

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais – PPG3M

Cristian Luiz Onzi

AVALIAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO NO PROCESSO DE DOBRAMENTO
EMPREGANDO AÇO SAE 1006

Porto Alegre

2022

Cristian Luiz Onzi

**AVALIAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO NO PROCESSO DE DOBRAMENTO
EMPREGANDO AÇO SAE 1006**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Onzi, Cristian Luiz
AVALIAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO NO PROCESSO DE
DOBRAMENTO EMPREGANDO AÇO SAE 1006 / Cristian Luiz
Onzi. -- 2022.
97 f.
Orientador: Lirio Schaeffer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Dobramento em L. 2. Retorno elástico. 3.
Conformação a frio do aço SAE 1006. 4. Deformação
verdadeira. I. Schaeffer, Lirio, orient. II. Título.

Cristian Luiz Onzi

**AVALIAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO NO PROCESSO DE DOBRAMENTO
EMPREGANDO AÇO SAE 1006**

Esta dissertação de mestrado foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer

Coordenador do PPGE3M: Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: 29/06/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Henrique Corrêa de Souza

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Profa. Dra. Luana de Lucca de Costa

Instituto Federal do Rio Grande do Sul – IFRS

Prof. Dr. Luis Folle

Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia – CIMATEC

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família e principalmente minha namorada Lisiane pelo apoio emocional prestado, auxiliando nas minhas dificuldades.

Ao professor Dr. Ing. Lirio Schaeffer, pelo apoio e direcionamento nos estudos, durante esta etapa sempre demonstrou ser um orientador prestativo, sem dúvidas suas contribuições foram essenciais para a construção desta dissertação.

Aos meus colegas, Thais Moreto e Rafael Pandolfo pelo auxílio nas atividades do curso.

A empresa Grupo Bigfer por ceder o espaço para modelagem do produto e a matriz, tão como ter disponibilizado o espaço para realizar os ensaios.

Ao PPGE3M pela oportunidade de realizar o mestrado e contribuir com meu crescimento profissional.

RESUMO

Este trabalho tem como foco principal avaliar o retorno elástico utilizando a técnica do Processo de Dobramento em L com ressalto e sem no punção, através de uma matriz para realizar o dobramento do aço SAE 1006. Realizou-se a caracterização do material como: ensaios de tração, metalografia e análise química do material para embasamento para comparar resultados com a literatura e utilizar as informações para cálculos analíticos e simulação numérica. Nos ensaios de dobramento foram possíveis identificar as deformações do lado externo das fibras dos corpos de prova com 1,5 mm de espessura, tal como o retorno elástico nos sentidos de laminação de 0° e 90°. No processo de dobramento foram utilizados dois modelos de punção, sem e com ressalto de 0,25 mm de altura e 1,2 mm de largura, para averiguar o fator do retorno elástico (K), as deformações verdadeiras (φ_{ext}) e relativas (ε) que ocorreram no lado externo das fibras, para realizar uma avaliação comparativa dos valores teóricos. Os resultados experimentais das deformações verdadeiras (φ_{ext}) / relativas (ε) com o punção sem ressalto foram 0,18[-]/20% para o sentido da laminação 0° e 0,26[-]/30% para o sentido da laminação 90°, já para o punção com ressalto foram 0,34[-]/40% para laminação a 0° e 0,38[-]/45% para laminação a 90°. O valor teórico da deformação relativa (ε) resultou em uma variação máxima de 9% e a deformação verdadeira (φ) em 0,7 [-] quando comparados aos resultados experimentais. Através dos dados obtidos, comprovou-se que a Linha Neutra (LN) da dobra da chapa gerou uma deformação assimétrica e constatou-se que as maiores deformações ocorreram no sentido de laminação a 90°. Os resultados obtidos experimentalmente do fator do retorno elástico (K) mostraram compatibilidade com os dados obtidos teoricamente, evidenciando que ao utilizar o método do punção com ressalto diminui o retorno elástico, demonstrando que o maior valor do fator de retorno elástico ocorre no sentido de laminação a 90°. Além disso, foi realizada a simulação numérica através do software Simufact Forming®, utilizada para comparação da deformação verdadeira (φ_{ext}) e o fator no retorno elástico (K) contra os dados experimentais. Os resultados do comportamento da deformação visual na simulação numérica ficaram similares com a análise metalográfica, porém os resultados da deformação verdadeira (φ_{ext}) ficaram altos comparados aos dados dos ensaios, gerando um erro relativo médio de 40,5% para o punção sem ressalto e 21,5% para o punção com ressalto. Entretanto os resultados obtidos do fator do retorno elástico (K) ficaram próximos, apresentado um erro relativo médio de 0,96% para o punção sem ressalto e 0,25% com ressalto.

Palavras-chave: Dobramento em L, Retorno elástico, Conformação a frio do aço SAE 1006, Deformação verdadeira.

ABSTRACT

The main focus of this work is to evaluate the springback using the technique of the L-Bending Process with step and without the punch, through a matrix to perform the bending of SAE 1006 steel. The characterization of the material was carried out as: tests tensile, metallography and chemical analysis of the basement material to compare results with the literature and use the information for analytical calculations and numerical simulation. In the bending tests, it was possible to identify the deformations on the external side of the fibers of the 1.5 mm thick specimens, such as the springback in the rolling directions of 0° and 90°. In the bending process, two punch models were used, without and with a 0.25 mm high and 1.2 mm wide step, to determine the springback factor (K), the true (φ_{ext}) and relative deformations (ε) that occurred on the external side of the fibers, to carry out a comparative evaluation of the theoretical values. The experimental results of true (φ_{ext})/relative (ε) strains with the punch without step were 0.18[-]/20% for the 0° rolling direction and 0.26[-]/30% for the rolling direction. rolling at 90°, for the punch with step it was 0.34[-]/40% for rolling at 0° and 0.38[-]/45% for rolling at 90°. The theoretical value of the relative strain (ε) resulted in a maximum variation of 9% and the true strain (φ_{ext}) in 0.7[-] when compared to the experimental results. Through the obtained data, it was verified that the Neutral Line (LN) of the sheet bend generated an asymmetrical deformation and it was verified that the greatest deformations occurred in the rolling direction at 90°. The results obtained experimentally of the springback factor (K) showed compatibility with the data obtained theoretically, showing that when using the punching method with step reduces springback, showing that the highest value of the springback factor occurs in the rolling direction at 90°. In addition, numerical simulation was performed using the Simufact Forming® software, used to compare the true strain (φ_{ext}) and the springback factor (K) against the experimental data. The results of the deformation behavior in the numerical simulation were similar with the metallographic analysis, however the results of the true deformation (φ_{ext}) were high compared to the test data, generating an average relative error of 40% for the punch without step and 21.5 % for the punch with step. However, the results obtained from the springback factor (K) were close, with an average relative error of 0.96% for the punch without step and 0.25% with step.

Keywords: L-bend, Springback, Cold forming of SAE 1006 steel, True deformation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do estudo.....	19
Figura 2 – Gráfico dos modelos de classificação de conformação de materiais. Fonte: Lesko (2007).	21
Figura 3 – Visão geral dos processos de conformação. Fonte: Adaptado Bresciani Filho <i>et al.</i> (2011).	22
Figura 4 – Produtos estampados com auxílio de matrizes. Fonte: Lira (2017).....	24
Figura 5 – Processo de dobramento: (a) dobramento em V (b) dobramento seção circular. Fonte: Kliauga e Ferrante (2009).	25
Figura 6 – Representação das tensões de tração e compressão e da linha neutra. Fonte: Marcondes <i>et al.</i> (2016).	26
Figura 7 – Tipos de dobramento (a) dobramento livre (b) dobramento em V (c) dobramento em U (d) dobramento a fundo (e) dobramento em matriz de deslizamento ou dobramento em L (f) dobramento rotativo. Fonte: Adaptado Rodrigues e Martins (2005).	28
Figura 8 – Geometria característica do processo de dobramento em L com ressalto. Fonte: Adaptado Jafari <i>et al.</i> (2015).	29
Figura 9 – Análise do retorno elástico vs. largura do ressalto. Fonte: Adaptado Jafari <i>et al.</i> (2015).	30
Figura 10 – Análise do retorno elástico vs. altura do ressalto. Fonte: Adaptado Jafari <i>et al.</i> (2015).	30
Figura 11 – Tensões no processo de dobramento. Fonte: Schaeffer <i>et al.</i> (2017)....	31
Figura 12 – Representação das variáveis na geometria do dobramento de chapas. Fonte: Adaptado Ahn (2020).	32
Figura 13 – Cálculo da força de dobramento em V. Fonte: Adaptado Schuler (1998).	34
Figura 14 – Dimensões para cálculo de força de dobramento em L. Fonte: Adaptado Rodrigues e Martins (2005).	35
Figura 15 – Representação do efeito mola no processo de dobramento. Fonte: Adaptado Klocke (2013).	36
Figura 16 – Distribuição das tensões produzidas no dobramento. Fonte: Adaptado Schijve (2009).	38

Figura 17 – Comportamento do Retorno elástico na curva tensão-deformação. Fonte: Adaptado KEELER <i>et al.</i> (2017).....	38
Figura 18 – Representação do efeito das zonas de deformação na curva tensão x deformação. Fonte: Adaptado Gautam <i>et al.</i> (2016).	39
Figura 19 – Relação entre a tensão de engenharia x deformação relativa do aço SAE 1006. Fonte: Lin <i>et al.</i> (2011).	42
Figura 20 – Análise metalográfica SAE 1006. Fonte: Freitas <i>et al.</i> (2010).....	44
Figura 21 – Diagrama da sistemática dos ensaios.....	45
Figura 22 – Espectrômetro de emissão ótica.	46
Figura 23 – Representação do corpo de prova.	47
Figura 24 – Metodologia de marcação dos copos de prova.....	47
Figura 25 – Máquina universal de ensaio Mecânico (EMIC modelo DL-20000).....	48
Figura 26 – Detalhamento do corpo de prova.	50
Figura 27 – Ferramenta de dobra, (a) modelagem 3D (b) ferramental fabricado.	50
Figura 28 – Detalhamento do punção de dobra, (a) punção reto (b) punção com ressalto.....	51
Figura 29 – Representação esquemática do procedimento de dobramento dos CP's no ferramental (flexas em amarelo representam o posicionamento do CP, em vermelho o sentido da atuação do punção).....	51
Figura 30 – Processo de gravação eletrolítica.	53
Figura 31 – Corpo de prova com marcação circular.....	53
Figura 32 – Medição da deformação com grade flexível.....	54
Figura 33 – Projetor de perfil para avaliação do ângulo pós dobramento.	54
Figura 34 – Corpos de prova embutidos.	55
Figura 35 – Modelos importados no Simufact Forming® (a) simulação com punção com ressalto (b) simulação com punção reto.	57
Figura 36 – Curva tensão x deformação SAE 1006 para os sentidos de laminação 0°,45° e 90°.	59
Figura 37 – Procedimento para determinar tensão de escoamento.....	60
Figura 38 – Curva de escoamento do SAE 1006.	61
Figura 39 – Metalografia 50X pós dobramento CP Grupo 1.....	63
Figura 40 – Medição da linha neutra com <i>software</i> Solidworks pós dobramento CP Grupo 1 ampliação 200x.	64
Figura 41 – Metalografia 50X pós dobramento CP Grupo 2.....	64

Figura 42 – Medição da linha neutra com <i>software</i> Solidworks pós dobramento CP Grupo 2 ampliação 200x.	64
Figura 43 – Metalografia 50X pós dobramento CP Grupo 3.....	65
Figura 44 – Medição da linha neutra com <i>software</i> Solidworks pós dobramento CP Grupo 3 ampliação 200x.	65
Figura 45 – Metalografia 50X pós dobramento CP Grupo 4.....	66
Figura 46 – Medição da linha neutra com <i>software</i> Solidworks pós dobramento CP Grupo 4 ampliação 200x.	66
Figura 47 – Medição do ângulo no processo de dobramento com punção reto, (a) medição do ângulo inicial (b) medição do ângulo final.	72
Figura 48 – Medição do ângulo no processo de dobramento com punção com ressalto, (a) medição do ângulo inicial (b) medição do ângulo final.....	72
Figura 49 – Deformação verdadeira no processo de dobramento com punção reto.	73
Figura 50 – Deformação verdadeira no processo de dobramento com punção com ressalto.....	74
Figura 51 – Comparativo gráfico da deformação relativa (ϵ) para o aço SAE 1006. .	79
Figura 52 – Comparativo gráfico da deformação verdadeira (φ_{ext}) para o aço SAE 1006.	79
Figura 53 – Comparação do comportamento da deformação na metalografia (a) contra a simulação numérica (b) para o punção reto.	80
Figura 54 – Comparação do comportamento da deformação na metalografia (a) contra a simulação numérica (b) para o punção com ressalto.	80
Figura 55 – Imagem gráfica do comparativo dos resultados do fator K	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento do aço SAE 1006. Fonte: ASM (1990).	41
Tabela 2 – Dados da tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento para os sentidos de laminação 0°, 45° e 90° do aço SAE 1006. Fonte: Simião (2011).	41
Tabela 3 – Dados do índice de encruamento e coeficiente de resistência para o sentido de laminação 0°, 45° e 90° do aço SAE 1006. Fonte: Araújo <i>et al.</i> (2010).....	42
Tabela 4 – Percentual em massa da composição químicas do SAE 1006. Fonte: Jamil <i>et al.</i> (2022) e Lin <i>et al.</i> (2011).	43
Tabela 5 – Composição química em percentual de massa dos aços para avaliação de graus de estampagem. Fonte: ABNT NBR 5915-2 (2013).	43
Tabela 6 – Seleção de grupos para metalografia.	55
Tabela 7 – Parâmetros das simulações numéricas computacionais para o processo de dobramento.	58
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do aço SAE 1006.	60
Tabela 9 – Valores das equações de Hollomon-Ludwing gerados pela curva de escoamento.....	62
Tabela 10 – Comparativo composição química aço SAE 1006 em percentual de massa.....	62
Tabela 11 – Resultados das deformações medidas no lado da fibra externa do dobramento para cada CP.	67
Tabela 12 – Resultados das deformações médias medidas no lado da fibra externa do dobramento.	67
Tabela 13 – Resultados calculados da deformação relativa (ε).	68
Tabela 14 – Resultados calculados da deformação verdadeira (φ).	69
Tabela 15 – Medição do ângulo de dobramento no sentido de laminação 0°.	69
Tabela 16 – Medição do ângulo de dobramento no sentido de laminação 90°.	69
Tabela 17 – Resultado da avaliação do fator de retorno elástico [K].	70
Tabela 18 – Valor teórico do retorno elástico com o cálculo da força para o método Rodrigues e Martins.	70
Tabela 19 – Parâmetros utilizados para o cálculo de força (equação 10), momento (equação 13) e fator de retorno elástico (equação 12).....	70

Tabela 20 – Valor teórico do retorno elástico com o cálculo da força do método Dieter.	71
Tabela 21 – Parâmetros utilizados para o cálculo de força (equação 8), momento (equação 13) e fator de retorno elástico (equação 12).....	71
Tabela 22 – Resultado da avaliação do fator de retorno elástico na simulação numérica.....	73
Tabela 23 – Valores médios das propriedades mecânicas do aço SAE 1006.	75
Tabela 24 – Comparativo das propriedades mecânicas do aço SAE 1006.....	76
Tabela 25 – Valores médios das equações de Hollomon-Ludwing gerados pela curva de escoamento.....	76
Tabela 26 – Comparativo das propriedades mecânicas da curva de escoamento do aço SAE 1006.	77
Tabela 27 – Comparativo da deformação relativa (ϵ) para o aço SAE 1006.....	78
Tabela 28 – Comparativo da deformação verdadeira (φ_{ext}) para o aço SAE 1006..	78
Tabela 29 – Comparativo da deformação verdadeira (φ_{ext}) da simulação numérica e valor experimental para o aço SAE 1006.	81
Tabela 30 – Comparativo do fator K com utilização dos modelos de punções.	81
Tabela 31 – Comparativo dos resultados experimentais e teóricos do fator K.....	82
Tabela 32 – Comparativo dos resultados experimentais e análise numérica do fator K.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
CCC	Cúbico de corpo centrado
CP's	Copos de prova
EEP	Estampagem extra profunda
EM	Estampagem média
EP	Estampagem profunda
FEM	Método dos elementos finitos (<i>Finite Element Method</i>)
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LN	Linha Neutra
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos (<i>Society of Automotive Engineer</i>)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Área Inicial	[mm ²]
A_i	Área instantânea	[mm ²]
b	Largura da chapa	[mm]
C	Coefficiente de resistência	[MPa]
E	Módulo de elasticidade	[N/mm ²]
F	Força	[N]
F_d	Força de dobramento	[N]
FG	Força no processo de dobra método Dieter	[N]
FL	Força no processo de dobra em L método Rodrigues e Martins	[N]
F_{pc}	Força do prensa chapas	[N]
FV	Força no processo de dobra V	[N]
j	Folga entre o punção e matriz	[mm]
K	Fator do retorno elástico	[-]
kf	Tensão de escoamento	[MPa]
$kf_{médio}$	Tensão de escoamento médio entre 0°, 45° e 90°	[MPa]
Ks	Fator de correção para determinar FL	[-]
l_0	Comprimento inicial	[mm]
l_1	Comprimento final	[mm]
l_2	Comprimento da variação do arco	[mm]
l_{ca}	Comprimento do arco dobrado	[mm]
lf	Comprimento chapa planificada	[mm]
M	Momento de dobramento	[N.mm]
n	Índice de encruamento	[-]
R_m	Tensão máxima	[MPa]
r_0	Raio inicial	[mm]
r_1	Raio final	[mm]
r_e	Raio externo da chapa	[mm]
r_i	Raio interno da chapa	[mm]
r_m	Raio de dobra metade da espessura	[mm]
r_{ma}	Raio da matriz	[mm]

r_p	Raio do punção	[mm]
s_0	Espessura da chapa inicial	[mm]
V_f	Volume final	[mm ³]
V_i	Volume inicial	[mm ³]
w	Distância dos apoios	[mm]
y	Distância da linha neutra até linha l_2	[mm]

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

α_0	Ângulo de dobramento inicial	[°]
α_1	Ângulo de dobramento final	[°]
α	Ângulo de dobramento	[°]
ε_{max}	Máxima deformação relativa	[-]
ε	Deformação relativa	[-]
σ	Tensão de engenharia	[MPa]
σ_{esc}	Tensão de escoamento	[MPa]
σ_N	Tensão Normal	[MPa]
φ	Deformação verdadeira	[-]
φ_{ext}	Deformação verdadeira externa	[-]
Δl	Varição absoluta do alongamento	[mm]
δ	Alongamento máximo	[%]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 CONFORMAÇÃO.....	20
2.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM	23
2.3 PROCESSO DE DOBRAMENTO	25
2.3.1 Tipos de dobramento.....	27
2.3.2 Dobramento em L com ressalto.....	28
2.3.3 Tensão no processo de dobramento	30
2.3.4 Força de dobramento	34
2.3.5 Retorno elástico.....	36
2.4 AÇO SAE 1006	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 MATERIAL UTILIZADO.....	45
3.1.1 Análise química do material SAE 1006	46
3.1.2 Ensaio de tração	47
3.1.3 Curva de engenharia e curva escoamento	48
3.2 DOBRAMENTO EM L NA FERRAMENTA.....	49
3.3 DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NO DOBRAMENTO EM L.....	52
3.4 DETERMINAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO	54
3.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA	55
3.6 MEDIÇÃO DA LINHA NEUTRA DA DOBRA.....	56
4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO PROCESSO DE DOBRAMENTO	57
5 ANÁLISE EXPERIMENTAL E TEÓRICA	59
5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL E QUÍMICAS	59
5.1.1 Curva de engenharia.....	59
5.1.2 Curva de escoamento.....	61
5.1.3 Análise química.....	62
5.1.4 Análise metalográfica	62
5.2 ENSAIO DO DOBRAMENTO.....	67
5.2.1 Medição da deformação no processo de dobramento	67

5.2.2 Retorno elástico	69
5.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA	71
6 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	75
6.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS SAE 1006	75
6.1.1 Curva de engenharia	75
6.1.2 Curva de escoamento	76
6.2 ANÁLISE QUÍMICA.....	77
6.3 DEFORMAÇÕES NO DOBRAMENTO	77
6.4 RETORNO ELÁSTICO.....	81
7 CONCLUSÕES	84
8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	85
BIBLIOGRAFIAS	86
ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE SAE 1006	93
ANEXO B – DESENHO TÉCNICO DO CORPO DE PROVA	94
ANEXO C – MODELAGEM DO CONJUNTO PRINCIPAL DA MATRIZ PARA O DOBRAMENTO	95

1 INTRODUÇÃO

O processo de conformação de chapas, também conhecido como estampagem popularizou em meados do século vinte, destacando-se com a sua capacidade de produção de produtos de qualidade, diversidade de aplicações, velocidade produtiva e relativamente econômicos. O processo caracteriza-se na transformação de uma chapa metálica para adquirir uma nova geometria, através da utilização de uma prensa e um ferramental, no qual é constituída por uma matriz, prensa chapas e um punção. A combinação destes elementos gera uma deformação plástica na chapa metálica. Segundo Schaeffer *et al.* (2017), a estampagem não se limita apenas em chapas de aços, o processo pode ser feito em cobre, aços, latão, alumínio e aço inox. Os aços de baixo carbono são a grande escolha para empresas do ramo de acessórios para móveis e eletrodoméstico, segundo Satoh, *et al.* (1985), pelo fato do aço possuir atratividade econômica e boa conformabilidade.

Conforme Kiminami (2013), o processo de conformação divide-se em dois segmentos, o primeiro seria o processo de conformação de volumes, sua particularidade está na razão área superficial sobre o volume da peça sendo relativamente pequena, ou seja, quando ocorre um alto valor de deformação e modificação na sua forma, como processos de trefilação, extrusão, laminação e forjamento. O segundo processo é conformação em chapas, caracteriza-se pela alta razão da área superficial sobre o volume da peça, processo relacionado a operações realizadas a frio em conformações em chapas e bobinas, utilizando-se ferramentas principais como matriz e punção nos processos de estampagem profunda, dobramento e corte.

No processo de dobramento, o metal sofre uma inflexão ao longo de seu eixo neutro, gerando uma deformação por flexão. O dobramento é obtido por matrizes com segmentos curvos para deixar as chapas com o formato desejado, para o tal processo, ocorrem tensões combinadas quando o metal escoar, gerando forças primárias trativas na posição chapa em contato com a matriz e forças compressivas indiretas na chapa com o contato do punção. O dobramento gera momentos fletores na chapa e devido a elasticidade do material, é comum que haja retorno elástico (DIETER, 1981; KIMINAMI *et al.*, 2013; SANTOS, *et al.* 2018).

Na estampagem há parâmetros que influenciam na conformação de chapas, particularmente: modelos e dimensão dos ferramentais, atrito, propriedades dos materiais, forças e espessuras. Ao projetar um ferramental deve ser levado em consideração o retorno elástico, pois o mesmo influenciará na geometria final do produto estampado (KALPAKJIAN; SCHMID, 2014; KARBASIAN; TEKKAYA, 2010; THIPPRAKMAS; ROJANANAN, 2008).

O retorno elástico tem sido muito explorado em diversas técnicas de dobramento como: em V estudadas pelos autores Park *et al.* (2020), Huang e Leu (1998), Tekaslan *et al.* (2006) e Wang *et al.* (2013), dobramento em L por Kazan *et al.* (2009), Phanitwong e Thipprakmas (2016), Ling *et al.* (2005) e Jamli *et al.* (2015) e para dobramento em U por Lee *et al.* (2015) e Dongjuan *et al.* (2007). Os estudos desenvolveram métodos de cálculos e conceitos para auxiliar na fabricação de ferramentais. Porém, muitas técnicas utilizadas para restringir o retorno elástico nos processos de dobramento nas indústrias são poucas divulgadas, que é um parâmetro importante no projeto de ferramentais. Tal como, o estudo realizado por Ling *et al.* (2005) que avaliou o processo de dobramento em L utilizando um ressalto no punção de dobra ocasionado uma conformação direta na chapa, que posteriormente foi estudado por Jafari *et al.* (2015), reforçando que aplicação desta técnica reduz o retorno elástico.

O propósito deste trabalho é avaliar o retorno elástico do processo de dobramento com dois modelos de punção, sem e com ressalto para largura e altura determinada em projeto. Através deste estudo almeja-se contribuir com um novo conceito para readaptação no processo de dobramento na avaliação do retorno elástico.

1.1 OBJETIVO

O objetivo principal da dissertação é verificar a influência do retorno elástico no processo de dobramento em L utilizando o punção com ressalto, considerando os sentidos de laminação de 0° e 90° no aço SAE 1006 de espessura de 1,5 mm. Contudo, os resultados obtidos foram a partir de ensaios mecânicos que são confrontados por equações extraídas da literatura, para fins de avaliação de conceitos teóricos com práticos.

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Realizar medições das variações dos ângulos no processo de dobramento em L utilizando punção com e sem ressalto, mensurando o retorno elástico (K) para os sentidos de laminação na chapa em 0° e 90°;
- Realizar a metalografia dos corpos de prova que foram submetidos ao processo de dobramento;
- Avaliar a máxima deformação verdadeira (φ_{ext}) e deformação relativa (ε) na fibra externa da chapa;
- Simular o processo de dobramento através de método de elementos finitos (FEM), determinando o retorno elástico e deformação verdadeira (φ_{ext});
- Avaliar análises de dados obtidos experimentalmente, numericamente e teoricamente.

A Figura 1 mostra a estrutura do trabalho com uma visão macro dos estudos executados em quatro etapas. A fase inicial consiste na etapa teoria, fundamentada por pesquisa bibliográfica sobre um aprofundamento do processo de conformação e estampagem, determinação da força de dobramento, a deformação verdadeira (φ) e relativa (ε) atuante no lado externo do dobramento e o fator do retorno elástico (K). A segunda etapa teve o foco na caracterização do material, executando ensaios de tração para os sentidos de laminação 0°, 45° e 90°, tão como a realização do ensaio de metalografia e análise química do material. A terceira etapa se baseou nos dados experimentais, que dividiu nas etapas de gravação da malha nos corpos de prova para avaliação de deformação verdadeira (φ), o ensaio de dobramento e as coletas de informações da deformação verdadeira (φ) e dos ângulos de dobramento. Por fim a quarta etapa, que se concentrou na simulação numérica dividida em pré-processamento com adição dos dados de entrada para obter os dados do retorno elástico e deformação verdadeira (φ) no pós-processamento. Através destas 4 etapas foram possíveis obter os dados para discussão dos resultados e os embasamentos apresentados nas conclusões.

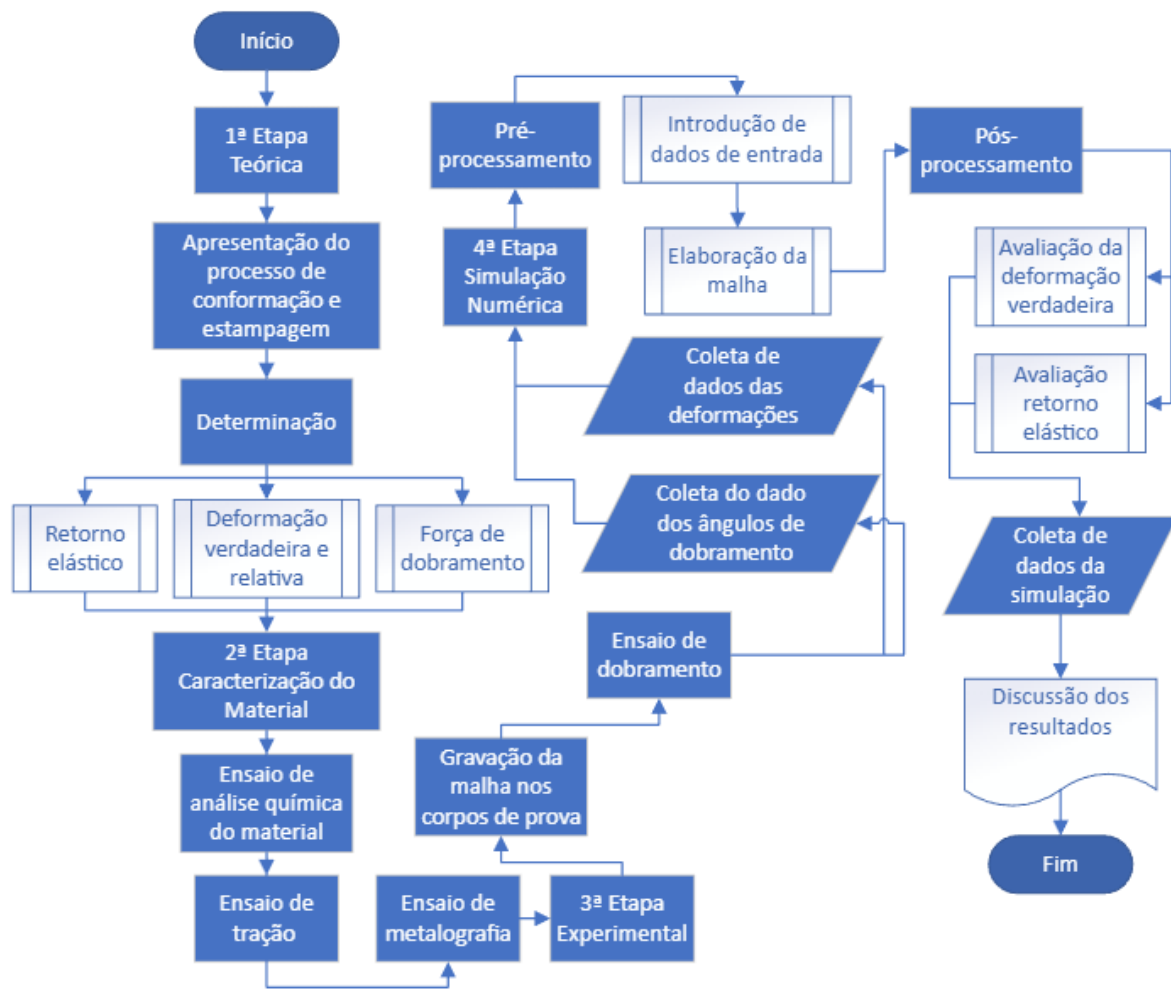


Figura 1 – Fluxograma do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONFORMAÇÃO

Segundo Kliauga e Ferrante (2009), para conformar metais trata-se de deformar plasticamente, a propriedade de deformabilidade auxilia o metal a adquirir a forma desejada por meio de uma ação mecânica de trabalho, para tal, a forma mais econômica perante a outros métodos. O processo de conformação, além de alterar a forma, modifica a microestrutura durante o processo, acarretando ao material adquirir melhores propriedades mecânicas devido: a diminuição do tamanho de grão, fechamento de poros de contração, aumento a resistência ao escoamento e aumento do comprimento dos contornos de grão por unidade de volume.

