



BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HAYDÉE ALINE ZAMORA

**ANÁLISE DO RETORNO ELÁSTICO NO PROCESSO DE DOBRAMENTO EM
CHAPAS DE AÇO AISI304**

Porto Alegre

2023

HAYDÉE ALINE ZAMORA

**ANÁLISE DO RETORNO ELÁSTICO NO PROCESSO DE DOBRAMENTO EM
CHAPAS DE AÇO AISI304**

Projeto de Pesquisa de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Ritter dos Reis, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. Ms. Eng. Manoel Henrique Alves

Porto Alegre

2023

Dedico este trabalho a Helena,
Vicente, Benício, Filipo e Olívia,
razões de minha existência.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer, pela disponibilização de todos os recursos necessários à realização deste trabalho, com o fornecimento, inclusive, das amostras utilizadas nos ensaios, e a liberação de uso do LdTM, bem como pelas importantes sugestões transmitidas.

Ao Prof. Dr. Eng. Halston Mozetic, pela preparação dos corpos de prova e pelos incontáveis auxílios prestados durante toda a pesquisa.

Ao Laboratório de Transformações Mecânicas da UFRGS (LdTM), na pessoa do Senhor César Henrique Rocha Silveira pelo auxílio na execução dos ensaios.

Ao colega Ms. Eng. Rafael Pandolfo da Rocha, por todos os esclarecimentos técnicos, atenção, conselhos, disponibilidade e ensinamentos repassados de forma tão prestativa, bem como pelo coleguismo demonstrado durante toda a realização deste trabalho.

Ao Prof. Ms. Eng. Manoel Henrique Alves, pelo apoio e conhecimento transmitidos durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

O Aço AISI304 é a liga metálica inoxidável mais utilizada em todo o mundo, conhecido como 18-8, o Aço AISI304 possui 18% de Cromo e 8% Níquel em sua composição química. Esta combinação de elementos químicos o posiciona dentro da família austenítica. As principais características deles são a elevada resistência à corrosão, boa resistência à altas temperaturas e às temperaturas criogênicas; baixo custo de manutenção, com vida útil muito longa. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência dos parâmetros de dobra, especificamente o efeito do deslocamento do punção no retorno elástico em tiras de aço de alta resistência. Foram realizados, quatro tipos de ensaios de dobramento (raios de 3mm, 6mm, 9mm e 13mm), diferenciando-se entre si pelos raios de dobramento utilizados, tendo por objetivo comparar os resultados previstos na literatura, e se os ensaios realizados atendiam às previsões dos resultados estabelecidos pelas equações de Lange, Moro e Auras e Schaeffer. Sendo observado que a equação de Moro e Auras atendeu de forma mais satisfatória as previsões matemáticas quando comparadas com os dados experimentais obtidos.

Palavras-Chave: Aços de alta resistência. Dobramento de chapas. Retorno elástico.

LISTA DE SÍMBOLOS

- K fator de retorno elástico [adimensional]
- s_0 espessura da chapa analisada [mm]
- E módulo de elasticidade do material [GPa]
- b largura da chapa analisada [mm]
- M_z momento fletor ou de dobramento aplicado à seção transversal da chapa, localizado no eixo Z [N.mm]
- r raio de dobra [mm]
- α_0 ângulo de dobra ou de abertura projetado para chapa [graus]
- α_f ângulo de dobra ou de abertura efetivamente obtido para chapa [graus]
- W distância entre os apoios da chapa, constantes da matriz em V [mm]
- r_p raio do punção [mm]
- μ coeficiente de atrito do material [adimensional]
- β_1 ângulo externo projetado para chapa [graus]
- σ_e tensão de escoamento convencional para o material [MPa]
- F_d força necessária para realizar o processo de dobra [N]
- h deslocamento do punção no sentido vertical, durante o dobramento [mm]
- r_{min} raio mínimo de dobra exigido para chapa, sem que ocorra trincas [mm]
- σ_R tensão de resistência à tração [MPa]
- Al % percentual de alongamento máximo de um material, quando submetido a ensaios de tração [%]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	5
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	5
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA	6
1.3.1	Objetivo geral	6
1.3.2	Objetivos específicos	6
1.4	JUSTIFICATIVA	7
2	REVISÃO DE LITERATURA	8
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	13
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	13
3.2	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS	16
3.2.1	Definição operacional das variáveis	16
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
4.1	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	17
4.1.1	Tensões no processo de dobramento	17
4.1.2	Força de dobramento experimental	17
5	CONCLUSÃO	23
	REFERÊNCIAS	24

1 INTRODUÇÃO

O Aço AISI304 é a liga metálica inoxidável mais utilizada em todo o mundo, conhecido como 18-8, o Aço AISI304 possui 18% de Cromo e 8% Níquel em sua composição química. Esta combinação de elementos químicos o posiciona dentro da família austenítica. O Brasil consome mais de 350 mil toneladas de aço inoxidável por ano, embora o consumo per capita seja de apenas 1,72Kg/ano/habitante (ano 2018, fonte Abnox). Deste consumo, cerca de 60% representam o Aço AISI304. As principais características deles são a elevada resistência à corrosão, boa resistência à altas temperaturas e às temperaturas criogênicas; baixo custo de manutenção, com vida útil muito longa. É ideal para ambientes que exigem higiene e limpeza (indústria alimentícia e cirúrgica).

Registre-se que o Aço AISI304 apresenta melhor comportamento em usinagem, resultando em maior produtividade e menor consumo de ferramentas durante a usinagem das barras.

É de referir que, segundo Araújo (2007), o retorno elástico, ou *springback*, efeito caracterizado quando uma peça conformada assume parcialmente sua posição inicial, pode ser diagnosticado e sanada através de simulação numérica ou empiricamente pela correção das dimensões da matriz e/ou da peça.

O estudo desse tema se concentra em chapas finas.

