

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JONATAN AUGUSTO DA SILVA

PROCESSO DE DOBRAMENTO A FRIO DE CHAPAS
FINAS METÁLICAS: Análises por elementos finitos,
experimentos e uma proposta para a compensação do
retorno elástico.

SÃO CARLOS -SP
2022

JONATAN AUGUSTO DA SILVA

PROCESSO DE DOBRAMENTO A FRIO DE CHAPAS FINAS METÁLICAS: Análises por elementos finitos, experimentos e uma proposta para a compensação do retorno elástico.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Sérgio Henrique Evangelista

São Carlos-SP
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Jonatan Augusto da Silva, realizada em 26/07/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Sergio Henrique Evangelista (UFSCar)

Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta (UFSCar)

Prof. Dr. Ernesto Massaroppi Junior (USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Cilene e aos meus filhos Gustavo e Gabriel que me apoiam desde sempre e aceitam com paciência meus desafios, além dos meus pais José Carlos e Rosana e para minha irmã Janaina que sempre me incentivam e apoiam.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos familiares que me apoiam em minhas decisões e desafios.

Agradeço ao orientador meu professor orientador Sérgio Henrique Evangelista pelo apoio, paciência e ensinamentos transmitidos.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEMec) que tantos conhecimentos transmitem com uma maestria exemplar.

Agradeço ao meu amigo e parceiro de trabalho e de mestrado Tony Emersom Marim, por todas as conversas técnicas e de motivação que fizeram este trabalho prosseguir desde o início.

À equipe da Escola de Engenharia de São Carlos na USP, Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan, Prof. Dr. Renato Goulart Javinevicius e ao Diretor Ademir Redondo da escola Senai João Martins Coube de Bauru pelos ensaios de materiais.

Ao Diretor Paulo Sérgio Sassi, aos Coordenadores Roberval Cathólico, Anderson Campanharo, José Aparecido Barbosa, Fábio Eduardo Costa e aos Professores da escola Senai Henrique Lupo de Araraquara pelo apoio durante todo o trabalho, incluindo na disponibilização dos equipamentos para a realização dos ensaios e procedimentos de medição.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEMec) Prof^ª. Dr^ª. - Ing. Andrea Madeira Kliauga, Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki, Prof. Dr. Vitor Ramos Franco, Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa, Prof. Dr. Luis Antônio de Oliveira Araújo, Prof. Dr. José Rubert Benaque por proporcionarem o compartilhamento de seus conhecimentos.

Ao PPGEMec, ao DEMa e ao Coordenador Prof. Dr. -Ing. Carlos Heiji Hirata Ventura pelo apoio.

À CAPES pelo apoio financeiro ao programa.

“Fazer o melhor que você pode nas condições atuais enquanto não tem condições de fazer
melhor ainda”...

Mario Sérgio Cortella.

RESUMO

Operações de conformação mecânica são desenvolvidas em diversas aplicações nos ambientes industriais e são divididas em operações mecânicas diferentes estando entre elas corte, dobra, forjamento. Dentre os diversos processos, a operação de dobramento que embora seja bastante simples apresenta um fenômeno que aparece ao ter sua carga aliviada durante a operação, conhecido como o retorno elástico (*springback*). O fenômeno do retorno elástico, faz com que o material retorne de maneira parcial ao seu estado inicial, sendo este um problema de grande relevância no ambiente industrial proporcionando uma lacuna de investigação na busca de minimizar seus impactos. O objetivo deste trabalho é propor alternativas de compensar o comportamento elástico das chapas finas de alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3) durante o dobramento sugerindo possíveis alterações no decorrer do processo como a aplicação de forças e ajustes nas ferramentas e moldes. A metodologia aplicada consiste em estudar experimentalmente o comportamento do retorno elástico durante a aplicação de dobras e comparar seus resultados com recursos de análise numérica por elementos finitos utilizando o *software* Abaqus®. Por meio da análise dos resultados e estudos da literatura foi possível propor alterações no processo de maneira que os efeitos negativos do surgimento do *springback* foram minimizados, elaborando desta forma variações estendidas para uma gama de operações de dobras utilizando os mesmos materiais. Foi possível concluir que a proposta de compensação apresentou resultados satisfatórios nas análises numéricas e experimentais utilizando a solução proposta no decorrer do trabalho, que ao inserir alterações na geometria das matrizes proporcionaram resultados de dobra aproximados aos valores esperados.

Palavras-chave: Retorno elástico. Elementos finitos. Dobramento de chapas.

ABSTRACT

Mechanical forming operations are developed in several applications in industrial environments and are divided into some different operations, including cutting, bending, forging. Among the various processes, the bending operation, although quite simple, presents a phenomenon that appears when the load is relieved, and this phenomenon is known as springback. The springback, which is also known as elastic material return, causes the material to partially return to its initial state that it presented before the bending process, which is a problem of great relevance in the industrial environment, which provides a gap research in order to minimize its impacts. The goal of this work is to propose alternatives to predict the elastic behavior of aluminum sheets when undergoing the bending process, suggesting possible changes during the process, such as the application of forces and adjustments to tools and molds. The applied methodology consists of experimentally studying the behavior of the springback during the application of folds in aluminum plates and comparing its results using numerical simulation resources with finite elements applying the Abaqus® *software* for the modeling and simulation of the process. A metallographic analysis must be performed before and another after the test to present the study of the microstructural variation in line with the springback behavior. Through the analysis of these, it is expected to be possible to propose significant changes in the process so that the negative effects of the emergence of springback are minimized, thus elaborating extended variations for a range of fold operations using the same materials. It was possible to conclude that the compensation proposal presented satisfactory results in the numerical and experimental analyzes using the solution proposed in the course of the work, which al inserting changes in the geometry of the matrices provided bending results close to the expected values.

Keyword: Springback. Finite Elements. Sheet Metal Bending.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tensões aplicadas em um cubo elementar.	4
Figura 2 - Esquema simplificado da classificação dos processos de conformação.	6
Figura 3 – Curva de engenharia relacionando tensão σ e deformação ε	8
Figura 4 – Comparação entre a tensão verdadeira e a tensão de engenharia.	9
Figura 5 – Operações de Conformação Mecânica.	11
Figura 6 – Dobramento livre.	12
Figura 7 – Conformação em “L”	12
Figura 8 – Processo de dobramento em “U”	13
Figura 9 – Representação das forças atuantes e representação da linha neutra	13
Figura 10 – Termos empregados para expressar a geometria no dobramento	14
Figura 11 – Representação de uma peça dobrada e linha neutra	14
Figura 12 – Etapas do dobramento em “V”	16
Figura 13 – Variáveis no dobramento	18
Figura 14 - Esquema mostrando que a magnitude do springback é proporcional à tensão.	20
Figura 15 – Rotação da seção em torno da linha neutra durante o retorno elástico.	21
Figura 16 – Terminologia do retorno elástico no dobramento.	23
Figura 17 – Fluxograma de planejamento do trabalho.	29
Figura 18 – Dimensões padronizadas para o ensaio de tração conforme norma ABNT NBR ISO 6892.	30
Figura 19 – Confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração.	30
Figura 20 – Ensaio de tração	31
Figura 21 – (a) Medidas principais do punção com raio de 1,0mm e ângulo de abertura de 90°. (b) Punção com raio de 1,0mm e ângulo de abertura de 90°.	32
Figura 22 –(a) Medidas principais do punção com raio de 5,5mm e ângulo de abertura de 90°. (b) Punção com raio de 5,5mm e ângulo de abertura de 90°.	32
Figura 23 – (a) Medidas principais da matriz. (b) Matriz produzida com ângulo de abertura de 90°.	33
Figura 24 – Montagem entre a matriz e o punção com raio de 1,0mm.	33
Figura 25 – Dobradeira Hidráulica Newton PDH - 7525.	34
Figura 26 – Arduino UNOR3.	34
Figura 27 – Célula de carga.	36
Figura 28 – Ponte de Wheastone utilizando células de carga.	36
Figura 29 – Instalação das células de carga, punção e matriz na dobradeira	37
Figura 30 – Módulo amplificador HX711.	37
Figura 31 – Montagem entre o Arduino, módulo HX711 e Células de carga.	38
Figura 32 – Medidora tridimensional TESA micro-hite 3D Bugnon 38.	39
Figura 33 – <i>Scanner</i> Shinning 3D EinScan Pro 2x Plus.	40
Figura 34 – Matriz caracterizada por meio de escaneamento 3D.	40
Figura 35 – Elemento CPE4 representado pelo elemento 1.	42
Figura 36 – Aplicação de simetria no modelo utilizado na análise numérica.	43
Figura 37 – Montagem do conjunto de punção de raio 5,0mm, matriz e chapa.	44
Figura 38 – Curva Tensão x Deformação de engenharia para o alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3)	47
Figura 39 – Curva de tensão de verdadeira x deformação verdadeira do alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3).	48

Figura 40 – Comparação entre a Curva de tensão e deformação de engenharia e as curvas de tensão e deformação verdadeiras curva calculada pelo modelo de Hollomon para alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3).....	48
Figura 41 – Chapa de 0,4mm dobrada com ferramenta de raio 1,0 mm.....	49
Figura 42 – Chapa de 0,4 mm dobrada com ferramenta de raio 5,5 mm.....	50
Figura 43 – Força x Deslocamento no experimento.	51
Figura 44 –Retorno elástico com matriz e punção de 90°.	52
Figura 45 – Curva de tensão e deformação verdadeira para o dobramento de ângulo 90° e variando o raio da ponta do punção.	53
Figura 46 – Comparação das curvas de tensão verdadeira x deformação verdadeira nas chapas dobrada com matriz 90° utilizando diferentes raios.....	54
Figura 47 – Comparação entre as curvas de tensão verdadeira x deformação verdadeira nas chapas dobrada com matriz 90° e diferentes raios cos a curva de tensão verdadeira x deformação verdadeira do ensaio de tração.	55
Figura 48 – Ângulo previsto por compensação de retorno elástico utilizando punção e matriz com ângulos e raios variados.....	59
Figura 49 – Curva de tensão verdadeira x deformação verdadeira na chapa dobrada.....	61
Figura 50 – Matriz com ângulo de 122° e raio de 0,4 mm como proposta de compensação do retorno elástico.	65
Figura 51 – (a) Projeto de matriz com ângulo de 87° e raio de 6,0 mm como proposta de compensação do retorno elástico. (b) Punção e Matriz com raio de 6,0mm e ângulo de abertura de 87°.	66
Figura 52 – Chapa dobrada com ângulo de 122° e raio de 0,4 mm como proposta de compensação do retorno elástico.....	67
Figura 53 – Chapa dobrada com ângulo de 87° e raio de 6,0 mm como proposta de compensação do retorno elástico.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planejamento experimental dos casos implementados.	45
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3)	49
Tabela 3 - Medição tridimensional das chapas dobradas.....	50
Tabela 4 – Medição tridimensional das ferramentas	50
Tabela 5 – Força de dobramento	50
Tabela 6 – Ângulos de dobra e retorno elástico com matriz e punção de 90°.	51
Tabela 7 – Casos estudados utilizando a proposta de compensação de retorno elástico por cálculos, análise numérica e experimentos (Condições NA não foram implementadas).	56
Tabela 8 – Comparação dos resultados de raios de dobra calculados de forma analítica e por análise numérica.....	57
Tabela 9 – Comparação entre o raio de dobra final calculado de forma analítica e por análise numérica.....	60
Tabela 10 – Casos estudados utilizando a proposta de compensação de retorno elástico por análise numérica e experimentos.....	60
Tabela 11 – Valores Teóricos, experimentais e por elementos finitos para o ângulo de dobra e para o fator k	63
Tabela 12 –Erros obtidos para o ângulo de dobramento (valores calculados em relação aos experimentais, Eq. 26).	63
Tabela 13 – Medidas da matriz/Punção com raio de 0,4mm e 122°.	65
Tabela 14 – Medidas da matriz/Punção com raio de 0,4 mm e 122°.	66
Tabela 15 – Valores das análises numéricas para o ângulo de dobra e para o fator k depois da proposta de compensação.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UFSCAR	Universidade Federal de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
CAD	Desenho auxiliado por computador (Computer Aided Design)
CAM	Manufatura auxiliada por computador (Computer Aided Manufacturing)
FEM	Método dos elementos finitos (Finite Element Method)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	[mm ²]	Área
A_0	[mm ²]	Área inicial
A_i	[mm ²]	Área instantânea
A_a	[mm ²]	Área aparente
b	[mm]	Largura da chapa
c	[mm]	Comprimento da linha neutra da chapa
E	[GPa]	Módulo de elasticidade
E'	[GPa]	Módulo de elasticidade ajustado
e_0	[mm]	Comprimento das fibras externas da dobra
e_i	[mm]	Comprimento das fibras internas da dobra
F	[N]	Força
F_n	[N]	Força Normal
F_t	[N]	Força tangencial
K	[MPa]	Coeficiente de resistência do material
k	[-]	Coeficiente retorno elástico
l_i	[mm]	Comprimento instantâneo
l_0	[mm]	Comprimento inicial
n	[-]	Índice de encruamento
R	[mm]	Raio de dobramento
R_i	[mm]	Raio inicial de dobra
R_p	[mm]	Raio do punção
R_n	[mm]	Raio neutro
R_f	[mm]	Raio final de obra
t	[mm]	Espessura da chapa
ν	[-]	Coeficiente de <i>Poisson</i>
σ	[MPa]	Tensão normal
σ_v	[MPa]	Tensão verdadeira
σ_0	[MPa]	Tensão de escoamento
σ_0'	[MPa]	Tensão de escoamento ajustada
σ_1	[MPa]	Tensão principal 1

σ_{11}	[MPa]	Tensão normal na direção 11
σ_{12}	[MPa]	Tensão de cisalhamento na direção 12
σ_2	[MPa]	Tensão principal 2
σ_{22}	[MPa]	Tensão normal na direção 22
σ_{23}	[MPa]	Tensão de cisalhamento na direção 23
σ_3	[MPa]	Tensão principal 3
σ_{31}	[MPa]	Tensão de cisalhamento na direção 31
σ_{33}	[MPa]	Tensão normal na direção 33
ε	[-]	Deformação específica
ε_v	[-]	Deformação verdadeira
Δ_l	[mm]	Varição do comprimento
α	[°]	Ângulo de dobramento
τ	[MPa]	Tensão de cisalhamento na condição de atrito

GLOSSÁRIO

Springback – Retorno elástico

Blank – Material bruto conforme condição de aquisição do fornecedor

Flexform – Processo de conformação mecânica com aplicação de fluídos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2 REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE	3
2.1 CONCEITOS DE TENSÃO DE UM CORPO.....	3
2.1 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA	5
2.1.1 Ensaio de Tração	7
2.1.2 Curva tensão x deformação	7
2.2 PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR DOBRAMENTO	10
2.2.1 Dobramento em “V”	15
2.2.2 Momento Fletor no Dobramento	17
2.3 RETORNO ELÁSTICO	20
2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAIS	29
3.1.1 Ensaio de Tração	29
3.1.2 Curva tensão x deformação verdadeira	31
3.2 EXPERIMENTO DE DOBRAMENTO.....	31
3.2.1 Projeto e construção de matrizes e punções	31
3.2.2 Dobradeira CNC	33
3.2.3 Medição de forças de dobramento	34
3.2.4 Medição Tridimensional	39
3.2.5 Escaneamento 3D	39
3.3 ANÁLISE NUMÉRICA.....	40
3.3.1 Geometria do modelo adotado	41
3.3.2 Deformações do modelo computacional	41
3.3.3 Condições de contorno	43
3.3.4 Hardware utilizado para simulação dos modelos	44
3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	45
4 RESULTADOS	47
4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	47
4.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES TRIDIMENSIONAIS DO EXPERIMENTO	49

4.3	FORÇAS DE DOBRA EXPERIMENTAIS.....	50
4.4	ÂNGULO PREVISTO POR ANÁLISES NUMÉRICAS.....	51
4.5	COMPENSAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO	55
4.6	COMPARAÇÃO ENTRE A SIMULAÇÃO E O EXPERIMENTO.....	62
5	CONCLUSÕES.....	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A – Sistema de Medição de forças com Arduino.....	76

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de produtos por meio da aplicação de processos de conformação mecânica esteve em crescente evolução durante várias décadas e o impacto deste desenvolvimento para as indústrias de bens e serviços representa grande parcela de seus esforços, buscando melhoria nos processos com redução de custos e melhorias nas características mecânicas (ZANLUCHI, 2014).

Os processos de conformação mecânica apresentam as características de deformar o material por meio da aplicação de esforços externos proporcionando desta forma a modificação da geometria com operações de corte, dobra ou modelamento do material utilizando ferramentas e matrizes específicas para realizar estes procedimentos sem grandes desperdícios de material. Este procedimento de trabalho é realizado utilizando o material em seu estado sólido (BRESCIANI *et al.* 2011).

Dentre os diversos processos de conformação mecânica aplicados no âmbito industrial, um dos processos de grande relevância consiste na operação da dobra de uma chapa, que mesmo sendo amplamente utilizada pode apresentar alguns problemas técnicos no decorrer de sua implementação (FARSI e AREZOO, 2011).

Diversos fatores podem ser observados no processo de dobramento e dentre eles o retorno elástico, conhecido como *Springback* está entre os fenômenos indesejáveis que podem surgir durante o desenvolvimento do processo de dobra. Este fenômeno faz com que a chapa submetida ao processo de conformação retorne parcialmente ao estágio inicial.

A maneira de tratar os efeitos do retorno elástico continua sendo um desafio de forma a prever o comportamento do material, e este trabalho visa abordar como verificar o possível comportamento mecânico em casos de dobramento de chapa metálica. Nisto, aplicam-se simulações numéricas por elementos finitos e experimentos de maneira a propor alterações no processo que tragam alterações significativas no resultado dos produtos.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em propor estratégias de compensação

do retorno elástico no dobramento de chapas finas metálicas em um estudo de caso, por meio de análises experimentais, equações clássicas da literatura e por elementos finitos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Visando atingir o objetivo geral proposto nesse trabalho foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Construir matrizes e punções para realização dos experimentos;
- Elaboração de análises numéricas para validar os ensaios experimentais;
- Realizar medições tridimensionais;
- Elaborar estratégias para compensação do retorno elástico;
- Construir novas matrizes e punções com a aplicação da proposta de compensação do retorno elástico;
- Realizar os experimentos posteriormente à alteração da matriz;
- Comparar por meios de medições tridimensionais resultados e verificar a eficiências das alterações propostas.

2 REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE

Nessa seção é apresentada uma pesquisa bibliográfica abordando os conceitos básicos sobre o tema e o estado da arte. São apresentados conceitos sobre tensão e deformação, processos de dobramento e análises por elementos finitos.

2.1 CONCEITOS DE TENSÃO DE UM CORPO

Quando um corpo está submetido a uma força externa que está apresentada de maneira estática ou dinâmica ou que de alguma maneira proporciona algum tipo de variação de carga mesmo que de maneira lenta durante um tempo de aplicação recebe o nome de tensão interna (CALLISTER, 2008).

O processo de conformação mecânica aparece como um resultado da aplicação de uma carga externa de maneira a vencer a resistência mecânica do material, gerando uma transformação permanente na geometria.

Beer *et al.* (2011) afirmam que os conceitos de tensão não permitem definir de maneira clara se uma determinada carga aplicada a um material será o suficiente para verificar quais efeitos podem surgir a partir de sua aplicação. A medida de tensão unidimensional σ que pode ser determinada pela relação entre a carga F à que o material está submetido e a área de sua seção transversal dada por A , relação esta que pode ser verificada na equação 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

A deformação unidimensional que um corpo sofre quando submetido aos esforços mecânicos está apresentada na equação 2 (CALLISTER, 2008).

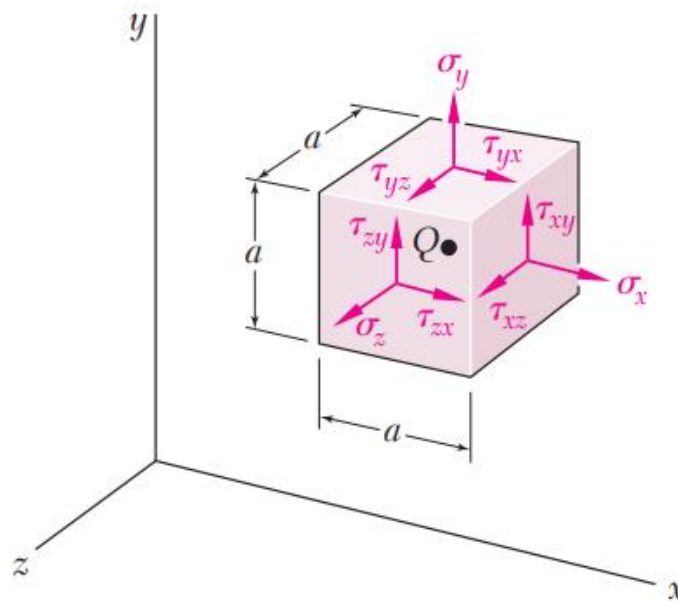
$$\varepsilon = \frac{(l_i - l_0)}{l_i} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

No caso, l_i é considerado o comprimento instantâneo do corpo de prova e l_0 consiste no comprimento inicial do corpo antes da aplicação da carga. Já a $\Delta l = (l_i - l_0)$ equivale ao valor da variação instantânea do comprimento.

Podem agir em um corpo dois tipos de forças, sendo que uma delas tem relação

com o volume do corpo, como as forças gravitacionais por exemplo. O outro tipo de força está relacionado com a área da superfície, sendo definida como tensão. Beer *et al.* (2011) apresentam a definição de estado de tensão como sendo as forças por unidade de área em uma pequena parcela do corpo, representada pela superfície das faces de um cubo elementar ou infinitesimal, conforme é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Tensões aplicadas em um cubo elementar.



Fonte: BEER *et al.*, 2008

O estado de tensão no ponto analisado pode ser descrito por meio da expressão de nove componentes apresentado na Figura 1 e descrito pela equação 3.

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

Segundo Araújo (2008), nas análises dos estados de tensão realizadas em chapas finas, como é o caso deste trabalho, as tensões aplicadas no cubo da figura acima podem ser simplificadas para o estado biaxial representado pelos valores de σ_x , σ_y e τ_{xy} se o plano de análise da chapa for o xy e sendo aceita a premissa de deformações planas associadas à análise.

2.1 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Os processos de deformação mecânica alteram as propriedades plásticas do material de maneira que seu volume e a sua massa sejam conservados com alteração somente na geometria apresentada (DIETER, 1986).

Bresciani *et al.* (2011) contribuem ao afirmar que para este tipo de conformação por meio de deformação mecânica o processo ocorre sempre aplicando forças externas no material mantido em seu estado sólido.