Schaeffer *et al.* (2017) destaca que a cada ano o processo de manufatura de estampagem está cada vez mais competitivo, peças mecânicas de produção altamente elevadas são fabricadas com o uso total da matéria prima até sua geometria final, termo também conhecido como *near-net-shape technology*, vêm sendo exploradas cada vez mais para obter ganhos em qualidade e custo. O processamento de estampagem é aplicado principalmente em aços, mas também utilizado para cobre, prata, ouro e alumínio. O setor automobilístico detém o maior consumo de peças estampadas, em segundo plano os outros setores como: eletrodomésticos, esportes, eletrônicos, moveleiro, aeroespacial e etc. que abrem margem de consumo mundial.

De acordo com Bresciani Filho *et al.* (2011) e Dieter (1981), os processos mecânicos de conformação podem ser obtidos em duas formas: processo de conformação por cisalhamento e conformação plástica. Quando conceituado em processo de conformação plástica as tensões empregadas ao metal são inferiores ao limite de resistência a ruptura, cujo o volume e a massa do metal são preservados. Por outro lado, o processo de conformação por usinagem seria quando as tensões empregadas excedem o limite de resistência a ruptura ocorrendo a remoção do material, afim de obter-se a forma final do produto desejado.

Segundo Lesko (2007), o processo de conformação de metais pode ser classificado pelo estado físico do material a ser conformado, como pode ser visto na Figura 2 os quatro processos em questão.



Figura 2 – Gráfico dos modelos de classificação de conformação de materiais.
Fonte: Lesko (2007).

Conformação no estado líquido ou também denominada fundição representa milhões de toneladas de produção nos segmentos aéreo espacial, automotivo, transportes e militar. O processo em si compreende no aquecimento do metal acima da temperatura de fusão, posteriormente sendo despejado ou até mesmo injetado em moldes feito em gesso, cerâmico, areia, metais não ferrosos ou ferrosos (LESKO, 2007).

Processo de conformação em estado fluido bem como quando o material está aquecido a uma temperatura abaixo do ponto de fusão, trazendo uma similaridade do material para um estado pastoso, que é transferido sob alta pressão para um molde, como por exemplo injeção de peças de magnésio e zamak (LESKO, 2007).

De acordo com Lesko (2007) conformação no estado plástico acontece quando é feito o aquecimento nas peças metálicas a temperaturas inferiores ao ponto de fusão, auxiliando a conformação das peças devido a diminuição da tensão de escoamento, com o objetivo de controlar a estrutura granular e dar forma com o resultado do aumento da resistência da peça conformada. Este processo é fortemente utilizado nos processos de forjamento, laminação, trefilação e extrusão

Conformação em estado sólido trata-se da conformação de chapas, tubos e barras normalmente realizados em temperaturas ambiente. Porém, em casos que o material não possui ductibilidade faz-se o processo de aquecimento. O processo em questão tradicionalmente processados em ferramentais de simples operações até estampagens sequenciais (LESKO, 2007).

Bresciani Filho *et al.* (2011), Chiaverini (1986) e Dieter (1981) compartilham a ideia que processo de conformação são distinguidos quanto ao processo de esforços aplicados: processo de compressão indireta e direta, tração, dobramento e processos de cisalhamento. Processos de compressão direta trata-se de aplicar uma força ao material a ponto de escoar perpendicularmente à direção de compressão, que são os processos de forjamento e laminação. Em contra partida os processos de compressão

indireta apontam processo de trefilação de arrames e tubos, embutimento profundo e extrusão, onde se destacam pelas forças primárias trativas e forças secundárias compressivas indiretas, oriundas da reação do material contra a matriz, resultando o escoamento do metal sob ação do estado de tensões combinada. Em especial o processo de conformação tipo trativo possui uma característica de estiramento da chapa metálica fina sobre uma força trativa contra a matriz. Processo de conformação por flexão ou também conhecidos como dobramento, ocorrem mediante a dada aplicação de uma rotação no eixo onde a força está sendo atuada estabelecendo um momento fletor, sendo assim possível fazer o dobramento de chapas. Por último processo de conformação cisalhante trata-se de força cisalhantes que são exercidas de tal forma que ocorre o rompimento do metal no plano de cisalhamento.

A Figura 3 demonstra a representação gráfica dos processos de conformação elencando tipo de conformação quando a temperatura, atuação dos esforços mecânicos e aplicações.

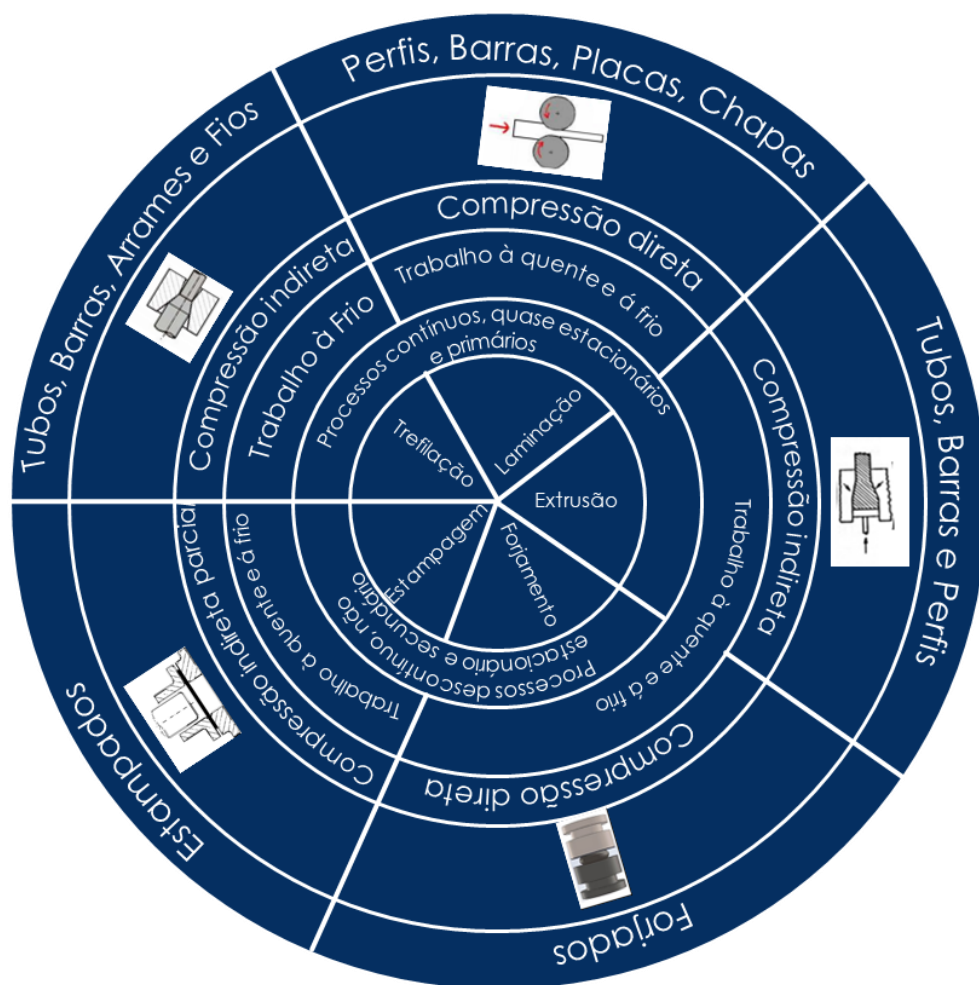


Figura 3 – Visão geral dos processos de conformação. Fonte: Adaptado Bresciani Filho *et al.* (2011).

2.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM

De acordo com Kliauga e Ferrante (2009) em meados de 1890 o processo de corte e conformação mecânica tornou-se popular para fabricação em alta escala de bicicletas e peças de reposição. As operações de corte, estampagem e dobramento tornaram-se constantemente empregadas na produção de peças em series, como: acessórios de bijuterias, peças automotivas, acessórios para móveis etc. A popularidade deste processo se dá pelo fato da eliminação de processos manuais gerando a produção em alta escala, em contra partida diminuindo o custo de produção.

O processo de estampagem consiste em conformar uma chapa plana ou também denominada geratriz, no formato da matriz na qual, a chapa é forçada a escoar pela matriz pela aplicação de esforços aplicados pelo punção. Em muitos casos para realizar o controle do escoamento da chapa é utilizado o prensas-chapas prevenindo o enrugamento (RODRIGUES; MARTINS, 2005) .

Lira (2017) complementa que, o processo de estampagem tem o propósito de aperfeiçoar a chapa metálica, por deformação plástica a quente ou a frio através de matrizes, com o objetivo de dar forma ao produto final. Na qual, concede vantagens como: maior produção com menor custo e garantindo dimensões precisas entre as peças estampadas.

Para obtenção de produtos estampados podem ser realizados através de prensas excêntricas ou hidráulicas e com auxílio de ferramentas fabricadas com aço-ferramenta tratado termicamente. Cada ferramenta possui sua particularidade devido ao produto que se deseja ser fabricado, como por exemplo, pode ser somente um simples processo de dobra até um processo de estágios de cortes e múltiplas dobras (KLIAUGA; FERRANTE, 2009).

Lira (2017) ressalta que, o processo estampagem de chapas permite realizar estampagem de diversos matérias como aço-carbono, latão bronze fosforoso, alumínio e entre outros. Com a possibilidade de realizar operações de furar, cortar ou dobrar podendo ser utilizados com operações únicas ou com ferramentas progressivas. Na Figura 4, a imagem da esquerda é possível visualizar o desenvolvimento dos estágios de estampagem com a utilização de ferramenta progressiva e a direita outro produto final de processo de estampagem.

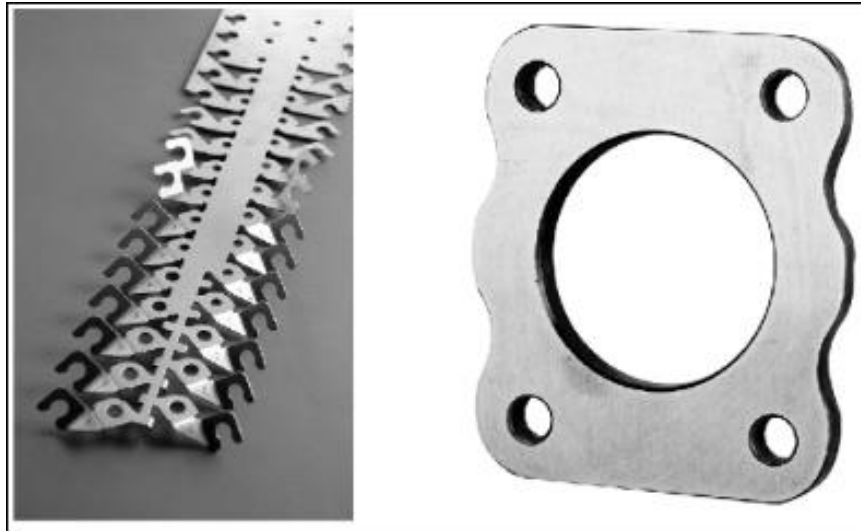


Figura 4 – Produtos estampados com auxílio de matrizes. Fonte: Lira (2017).

Neste sentido, Dieter (1981) acrescenta que a produção em massa de peças metálicas conformadas são realizadas em prensas mecânicas ou hidráulicas. As prensas mecânicas armazenam energia no volante e transferem para o cursor móvel ligado ao embolo da prensa. A vantagem das prensas mecânicas é pela ação rápida por golpes de estampagem, divergente as prensas hidráulicas que são lentas.

Segundo Lira (2017), prensas mecânicas podem variar de 20 até 6 mil toneladas com uma velocidade de golpes por minuto de 20 a 1.500 abrangendo um curso de trabalho 5 mm a 500 mm, já prensas hidráulicas permitem controle de avanço e podem variar de 20 a 10 mil toneladas para um curso de 10 mm a 800 mm.

Além disso, as prensas são classificadas por números de cursores (eixos de atuação) que podem atuar em operações independentemente. A prensa de efeito simples contempla um cursor que atua na direção vertical, efeito duplo trata-se da atuação de dois cursores, sendo que o segundo movimento age como um meio de fixação que é responsável de impedir que ocorra rugosidade no processo de estampagem profunda, e por fim, prensa de efeito triplo quando desempenha duas operações acima da matriz e terceiro que age abaixo da matriz. (DIETER, 1981).

O processo de dobramento vem sendo aplicado nas indústrias há muitos anos, por trazer simplicidade em seu processo. Conforme Dieter (1981) e Schaeffer (2016), o processo possui grande importância e bastante difundido nas áreas industriais como civil e transportes, para tal, estudos tecnológicos e fundamentos científicos são relativamente recentes, diretamente ligados devido ao processo gerar eventos indesejáveis como variações de espessura e dimensional.

2.3 PROCESSO DE DOBRAMENTO

Segundo Rodrigues (2005), o processo de estampagem resulta em deformações plásticas nas chapas, possibilitando a transformação de superfícies planas para geometrias cônicas, prismáticas ou cilíndricas. Através do processo de dobramento é possível obter uma vasta gama de geometria desde simples até complexas, intrinsicamente ligadas ao método de utilização e fabricação.

Dieter (1981) acrescenta que, o processo de dobramento transforma arrames, barras, tubos e chapas de segmentos retos para uma seção tubular, quadrada, retangular ou circular. Para obtenção das tais geometrias é necessário o uso de ferramental, no qual exercerá um esforço de flexão, atingindo o determinado ângulo desejado em dobramento livre ou até a medida do ângulo fixo da matriz. A Figura 5 representa matrizes específicas para dobramento de chapa, o dobramento em V é empregado com um punção que desloca no sentido vertical de cima para baixo, fornecendo uma deformação na chapa até o contato final na matriz (Figura 5a), já para o dobramento em seção circular ocorrerá através da geometria circular do punção e matriz (Figura 5b).

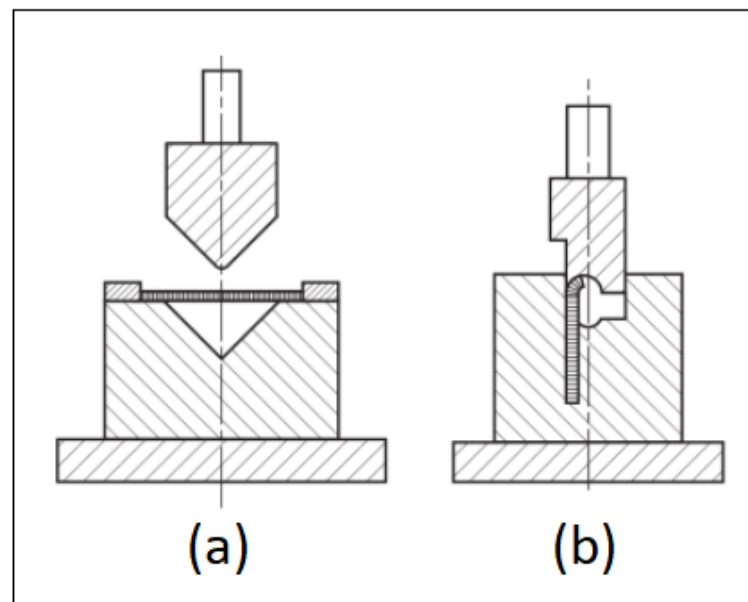


Figura 5 – Processo de dobramento: (a) dobramento em V (b) dobramento seção circular. Fonte: Kliauga e Ferrante (2009).

De acordo com Altan *et al.* (1999), produzir peças dobradas resultam no acréscimo da rigidez por meio do aumento do momento transversal de inércia na região onde ocorre a dobra. Neste sentido, Schaeffer (2016) ressalta que no processo

de dobramento o material que sofre deformação abaixo da sua temperatura de recristalização será submetido a deformações elásticas, posteriormente ocorrem deformações plásticas.

A Figura 6 expressa o comportamento pós dobra na região da estampagem, segundo Bresciani *et al.* (2011) a flexão e a deformação plástica são oriundas dos esforços aplicados em duas direções contrárias, provocando o raio da dobra. Na parte externa as fibras atuam no sentido de tração (cor vermelha) e a interna no sentido de compressão (cor azul), que também é possível visualizar no perfil da dobra há presença da linha neutra, sendo a união das tensões do lado interno e lado externo.

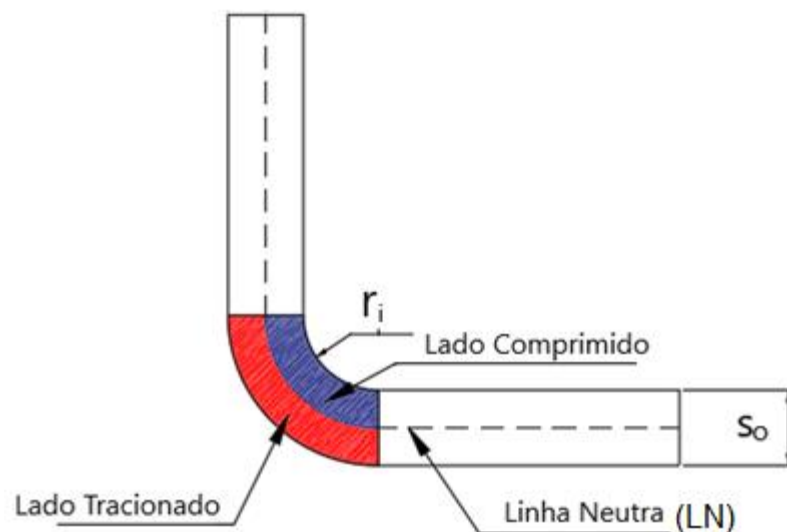


Figura 6 – Representação das tensões de tração e compressão e da linha neutra.
Fonte: Marcondes *et al.* (2016).

No processo de dobra podem ocorrer defeitos de processo como variação da espessura, ruptura e variação dimensional no ângulo de dobra. De acordo com Tsoupis (2014), o efeito de trincas no processo de dobramento pode surgir na região onde sucede a tensão de tração, localizada na parte externa da chapa. Este fenômeno ocorre com menor frequência quando o sentido de laminação da chapa é orientado perpendicularmente a linha de dobra.

Segundo Dieter (1981), para evitar que ocorra trincas no lado tracionado do lado externo da dobra, deve-se adotar o raio mínimo de dobra, que é expresso por multiplicidade da espessura do material, sendo assim, ao raio sugerido $3 \cdot s_0$ – três vezes sua espessura – porém, o raio mínimo pode ser considerado como limite de conformação, que pode variar de material a material estampado. Neste âmbito, para

materiais extremamente dúcteis pode ser considerado nulo, já para chapas de ligas de alta resistência deve ser considerado o valor igual ou maior $5.s_0$.

Santos (2013) salienta que, mesmo os materiais apresentam boa ductibilidade que venham evitar o defeito de rugas, não seria o fator crítico do processo, mas sim, o alcance do controle de qualidade dimensional do produto, pois a presença do retorno elástico no processo que deve ser considerado no projeto.

2.3.1 Tipos de dobramento

Conforme Rodrigues e Martins (2005), dobramento de chapas pode ser executado de diversas maneiras, a escolha do método será em função da aplicabilidade e geometria do produto e o tipo de ferramenta. A Figura 7 ilustra os tipos de dobramentos que podem ser considerados: a) dobramento livre, b) dobramento em V, c) dobramento em U, d) dobramento a fundo, e) dobramento em matriz de deslizamento, e por fim, f) dobramento com punção giratório.

Segundo Bralla (2006), o dobramento livre permite que o ângulo da chapa a ser dobrada é estabelecido pelo avanço do punção contra a matriz, deste modo, quanto menor for a altura de penetração do punção na matriz maior será o ângulo da arestas da chapa. Neste tipo de dobramento as forças atuantes são baixas, todavia a precisão dimensional deixa a desejar, devido à medida que a recuperação elástica atua sobre o material altera a geometria final.

O dobramento em V sucede quando a chapa sofre deformação do punção até encostar na matriz, neste caso a folga da dobra vai ser a própria espessura da chapa. Esta operação traz confiabilidade na precisão do ângulo de dobra, bem como, possui a característica de ser adotadas em processos de dobra com ângulo igual e menor que 90° e para espessura entre 0,5 até 25 mm (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

Dobramento em U é caracterizado por apresentar o formato da matriz em U, a chapa é dobrada com o punção e para alguns casos há um contra punção no fundo do U atuado por molas, o mesmo tem a função de prensa chapa auxiliando no deslocamento da chapa no momento da dobra e eliminando defeitos de empenamento (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

Dobramento em matriz de deslizamento, também conhecido como dobramento em L ou pelos termos em inglês *L-bending* e *wipe-bending*, trata-se quando uma das abas da chapa é fixada por um prensa chapas ao passo que a outra extremidade sofre

o dobramento de 90° pela ação do punção (KAZAN; FIRAT; TIRYAKI, 2009; RODRIGUES; MARTINS, 2005). Para Swift e Booker (2013), o dobramento em L possui a possibilidade de regular o avanço do punção para determinar o ângulo de dobra desejado.

Por fim, o processo de dobramento rotativo que ocorre quando o punção cilíndrico com formato em V entra em contato com a chapa, que pela ação mecânica fará rotação em seu eixo dobrando a chapa, a vantagem deste método é a eliminação de um prensa chapas e baixas forças na estampagem de dobra. (RODRIGUES; MARTINS, 2005). Segundo Keller *et al.* (2017) o uso deste processo de dobramento possui a vantagem de calibrar o ângulo de dobra, que pode ser facilmente ajustado para corrigir as alterações do retorno elástico devido a concepção do punção rotativo.

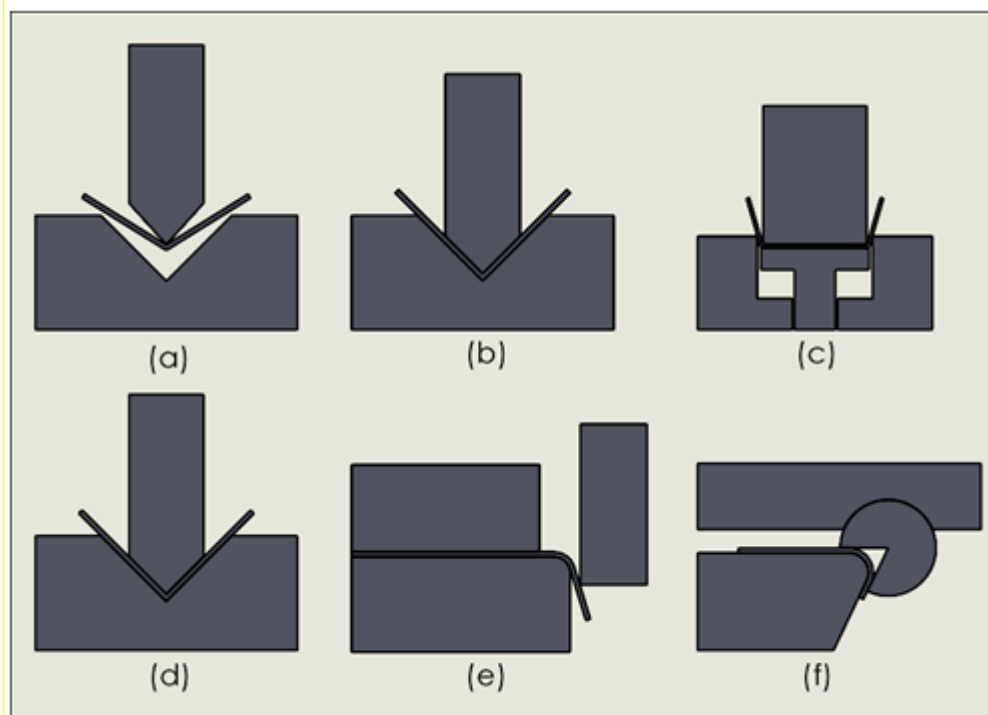


Figura 7 – Tipos de dobramento (a) dobramento livre (b) dobramento em V (c) dobramento em U (d) dobramento a fundo (e) dobramento em matriz de deslizamento ou dobramento em L (f) dobramento rotativo. Fonte: Adaptado Rodrigues e Martins (2005).

2.3.2 Dobramento em L com ressalto

O dobramento em L com ressalto foi inicialmente estudado por Ling em 2005, com o objetivo de restringir o retorno elástico, que posteriormente foi abordado por Kuo e Lin em 2012, e em 2015 avaliado por Jafari. Segundo Ling *et al.* (2005) o retorno elástico representa problemas significativos em projetos para que venham obter a

peça final desejada sem desvios dimensionais, ao avaliar este método identificou que gera a diminuição no retorno elástico.

A Figura 8 demonstra o método de dobramento em L com ressalto, o mesmo possui similaridade com o processo de dobramento em L convencional, a diferença característica está presente no punção inferior. Neste local, há um ressalto com altura e largura determinada que no processo de dobramento executa também uma conformação direta no lado interno da dobra (JAFARI *et al.*, 2015; KUO; LIN, 2012; LING; LEE; CHEOK, 2005).

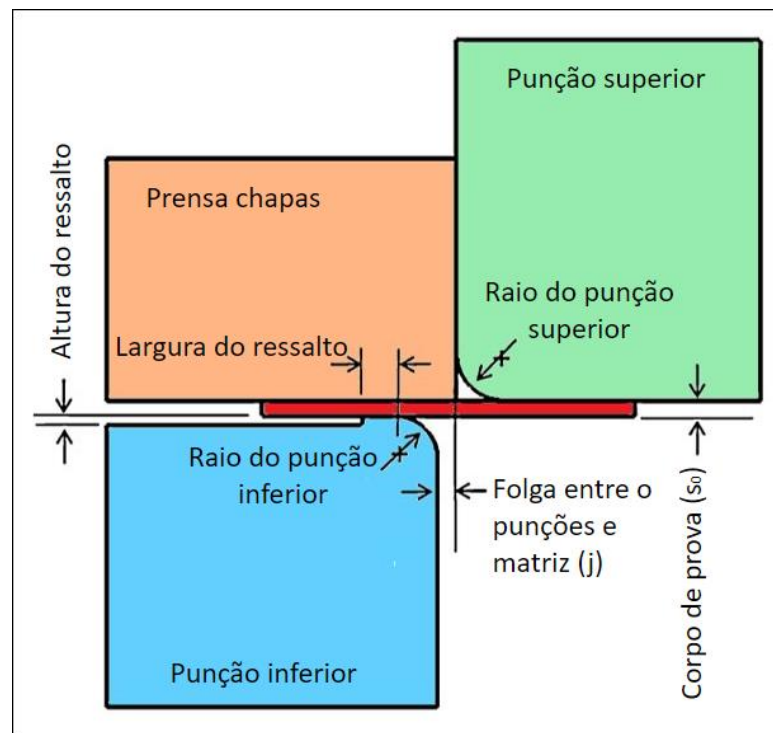


Figura 8 – Geometria característica do processo de dobramento em L com ressalto. Fonte: Adaptado Jafari *et al.* (2015).

Segundo Jafari *et al.* (2015), a altura e largura do ressalto presente no punção inferior reduz o retorno elástico. A Figura 9 mostra o comportamento do retorno elástico com a variação da largura do ressalto, nota-se que com o aumento da largura diminui o ângulo do retorno elástico, este efeito se mantém quando aumentado a altura do ressalto, como destacado da Figura 10.

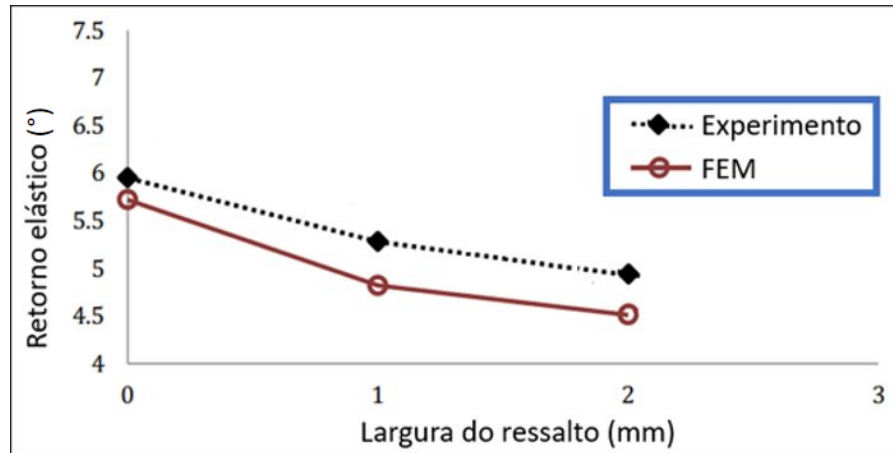


Figura 9 – Análise do retorno elástico vs. largura do ressalto. Fonte: Adaptado Jafari *et al.* (2015).