Oliveira *et al* (2013) acrescentam que, quando submetidas à processo de dobramento, as chapas metálicas desenvolvem tensões elásticas e plásticas no seu interior, ao passo que na região da linha neutra os carregamentos internos, se restringem apenas a tensões elásticas. A concentração desse tipo de esforço na linha neutra, quando da remoção da carga aplicada pela ferramenta (punção), colabora para o retorno significativo à posição assumida pela chapa, o que, por conseguinte, relaciona o fenômeno de recuperação elástica com a peculiaridade de que nos processos de dobramento, os materiais não são totalmente conformados plasticamente.

Frees (2017) afirma que durante o processo de dobramento semiguiado, para qualquer ângulo de dobra e raios da punção, o retorno elástico comporta-se de maneira indiferente. Assim nota-se que tal como aludido por Araújo (2007), o *springback* é mais

evidente e mais acentuado em chapas finas, motivo pelo qual ressalta-se a importância de se adotar o estudo do fenômeno de recuperação elástica para esse tipo de chapa, com a finalidade de promover mais informações aos setores.

De uma forma geral, em dobramentos, os estudos de Sales (2013) reforçam as asserções de Martins e Schaeffer (2015) e Zanluchi (2014), no sentido de que o retorno elástico se desenvolve em maior proporção com o aumento do ângulo de dobra, o que evidencia que, quanto maior a tensão de escoamento, maior a propensão de desenvolver retorno elástico.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Percebe-se a relevância do presente estudo quando da manifestação de Boff, Zanluchi e Schaeffer (2013), da qual consta que, quando da confecção de ferramentas para processo de conformação, mais especificamente para aços avançados de alta resistência, é necessário correlacionar os aspectos do processo, geometria do ferramental e inclusive do comportamento do material empregado. Dessa forma, infere-se que é imprescindível averiguar a existência e, conseqüentemente, a aplicabilidade de formulações teóricas que possam prever, eficazmente, o comportamento elástico do material de acordo com o processo de conformação empregado, reduzindo assim o desperdício com a confecção de matrizes e de punções metálicas para prevê-los através do método de tentativa e erro.

Quando adotados em processos de conformação, há poucas pesquisas e, conseqüentemente, um número reduzido de informações acerca do seu comportamento. À vista disso, a pesquisa se voltará ao Aço Austenítico AISI304, com o objetivo de contribuir com resultados teóricos e práticos que demonstrem o comportamento deste aço durante o processo de dobramento, mais precisamente, quanto ao retorno elástico, fenômeno este que é indesejável, sendo responsável pelo desperdício de matérias primas no setor industrial.

Em vista dos temas anteriormente abordados, este Trabalho se propõe a buscar por respostas para a seguinte questão de pesquisa: Quais os parâmetros significativos a serem quantificados quando de uma análise do retorno elástico no processo de dobramento livre em chapas de aço AISI304?

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O trabalho compreende a apuração dos resultados obtidos dos procedimentos físicos de dobramento de 40 amostras do Aço AISI304, sendo os trabalhos realizados no Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, com a utilização de Máquina de Prensa Hidráulica EMIC de 600 toneladas.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais são apresentados a seguir, mais especificamente no que tange ao fenômeno de recuperação elástica, podendo fomentar e incentivar a realização de novas pesquisas acadêmicas na área de conformação mecânica, a qual afigura-se de elevada importância no desenvolvimento industrial.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo desse estudo é correlacionar a influência dos parâmetros do processo de dobramento livre com o desenvolvimento do retorno elástico, baseando-se, assim, em pesquisas constantes da literatura dos processos de conformação de chapas.

1.3.2 Objetivos específicos

O objetivo principal da pesquisa está em estabelecer correlações existentes entre o fenômeno de recuperação elástica no aço AISI304 e as alterações de carregamento aplicado, deslocamento efetuado pela punção durante o processo de dobramento, além de verificar a existência de alterações nas microestruturas desses materiais.

Os objetivos específicos são os que seguem:

- Analisar, por meio da premissa de raio mínimo defendida por Moro e Auras (2006), a possibilidade de ocorrer fraturas às amostras de aços, motivada pela dimensão, efetivamente assumida pelos raios de dobra;
- Mensurar, por meio da equação adotada por Lange (1990), a força de dobra aplicada em cada processo de dobramento proposto, com a finalidade de compará-la à força descrita pela máquina e, conseqüentemente, averiguar a aplicabilidade da equação aos ensaios realizados.

- Quantificar, por intermédio da utilização da equação prevista por Schaeffer (2016), o fator de retorno elástico previsto para o aço AISI304.

1.4 JUSTIFICATIVA

Como se sabe, na confecção de materiais nas indústrias alimentícia, hospitalar, química, criogênica, de destilarias de etanol, de tubos e tanques em geral, de estampagem geral, profunda, e de precisão, as quais fazem uso do Aço AISI304, podem ocorrer sobras indesejáveis de materiais, com a confecção de matrizes e de punções metálicos.

No ponto, o estudo busca analisar e encontrar maneiras mais eficientes de compreender o comportamento do retorno elástico do aço nos processos de dobramento adotado pelas citadas indústrias em seus processos de fabricação, com o intuito de minimizar desperdícios.

Vale citar que Zanluchi e Schaeffer (2016) abordaram em seus estudos a necessidade de correlação de aspectos inerentes ao processo de fabricação, quando da confecção de ferramentas para processos de conformação, revelando-se, à vista disso, de considerável importância o estudo do comportamento elástico do material metálico empregado nesses procedimentos.

E diga-se que Araújo (2007) estuda de maneira mais específica as questões físicas relacionadas ao conceito de retorno elástico, destacando a importância de dominar, nos mais diversos processos de confecção de materiais em aço, o comportamento elástico deste material, tratando de questões como a energia elástica residual e a tendência de retorno à posição de equilíbrio do aço em ferramentas utilizadas nos processos de conformação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste ponto serão discriminadas referências bibliográficas e conceitos fundamentais, com o objetivo de descrever os processos de conformação mecânica e, ao mesmo tempo, o comportamento mecânico do material empregado na presente pesquisa.

