos, ficando abaixo de 10%.

A previsibilidade da Força de Dobramento (F_d) através do método analítico de cálculos utilizando a Equação 13 para esses dois aços, não é indicada, pois os resultados calculados ficaram abaixo dos obtidos na análise experimental, variando de -10% a -34,1% para o S700MC e -28,8% a 38,3% para o S900MC.

Para estes dois aços, a partir dos resultados verificados e não considerando os do aço S900MC dobrados com o Raio do Punção (r_p) 3mm, pois ocorreram fissuras na zona externa de dobramento, é indicado a utilização de simulação computacional, empregando-se o software SIMUFACT FORMING 15® para prever a Deformação Verdadeira (φ_x), assim como para o Fator de Retorno Elástico (K) e para Força de Dobramento (F_d), visto que os percentuais de diferenças em relação a análise experimental ficaram abaixo de 10%.

Referências

AERENS, R.; MASSELIS, S. Air bending. Scientific and Technical Research Center of the Metal Fabrication Industry (CRIF/WTCM/SIRRIS) MC 110, Leuven, Belgium, 2000.

ALTAN, Taylan & TEKKAYA, A. Erman. *Sheet Metal Forming: Fundamentals*. Materials Park: ASM International, 2012.

AROLA, A-M.; KESTI, V.; RUOPPA, R. The effect of punch radius on the deformation of ultra-high strength steel in bending. Key Eng Mater 639: p. 139-146. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 7438:
Materiais metálicos - Ensaio de dobramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy. 2nd. ed. New York, McGraw-Hill, p 1-609. 1981.

EUROPEAN STANDARD. EN 10149-2/2013: Hot Rolled Flat Products Made of High Yield Strength Steels for Cold Forming – Part 2: Technical Delivery Conditional for Tehrmomechanically Rolled Steels, p. 1-29: EN, 2013.

FARSI, M. A.; AREZOO, B. Bending Force and Spring-Back in V-Die-Bending of Perforated Sheet-Metal Components. Technical Papers • J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. 2011.

FU, Z.; MO, J.; CHEN, L.; CHEN, W. Using genetic algorithm-back propagation neural network prediction and finite-element model simulation to optimize the process of multiple-step incremental air-bending forming of sheet metal. Mater Des 31 (1):267-277, 2010.

HOSFORD, W.; CADDELL, R. Metal Forming Mechanics and Metallurgy. 4^a Ed., New York: Cambridge University Press, p. 30-37. 2011.

LANGE, K. Handbook of metal forming. McGraw-Hill Book Company, New York, US, p. 723-755. 1985.

LEDENTSOY, D.; DÜSTER, A.; VOLK, W.; WAGNER, M.; HEINLE, I.; RANK, E. Model adaptivity for industrial application of sheet metal forming simulation. Finite Elem Anal Des 46 (7):585-600, 2010.

LIVATYALI, H.; ALTAN, T. "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), p. 262–268. 2001.

NARAYANASAMY, R.; PADMANABHAN, P. Comparison of regression and artificial neural network model for the prediction of springback during air bending process of interstitial free steel sheet. J Intell Manuf 23 (3), p. 357-364. 2012.

PERKA, A. et al. Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications: Arc and Laser Welding Process, Properites, and Chalenges, Metals. V. 12, 2022.

ROCHA, R. P.; RIFFEL, M.; MOZETIC, H.; SCHAEFFER, L. Análise do Retorno

Elástico no Processo de Dobramento em “V” em Aços de Alta Resistência.
Brazilian Journal of Development. v.8, n.4, p. 27662-27677. Abril, 2022.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. Tecnologia Mecânica: Tecnologia da deformação plástica - aplicações industriais. Lisboa: Escolar, p. 265-332, 2010.

SCHAEFFER, L.; NUNES, R. M.; BRITO, A. M. Tecnologia da estampagem de chapas metálicas. 1^a ed. Porto Alegre: Gráfica da UFRGS, p. 56-65. 2017.

SSAB - Swedish Steel AB [homepage on the Internet] 2021. [cited 2023 Dez 18]. Available from: <https://www.ssab.com/Products/Brands/Strenx/Products/>.

ULSAB. UltraLight Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concepts (ULSAB-AVC). [homepage on the Internet] 2017. [cited 2023 Dez 18]: <http://www.worldautosteel.org/projects/ulsab-avc-2/>.

USIMINAS. Usinas Siderurgicas de Minas Gerais. [homepage on the Internet] 2021. [cited 2023 Dez 20]. Available from: <https://www.usiminas.com/catalogos/>.

VORKOV, V. *et al.* Experimental Investigation of Large Radius Air Bending. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V. 92. p. 3553-3569. 2017.

VORKOV, V. *et al.* Analytical Prediction of Large Radius Bending by Circular Approximation. Journal of Manufacturing Science and Engineering. V. 140, nº. 12. p. 121010-0 a 121010-12. 2018.

YANG, X. *et al.* Investigating springback in bending of advanced high-strength steel, Part II Springback prediction. STAMPING J January/February:8-9, 2011.