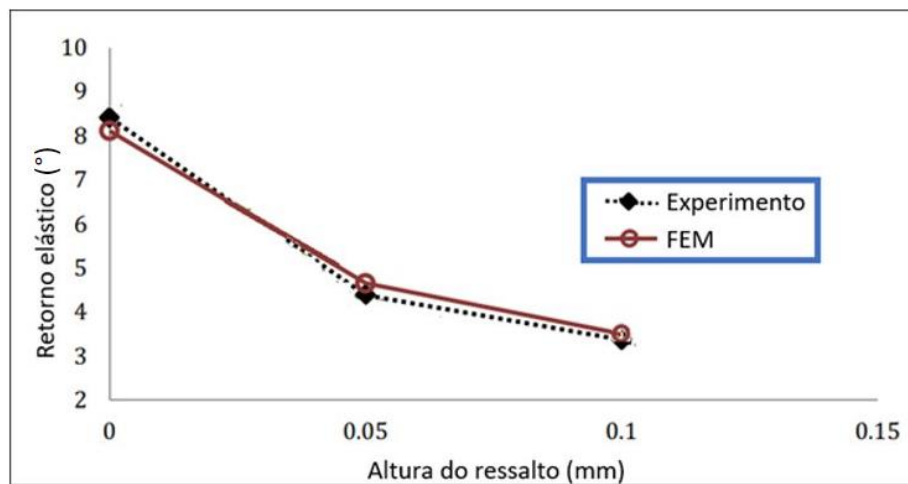


Figura 10 – Análise do retorno elástico vs. altura do ressalto. Fonte: Adaptado Jafari *et al.* (2015).

2.3.3 Tensão no processo de dobramento

Conforme abordado inicialmente no tópico 2.3 a chapa quando dobrada dá origem a uma dupla tensão, no lado externo ocorre tensões trativas e lado interno compressivas. Segundo Schaeffer (2016) a intensidade de ambas tensões decrescem nas fibras externas ao centro da peça, chegando ao ponto aonde as tensões se anulam, surgindo a linha neutra, considerada como a linha de passagem entre as tensões de compressão e tração.

Na Figura 11 pode ser analisado o comportamento de dobramento interligando o ensaio convencional de tração no efeito do lado externo da dobra, representado pela curva de engenharia. Durante o início do processo de dobramento surge a tensão exercidas pelas forças oriundas da atuação do ferramental, onde a superfície externa

da chapa passa por um regime transitório de elástico ao regime plástico. No início do dobramento elástico o material se encontra abaixo do limite elástico, para tal, a deformação é zero localizada na metade da espessura da chapa. No momento que ocorre o dobramento plástico, há presença do limite elástico, a linha neutra se desloca gradativamente quando ocorre o dobramento para a superfície interna da dobra. No processo em si, as fibras da superfície da linha externa são mais deformadas perante as superfícies internas que sofrem compressão (DIETER, 1981). Conforme Schaeffer *et al.* (2017), a tensão de tração localizada na parte externa da dobra não deve exceder a tensão máxima (R_m), caso contrário se manifestará fissuras no raio externo da chapa.

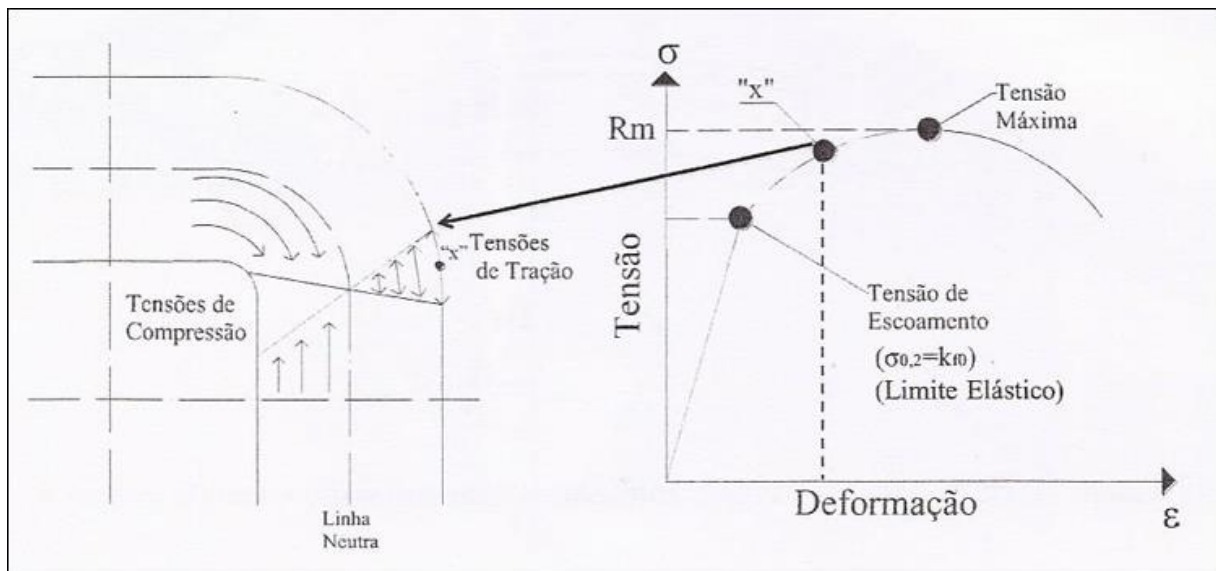


Figura 11 – Tensões no processo de dobramento. Fonte: Schaeffer *et al.* (2017).

Segundo Barbosa (2009) e Grüning (2013), dobramento na zona elástica apresenta certas variáveis explanados na Figura 12, que possibilita realizar o cálculo para determinação do comprimento do arco dobrado (l_{ca}) e a própria deformação relativa (ϵ). Ademais conforme Lange (1990), a Figura 12 mostra a simetria nas tensões de compressão presentes com maior intensidade no raio interno r_i e tração no lado do raio externo (r_e) no momento do dobramento, neste sentido a linha neutra se encontra na metade da espessura do material, no qual estão posicionados a linha (l_{ca}) e o raio médio (r_m).

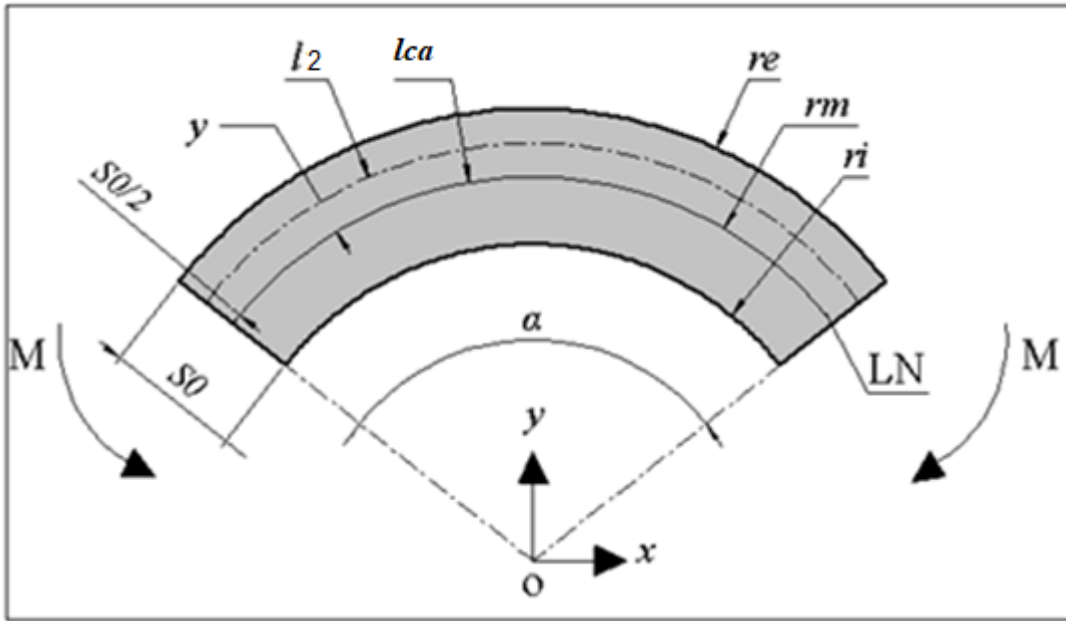


Figura 12 – Representação das variáveis na geometria do dobramento de chapas.
Fonte: Adaptado Ahn (2020).

O comprimento do arco dobrado (l_{ca}) na posição da linha neutra (LN) pode ser calculado pela equação 1, conhecendo-se o ângulo de dobramento (α) e o raio de dobra da metade da espessura da chapa (r_m).

$$l_{ca} = r_m \cdot \alpha \quad \text{Eq. 1}$$

A deformação do arco do comprimento l_2 visto na Figura 12, representa uma distância da linha neutra (LN) até a posição y , que pode ser equacionada pela equação 2 (MARCINIAK *et al.* 2002).

$$l_2 = (r_m + y)\alpha = r_m \cdot \alpha \left(1 + \frac{y}{r_m}\right) = l_{ca} \left(1 + \frac{y}{r_m}\right) \quad \text{Eq. 2}$$

Conforme Schaeffer (2016), através da variação relativa dos arcos dobrados l_{ca} e l_2 encontra-se a deformação relativa (ε) pela equação 3. A equação 3 pode ser utilizada em casos quando não há simetria entre a região comprimida e tracionada da chapa:

$$\varepsilon = \frac{l_2 - l_{ca}}{l_{ca}} = \frac{(\alpha(r_m + y) - r_m \cdot \alpha)}{r_m \cdot \alpha} = \frac{y}{r_m} \quad \text{Eq. 3}$$

No dobramento plástico parte-se do pressuposto que há uma simetria entre a região tracionada e a região comprimida, e que a relação $\sigma x \varepsilon$ é sabida como dado inicial do produto a ser submetido ao dobramento. Sendo que, qualquer seção haverá a máxima deformação relativa (ε_{max}) que ocorre nas fibras externas (tensões de tração) distantes da linha neutra (SCHAEFFER, 2016). Neste sentido é possível calcular a máxima deformação relativa pela equação 4, onde s_0 é a espessura inicial da chapa e r refere-se à relação $r = r_m + y$ conforme indicado na Figura 12.

$$\varepsilon_{max} = \frac{s_0}{2} \cdot \frac{1}{r} \quad \text{Eq. 4}$$

Segundo Fress (2017), em seus ensaios a deformação no processo em estudo é inevitável, os materiais em geral possuem uma capacidade de estiramento que resultaram na deformação da superfície externa quando o dobramento ocorre. Ademais, conforme Schaeffer *et al.* (2017), no processo do dobramento as fibras externas aumentam de tamanho, a partir disto, é possível também mensurar as deformações verdadeiras de tração (φ) pela equação 5 conforme a posição da linha neutra (LN):

$$\varphi_{ext} = \ln\left(\frac{l_2}{l_{ca}}\right) = \ln\left(1 + \frac{y}{r_m}\right) \quad \text{Eq. 5}$$

No estudo de Fress (2017), sobre avaliação de processo de dobramento, considerou que a posição y sendo deformação nas fibras externas (Figura 12), partindo da premissa que há simetria nas deformações de tração e compressão:

$$\varphi_{ext} = \ln\left(1 + \frac{s_0}{2r_i + s_0}\right) \quad \text{Eq. 6}$$

A equação 7 apresenta outro método de cálculo para a determinação da deformação verdadeira (φ_{ext}) no processo de dobramento (LANGE, 1990). Com a particularidade de avaliar a espessura da chapa (s_0) e o raio do punção (r_p).

$$\varphi_{ext} = \ln \sqrt{1 + \frac{s_0}{r_p}} \quad \text{Eq. 7}$$

2.3.4 Força de dobramento

Ação de dobrar chapas requer uma força que venha atuar nas condições específicas de trabalho. Segundo Rodrigues e Martins (2005), cada método de dobramento possui uma particularidade de força atuante. Em contrapartida, Dieter (1981) descreve que a força de dobramento (FG) pode ser encontrada com a equação 8, usando a largura da chapa (b), espessura inicial (s_0), a tensão máxima (R_m), ângulo de dobramento α e o raio interno da chapa (r_i).

$$FG = \frac{(R_m \cdot s_0^2 \cdot b)}{2(r_i + \frac{s_0}{2})} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad \text{Eq. 8}$$

Para a determinação da força do processo de dobramento em V (FV) deve ser avaliado a geometria da ferramenta, para melhor entendimento a Figura 13 exhibe os parâmetros que devem ser avaliados para o cálculo da forma de dobramento (SCHAEFFER *et al.* 2017).

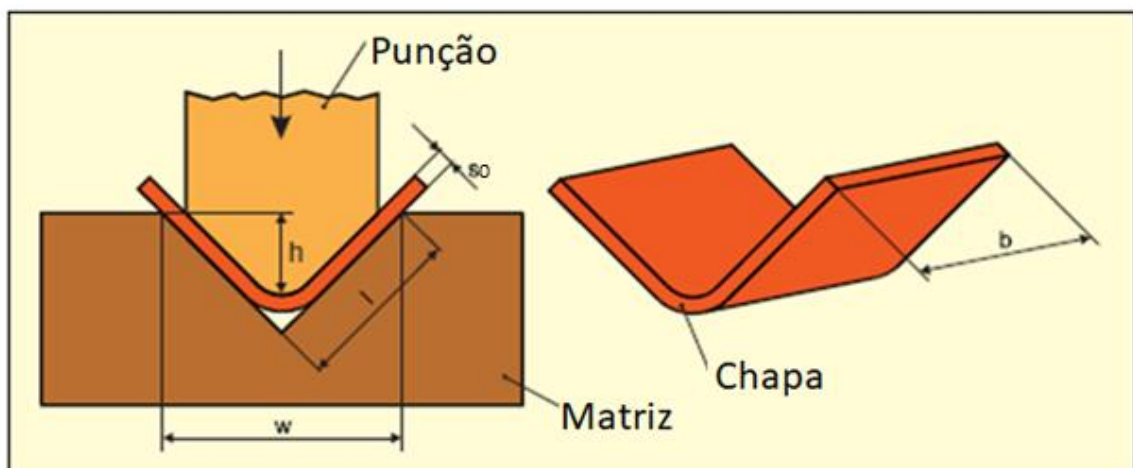


Figura 13 – Cálculo da força de dobramento em V. Fonte: Adaptado Schuler (1998).

A utilização Equação 9, expressa como calcular a força de dobramento em V, onde R_m representa a tensão máxima, b a largura da chapa, s_0 a espessura da chapa e w a distância de apoios (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

$$FV = \frac{(1,2 \cdot b \cdot s_0^2 \cdot R_m)}{w} \quad \text{Eq. 9}$$

No processo de dobramento em L inicia-se com o posicionamento da chapa na ferramenta, a mesma ficará fixada com o prensa chapas (Figura 14) e a flexão da chapa ocorre pelo movimento do avanço do punção até o curso definido (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

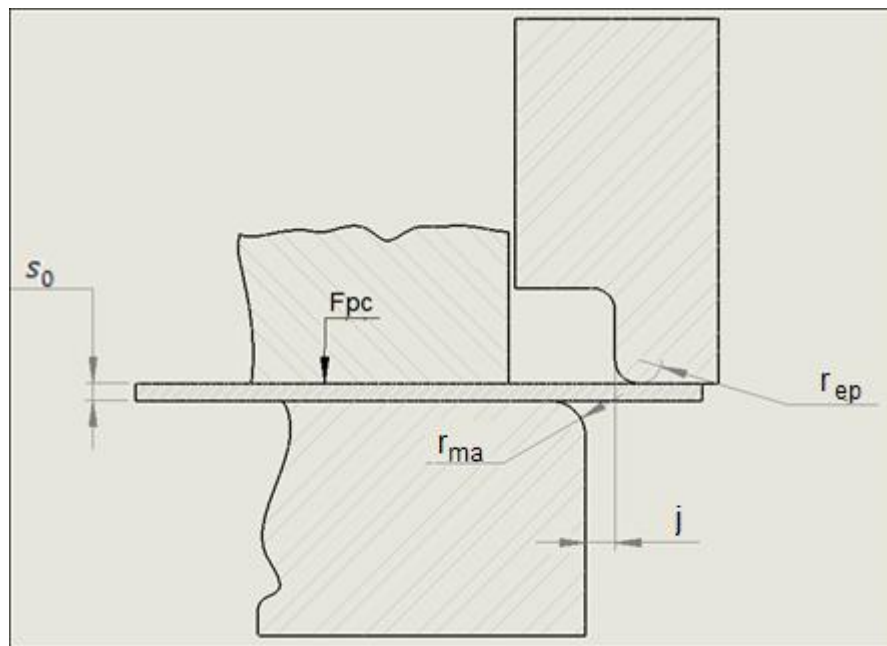


Figura 14 – Dimensões para cálculo de força de dobramento em L. Fonte: Adaptado Rodrigues e Martins (2005).

De acordo Rodrigues e Martins (2005) as forças de atrito aparecem entre o punção e a chapa, no qual irá ocorrer o aumento da força gradualmente com o deslocamento do punção, sendo possível estimar o valor da força máxima do dobramento da aba adotando o cálculo da equação 10. Em que, b é o comprimento de dobra, s_0 a espessura da chapa, r_p o raio do punção, j a folga entre o punção e a matriz, r_{ma} o raio da matriz, R_m tensão máxima e K_s um fator de correção que abrange 1.5 a 2.

$$FL = \frac{(K_s \cdot R_m \cdot b \cdot s_0^2)}{4(r_p + j + r_{ma})} \quad \text{Eq. 10}$$

2.3.5 Retorno elástico

Segundo Schijve (2008), o retorno elástico está relacionado as tensões residuais, que ocorre em diversos processos de conformação. Quando o material é deformado plasticamente deixa uma distribuição de tensões residuais no produto, gerando um momento fletor que introduz a deformação plástica nas fibras externas e elástica nas fibras internas da chapa. Posteriormente, após o descarregamento das tensões ocorre o retorno elástico.

Conforme Dieter (1981), o efeito mola ou o termo conhecido em inglês *springback*, é uma variação dimensional que o material sofre após a chapa conformada, quando a pressão da ferramenta é liberada. Este fenômeno ocorre devido às variações da deformação produzidas pela recuperação elástica. Quando maior for o limite de escoamento do material maior será o retorno elástico. A Figura 15 exemplifica o tal efeito, no ponto em que a ferramenta de dobra chega ao seu curso final a chapa está sofrendo a força de dobra resultando no ângulo inicial (α_0) que está ligado ao raio inicial (r_0), quando o punção retorna ocorre a liberação da carga, por consequência, surge o efeito mola repercutindo na transformação de um ângulo final (α_1) que também está ligado ao raio final (r_1).

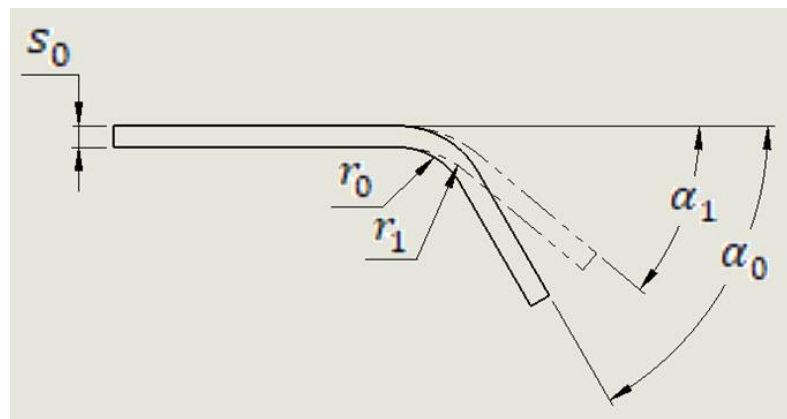


Figura 15 – Representação do efeito mola no processo de dobramento. Fonte: Adaptado Klocke (2013).

Nesta mesma perspectiva Carden *et al.* (2002), descreve que o retorno elástico é a mudança elástica do corpo conformado, que exercerá após a descarga das tensões transformando-o uma nova geometria.

O retorno elástico quando não aplicado em projetos de ferramentas origina problemas de qualidade e geração de impactos econômicos devido ao atraso de

produções de ferramentais. Por exemplo na indústria automotiva dos Estados Unidos possui uma perda de cerca US\$ 50 milhões por ano (GAN; WAGONER, 2004).

Ademais, o retorno elástico é o principal problema da diminuição de qualidade das peças dobradas, causando variações dimensionais, gerando problemas de montagem e defeitos visuais no produto. A alternativa para contornar esta situação consiste em projetar ferramentas de tal forma que venham prever o retorno elástico (THIPPRAKMAS, 2020).

Schaeffer *et al.* (2017) acrescenta que, o retorno elástico trata-se do comportamento das tensões de compressão e tração, quando é ultrapassado a tensão de escoamento em ambos os lados da linha neutra. Entre os limites de compressão e tração ocorrem tensões correspondentes ao estado elástico do material, nesta região o material é deformado unicamente elasticamente. No momento em que as forças internas deixam de atuar sobre a peça a região deformada elasticamente tende a retornar a sua posição inicial ocorrendo o retorno elástico.

De acordo com Ferreira (2010), a deformação plástica é diminuída pela recuperação elástica. Na Figura 16 observa-se a sessão transversal ao corte do raio de dobramento de uma chapa, que apresenta duas regiões nas extremidades deformadas plasticamente, separadas por uma região central deformada elasticamente onde há a linha neutra. A região central que está deformada elasticamente tende a retornar para seu estado inicial. Porém, as tensões trativas (+) na extremidade superior e compressivas (-) na posição inferior, restringem parcialmente a recuperação elástica. Schijve (2009) descreve que, no processo de dobramento ocorre um momento fletor sobre a chapa introduzindo regiões deformadas plasticamente nas fibras externas e internamente regiões deformadas elasticamente, após o descarregamento ocorre o retorno elástico devido a distribuição de tensão elástica oriunda do material dobrado.

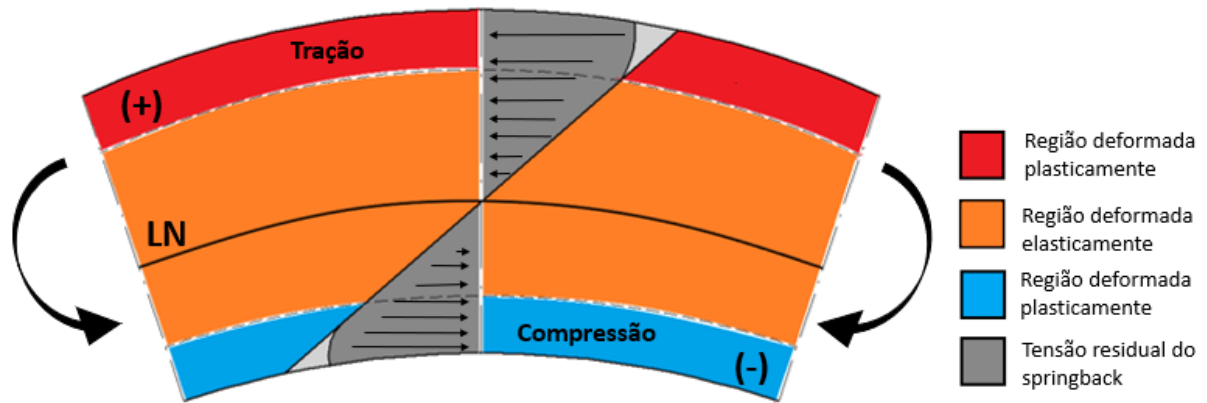


Figura 16 – Distribuição das tensões produzidas no dobramento. Fonte: Adaptado Schijve (2009).

Conforme Keeler *et al.* (2017), após um corpo metálico sofrer uma deformação plástica através do punção e matriz ocorre o desvio dimensional com a remoção do ferramental. Este efeito é conhecido como retorno elástico causado pela recuperação elástica, o mesmo pode ser investigado com o comportamento característico de uma curva tensão x deformação, no qual a tensão é diretamente proporcional a deformação ilustrado na Figura 17, onde o carregamento atua inicialmente no ponto O até finalizar no ponto A, quando há o descarregamento das forças atuantes resulta na linha AB, a amplitude OB simboliza a deformação plástica em contrapartida BC retrata a região onde ocorre o retorno elástico.

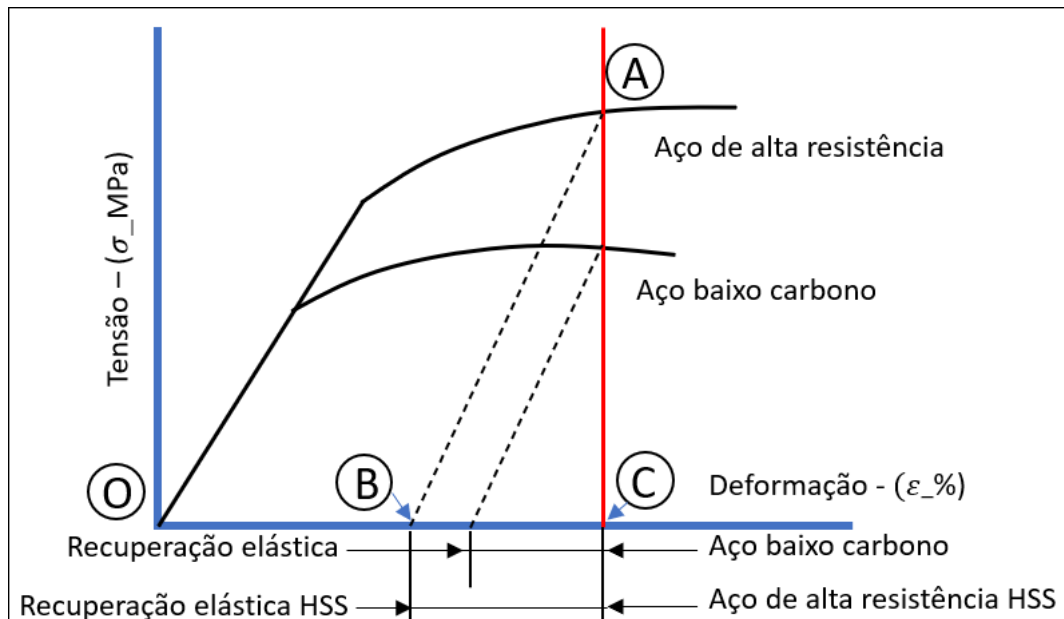


Figura 17 – Comportamento do Retorno elástico na curva tensão-deformação. Fonte: Adaptado KEELER *et al.* (2017).

Segundo Gautam *et al.* (2016), o processo de deformação de chapas ocorre depois que as mudanças da estrutura do material ultrapassam o limite elástico máximo. No entanto, esta não é a deformação final atingida, após a liberação das cargas o material tende a retornar a sua origem, resultando o retorno elástico. A Figura 18 ilustra por outra ótica o efeito da deformação através da curva tensão x deformação, sendo que a deformação total trata-se da deformação elástica mais a deformação plástica na operação, na qual a zona elástica é a fonte responsável pelo retorno elástico.

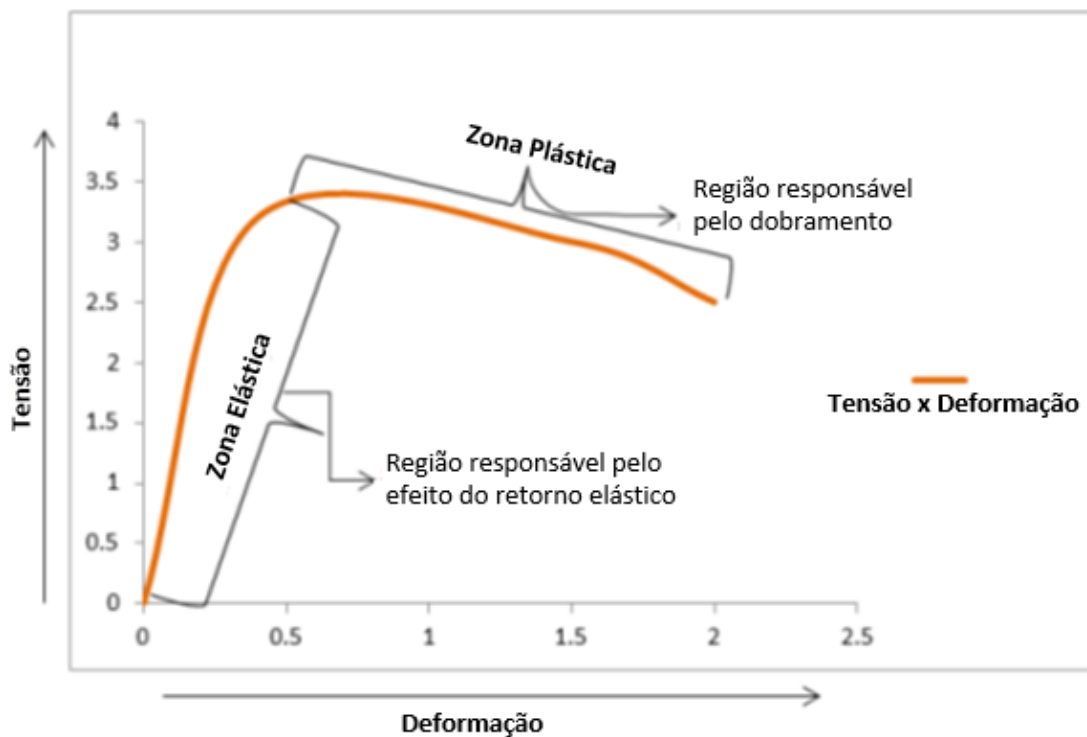


Figura 18 – Representação do efeito das zonas de deformação na curva tensão x deformação. Fonte: Adaptado Gautam *et al.* (2016).

Conforme Gautam *et al.* (2016), a magnitude o retorno elástico está presente em todos os materiais. Os fatores de tensão de escoamento e de tensão máxima determinarão quanto será o springback. Por exemplo, em materiais dúcteis o retorno elástico será menor do que os metais de alta resistência, com o vínculo do módulo de elasticidade (E) do determinado material. Ou seja, o retorno elástico aumenta com o aumento da tensão de escoamento (σ_{esc}) e a tensão máxima (R_m).

Conforme Schaeffer (2016), o retorno elástico está atrelado ao limite de escoamento do material e o método de dobramento empregado. Quando adotado um raio de dobramento pequeno no ferramental resulta em uma zona plástica maior, fazendo que a zona elástica seja menor e ocorra baixo retorno elástico. Ademais

Keeler *et al.* (2017) ressalta que, o retorno elástico ocorre em determinados lugares da peça, atuadas pelo ferramental e pela geometria do produto, que impede o descarregamento das tensões elásticas restantes na peça surgindo tensões residuais, sendo que este somatório pode causar uma mudança significativa na forma de desvio geométrico pelo fato do efeito multiplicador.