Os processos de conformação dos materiais metálicos podem ser estruturados de duas maneiras, quais sejam, de forma mecânica ou metalúrgica. Quando da aplicação de tensões externas com a ação de uma determinada temperatura que não permita a liquefação do material metálico, temos caracterizado o processo mecânico. Quando a temperatura e/ou as tensões externas aplicadas promovem a liquefação do metal ou a difusão das partículas metálicas, denomina-se processo metalúrgico (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Classificado como um subgrupo dos processos de fabricação, os processos de conformação mecânica, segundo Aparício, Coelho e Barbosa (2002) conformam materiais metálicos por meio da deformação plástica.

Bresciani Filho *et al.* (2011) acrescentam que os processos mecânicos de conformação englobam duas divisões: processos de conformação plástica e de conformação por usinagem.

Quando as tensões aplicadas ao metal são inferiores ao limite de resistência à ruptura, denomina-se processo de conformação plástica. Por sua vez, quando as tensões exercidas superam o limite de resistência à ruptura, tem-se um processo de conformação por usinagem.

Segundo Ferreira (2010), na análise dos parâmetros que influenciam na plasticidade dos materiais, destaca que, à medida que o tamanho do grão do material é reduzido, aumenta-se a plasticidade, redução esta que pode ser atenuado pelo controle de temperatura.

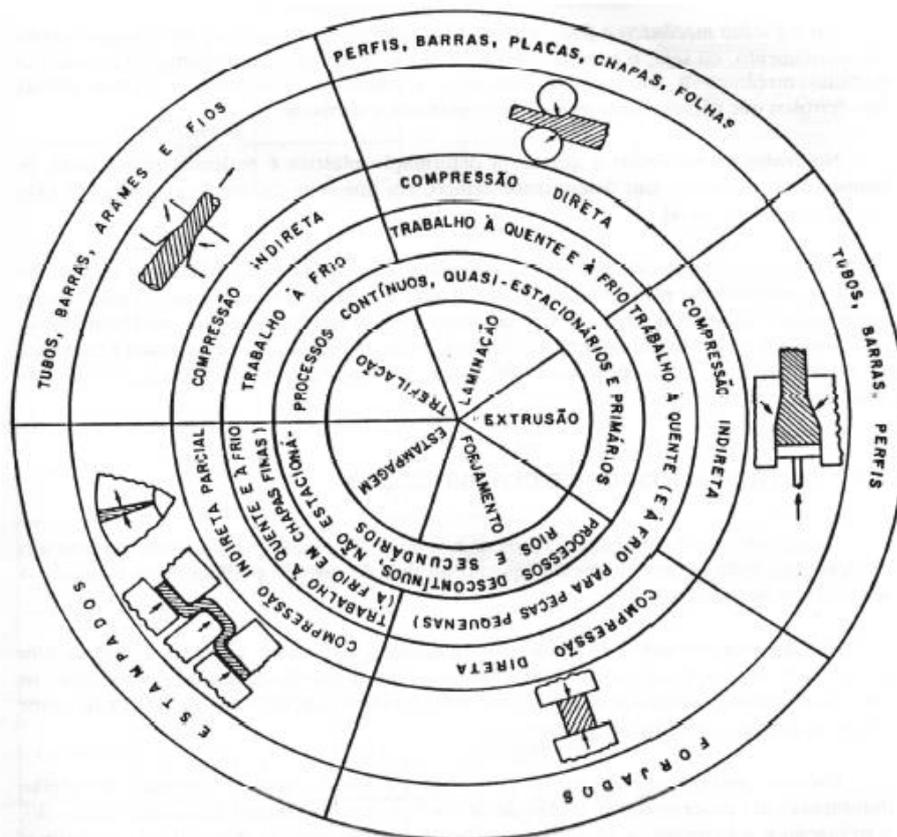
Os processos de conformação mecânica podem ser classificados quanto aos esforços aplicados:

Processo de compressão direta; processo de compressão indireta; processo de tração; processo de dobramento; e processo de cisalhamento. Considera-se, assim, os processos de laminação e forjamento compressão direta. Enquanto a trefilação, extrusão, e estampagem profunda são denominados processo de compressão indireta. Os processos de tração são caracterizados pelo envolvimento de chapas ao redor de uma matriz, em função da aplicação de esforços de tração. Tais processos divergem do de dobramento,

uma vez que este é caracterizado pela aplicação de momentos de dobramento à chapa (CHIAVERINI, 1986).

A título elucidativo, vale trazer à colação a Figura 1 abaixo, a qual apresenta uma síntese dos processos de conformação mecânica em geral:

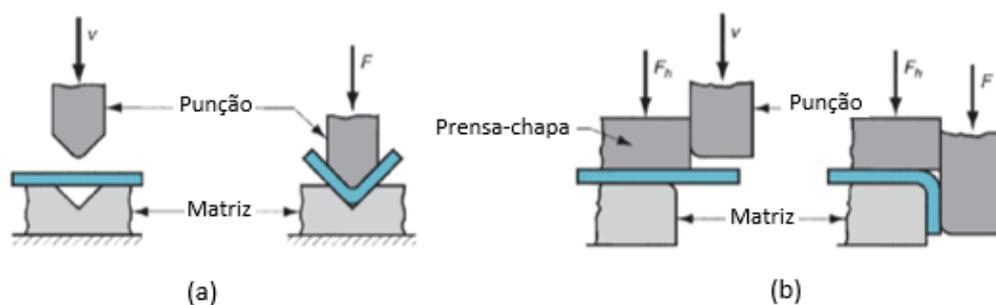
Figura 1 - Representação dos processos de conformação mecânica em geral



Fonte: Oliveira (2015)

Na figura 2, abaixo, vê-se o mecanismo utilizado nos dobramentos em “V” e “L”, com a atuação do punção sobre cada amostra de aço adotada no ensaio.

