



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO**



VALNEI FELICIANO DE SOUZA

**ANÁLISE DO RETORNO ELÁSTICO DO AÇO NBR 6656 LNE 380
SUBMETIDO AO PROCESSO DE DOBRAMENTO GUIADO EM
MATRIZ GIRATÓRIA**

**OURO PRETO - MG
2019**

VALNEI FELICIANO DE SOUZA

valnei.souza@bol.com.br

**ANÁLISE DO RETORNO ELÁSTICO DO AÇO NBR 6656 LNE 380
SUBMETIDO AO PROCESSO DE DOBRAMENTO GUIADO EM
MATRIZ GIRATÓRIA**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Diogo Antônio de Sousa

**OURO PRETO – MG
2019**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729a Souza, Valnei Feliciano de .
Análise do retorno elástico do aço NBR 6656 LNE 380 submetido ao processo de dobramento guiado em matriz giratória. [manuscrito] / Valnei Feliciano de Souza. - 2019.

77 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

1. Chapas de aço - Dobramento. 3. Aço de alta resistência - Retorno elástico. 4. Aço de alta resistência e baixa liga (ARBL). I. Sousa, Diogo Antônio de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

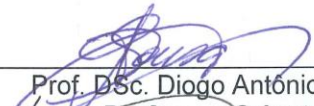


UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

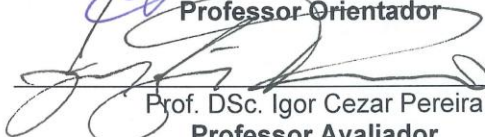
ATA DA DEFESA

Aos 05 dias do mês de Dezembro de 2019, às 13h 00min, na sala Auditório, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno Valnei Feliciano de Souza, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. DSc. Diogo Antônio de Sousa, Prof. DSc. Igor Cezar Pereira e Prof. MSc. Sávio Sade Tayer. O candidato apresentou o trabalho intitulado: **“Análise do retorno elástico do aço NBR 6656 LNE 380 submetido ao processo de dobramento guiado em matriz giratória”**, sob orientação do Prof. DSc. Diogo Antônio de Sousa. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno Aprovado.


Ouro Preto, 05 de Dezembro de 2019.



Prof. DSc. Diogo Antônio de Sousa
Professor Orientador



Prof. DSc. Igor Cezar Pereira
Professor Avaliador



Prof. MSc. Sávio Sade Tayer
Professor Avaliador



Valnei Feliciano de Souza
Aluno

A Deus dedico mais esta etapa vencida,
a meus pais pelo apoio.

A minha querida esposa, pela
compreensão, carinho e companheirismo
de sempre.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela saúde e por me guiar durante esta trajetória.

Aos meus pais pelos ensinamentos e pela formação do meu caráter, a minha irmã pela amizade e atenção de sempre.

A minha querida esposa pelo companheirismo, pela compreensão, carinho e incentivo.

Ao meu professor orientador Diogo, pela orientação, dedicação e suporte para realização deste estudo.

Aos professores e colegas da Escola de Minas por todos os ensinamentos.

A Universidade Federal de Ouro Preto pela oportunidade.

A Usiminas – Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A pela doação de amostra do material para realização deste estudo.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

A concepção de novas ligas está associada às exigências e aos contínuos desafios do mercado de aço. A indústria automobilística é um dos maiores mercados para aços de alta resistência e baixa liga, no entanto, o grande objetivo desse setor tem sido oferecer materiais cada vez mais inovadores, focando principalmente na obtenção de um nível cada vez mais alto de segurança, conforto e redução de peso nos veículos. O dobramento é uma das operações mais importantes de conformação de chapas dentre processos de conformação mecânica. Durante estas operações, entretanto, ocorre o fenômeno de recuperação elástica. Esse trabalho propõe analisar o retorno elástico após operação de dobramento em perfil cartola de amostra do aço NBR 6656 LNE 380, cujos corpos de prova foram retirados da amostra no sentido de laminação e perpendicular ao sentido de laminação da chapa. Para isto chapas de 2mm de espessura foram submetidas ao processo de dobramento guiado em matriz giratória, conformando o material em perfil “cartola”, uma vez que essa matriz foi projetada e construída considerando a geometria aproximada e as dimensões médias das utilizadas em estruturas veiculares como por exemplo, longarinas e travessas. Após o dobramento foram medidos os ângulos de dobra e comparados os valores com o ângulo de construção da matriz, obtendo assim os valores do retorno elástico. Verificou-se baixos valores de retorno elástico quando comparados com os valores encontrados por Frees (2017) que foram de 6 e 7°, onde no presente trabalho o maior valor de retorno elástico encontrado foi no dobramento do corpo de prova CP03 retirado no sentido de laminação da chapa, com $\theta_3=4,252^\circ$. Diante das diferenças encontradas verificou-se que o fato dos valores encontrados serem menores que os valores obtidos por Frees (2017) ocorreu devido a diferença da espessura do material trabalhado e das características geométricas da operação, ou seja, o tipo de construção da matriz de dobramento que favorece um menor retorno elástico. Com a utilização do método de Análise de Variância *ANOVA*, foi possível constatar e afirmar que o sentido de laminação da chapa não interfere no valor do retorno elástico do material.