Segundo Almeida (2017), conformar um material pode ser definido do ponto de vista de seus resultados como os processos que deformam plasticamente tiras, blocos ou chapas alcançando sua região de deformações plásticas.

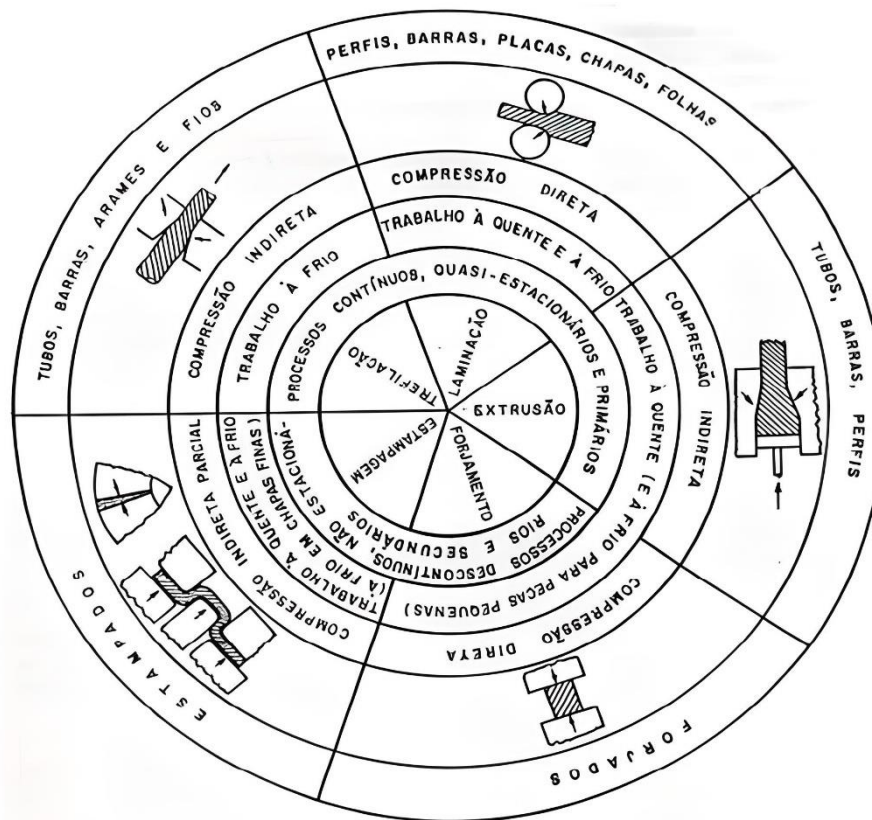
Bresciani *et al.* (2011) também classificam os processos de conformação mecânica quanto ao tipo de esforço que é aplicado ao processo, bem como a temperatura de trabalho no decorrer da conformação podendo variar entre conformação mecânica a quente e a frio, em que o trabalho é considerado a quente quando esta temperatura supera a temperatura de recristalização do material em questão.

Abaixo é possível verificar alguns exemplos das classificações da aplicação de força no processo de conformação mecânica:

- Compressão direta.
- Compressão indireta.
- Conformação por tração.
- Cisalhamento
- Flexão

Um esquema simplificado da aplicação destes processos acima citados pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema simplificado da classificação dos processos de conformação.



Fonte – BRESCIANI *et al.*, 2011.

Dentre os diversos processo de conformação mecânica, é possível destacar segundo Bresciani *et al.* (2011) os mais utilizados nas aplicações em geral, sendo eles:

- Laminação
- Trefilação
- Extrusão
- Dobramento
- Corte

Para auxiliar no desenvolvimento do projeto e da escolha de qual processo de conformação deve ser aplicado e qual o comportamento o material deve apresentar, Schaeffer (2004) diz que ensaios mecânicos com os materiais utilizados são fundamentais. Dentre os diversos ensaios disponíveis, os ensaios de tração, as curvas de escoamento, índices de anisotropia e as curvas que apresentam os limites máximos de deformação são apresentados por Schaeffer (2004) como os principais

ensaios a serem realizados no material utilizado nos experimentos de dobramento a frio com chapas metálicas.

2.1.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é muito utilizado nos estudos de materiais e projetos de engenharia, pois apresentam informações básicas sobre as características mecânicas aplicadas nas estruturas e auxiliam na escolha dos materiais mais indicados para o projeto solicitado (SCHIMITZ, 2013).

Este ensaio consiste na aplicação de forças uniaxiais no corpo de prova proporcionando seu alongamento e crescendo a carga até atingir a ruptura do material, conseguindo desta forma identificar como o corpo se comporta na tração bem como verificar em valores da aplicação de forças o material se rompe (PERINI, 2008).

Um dos principais parâmetros obtidos por meio do ensaio de tração é o Módulo de Young (E), que fornece a rigidez com que o material se comporta na região elástica e que é apresentado pela equação 4.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Ao observar a equação 4, o Módulo de Young é representado por E , σ é a tensão uniaxial aplicada e a deformação uniaxial é apresentada pelo valor de ε . O valor de E também pode ser chamado de módulo de elasticidade conforme apresentado por Silva (2012).

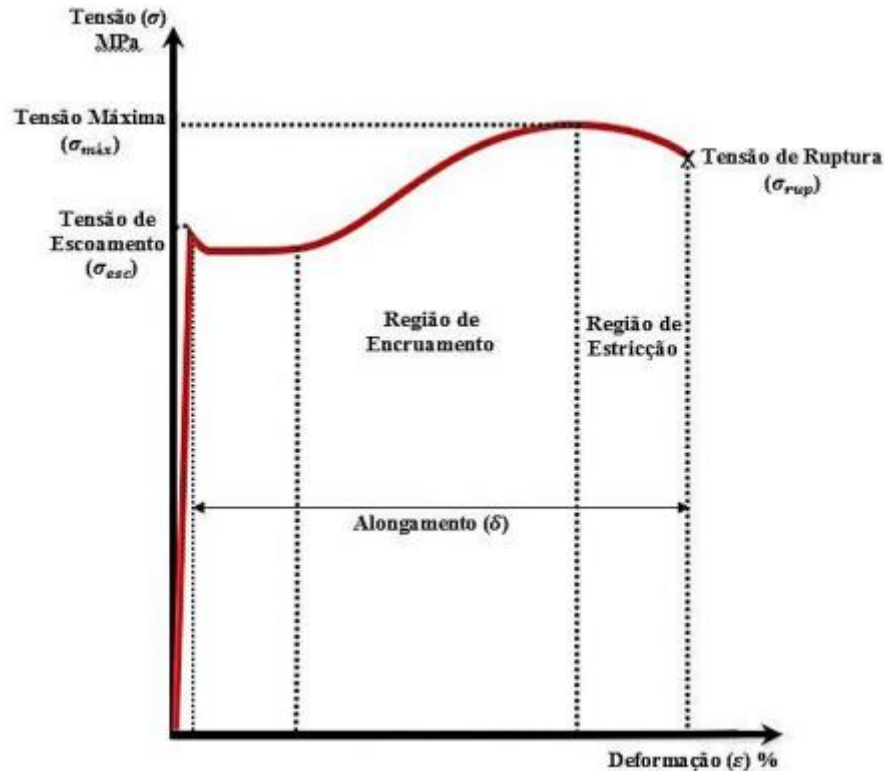
2.1.2 Curva tensão x deformação

Segundo Martins *et al.* (2016) os deslocamentos existentes na deformação plástica são controlados por sua interação com outros obstáculos e a deformação é governada por estes deslocamentos e por sua recuperação dinâmica.

As variáveis identificadas nos ensaios de tração são importantes para ressaltar as características dos materiais e verificar sua resistência para aplicação em

operações de conformação. Os valores do ensaio de tração podem ser apresentados graficamente, conforme mostra a figura 3.

Figura 3 – Curva de engenharia relacionando tensão σ e deformação ε .



Fonte: FREES, 2017.

Segundo Schaeffer (2009), a tensão de escoamento (σ_{esc}) apresenta o limite entre a região elástica do material e a região inicial de encruamento, sendo desta maneira um dos parâmetros mais importantes identificados a partir do ensaio de tração.

Outro parâmetro relevante para Schaeffer (2009) é a tensão máxima (σ_{max}) que mostra a maior resistência que o material submetido ao ensaio pode suportar antes de entrar em uma região de instabilidade e seguir até a tensão de ruptura.

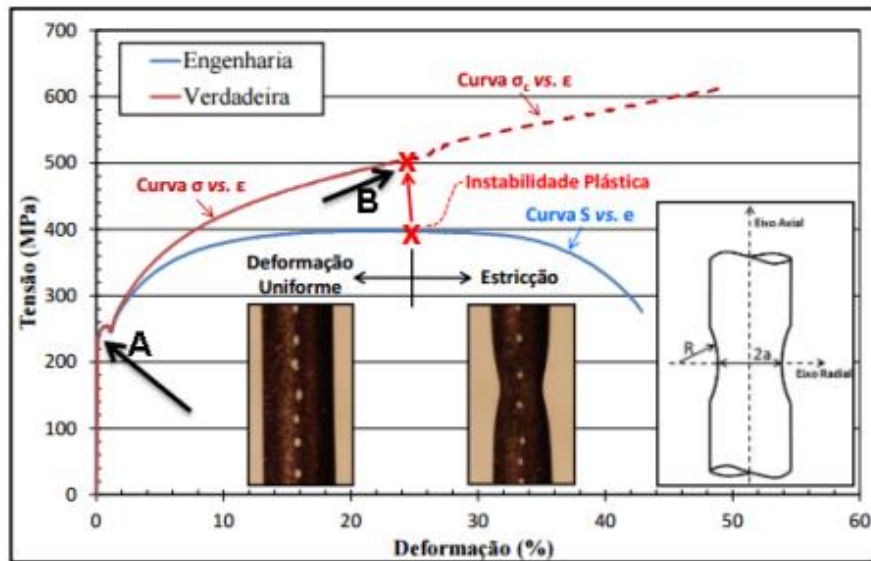
A tensão de engenharia (σ) é definida pela equação 5,

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

em que a tensão é representada por σ , a força aplicada no corpo de prova é a F e a área inicial do corpo de prova é apresentada pelo valor de A_0 .

Os dados obtidos no ensaio de tração são considerados valores de engenharia, enquanto outros cálculos e *softwares* utilizam em suas bases os valores de tensão verdadeiras. A comparação teórica existente entre as curvas é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Comparação entre a tensão verdadeira e a tensão de engenharia.



Fonte: MARTINS *et al.*, 2016

Quando a tensão do material ultrapassa os valores da tensão limite de resistência ao escoamento ocorre o início da fase de estricção que se desenvolve até o rompimento do corpo de prova, pois acontece uma rápida perda de resistência do material.

Segundo Callister (2008) a tensão verdadeira é definida como sendo relação entre a força aplicada na operação e a área instantânea (A_i) do material que está sofrendo a deformação, conforme apresentado na equação 6.

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i} \quad (6)$$

Callister (2008) apresenta a equação 7 como outra relação para a demonstração da deformação verdadeira. As equações 6 e 7 são válidas para processos em que não ocorra variação de volume.

$$\varepsilon_v = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad (7)$$

Ao relacionar as tensões verdadeiras (σ_v) e deformações verdadeiras (ε_v) e de engenharia são obtidas as equações 8 e 9.

$$\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (8)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon) \quad (9)$$

A partir dos valores de tensão e deformação verdadeiras é possível a realização de um ajuste da curva para que seja considerada somente da parcela plástica do ensaio de tração. Para esta aplicação de correção de curva alguns modelos podem ser utilizados como o modelo de *Hollomon*, *Swift* e *Ludwig* (EKAPUTRA, 2016). O modelo escolhido para aplicação no trabalho foi o de *Hollomon* apresentado na equação 10 (HOLLOMON, 1945).

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (10)$$

No modelo de *Hollomon* o valor de K consiste no coeficiente de resistência, ε representa a deformação plástica e n o coeficiente de encruamento, sendo que estes valores são específicos para cada material e obtidos por meio de ensaios experimentais (OSMAN *et al.*, 2010).

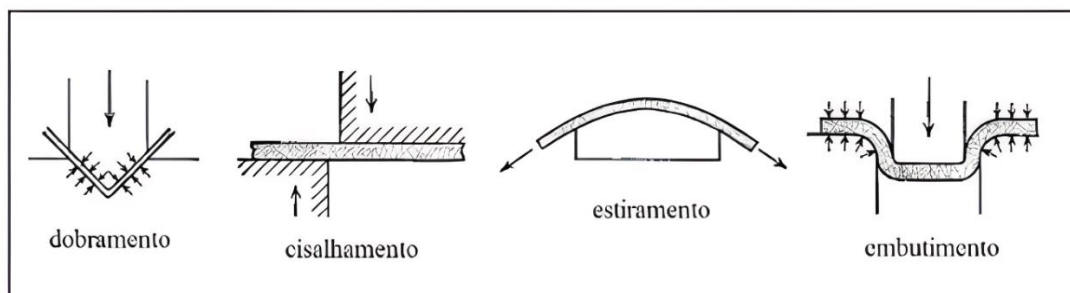
2.2 PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR DOBRAMENTO

Os processos de estampagem se encontram presentes de forma massiva na indústria de manufatura, pois apresentam diversas características vantajosas em sua aplicação. Dentre estas características destacam-se a variedade de formas que podem ser aplicadas, elevada capacidade de produção, controle dimensional realizado de forma simples além de um tempo reduzido aplicado no processamento das peças (DIETER, 1981; BRESCIANI *et al.*, 2011).

Dieter (1981) classifica de forma simplificada os processos que podem ser aplicados durante a estampagem de um material como sendo possíveis variações de operação de dobramento, cisalhamento, estiramento e embutimento, conforme pode

ser verificado na Figura 5.

Figura 5 – Operações de Conformação Mecânica.



Fonte: DIETER, 1981.

A matéria prima básica para a aplicação de qualquer um dos processos de conformação citados acima consiste em um material produzido em formato de chapas, em geral provenientes de processos de laminação, em que a chapa é submetida aos processos de corte para a obtenção do *blank* para posterior processamento de conformação.

O processo de dobramento consiste em uma das operações do grupo das estampagens que apresenta maior simplicidade, podendo ser utilizado como uma etapa final de produção ou até mesmo como uma etapa intermediária entre o processamento de outras operações de conformação.

A variedade das geometrias que podem ser desenvolvidas pode tornar o processo flexível por meio da utilização de moldes projetados para as aplicações específicas. Esta operação em geral é desenvolvida por meio de prensas de conformação com dimensões e capacidades elevadas (SILVA, 2012).

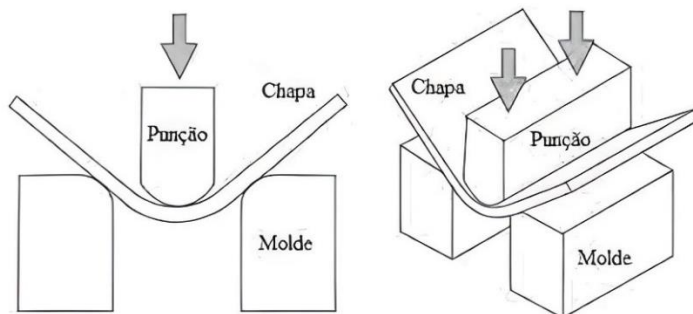
Pela sua flexibilidade de resultados, a operação de dobra possui aplicação em larga escala na indústria automobilística, aeronáutica e de defesa, além de outras áreas em que seja necessária a aplicação de produção de chapas com geometrias específicas (SARIKAYA, 2008).

Estas operações de dobras são consideradas simples e com aplicação frequente no ambiente industrial, porém importantes avanços tecnológicos sob este aspecto são resultados de pesquisas recentes, conforme citado em Zanluchi (2014).

Dentre os tipos de dobramento, o processo de dobramento livre apresenta como característica a aplicação de força em uma chapa por meio do punção sem a necessidade da existência de uma matriz para garantir a geometria. Esta operação

de dobramento pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 – Dobramento livre



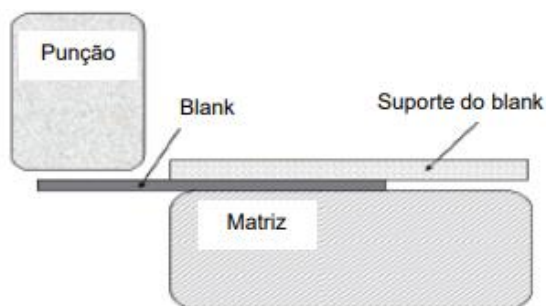
Fonte: DIEGEL, 2002.

Para a obtenção de chapas com valores de ângulos diferentes na operação de dobra sem a presença de matriz é necessário que uma alteração no curso do punção seja realizada, pois é por meio deste curso que é possível proporcionar diferentes ângulos de dobra na chapa (SILVA, 2012).

O processo de conformação de chapas dobradas em formato de “L” é amplamente utilizado em ambientes de produção aplicados em larga escala, e durante seu desenvolvimento de maneira geral, a chapa que será submetida ao processo de dobramento é fixada provisoriamente por um suporte do blank para que ela não saia da posição durante o processo.

Depois de fixar a chapa por meio de um mecanismo prensa chapas, um punção é deslocado contra a chapa causando uma deformação em formato de “L”, conforme pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Conformação em “L”



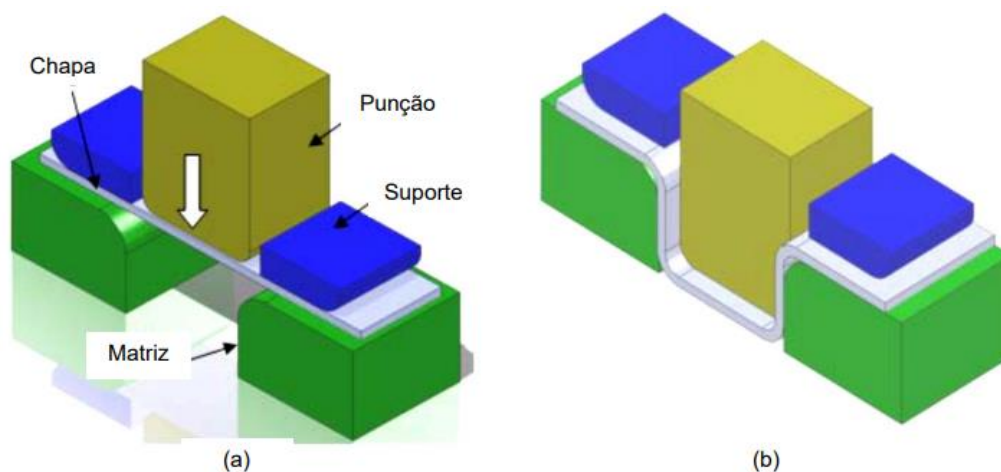
Fonte: CHEN e K0, 2006.

Quando uma chapa é submetida a um processo de dobra realizada em dois eixos de forma simultânea em uma mesma operação recebe o nome de dobramento em “U”. Neste processo um suporte é utilizado para que a chapa se mantenha em contato

com o punção durante toda a operação, enquanto suas laterais são conformadas de acordo com a matriz. Este modelo de dobramento é apresentado na Figura 8.

Este processo exige que o equivalente a 30% da tensão de dobra seja empregada para realizar a compressão da chapa em relação ao bloco de apoio e o punção, de forma a manter um contato eficiente durante todo o processo de dobramento (SILVA, 2012).

Figura 8 – Processo de dobramento em “U”



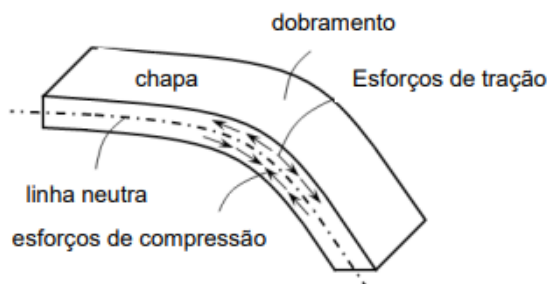
(a) Estágio inicial do dobramento em “U”

(b) estágio final do dobramento em “U”

Fonte: Adaptado de Abdullah *et al.*, 2012.

Durante a execução do dobramento do material, uma deformação por flexão é identificada fazendo com que a parte externa da chapa seja tracionada e a parte interna seja comprimida, sendo que estas tensões apresentam um aumento a partir da linha neutra existente na chapa atingindo seus valores máximos nas extremidades da espessura da chapa. Isto pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Representação das forças atuantes e representação da linha neutra

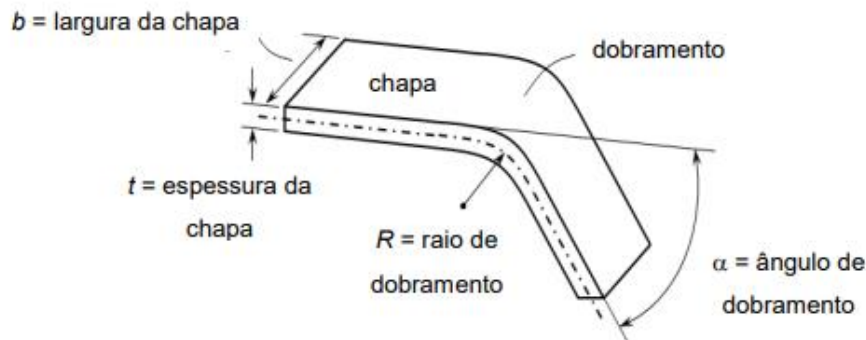


Fonte: SALES, 2013.

Na operação de dobra de uma chapa são observados alguns parâmetros

importantes como o raio de curvatura interno R , o ângulo de dobramento que é representado por α e a largura do corpo a ser dobrada que convencionalmente é apresentada por b (DIETER, 1981), conforme pode ser verificado na Figura 10.

Figura 10 – Termos empregados para expressar a geometria no dobramento

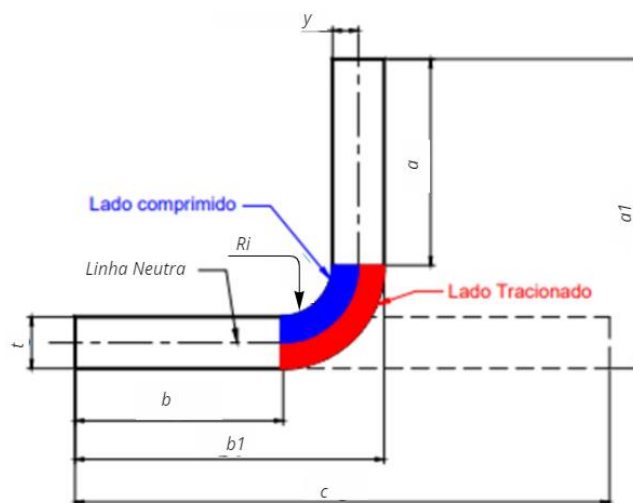


Fonte: SALLES, 2013.