Além das características de elasticidade do material que devem ser apuradas, o raio do punção deve ser controlado para obter a precisão dimensional após o dobramento das peças. Neste intuito, o raio e ângulo de dobramento deve ser perfeitamente projetado para compensar esta característica do retorno elástico. (MARCONDES; DOS SANTOS; HAUS, 2016).

Uma maneira de minimizar o retorno elástico é aumentar o ângulo de dobramento ou pelo método de cunhagem. O método mais usual é aumentar o ângulo inicial (α_0) de dobra além do ângulo projetado, muitas vezes determinada em projetos na tentativa e erro, que ajustado após o dobramento final do produto, já o método de cunhagem se trata da adição de cunhas na lateral do ferramental que irão auxiliar o dobramento em um estágio seguinte do punção de dobramento (GAUTAM *et al.*, 2016).

Conforme Dieter (1981), nos processos de estampagem nunca deixarão de existir o efeito mola. No processo de dobramento o fator do retorno elástico (K) pode ser verificado através da equação 11 que está ilustrado na Figura 15, sendo a razão entre os ângulos de dobramento.

$$K = \frac{r_0 + \frac{s_0}{2}}{r_1 + \frac{s_0}{2}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \quad \text{Eq. 11}$$

Segundo Grüning (2013), quando não é conhecido os ângulos de dobramento pode ser calculado o retorno elástico pela equação 12. Onde, M é o momento de dobramento da chapa, s_0 espessura da chapa, b a largura da chapa a ser dobrada, E o módulo de elasticidade, por fim, r_p no qual se refere ao raio do punção.

$$K = 1 - \frac{12M(r_p + 0,5.s_0)}{E.b.s_0^3} \quad \text{Eq. 12}$$

O momento de dobramento pode ser calculado com a equação 13, onde w é a distância de apoio de dobramento e F_d a força de dobramento.

$$M = \frac{F_d \cdot w}{4} \quad \text{Eq. 13}$$

2.4 AÇO SAE 1006

Aços de baixo carbono apresentam uma grande vantagem característica pela sua boa conformabilidade, conforme Satoh, *et al.* (1985) os aços em questão, apresentam propriedades mecânicas como alto alongamento e baixa tensão de escoamento para um índice de anisotropia média (valor de 1.7), sendo excelente para processo de estampagem, onde são os aços mais produzidos no mundo devido sua atratividade econômica. A Tabela 1 exhibe dados extraídos na literatura sobre as propriedades mecânicas características do aço SAE 1006, referindo-se ao seu alongamento (δ), tensão máxima (R_m) e tensão de escoamento (σ_{esc}), já a Tabela 2 mostra avaliação característica do material realizada por Simião (2011) considerando o sentido da laminação. A Figura 19 expõem o comportamento da curva de tensão de engenharia x deformação relativa do aço SAE 1006.

Tabela 1 – Dados da tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento do aço SAE 1006. Fonte: ASM (1990).

Tensão máxima (R_m) [MPa]	Tensão de escoamento (σ_{esc}) [MPa]	Alongamento (δ) [%]
330	280	20

Tabela 2 – Dados da tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento para os sentidos de laminação 0°, 45° e 90° do aço SAE 1006. Fonte: Simião (2011).

Sentido da laminação [°]	Tensão máxima (R_m) [MPa]	Tensão de escoamento (σ_{esc}) [MPa]	Alongamento (δ) [%]
0	341 +/- 3	274 +/- 3	31,9 +/- 2
45	360 +/- 2	290 +/- 3	27,1 +/- 1
90	332 +/- 3	258 +/- 3	34,6 +/- 1

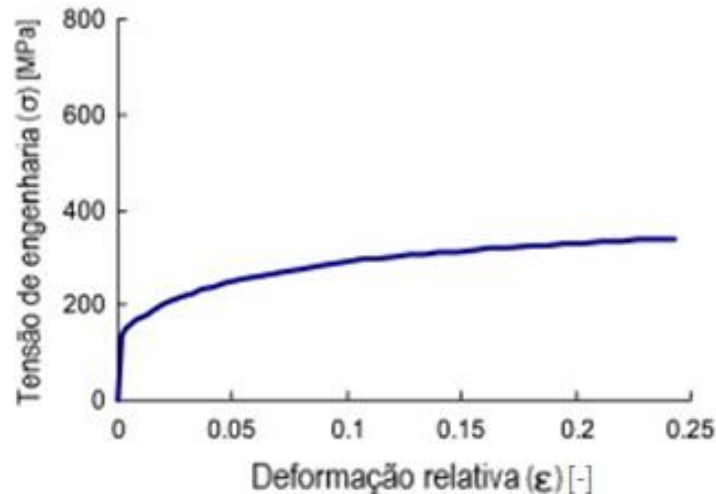


Figura 19 – Relação entre a tensão de engenharia x deformação relativa do aço SAE 1006. Fonte: Lin *et al.* (2011).

Na Tabela 3 observa-se o índice de encruamento (n) e o coeficiente de resistência (C), dados extraídos da curva de escoamento realizada pelo auto Araújo *et al.* (2010) para cada sentido de laminação.

Tabela 3 – Dados do índice de encruamento e coeficiente de resistência para o sentido de laminação 0°, 45° e 90° do aço SAE 1006. Fonte: Araújo *et al.* (2010).

Sentido da laminação [°]	Coefficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]
0	522	0,21
45	578	0,20
90	563	0,21

Segundo Simião (2011) chapas de aços baixo carbono possuem o foco para utilização no processo de estampagem, no qual os mesmos são comercializados em bobinas laminadas a quente com espessuras a cerca de 2 a 10 mm. Em muitos casos as chapas são enviadas para empresas relaminadoras que farão processo de adequação conforme solicitado pelo cliente, sendo etapas de decapagem, slitter (corte de largura), recozimento e até mesmo processos de tratamentos superficial como galvanização.

O comportamento de estampagem da chapa depende de três variáveis, índice de encruamento, grau de anisotropia e qualidade superficial. Estes fatores estão ligados a composição química que proporcionam diferenças em propriedades mecânicas do material (PERO-SANZ *et al.*, 1999). A Tabela 4 mostra os parâmetros de referência para a composição química do SAE 1006.

Tabela 4 – Percentual em massa da composição químicas do SAE 1006. Fonte: Jamil *et al.* (2022) e Lin *et al.* (2011).

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]
Jamil (2022)	<0,06	0,07-0,06	<0,35	<0,03	0,05	-
Lin (2011)	<0,06	-	<0,2	<0,025	<0,02	>0,0015

A norma ABNT NBR 5915-2 (2013), determina a composição químicas dos aços utilizados para estampagem, no qual são classificados quanto a grau de estampagem, estampagem média (EM), estampagem profunda (EP) e estampagem extra profunda (EEP), que pode variar de grau 1 até grau 4. A Tabela 5 exibe a composição química dos aços em relação a classificação de grau de estampagem.

Tabela 5 – Composição química em percentual de massa dos aços para avaliação de graus de estampagem. Fonte: ABNT NBR 5915-2 (2013).

Grau de estampagem	C máx [%]	Mn máx [%]	P máx [%]	S máx [%]	Al máx [%]	Ti máx [%]
EM	0,12	0,6	0,03	0,03	0,01	-
EP	0,1	0,45	0,03	0,03	0,01	-
EEP grau 1	0,08	0,45	0,03	0,03	0,01	-
EEP grau 2	0,06	0,45	0,03	0,02	0,01	-
EEP grau 3	0,007	0,35	0,02	0,02	0,01	0,2
EEP grau 4	0,007	0,2	0,02	0,02	0,01	0,2

Segundo Freitas *et al.* (2010) o SAE 1006 possui composição predominante por ferro, carbono e presença de impurezas, como fósforo e enxofre, havendo a possibilidade de possuir outros elementos como exemplo, tungstênio, cromo, vanádio, silício, manganês, cobalto, molibdênio, alumínio, níquel, entre outros. O aço em questão, recebe a classificação de ferríticos de baixo carbono (DE ALBUQUERQUE *et al.*, 2009). A Figura 20 está ilustrando a microestrutura do SAE 1006, que é possível visualizar os contornos de grãos e a estrutura ferrítica com pequenos pontos de inclusões (FREITAS *et al.*, 2010).

Conforme Billur (2019), a composição de ferrita possui uma microestrutura CCC (cúbica de corpo centrado) determinada como ferro indicado pela letra alfa (α) no diagrama de fase $Fe - Fe_3C$. Por se tratar de um aço baixo carbono prevalece a microestrutura ferrítica, já para aços de médio e alto possuem ferrita com uma porcentagem mássica de perlita.

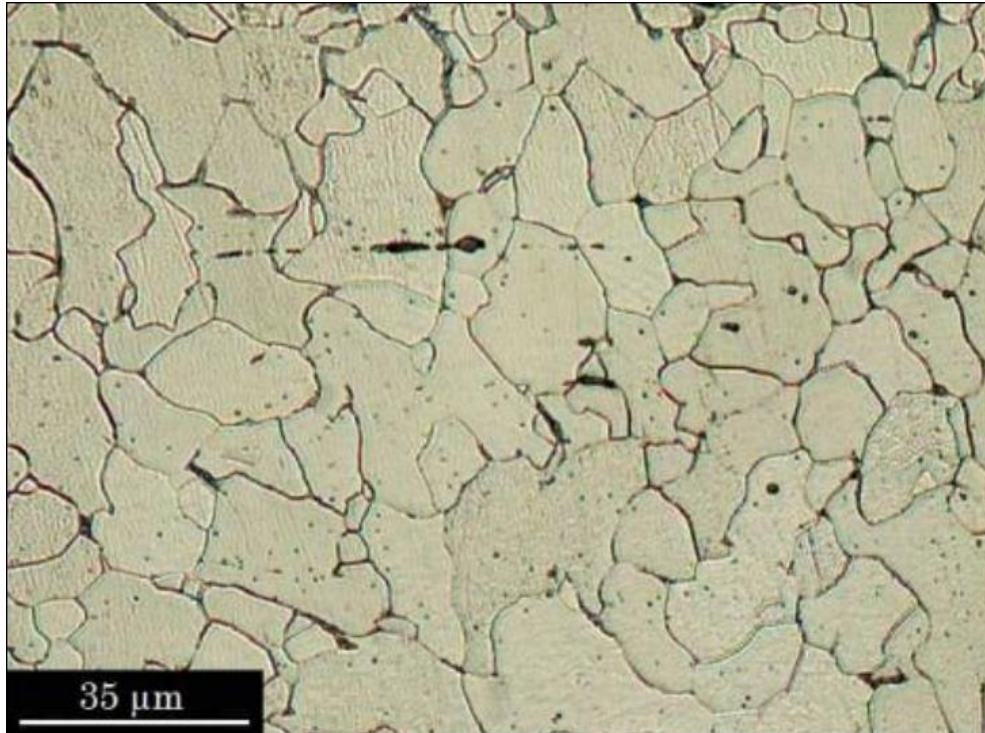


Figura 20 – Análise metalográfica SAE 1006. Fonte: Freitas *et al.* (2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do estudo baseou-se em avaliar o retorno elástico no processo de dobramento em L e visa comparar duas técnicas de dobra. A primeira técnica, fundamenta-se na literatura de Rodrigues e Martins (2005) com a utilização de um punção sem ressalto, a segunda técnica utiliza um punção com ressalto, que será abordada na seção 3.2. Em ambos os casos, foi avaliada a influência do sentido da laminação da chapa. A sistemática dos ensaios está representada na Figura 21, que está dividido em 3 grandes grupos: caracterização do material SAE 1006, ensaio de dobramento e a simulação do estudo do dobramento.

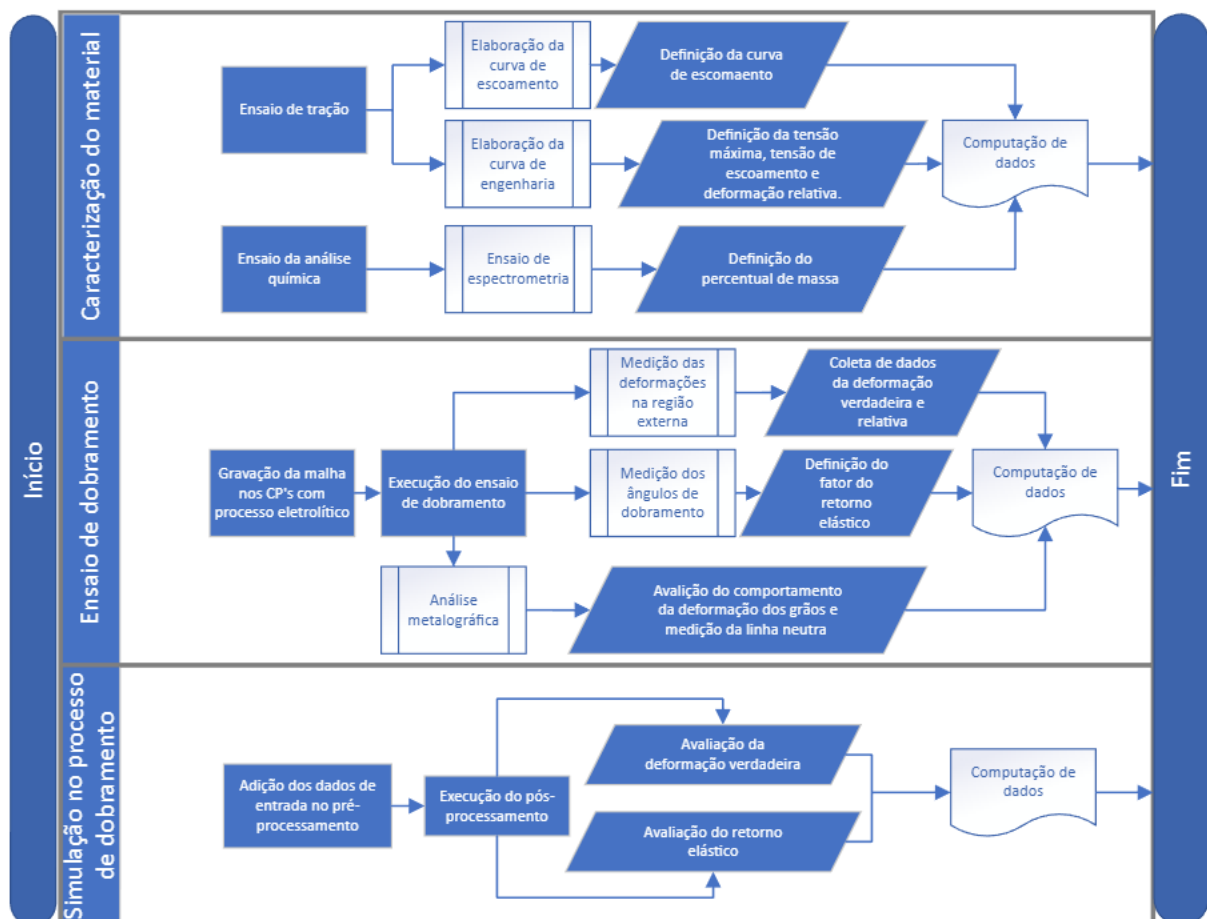


Figura 21 – Diagrama da sistemática dos ensaios.

3.1 MATERIAL UTILIZADO

No presente estudo foi utilizado aço de baixo carbono SAE 1006 de espessura 1,5 mm, fabricado pela usina ArcelorMittal (Anexo A). O material é altamente usado

nas indústrias que fabricam acessórios para móveis e para linha branca, como: corrediças, dobradiças, suportes, rodízios, cantoneiras, junções, distanciadores, etc. A fabricação dos corpos de prova para o ensaio de tração e avaliação do dobramento foram feitas através do corte a laser com a utilização de ar comprimido como meio de oxidação do material a ser submetido ao corte. Conforme Cournelius (2020), o corte a laser apresenta baixo risco de deformação, além de, reduzir drasticamente alterações nos ensaios mantendo a integridade do material inicial.

3.1.1 Análise química do material SAE 1006

Com a finalidade de certificar a composição química do material SAE 1006 realizou-se uma análise quantitativa, identificando o teor da composição química de cada elemento por meio de espectroscopia de emissão ótica.

Para executar a investigação da composição química do aço SAE 1006 utilizou-se um corpo de prova 25x25x1,5 mm, seguindo a norma ASTM E415-17 (2017), a execução foi realizada no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física) da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) utilizando o espectrômetro de emissão ótica do fornecedor Spectro, modelo Spectrolab (Figura 22).



Figura 22 – Espectrômetro de emissão ótica.

3.1.2 Ensaio de tração

Foi realizado o ensaio de tração com o foco de investigar as propriedades mecânicas do aço SAE 1006 com 1,5 mm de espessura (s_0), tais como, a tensão máxima (R_m), tensão de escoamento (σ_{esc}), índice de encruamento (n), o coeficiente de resistência (C) e o alongamento absoluto (Δl). Foram utilizados 5 corpos de prova nos sentidos de laminação 0° , 45° e 90° totalizando 15 corpos cortados com o processo a laser seguindo os procedimentos da norma NBR 6892-1 (2013).

Conforme a NBR 6892-1 (2013), corpos de prova como tiras de espessuras de 0,1 até 3 mm podem ser fabricados com lados paralelos, ou seja de forma retangular, válido somente para largura igual ou menor que 20 mm. A Figura 23 representa o dimensionamento dos CP's.

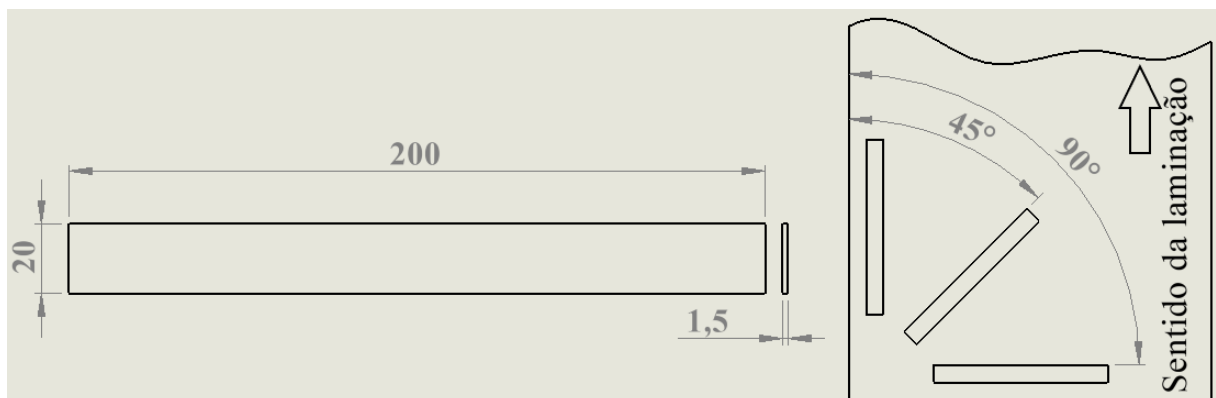


Figura 23 – Representação do corpo de prova.

Os corpos de prova foram identificados manualmente com o sentido de laminação. Ademais, os mesmos foram marcados com traços com espaçamentos de 5 mm e a delimitação do comprimento útil de 80 mm, como pode ser visto na Figura 24. O intuito da realização das marcações, faz jus a verificação do comprimento e avaliação da deformação do material.

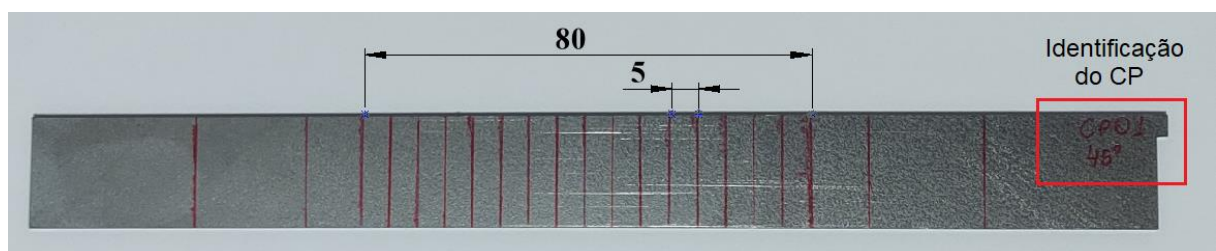


Figura 24 – Metodologia de marcação dos corpos de prova.

Os ensaios foram conduzidos na máquina universal de ensaios mecânicos do fabricante EMIC modelo DL-20000 com a utilização do extensômetro (Figura 25) com velocidades de ensaio baseada na taxa de tensão descrito na norma NBR-6892-1:2013. Foi adotado uma taxa de tensão de 10 MPa s^{-1} , dentro dos parâmetros estabelecidos de 6 a 60 MPa s^{-1} para materiais com o módulo de elasticidade (E) igual e maior a 150.000 MPa.



Figura 25 – Máquina universal de ensaio Mecânico (EMIC modelo DL-20000).

3.1.3 Curva de engenharia e curva escoamento

Com o foco de verificar o comportamento do aço em estudo sobre ação da força de tração, bem como, caracterizar o material para coletar a tensão de escoamento (σ_{esc}) e a tensão máxima (R_m) foram possíveis através dos dados gerados pelo software Tesc® Emic durante o ensaio de tração.

Mediante aos dados extraídos, foi possível definir a curva de engenharia ($\sigma \times \varepsilon$), onde a tensão de engenharia (σ) é obtida pela equação 14, sendo a força (F) dividida pela área da seção transversal do CP (A_0) que será computada no eixo x. Para o eixo y, equivalente a deformação relativa (ε) por meio da variação absoluta do alongamento (Δl) dividido pelo comprimento inicial (l_0) visto na equação 15.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Eq. 14}$$

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Eq. 15}$$

Da mesma forma, foi possível construir a curva de escoamento do material ($kf \times \varphi$). Onde a tensão de escoamento (kf) é calculada pela divisão da força (F) pela área instantânea do CP (A_i) e a deformação verdadeira (φ) obtida por pela equação 17.

$$kf = \frac{F}{A_i} \quad \text{Eq. 16}$$

$$\varphi = \ln \left(\frac{l_1}{l_0} \right) \quad \text{Eq. 17}$$

Dado que, a área instantânea pode ser encontrada através da lei da constância do volume, igualando o estado inicial para o instantâneo isolando a área inicial vista pela equação 18.

$$V_f = V_i \gg A_i \cdot l_1 = A_0 \cdot l_0 \gg A_i = \frac{A_0 \cdot l_0}{l_1} \quad \text{Eq. 18}$$

3.2 DOBRAMENTO EM L NA FERRAMENTA

Para avaliar o dobramento em L nos sentidos de laminação de 0° e 90° foram fabricados corpos de prova que possuem 2 abas para serem dobradas, como pode

ser visto na Figura 26. Neste intuito, foi confeccionado uma ferramenta que permite realizar o dobramento das duas abas em um único golpe (Figura 27).

Para o processo de dobramento foram utilizados dois punções, o modelo apresentado na Figura 28a trata-se do punção com a face lisa, a Figura 28b é o referente ao punção com ressalto de 1,2 mm de largura e 0,25 mm de altura. Conforme Dieter (1981), que em casos de materiais dúcteis o raio mínimo pode ser nulo, diante disto o raio adotado para a dobra foi de 0,5 mm em ambos os punções.

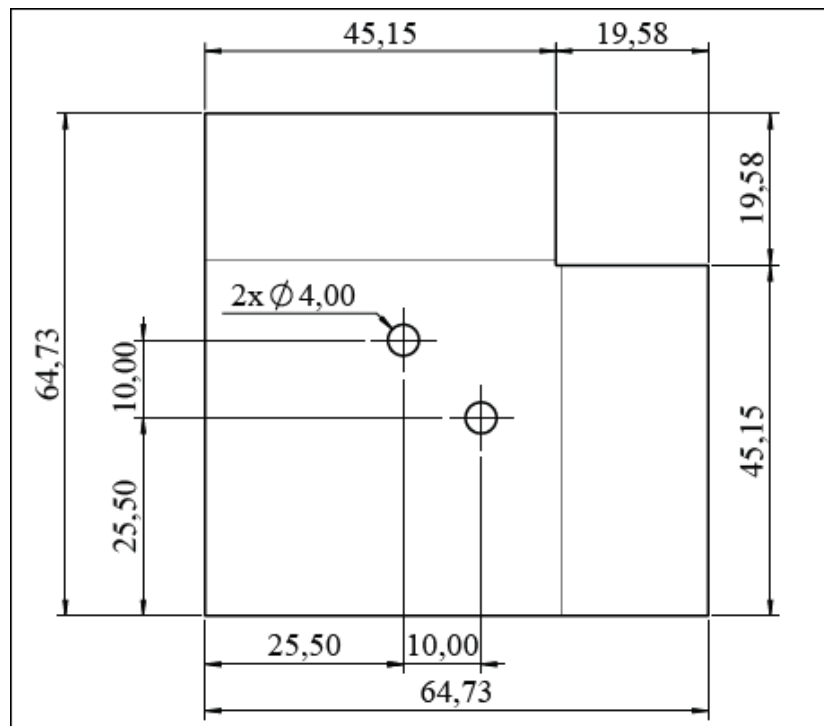


Figura 26 – Detalhamento do corpo de prova.

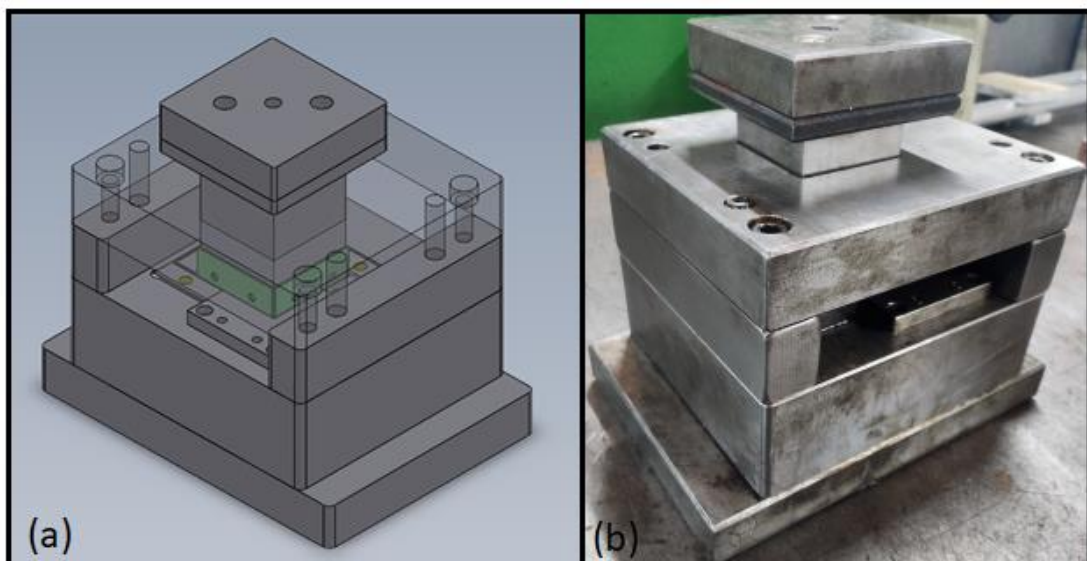


Figura 27 – Ferramenta de dobra, (a) modelagem 3D (b) ferramental fabricado.

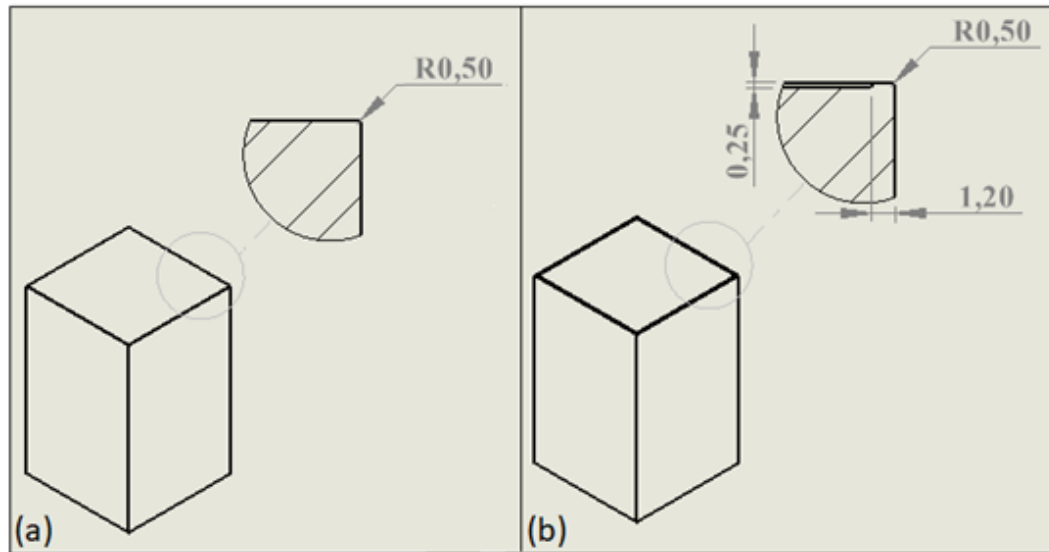


Figura 28 – Detalhamento do punção de dobra, (a) punção reto (b) punção com ressalto.