Figura 2 - Processos de dobramento: a) em matriz "V", b) em "L", ou a 90°



Fonte: Correa (2017)

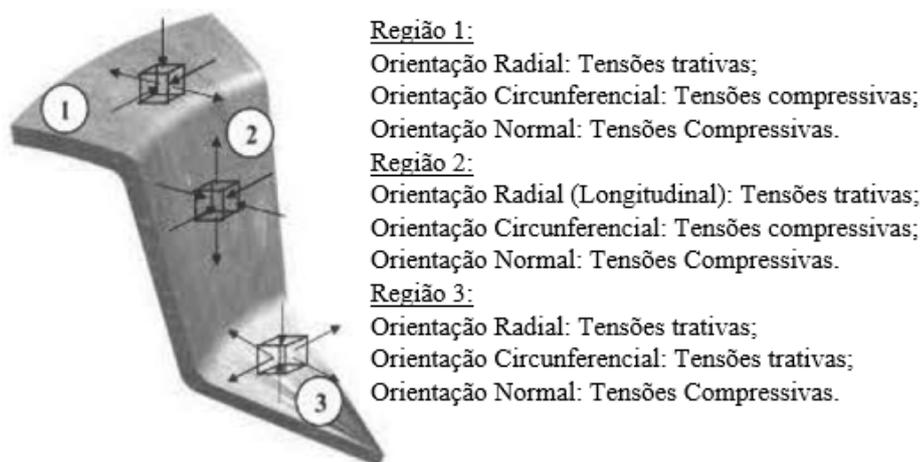
Outro aspecto a merecer nota, diz respeito a estampagem de metais. Este processo se constitui em uma operação mecânica, também utilizado no presente trabalho. Podemos definir estampagem como sendo um processo de conformação de chapas, realizado geralmente a frio, que compreende um conjunto de operações por meio das quais uma chapa é submetida de modo a adquirir uma nova forma geométrica, plana ou oca. É o processo utilizado para fazer com que uma chapa plana (*blank*) adquira a forma de uma matriz (fêmea), imposta pela ação de um punção (macho). O processo é empregado na fabricação de peças de uso diário (para-lamas, portas de carro, banheiras, rodas, etc.).

A estampagem compreende as seguintes operações: corte, dobramento e encurvamento, estampagem profunda e prensagem. A prensagem pode ser plena ou compacta, quando o material é levado à fluência (prensagem entre moldes, como acabamento de peças já prensadas); ou prensagem côncava de peças em chapas (placas).

Para melhorar o rendimento do processo, é importante que se tenha boa lubrificação. Com isso reduzem-se os esforços de conformação e o desgaste do material.

Abaixo, na Figura 9, vê-se a distribuição das tensões durante o processo de estampagem:

Figura 9 - Distribuição das tensões durante o processo de estampagem.



Fonte: Ferreira (2010)

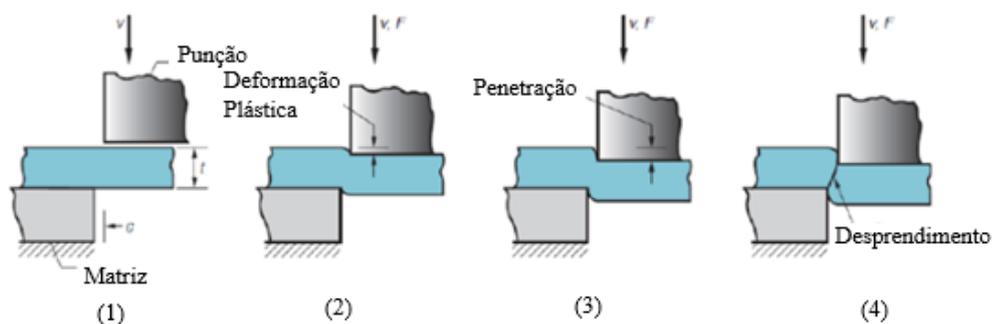
Deve ser ressaltado que o processo de estampagem pertence a dois grupos principais: o grupo principal dos processos de conformação e o grupo principal dos processos de separação, de acordo com a norma DIN 8580. Nesse aspecto, percebe-se que os processos de conformação são caracterizados pela alteração da forma e das dimensões da peça, sem retirar ou adicionar material, a exemplo dos processos de

embutimento profundo, dobra e repuxamento. Por sua vez, os processos de separação removem material, como, por exemplo, os processos de cisalhamento e corte fino (SCHAEFFER, 2009).

O processo de corte constitui técnica empregada no preparo das chapas de aço para exame e teste, segundo Schaeffer (2016) o processo de corte é executado através do movimento relativo de punção de corte contra uma matriz, objetivando, assim, realizar um furo na chapa com a mesma forma de punção e/ou separar o componente da chapa. Durante a atuação da força pela punção, surge a deformação elástica na chapa, ao passo que, em função da folga entre a matriz e a punção, a chapa arqueia-se sob o punção, etapa essa que é rapidamente transformada em deformação plástica e, posteriormente, em cisalhamento, resultando, assim, em trincas ao longo do material e, conseqüentemente, na separação da sua respectiva parcela.

A Figura 10, abaixo, sintetiza as referidas etapas do processo de corte.

Figura 10 - Etapas do processo de corte



Fonte: Correa (2017)

Por fim, segundo Gausmann (2017), para atender a determinadas especificações de projeto, a fabricação de perfis metálicos com pequenos raios de dobra pode ocasionar fissuras na região externa destes materiais. Tal fenômeno é justificado pela elevada taxa de deformação na região onde ocorre a dobra, podendo ser ainda mais crítico com um raio inferior à espessura da chapa, ligado a um ângulo de dobramento inferior a 90° .

Segundo Dieter (1981), o raio mínimo de dobramento, definido com o limite de conformação para os materiais, representa um valor mínimo de raio que um determinado perfil metálico deve apresentar posteriormente ao processo de dobra, com o intuito de evitar o surgimento de trincas na superfície externa.