Ao ser realizado o dobramento de um material metálico é possível verificar o surgimento em diversas regiões da peça de alguns estados diferentes de tensões o que torna difícil prever o comportamento do material até a ruptura. De maneira geral, são observados de forma predominante esforços em duas direções opostas o que gera uma flexão e como consequência uma deformação plástica é gerada, modificando desta forma a superfície plana da chapa (QUADROS, 2020).

A geometria da superfície plana da peça coincide com a linha neutra. Esta linha neutra que consiste nas dimensões exatas da chapa também é conhecida como o desenvolvimento linear da geometria da peça dobrada, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Representação de uma peça dobrada e linha neutra



Fonte: SANTOS, 2013.

Para calcular a posição da linha neutra é necessário levar em consideração o comprimento do material e sua espessura, além das dimensões laterais das dobras e seu raio de concordância. A linha neutra é cotada pela letra y e possui como característica estar posicionada ao centro da chapa antes do material ser submetido ao processo de dobramento. Segundo Bresciani *et al.* (2011) a linha neutra se desloca para a proximidade da superfície interna da dobra durante o dobramento. A linha neutra é definida equação 11 (QUADROS, 2020).

$$c = a + b + \frac{\pi}{2} * (R_i + y) \quad (11)$$

O valor de y é calculado a partir da equação 12.

$$y = 2 \frac{c - a - b}{\pi} - R_i \quad (12)$$

O raio de curvatura de maneira geral é definido a partir da quantidade de dano que a superfície externa pode suportar, pois quanto menor é o raio de dobramento, maior é a tensão que será desenvolvida na região tracionada (QUADROS, 2020).

No processo de dobramento como o que pode ser observado na Figura 11 apresenta as fibras externas e internas ao raio de dobra que podem ser calculadas pela equação 13 (SARIKAYA, 2008).

$$e_0 = e_1 = \frac{1}{\left(\frac{2R_i}{t}\right)+1} \quad (13)$$

O valor de e_0 consiste nas fibras externas e e_1 são as fibras internas da região de dobra. Sarikaya (2008) diz que experimentalmente a equação 13 apresenta maior precisão quando a aplicação é embasada na deformação das fibras internas, pois a deformação é diferenciada entre as regiões fazendo com que a linha neutra seja deslocada para a região interna da dobra o que faz com que a deformação das fibras externas seja maior. Este aumento na deformação nas fibras externas pode provocar trincas no material quando a relação entre o raio de dobra e a espessura diminui.

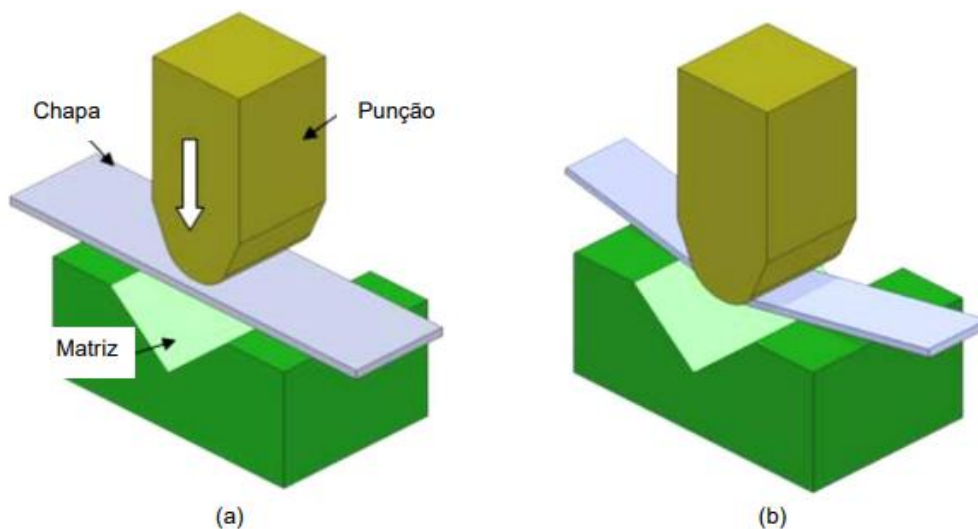
2.2.1 Dobramento em “V”

O dobramento em “V” consiste na conformação mecânica de uma chapa por meio de um punção e de uma matriz com ângulos definidos no projeto. Arezzo e Farsi (2011) definem que a operação de dobramento em “V” é frequentemente utilizada no

ambiente industrial por sua facilidade e variações de implementação.

Durante a operação de dobramento, o punção se movimenta para baixo na direção da chapa, fazendo com que o material apresente certa deformação. Enquanto o punção continua seu movimento para conformação da chapa, a deformação plástica se inicia, modificando a geometria do material, até que o punção carregue totalmente o material fazendo com que a chapa seja apoiada pela geometria da matriz conforme mostra a Figura 12 (SARIKAYA, 2008).

Figura 12 – Etapas do dobramento em “V”



(a) Estágio inicial do dobramento em “V”

(b) Estágio final do dobramento em “V”

Fonte: Adaptado de Abdullah *et al.*, 2012

Segundo Sarikaya (2008), no início da operação de dobramento em “V” o deslocamento da chapa é menor do que o raio da ponta de ferramenta e a partir do aumento da força empregada pelo punção sobre a chapa a curvatura sob o raio da ponta da ferramenta chega em um ponto em que estas geometrias se adaptam.

Esta característica que interfere no processo de conformação mecânica é causada pelo contato entre a matriz e a chapa a ser dobrada, induzindo tensões na matriz além da possibilidade de provocar defeitos internos na chapa (FOLLE, 2012).

Schaeffer (2004) apresenta a existência de dois modelos diferentes de atrito sendo um deles o modelo de Coulomb e o outro consiste no modelo de “Fator de Atrito”. Ele define que no modelo de Coulomb existe uma tensão de cisalhamento que é essencial para proporcionar o deslocamento relativo entre as superfícies de contato proporcional à pressão de contato aplicada.

Segundo Burchitzs (2005), a definição do coeficiente de atrito mais utilizado consiste no modelo de Coulomb. Este valor depende das condições do local de contato e apresenta diferenças de acordo com os materiais das chapas e ferramentas. Ainda segundo o modelo de Coulomb o valor de coeficiente de atrito depende da pressão de contato, viscosidade de lubrificante entre as partes em contato, a velocidade da interação e a rugosidade superficial dos elementos.

Para descrever o atrito nos ensaios de dobramento é importante definir um modelo que traduza de forma razoável a realidade do procedimento, principalmente em aplicações nas quais a força de atrito apresenta contribuições importantes nos resultados das forças aplicadas (FOLLE, 2012).

Segundo Folle (2012), todas as vezes em que acontece o deslizamento entre as partes colocadas em contato durante um ensaio, o coeficiente de atrito deve ser aplicado em todo o sistema. Durante a conformação de uma chapa, o coeficiente de atrito é controlado por meio de duas componentes diferentes, sendo uma delas a força de deformação que atua durante a penetração da ferramenta na chapa, além de uma força adesiva que atuam nas áreas de contato. O coeficiente de atrito com base nestas condições pode ser descrito pela equação 14.

$$\mu = \mu a + \mu p \quad (14)$$

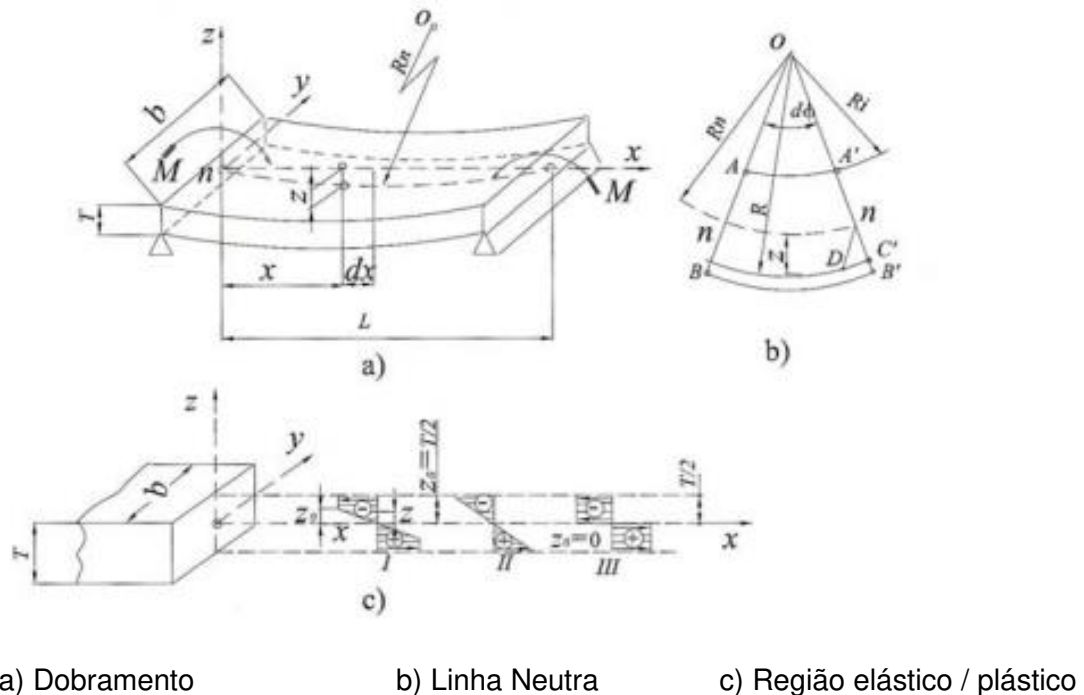
Na equação 14 o valor de μa é a componente adesiva que leva em consideração o material empregado e depende da composição química das superfícies que apresenta deslizamento enquanto μp possui uma relação com a características das superfícies de contato (FOLLE, 2012).

2.2.2 Momento de Flexão no Dobramento

A Figura 13 representa uma tira de material submetida a uma operação de dobramento, em que é possível verificar a região tracionada e a região comprimida apresentada na parte a da Figura 13. Na figura 13 (b) é possível observar as grandezas que surgem no dobramento, como o momento de flexão além da variação de localização da linha neutra e a posição do raio de dobra em função do centro de

dobramento. Na figura 13(c) são demonstradas as regiões submetidas à tração e à compressão no momento do dobramento.

Figura 13 – Variáveis do dobramento



Fonte: SARIKAYA, 2008.

O momento de flexão na região do domínio elástico e plástico é definido por Sarikaya (2008) como sendo o somatório dos momentos em cada uma destas regiões.

A operação de dobramento aplicada em uma secção retangular no domínio de componentes elásticas e plásticas é apresentada por Sarikaya (2008) por meio da equação 15, que relaciona largura da chapa b (mm), espessura da chapa t (mm).

$$M = \frac{(\sigma_0)b}{12}(3t^2 - 4z_0^2) \quad (15)$$

O valor de z_0 pode ser calculado por meio da lei de *Hooke* e pode ser verificada na equação 16. Nesta equação o valor de Rn representa o raio de curvatura, o valor

de E é o módulo de elasticidade, ε_0 é a deformação inicial de escoamento e σ_0 é a tensão de escoamento.

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon_0 = E \frac{z_0}{R_i} \quad (16)$$

Ao se completar a equação 16 e substituir os valores de z_0 fica apresentado seu resultado na equação 17.

$$z_0 = \frac{(\sigma_0) \cdot R_i}{E} \quad (17)$$

Sarikaya (2008) apresenta a equação 18 que calcula o momento fletor do dobramento e relaciona os valores de σ_0 como a tensão de escoamento, Rn representa o raio de curvatura, b mostra a largura da chapa e o módulo de elasticidade E .

$$M = (\sigma_0) \frac{bt^2}{12} \left[3 - \left(\frac{2(\sigma_0)R_i}{E} \right)^2 \right] \quad (18)$$

Sarikaya (2008) diz que para operações de dobramento em que os raios de dobra estejam entre valores de 5 e 200 milímetros a participação do segundo termo da equação é pequena podendo ser simplificada para grande parte das aplicações apresentadas na equação 19.

$$M = (\sigma_0) \frac{bt^2}{4} \quad (19)$$

Como forma de simplificar a Equação 19 aplicando variáveis identificadas por meio de ensaios de tração do material realizados de forma mais usuais, a equação 20 apresenta o momento de dobra segundo os estudos de Sarikaya (2008).

$$M = n \left(\sigma_{max} \frac{bt^2}{4} \right) \quad (20)$$

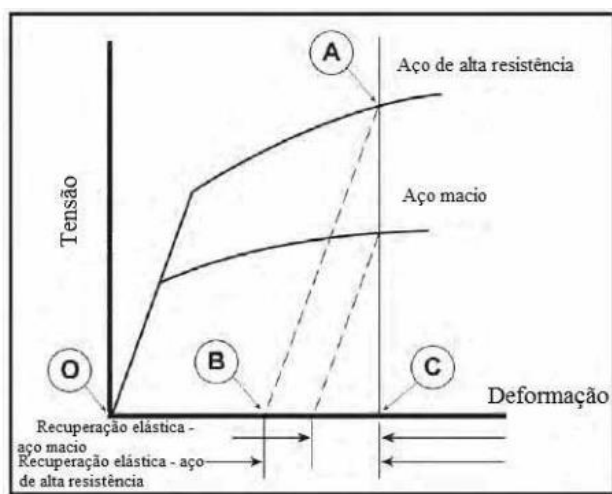
A equação 20 utiliza as variáveis n como correção do coeficiente de dureza do material ($n = 1,6$ até $1,8$), σ_{max} como resistência máxima à tração do material, b como largura de dobra e t como a espessura do material.

2.3 RETORNO ELÁSTICO

O fenômeno do retorno elástico (*springback*) consiste segundo Ramezani *et. al* (2010) em um efeito indesejado do processo de conformação que apresenta um fenômeno de recuperação elástica similar a um efeito de mola, o que gera uma deformação menor nos materiais, fazendo com que o material retorne parcialmente após a liberação da aplicação de força em um determinado processo de conformação mecânica como por exemplo em uma operação de dobramento de chapas.

Este comportamento de retorno elástico pode ser observado na Figura 14, em que é apresentado o comportamento deste fenômeno em materiais diferentes.

Figura 14 - Esquema mostrando que a magnitude do *springback* é proporcional à tensão.



Fonte: KEELER, 2020.

Segundo Silva (2012), o efeito elástico do material é muito impactado por meio das ferramentas e geometria, pois quando as características geométricas não permitem que as tensões sejam completamente descarregadas após a aplicação e retirada de uma carga no processo de conformação, fato este que promove a distribuição destas tensões.

Dieter (1981) caracteriza o retorno elástico como sendo a variação dimensional na geometria de uma peça que acontece após o alívio das cargas aplicadas entre a chapa por meio da junção entre a matriz e a ferramenta, sendo que a previsão do comportamento deste retorno elástico está entre as tarefas mais difíceis de serem executadas nos processos de conformação mecânica.

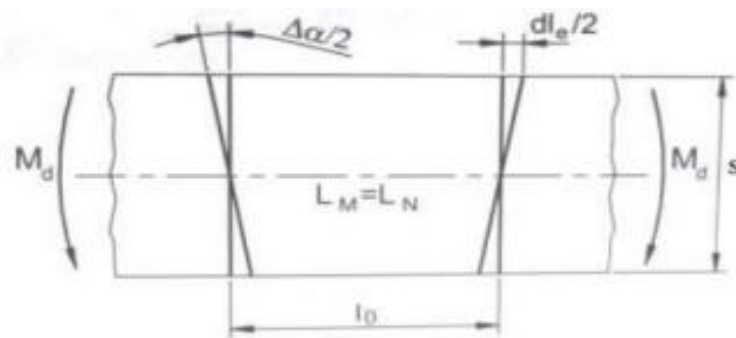
O retorno elástico apresenta a dificuldade de previsão no comportamento da

chapa na operação de dobramento, pois segundo Sarikaya (2008) este fenômeno surge como resultado da combinação de diversos fatores envolvidos no processo como por exemplo:

- Espessura da chapa
- Módulo de elasticidade do material
- Raio de dobra do punção e matriz
- Força empregada no dobramento
- Tempo de execução da operação
- Entre outros

Para Silva (2012) os resultados do retorno elástico são proporcionais ao limite de escoamento do material e apresenta comportamento inversamente proporcional ao módulo de elasticidade, sendo que esta variação aparece nas proximidades da linha neutra da chapa, conforme pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Rotação da seção em torno da linha neutra durante o retorno elástico.



Fonte: RODRIGUES e MARTINS, 2010 apud QUADROS, 2020.

O deslocamento aplicado pela rotação acontece no domínio elástico e pode ser observado nas proximidades da linha média e previsto pela equação 21 (SILVA, 2012),

$$\tan \frac{\Delta\alpha}{2} = \frac{dle}{t} \quad (21)$$

em que:

dle = comprimento recuperado da fibra externa

t = espessura

A definição teórica do retorno elástico pode ser considerada por meio da equação 22, pois a variação angular acontece no domínio elástico e o ângulo é pequeno.

$$\frac{\Delta\alpha}{l_0} = \frac{\frac{2}{t} \cdot (\sigma_{xd})_{ext}}{E} \quad (22)$$

Na equação 22 a variável l_0 representa o comprimento da linha neutra, $(\sigma_{xd})_{ext}$ é a tensão do retorno elástico na fibra externa e o valor de E consiste no módulo de elasticidade do material.

Schaeffer e Rocha (2007) dizem que um fator que relaciona os valores de retorno elástico com base no comportamento da linha média é denominado como coeficiente de retorno elástico. Ao verificar a importância de considerar o retorno elástico no processo de dobramento, foram apresentadas equações que permitem determinar este coeficiente. A equação 23 apresenta o cálculo do momento fletor de dobramento (Mb) segundo Schaeffer e Rocha (2007), são necessários a força F que será exercida no dobramento, e a distância entre o apoio l .

$$Mb = \frac{F \cdot l}{4} \quad (23)$$

A equação 24 apresenta o coeficiente de retorno elástico k que relaciona grandezas como o momento de flexão de dobra Mb , raio inicial de dobra R_i , módulo de elasticidade E , espessura t e largura da chapa a ser dobrada b para quantificar o efeito do *springback* na operação.

$$k = 1 - \frac{12Mb(R_i + 0,5t)}{E \cdot b \cdot t^3} \quad (24)$$

A partir da Equação 25 ficam relacionados ao fator de retorno elástico k os valores de ângulos teórico de dobramento α e o ângulo de dobramento calculado α' , conforme apresentado por Schaeffer e Rocha (2007).

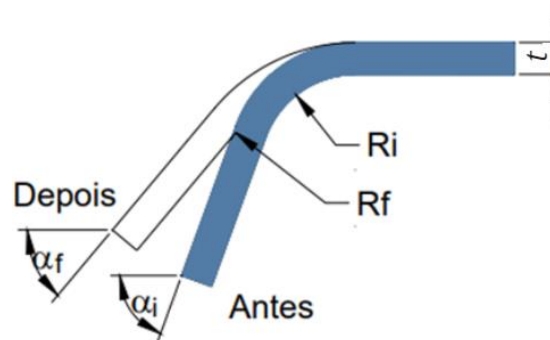
$$k = \frac{\alpha}{\alpha'} \quad (25)$$

Com base nestes valores é possível aplicar o cálculo dos erros encontrados no processo, apresentado na equação 26, em que o valor experimental aparece como resultado do experimento prático e os valores calculados podem ser aplicados com base nas equações apresentadas anteriormente ou dos resultados obtidos por meio de análises de elementos finitos, conforme o caso analisado.

$$Erro (\%) = 100 * (Valor_{Calculado} - Valor_{Experimental}) / Valor_{experimental} \quad (26)$$

Na figura abaixo, Sarikaya (2008) e Dieter (1981) apresentam a terminologia para o desenvolvimento de outro modelo de equações utilizadas nas operações de dobramento e para dimensionamento do fator de retorno elástico.

Figura 16 – Terminologia do retorno elástico no dobramento.



Fonte: DIETER, 1981

Na Figura 16 e na equação 27, o valor de R_i consiste no raio de dobra, α_i é o ângulo teórico projetado, α_f é o ângulo após o retorno elástico, R_f é o raio final de dobra e t consiste na espessura da chapa dobrada.

$$k = \frac{R_i + \frac{t}{2}}{R_f + \frac{t}{2}} = \frac{\frac{2R_i + 1}{t} + 1}{\frac{2R_f}{t} + 1} = \frac{\theta_f}{\theta_i} = \frac{180^\circ - \alpha_f}{180^\circ - \alpha_i} \quad (27)$$

O comprimento da linha neutra segundo Sarikaya (2008) é o mesmo antes e depois da operação de dobra, conforme relaciona a equação 28, em que L_n é o valor da linha neutra de dobra.

$$L_n = \left(R_i + \frac{t}{2} \right) \alpha_i = \left(R_f + \frac{t}{2} \right) \alpha_f \quad (28)$$

O fator de retorno elástico k depende de uma relação entre o raio da ferramenta de dobra e a espessura da chapa e seus valores podem variar entre 0 e 1. O valor de k igual a 0 indica uma operação totalmente elástica. Quando o valor de k apresenta 1 como resultado significa que não existe retorno elástico na operação.

Desta forma para estimar o valor do retorno elástico Sarikaya (2008) e Farsi e Arezoo (2011) apresentam a equação 29, que consiste em uma aproximação desenvolvida nos termos do raio de dobra inicial e final obtido na operação.

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i(\sigma_0)}{Et} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i(\sigma_0)}{Et} \right) + 1 \quad (29)$$

Para o caso de aplicação em um dobramento considerando deformação plana, a equação 30 pode ser aplicada. Nesta equação são utilizados os valores de R_i para o raio inicial, R_f para o raio de dobra depois do retorno elástico, t é a espessura da chapa, E é o módulo de elasticidade do material, ν é o coeficiente de *Poisson* e σ_0 é a tensão de escoamento.

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i \sigma_0}{tE} (1 - \nu^2) \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i \sigma_0}{tE} (1 - \nu^2) \right) + 1 \quad (30)$$

Segundo Malavolta *et al.* (2007), quando a largura da chapa é muito maior do que sua espessura, é possível assumir a hipótese de deformação plana. Para o caso da deformação plana, os valores do módulo de elasticidade E e a tensão de escoamento σ_0 devem ser substituídos pelos valores apresentados nas equações 31 e 32,

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (31)$$

em que:

E' : Módulo de elasticidade ajustado

E : Módulo de elasticidade

ν = Coeficiente de *Poisson*

$$\sigma_0' = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \quad (32)$$

em que:

σ_0' : Limite de resistência ajustado

σ_0 : Limite de resistência

Os estudos de retorno elástico estão em desenvolvimento por muitas décadas, o que pode ser comprovado por estudos de Shanley (1942, *apud* Braga 2009) que atuava na indústria aeronáutica e desenvolveu pesquisas sobre o comportamento do retorno elástico por meio da análise da curva de tensão-deformação do alumínio AL24ST. Como resultado de seu trabalho foi proposta uma equação para o retorno

elástico baseado nas deformações elásticas, totais e residuais do material.