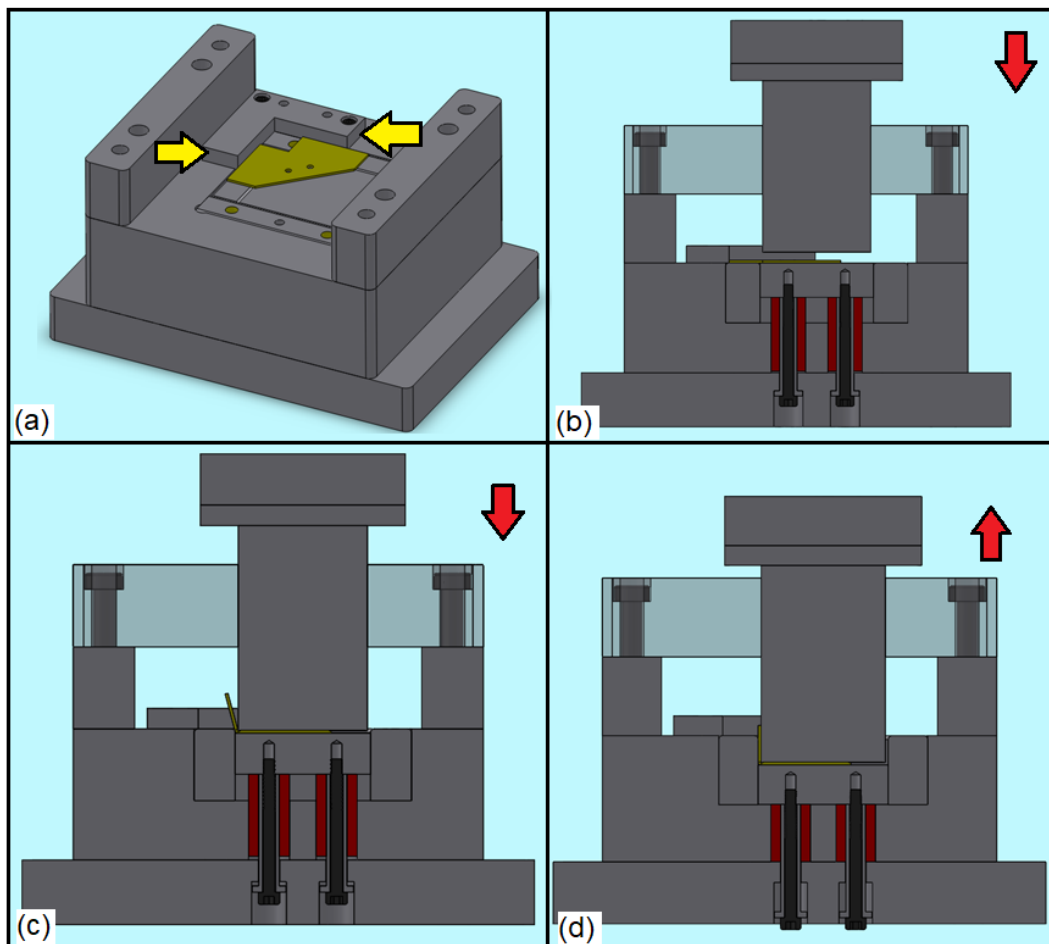


Figura 29 – Representação esquemática do procedimento de dobramento dos CP's no ferramental (flexas em amarelo representam o posicionamento do CP, em vermelho o sentido da atuação do punção).

Os ensaios foram praticados em uma prensa hidráulica de 40 toneladas, inicialmente o ferramental foi instalado na prensa e posteriormente iniciou-se o experimento com o posicionamento do corpo de prova na base da ferramenta guiado pelo limitador (Figura 29a), em seguida foi acionado o martelo da prensa para iniciar o dobramento (Figura 29b), a chapa inicia o processo de dobramento (Figura 29c) até o martelo da prensa finalizar o seu ciclo (Figura 29d), logo depois ao finalizar o ciclo foi removido o corpo de prova e iniciado novamente o procedimento. O teste se repeliu 5 vezes para cada punção conforme mencionados na Figura 28.

3.3 DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NO DOBRAMENTO EM L

Para averiguar a deformação externa no processo de dobramento os corpos de prova, foram gravados uma malha circular em sua superfície (Figura 31), cada círculo possui um diâmetro inicial de 2,5 mm. O método de gravação ocorreu através de processo eletrolítico seguido do processo de limpeza CP's, em seguida os mesmos foram posicionados sobre uma chapa (Figura 30a), na qual passará a corrente negativa gerada pela fonte de energia, posteriormente é sobreposto a tela de geometria circular na companhia de um feltro com a solução de eletrólito (Figura 30b), a seguir ligou-se o gerador passando a base ligada ao polo gerador sobre o CP originando o ataque químico, por fim aplicou-se a solução neutralizadora para interromper o ataque químico (Figura 30c).

Conforme Schaeffer *et al.* (2017), a deformação verdadeira (φ) pode ser mensurada com a medição da variação dimensional das grades impressas em um componente, como por exemplo a gravação circular dado que, após receber ação do dobramento trona-se uma elipse. Portanto, foi utilizado uma régua flexível impressa em escala correspondente a gravação realizada nos CP's (Figura 32a), a mesma possibilita coletar dados da deformação relativa (ε) em porcentagem (%) e o próprio valor da deformação verdadeira (φ) sendo radial ou tangencial. Portanto, a régua possibilitou a medição dos CP's na fibra externa da dobra tracionada destacada na Figura 32b.

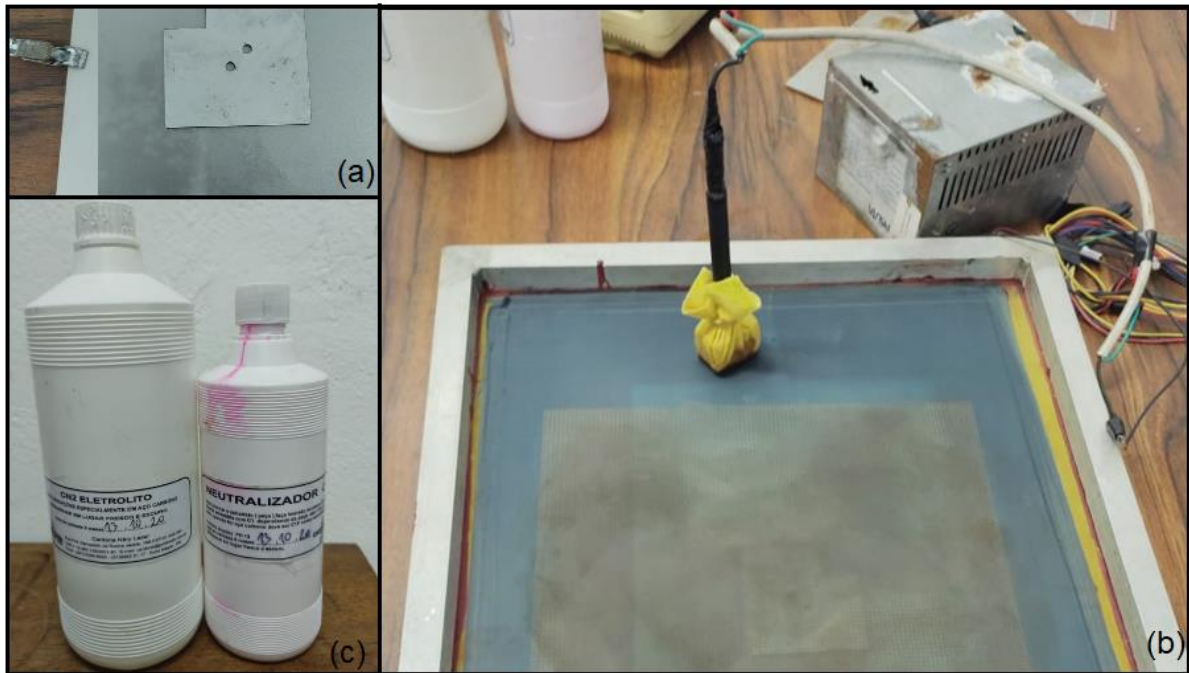


Figura 30 – Processo de gravação eletrolítica.

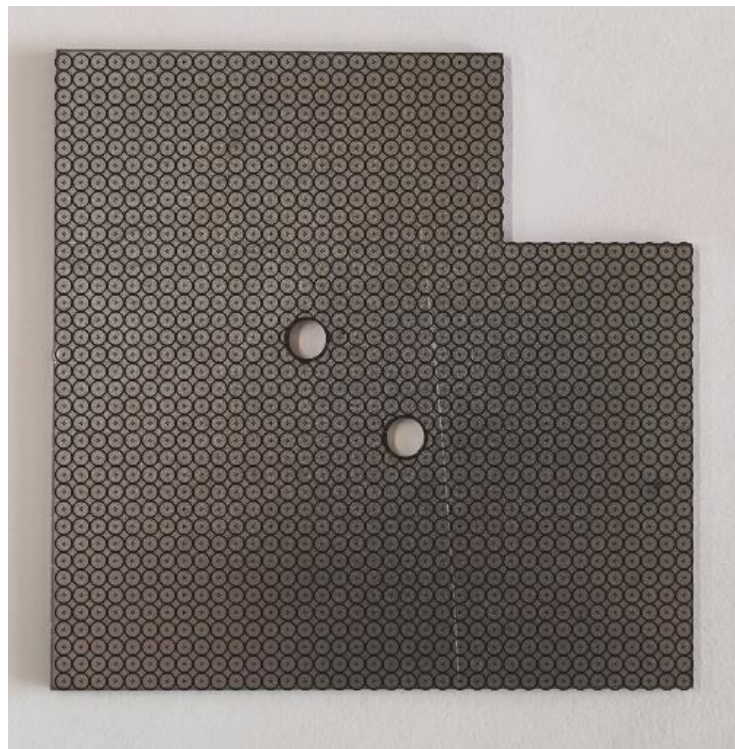


Figura 31 – Corpo de prova com marcação circular.

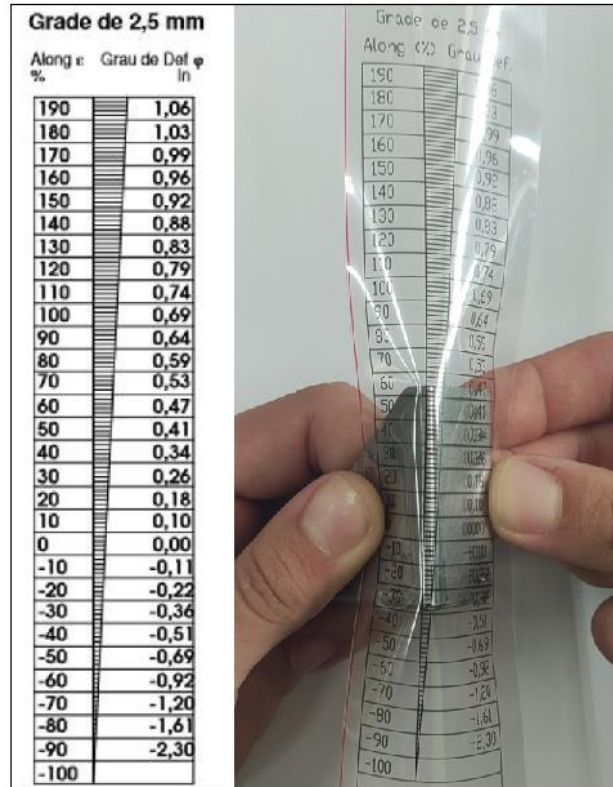


Figura 32 – Medição da deformação com grade flexível.

3.4 DETERMINAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO

Para cada corpo de prova dobrado foi medido com o projetor de perfil da marca Mitutoyo modelo PJ-A3000 (Figura 33). O modelo realiza a leitura em graus e minutos, no qual os dados coletados foram convertidos em graus decimais. O fator do retorno elástico (K) foi calculado pela equação 11 com os dados coletados do ângulo de dobra inicial (α_0) e final (α_1).

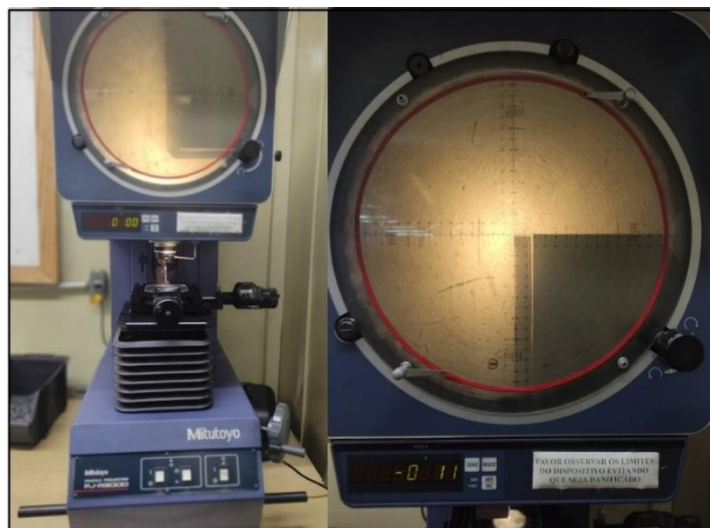


Figura 33 – Projetor de perfil para avaliação do ângulo pós dobramento.

3.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Para avaliar a microestrutura dos corpos de prova após o processo de dobramento utilizou método da norma ABNT NBR 13284 (1995). O processo iniciou com o corte dos corpos de prova através da eletroerosão a fio. A Tabela 6 exibe a divisão dos cortes após o processo de dobramento. A separação foi feita em 4 grupos, cada grupo corresponde ao método de dobramento e o sentido de laminação.

Tabela 6 – Seleção de grupos para metalografia.

Processo de Dobramento em L	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
	Punção reto	Punção reto	Punção com ressalto	Punção com ressalto
Sentido da laminação	0°	90°	0°	90°
Qt de cortes	2	2	2	2

Em seguida foi realizado o processo de embutimento a quente com resina fenólica, também conhecida como baquelite. O processo fora realizado na embutidora modelo EM-400 do fornecedor Teclago. A Figura 34 apresenta os corpos de prova embutidos segmentados em grupos.

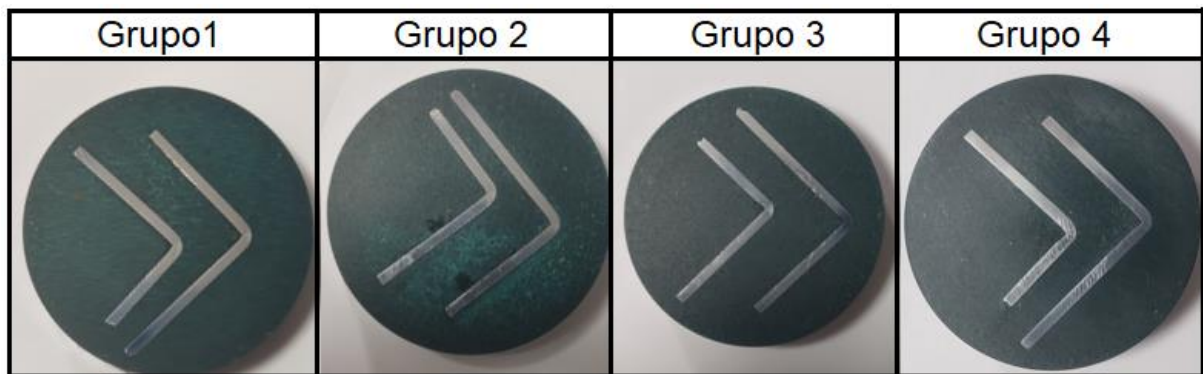


Figura 34 – Corpos de prova embutidos.

Seguidamente iniciou o processo de lixamento para garantir uma superfície lisa e plana sem quaisquer deformações. Para as etapas de lixamento fora empregadas lixas de diferentes granulometrias, sendo: #400, #600 #1200 e #2000. A cada transição de lixa rotacionou-se a direção em 90° até ocultar os traços anteriores produzidos pelas lixas anteriores. Ao finalizar o processo de lixamento as amostras foram limpas com álcool elítico e iniciado o processo de polimento, utilizando uma politriz para uma rotação de 250 por minuto com abrasivo pasta diamantada de 6 μ m e álcool como lubrificante. Conforme Colpaert (2008), o polimento possui a finalidade

de remover todos os riscos oriundo do processo anterior, permitindo o a visualização perfeita no microscópio ótico.

Após realizar o polimento, sucedeu-se o ataque químico com 2% de Nital por um período de 25 segundo por imersão. O ataque proporciona a revelação da estrutura dos grãos (DOS SANTOS, 2015). As amostras foram avaliadas e coletadas imagens através do microscópio ótico Marca Olympus, modelo GX51.

3.6 MEDIÇÃO DA LINHA NEUTRA DA DOBRA

Logo depois do procedimento de metalografia e coleta das imagens de cada processo de dobramento, permitiu-se fazer a medição da linha neutra através do *software* CAD SolidWorks®. As imagens foram inseridas através do comando inserir imagem, em seguida foi ajustado a mesma para a escala real usando a medida conhecida da espessura da chapa e conferido a referência de escala indicativa que o microscópio sobrescreve na imagem fotografada. Desta maneira, foi criado esboço gerando as circunferências a partir da imagem, o que permitiu coletar a distância y , sendo a amplitude do raio linha neutra (LN) até o raio externo (r_e) da dobra da chapa.

4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO PROCESSO DE DOBRAMENTO

Foi elaborado um modelo numérico computacional para simular a ação do processo de dobramento (Anexo C). As duas simulações foram realizadas nas dependências da UFRGS com o *software* Simufact Forming® representado pela empresa Hexagon | MSC. Os procedimentos da simulação foram embasados na disciplina métodos especiais de cálculos em conformação mecânica, onde foram adquiridos conhecimentos durante as aulas e tendo como suporte a equipe MSC.

Criou-se o modelo sólido dos aços principais, que terão contato com a chapa dobrada no ferramental, por meio do software CAD SolidWorks® com o foco de evitar a geração de malha desnecessária que não esteja relacionada a estampagem do estudo. Posteriormente para a simulação, iniciou a etapa de pré-processamento, onde é feito a exportação dos sólidos no formato .Stl para o Simufact Forming® (Figura 35).

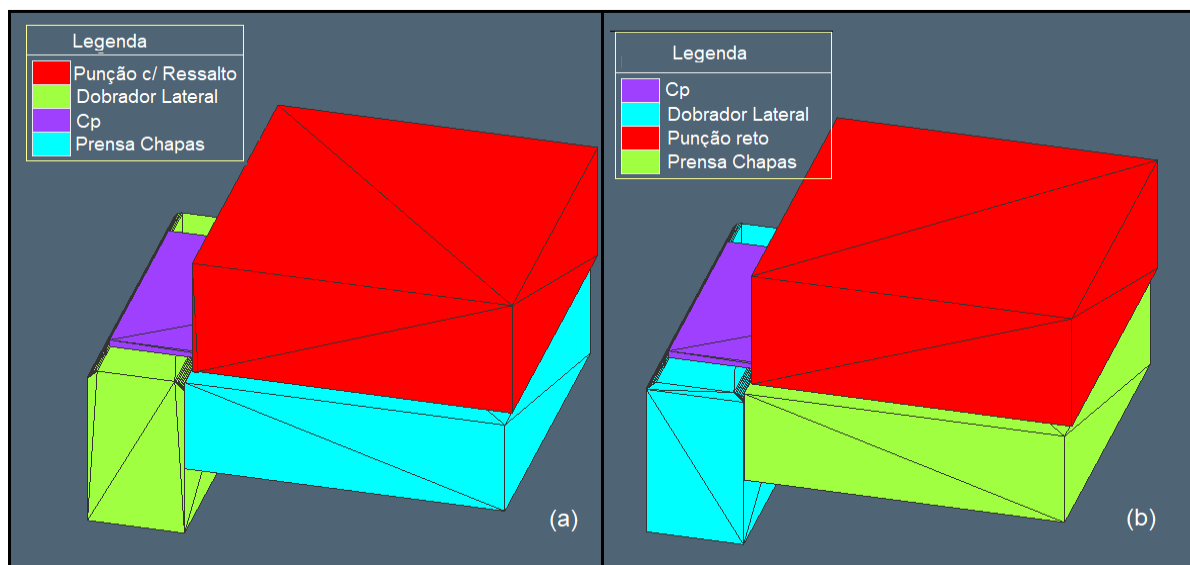


Figura 35 – Modelos importados no Simufact Forming® (a) simulação com punção com ressalto (b) simulação com punção reto.

Depois da exportação, deu-se início da definição dos parâmetros utilizados para a simulação (Tabela 7), realizando a configuração da prensa hidráulica com 40 toneladas, adição dos materiais, temperatura de trabalho, a delimitação dos movimentos da simulação, a configuração do tamanho da malha. Ademais, para obter fidelidade na simulação foi criado o material SAE 1006 no banco de dados do *software*, considerando um material isotrópico com o módulo de Young, $E = 210 \text{ GPa}$ e o comportamento da curva de escoamento pela equação de Holloman $k f_{m\u00e9dio} =$

$525.\varphi^{0,2}$, sendo a média dos três sentidos de laminação dos dados obtidos na caracterização do material realizado neste presente trabalho e a utilização do coeficiente de atrito 0.1, em vista que trata-se de uma conformação a frio sustentado por Groover (2010).

Tabela 7 – Parâmetros das simulações numéricas computacionais para o processo de dobramento.

Análises	Dados de entrada
Tamanho de elementos	0,18 [Tipo QUAD]
Número de elementos	2.854
Material do CP's	Aço baixo carbono SAE 1006
Material dos ferramentais	AISI D2
Velocidade da prensa hidráulica	20 mm/s
Temperatura de trabalho da peça	20° C
Temperatura de trabalho da ferramenta	20° C
Módulo de Young	210 GPa
Curva de escoamento	$kf_{m\u00e9dio} = 522.\varphi^{0,2}$
Coefficiente de atrito	0.1 [-]
Espessura da chapa s_0	1,5 mm

Uma vez concluído a parametrização dos dados inicia-se a simulação para geração dos dados de pós-processamento. Podendo ser coletada a variação do ângulo de dobra e as deformações presente no processo.

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL E TEÓRICA

5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL E QUÍMICAS

5.1.1 Curva de engenharia

Para a geração da curva de engenharia foram utilizados os dados coletados da força e o deslocamento do CP pelo *software* Tesc® Emic durante o ensaio de tração. Através dos dados foi calculado a tensão de engenharia (σ) e a deformação relativa (ϵ) utilizando as equações 14 e 15 para posteriormente elaborar a plotagem da curva de engenharia. A Figura 36 apresenta a curva de engenharia ($\sigma \times \epsilon$) para o aço SAE 1006 nos três sentidos de laminação (0° , 45° e 90°).

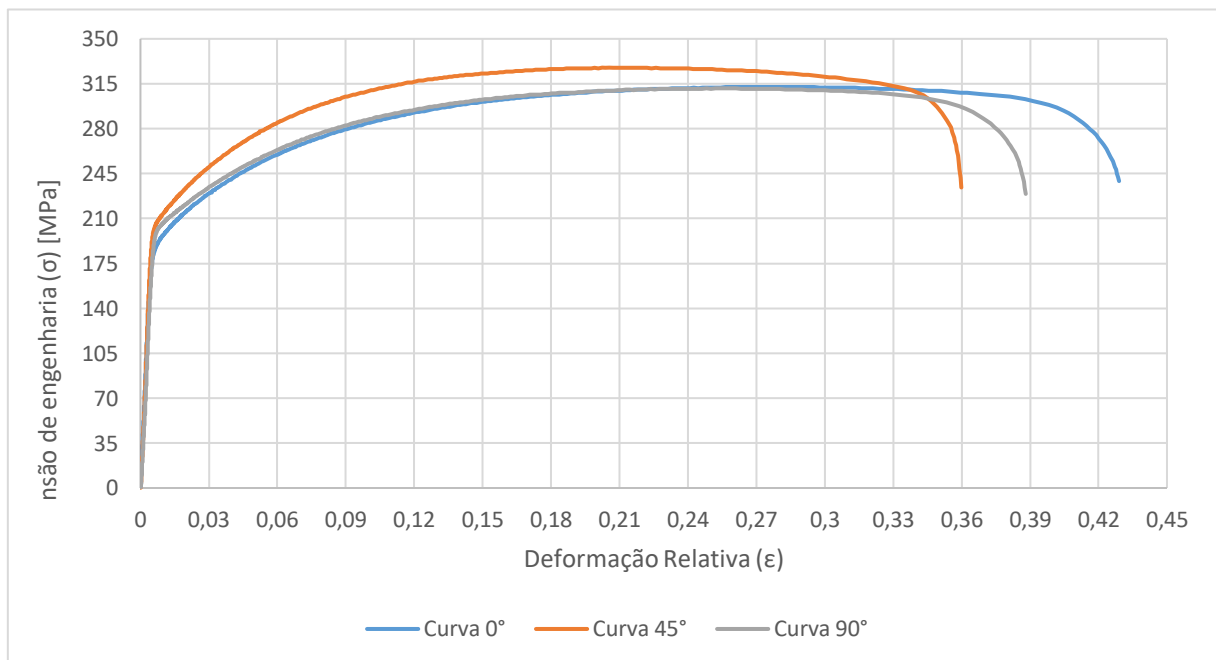


Figura 36 – Curva tensão x deformação SAE 1006 para os sentidos de laminação 0° , 45° e 90° .

Nos ensaios identificou-se que a posição do escoamento na curva de engenharia não estava visível, neste cenário foi adotado o procedimento da norma ASTM E8/E8M-21 (2021), que consiste localizar a tensão de escoamento através de proporcionalidade, traçando uma reta paralela no regime elástico até a mesma cruzar a curva de engenharia, para efetuar a leitura da tensão no eixo y do gráfico. Para o deslocamento desta reta foi adotado 0,2% sendo o valor indicado para metais e ligas

em gerais, no que se refere a deformação relativa (ϵ) de 0,002 [-]. A Figura 37 exibe o procedimento descrito para adquirir os valores da tensão de escoamento.

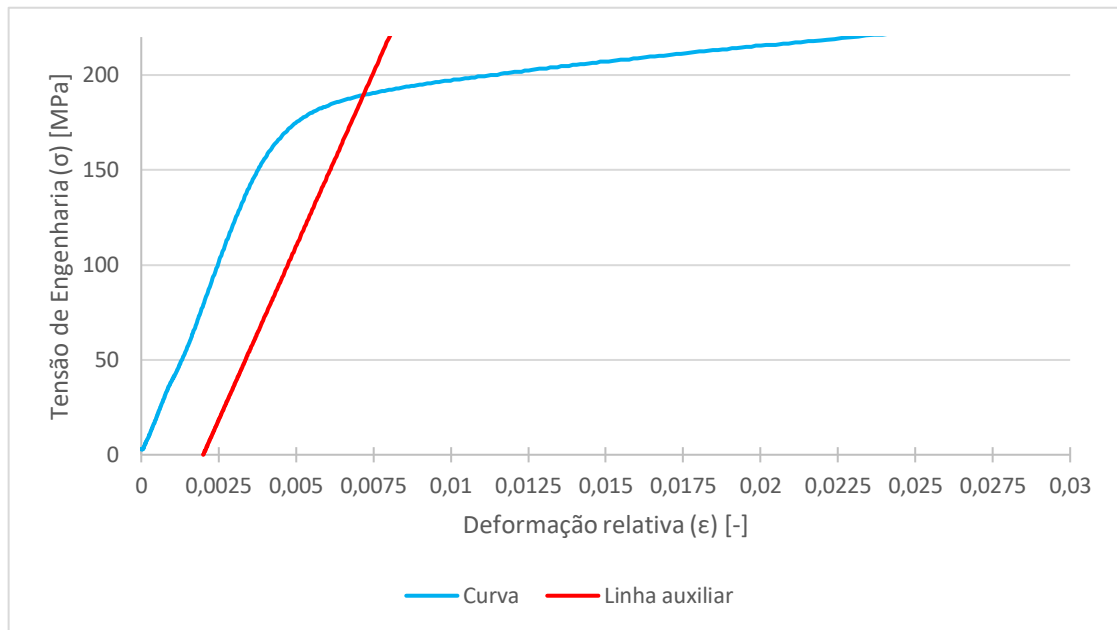


Figura 37 – Procedimento para determinar tensão de escoamento.

A Tabela 8 apresenta os valores encontrados para a tensão de escoamento (σ_{esc}), tensão máxima (R_m) e o alongamento máximo (δ) em porcentagem das 5 amostras ensaiadas nos três sentidos de laminação da chapa. Ademais, foi calculado a média e o desvio padrão de medição, onde os valores da tensão máxima, alongamento e tensão de escoamento do sentido de laminação 0° são respectivamente $311 \pm 3,7$ (MPa), $35 \pm 0,5$ (%) e $186 \pm 3,9$ (MPa), para 45° foram $327 \pm 0,6$ (MPa), $32 \pm 3,5$ (%) e $203 \pm 5,7$ (MPa) e para 90° alcançaram $310 \pm 0,9$ (MPa), $35 \pm 2,6$ (%) e 198 ± 5 (MPa).

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do aço SAE 1006.

	Tensão Máxima (R_m) [MPa]	Along. (δ) [%]	Tensão de Escoamento (σ_{esc}) [MPa]	Tensão Máxima (R_m) [MPa]	Along. (δ) [%]	Tensão de Escoamento (σ_{esc}) [MPa]	Tensão Máxima (R_m) [MPa]	Along. (δ) [%]	Tensão de Escoamento (σ_{esc}) [MPa]
	Sentido Laminação 0°			Sentido Laminação 45°			Sentido Laminação 90°		
Amostra 1	312,50	35,4	189,31	326,93	30,1	204,81	311,42	32,2	200,50
Amostra 2	310,56	35,2	185,86	327,14	32,2	204,60	310,77	35,8	198,57
Amostra 3	313,79	34,8	187,15	327,79	32,3	203,52	310,34	33,4	194,26
Amostra 4	311,20	35,4	184,35	327,57	30,2	204,81	310,34	34,2	196,84
Amostra 5	308,62	35,4	184,57	327,57	34,6	197,92	311,20	33,3	200,29
Média	311,33	35,2	186,25	327,40	31,9	203,13	310,81	34,8	198,09
Desvio	3,77	0,5	3,94	0,68	3,5	5,70	0,95	2,6	5,01

5.1.2 Curva de escoamento

A curva de escoamento expressa o comportamento que o material sofre no estado da tensão de escoamento (σ_{esc}) até a tensão máxima (R_m), ou seja, durante a sua deformação plástica (NUTOR *et al.* 2017). Diante disto, calculou-se a tensão de escoamento (kf) x a deformação verdadeira (φ), tornando-se possível a plotagem do gráfico. Após a plotagem das curvas de escoamento, aplicou-se a linha de tendência através do *software* Excel para obter os valores conforme a equação de Hollomon-Ludwing ($kf = C \cdot \varphi^n$), os quais estão sendo apontados na Figura 38, correspondente a cada sentido de laminação. Onde n é o índice de encruamento, φ a deformação e C corresponde ao coeficiente de resistência (GROOVER, 2010; SCHAEFFER, 2016).