Moro e Auras (2006) afirmam que o raio mínimo de dobramento está correlacionado à variação de espessura da chapa e ao aumento das tensões desenvolvidas na região tracionada. Assim, destacam que com um raio de dimensão inferior à dimensão do raio mínimo, haverá redução da espessura da chapa e, inclusive o rompimento das fibras da região tracionada, dado que as tensões acometidas na região tracionada aumentam a medida em que o raio de dobra é reduzido. Para a determinação do raio mínimo de dobra é necessário considerar a espessura da chapa, bem como o percentual de alongamento máximo da chapa, quando submetida a ensaios de tração.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa em tela consiste em ensaios de natureza eminentemente prática realizados em âmbito laboratorial, sobre amostras de aço utilizado em diversos segmentos industriais, a fim de buscar, por meio da observação sistemática dos resultados obtidos, e, por conseguinte, da aferição e estudos destes mesmos dados, meios concretos e economicamente viáveis destinados à redução de custos nos diversos processos industriais.

No âmbito do presente trabalho, apresenta-se abaixo as amostras e o maquinário utilizado para a realização dos ensaios no Laboratório de Transformação Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS em 26/04/2022.

A Figura 3, abaixo, mostra o processo de dobramento em “V” de uma amostra de Aço AISI304 sobre uma matriz.

Figura 3 - Processo de dobramento livre em rolete.



Fonte: a Autora (2022)

Já a Figura 4 evidencia o punção adotado nos ensaios de dobramento realizados no Laboratório de Conformação Mecânica da UFRGS.

Figura 4 – Punção utilizada em um dos ensaios



Fonte: a Autora (2022)

A Figura 5, abaixo, contém os punções utilizados nos ensaios de dobramento, tendo, respectivamente, estruturas físicas para provocarem deformações nas amostras de aço em ângulos de 3° , 6° , 9° e 13° .

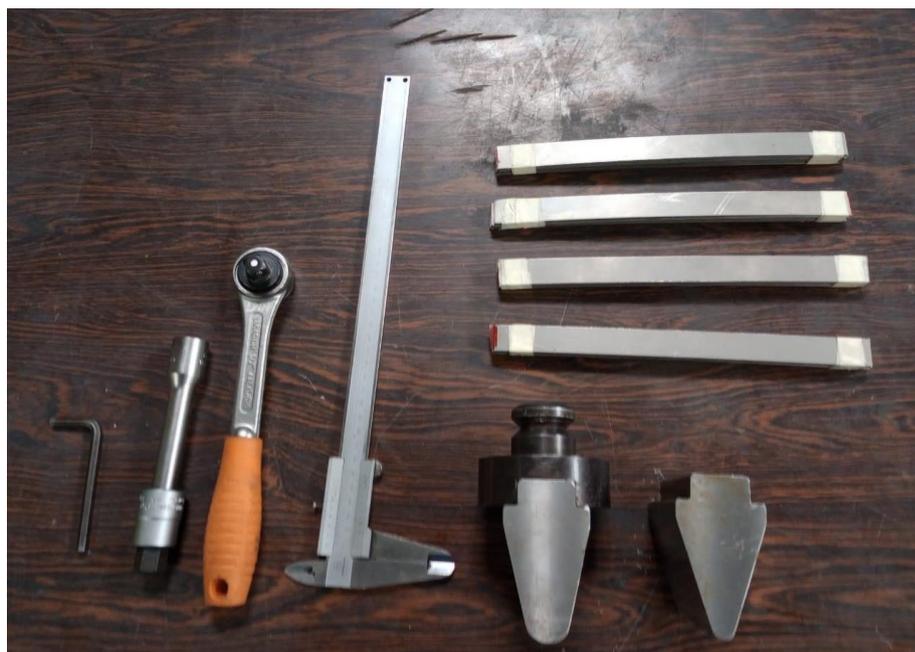
Figura 5 – Punções empregados nos ensaios de dobramento



Fonte: a Autora (2022)

A Figura 6 apresenta uma série de ferramentas empregadas nos processos de aferição, medição e preparo das amostras de aço utilizadas nos ensaios de dobramento.

Figura 6 – Ferramental utilizado nos ensaios



Fonte: a Autora (2022)

Temos, na Figura 7, a representação fotográfica geral do Laboratório de Conformação Mecânica da UFRGS, no qual os ensaios foram realizados.

Figura 7 – Laboratório de Conformação Mecânica da UFRGS



Fonte: a Autora (2022)

A Figura 8 constitui a prensa hidráulica empregada nos ensaios de dobramento, tendo como potencial nominal uma força de 600 toneladas.

Figura 8 – Prensa Hidráulica EMIC de 600 toneladas



Fonte: a Autora (2022)

3.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS

3.2.1 Definição operacional das variáveis

A pesquisa realizada apresenta as seguintes variáveis:

- Extensão e propriedades estruturais das fraturas ocorridas nas amostras de aços, motivada pela dimensão, efetivamente assumida pelos raios de dobra;
- Força de dobra aplicada em cada processo de dobramento proposto, com a finalidade de compará-la à força descrita pela máquina e, conseqüentemente, averiguar a aplicabilidade da equação aos ensaios realizados;
- Alterações acometidas às microestruturas dos aços adotados, mais precisamente, nas zonas de tração e compressão;
- Fator de retorno elástico previsto para o aço AISI304.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

4.1.1 Tensões no processo de dobramento

Preliminarmente, apresenta-se, abaixo, as equações utilizadas para a obtenção dos resultados referentes ao retorno elástico dos procedimentos realizados.

Nesse passo, é importante referir que a tensão de escoamento (k_f) correspondente a tensão máxima (σ_{max}) do material no instante da deformação relativa (ε) máxima, pode ser calculada utilizando a Equação 1 (EARY, 1974 apud SCHAEFFER, 2022):

Equação 1

$$k_f = \sigma_{max} (1 + \varepsilon)$$

Já a Equação 2, de LUDWIG-HOLLOMONN, é utilizada para determinar a tensão de escoamento (k_f), onde “C” representa o coeficiente de resistência do material e “n” é o coeficiente ou índice de encruamento. A partir desta equação, é possível determinar o comportamento plástico do material (FLIMM, 1996 apud SCHAEFFER, 2022):

Equação 2

$$k_f = C * \varphi^n$$

4.1.2 Força de dobramento experimental

Com relação à força de dobramento (F_d), exigida para o processo de dobramento, é necessário correlacionar os parâmetros utilizados neste processo, o raio do punção (r_p), o ângulo antes do retorno elástico (α_i), a espessura da chapa (s), a largura da chapa (b), a Distância entre os apoios de dobramento (w), a tensão de escoamento convencional do material (σ_{esc}) e o coeficiente de atrito (μ) (ROCHA, R., RIFFEL, M., MOZETIC, H., SCHAEFFER, L., (2022).