A teoria de dobramento de Hill foi utilizada para a elaboração de uma expressão analítica da recuperação elástica no alumínio SW26 por Alexander (1959, *apud* Magnusson *et al.*, 1990).

Magnusson *et al.* (1990) apresentaram um estudo em que foram considerados materiais isotrópicos e o encruamento de von Mises para verificar o retorno elástico em dobramento livre, utilizando como material chapas finas de Kirchhoff, e concluíram que o retorno elástico aumenta com o aumento da espessura.

Um modelo chamado de BEND foi criado por Wang, Kinzel e Altan (1993) utilizando como base o critério de escoamento de Hill (1948) e a teoria de encruamento de Swift (1952). Este modelo foi aplicado em dobramentos em L, U e em V e apresentaram boa predição da geometria final das chapas dobradas.

No que se refere ao dobramento em V, Forcellese *et al.* (1998) realizaram experimentos em liga de alumínio 5083 e compararam os resultados com análises por elementos finitos. Nas comparações verificaram influências nos valores de retorno elástico do material causadas pelo raio do punção e pela força aplicada no pós-dobra, apontando desta forma para algumas variáveis a serem monitoradas no processo.

A preocupação com o retorno elástico e o controle de qualidade segundo Carden *et al.* (2002) aumentou entre os fabricantes da indústria automobilística com a crescente utilização de aços de alta resistência, pois seu retorno elástico é maior ao serem comparados com os resultados de peças confeccionadas em aço carbono.

Novas estratégias de desenvolvimento do processo de dobramento foram estudadas para verificar possíveis melhorias como o processo apresentado por Xiong *et al.* (2015) que consiste na operação de dobramento do alumínio 2024-T3 utilizando conformação eletromagnética. Neste trabalho foram discutidas a distribuição das forças eletromagnéticas e o impacto da chapa contra a matriz provocadas pelos impulsos elétricos, além da busca por um modelo numérico para minimizar os desvios geométricos.

Karaağaç (2017) apresentou uma investigação sobre o retorno elástico no processo de dobramento em V utilizando *flexforming*, que consiste na realização do dobramento utilizando pressão hidráulica sobre uma borracha, com o objetivo de conformar a chapa sobre uma matriz. Neste trabalho foi utilizado como material uma liga de cobre e realizada uma comparação com os processos tradicionais de dobramento. Os resultados foram considerados satisfatórios, pois alguns erros

característicos dos processos tradicionais não foram observados neste experimento.

Como ferramentas de auxílio no processo de análise e previsão do retorno elástico alguns autores utilizam análises por elementos finitos para verificar o comportamento do material. Segundo Malavolta *et al.* (2005) uma previsão do retorno elástico aplicada ao dobramento de chapas metálicas por meio da análise de elementos finitos pode contribuir para um ajuste compensatório no ferramental de dobra ainda durante seu projeto, minimizando custos e otimizando os resultados.

2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A evolução na velocidade de processamento e na capacidade de armazenamento de dados nos computadores possibilitou relacionar grandes números de variáveis, ampliando o uso dos métodos numéricos e tornando as simulações cada vez mais confiáveis.

O método dos elementos finitos – MEF, por meio da realização de cálculos de forma rápida possibilita um alto nível de modelamento da realidade. Com um modelo físico definido, regras planejadas como a representação do material e restrições das ferramentas, é possível chegar a resultados muito similares aos conseguidos em modelos reais.

No MEF uma malha (*Mesh*) composta de elementos divididos em pequenas áreas ou volumes e mapeado, recebem condições de contorno como calor, forças, atrito e são feitos os cálculos conforme a lei constitutiva do material (curva de escoamento, valores de tensão, valores de deformação, anisotropia).

Huebner *et al.* (2001), definiram o MEF em três etapas distintas sendo elas:

- Pré – processamento consiste na etapa de preparação do problema, quantificação e modelamento das condições físicas;
- Solução (*solver*), que executa o cálculo matemático da equação diferencial conforme as condições impostas pelo modelo;
- Pós – processamento que apresenta os resultados da análise numérica possibilitando colocar em evidência os parâmetros críticos do sistema.

De forma geral, devem ser definidas pelo usuário as condições iniciais, condições de contorno, geometria, o tipo de elemento de malha e atribuir as propriedades do material. Deve ser criado o modelo mais próximo possível do real e quantificar o

problema de forma mais enxuta e simplificada possível, desde que essas simplificações não comprometam o modelo.

Em seguida, com o modelo físico realizado, são executados os cálculos matemáticos e dependendo do número de variáveis, da precisão e do poder computacional essa etapa pode ser a mais demorada do processamento.

Por fim, consegue-se os resultados, que devem ser interpretados em cada cenário e conforme a necessidade do projeto.

Para Hallquist *et al.* (2000) em simulações de processos de conformação de chapas metálicas, pode-se visualizar problemas mecânicos de alta complexidade como:

- Deformações geométricas (regiões críticas, precisão dimensional, retorno elástico etc.);
- Deslocamentos nodais em relação ao tempo transcorrido (caminho das deformações, deslocamento plástico do material etc.);
- Frequências e vibrações da estrutura;
- Gradientes de tensão (acúmulo de tensões na peça, cargas etc.);
- Gradientes de temperatura;
- Previsão de defeitos (regiões seguras, regiões de rupturas, regiões de enrugamentos etc.).

Segundo Evangelista (2000), a utilização do método de elementos finitos pode ser aplicada em uma grande gama de problemas em engenharia e utiliza a região da solução como uma combinação de elementos pequenos e interconectados entre si. Estas características da utilização dos MEF permitem estimar uma solução aproximada para um problema complexo em curto tempo, possibilitando redução nos custos de desenvolvimento e melhoria da qualidade final da peça pela otimização de parâmetros do processo.

O critério de von Mises que é mostrado pela equação 33 e pode ser utilizado como critério para a verificação do comportamento dos materiais isotrópicos, sendo este um critério muito utilizado por apresentar resultados satisfatórios na operação de dobramento de materiais dúcteis (SARIKAYA, 2008).

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2\sigma^2 \quad (33)$$

Quando os valores de tensão e deformação são referidas às tensões principais ao eixo da análise, a equação 34 descreve seu comportamento.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma^2 \quad (34)$$

O estado plano de deformação pode ser utilizado como estratégia de trabalho, pois os elementos de deformação planas podem ser aplicados em situações em que é possível assumir que, as deformações em um corpo carregado apresentam coordenadas planas isoladas e as deformações normais e tensões de cisalhamento em outras partes do corpo sejam iguais a zero (ABAQUS, 2015).

Segundo Bresciani *et al.* (2011) e Ribeiro (2004), a deformação plana pode ser considerada em processos de conformação que apresentem em uma das dimensões, no caso na dimensão z valores muito menores do que as dimensões encontradas no plano x-y.

Desta forma pode se assumir que qualquer seção transversal que seja paralela ao plano x-y seja submetida ao mesmo estado de deformação e as tensões σ_z pode ser calculada com base as tensões normais σ_x e σ_y .

Por este motivo pode ser considerado para a análise numérica de um corpo de prova por meio dos estados planos de deformação somente uma faixa de espessura unitária do material durante a aplicação das cargas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção do trabalho apresenta os materiais e métodos que foram utilizados.

3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o alumínio QQ-A-250/5 (2024-T3) com espessura de 0,4 mm que é amplamente aplicado na indústria aeronáutica com características descritas por Wilsons (2014) como um material com alta resistência mecânica e boa usinabilidade. A composição química do material apresentada pelo fabricante pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Composição Química do Material.

SAE AMS QQ A 250/5 Alloy QQ A 250/5	
Element	% Present
Copper (Cu)	3.80 - 4.90
Magnesium (Mg)	1.20 - 1.80
Manganese (Mn)	0.30 - 0.90
Silicon (Si)	0.0 - 0.50
Iron (Fe)	0.0 - 0.50
Zinc (Zn)	0.0 - 0.25
Titanium + Zirconium (Ti+Zr)	0.0 - 0.20
Titanium (Ti)	0.0 - 0.15
Others (Total)	0.0 - 0.15
Chromium (Cr)	0.0 - 0.10
Other (Each)	0.0 - 0.05
Aluminium (Al)	Balance

Fonte: Wilsons, 2014.

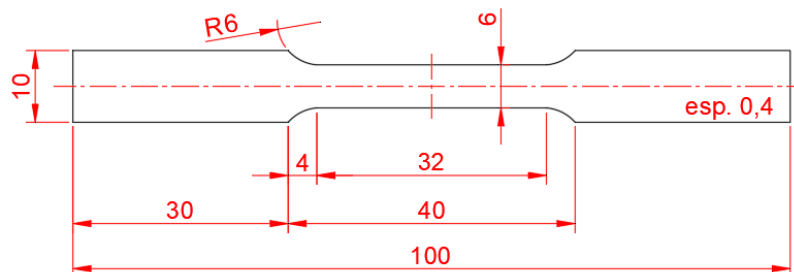
Os corpos de prova utilizados tanto para os ensaios de tração quanto para os materiais utilizados nos experimentos foram cortados na direção de 0° de laminação da chapa.

3.1.1 Ensaio de Tração

Foi realizado um ensaio de tração para o levantamento da curva de tensão em função de deformação visando verificar o comportamento mecânico do material, sendo que este ensaio foi desenvolvido em parceria com a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) por meio do Programa de Engenharia de Materiais.

A elaboração do corpo de prova foi desenvolvida com base nas dimensões solicitadas pela norma ABNT NBR ISO 6892 e estão apresentadas na Figura 18.

Figura 18 – Dimensões padronizadas para o ensaio de tração conforme norma ABNT NBR ISO 6892.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os corpos de prova aplicados nos ensaios de tração foram cortados em uma máquina de eletroerosão a fio da marca Fanuc® modelo a-C400iA como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Confeção dos corpos de prova para o ensaio de tração



Fonte: Elaborada pelo autor

O ensaio de tração foi realizado com corpos de prova de 0,4 mm de espessura em um equipamento para ensaio de tração modelo MTS® Landmark 647 com capacidade para ensaios de até 10 kN apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Ensaio de tração



Fonte: Elaborada pelo autor

3.1.2 Curva tensão em função da deformação verdadeira

Foram utilizados os valores de tensão e deformação obtidos por meio do ensaio de tração na elaboração da curva de tensão e deformação de engenharia que verifica o comportamento do material quando submetido ao esforço de tração.

Por meio do relatório gerado no ensaio de tração realizado pelo equipamento foi possível identificar a tensão de engenharia (σ) e a deformação de engenharia (ϵ).

Ainda com base nos valores proporcionados pelo ensaio de tração foi possível identificar os valores de tensão e deformação verdadeiros utilizando para este cálculo as relações apresentadas pelas equações 8 e 9, em que são considerados os valores da seção transversal instantâneos relacionados com a tensão do material.

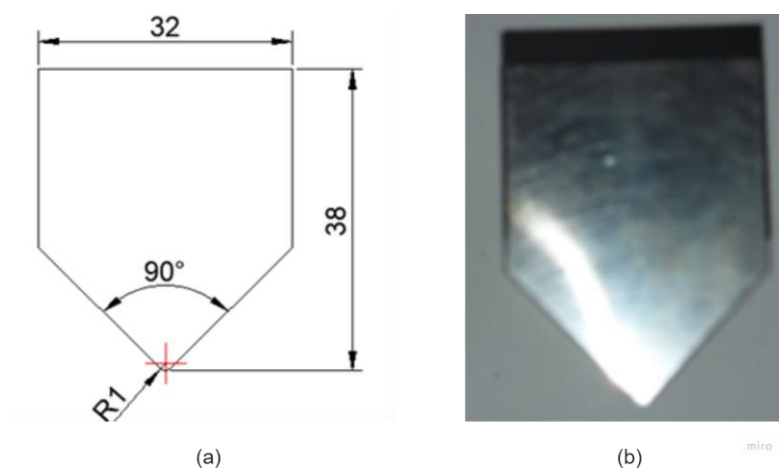
3.2 EXPERIMENTO DE DOBRAMENTO

3.2.1 Projeto e construção de matrizes e punções

Para o desenvolvimento da parte experimental do projeto foram construídos dois modelos de punções apresentando diferenças em seus valores de raio de ponta e com ângulo de abertura de 90° , sendo que esta opção foi tomada como base alguns

trabalhos como o de Sarikaya (2008) e Corrêa *et al.* (2016) que apresentaram relevância em seus resultados ao realizar alterações no raio da ponta das ferramentas de dobra. A figura 21 (a) apresenta as dimensões principais do punção com raio de 1,0mm e a figura 21(b) mostra o punção produzido conforme as medidas projetadas.

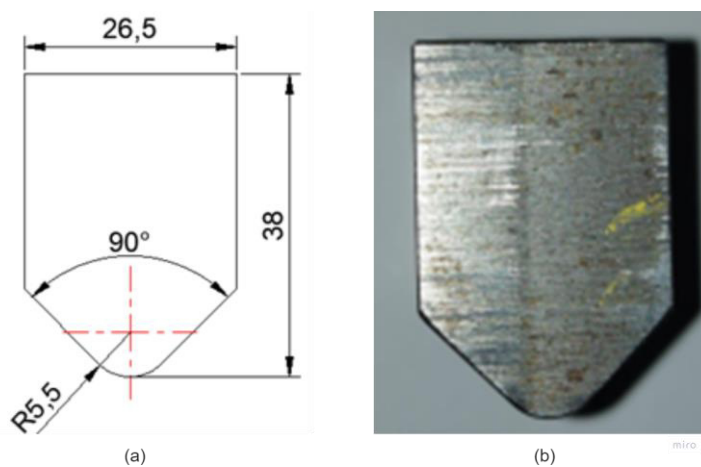
Figura 21 – (a) Medidas principais do punção com raio de 1,0mm e ângulo de abertura de 90°. (b) Punção com raio de 1,0mm e ângulo de abertura de 90°.



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 22 (a) mostra as dimensões principais do projeto do punção com raio de 5,5 mm e ângulo de abertura de 90° e Figura 22 (b) mostra o punção produzido com o raio de ponta de 5,5 mm e ângulo de abertura de 90° para proporcionar um comportamento diferente no material durante o ensaio.

Figura 22 – (a) Medidas principais do punção com raio de 5,5 mm e ângulo de abertura de 90°. (b) Punção com raio de 5,5 mm e ângulo de abertura de 90°.



Fonte: Elaborada pelo autor

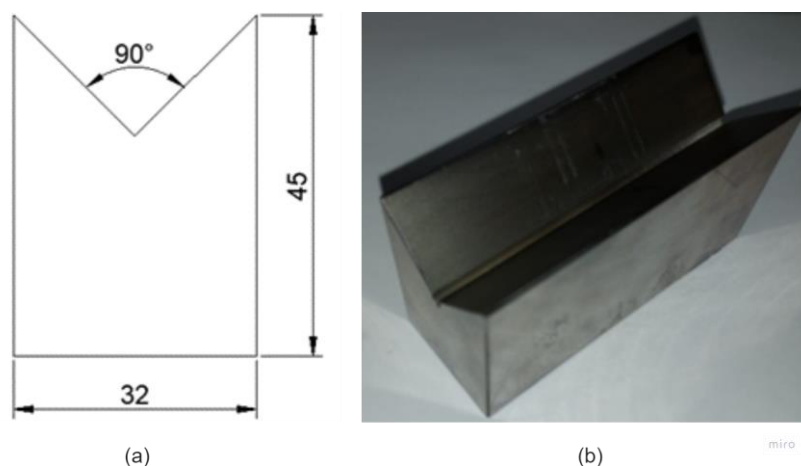
O ângulo dos punções foi de 90°, sendo este o mesmo ângulo que foi aplicado

para a matriz, conforme é apresentado na Figura 23 (a). A Figura 23 (b) apresenta a matriz construída para a realização dos primeiros experimentos com matriz de ângulo de abertura de 90° .

Figura 23 – Matriz com ângulo de abertura de 90°

(a) Medidas principais da matriz.

(b) Matriz produzida com ângulo de abertura de 90° .



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 24 é possível verificar a montagem entre um dos punções e a matriz aplicados ao projeto.

Figura 24 – Montagem entre a matriz e o punção com raio de 1,0mm.



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.2 Dobradeira CNC

O experimento foi realizado utilizando-se de uma dobradeira do Modelo Newton® PDH - 7525 para cargas de 75 toneladas com um vão livre disponível para dobra de chapas de até 2,5 m e com comando numérico computadorizado. A dobradeira

utilizada é apresentada na figura abaixo.

Figura 25 – Dobradeira Hidráulica Newton PDH - 7525.



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.3 Medição de forças de dobramento

No desenvolvimento do experimento foi realizada a medição das forças de dobramento. O sistema para a medição de forças foi elaborado utilizando como dispositivo de controle uma placa microcontrolada de Arduino Uno apresentada na Figura 26. Braga (2019) apresentou um sistema de aquisição de sinais de força utilizando este controlador e sensores compostos por células de carga com resultados satisfatórios.

Figura 26 – Arduino UNOR3.



Fonte: ARDUINO, 2021.

Algumas características relevantes em relação à placa Arduino Uno são

apresentadas a seguir e são disponibilizadas pelo próprio fabricante.

- Voltagem operacional: 5V
- Voltagem de alimentação (recomendada): 7-12V
- Voltagem de alimentação (limites): 6-20V
- Pinos I/O digitais: 14
- Pinos de entrada analógica: 6
- Corrente contínua por pino I/O: 40 mA
- Memória flash 32 KB (2KB usados para o bootloader)
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB

Como sensores do projeto foram utilizadas células de carga aplicadas em larga escala na elaboração de projetos integrados possuindo o Arduino como controlador principal apresentando como vantagens uma capacidade de carga compatível com o projeto aliado a custos reduzidos (BRAGA, 2019).

Algumas das características da célula de carga podem ser verificadas abaixo:

- Capacidade de carga de cada célula: até 50 kgf
- Potência nominal: $1,0 \pm 0,1$ mV/V
- Temperatura, efeito sobre o produto: 0,02% Full Scale/°C
- Equilíbrio zero: $\pm 0,1000$ mV/V
- Impedância de entrada: $1000 \pm 20\%$ Ω
- Impedância de saída: $1000 \pm 10\%$ Ω
- Resistência de isolamento: 2000 Ohms
- Seguro de Sobrecarga: 120% Full Scale
- Temperatura: -20 ~ 65 °C
- Excitação Tensão: 5VDC
- Tensão máxima de trabalho: 8 VCC.

A Figura 27 mostra uma das células de carga utilizadas no projeto.

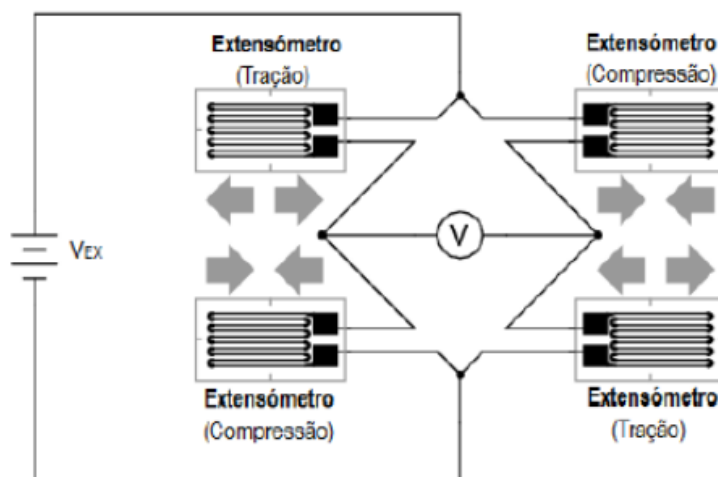
Figura 27 – Célula de carga.



Fonte: Elaborada pelo autor

Segundo aplicações descritas por Braga (2019) e Vieira (2016), a montagem dos extensômetros funciona tomando como base os conceitos teóricos conhecidos como pontes de *Wheastone*. Dentre as possibilidades de interligação entre as células de carga, neste projeto foi escolhida a configuração que utiliza quatro dispositivos dispostos nas quatro extremidades da chapa de base, conforme mostra a Figura 28.

Figura 28 – Ponte de Wheastone utilizando células de carga.



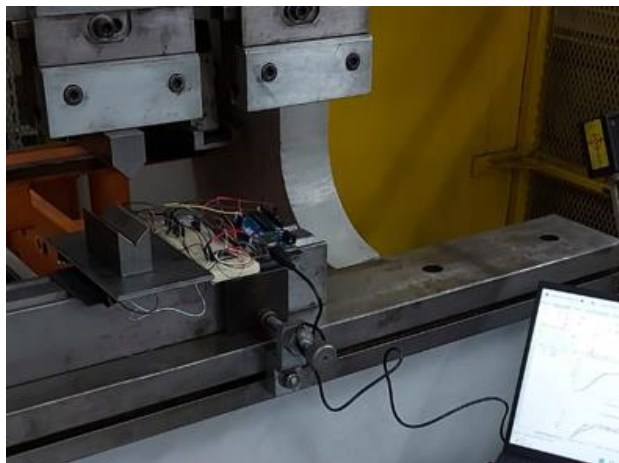
Fonte: Vieira, 2016

A ligação eletrônica foi baseada na configuração de uma ponte de *Wheatstone* descrita por Silva *et al.* (2019) como sendo uma configuração confiável e que apresenta resultados satisfatórios em sistemas de medição de dados experimentais.

Para a realização da medição da força no dobramento, o punção foi fixado no cabeçote superior e as células de carga foram instaladas sob a base que sustenta a

matriz, conforme mostra a Figura 29.

Figura 29 – Instalação das células de carga, punção e matriz na dobradeira



Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme dito por Braga (2019) e Silva *et al.* (2019), os sinais eletrônicos gerados pelas células de carga para serem emitidos ao sistema de controle são baixos e necessitam de algum sistema amplificador de sinais e neste projeto foi utilizado o módulo HX711. Este módulo é um conversor e amplificador de sinais com produção dedicada a integração com células de carga do modelo utilizado. Suas principais características são apresentadas abaixo. O módulo é mostrado na Figura 30.

- Tensão de operação: 4,8 à 5,5V DC
- Corrente de operação: 1,6mA
- Temperatura de operação: -20 à 85°C
- Interface SPI • Precisão dos dados: 24 bits
- Frequência de atualização: 80 Hz

Figura 30 – Módulo amplificador HX711.