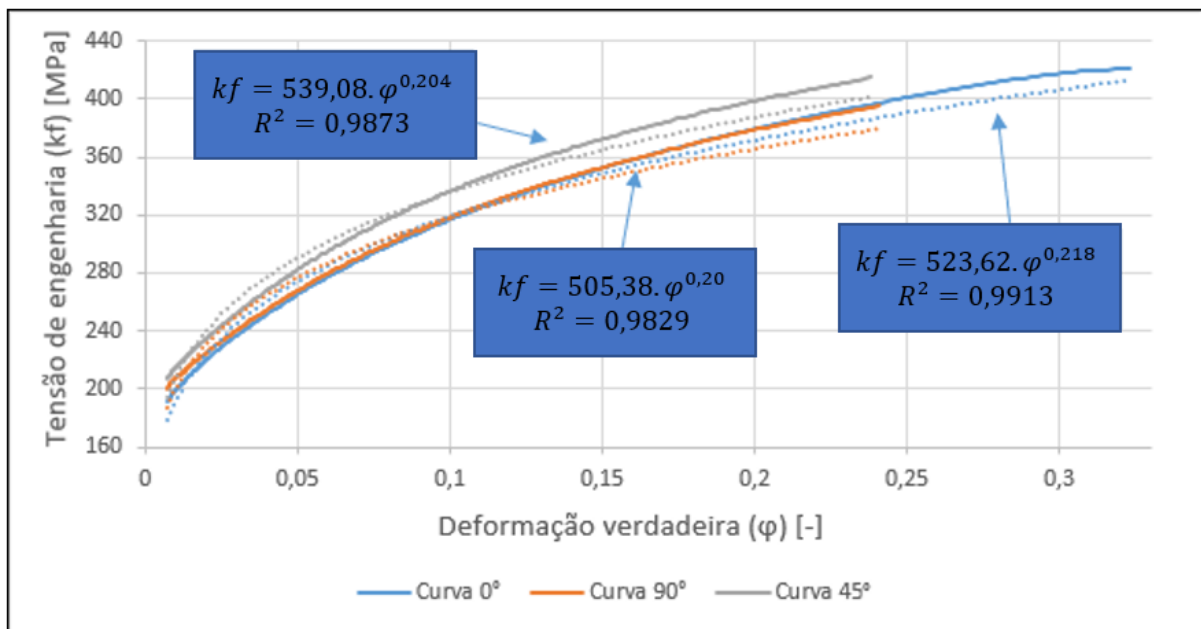


Figura 38 – Curva de escoamento do SAE 1006.

Os valores do comportamento plástico no material de cada ensaio estão apurados na Tabela 9. Nota-se que a curva de escoamento foi elaborada individualmente para cada amostra. A fim de, obter a média dos valores dos coeficientes de resistência e os índices de encurtamento.

Tabela 9 – Valores das equações de Hollomon-Ludwing gerados pela curva de escoamento.

	Coeficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]	Coeficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]	Coeficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]
	Sentido Laminação 0°		Sentido Laminação 45°		Sentido Laminação 90°	
Amostra 1	529,74	0,220	540,88	0,207	505,73	0,199
Amostra 2	518,95	0,216	539,18	0,204	504,91	0,200
Amostra 3	525,94	0,215	535,55	0,202	506,75	0,203
Amostra 4	520,93	0,217	543,94	0,203	506,13	0,202
Amostra 5	522,56	0,222	535,87	0,206	503,38	0,198
Média	523,62	0,218	539,08	0,204	505,38	0,200
Desvio	8,22	0,006	6,78	0,004	2,51	0,004

5.1.3 Análise química

Na Tabela 10 está sendo apresenta os resultados extraídos pela análise química do SAE 1006, bem como, os valores especificados pelo fornecedor AcelorMittal e pelos estudos de Becker *et al.* (2018).

Tabela 10 – Comparativo composição química aço SAE 1006 em percentual de massa.

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]	Cu [%]	Nb [%]
NBR 5007 - EM	<0,12	-	<0,6	<0,03	<0,03	-	-	-	<0,01	-	-
AcelorMittal	0,0233	0,013	0,221	0,01	0,0105	0,0018	0,001	0,006	0,031	0,012	0,0001
Becker (2018)	0,053			0,022	0,184	0,06					
Medição	0,0281	0,011	0,2	0,0107	0,0129	0,001	0,005	0,005	0,0453	0,01	0,001

5.1.4 Análise metalográfica

De acordo com Callister (2012), o contraste apresentado em uma imagem capturada pelo microscópio, provém da desigualdade na refletividade que ocorre na superfície da microestrutura. A Figura 39 até Figura 46 apresentam a microestrutura do aço SAE 1006, como pode ser observado há predominância da fase de ferrita, em conformidade com Cavalcante *et al.* (2009) e Freitas *et al.* (2010)

Para a Figura 39, Figura 41, Figura 43 e Figura 45 apresentam uma ampliação de 50x gerando a ênfase no ponto local do dobramento, para as figuras mencionadas exibem destaques de ampliações de 200x das extremidades do dobramento, no qual destaca claramente ao lado externo da dobra os grãos tracionados e para o lado

interno os grãos comprimidos, efeito que se repeliu nos estudo de WANG *et al.*, (2013). Conforme Ahn (2020), deformações plásticas em chapa geram um comportamento de deformação assimétrico, onde o movimento da linha neutra depende das taxas de compressão e tração, normalmente a LN move-se para direção interna, mas em alguns casos em que as condições das deformações efetivas não são iguais ocasiona o movimento da LN para o lado externo da superfície da chapa. Os resultados encontrados nas medições da linha neutra pelas avaliações das deformações dos grãos estão sendo ilustrados na Figura 40, Figura 42, Figura 44 e Figura 46.

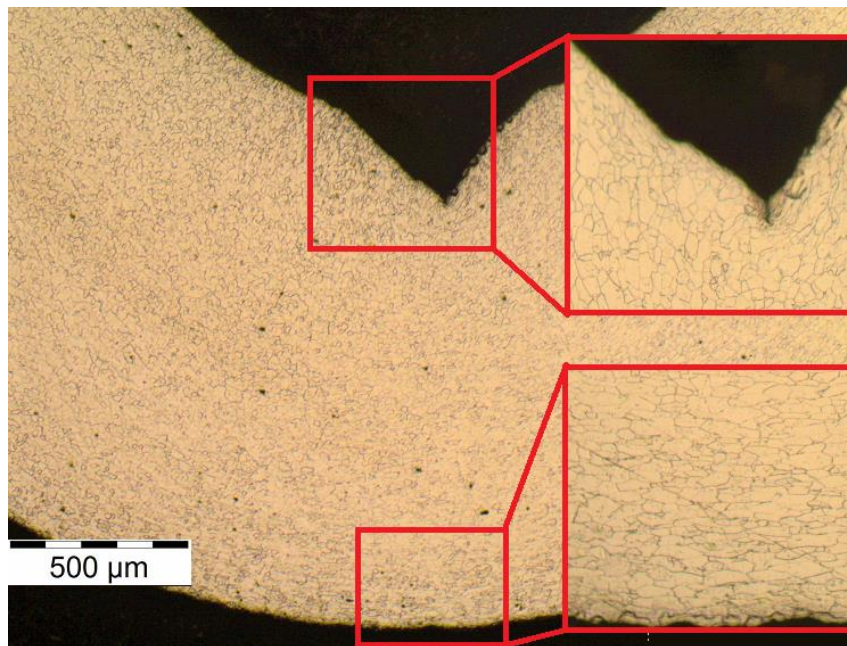


Figura 39 – Metalografia 50X pós dobramento CP Grupo 1.

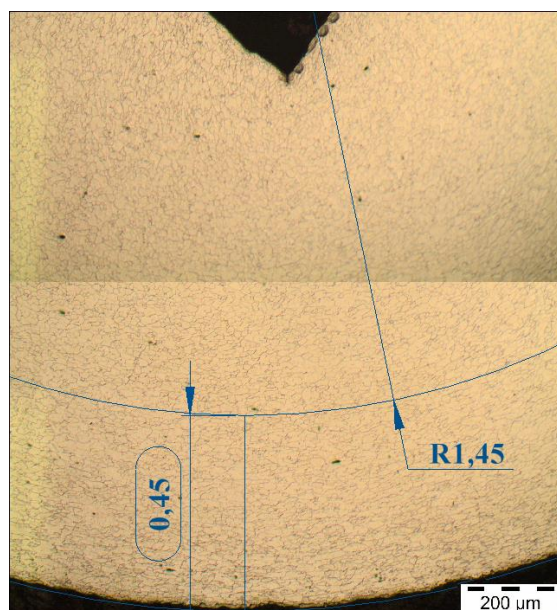


Figura 40 – Medição da linha neutra com *software* Solidworks pós dobramento CP Grupo 1 ampliação 200x.

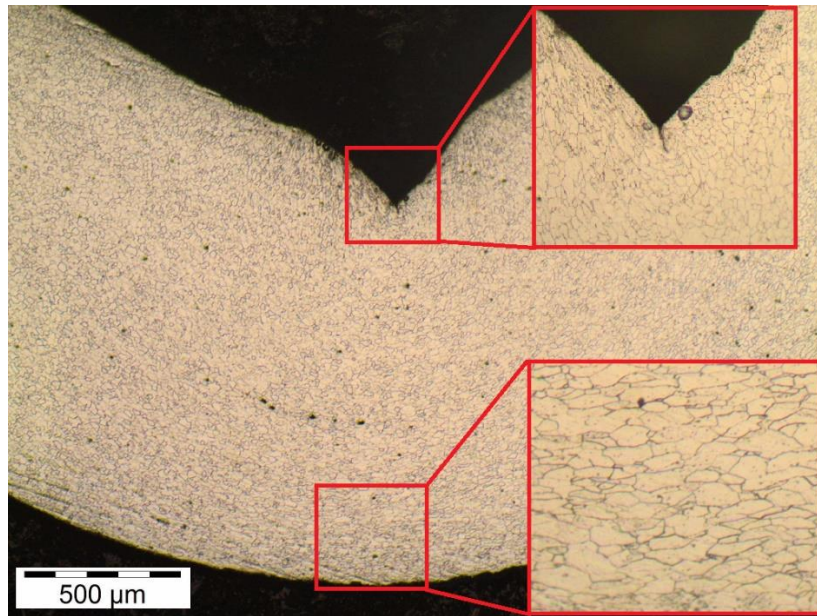


Figura 41 – Metalografia 50X pós dobramento CP Grupo 2.

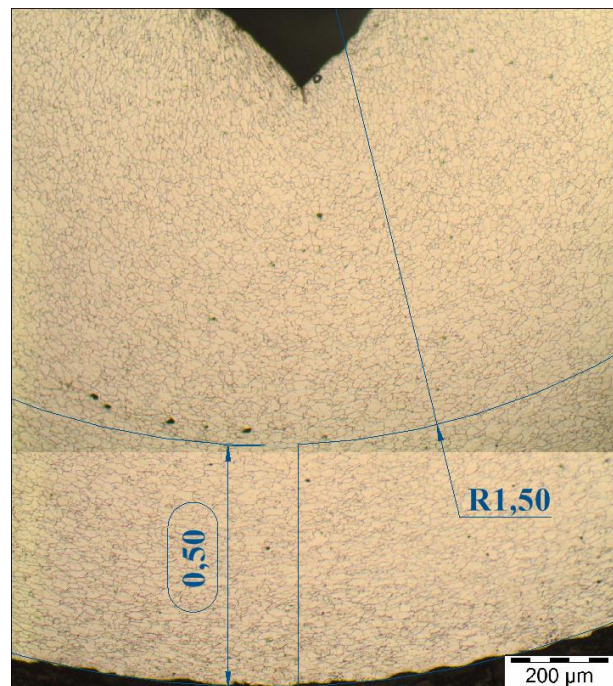


Figura 42 – Medição da linha neutra com *software* Solidworks pós dobramento CP Grupo 2 ampliação 200x.

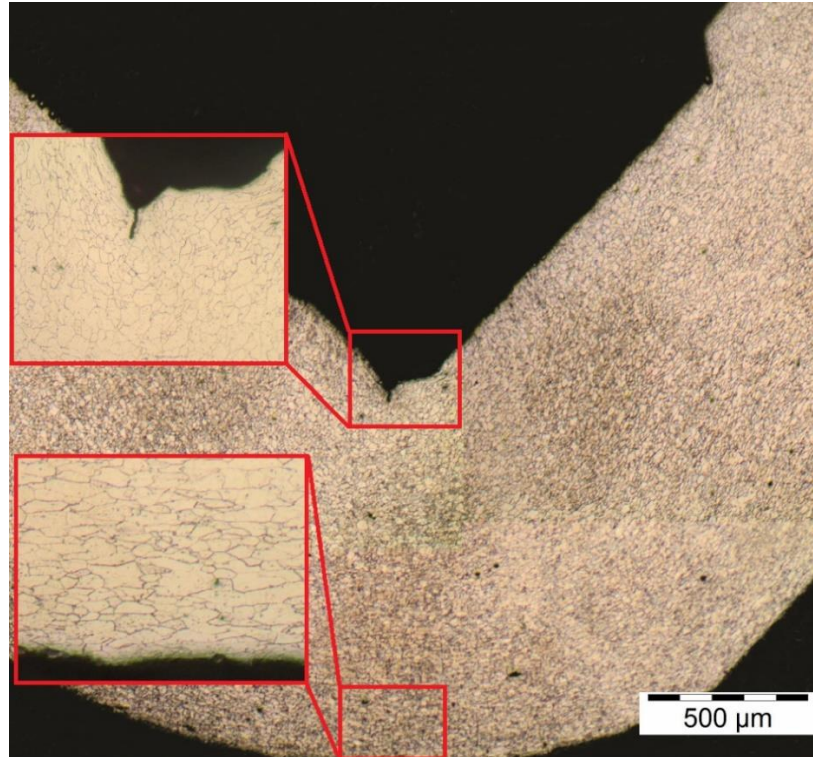


Figura 43 – Metalografia 50X pós dobramento CP Grupo 3.

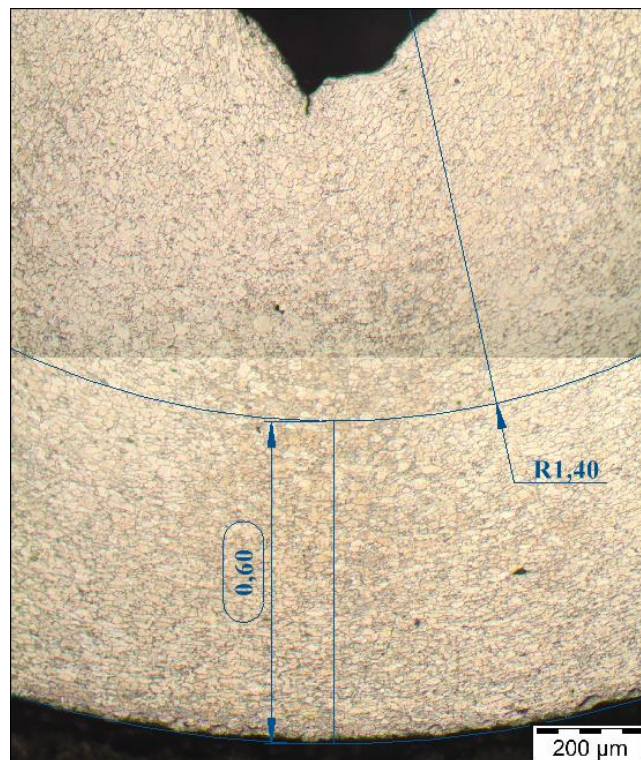


Figura 44 – Medição da linha neutra com *software* Solidworks pós dobramento CP Grupo 3 ampliação 200x.

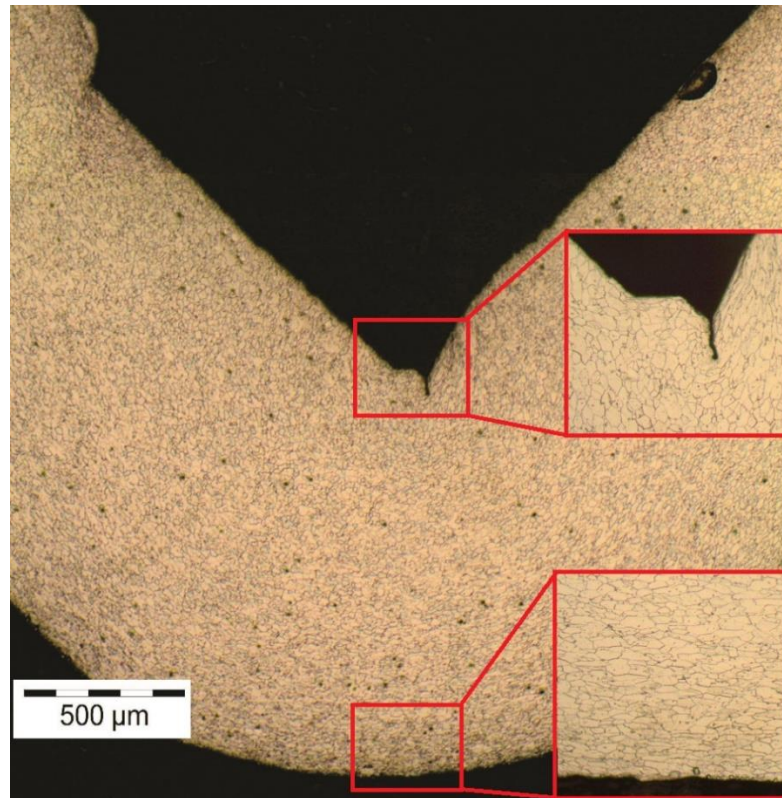


Figura 45 – Metalografia 50X pós dobramento CP Grupo 4.

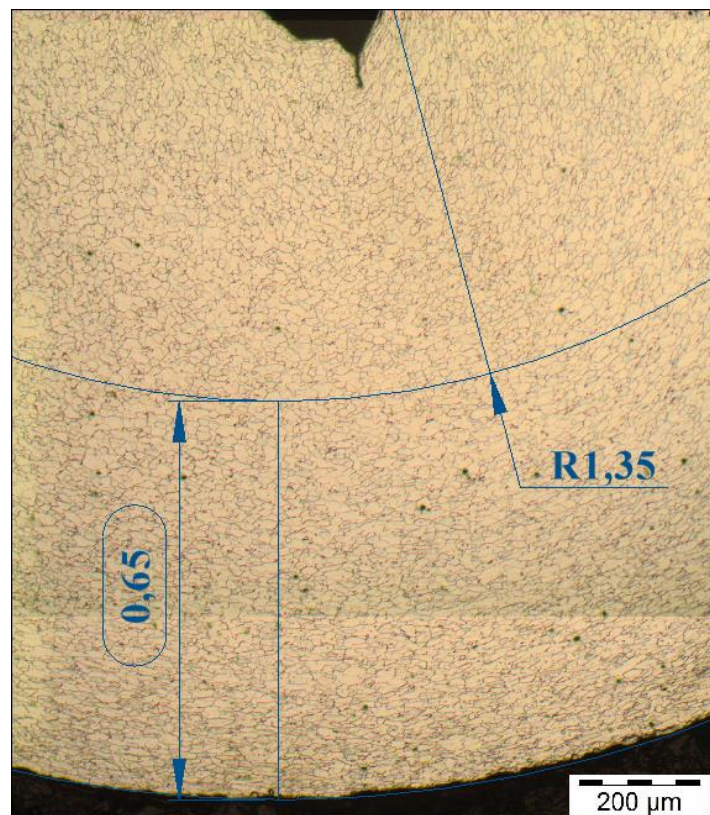


Figura 46 – Medição da linha neutra com *software* Solidworks pós dobramento CP Grupo 4 ampliação 200x.

5.2 ENSAIO DO DOBRAMENTO

Para a execução do ensaio do dobramento iniciou os testes na prensa com o punção reto (Figura 28a) e posteriormente substituiu-se para o punção com ressalto (Figura 28b). Durante o ensaio manteve-se os mesmos parâmetros de regulação na prensa antes e após a troca do punção de dobra.

5.2.1 Medição da deformação no processo de dobramento

Após o ensaio de dobramento realizou-se a medição da deformação relativa e verdadeira conforme ilustrado na Figura 32. No qual, os valores elencados na Tabela 11 tratam-se dos valores encontrados para cada CP que passou pelo processo de dobramento e na Tabela 12 os valores médios para cada grupo de ensaio.

Tabela 11 – Resultados das deformações medidas no lado da fibra externa do dobramento para cada CP.

CP	Grupo 1 Punção reto Laminação 0°		Grupo 2 Punção reto Laminação 90°		Grupo 3 Punção c/ ressalto Laminação 0°		Grupo 4 Punção c/ ressalto Laminação 90°	
	ε [%]	φ_{ext} [-]	ε [%]	φ_{ext} [-]	ε [%]	φ_{ext} [-]	ε [%]	φ_{ext} [-]
1	20	0,18	26	0,23	40	0,34	40	0,40
2	18	0,16	24	0,21	42	0,35	44	0,37
3	20	0,18	30	0,27	38	0,32	48	0,37
4	22	0,20	40	0,34	40	0,34	48	0,40
5	20	0,18	30	0,27	42	0,35	44	0,37

Tabela 12 – Resultados das deformações médias medidas no lado da fibra externa do dobramento.

Grupo de ensaio	Tipo de Punção	Sentido da laminação [°]	Deformação Relativa ε [%]	Deformação Verdadeira φ_{ext} [-]
Grupo 1	reto	0	20	0,18
Grupo 2	reto	90	30	0,26
Grupo 3	com ressalto	0	40	0,34
Grupo 4	com ressalto	90	45	0,38

A deformação relativa (ε) foi calculada com a utilização da equação 3, que realiza uma avaliação considerando variação das fibras dobradas na deformação na região comprimida e tracionada no processo de dobramento. A deformação relativa (ε) também foi investigada pela equação 4, em que $r = r_m + y$ uma vez que considera

simetria na deformação dado que $y = \frac{s_0}{2}$. Os resultados encontrados em ambas equações estão dispostos na Tabela 13.

$$\varepsilon = \frac{y}{r_m} \cdot (100 \%) \quad \text{Eq. 3}$$

$$\varepsilon = \frac{s_0}{2} \cdot \frac{1}{r} \cdot (100 \%) \quad \text{Eq. 4}$$

Tabela 13 – Resultados calculados da deformação relativa (ε).

Grupo de ensaio	Tipo de Punção	Sentido da laminação [°]	Valor medido y [mm]	Raio médio da linha neutra (r_m) [mm]	Deformação Relativa (ε) [%] Eq.3	Deformação Relativa (ε) [%] Eq.4
Grupo 1	reto	0	0,45	1,55	29	37,5
Grupo 2	reto	90	0,5	1,5	33	37,5
Grupo 3	com ressalto	0	0,6	1,40	43	37,5
Grupo 4	com ressalto	90	0,65	1,35	48	37,5

A deformação verdadeira (φ) foi calculada por três métodos, pela equação 5 conforme Schaeffer (2016), equação 6 de acordo com Fress (2017), onde se considerou r_i como o raio do punção (r_p) e pela equação 7 conforme Lange (1990). A Tabela 14 evidência os resultados teóricos calculados.

$$\varphi_{ext} = \ln \left(1 + \frac{y}{r_m} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

$$\varphi_{ext} = \ln \left(1 + \frac{s_0}{2r_i + s_0} \right) = \ln \left(1 + \frac{s_0}{2r_p + s_0} \right) \quad \text{Eq. 6}$$

$$\varphi_{ext} = \ln \sqrt{1 + \frac{s_0}{r_p}} \quad \text{Eq. 7}$$

Tabela 14 – Resultados calculados da deformação verdadeira (φ).

Grupo de ensaio	Tipo de Punção	Deformação Verdadeira (φ_{ext}) [-]		
		Conforme Schaeffer, 2016 Eq.5	Conforme Fress, 2017 Eq.6	Conforme Lange, 1990 Eq.7
Grupo 1	reto	0,25	0,47	0,69
Grupo 2	reto	0,29	0,47	0,69
Grupo 3	com ressalto	0,36	0,47	0,69
Grupo 4	com ressalto	0,39	0,47	0,69

5.2.2 Retorno elástico

O ângulo final (α_1) foi medido após o ensaio através do projetor de perfil, a Tabela 15 dispõem os dados das medições avaliadas para o dobramento referente ao sentido da laminação de 0° com o punção reto e para o punção com o ressalto, já a Tabela 16 exhibe os dados para o sentido de laminação a 90° . Ambas tabelas mencionadas apresentam o cálculo aritmético da média e o desvio padrão.

Tabela 15 – Medição do ângulo de dobramento no sentido de laminação 0° .

CP	Punção reto [°]	Punção c/ Vinco [°]
1	89,26	89,10
2	89,08	89,5
3	88,08	89,38
4	89,25	89,55
5	88,78	89,43
Média	88,89	89,39
Desvio padrão	0,95	0,34

Tabela 16 – Medição do ângulo de dobramento no sentido de laminação 90° .

CP	Punção reto [°]	Punção c/ Vinco [°]
1	89,06	89,81
2	88,9	89,7
3	89,13	89,99
4	89,03	89,75
5	89,05	89,73
Média	89,03	89,80
Desvio padrão	0,16	0,22

A Tabela 17 expressa o resultado do fator de retorno elástico (K) determinado pela equação 11. Os dados para os cálculos são as médias dos valores coletados do ângulo final (α_1) e para o ângulo inicial (α_0) foram medidos durante os ensaios antes da remoção da carga, onde o valor predominou a 90° , esta condição é validada em

função do projeto do ferramental estar com o punção alinhado com o prensa chapas e não haver a folga do dobrador lateral perante a chapa.

Tabela 17 – Resultado da avaliação do fator de retorno elástico [K].

Punção	Sentido de Laminação [°]	Ângulo inicial [°]	Ângulo final [°]	Fator retorno elástico $K = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}$ [-]
Reto	0	90	88,89	0,988
Reto	90	90	89,03	0,989
Com ressalto	0	90	89,39	0,993
Com ressalto	90	90	89,80	0,998

Na Tabela 18 está apresentado o valor teórico do retorno elástico determinado pela equação 12. Para a determinação do mesmo, foi adotado o módulo de elasticidade do aço baixo carbono de $E = 210GPa$ (CALLISTER; RETHWISCH, 2012), a utilização da equação 13 para o cálculo do momento e a equação 10 para encontrar a força de dobramento considerando o fator $K_s = 1,5$ (RODRIGUES; MARTINS, 2005), demais parâmetros dos resultados encontrados estão sendo apresentados na Tabela 19.

Tabela 18 – Valor teórico do retorno elástico com o cálculo da força para o método Rodrigues e Martins.

Sentido de Laminação [°]	Tensão máxima (R_m) [MPa]	Força $FL = \frac{(K_s \cdot R_m \cdot b \cdot s_0^2)}{4(r_p + j + r_{ma})}$ [N]	Momento $M = \frac{F_d \cdot w}{4}$ [N.mm]	Fator Retorno elástico $K = 1 - \frac{12M(r_p + 0,5 \cdot s_0)}{E \cdot b \cdot s_0^3}$ [-]
0	311,33	1.959	9.796	0,9954
90	310,81	1.956	9.780	0,9955

Tabela 19 – Parâmetros utilizados para o cálculo de força (equação 10), momento (equação 13) e fator de retorno elástico (equação 12).

Parâmetro	Dados
Distância entre os apoios (w)	20 mm
Espessura da chapa inicial (s_0)	1,5 mm
Fator de correção (K_s)	1,5 [-]
Folga entre o punção e matriz (j)	0,1 mm
Largura da Chapa (b)	45,5 mm
Módulo de elasticidade (E)	210 GPa
Raio da matriz (r_{ma})	0,5 mm
Raio do punção (r_p)	1 mm
Tensão máxima 0° Rm	311,33 MPa
Tensão máxima 90° Rm	310,81 MPa

A Tabela 20 exibe o valor teórico do retorno elástico, porém utilizando a equação 8 para o cálculo da força de acordo com Dieter (1981), em que a Tabela 21 exibe os parâmetros utilizados para os cálculos.

Tabela 20 – Valor teórico do retorno elástico com o cálculo da força do método Dieter.

Sentido de Laminação [°]	Tensão máxima (R_m) [MPa]	Força $FG = \frac{(R_m \cdot s_0^2 \cdot b)}{2(r_i + \frac{s_0}{2})} \cdot \tan \frac{\alpha}{2}$ [N]	Momento $M = \frac{F_d \cdot w}{4}$ [N.mm]	Fator Retorno elástico $K = 1 - \frac{12M(r_p + 0,5 \cdot s_0)}{E \cdot b \cdot s_0^3}$ [-]
0	311,33	12.748	63.745	0,97035
90	310,81	12.727	63.638	0,97044

Tabela 21 – Parâmetros utilizados para o cálculo de força (equação 8), momento (equação 13) e fator de retorno elástico (equação 12).