Sendo assim, temos que a Equação 3 descreve a relação entre estes parâmetros e para o cálculo da Força de dobra (F_d), se considera o coeficiente de atrito (μ) igual a 0,1 (LANGE, 1990 apud HEINEN, 2021):

Equação 3

$$F_d = \frac{\sigma_e . b . s^2 . \cos(\alpha_i/2) . (\cos(\alpha_i/2) + (\mu . \text{sen}(\alpha_i/2)))}{w - (2 . (r_p + s) . \text{sen}(\alpha_i/2)) + (\mu . s . \cos(\alpha_i/2))}$$

Por fim, DIETER (1981) e KALPAKJIAN (2016) descrevem que quanto maior for o limite de escoamento, maior será a recuperação elástica do material. Também descrevem que o fator de retorno elástico (K) pode ser definido pela razão entre o ângulo de dobramento antes do retorno elástico (α_i), o raio antes do retorno elástico (r_i) com o ângulo após o retorno elástico (α_f) e o raio após o retorno elástico (r_f), associados a espessura (s) da chapa, conforme expressado pela Equação 4 (SCHAEFFER, 2022).

Equação 4

$$K = 1 - \frac{2 \cdot r_i + s}{2 \cdot r_f + s} = \frac{\alpha_f}{\alpha_i}$$

Por sua vez, e considerando que as conclusões do presente trabalho se basearam na equação de Moro e Auras (2006), cumpre, pois, reproduzir a citada equação, segundo a qual, para a 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 %), conforme descreve a Equação 5:

Equação 5

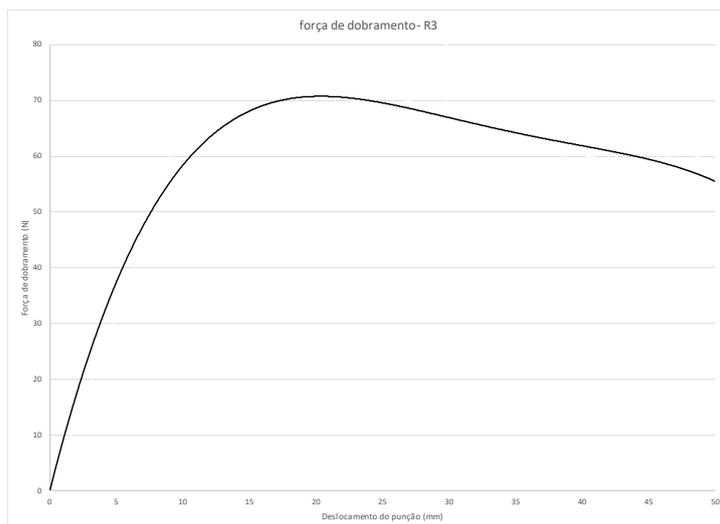
$$r_{min} = \frac{50 \cdot s_0}{Al \%} - \frac{s_0}{2}$$

Já no âmbito de análise dos dados, abaixo, na Tabela 1, temos os resultados do ensaio de dobramento livre para o aço AISI304, tendo sido utilizado os raios de punção (rp) de 3 mm, 6 mm, 9 mm e 13 mm:

Tabela 1 – Retorno elástico das amostras

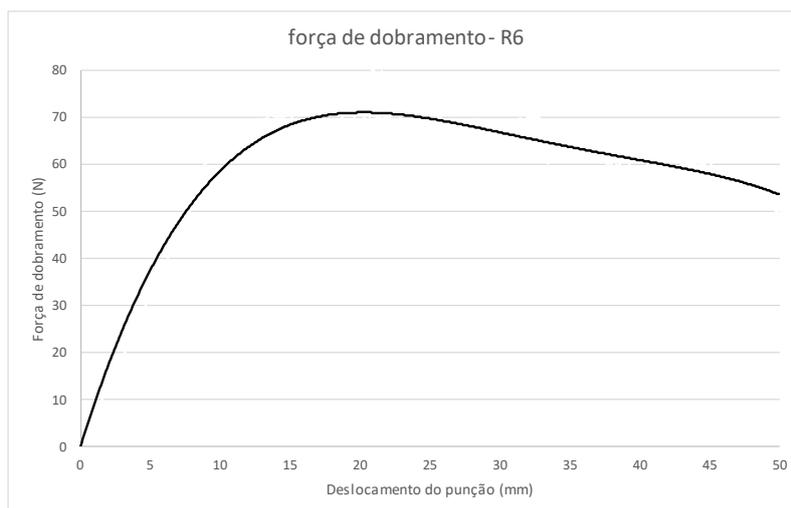
	Ângulo final das amostras (°)			
	raio 3 mm	raio 6 mm	raio 9 mm	raio 13 mm
AMOSTRA 1	135	132	131	129
AMOSTRA 2	134	131	130	130
AMOSTRA 3	135	130	131	128
AMOSTRA 4	135	134	130	129
AMOSTRA 5	133	130	130	130
MÉDIA	134,4	131,4	130,4	129,2
RETORNO ELÁSTICO (K)	0,670	0,685	0,690	0,697