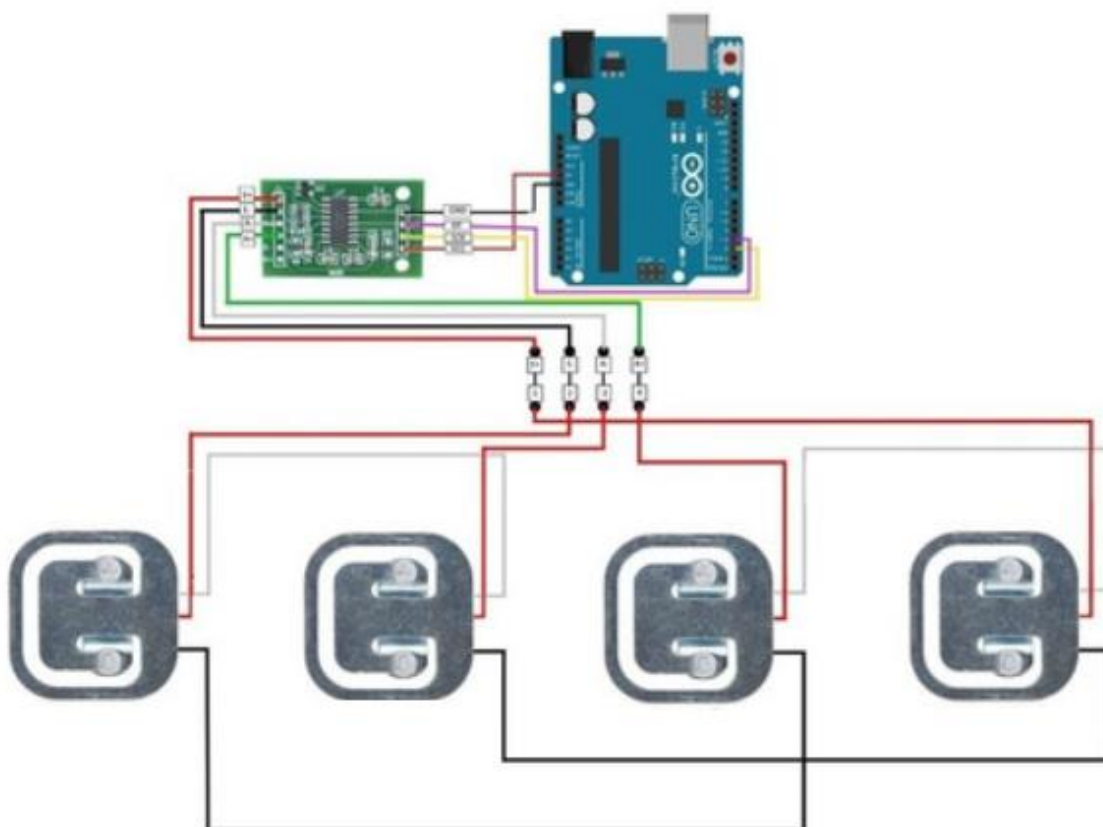
Fonte: Braga, 2019

O mecanismo de armazenamento dos dados da porta serial do Arduino para a gravação das informações em forma de planilha foi desenvolvido utilizando o *software Processing*®, que trabalha de forma integrada ao Arduino e realiza o salvamento dos dados medidos por meio dos sensores em arquivos de texto ou planilhas. Neste trabalho os dados foram salvos em planilhas do *software* Microsoft Excel® cuja opção foi escolhida por sua facilidade na elaboração de gráficos e trabalho com operações matemáticas.

A programação do sistema para realizar a integração entre as células de carga, o módulo amplificador e a placa do microcontrolador foram desenvolvidas por meio do *software* Arduino IDE na versão 1.8.16 e está disponibilizada no apêndice A.

O diagrama eletrônico completo utilizado no sistema de medição de forças durante o experimento é apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Montagem entre o Arduino, módulo HX711 e Células de carga.



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.4 Medição Tridimensional

A medição para caracterização da matriz e do punção bem como das chapas dobradas foi realizada utilizando uma medidora tridimensional modelo TESA® micro-hite 3D Bugnon 38, apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Medidora tridimensional TESA micro-hite 3D Bugnon 38.



Fonte: Elaborada pelo autor

Este equipamento apresenta resolução em suas dimensões nos valores de $3\mu\text{m}$.

3.2.5 Escaneamento 3D

Para caracterização dos punções e matrizes foi realizada uma medição por meio de escaneamento 3D para comparação de seus resultados com outros instrumentos de medição, como a medidora tridimensional apresentada anteriormente.

A etapa de escaneamento 3D foi desenvolvida utilizando um *Scanner* 3D modelo® *Shinning 3D EinScan Pro 2x Plus*. Este equipamento foi aplicado para a medição da geometria posterior ao ensaio de dobra de forma a realizar uma comparação entre o modelo teórico final e o real resultado obtido. O *scanner* 3D utilizado é apresentado na Figura 33.

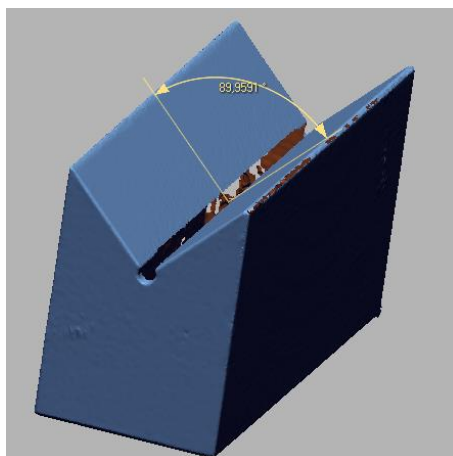
Figura 33 – Scanner Shinning 3D EinScan Pro 2x Plus.



Fonte: Elaborada pelo autor

Um dos modelos gerados por meio da operação de escaneamento 3D está apresentado na figura abaixo, em que é possível verificar as características da matriz com sua geometria identificada e tratada por meio do *software* de montagem virtual do modelo.

Figura 34 – Matriz caracterizada por meio de escaneamento 3D.



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica aplicada consiste em uma alternativa para verificar o comportamento das chapas de alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3) com espessura de 0,4 mm na operação de dobramento em “V”, na etapa de avanço do punção, durante a manutenção da carga e na etapa de seu alívio. A análise numérica visa verificar o

retorno elástico da chapa, bem como oferecer recursos para a comparação com dados experimentais e resultados de cálculos matemáticos.

Para o desenvolvimento de análises numéricas com base no experimento foi utilizado o *software* de elementos finitos no qual foram elaborados os modelos para simulação numérica com base nos materiais projetados e construídos fisicamente para realização experimental.

Para a simulação computacional do processo experimental, foi utilizado o *software ABAQUS® /CAE* da empresa francesa *Dassult Systèmes*, instalados nos laboratórios do departamento de engenharia de materiais (D.E.Ma) da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. O ABAQUS® trata-se de uma solução completa para simulações de problemas de engenharia em suas mais diversas áreas de conhecimento (ABAQUS, 2015).

3.3.1 Geometria do modelo adotado

O desenvolvimento do modelo computacional aplicado para a análise numérica foi desenvolvido com base no experimento realizado, tendo início na caracterização do material em que foram inseridos os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*, além dos valores de tensão e deformação verdadeiros, dados estes que foram obtidos por meio do ensaio de tração do material utilizado como corpo de prova.

As chapas foram projetadas no *software* com dimensões de 20 mm de largura e 150 mm de comprimento com espessuras de 0,4 mm assumindo as características de elementos deformáveis.

Os elementos que compõe a matriz e o punção foram considerados como sendo corpos rígidos de para simplificar a solução.

Neste estudo foi considerado o material como sendo isotrópico e as características elásticas e plásticas foram aplicadas, sendo estas as configurações relevantes para ensaios de dobramento de chapa finas, segundo Sarikaya (2008).

3.3.2 Deformações do modelo computacional

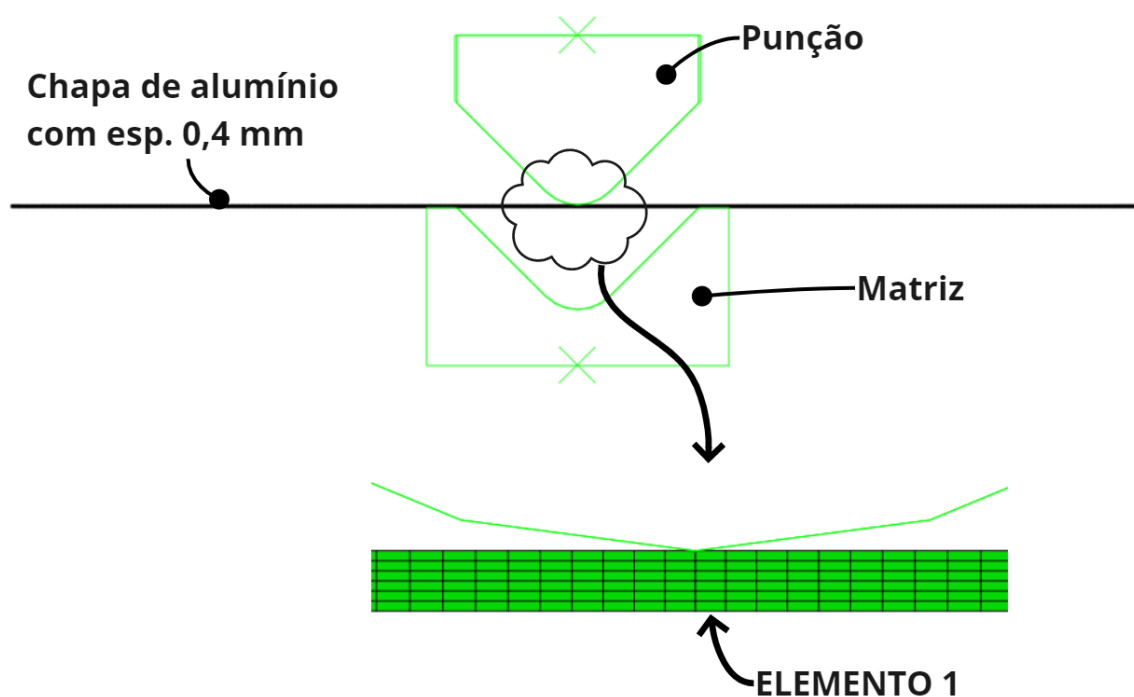
A malha do corpo de prova foi considerada plana dividida em 6 elementos igualmente espaçados na direção da espessura de 0,4 mm e em 60 elementos na

direção do comprimento, o que resultou em um total de 360 elementos em cada uma das metades do corpo de prova. Os elementos utilizados foram do tipo quadrilátero denominado no ABAQUS® como CPE4 que são formados por 4 nós e aplicados em análises que se utilizam do estado plano de deformação (ABAQUS, 2015).

A análise numérica foi realizada baseada nos esforços e deformações identificados no elemento 1 apresentado na figura abaixo. Este elemento foi escolhido para a medição, pois segundo Frees (2017), nesta região que é tracionada durante a operação de dobramento se encontra o trecho mais comum de se surgirem as falhas.

Na Figura 35 é mostrada a distribuição dos elementos na chapa de 0,4 mm de espessura.

Figura 35 – Elemento CPE4 representado pelo elemento 1.



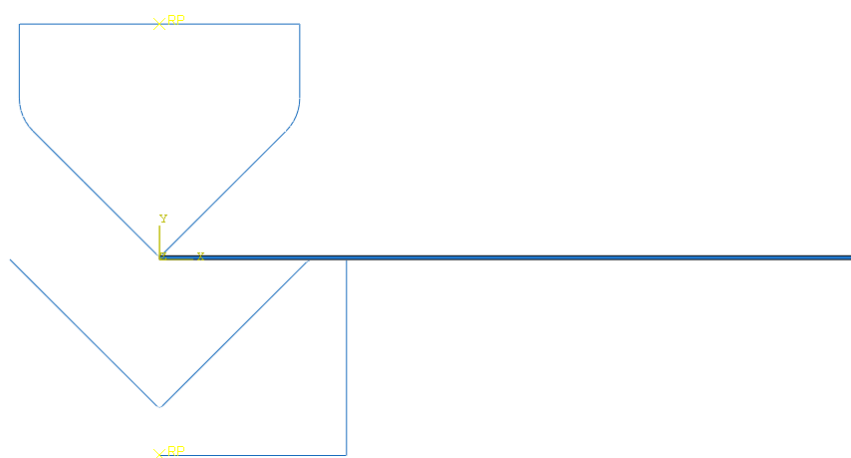
Fonte: Elaborada pelo autor

A configuração das etapas de carga e descarga na análise numérica foram definidas com base no experimento realizado de maneira prévia, em que o deslocamento do punção acontece somente na direção do eixo perpendicular à chapa.

3.3.3 Condições de contorno

Para simplificação da solução numérica foi considerada uma simulação em 2D utilizando as características de estado plano de deformação. Outra estratégia de simplificação utilizada no desenvolvimento da análise foi a aplicação de simetria em relação ao plano yx no corpo de prova, punção e matriz conforme mostra a Figura 36. Nesta figura é possível observar a chapa modelada somente com metade de sua dimensão, pois a outra metade da geometria e comportamento foi assumido por meio da simetria citada.

Figura 36 – Aplicação de simetria no modelo utilizado na análise numérica.



Fonte: Elaborada pelo autor

A deformação plana foi utilizada como estratégia de trabalho, pois a largura da chapa é muito maior do que a espessura do corpo de prova, o que permite estudar uma fatia de material e extrapolar seus resultados para toda a chapa (ABAQUS, 2015) e Malavolta *et al.* (2005).

A análise numérica foi caracterizada por dois problemas em que consistem na operação de dobramento, estruturada por meio do algoritmo implícito do *software* ABAQUS® no qual foi realizada a configuração da aplicação para um tempo de 15 segundos entre o avanço do punção até sua chegada ao limite de avanço que consiste na acomodação total da chapa sobre a matriz. O retorno do punção foi determinado com um tempo de 3 segundos de duração e está inserido na segunda parte do problema, que também foi modelado com base no modelo implícito do *software* ABAQUS®.

As etapas de movimentação do punção no *software* foram criadas com base no

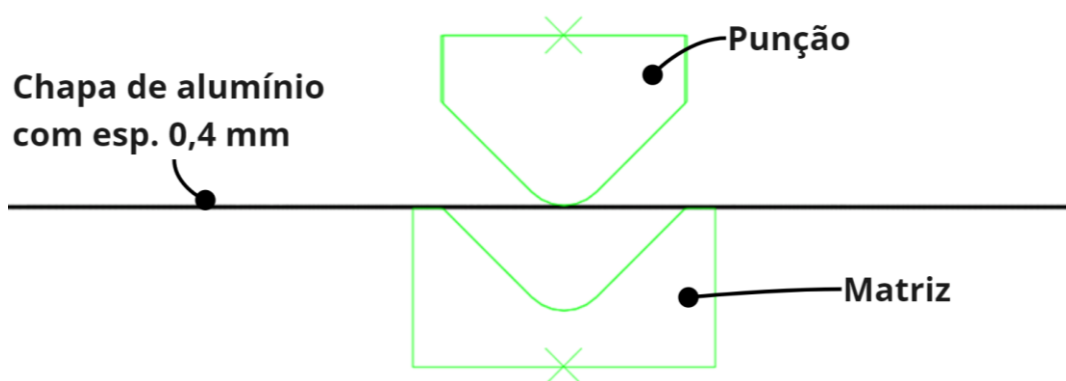
tipo estático de análise, pois segundo ABAQUS (2015) esta aplicação pode ser empregada para modelos de conformação mecânica, dentre os quais está a operação de dobramento.

O punção foi definido com seu movimento livre somente no eixo Y, sendo que este movimento é perpendicular a direção de dobra da chapa.

A análise foi desenvolvida utilizando o mesmo valor de deslocamento e velocidade aplicada nos ensaios experimentais e o monitoramento e captura de dados foram realizados por meio da geração de gráficos do comportamento de tensão e deformação verdadeiras do corpo de prova, bem como dos valores de forças existentes na análise.

O experimento e a análise numérica foram realizados sem a aplicação de lubrificação. Foi considerado o coeficiente de atrito de 0,47, pois segundo Bouché (1979), este é o valor para a combinação entre ligas de alumínio e aço sem lubrificação. Na Figura 37 é apresentado o modelo com a chapa de 0,4mm de espessura e o punção com raio de dobra de 5,0 mm.

Figura 37 – Montagem do conjunto de punção de raio 5,0mm, matriz e chapa.



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.4 Hardware utilizado para simulação dos modelos

Para a realização das simulações, programações e estudos dos modelos utilizados, foi utilizado um computador ASUS VivoBook com processador Core i5 de 8ª geração e 1,6GHz, 4 núcleos, com 8 GB de memória RAM e Placa de vídeo dedicada Nvidia (GPU) de 2 GB. Fatores de escala de massa ou de tempo não foram aplicados na simulação.

3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento de dobra foi realizado mantendo a matriz fixa junto à base e proporcionando o deslocamento do punção até que a chapa fosse conformada assumindo a geometria da matriz. Esta posição de manutenção da chapa dobrada foi mantida por um segundo, sendo aliviada a carga sobre o punção em seguida.

O planejamento de implementação dos casos estudados no trabalho está organizado conforme a Tabela 1, em que foram definidos ensaios experimentais, modelos de análise numérica, cálculos analíticos e propostas para uma compensação do retorno elástico.

Tabela 1 – Planejamento experimental dos casos implementados.

Etapa de implementação	Tipo de Solução utilizada	Caso	Ângulo de abertura do "V" do conjunto da matriz e punção	Raio do punção (mm)
Antes da implementação da proposta de compensação do retorno elástico	Experimento	1	Abertura de 90°	1,0
		2	Abertura de 90°	5,5
	Análise de elementos finitos	3	Abertura de 90°	0,4
		4	Abertura de 90°	1,0
		5	Abertura de 90°	2,0
		6	Abertura de 90°	3,0
		7	Abertura de 90°	4,0
		8	Abertura de 90°	5,0
		9	Abertura de 90°	6,0
Depois da implementação da proposta de compensação do retorno elástico	Experimento	10	Abertura de 87°	0,4
		11	Abertura de 122°	6,0
	Análise de elementos finitos	12	Abertura de 122°	0,4
		13	Abertura de 95°	3,0
		14	Abertura de 87°	6,0
		15	Abertura de 81°	10,0
		16	Abertura de 122°	0,4
	Solução analítica	17	Abertura de 108°	1,0
		18	Abertura de 100°	2,0
		19	Abertura de 95°	3,0
		20	Abertura de 92°	4,0
		21	Abertura de 89°	5,0
		22	Abertura de 87°	6,0
		23	Abertura de 85°	7,0
		24	Abertura de 84°	8,0
		25	Abertura de 82°	9,0
		26	Abertura de 81°	10,0

Fonte: Elaborada pelo autor

Nos casos 1 e 2 foram utilizados ensaios experimentais para verificação do comportamento do material na análise numérica, na aplicação das equações e seu comportamento nos experimentos práticos.

Nas análises numéricas preliminares foram estudados os casos entre 3 e 9 para verificação dos resultados e comparação com equações.

Após a realização da análise numérica e do procedimento experimental, foi realizada a aplicação de equações 39 e 40 para se obter um procedimento compatível com os resultados obtidos para elaboração de uma proposta de compensação do retorno elástico.

Foram realizados estudos dos resultados obtidos e elaborada uma proposta de compensação do retorno elástico. Esta proposta foi implementada na construção de matrizes e punções utilizados nos casos 10 e 11.

Nos casos entre 12 e 15 foram aplicadas as análises numéricas com a geometria definida para a compensação de retorno elástico. Ao aplicar as equações 38 e 39, foi verificada de forma analítica a implementação dos casos 16 até o 26.

Os resultados obtidos na análise dos casos propostos serão apresentados e discutidos nos próximos capítulos.

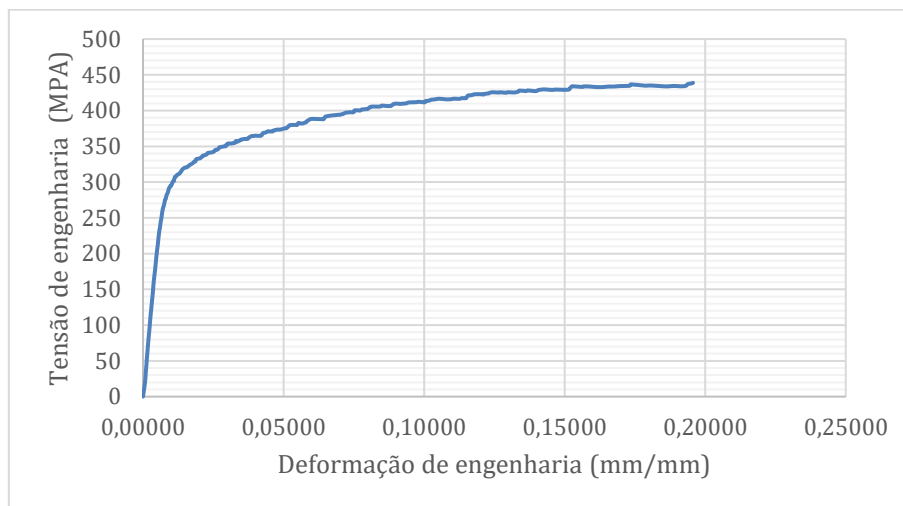
4 RESULTADOS

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho desde os ensaios de tração até os resultados dos ensaios experimentais de dobramento e das análises numéricas. Também estão apresentados os resultados obtidos como proposta de compensação do retorno elástico obtidos por outras análises numéricas e experimentos.

4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Os valores obtidos por meio do ensaio de tração do material estão demonstrados na Figura 38 para os corpos de prova de espessura de 0,4 mm.