Parâmetro	Dados
Ângulo de dobramento (α)	90°
Distância entre os apoios (w)	20 mm
Espessura da chapa inicial (s_0)	1,5 mm
Folga entre o punção e matriz (j)	0,1 mm
Largura da Chapa (b)	45,5 mm
Módulo de elasticidade (E)	210 GPa
Raio da matriz (r_{ma})	0,5 mm
Raio do punção (r_p)	1 mm
Raio interno da chapa (r_i)	0,5 mm
Tensão máxima 0° Rm	311,33 MPa
Tensão máxima 90° Rm	310,81 MPa

5.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Os dados de pós-processamento das simulações são visualizados na própria interface do Simufact Forming®. A Figura 47 e Figura 48 exibe o pós-dobrimento no processo de simulação numérica, que ao utilizar o comando *measuring* foi possível criar dois pontos resultando em uma linha horizontal e o terceiro ponto na base do dobramento, deste modo resultou na segunda linha colinear sobre a aresta de dobramento, onde foram possíveis medir os ângulos de dobramento. A Figura 47 exibe a medição realizada no processo de dobramento com o punção reto, resultando em 90,04° a medição do ângulo inicial (α_0) e 89,19° para o ângulo final (α_1). A Figura 48 destaca a medição do ângulo no processo de dobramento com a utilização do

punção com ressalto antes e após o dobramento, que sucedeu respectivamente em $\alpha_0 = 90,07^\circ$ e $\alpha_1 = 89,85^\circ$.

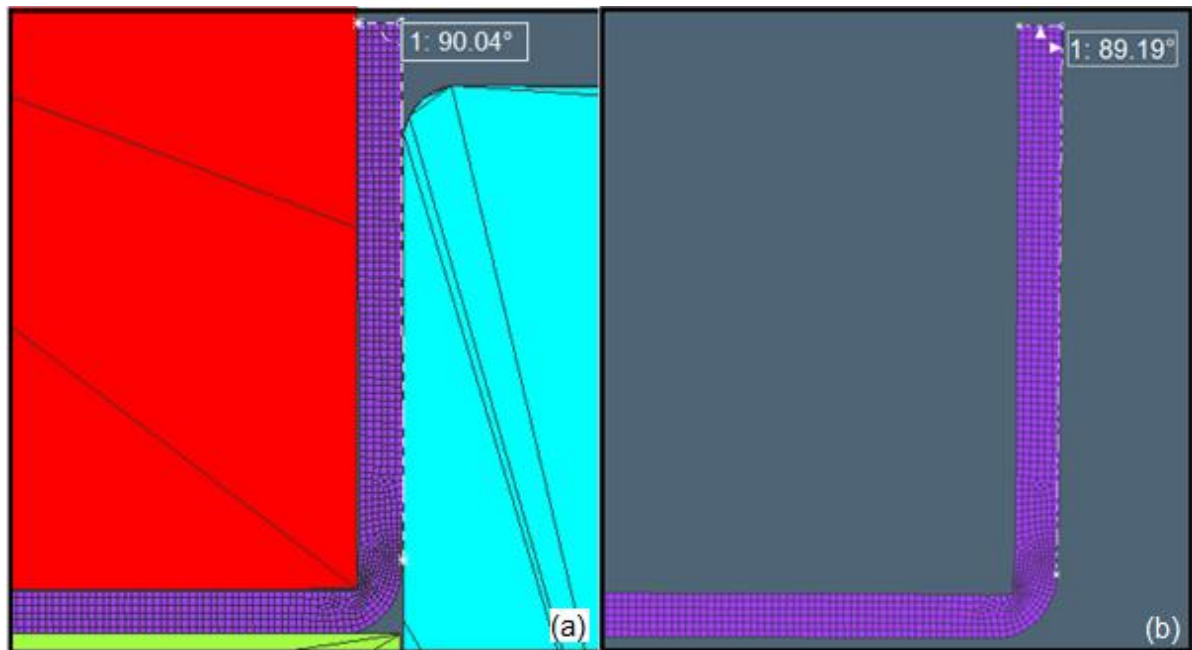


Figura 47 – Medição do ângulo no processo de dobramento com punção reto, (a) medição do ângulo inicial (b) medição do ângulo final.

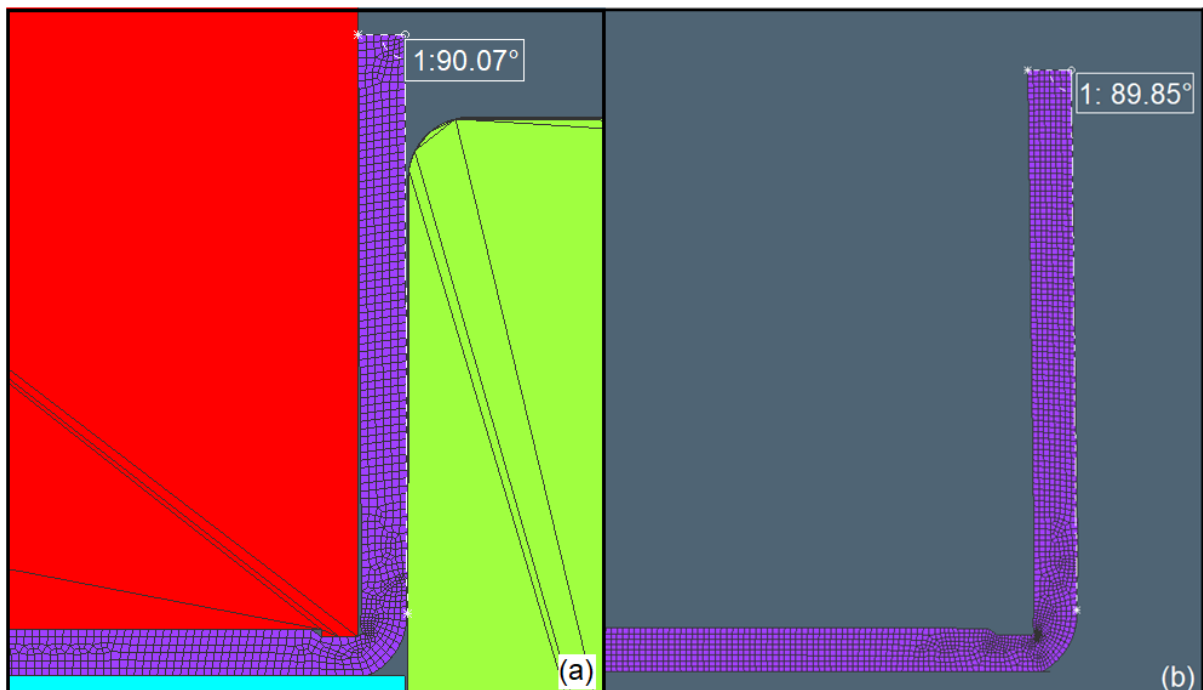


Figura 48 – Medição do ângulo no processo de dobramento com punção com ressalto, (a) medição do ângulo inicial (b) medição do ângulo final.

Os resultados da avaliação do fator do retorno elásticos (K) estão sendo apresentados na Tabela 22, que foram calculados pela equação 11 através dos valores dos ângulos iniciais (α_0) e ângulos finais (α_1).

Tabela 22 – Resultado da avaliação do fator de retorno elástico na simulação numérica.

Punção	Ângulo inicial [°]	Ângulo final [°]	Fator retorno elástico $K = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}$ [-]
Reto	90,04	88,19	0,9794
Com ressalto	90,07	89,85	0,9975

Através da simulação numérica também foi possível identificar o comportamento da deformação verdadeira (φ) no processo de dobramento. A Figura 49 mostra o efeito da deformação com a utilização do punção reto, no detalhe A é possível identificar a malha comprimida no lado interno da chapa com uma deformação de 0,86 em que ocorreu o ponto máximo da deformação e a região do detalhe B do lado externo referindo-se ao ponto de estudo do trabalho, exibindo a deformação de 0,37.

A simulação executada com o punção com ressalto está sendo mostrada na Figura 50, na qual é possível identificar o surgimento do ponto interno de concentração da deformação verdadeira (φ) próximo ao ressalto do punção com o resultado de 1.1 destacado no ponto A e para o detalhe B mostra o efeito da deformação no lado externo, originando-se um valor de 0,46.

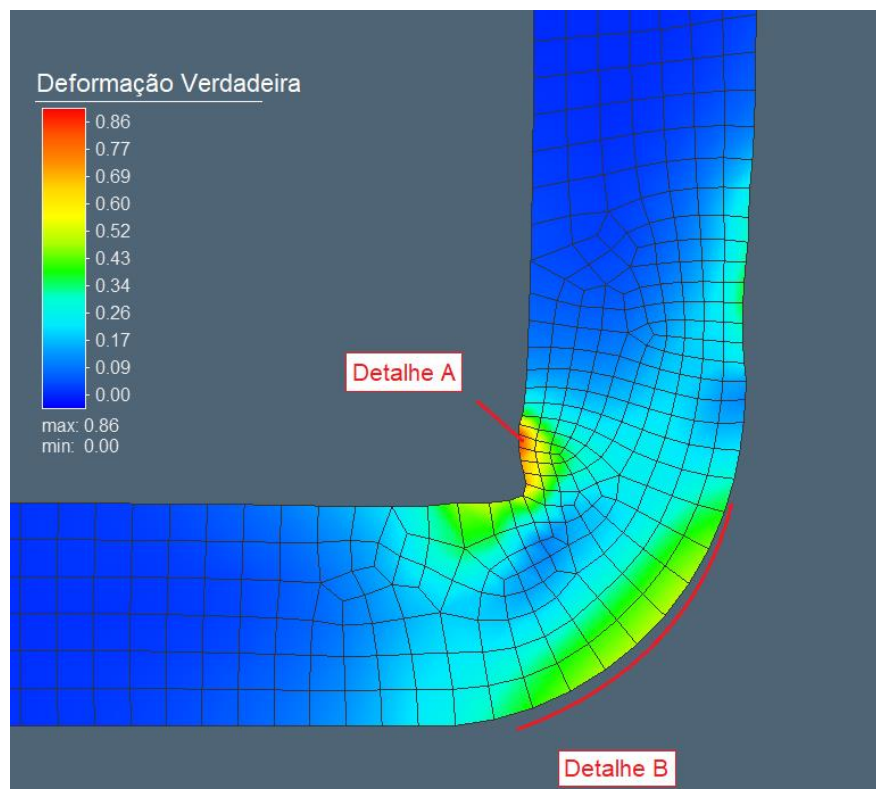


Figura 49 – Deformação verdadeira no processo de dobramento com punção reto.

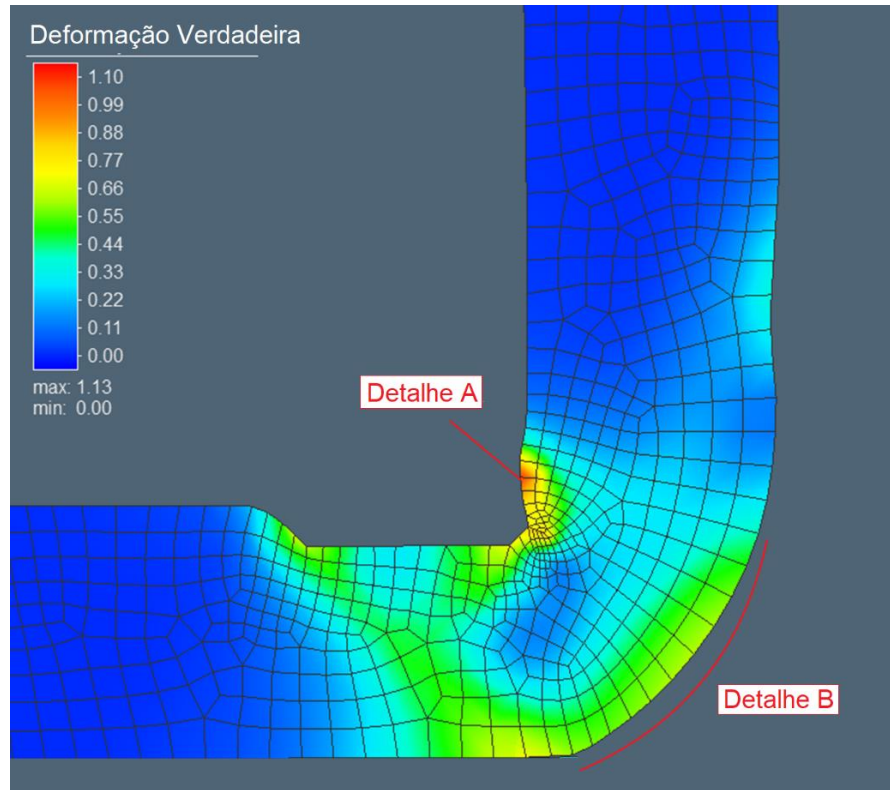


Figura 50 – Deformação verdadeira no processo de dobramento com punção com ressalto.

6 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

6.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS SAE 1006

6.1.1 Curva de engenharia

As informações exibidas na Tabela 23 relaciona-se as propriedades mecânicas extraídas através da curva de engenharia ($\sigma\epsilon$) pelo ensaio de tração. A tabela informa os valores médios da tensão máxima (R_m), alongamento máximo (δ) e tensão de escoamento (σ_{esc}) para cada sentido de laminação dos 5 CP's ensaiados. Nota-se que os maiores valores de tensão máxima e escoamento foram no sentido de laminação a 45°.

Ademais fazendo um comparativo entre os dados do sentido de laminação 0° e 90° percebe-se que o valores de tensão máxima (R_m) ficam próximos, com apenas uma diferença de 0,5 MPa sendo menor no sentido de laminação de 90° em acordo com Leu (1997), entretanto a tensão de escoamento resultou em 11,8 MPa superior no sentido de 90°. Além disso, como pode ser observado no sentido de laminação a 0° possui uma maior porcentagem de deformação pelo fato de as fibras estarem no mesmo sentido da força aplicada.

Tabela 23 – Valores médios das propriedades mecânicas do aço SAE 1006.

	Tensão Máx. (R_m) [MPa]	Along. (δ) [%]	Tensão de Escoamento (σ_{esc}) [MPa]	Tensão Máx. (R_m) [MPa]	Along. (δ) [%]	Tensão de Escoamento (σ_{esc}) [MPa]	Tensão Máx. (R_m) [MPa]	Along. (δ) [%]	Tensão de Escoamento (σ_{esc}) [MPa]
	Sentido Laminação 0°			Sentido Laminação 45°			Sentido Laminação 90°		
Média	311,3	35,2	186,2	327,4	31,9	203,1	310,8	34,8	198,0
Desvio	3,77	0,5	3,94	0,68	3,5	5,70	0,95	2,6	5,01

A Tabela 24 mostra o comparativo dos valores obtidos com avaliação de Simião (2011) sobre o aço SAE 1006 para os dados da tensão máxima (R_m) e o alongamento máximo (δ), nota-se que os valores de tensão estão próximos, apresentado uma variação média de 28 MPa para a tensão máxima (R_m) e 3% para a o alongamento máximo (δ).

Tabela 24 – Comparativo das propriedades mecânicas do aço SAE 1006.

	Tensão Máx. (R_m) [MPa]	Along. (δ) [%]	Tensão Máx. (R_m) [MPa]	Along. (δ) [%]	Tensão Máx. (R_m) [MPa]	Along. (δ) [%]
	Sentido Laminação 0°		Sentido Laminação 45°		Sentido Laminação 90°	
Ensaio	311,3 +/- 3,77	35,2 +/- 0,5	327,4 +/- 0,68	31,9 +/- 3,5	310,8 +/- 0,95	34,8 +/- 2,6
Simião (2011)	341 +/- 3	31,9 +/- 2	360 +/- 2	27,1 +/- 1	332 +/- 3	34,6 +/- 1

6.1.2 Curva de escoamento

Na Tabela 25 resume os dados médios obtidos através da curva de escoamento para a aplicação da equação de Hollomon-Ludwing ($kf = C \cdot \varphi^n$), extraídos pela linha de tendência através do software Excel. Diante disso, as equações de escoamento do SAE 1006 resultam em $kf_{0^\circ} = 523,62 \cdot \varphi^{0,218}$, $kf_{45^\circ} = 539,08 \cdot \varphi^{0,204}$ e $kf_{90^\circ} = 505,38 \cdot \varphi^{0,2}$ respectivamente para os sentidos de laminação 0°, 45° e 90°. Através das equações encontradas, permite prever a tensão de escoamento do material SAE 1006 para distintos valores de deformação verdadeira (φ).

Tabela 25 – Valores médios das equações de Hollomon-Ludwing gerados pela curva de escoamento.

	Coeficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]	Coeficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]	Coeficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]
	Sentido Laminação 0°		Sentido Laminação 45°		Sentido Laminação 90°	
Média	523,62	0,218	539,08	0,204	505,38	0,200
Desvio	8,22	0,006	6,78	0,004	2,51	0,004

O resultado médio da fórmula de tensão de escoamento dos valores ensaiados foram $kf_{médio} = 522 \cdot \varphi^{0,2}$. Ao avaliar os dados de Araujo (2010) resultou em $kf_{médio} = 554 \cdot \varphi^{0,2}$, no qual apresentaram somente uma diferença de 5,7% no coeficiente de resistência. Na Tabela 26 exibe avaliação comparativa dos dados para cada sentido de laminação.

Tabela 26 – Comparativo das propriedades mecânicas da curva de escoamento do aço SAE 1006.

	Coeficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]	Coeficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]	Coeficiente de Resistência (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]
	Sentido Laminação 0°		Sentido Laminação 45°		Sentido Laminação 90°	
Ensaio	523,62	0,218	539,08	0,204	505,38	0,2
Araujo (2010)	522	0,21	578	0,2	563	0,21

6.2 ANÁLISE QUÍMICA

Conforme Souza (1989) o controle da composição química do material é de grande relevância para obtenção de boas condições para as propriedades mecânicas. Com a análise da Tabela 5 verificou-se que os CP's utilizados neste estudo, apresentaram compatibilidade nos teores dos elementos de liga com o especificado pelo fornecedor AcelorMittal, similar aos resultados de Becker *et al.* (2018) e apresentado somente variação no elemento AL de 0,03% superior a norma NBR 5007 – EM.

6.3 DEFORMAÇÕES NO DOBRAMENTO

Os valores da deformação relativa (ε) estão sendo exibidos na Tabela 27, na qual aponta um comparativo dos valores que foram coletadas experimentalmente nos ensaios, sendo a deformação oriunda do dobramento do lado externo da chapa e as deformações determinadas teoricamente pelas equações 3 e 4.

Ao analisar o comparativo da deformação relativa (ε) presente na Tabela 27 nota-se que, a equação 4 se mantém constante de 37,5%, pelo fato de a mesma considerar que há simetria entre a região tracionada e a região comprimida no processo de dobramento. Ao comparar este valor com o teórico com o experimental, nota-se a variação da deformação relativa (ε) para cada grupo ensaio. Dessa forma, é visto que nos ensaios apresentaram dissimetria nas regiões de tração e compressão no dobramento, que ao utilizar a equação 3 proposta por Marciniak *et al.* (2002) e Schaeffer (2016) os valores da deformação verdadeira se aproximam havendo uma variação mínima de 3% e máxima a 9%.

Tabela 27 – Comparativo da deformação relativa (ε) para o aço SAE 1006.

Grupo de ensaio	Tipo de Punção	Sentido da laminação [°]	Def. Rel. experimental (ε) [%]	Def. Rel. teórica (ε) Eq.3 [%]	Def. Rel. teórica (ε) Eq.4 [%]
Grupo 1	reto	0	20	29	37,5
Grupo 2	reto	90	30	33	37,5
Grupo 3	com ressalto	0	40	43	37,5
Grupo 4	com ressalto	90	45	48	37,5

Análise comparativa da deformação verdadeira do lado externo (φ_{ext}) dos dados experimentais e teóricos calculados através das equações 5, 6 e 7 estão sendo apresentados na Tabela 28. Avaliando os resultados calculados teoricamente pela equação 7 por Lange (1990) e pela equação 6, sendo o método aplicado no estudo de Fress (2017) apresentados na Tabela 28, nota-se que os resultados das deformações verdadeiras (φ_{ext}) apresentaram valores fixos, respectivamente de 0,69[-] e 0,47[-]. Já para a determinação do valor teórico utilizando a equação 5 por Schaeffer (2016), apresentou variação mínima de 0,01[-] e máxima de 0,7[-] para cada grupo de ensaio conforme a medição da linha neutra assemelhando com os valores experimentais, que ocasionou um efeito do comportamento de deformação assimétrico sustentado por Ahn (2020), em vista da linha neutra se deslocar para o lado externo da superfície da chapa.

Tabela 28 – Comparativo da deformação verdadeira (φ_{ext}) para o aço SAE 1006.

Grupo de ensaio	Tipo de Punção	Sentido da laminação [°]	Deformação Verdadeira experimental (φ_{ext}) [-]	Conforme Schaeffer, 2016 (φ_{ext}) [-]	Conforme Fress, 2017 (φ_{ext}) [-]	Conforme Lange, 1990 (φ_{ext}) [-]
Grupo 1	reto	0	0,18	0,25	0,47	0,69
Grupo 2	reto	90	0,26	0,29	0,47	0,69
Grupo 3	com ressalto	0	0,34	0,36	0,47	0,69
Grupo 4	com ressalto	90	0,38	0,39	0,47	0,69

Analisando atentamente a Figura 51 e Figura 52, percebe-se que a deformação verdadeira (φ_{ext}) e relativa (ε) nos corpos de prova são sempre maiores no sentido da laminação de 90°. Ademais, é possível observar que o grupo de ensaio 3 e 4 que foram submetidos ao processo de dobramento para o punção com ressalto, sofrem um tracionamento maior na parte externa por estarem submetidas a um processo de conformação executada pelo ressalto.

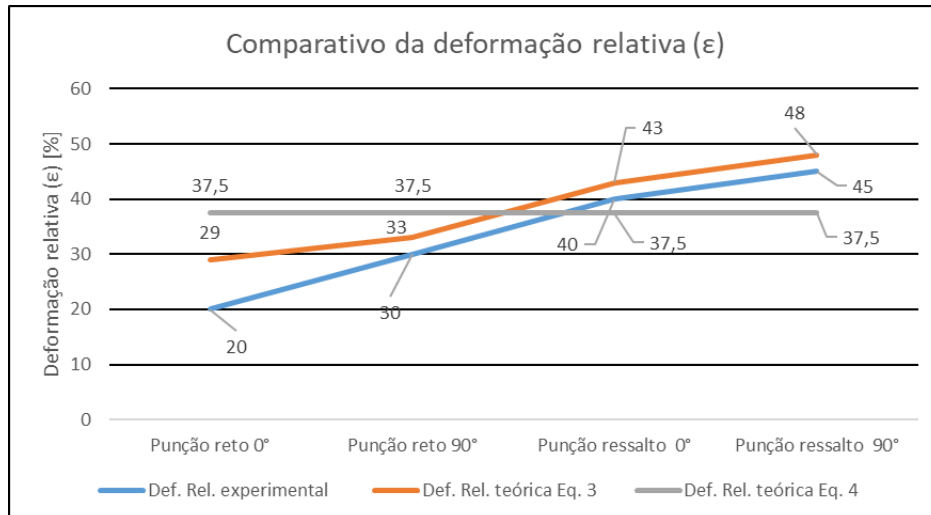


Figura 51 – Comparativo gráfico da deformação relativa (ϵ) para o aço SAE 1006.

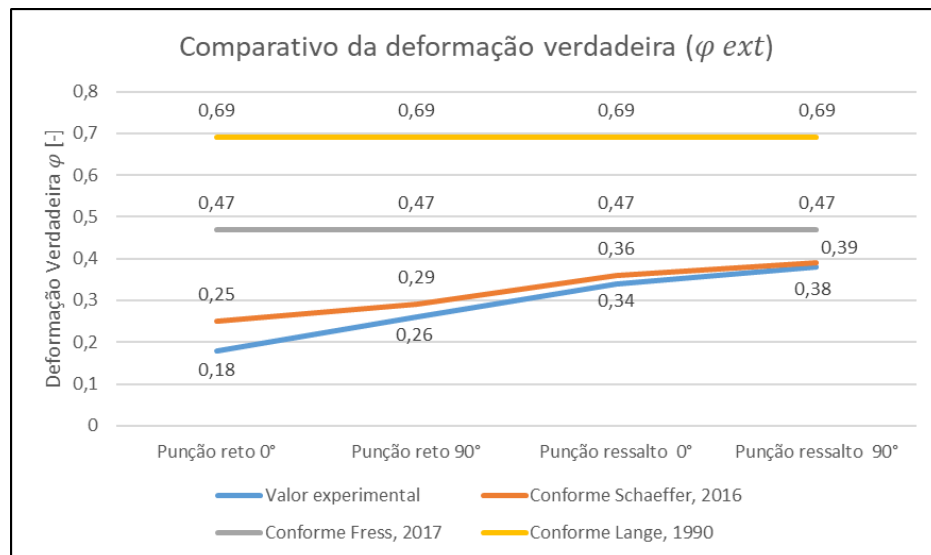


Figura 52 – Comparativo gráfico da deformação verdadeira (φ_{ext}) para o aço SAE 1006.

Analisando a deformação da chapa na metalografia perante a simulação numérica é perceptível a precisão na simulação, como pode ser visto na Figura 53 e Figura 54 trazendo fidelidade no comportamento da deformação do aço. A Figura 53 trata-se do processo de dobramento com o punção reto, no detalhe A nota-se a semelhança do dobramento no lado interno da chapa que sofreu compressão.

A Figura 54 é possível visualizar a conformação direta ocorrida pelo punção com ressalto, no detalhe A é mostrado o decaimento da deformação e para o detalhe B nota-se a grande semelhança do resultado final no lado interno do dobramento.

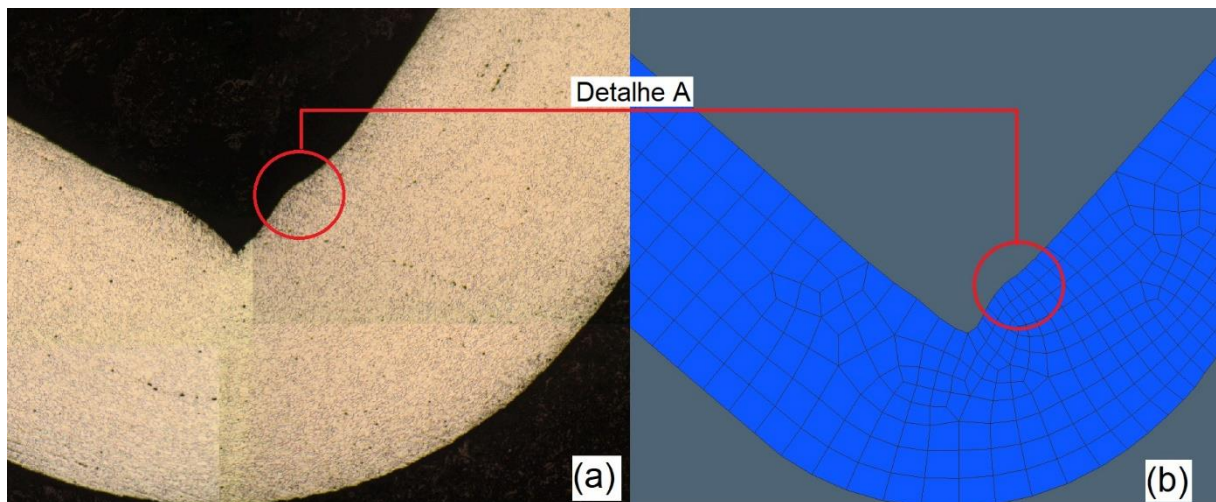


Figura 53 – Comparação do comportamento da deformação na metalografia (a) contra a simulação numérica (b) para o punção reto.

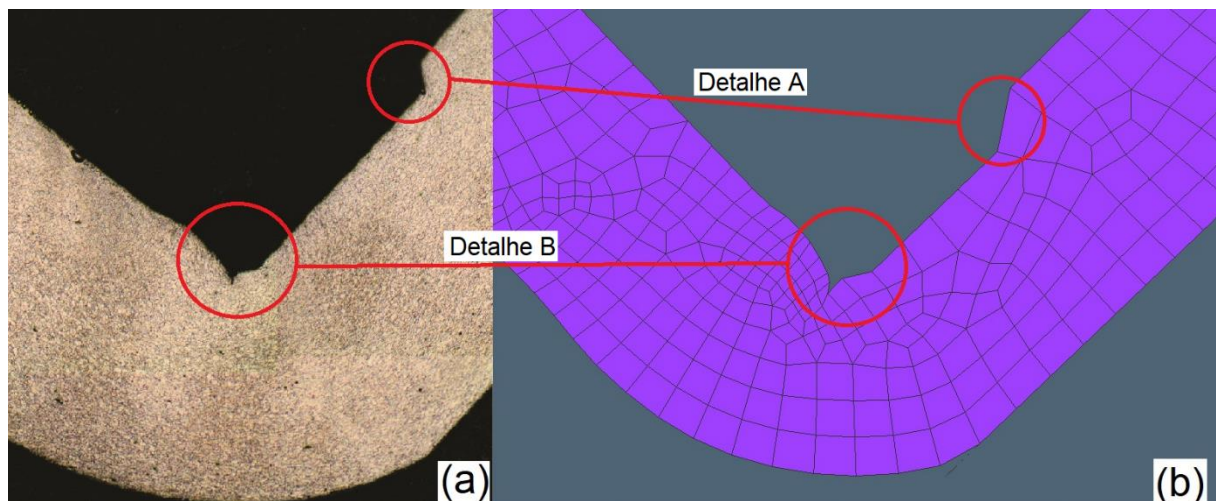


Figura 54 – Comparação do comportamento da deformação na metalografia (a) contra a simulação numérica (b) para o punção com ressalto.

A comparação analítica da deformação verdadeira do lado externo (φ_{ext}) dos dados da simulação numérica e experimentais estão sendo abordados na Tabela 29. Na configuração de dobramento com o uso do punção reto apresentou uma variação na deformação de 0,11 para 90° no sentido de laminação e 0,19 para 0° representando um erro relativo de respectivamente de 30% a 51% (valor médio de 40,5%), em contra partida no processo de dobramento para o punção com ressalto ocorreu uma variação de 0,8 para o sentido de laminação a 90° a 0,12 para 0°, representado respectivamente um erro relativo de 17% e 26% (valor médio de 21,5%).

Tabela 29 – Comparativo da deformação verdadeira (φ_{ext}) da simulação numérica e valor experimental para o aço SAE 1006.