Figura 11 – Força de dobramento referente ao raio de 3 mm



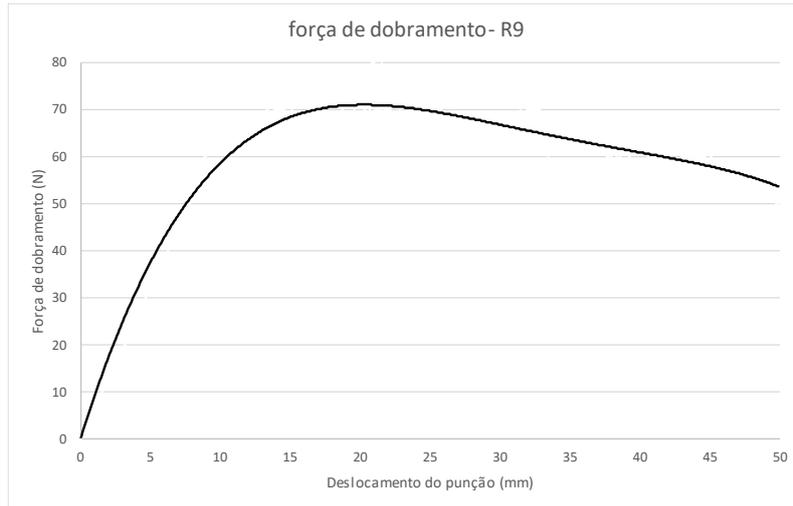
A Figura 11, com utilização de raio de punção de 3mm, notamos que a curvatura da força de dobramento durante o deslocamento do punção atingiu força máxima de aproximadamente 70 N, com declínio da força em relação ao deslocamento logo após o atingimento deste patamar de força.

Figura 12 – Força de dobramento referente ao raio de 6 mm



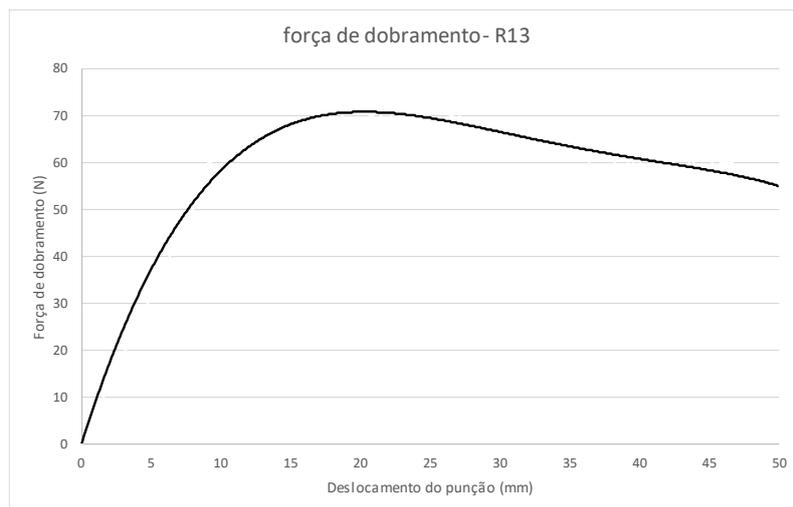
A Figura 13, com emprego de raio de punção de 9mm, podemos notar que a curvatura da força de dobramento durante o deslocamento do punção atingiu força máxima de aproximadamente 70 N, com declínio da força em relação ao deslocamento logo após o atingimento deste patamar de força.

Figura 13 – Força de dobramento referente ao raio de 9 mm



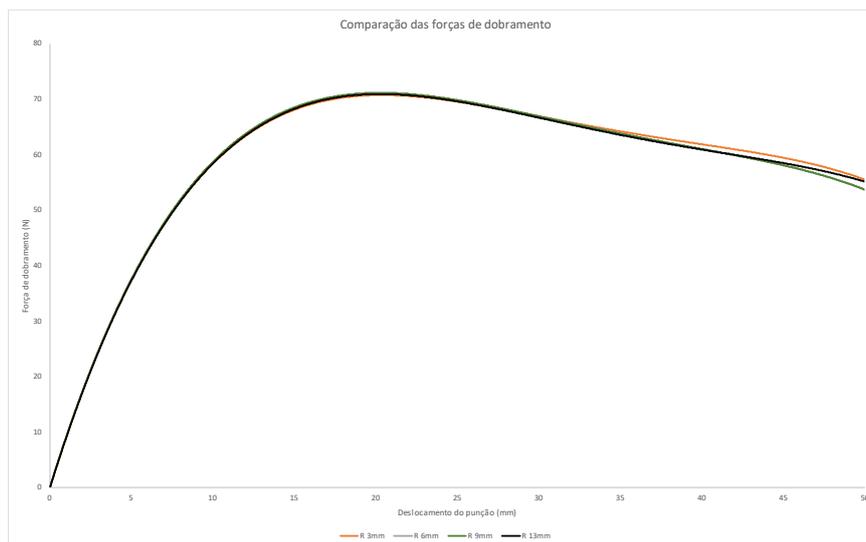
A Figura 14, com emprego de raio de punção de 13mm, da mesma forma que os exemplos anteriores, vemos que a curvatura da força de dobramento durante o deslocamento do punção atingiu força máxima de aproximadamente 70 N, com declínio da força em relação ao deslocamento logo após o atingimento deste patamar de força.

Figura 14 – Força de dobramento referente ao raio de 13 mm



Já a Figura 15, abaixo, demonstra a sobreposição das forças de dobramento de forma comparativa, a fim de possibilitar o exame comparativo com relação aos raios utilizados nos procedimentos de dobramento.

Figura 15 – Comparação das forças de dobramento



Considerando que o fator de retorno elástico pode ser mensurado pelo quociente entre o ângulo de projeto, ou o ângulo de abertura, e o ângulo em que a peça permanece efetivamente ao término do processo de dobra (Equação 4), foi determinado o fator de retorno elástico efetivo para as amostras de Aço AISI304, o que pode ser averiguado na Tabela 1.

Com base nos dados obtidos, é possível constatar que o raio médio alcançou o valor de 131,35mm (Tabela 1), não se encontrando abaixo do raio mínimo de dobra. Dessa forma, a hipótese de surgimento de fraturas ou trincas restou refutada, tal como comprovado, inclusive, pelos resultados experimentais.