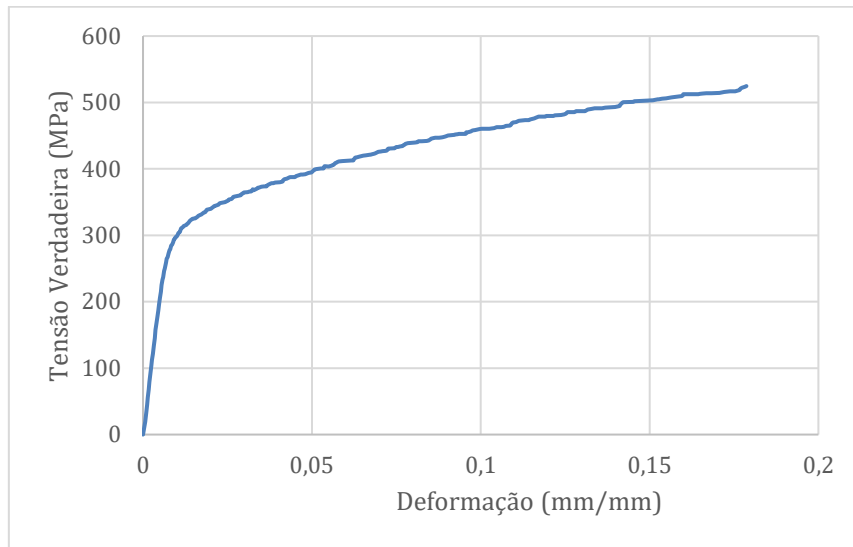
Figura 38 – Curva Tensão em função da Deformação de engenharia para o alumínio QQ-A-250/5 (2024-T3)



Fonte: Elaborada pelo Autor

Na figura 39 é apresentado o comportamento da tensão verdadeira em função da deformação verdadeira calculada para o alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3) com a espessura de 0,4 mm, calculados utilizando a equação 8 e 9.

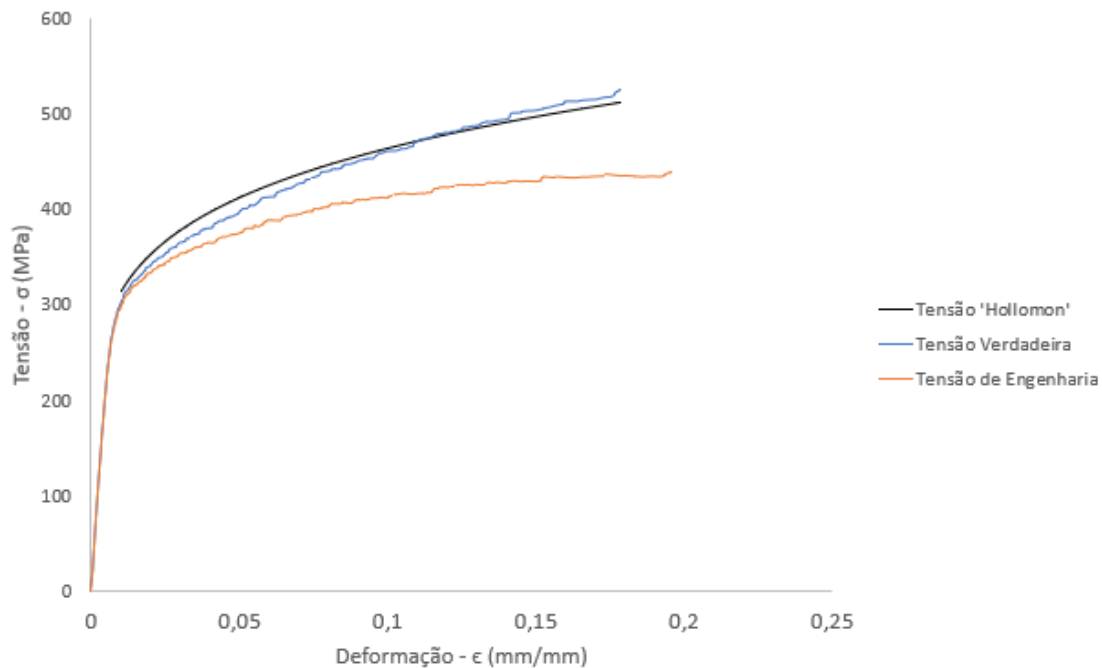
Figura 39 – Curva de tensão de verdadeira em função da deformação verdadeira do alumínio QQ-A-250/5 (2024 - T3).



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 40 mostra uma comparação entre os valores de tensão verdadeiras calculadas pelo modelo de *Hollomon* e pelo modelo calculado anteriormente.

Figura 40 – Comparação entre a Curva de tensão e deformação de engenharia e as curvas de tensão e deformação verdadeiras curva calculada pelo modelo de *Hollomon* para alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3).



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a realização do cálculo da tensão e deformação verdadeira utilizando o modelo de *Hollomon*, foram utilizados os valores do coeficiente de resistência K como sendo 689 MPa e o valor de 0,17 para o coeficiente de encruamento n em que foram calculados com base na equação 10.

A Tabela 2 apresenta os valores de propriedades mecânicas do material que foram obtidos nos ensaios experimentais e nas informações do fabricante. Estes dados foram utilizados nas análises numéricas e nos cálculos matemáticos.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3)

Propriedades do material	Valores
Módulo de Elasticidade E (GPa)	73,0 GPa
Tensão de Escoamento (MPa)	286 MPa
Tensão de Ruptura (MPa)	524 MPa
Resistência à tração	689 MPa
Índice de encruamento	0,15
Alongamento % do corpo de prova de 32mm	19,8 %
Densidade	2,74g/cm ³
Coeficiente de Poisson	0,33

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES TRIDIMENSIONAIS DO EXPERIMENTO

A Figura 41 mostra os resultados para a análise do caso 1 de uma chapa dobrada com a ferramenta de raio 1,0 mm.

Figura 41 – Chapa de 0,4mm dobrada com ferramenta de raio 1,0 mm.



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 42 apresenta os resultados de uma chapa dobrada com a ferramenta de raio 5,5 mm.

Figura 42 – Chapa de 0,4 mm dobrada com ferramenta de raio 5,5 mm.



Fonte: Elaborada pelo autor

Foram realizadas as medições de raio interno da chapa e ângulo de dobramento. As medidas estão apresentadas na Tabela 3 e as medidas principais da matriz e do punção são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 3 - Medição tridimensional das chapas dobradas

Caso	Raio do Punção	Raio Interno[mm]	Ângulo de dobra[°]
1	1,0	1,458	93,54
2	5,5	6,453	113,30

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4 – Medição tridimensional das ferramentas

Matriz		Punção		
Largura do V(mm)	Angulo de dobra(°)	Largura do "V" (mm)	Ângulo de dobra(°)	Raio de dobra(mm)
32,167	89,95	32,3	89,6	1,0
		32,2	89,9	5,5

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3 FORÇAS DE DOBRA EXPERIMENTAIS

Durante a realização dos experimentos foram obtidas as forças máximas de dobra aplicadas em cada um dos corpos de prova e que podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Força de dobramento

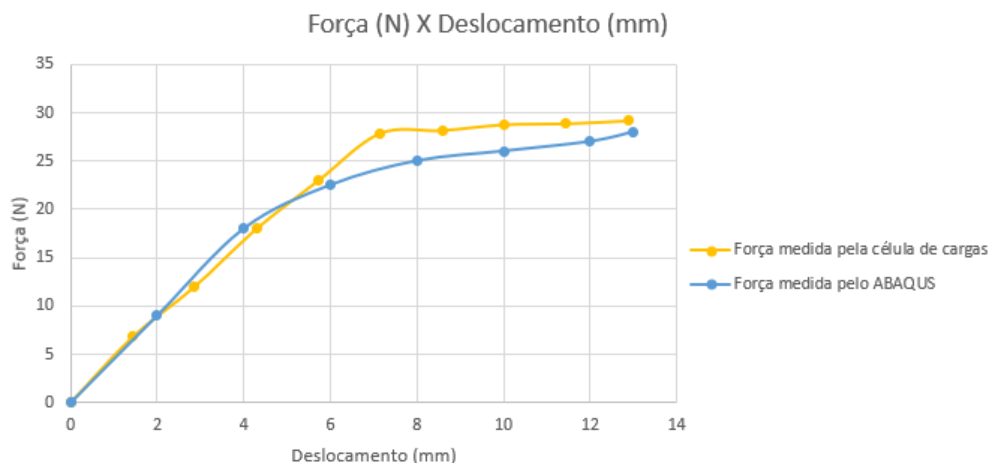
Raio do punção (mm)	Força de dobra(N)
1,0	33 N
5,5	30 N

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 43 apresenta uma comparação entre os dados de força medida por meio

do experimento para o dobramento realizado com o punção de raio 5,5 mm, em que é apresentada a curva média dos corpos de prova utilizados. Foram realizados experimentos em que 3 corpos de prova dobrados com ferramentas de raio 1,0 mm e outros 3 corpos de prova foram dobrados com ferramenta de raio 5,5 mm.

Figura 43 – Força em função do Deslocamento no experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.4 ÂNGULO PREVISTO POR ANÁLISES NUMÉRICAS

Nas análises numéricas foram realizados os ensaios planejados entre os casos de 3 e 9 e seus resultados são apresentados na tabela abaixo. Nestas medições foram observados os valores de ângulos de dobramento da chapa após o alívio da carga do punção sendo utilizadas a matriz e o punção com ângulo de 90° e variando o raio de dobra.

Tabela 6 – Ângulos de dobra e retorno elástico com matriz e punção de 90°.

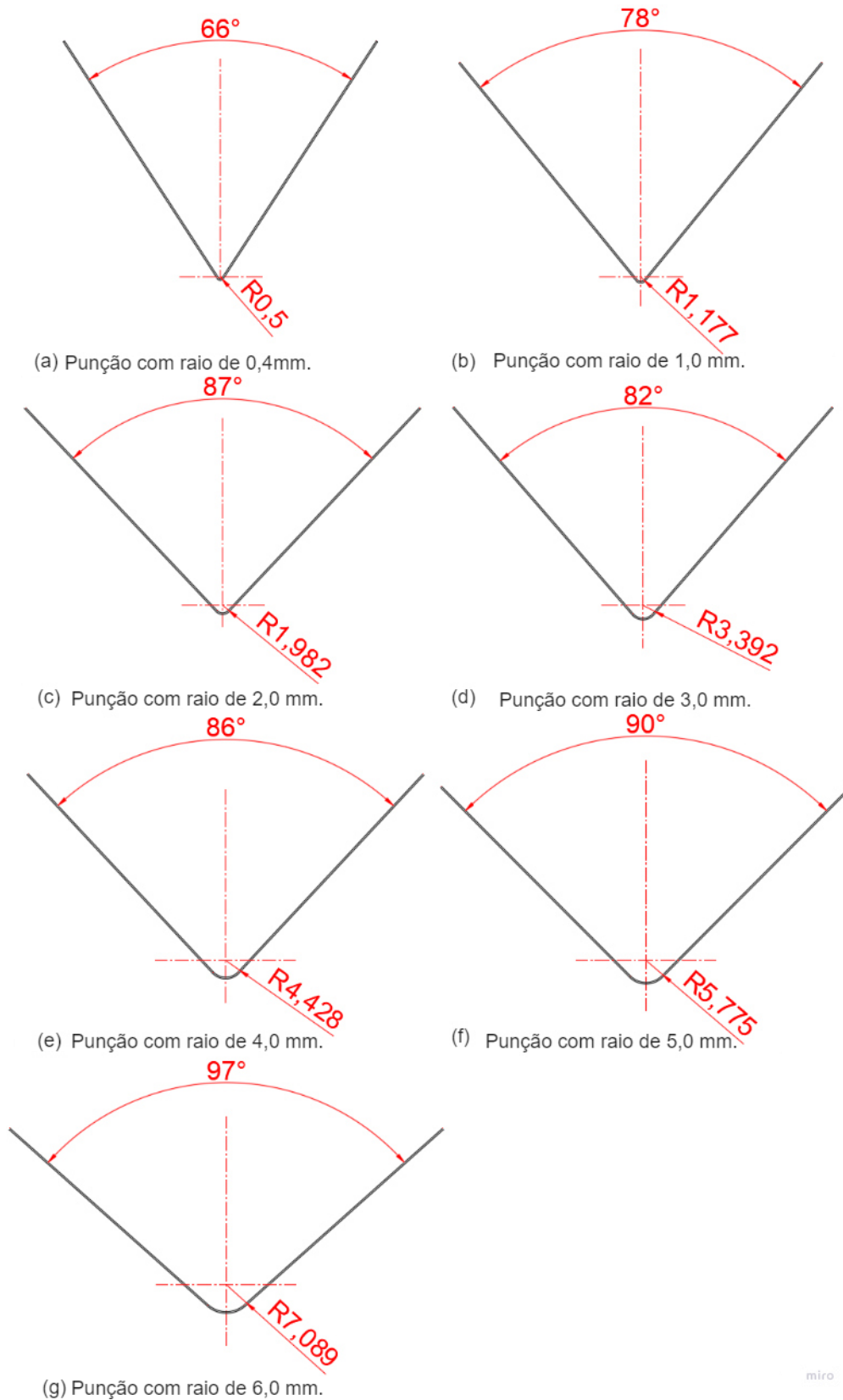
Ângulos de dobra previstos por elementos finitos				
Casos	Raio do punção(mm)	Ângulo Desejado(°)	Ângulo medido por FEA(°)	Erro (%)
3	0,4	90	66	36
4	1,0	90	78	15
5	2,0	90	87	3,4
6	3,0	90	82	9,7
7	4,0	90	86	4,6
8	5,0	90	90	0
9	6,0	90	97	7,2

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 44 são apresentadas as medidas da operação de dobramento desenvolvida no *software* ABAQUS®, para as ferramentas variadas de acordo com

cada caso implementado e ângulo de dobramento de 90°.

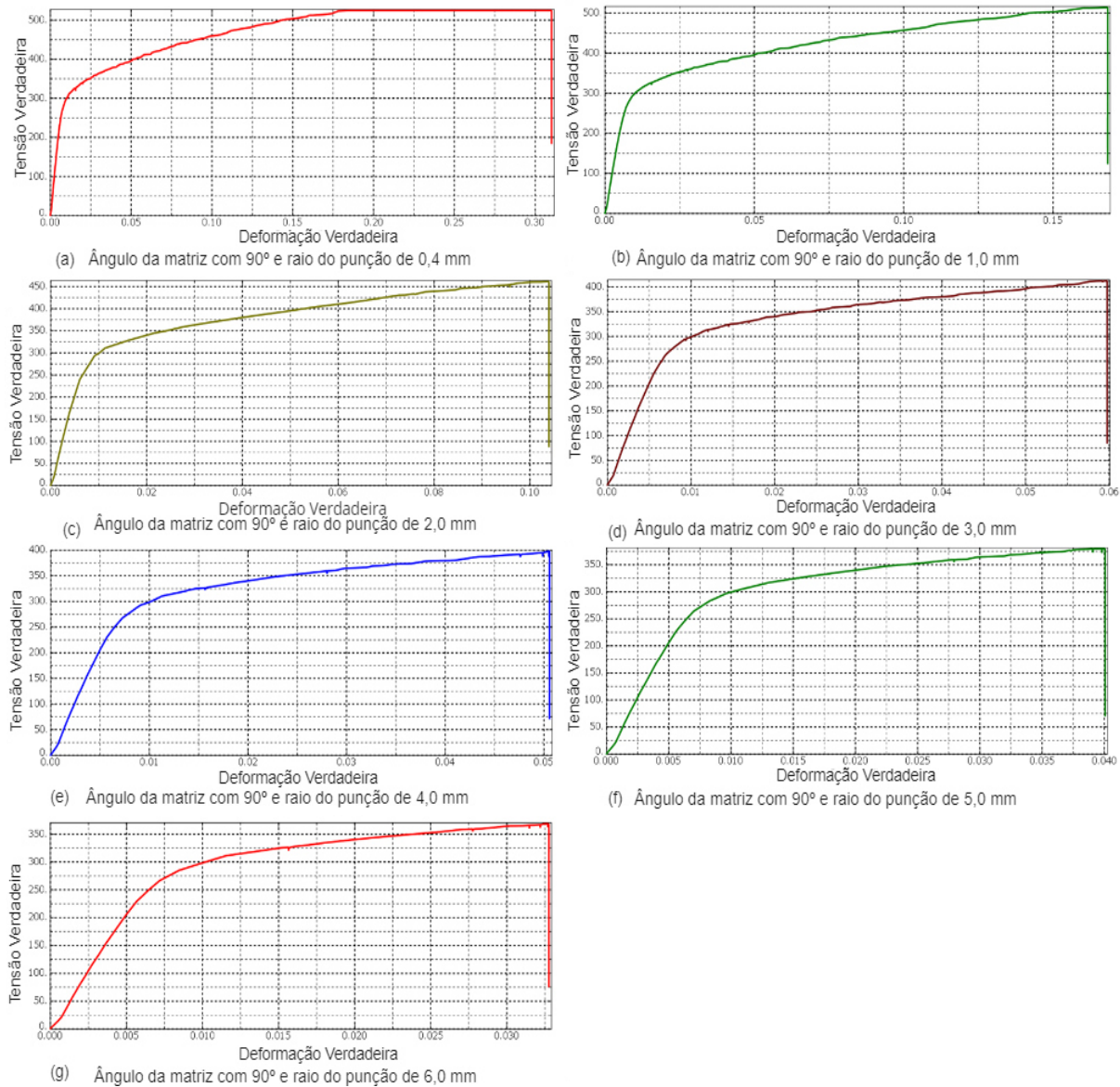
Figura 44 –Retorno elástico com matriz e punção de 90°.



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura abaixo apresenta o gráfico de tensão verdadeira em função da deformação verdadeira ao analisar as dobras para os casos definidos entre 3 e 9, com a variação de raio de ponta de ferramenta e manutenção do ângulo de abertura.

Figura 45 – Curva de tensão em função da deformação verdadeira para o dobramento de ângulo 90° e variando o raio da ponta do punção.



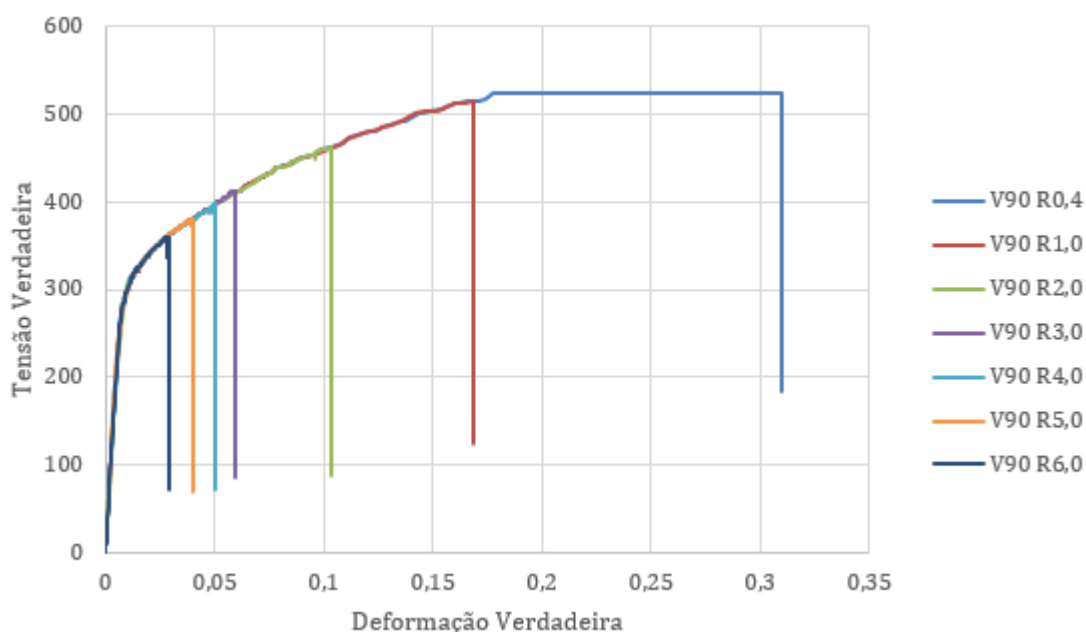
Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 46 relaciona os ensaios que foram elaborados, e foi possível observar que todos os experimentos apresentaram comportamentos semelhantes no início da relação entre a tensão verdadeira e a deformação verdadeira, o que pode se considerar que o ensaio apresentou as mesmas características em seu

desenvolvimento.

Outra análise que pode ser feita com base nestas informações é de que a tensão e a deformação verdadeira aumentaram de valor conforme o valor do raio do punção diminuiu, o que faz com que a tensão limite seja atingida ao se utilizar o raio de dobra de 0,4 mm, que consiste em um raio de dobra igual ao valor da espessura da chapa.

Figura 46 – Comparação das curvas de tensão verdadeira em função da deformação verdadeira nas chapas dobrada com matriz 90° utilizando diferentes raios.

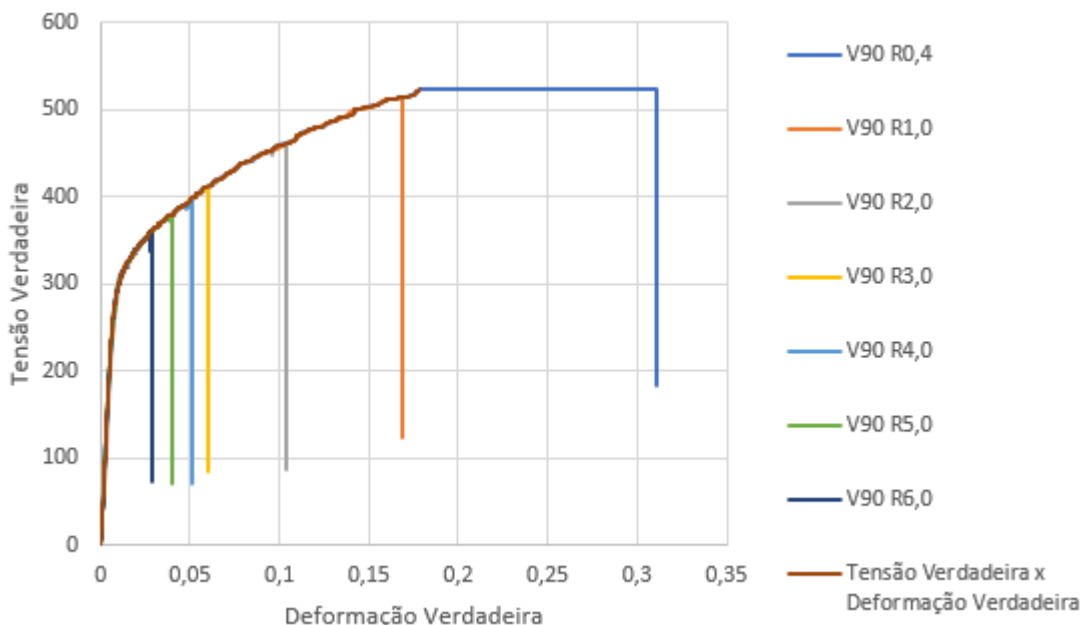


Fonte: Elaborada pelo autor

Segundo a norma DIN 9635, os valores de raio mínimo para ligas de alumínio devem estar entre 0,9 e 3 vezes o valor da espessura.

A Figura 47 mostra o comportamento da análise numérica dos 7 casos de dobramento juntamente com a curva de tensão verdadeira e deformação verdadeira obtida por meio do ensaio de tração.