Grupo de ensaio	Tipo de Punção	Sentido da laminação [°]	Deformação Verdadeira experimental (φ_{ext}) [-]	Deformação Verdadeira numericamente (φ_{ext}) [-]	Erro relativo [%]
Grupo 1	reto	0	0,18	0,37	51
Grupo 2	reto	90	0,26	0,37	30
Grupo 3	com ressalto	0	0,34	0,46	26
Grupo 4	com ressalto	90	0,38	0,46	17

6.4 RETORNO ELÁSTICO

O sentido de orientação da laminação de chapas possui influência no processo de dobramento, quando executado o mesmo no sentido de laminação a 0° o alinhamento da dobra estará perpendicular as fibras, com isto haverá maior resistência no dobramento e maior retorno elástico. No entanto, para a orientação de laminação 90° ocorre o efeito contrário, pois o dobramento está paralelo as fibras (LEU, 1997). A Tabela 30 expõem os dados experimentais do fator K do retorno elástico nos sentidos de laminação e com a utilização dos punções em estudo, a variação do valor do fator K quando comparados pelo sentido de laminação encontra-se uma variação da terceira casa após a vírgula.

Ademais, nos resultados encontrados é possível constatar que com a utilização do punção com ressalto evidência um fator K maior que a utilização do punção reto, que resulta em um menor retorno elástico no dobramento, esta avaliação está de acordo com os estudos de realizados por Jafari *et al.* (2015), Ling *et al.* (2005) e Kuo e Lin (2012).

Tabela 30 – Comparativo do fator K com utilização dos modelos de punções.

Sentido de Laminação [°]	Fator K	
	Tipo de Punção	
	Reto	Com ressalto
0°	0,988	0,993
90°	0,989	0,998

Por meio da Tabela 31, pode-se visualizar um comparativo dos resultados do fator K experimental obtido pela equação 11 e pelos dois resultados teóricos, através da equação 13 utilizando o dado de entrada da força pela equação 10 do autor Rodrigues e Martins (2005) e pela equação 8 de Dieter (1981). Observa-se que, os

valores experimentais ficaram próximos aos valores teóricos calculados, porém pelo método de Rodrigues e Martins (2005) surgiu menor erro relativo de 0,2% a 0,7%. Em contra partida, o valor teórico calculado por Dieter (1981) apresentou 1,8% a 2,8%, ou seja, neste caso esta equação 8 não é adequada para este estudo.

Tabela 31 – Comparativo dos resultados experimentais e teóricos do fator K.

Punção	Sentido de Laminação [°]	Valor Experimental (K) [-]	Valor teórico Rodrigues e Marins (2005) (K) [-]	Erro relativo [%]	Valor teórico Dieter (K) (1981)	Erro relativo [%]
Reto	0	0,988	0,9954	0,7	0,9703	1,8
Reto	90	0,989	0,9955	0,7	0,9704	1,9
Com ressalto	0	0,993	0,9954	0,2	0,9703	2,3
Com ressalto	90	0,998	0,9955	0,3	0,9704	2,8

A Tabela 32 mostra o comparativo dos valores experimentais e numéricos do fator K, onde os dados apresentados na simulação numérica foram considerados um aço SAE 1006 isotrópico e com adição dos dados coletados na caracterização do material em estudo. Na Tabela 32 é possível constatar que, a simulação numérica apresentou um erro relativo no punção reto para o sentido de laminação 0° de 0,91% e para o sentido de 90° foi 1,01% (valor relativo médio de 0,96%) e para o punção com ressalto resultou apresentou 0,4% no sentido de laminação 0° e 0,1% para 90° (valor relativo médio de 0,25%). Isto demonstra que a simulação numérica possui robustez nos cálculos numéricos gerando resultados fiéis.

Tabela 32 – Comparativo dos resultados experimentais e análise numérica do fator K.

Punção	Sentido de Laminação [°]	Valor Experimental (K) [-]	Valor Numérico (K) [-]	Erro relativo [%]
Reto	0	0,988	0,979	0,91
Reto	90	0,989	0,979	1,01
Com ressalto	0	0,993	0,997	0,40
Com ressalto	90	0,998	0,997	0,10

Nota-se também que o resultado do fator de retorno elástico da simulação do processo de dobramento com o punção com ressalto, apontou um valor maior do fator K perante ao punção reto, que estão alinhados com o efeito ocorrido no processo experimental apresentado neste trabalho, constatando que ao utilizar o método de dobramento do punção com ressalto possui o efeito de menor retorno elástico. A

Figura 55 apresenta uma visão geral dos resultados experimentais, teóricos e numericamente dos resultados do fator do retorno elástico.

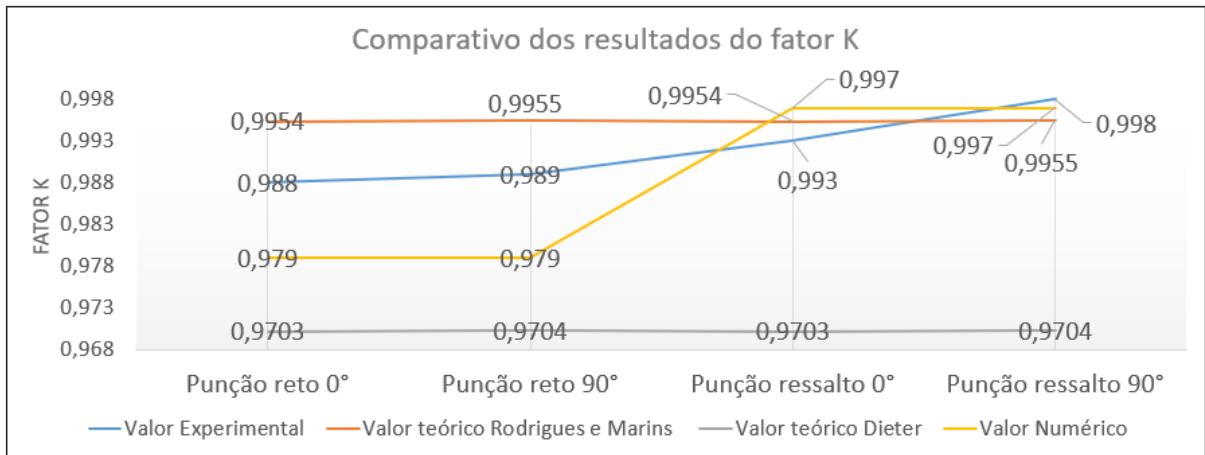


Figura 55 – Imagem gráfica do comparativo dos resultados do fator K

7 CONCLUSÕES

Em síntese, a caracterização do material SAE 1006 realizada para avaliar as propriedades mecânicas como tensão máxima (R_m), tensão de escoamento (σ_{esc}) e alongamento máximo (δ), assim como, avaliação da composição química que foram essenciais para alcançar os dados do presente trabalho, mostrou que os valores ficaram próximos aos comportamentos de outros autores citados sendo uma variação média de 28MPa para a tensão máxima (R_m) e 3% para a o alongamento máximo (δ).

Ao avaliar a deformação relativa (ε) no lado da fibra externa do dobramento, conclui-se que os valores medidos no ensaio quando comparados com os dados teóricos obtidos pela equação 3 apresentam uma variação máxima de 9%, em contrapartida a equação 4 obteve 17,5 % quando comparados com valores medidos no ensaio. Já para avaliação da deformação verdadeira (φ), o valor experimental ficou muito próximo da equação 5, sendo a variação máxima de 0,7[-] um valor menor quando analisado os resultados obtidos pelas equação 6 e equação 7, sendo respectivamente 0,47 e 0,69[-]. Dessa forma, pela aproximação dos resultados experimentais nas equações 3 e 5, compreende-se que o processo de dobramento gerou um comportando de deformação assimétrica, pelo fato das equações consideram a variação da posição da linha neutra (LN). Além disso, averiguou-se que tanto no processo de dobramento com punção sem e com ressalto a deformação sempre gerou um valor maior no sentido de laminação 90°, devido a este sentido possuir menor resistência ao dobramento e maior deformabilidade.

Diante do exposto, na avaliação experimental compreendeu duas situações, no processo de dobramento o retorno elástico se torna menor sempre no sentido da laminação de 90° e a utilização do processo de dobramento em L com ressalto no punção restringe o efeito do retorno elástico devido a redução da região deformada plasticamente localizada na dobra da chapa.

Com a utilização do dado de entrada da força pela equação 10, entende-se que é a mais adequada no processo de dobramento em L, pelo fato dos resultados obtidos do fator K gerado pela equação 12, que quando comparados com dados coletados experimentalmente apresentaram um erro relativo menor de no máximo 0,7%.

Os resultados da simulação numérica exibiram aproximação no comportamento da deformação visual da chapa quando comparado na análise

metalográfica. Porém os resultados de deformação verdadeira (φ) apresentam variações maiores quando comparados pelo método experimental, gerando um erro relativo médio de 40,5% para o punção sem ressalto e 21,5% quando utilizado punção com ressalto. No entanto, na análise comparativa do valor experimental do fator do retorno elástico (K) para o valor numérico resultou em valores similares, onde avaliação do erro relativo foi de no máximo de 1% para o punção reto e 0,4% no punção com ressalto.

Contudo foi possível comprovar pelos métodos analíticos, experimentais e avaliação numérica que no processo de dobramento com o ressalto presente no punção reduz o retorno elástico, sendo um método que possa ser adotado em projetos para restringir o retorno elástico.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para futuras avaliações, podem ser consideradas:

- a) Avaliar o retorno elástico realizando para diferentes medidas de altura e largura do ressalto no punção;
- b) Avaliar o comportamento da deformação do dobramento em L com ressalto para aços de alta resistência;
- c) Avaliar a influência o retorno elástico para estampagem a quente para o punção sem e com ressalto;
- d) Avaliar a força de dobramento experimental, teórico e computacional;
- e) Realizar análises através de Microscopia Eletrônica de Varredura para mapear com maior profundidade de detalhes as microestruturas geradas no processo de dobramento.

BIBLIOGRAFIAS

- AHN, Kanghwan. Plastic bending of sheet metal with tension/compression asymmetry. **International Journal of Solids and Structures**, [s. l.], v. 204–205, p. 65–80, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.022>
- ALTAN, Taylan; OH, Soo-Ik; GEGEL, Harold L. **Conformação de metais: fundamentos e aplicações**. São Carlos: EESC-USP, 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E415-17: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry**. Pennsylvania: ASTM, 2017.
- ARAUJO, Arisson Carvalho de *et al.* Analysis of shear band formation by special tension tests applied to the samples. **REM - International Engineering Journal**, [s. l.], v. 63, n. 3, p. 501–507, 2010. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000300012>
- ASM INTERNATIONAL. **Materials characterization**. 7. ed. United States of America: ASM International, 1990. v. 10
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13284: Metalográfica Procedimento Preparação de corpos de prova para análise**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6892-1: Materiais metálicos - Ensaio de Tração Part1: Método de Ensaio a Temperatura Ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5915-2: Chapas e bobinas de aço laminadas a frio Parte 2: Aços para estampagem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.
- BARBOSA, Geraldo Magela. Processo de dobramento de chapas metálicas. **Exacta**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 109–120, 2009.
- BECKER, Eric *et al.* Experimental investigation of the thixoforging of tubes of low-carbon steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 252, n. August 2017, p. 485–497, 2018. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.003>
- BILLUR, Eren. **Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels: From a Technological and Business Perspective**. 1. ed. Suíça: Springer, 2019.
- BRALLA, JG. **Handbook of manufacturing processes**. New York: Industrial Press,

2006.

BRESCIANI FILHO, Ettore *et al.* **Conformação Plástica dos Metais**. 1. ed. São Paulo: EPUSP, 2011.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, Davud G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARDEN, W. D. *et al.* Measurement of springback. **International Journal of Mechanical Sciences**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 79–101, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00082-0)

CAVALCANTE, Tarique Da S. *et al.* **Aplicação de Técnicas de Processamento e Análise de Imagem na Análise Automática da Quantidade e do Tamanho do Grão em Imagens Metalográficas**. Barcelona: Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2009.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Volume 2: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

COURNELIUS, Mauricio Boeira. **Desenvolvimento e caracterização do processo de dobramento com chapas de hardox 500**. 106 f. 2020. - Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

DE ALBUQUERQUE, Victor Hugo C. *et al.* Evaluation of multilayer perceptron and self-organizing map neural network topologies applied on microstructure segmentation from metallographic images. **NDT and E International**, [s. l.], v. 42, n. 7, p. 644–651, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.05.002>

DE ARAÚJO FREITAS, Vera Lúcia *et al.* Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 527, n. 16–17, p. 4431–4437, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.03.090>

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ganabara Koogan S.A., 1981.

DOS SANTOS, Givanildo Alves. **Tecnologia dos Materiais Metálicos: Propriedades, Estruturas e Processos de Obtenção**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015.

FERREIRA, Ricardo Artur Sanguinetti. **Conformação plástica: fundamentos**

- metalúrgicos e mecânicos**. 2. ed. Recife: Universitária da UFPE, 2010.
- FRESS, Monique valentim da silva. **Avaliações sobre o processo de dobramento do aço NBR 6656 LNE 380**. 100 f. 2017. - Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- GAN, Wei; WAGONER, R. H. Die design method for sheet springback. **International Journal of Mechanical Sciences**, [s. l.], v. 46, n. 7, p. 1097–1113, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.06.006>
- GAUTAM, Bhav *et al.* Analysis of Springback Variation in V Bending. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 555–560, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.17577/IJERTV5IS020526>
- GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- GRÜNING, Klaus. **Umformtechnik**. 4. ed. Braunschweig: Springer-Verlag, 2013.
- HUANG, You Min; LEU, Daw Kwei. Effects of process variables on V-die bending process of steel sheet. **International Journal of Mechanical Sciences**, [s. l.], v. 40, n. 7, p. 631–650, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(97\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(97)00083-0)
- JAFARI, Mirshaban *et al.* Numerical control and optimization of springback in L-bending of magnesium alloy through FE analysis and artificial intelligence. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, [s. l.], v. 68, n. 5, p. 969–979, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12666-015-0535-7>
- JAMIL, Meryeme *et al.* Application of the JMAK precipitation law in iron loss modelling to account for magnetic ageing effect. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, [s. l.], v. 547, n. July 2021, p. 168901, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168901>
- JAMLI, M. R.; ARIFFIN, A. K.; WAHAB, D. A. Incorporating feedforward neural network within finite element analysis for L-bending springback prediction. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 42, n. 5, p. 2604–2614, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.005>
- KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. **Manufacturing engineering and technology**. 7. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2014.
- KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. A review on hot stamping. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 210, n. 15, p. 2103–2118, 2010. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019>

KAZAN, Recep; FIRAT, Mehmet; TIRYAKI, Aysun Egrisogut. Prediction of springback in wipe-bending process of sheet metal using neural network. **Materials and Design**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 418–423, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.033>

KEELER, Stuart; KIMCHI, Menachem; MOONEY, Peter J. Advanced High-Strength Steels Guidelines. **WorldAutoSteel**, [s. l.], v. 6, p. 314, 2017.

KIMINAMI, Claudio Shyinti; DE CASTRO, Walman Benício; DE OLIVEIRA, Marcelo Falcão. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

KLIAUGA, Andréa Madeira; FERRANTE, Maurizio. **Metalurgia básica para ourives e designers: do metal à joia**. 1ªed. São Paulo: Blucher, 2009.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Processes 4**. Berlin: Springer, 2013.

KUO, Chun Chih; LIN, Bor Tsuen. Optimization of springback for AZ31 magnesium alloy sheets in the L-bending process based on the Taguchi method. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 161–173, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3373-8>

LANGE, Kurt. **Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft**. 3. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1990. v. 3 Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10686-0>

LEE, Jeong Yeon; BARLAT, Frédéric; LEE, Myoung Gyu. Constitutive and friction modeling for accurate springback analysis of advanced high strength steel sheets. **International Journal of Plasticity**, [s. l.], v. 71, p. 113–135, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.04.005>

LESKO, Jim. **Industrial design: Materials and manufacturing guide**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

LEU, Daw Kwei. A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 66, n. 1–3, p. 9–17, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02453-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02453-3)

LIN, Jianping *et al.* A design of experiments assessment of moisture content in uncured adhesive on static strength of adhesive-bonded galvanized SAE1006 steel. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 478–485, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.04.001>

- LING, Y. E.; LEE, H. P.; CHEOK, B. T. Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 168, n. 2, p. 296–302, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.236>
- LIRA, Valdemir Martins. **Princípios dos processos de fabricação utilizando metais e polímeros**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2017.
- MARCINIAK, Zdzislaw; DUNCAN, John; HU, Jack. **Mechanics of sheet metal forming**. 2. ed. London: Elsevier, 2002.
- MARCONDES, Paulo Victor Prestes; DOS SANTOS, Ricardo Adriano; HAUS, Siedro Augusto. The coining force influence on springback in TRIP800 steel V and L-bending processes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 455–463, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-015-0467-5>
- NUTOR, Raymond Kwesi; ADOMAKO, Nana Kwabena; FANG, Y. Z. Using the Hollomon Model to Predict Strain-Hardening in Metals. **American Journal of Materials Synthesis and Processing**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.11648/j.ajmsp.20170201.11>
- PARK, Hyeonil *et al.* Delamination behavior analysis of steel/polymer/steel high-strength laminated sheets in a V-die bending test. **International Journal of Mechanical Sciences**, [s. l.], v. 173, p. 105430, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105430>
- PERO-SANZ, J. *et al.* Annealing textures for drawability: Influence of the degree of cold rolling reduction for low-carbon and extra low-carbon ferritic steels. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 43, n. 5, p. 303–309, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(99\)00040-6](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(99)00040-6)
- PHANITWONG, Wiriyakorn; THIPPRAKMAS, Sutasn. Development of a new springback factor for a wiping die bending process. **Materials and Design**, [s. l.], v. 89, p. 749–758, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.031>
- RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da deformação plástica - aplicações industriais**. Lisboa: Escolar, 2005. v. 2
- SANTOS, Bruna Karine dos; QUADROS, Marcelo Luiz de. **Processo de conformação**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.
- SANTOS, Ricardo Adriano dos. **Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processos de dobramento de aços de alta**


- resistência**. 115 f. 2013. - Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- SATOH, Susumu *et al.* New Process for Manufacturing Deep-Drawing Cold-Rolled Steel Sheets From Extra-Low-Carbon Steels. **Kawasaki Steel Technical Report**, [s. l.], v. 12, n. 12, p. 36–44, 1985.
- SCHAEFFER, Lirio. **Manufatura por conformação mecânica**. 1. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016.
- SCHAEFFER, Lirio; NUNES, Rafael Menezes; BRITO, Alberto Moreira. **Tecnologia da estampagem de chapas metálicas**. 1. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2017.
- SCHIJVE, Jaap. **Fatigue of structures and materials**. 2. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.
- SCHULER, Gmbh. **Metal forming handbook**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- SIMIÃO, Maurício. **Avaliação da Anisotropia em Chapas de Aço de Baixo Carbono SAE 1006, Extra Low Carbon e Aços Livres de Intersticiais**. 84 f. 2011. - Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário da FEI, São Bernado do Campo, 2011.
- SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição química dos aços**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.
- SWIFT, Ken G.; BOOKER, Julian D. **Manufacturing Process Selection Handbook**. Kidlington: Elsevier Science, 2013.
- TEKASLAN, Özgür; ŞEKER, Ulvi; ÖZDEMİR, Ahmet. Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies. **Materials & Design**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 251–258, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.10.006>
- THIPPRAKMAS, Sutasn. Spring-back factor applied for V-bending die design. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 1–11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2020jamdsm0037>
- THIPPRAKMAS, Sutasn; ROJANANAN, Surasit. Investigation of spring-go phenomenon using finite element method. **Materials and Design**, [s. l.], v. 29, n. 8, p. 1526–1532, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.02.002>
- TSOUPIS, Ioannis; HILDERING, Sven; MERKLEIN, Marion. Bending of high-strength low-alloyed steel with respect to edge crack sensitivity caused by shearing operations. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 81, p. 712–717, 2014. Disponível em:

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.065>

WANG, Lifei *et al.* Evolution of springback and neutral layer of AZ31B magnesium alloy V-bending under warm forming conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 213, n. 6, p. 844–850, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.005>

ZHANG, Dongjuan *et al.* An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending. **Computational Materials Science**, [s. l.], v. 38, n. 4, p. 707–715, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2006.05.001>

ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE SAE 1006

 ARCELORMITTAL BRASIL S.A.		Certificado de Qualidade / Mill Sheet / Quality Certificate										Pág: 1 de 01											
Usina / Plant: ArcelorMittal Vega BR 280 km 11 S/Nº, Morro Grande, São Francisco do Sul, SC, 89240-000, CNPJ: 17.469.701/0106-44, Tel/Fone: (5547) 3471-0550, Fax: (5547) 3471-0601		Ordem de Venda / Order No: 9455736 / 000001	Nº do pedido do cliente / Buyer ref. No: 6001001901-230448				Nº pedido do consumidor / Customer Ref. No:	Nº do certificado / Certificate: 003633598301	Data de emissão / Issue Date: 23.07.2021														
Consumidor / Customer: BIGFER IND COM FERRAGENS LTDA		Cliente final / End user: BIGFER IND COM FERRAGENS LTDA				Part Number: CONFORME NORMA																	
Aplicação / Application: MOVEIS EM AÇO, PRATILHEIRAS E EXPOSITORES - CORREDI / STEEL FURNITURE, RACKS AND DISPLAYS - SLIDES AND R		Produto / Product: Bobina Laminada a Frio / Cold Rolled Coil		Norma do Produto / Product Standard: SAE 1006				Revestimento / Coating:		Pós-tratamento / Post-treatment:		Revestimento Especial / Special coating:											
Espessura / Thickness: (MM) 1,50	Largura / Width: (MM) 1.200	Borda / Edge: Natural	Tipo de dimensão / type of dimension: Nominal	Óleo / Oil: Sim/Yes	Tipo de Óleo / Oil Type: QK	Aspecto Superficial / Surface Aspect: X	Cond. Especial / Special Cond.: NORMAL		Nº Protocolo / No Protocol:														
Composição Química / Chemical Composition (%) - L = Análise de Panela / Ladle Analysis - P = Análise de Produto / Product Analysis																							
Corrida	Cód.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	H	Sn	Ti	B	Ca				
3881318	L	0,0233	0,0130	0,2210	0,0100	0,0105	0,0310	0,0120	0,0060	0,0180	0,0010	0,0000	0,0001	0,0015		0,0010	0,0000	0,0001	0,0000				

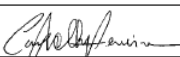
Nº da amostra / Sample No:	Tração / Tensile Unidade / Unit = MPA Base / Basis =				Anisotropia / Anisotropy				Valor BH / BH Value	Dobramento / Bending Base :	Dureza / Hardness Test:	Embutimento / Cupping test	Rugosidade / roughness	Densidade de picos / Peaks	Expansão de furo / hole expansion	Grão / Gr. Sz	Inclusões / Inclusion				Revestimento / Coating		
	Pos. Dir. / Position-Direction	LE / YS	LR / TS	Resistência / Yield Rate (%)	Alongamento Elong (%)	Alig. Alig	n	r									n	r	Pos - Dir / Position-Direction	Medida / Average	Face superior / Top side	Face inferior / Bottom side	Total
N/A				0,0								0	0	0						0	0	0	

Número do lote / lot ID	Nº da nota fiscal / Issue Number	Peso liq. / Net weight t	Peso Bruto / Gross Weight(t)	Corrida / Heat No	Comprimento Real / Real Length(m)	Amostra 1 / Sample 1	Amostra 2 / Sample 2	Códigos / Codes	Obs.	
21886507E	000480695	11,862	11,884	3881318	810,00	N/A	N/A	(1) POSIÇÃO / POSITION (11) - Início / Beginning; M - Meio / Middle; F - Fim / End DIREÇÃO / DIRECTION (2) T - Transversal / Transverse; L - Longitudinal / Longitudinal; D - Diagonal / Diagonal	(2) INCLUSÕES TIPO / TYPE A - Sulfeto / Sulfide B - Alumínio / Aluminate C - Silício / Silicate D - Óxido / Oxide T - Total / Total SÉRIE F - Fina / Thin G - Grossa / Heavy	

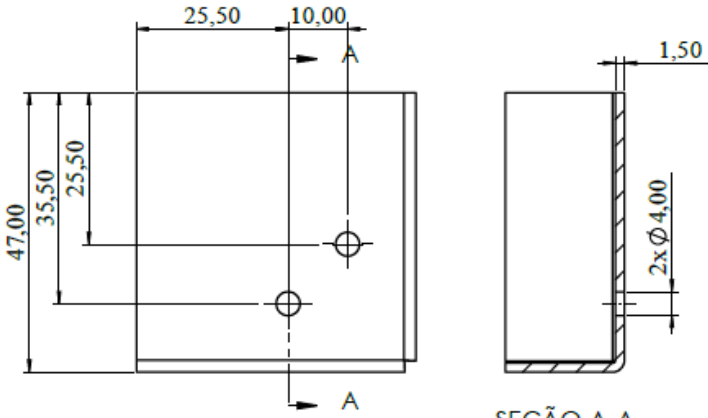
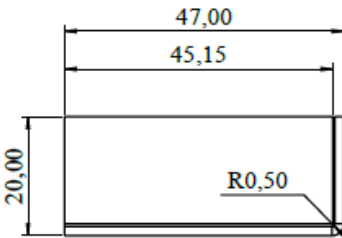
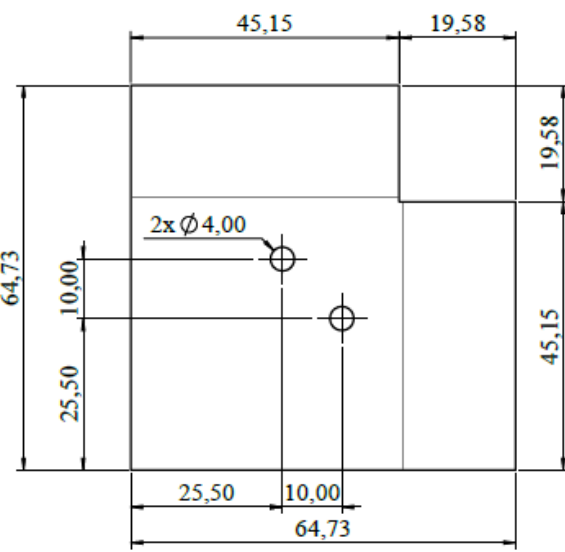
CERTIFICAMOS QUE O MATERIAL AQUI DESCRITO, FOI INSPECIONADO E APROVADO DE ACORDO COM AS ESPECIFICAÇÕES QUE NÃO ESTÁ CONTAMINADO POR RADIOATIVIDADE ACIMA DOS LIMITES NORMAIS E QUE O MATERIAL NÃO SOFREU CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO DURANTE O SEU PROCESSO DE FABRICAÇÃO. / WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN SATISFACTORY INSPECTED IN ACCORDANCE WITH THE SPECIFICATIONS, HAS NOT BEEN CONTAMINATED BY ANY RADIOACTIVITY ABOVE NORMAL BACKGROUND LEVELS AND HAS NOT COME INTO CONTACT WITH ANY MERCURY BEARING INSTRUMENTS OR MERCURY CONTAMINANTS DURING ITS PRODUCTIVE PROCESS.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO: DECAPAGEM - LAMINADOR A FRIO CONTÍNUO - RECOZIMENTO EM CAIXA - LAMINADOR DE ENCRUAMENTO - RECOZIMENTO CONTÍNUO - GALVANIZAÇÃO / MANUFACTURING PROCESS: PICKLING LINE - TANDEN COLD MILL- BATCH ANNEALING FURNACE - SKIN-PASS MILL - ANNEALING FURNACE - CONTINUOUS HOT-DIP GALVANIZING LINE.

CERTIFICAÇÕES: IATF 16949, ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001.


Carlos Alberto Ferreira
 Gerência de Assistência Técnica a Clientes
 Customer Technical Support Manager

ANEXO B – DESENHO TÉCNICO DO CORPO DE PROVA

<p>Localizações: Desenhos IGS: Servidor:\04-Desenhos Iges\Desenhos Matrizes\Código* Desenhos DXF: Servidor:\02-Projeto de Ferramentas\08-Desenhos Dxf\Código*</p>													
<p>O.S.:</p>													
<p>Processo:</p>	<p style="text-align: center;">Peça desenvolvida</p> 												
<p>Tempo OPER.</p>													
<p>Fresa Desbaste</p>													
<p>Retifica</p>													
<p>Cnc</p>													
<p>Fresa Conven.</p>													
<p>Torno</p>													
<p>Eletro-Penet.</p>													
<p>Eletro-Fio</p>													
<p>Bancada</p>													
<p>Tolerâncias quando não especificadas:</p> <table border="1" data-bbox="247 1736 427 1861"> <tr> <td>0</td> <td>± 1</td> </tr> <tr> <td>0,0</td> <td>± 0,1</td> </tr> <tr> <td>0,00</td> <td>± 0,01</td> </tr> <tr> <td>0,000</td> <td>± 0,001</td> </tr> <tr> <td>± 15</td> <td></td> </tr> </table> <p>▽ - Desbastado ▽ - Acabado ▽▽ - Retificado ▽▽▽ - Polido</p>	0	± 1	0,0	± 0,1	0,00	± 0,01	0,000	± 0,001	± 15		<p>Denominação do Componente: Corpo de prova</p>	<p>N° Comp. Quant.</p>	<p>SAE 1006 Material</p>
0	± 1												
0,0	± 0,1												
0,00	± 0,01												
0,000	± 0,001												
± 15													
<p>Projeto:</p>	<p>Dissertação de Mestrado - Avaliação retronono elástico</p>		<p>Tratamento Térmico: Dureza: Prof. da Camada:</p>										
<p>BIGFER</p>	<p>Projetista: Cristan Onzi</p>	<p>Data: 05/04/21</p>	<p>Código da Ferramenta: Código do Produto: Escala: 1:1</p>										

ANEXO C – MODELAGEM DO CONJUNTO PRINCIPAL DA MATRIZ PARA O DOBRAMENTO