Também é possível observar que as forças de dobramento, em todos os raios utilizados, apresentaram, basicamente, o mesmo ápice de força, concentrada em torno de 70 N, conforme evidencia a Figura 15, e que o declínio de força empregada começa a partir deste ponto, mas com uma menor quociente de variação (Força/Deslocamento), se comparada com o início do processo, em que as forças empregadas, quando comparadas com o deslocamento, aumentam de forma mais acentuada, e apesar de o deslocamento da punção permanecer constante. O que indica, comparativamente às amostras utilizadas, a existência de pouca variabilidade de forças relacionadas com os raios utilizados, conforme demonstrado no gráfico da Figura 15.

Aparentemente, o intervalo de raios utilizados não evidenciaram variações significativas das forças de dobramento, antes o contrário, pois, como já dito anteriormente, as forças permaneceram idênticas, em relação aos deslocamentos, sugerindo que variações de força maiores que as obtidas na pesquisa elaborada necessitariam de

deslocamentos maiores ou, e de forma mais assertiva, de espessuras maiores das amostras, o que, ainda assim, tenderiam a apresentar a mesma relação Força/Deslocamento, já que as características intrínsecas dos materiais utilizados como corpos de provas não seriam alteradas significativamente apenas com a alteração de suas espessuras relativas.

O retorno elástico, da mesma forma, parece não ter sofrido alterações significativas, em uma análise mais ampla, em função da alteração dos raios e espessuras das amostras, já que a diferença obtida entre o maior e o menor retorno elástico alcançou o valor de apenas 0,027K ($0,697 - 0,67 = 0,027$).

5 CONCLUSÃO

Com relação à equação de Lange (1990, apud FREES, 2017), representada pela Equação 3, observou-se que, quando utilizado o dobramento livre, os resultados não parecem apresentar conexão com os dados experimentais obtidos, em razão da considerável diferença da força aplicada pelo equipamento utilizado no procedimento de dobramento. É possível observar, como antes já dito, a partir de um deslocamento de 20mm, para todas as amostras, o decréscimo da força empregada.

Também podemos afirmar que há uma tendência no aumento do fator de retorno elástico (K), conforme aumenta-se o raio do punção (rp), sendo possível concluir que a equação de Lange poderia ser aplicada ao Aço AISI304, já que os dados produzidos se revelaram coerentes com os cálculos extraídos da equação de Lange (1990, apud FREES, 2017).

Quanto à Equação 1, vale ressaltar que o objetivo desta seção, além de determinar o fator de retorno elástico efetivo, versa sobre a obtenção do fator elástico por meio da equação de Schaeffer (2022), a fim de compará-los e, concomitantemente, avaliar a aplicabilidade desta equação ao Aço AISI304. Quando comparados ao fator de retorno elástico efetivo de cada processo de dobra realizado, constatou-se que os resultados encontrados por intermédio desta equação apresentam uma inexatidão estimada em no máximo 10%, o que, a depender da aplicação industrial do Aço AISI304, não seria viável a utilização desta equação.

Já acerca da premissa de raio mínimo defendida por Moro e Auras (2006), a possibilidade de ocorrer fraturas às amostras de aços, motivada pela dimensão, efetivamente assumida pelos raios de dobra, podemos concluir os valores coletados apresentam máxima coerência com os dados produzidos entre os experimentos e os cálculos obtidos pela equação de Moro e Auras, Equação 5, sendo constatado que os valores de raios de dobra aferidos encontram-se acima do valor de raio mínimo, não havendo constatação de fraturas ou trincas à superfície das amostras utilizadas, devendo, por isso, ser refutada tal hipótese nos processos de dobramento.

Sendo assim, é possível concluir que a equação de Moro e Auras (2006) atende às características do Aço AISI304.

REFERÊNCIAS

- APARÍCIO, C. A.; COELHO, R. T.; BARBOSA, C. A.. **Desenvolvimento de Simulação de Processo de Forjamento Usando o Método de Elementos Finitos**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2., 2002, João Pessoa. Anais... . PB: Abcm, 2002.
- ARAÚJO, D. D: **Estudo do *Springback* na Conformação Mecânica de Segmentos Torodais em Chapas Grossas**. 2007. 155 f. Dissertação – Curso de Engenharia de Materiais, Rede Temática Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO 7438**: Materiais metálicos – Ensaio de Dobramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BOFF, U; ZANLUCHI, J. J. D.; SHAEFFER, L.. **A Influência da Lubrificação no Retorno Elástico em Tiras Conformadas de Aço**. SEMINÁRIO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA DO IFSUL, 2., 2013, Sapucaia do Sul. II Seminário. RS: Inovtec, 2013.
- BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica dos metais**. 6 ed (1 digital). Campinas: EPUSP, 2011.
- CHENIN FILHO, R. A.. **Estudo da Fratura de Aços de Nova Geração Através da Variação de Pressão no Prensa-Chapas**. 2011. 148 f. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia Mecânica Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- CHIAVERINI, V.. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1986. 2 v.
- CORREA, J. M.. **Análise do retorno elástico no dobramento de chapas metálicas**. 2017. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário Ritter dos Reis, Porto Alegre, 2017.
- DIETER, G. E.. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. Tradução de Antônio Sergio de Souza e Silva, Luiz Henrique de Almeida, Paulo Emilio Valadao de Miranda.
- 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.
- 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.
- GAUSMANN, F.. **A Influência da fibra neutra no desenvolvimento do planificado**. 2017. 59 f. Monografia – Curso de Engenharia Industrial, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2017.

HEINEN, H. A. **Estudo do retorno elástico para processos de dobramento à frio de chapas do aço ASTM A36**. Dissertação de mestrado em engenharia de minas, metalúrgica e materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.

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.

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.

OLIVEIRA, R. A. *et al.* **A Influência da Força do Prensa-Chapas no Retorno Elástico de Tiras de Aço de Alta Resistência**. Corte & Conformação de Metais, Porto Alegre, agosto de 2013.

ROCHA, R., 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, Abr. 2022.

SALES, V.. **Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. 3. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009.

SCHAEFFER, L., ROCHA, A. **Conformação Mecânica – Cálculos aplicados em processos de fabricação**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.

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

ZANLUCHI, J. J. D.. **Avaliação de retorno elástico para processos de estampagem à frio dos aços bifásicos DP600 e DP800**. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