Figura 47 – Comparação entre as curvas de tensão verdadeira X deformação verdadeira nas chapas dobrada com matriz 90° e diferentes raios com a curva de tensão verdadeira X deformação verdadeira do ensaio de tração.



Fonte: Elaborada pelo autor

A partir do gráfico acima, foi possível observar que o comportamento da tensão e deformação verdadeira se manteve coerente com a solicitação em cada um dos corpos de prova, em que as curvas se mantiveram com o mesmo comportamento até o ponto em que a solicitação se diferenciava. Após o alívio da carga a tensão diminuiu de intensidade, porém resíduos do processo foram mantidos na chapa ao final do processo.

4.5 COMPENSAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO

Com base nas equações da literatura, nos experimentos realizados e nas análises numéricas foi proposta uma estratégia de compensação do retorno elástico observado ao realizar a operação de dobramento das chapas de alumínio QQ-A-250/5 (2024-T3) com espessura de 0,4 mm.

A tabela 7 apresenta a relação dos resultados obtidos em um comparativo em todos os casos em que foram aplicados os procedimentos de compensação do retorno elástico.

Tabela 7 – Casos estudados utilizando a proposta de compensação de retorno elástico por cálculos, análises numéricas e experimentos (Condições NA não foram implementadas).

Etapa de implementação	Tipo de Solução utilizada	Caso	Ângulo calculado por elementos finitos como compensação de projeto da matriz(*)	Raio do punção modelado para a condição inicial	Erro angular analítico (%) entre a matriz teórica e 90°	Erro angular FEA (%) entre (*) e 90°	Erro angular (%) entre o valor medido e 90°
Depois da implementação da proposta de compensação do retorno elástico	Experimento	10	122°	0,4	NA	NA	22,0
		11	87°	6,0	NA	NA	3,2
	FEA	12	122°	0,4	0,809	3,0	NA
		13	95°	3,0	-3,098	2,0	NA
		14	87°	6,0	-24,878	0,0	NA
		15	81°	10,0	-56,907	3,2	NA
		16	122°	0,4	0,809	NA	NA
	Solução analítica	17	108°	1,0	14,875	NA	NA
		18	100°	2,0	4,89	NA	NA
		19	95°	3,0	-3,098	NA	NA
		20	92°	4,0	-10,452	NA	NA
		21	89°	5,0	-17,635	NA	NA
		22	87°	6,0	-24,878	NA	NA
		23	85°	7,0	-32,315	NA	NA
		24	84°	8,0	-40,089	NA	NA
		25	82°	9,0	-48,254	NA	NA
26		81°	10,0	-56,907	NA	NA	

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir dos resultados obtidos por meio das análises de elementos finitos e valores obtido por meio de cálculos analíticos utilizando a equação 30 como base, foi possível estimar os valores de ângulo de dobra para a compensação do retorno elástico.

A relação da proposta da compensação foi elaborada ao relacionar os resultados obtidos para o coeficiente de retorno elástico por meio da equação 27 e 30 com os valores da análise de elementos finitos para os valores de raio de dobra de 0,4 mm, 1,0 mm, 3,0 mm e 6,0 mm.

$$k_{fem} = \frac{\alpha_{medido}}{\alpha_{desejado}} \quad (35)$$

Desta forma foi identificado o valor do ângulo que a matriz deveria apresentar ao ser levado em consideração o fator k_{fem} da equação 35. A equação 36 apresenta esta relação.

$$\alpha_{comp} = \frac{\alpha_{desejado}}{K_{fem}} \quad (36)$$

Os valores obtidos como resultado das análises por elementos finitos apresentaram os valores de raio de dobra aproximados dos valores calculados de maneira analítica, fato que apresentou uma oportunidade de estabelecimento de uma relação. A tabela abaixo apresenta uma comparação entre os valores de raio de dobra final calculados de maneira analítica com os valores obtidos nas análises numéricas.

Tabela 8 – Comparação dos resultados de raios de dobra calculados de forma analítica e por análise numérica.

Raio do punção	Raio calculado de forma analítica	Raio de dobra simulado na análise numérica	Erro angular equação 26 (%)
0,4	0,405	0,470	16,0
1	1,031	1,177	14,1
2	2,129	1,982	7,4
3	3,299	3,392	2,8
4	4,549	4,428	2,6
5	5,887	5,775	1,9
6	7,322	7,089	3,2

Fonte: Elaborada pelo autor

Com a tabela acima verifica-se que os valores dos erros apresentam valores menores com o aumento dos valores do raio do punção, para a região em que a norma apresenta valores de raio de dobra convencionais, acima do valores da espessura do material.

Desta forma a equação 37 estabelece uma relação entre ângulo ideal de dobramento e raio de dobramento.

$$c_1 = \frac{\alpha_{comp}}{R_{analítico}} \quad (37)$$

Ao realizar esta equação para alguns raios de dobra, foi possível verificar uma tendência no comportamento do material, em que a equação 38 mostra a relação entre a variável c_1 e o $r_{analítico}$.

$$c_1 = 108,84 * R_{analítico}^{-1,11} \quad (38)$$

Ao substituir c_1 da equação 38 na equação 37, foi possível obter um modelo de compensação que pode ser aplicado nos casos em análise, conforme a equação 39.

$$\alpha_{comp} = R_{analítico} * 108,84 * R_{analítico}^{-1,11} \quad (39)$$

Na equação 39, o valor de α_{comp} corresponde ao valor do ângulo ($^\circ$) inserido na matriz como compensação e $R_{analítico}$ (mm) pode ser calculado pela equação 30. O valor do raio analítico ($R_{analítico}$) é equivalente ao valor de raio final de dobra (R_f). Manipulando a Equação 30, o valor do $R_f = R_{analítico}$ fica definido da maneira que apresenta a equação 40,

$$R_f = R_{analítico} = \frac{R_i}{4 \left(\frac{R_i \sigma_0}{tE} (1 - \nu^2) \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i \sigma_0}{tE} \right) (1 - \nu^2) + 1} \quad (40)$$

em que:

R_i = Raio inicial

σ_0 = Tensão de escoamento do material

t = Espessura da chapa

E = Módulo de elasticidade

ν = Coeficiente de Poisson

A obtenção deste modelo utiliza como base resultados das análises numéricas combinados com resultados encontrados nas equações clássicas existentes na literatura que relaciona fator de retorno elástico com raio de dobra final e inicial, como é encontrado nas equações 27 e 30.

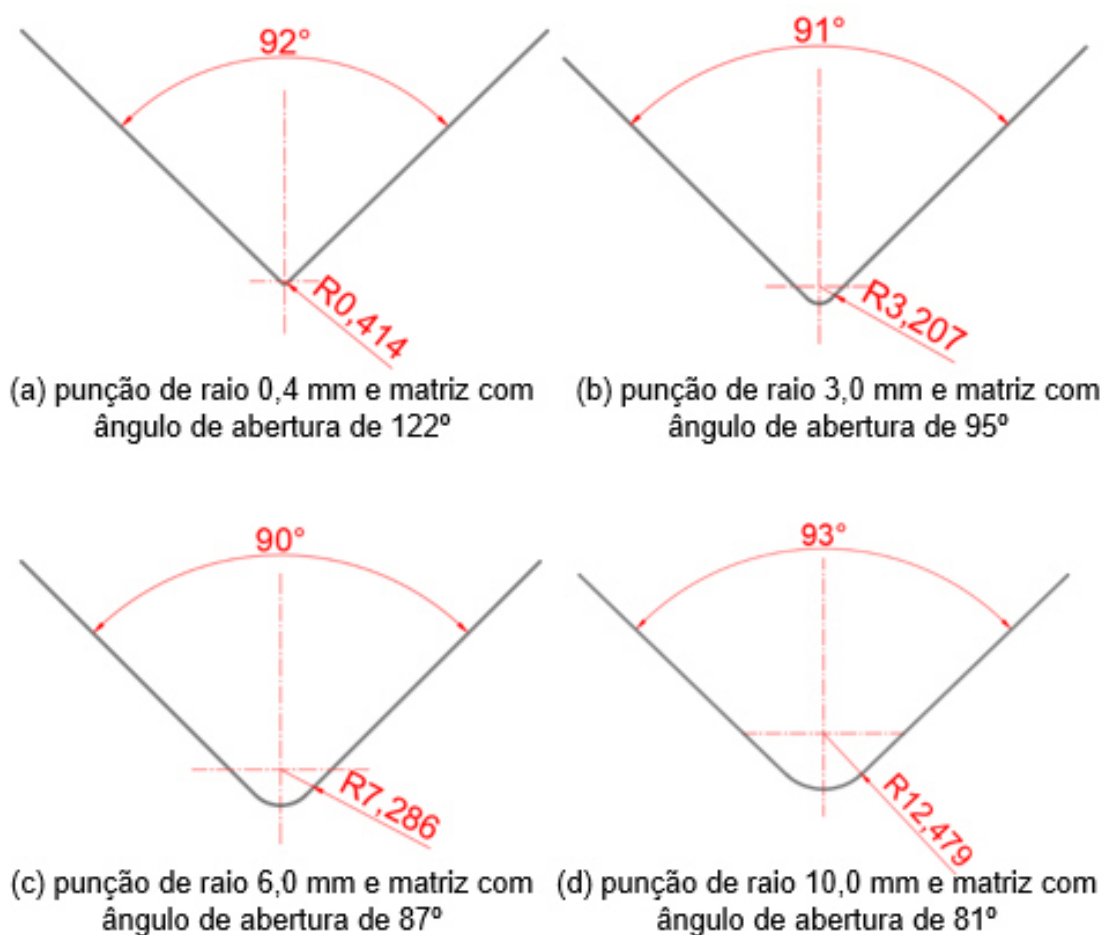
O modelo que foi aplicado nos cálculos levou em consideração os conceitos de deformação plana que pode ser resolvida por meio da equação 37. Caso a solução a ser desenvolvida considerar o estado plano de tensão, o modelo de compensação proposto não se aplica de maneira direta, sendo necessários novos estudos.

Como resultado do procedimento descrito acima foram elaborados para a

simulação numérica punções e matrizes com valores diferentes de ângulo de dobra com o intuito de atingir o ângulo de dobra final de 90° .

Na Figura 48 é apresentada a previsão do ângulo de dobramento das chapas por análise numérica ao implementar no *software* ABAQUS® a proposta de compensação do retorno elástico na operação de dobramento desenvolvida para as aplicações dos casos de 12 a 15.

Figura 48 – Ângulos e raios previstos por compensação de retorno elástico utilizando punção e matriz com ângulos e raios variados.



Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 9 relaciona os valores dos raios de dobras calculados de maneira analítica com os valores obtidos nas análises numéricas utilizando os modelos contendo a geometria de compensação do retorno elástico.

Tabela 9 – Comparação entre o raio de dobra final calculado de forma analítica e por análise numérica.

Raio do punção	Raio calculado de forma analítica	Raio de dobra da análise numérica	Erro angular pela equação 10 (%)
0,4	0,405	0,414	2,22
3	3,299	3,207	2,78
6	7,322	7,286	0,49
10	14,250	12,479	12,43

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 10 apresenta as análises numéricas elaboradas para verificar o resultado da proposta de compensação.

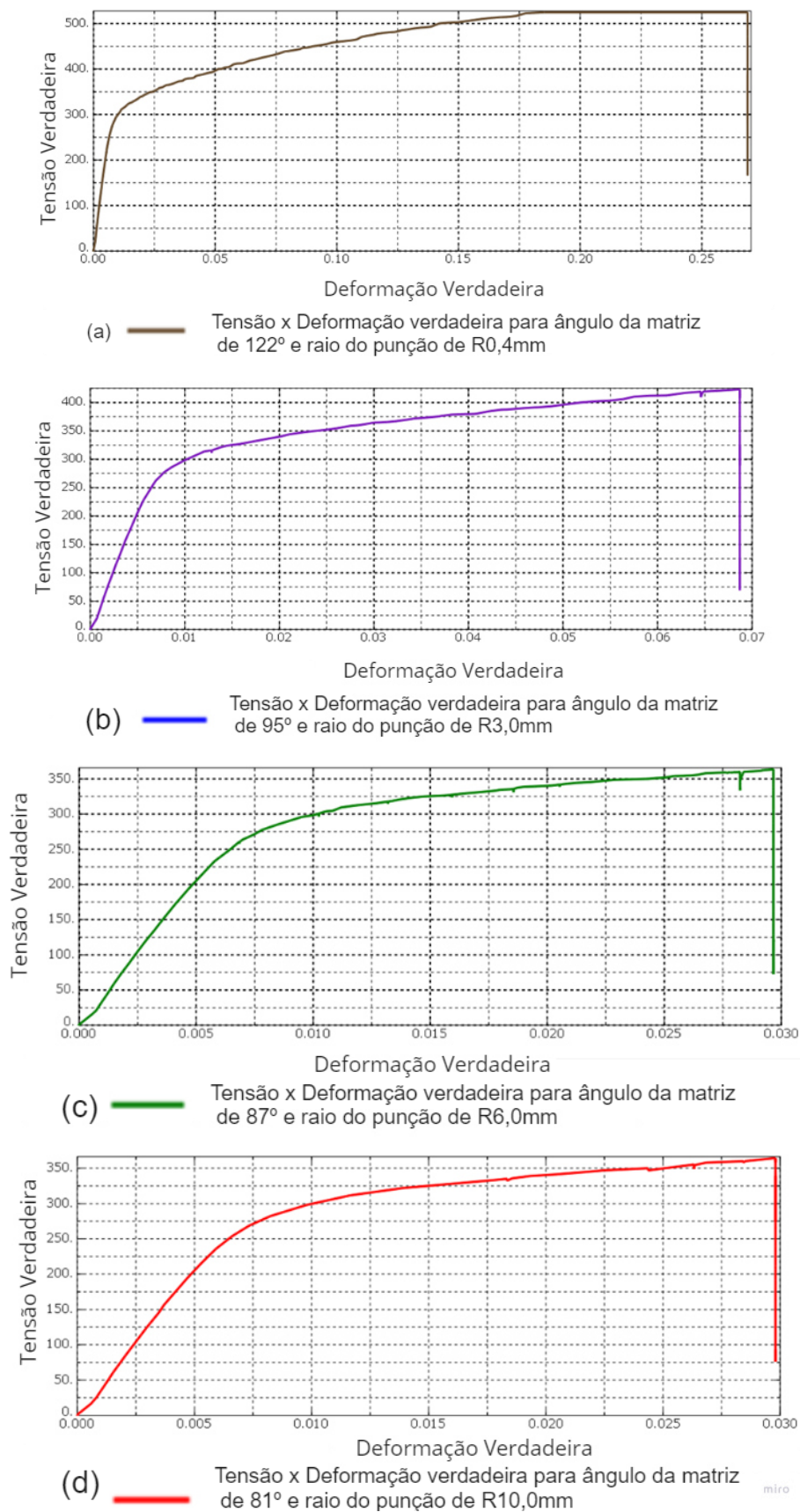
Tabela 10 – Casos estudados utilizando a proposta de compensação de retorno elástico por análise numérica e experimentos.

Caso	Raio do punção	Ângulo da Matriz Com Valor Compensado	Ângulo Desejado	Ângulo Medido	Erro angular FEA (%)
12	0,4	120,221	90	92	3,0
13	3	95,448	90	91	2,0
14	6	87,434	90	90	0,0
15	10	81,258	90	93	3,2

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 49 apresenta a relação de tensão verdadeira em função da deformação verdadeira para o comportamento do material durante a operação de dobramento ao implementar a proposta de compensação do retorno elástico nas análises numéricas com o *software* ABAQUS®.

Figura 49 – Curva de tensão verdadeira x deformação verdadeira na chapa dobrada



Fonte: Elaborada pelo autor

Comparando os resultados obtidos com a tabela 9, foi possível verificar que os erros dos valores do raio de dobra diminuíram se comparando com a análise realizada nos modelos sem o ajuste de compensação do retorno elástico, ao verificar os raios medidos a partir do punção de 0,4 mm até os raios de 10,0 mm o erro máximo foi de 12,43%.

Desta forma foi possível verificar que a proposta de compensação do retorno elástico apresentou resultados positivos quando a análise foi realizada por simulações numéricas, pois os erros das medições dos ângulos apresentaram valores entre 0 e 3,2% entre os resultados esperados e valores obtidos. Já os erros nos valores dos raios de dobra apresentaram valores entre 0,49% e 2,78%, o que representa valores melhores do que os apresentados nos modelos analisados antes da compensação, em que os erros angulares apresentavam valores de até 36% presentes na tabela 6.

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE A SIMULAÇÃO E O EXPERIMENTO

Os primeiros ensaios experimentais implementados para os casos 1 e 2 foram realizados utilizando a matriz e punção com raio de 1,0 mm e 5,5 mm respectivamente, sendo que ambos os conjuntos utilizaram ângulo de abertura de 90°.

O valor da força de dobra realizada por punção com raio de 1,0 mm apresentou um valor médio de 30 N. A força medida durante a dobra na chapa com punção de raio de 5,5 mm foi de 27,5 N.

Os valores dos ângulos de dobras obtidos por experimento, análises numéricas e valores teóricos esperados estão apresentados na tabela 11, em que também estão inseridos os valores do fator de retorno elástico k calculados a partir das condições indicadas na tabela. Foram calculados os valores teóricos por meio da aplicação das equações 23, 24 e 25, e foram encontrados os valores de ângulos de dobras teóricos, bem como foi possível definir o fator de retorno elástico k .

Tabela 11 – Valores Teóricos, experimentais e por elementos finitos para o ângulo de dobra e para o fator k .

Raio de dobra	Ângulo de Dobramento ($^{\circ}$)			Fator k		
	Teórico	Experimento	Elementos Finitos	Teórico	Experimento	Elementos Finitos
1,0	96,30	93,54	89	0,935	0,962	0,988
5,5	136,19	113,3	104	0,661	0,794	0,865

Fonte: Elaborada pelo autor

Desta forma é possível verificar os erros de previsão dos ângulos finais de dobramento conforme a equação 26 e que estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Erros obtidos para o ângulo de dobramento (valores calculados em relação aos experimentais, Eq. 26).

Raio de dobra	Erros teóricos em relação ao experimento	Erros nos cálculos por elementos finitos em relação ao experimento
1,0	+ 2,95%	- 4,85%
5,5	+ 20,20%	- 8,21%

Fonte: Elaborada pelo autor

Pela síntese obtida na Tabela 12, é possível verificar que a resposta do alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3) apresenta um padrão diferenciado de erros quando comparados os cálculos por equações ou por elementos finitos. Os cálculos por equações apresentaram valores finais dos ângulos de dobramento maiores que os obtidos nos experimentos respectivos. Por outro lado, os cálculos por elementos finitos apresentaram valores de ângulos de dobramento menores que os obtidos nos experimentos.

É preciso considerar que a modelagem teórica (equações 24 e 25) parte de premissas que não consideram o grau de encruamento imposto sobre as amostras. Os resultados teóricos apresentados extrapolam a previsão do total retorno elástico, mas não perdem sua importância ao serem obtidos por cálculos analíticos.

De maneira oposta, a análise por elementos finitos considera o efeito diferencial imposto pelo encruamento das amostras. Apesar de os erros de previsão por elementos finitos parecerem mais satisfatórios que os obtidos pelas equações dado o módulo dos desvios apresentados, estudos mais sistemáticos necessitam ser

contemplados para se verificar os possíveis fatores de influência nos erros remanescentes juntamente com as limitações das hipóteses adotadas nestas análises.

De forma indireta pelos gráficos das deformações principais 1 (Figuras 45 (b) e 45 (f)), observa-se uma relação coerente da evolução da grandeza com o raio de curvatura do punção (menor raio relaciona-se com maior deformação principal 1). Apesar deste aspecto que mostra tal coerência, as tensões equivalentes do caso 2 (punção com raio de 1,0 mm na ponta) atingiram um valor máximo acima da maior tensão obtida no ensaio de tração do material. Esta é uma situação comum quando há carregamentos mais complexos do que os uniaxiais, mas que poderia encontrar uma ponderação diferenciada ao se realizar comparações para esta análise alterando-se a premissa do estado plano de deformações para o estado plano de tensões.

Ainda, indagações sobre como o contato da ponta arredondada do punção interage com a chapa poderão ser úteis aos estudos que se baseiam em geometrias mais complexas. No caso, o problema de contato mecânico e atrito pode se revelar como fator crucial em alguns casos, sobretudo se junto a estes estudos se contemplar a presença de elementos construtivos que condicionam a acomodação do material na matriz, o que se traduz em condicionar o encruamento do material por regiões na matriz. Isto pode levar a novas estratégias para análise do problema já na etapa dos estudos numéricos.

A partir da compensação proposta na seção 4.5 deste trabalho, ao ser realizada a alteração nos ângulos das ferramentas de dobra e mantendo os outros parâmetros de trabalho, diferenças foram observadas apresentando como um resultado significativo a possibilidade de obter o ângulo final muito aproximado ao valor desejado.

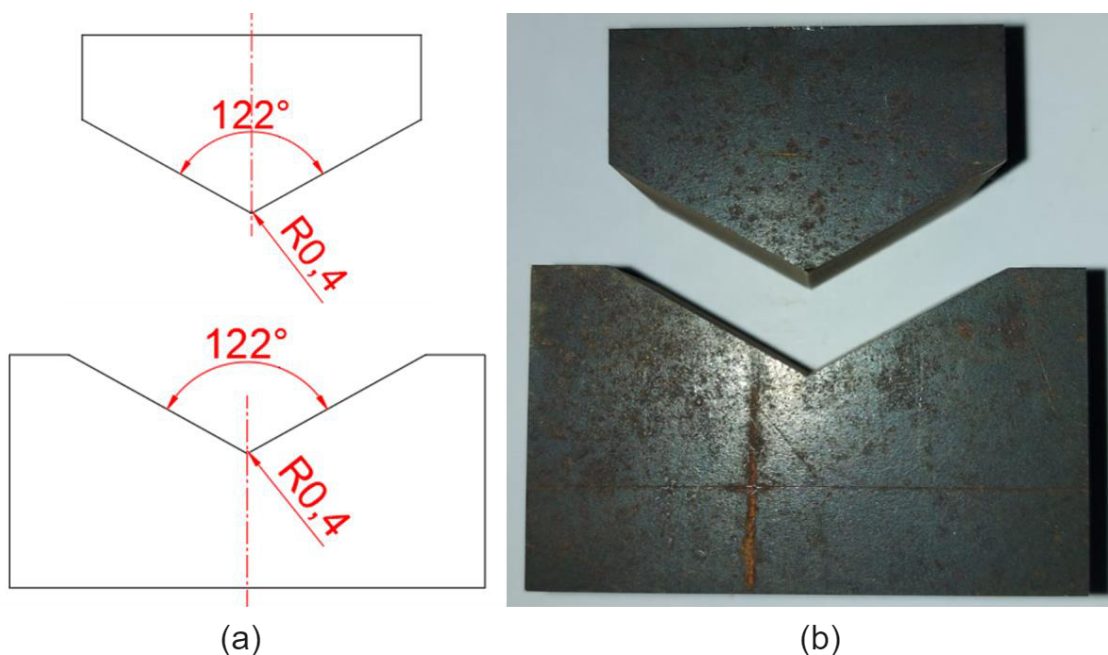
Para a realização do experimento utilizando a proposta de compensação do retorno elástico, foram escolhidos os valores de dobra para o punção com raio de 0,4 mm e o punção com raio de 6,0mm. Para estas condições, a equação 30 explicada na seção 4.5 apresenta valores de ângulo da matriz de 122° com raio de 0,4 mm para que seja obtido uma chapa com ângulo de 90° ao fim do processo de dobramento.

Ao utilizar a equação 30 para verificar o ângulo necessário para atingir uma dobra de 90° ao utilizar o raio da ferramenta com valor de 6,0 mm, foi proposta uma abertura

no valor de 87° no conjunto matriz e punção.

A Figura 50 (a) apresenta o projeto da matriz e do punção com a proposta de compensação para o raio de dobra de 0,4 mm e ângulo de 122°. As peças do punção e da matriz construídas são apresentadas na Figura 50 (b).

Figura 50 – Matriz com ângulo de 122° e raio de 0,4 mm como proposta de compensação do retorno elástico.



Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 13 apresenta os valores referentes as dimensões do punção e da matriz medidos por meio da medição tridimensional.

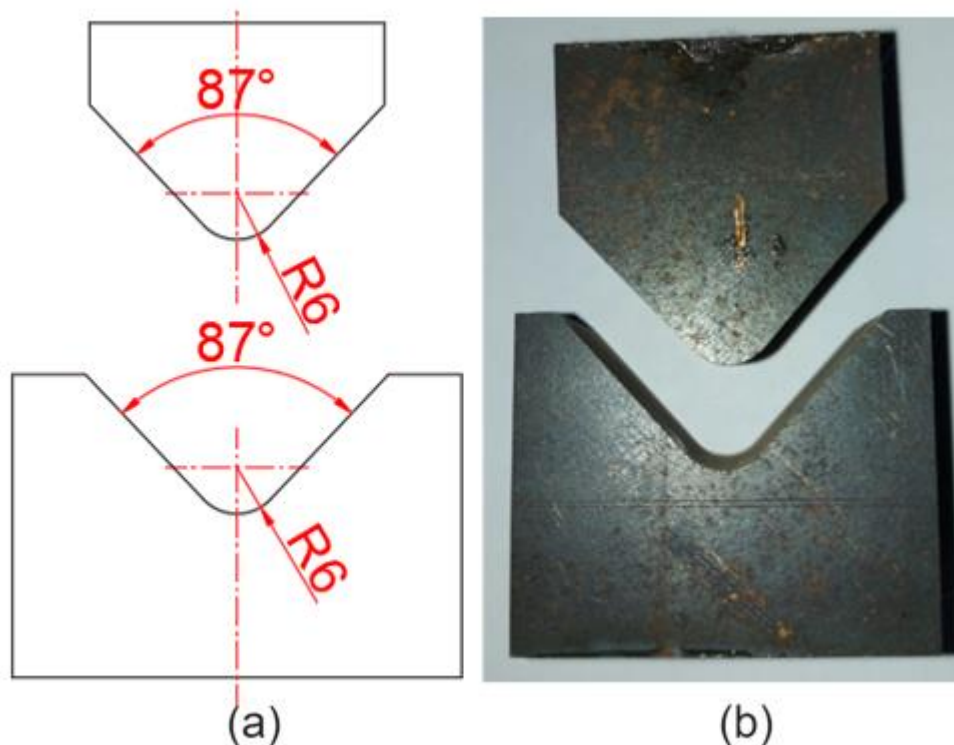
Tabela 13 – Medidas da matriz/Punção com raio de 0,4mm e 122°

Matriz		Punção		
Largura do V[mm]	Angulo de dobra[°]	Largura do "V" [mm]	Ângulo de dobra[°]	Raio de dobra
59,982	122,05	60,015	122,02	0,4

Fonte: Elaborada pelo autor

Foi projetado outro conjunto como proposta de compensação do retorno elástico para o raio de dobra de 6,0 mm. A Figura 51(a) mostra a matriz e o punção com os valores para esta compensação. A Figura 51(b) mostra o punção e a matriz construídos para a aplicação da compensação com ferramenta de raio 6,0 mm.

Figura 51 – (a) Projeto de matriz com ângulo de 87° e raio de 6,0 mm como proposta de compensação do retorno elástico. (b) Punção e Matriz com raio de 6,0 mm e ângulo de abertura de 87° .



Fonte: Elaborada pelo autor

Foram realizadas as medições do conjunto de matriz e punção de raio 6,0 mm e ângulo de 87° , e seus valores são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 14 – Medidas da matriz/Punção com raio de 0,4 mm e 122°

Matriz		Punção		
Largura do V[mm]	Angulo de dobra[$^\circ$]	Largura do "V" [mm]	Ângulo de dobra[$^\circ$]	Raio de dobra
38,350	86,980	38,342	87,010	6,0

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao realizar o ensaio com a ferramenta de raio 6,0 mm e ângulo de abertura com valor de 87° , o resultado da análise numérica atingiu o valor de 90° , que consistia no valor teórico esperado para esta alteração. A força de dobra não apresentou diferenças significativas em seus resultados em comparação com os valores obtidos anteriormente.

Para calcular o fator de retorno elástico foi utilizada a equação 38, que relaciona

o ângulo teórico esperado, que no caso dos experimentos é o valor de 90°.

Para esta operação com a aplicação da compensação do ângulo da matriz e do punção, o fator de retorno elástico apresentou uma diferença significativa com um resultado de 0,967, o que fez com que a chapa ao sofrer o retorno elástico tenha atingido o valor do ângulo esperado.

No caso da aplicação da análise numérica com a ferramenta de raio 0,4 mm em conjunto com a matriz e o punção com o ângulo de abertura de 122°, o resultado do fator de retorno elástico apresentou a mesma característica, estando em valores próximos de 0,782, fato que proporcionou uma chapa dobrada com o ângulo próximo ao projetado pela matriz e que deixou o resultado distante do esperado.

A Tabela 15 apresenta os resultados comentados em relação ao comportamento do retorno elástico a partir das alterações propostas.

Tabela 15 – Valores das análises numéricas para o ângulo de dobra e para o fator k depois da proposta de compensação.

Raio de dobra	Ângulo de Dobramento (°)		Fator k	
	Experimento	Elementos Finitos	Experimento	Elementos Finitos
0,4	115	92	0,782	0,978
6,0	93	90	0,967	1,000

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 52 apresenta a imagem de um dos corpos de prova dobrados pelo conjunto de punção e matriz com raio de 0,4 mm e ângulo de 122° e a figura 53 mostra uma das chapas dobradas com o conjunto de punção e matriz de raio 6,0 mm e ângulo de 87°.

Figura 52 – Chapa dobrada com ângulo de 122° e raio de 0,4 mm como proposta de compensação do retorno elástico.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 53 – Chapa dobrada com ângulo de 87° e raio de 6,0 mm como proposta de compensação do retorno elástico.



Fonte: Elaborada pelo autor

Com base nas análises realizadas antes e depois da proposta de modificação do ângulo da matriz e do punção, alguns fatores necessitam de uma maior investigação em busca do estabelecimento de um padrão para a compensação do retorno elástico, pois para uma determinada combinação entre os valores de ângulo e raio a compensação se mostrou eficiente tanto nos resultados medidos por meio do ângulo quanto na variação do fator k de retorno elástico.

Em outra combinação entre ângulos e raio de dobra de 0,4 mm o fator de retorno elástico se manteve próximo de 1 o que apresenta um resultado diferente no que tange a determinação de um padrão para outras combinações entre raios, ângulos e espessuras.

O fato da dobra realizada com a ferramenta de raio 0,4 mm ter apresentado valores diferentes do esperado pode ter sido causada pelo valor de raio igual ao valor da espessura da chapa, o que fica definido na literatura como não sendo o cenário ideal para o processo de dobramento. Este raio foi escolhido com o objetivo de verificar se os valores realmente apresentariam erros maiores, o que aconteceu e apresenta coerência com o esperado para raio de dobra igual ou menor do que as espessuras da chapa utilizada.

Este fato ressalta ainda mais a necessidade de um aprofundamento nos estudos propondo alterações de ângulos, raios e procedimentos de análise numérica para investigar novas possibilidades para que a proposta de um modelo matemático seja assertiva e atenda a uma gama maior de possibilidades.

5 CONCLUSÕES

Após as análises das atividades desenvolvidas no decorrer do trabalho foi possível concluir que foi alcançado o objetivo principal de propor estratégias de compensação do retorno elástico no dobramento de chapas finas metálicas por análises experimentais, equações clássicas da literatura e por elementos finitos.

No decorrer da revisão de literatura foi possível verificar que o tema de fato apresenta relevância e a busca por soluções para minimizar os efeitos indesejados do retorno elástico nos processos de fabricação são constantes e procuram realizar o processo de dobra de maneira mais simples e efetiva.

As alternativas propostas para minimizar estes efeitos consistem em abordar por simulação numérica e comprovar seus resultados por meio da execução de experimentos, proporcionando desta forma o levantamento de variáveis que possam ser implementadas de forma prática para prever os efeitos do retorno elástico e propor alterações no processo antes de sua execução.

A proposta da criação de um modelo que relaciona variáveis teóricas com análises numéricas para a compensação do retorno elástico apresentou resultados satisfatórios durante a análise por elementos finitos. Os erros medidos nas análises numéricas apresentaram valores menores que 3% entre o esperado e o valor obtido ao se comparar o ângulo de abertura das chapas após o dobramento.

As comparações dos resultados da proposta de compensação do retorno elástico também apresentaram resultados satisfatórios na realização dos experimentos em que os erros para dobra de chapas com raio de 6,0 mm se mantiveram na faixa de 3,0% entre os valores esperados e os medidos de forma tridimensional.

A matriz construída para a dobra da chapa com punção de raio de 0,4 mm apresentou um erro na casa dos 14%, sendo este resultado um ponto a ser analisado com maior profundidade em trabalhos futuros com o intuito de investigar o que pode ter proporcionado tal alteração.

Pode-se concluir que os resultados foram satisfatórios e um modelo obtido apresentou um comportamento coerente com o esperado para a maioria dos casos, o que permite identificar a possibilidade de realizar novos estudos sobre a estratégia utilizada para extrapolar os limites das chapas ensaiadas e verificar sua efetividade em outros cenários ao se aplicar outros materiais e novas condições de contorno.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ficam apresentadas para realizações em trabalhos futuros algumas sugestões para um aprofundamento do trabalho:

- Análise metalográfica do alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3) para verificar sua composição mais detalhadamente e definir os elementos que mais influenciam nas propriedades mecânicas e/ou a capacidade de alteração da estrutura metalográfica para atender requisitos de projeto.
- Analisar o retorno elástico utilizando lubrificantes durante o ensaio de dobramento, a fim de identificar possíveis variações do fator k da equação 24 durante o processo;
- Verificar as deformações e retorno elástico do alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3) em diferentes processos de dobramento.
- Analisar o comportamento de deformações e retorno elástico do alumínio QQ-A-250/5 (2024 – T3) utilizando com outras espessuras.
- Verificar a aplicabilidade do modelo proposto utilizando outras espessuras de chapa do QQ-A-250/5 (2024 – T3).
- Verificar a aplicabilidade do modelo para valores de raios de dobras diferentes dos valores utilizados neste trabalho.
- Aplicar o modelo proposto para outros materiais e em outras condições de trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABAQUS 6.12 Analysis User 's Manual. University of Cambridge, 2015. Disponível em:
<http://abaqus.software.polimi.it/v6.12/books/ver/default.htm?startat=ch02s02abv159.html>
- ABNT NBR ISO 6892. **Materiais metálicos – Ensaio de tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**, 70p., 2013.
- ABDULLAH, A. B.; SAPUAN, S. M.; SAMAD, Z.; NURAINI, A. A. A comprehensive review of experimental approaches used in the measurement of springback. **Advances in natural and applied sciences**, v. 6, p. 195-205, 2012.
- ALMEIDA, L. “**ESTUDO COMPARATIVO DA ESTAMPABILIDADE DO LATÃO UNS C22000 PRODUZIDO INICIALMENTE PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO CONTÍNUA EM COMPARAÇÃO A FUNDIÇÃO SEMICONTÍNUA**”. 2017. 158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- ARDUINO**. Disponível em <https://www.arduino.cc>. Acesso em 20 abr. 2021
- ARAÚJO, D. D. “**Estudo do *springback* na conformação mecânica de segmentos toroidais em chapas grossas**”. 2008. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Estadual de Minas Gerais, Ouro Preto, 2008.
- BEER, F. P.; E. JOHNSTON, R.Jr., DEWOLF, John T.; MAZUREK, David. F. **Mecânica dos Materiais**. Tradução José Benaque Rubert; Walter Libardi. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011. 800p.
- BRAGA, I. I. S. **Fabricação de um dinamômetro para medição de força no corte ortogonal**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2019.
- BRAGA, M. **Análise Comparativa da Recuperação Elástica de Chapas Dobradas pelos Processos Convencional e Não Convencional Utilizando Elastômero**, dissertação de mestrado Mecânica dos Sólidos e Estruturas – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, 2009.
- BRESCIANI E. F.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação Plástica dos Metais**. Campinas: Editora da Unicamp, 2011 (6a. edição), 383p.
- BURCHITZ, I. **Springback: improvement of its predictability Literature study report**. Netherlands Institute for Metals Research. Delft. 2005.

CALLISTER, W. D. Jr., **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro, 2008, 705p.

CARDEN, W.D., *et al.*, 2002. Measurement of springback, **International Journal of Mechanical Sciences**, 44(1): 79-101.

CHEN, F. K., KO, S. F., Deformation analysis of springback in L-bending of sheet metal. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Taipei, v.18(1-2), p. 339-342, 2006.

CORRÊA, J. M.; MALINSKI, C.; STEFANNI, D.; BARBOZA, G.; BOFF, U.; SCHAEFFER, L. **Análise do retorno elástico no dobramento de chapas metálicas**. Anais SENAFOR, 2015.

DIEGEL, O., **Bend Works – The fine-art of sheet metal bending**. Complete Design Services, julho de 2002.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.

DIETER, G.E. **Fundamentals of Metalworking**. USA: McGraw-Hill. 1986 pp. 503-554.

EKAPUTRA, I.M.W.; KIM, W. G.; PARK, J.; KIM, S.; KIM, E. Influence of Dynamic Strain Aging on Tensile Deformation Behavior of Alloy 617. **Nuclear Engineering and Technology**. South Korea, 2016.

EVANGELISTA, S. H. **Diagramas de limite de conformação aplicados à análise por elementos finitos de um processo de estampagem em chapas metálicas**. 2000. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2000. 154 p.

FARSI, M. A., AREZOO, B. Bending force and spring-back in v-die-bending of perforated sheet-metal components. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.** Rio de Janeiro, v. 33, n. 1, p. 45-51, Mar. 2011. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782011000100007&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 14 out 2020.

FOLLE, L. F. **Estudo do Coeficiente de Atrito para Processos de Estampagem**. Dissertação de doutorado. PPGEM – UFRGS, Porto Alegre/RS, 2012.

FORCELLESE, A.; FLATINI, L.; GABRIELLI, F.; MICARI, F. The evaluation of spring back in 3D stamping and coining processes, **Journal of Materials Processing Technology** 80–81, pp.108–112, 1998.

FREES, Monique Valentim da Silva. **Avaliações sobre o processo de dobramento do aço NBR 6656 LNE 380**. 2017

HALLQUIST, J. O. LS-DYNA vs. 950 User Manual. Livemore Software Technology Corp. 2000. Disponível em : https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf . Acesso em 10 de jan. de 2022.

HILL, R. **A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals**. Proc. R. Soc. Lond. 1948.

HOLLOMON, J.H. **Tensile deformation**. Trans. Metall. Soc. AIME 1945, 162, 268–290.

HUEBNER, K. H.; DEWHIRST, D. L.; SMITH, D.E.; BYRON, T. G. **The Finite Element Method for Engineers**. John Wiley & Sons, 2001. ISBN: ISBN 0-471-37078-9.

KARAAĞAÇ, İ. The experimental investigation of springback in V-bending using the flexforming process. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 42, n. 5, p. 1853-1864, 2017.

KEELER, S., Advanced high strength steel (AHSS) application guidelines. **AHSS - World Auto Steel**, versão 6.0, 163p., acesso em 10 de outubro de 2020. Disponível em: < <https://www.worldautosteel.org/>>

MALAVOLTA, A. T.; MORENO, M. E.; EVANGELISTA, S. H., LIRANI, J.; AL-QURESHI, H. A. **Análise do retorno elástico em dobramentos de chapas via método dos elementos finitos**. Anais. Joinville: ABCM, 2005.

MALAVOLTA, A. T.; LIRANI, J.; MASSAROPI JR, E.; AL-QURESHI, H. A. Método de elementos finitos ajuda a prever o retorno elástico no dobramento de chapas anisotrópicas. **Corte & Conformação de Metais**, São Paulo, p. 76-84, 2007.

MARTINS, N.; SANTOS, C. E.; VIEIRA, A. L.; JUNIOR MAGALHÃES, P. A.; CARNEIRO, J. R.; NÁPOLES, C. N. N.; SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS A TRAÇÃO DO AÇO TRIP MC700. **XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**. ABMEC, Brasília, nov. 2016.

MAGNUSSON, C., TAN, Z. Mathematical modeling of V-die bending process. IDDRG, 1990.

OSMAN, M. A.; SHAZLY, M.; WIFI, M. Springback prediction in V-die bending modeling and experimentation. **Journal of Achievements in Materials and**

Manufacturing Engineering. Vol.38, nº3, 2010.

PERINI, F.G. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados.** 2008. 97f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Programa de Pós-graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul 2008.

QUADROS, G. N. **ANÁLISE DOS FATORES INFLUENCIADORES NA NÃO CONFORMIDADE DIMENSIONAL DO PROCESSO DE DOBRAMENTO.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, 2020.

RAMEZANI, M., RIPIN, Z. M., AHMAD, R. Modelling of kinetic friction in V-bending of ultra-high strength steel sheets. Int **J Adv Manuf Technol**, Nibong Tebal, v.46, p.101-110, 2010.

RIBEIRO, F. L. B. **Introdução aos elementos finitos.** Notas de Aula – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica Volume II Tec. da Def. Plástica – Aplicações Industriais**, Portugal: Escolar Editora, 2010.

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

SANTOS, R. A. **INFLUÊNCIA DA FORÇA PÓS DOBRA E DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NO RETORNO ELÁSTICO EM PROCESSOS DE DOBRAMENTO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA.** 2013. 115p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná – Manufatura, Curitiba, 2013.

SARIKAYA, O. T. **Analysis of heat treatment effect on springback in V bending.** 2008. 184p. THESIS (Master of Science in Mechanical Engineering), Natural and Applied Science of Middle East Technical University, Turkey, 2008.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** 3. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009. 167 p.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SCHAEFFER, L.; ROCHA, A. da S. **Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.

SCHMITZ, S. **Aços planos aplicados na indústria automobilística.** 2013. 87f.

Material do Departamento de Engenharia de Materiais da UFPR.

SILVA, A. S.; VARANIS, M.; MERELES, A. G.; OLIVEIRA, C.; BALTHAZAR, J. M. A study of strain and deformation using the Arduino microcontroller and strain gauges devices. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 41, nº3, Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0206>. Acesso em 18 abr. 2021.

SILVA, E. A. **Estudo do efeito springback em aços avançados de alta resistência aplicados a indústria automobilística**. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/94426>>.

SWIFT, H. W. **Plastic instability under plane stress**. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 1, p. 1–18, 1952.

VIEIRA, M. A. R. **Sensor Inteligente para Medição de Cargas Mecânicas**. Relatório Final da Dissertação/Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão Instituto Politécnico de Bragança, 2016.

WANG, C.; KINZEL, G; ALTAN, T. Mathematical modeling of plane-strain bending of sheet and plate. Journal of Materials Processing Technology, Ed. 39, pp. 279-304, 1993.

WILSONS. **Aluminium Alloy – QQ-A-250/5 “T3” Sheet**. Catálogo. Reino Unido. 2014

XIONG, W.; WANG, W.; WAN, M.; LI, X. Geometric issues in V-bending electromagnetic forming process of 2024-T3 aluminum alloy. **Journal of Manufacturing Processes**. Beijing, v19, p 171 – 182, jun. 2015 < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.015>>

ZANLUCHI, J.J.D. **Avaliação de Retorno Elástico para Processos de Estampagem à Frio dos Aços Bifásicos DP600 e DP800**. 2014. 94p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2014.

APÊNDICE A – Sistema de Medição de forças com Arduino

```

#include <HX711.h>

#include "HX711.h"
HX711 dispositivo;
const int DOUT = 3;
const int CLK = 2;

//HX711 dispositivo(3, 2); // SCK= pino 2 e DT= pino 3
float calibration_factor = 36000.00; // Fator de calibração para ajuste da célula
float forca; // variável força

void setup()
{
    // rotina de configurações
    Serial.begin(9600); // Baud rate da comunicação
    balanca.begin(DOUT,CLK);
    Serial.println("Remova todos os pesos da balança");
    delay(1000); // atraso de 1000ms = 1s
    Serial.println("Após estabilização das leituras, coloque a carga conhecida no
dispositivo");
    delay(1000); // atraso de 1000ms = 1s
    Serial.println("Pressione + para incrementar o fator de calibração");
    Serial.println("Pressione - para decrementar o fator de calibração");
    delay(1000); // atraso de 1000ms = 1s
    balanca.set_scale(); // seta escala
    balanca.tare(); // escala da tara

    long zero_factor = balanca.read_average();
}

void loop() { // chama função de loop

    carga.set_scale(calibration_factor);

    Serial.print("Força: "); // Printa "Força:" na COM
    peso = balanca.get_units(), 10; // imprime força
    if (forca < 0)
    {
        forca = 0.00;
    }
}

```

```
Serial.print(forca);
Serial.print(" N");
Serial.print(" Fator de calibração: ");
Serial.print(calibration_factor);
Serial.println();
delay(500);

if(Serial.available())
{
  char temp = Serial.read();
  if(temp == '+')
    calibration_factor += 1000;
  else if(temp == '-')
    calibration_factor -= 1000;
}
}
```