Palavras-chave: Dobramento, Aços de Alta Resistência e Baixa Liga, Retorno elástico.

ABSTRACT

The design of new alloys is associated with the ongoing attempts and challenges of the steel market. The automotive industry is one of the largest markets for high strength and low alloying, yet the industry's main goal is to offer ever more innovative materials, focusing primarily on utilizing an ever-higher level of safety, comfort and reduction. weight in vehicles. Bending is one of the most important sheet metal forming operations among mechanical transformation processes. During these operations, however, the phenomenon of elastic recovery occurs. The work analyzed or the elastic return after the bending operation on the steel sample profile of NBR 6656 LNE 380, the specimens were removed from the sample without lamination direction and perpendicular to the plate lamination direction. For this, the 2mm thick plates were subjected to a guided bending process in the rotating die, according to the material in the “top hat” profile, since this die was designed and considered an approximate geometry and as the measures of use in machines. vehicles such as stringers and sleepers. After bending were measured at inclination angles and the values were compared with the construction angle of the matrix, thus obtaining the elastic return values. Low elastic return values were verified when compared to the values found by Frees (2017) which were 6 and 7°, where no present work or higher elastic return value found was bent in the CP03 specimen taken in the direction of lamination of the. plate, with = 4,252 °. Given the differences found, it was verified the fact that the values found are smaller than the values received by Frees (2017), there was a difference in the thickness of the material worked and the geometrical characteristics of the operation, that is, the type of construction of the folding matrix that favors a lower elastic return. Using the ANOVA Analysis of Variance method, it was possible to verify and indicate which direction of the plate lamination does not interfere with the elastic return value of the material.

Keywords: *Folding, High Strength and Low Alloy Steels, Elastic Return.*

LISTA DE SIMBOLOS

| | |
|-----------|---|
| A | Área (mm ²) |
| A_0 | Área inicial da seção (mm ²) |
| C | Coefficiente de resistência do material ($k_f=C.\varphi_n$) |
| E | Módulo de elasticidade (N/mm ²) |
| F | Força (N) |
| $F_{máx}$ | Força máxima (N) |
| F_d | Força de dobramento (N) |
| K | Fator de retorno elástico |
| L | Comprimento total do corpo de prova (mm) |
| L_0 | Comprimento inicial (mm) |
| L_s | Comprimento final (mm) |
| LN | Linha neutra |
| LM | Linha média |
| n | Índice de encruamento |
| R | Índice de anisotropia |
| $r_{mín}$ | Raio mínimo de dobramento |
| r_1 | Raio final após retorno elástico (mm) |
| S_0 | Espessura inicial da chapa (mm) |
| S_1 | Espessura final da chapa (mm) |
| V | Volume (mm ³) |
| W | Distância entre apoios (mm) |
| Y | Posição das fibras da chapa (mm) |

LISTA DE SIMBOLOS GREGOS

| | |
|---------------------|---|
| α | Ângulo de dobramento (°) |
| α_1 | Ângulo de dobramento antes do retorno elástico (°) |
| α_2 | Ângulo de dobramento após o retorno elástico (°) |
| β_1 | Ângulo antes do retorno elástico conforme NBR ABNT 6153 (°) |
| β_2 | Ângulo após retorno elástico conforme NBR ABNT 6153 (°) |
| α_s | Ângulo do retorno elástico (°) |
| ε | Deformação relativa (%) |
| ε_d | Deformação relativa no dobramento (%) |
| δ | Alongamento (%) |
| ε_p | Deformação permanente no final da zona elástica (%) |
| ε_{esc} | Tensão de escoamento convencional (MPa) |
| $\varepsilon_{máx}$ | Deformação máxima no dobramento (%) |
| $\sigma_{máx}$ | Tensão máxima (MPa) |
| $\sigma_{0,2}$ | Tensão de escoamento convencional para 0,2% (MPa) |
| σ | Tensão normal (MPa) |
| φ | Deformação verdadeira |
| φ_d | Deformação verdadeira no dobramento |
| Δ_b | Deformação absoluta na largura (mm) |
| Δ_l | Deformação absoluta no comprimento (mm) |
| Δ_s | Deformação absoluta na espessura (mm) |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AHSS | Aço Avançado de Alta resistência (<i>Advanced High Strength Steel</i>) |
| AISI | Instituto Americano de Ferro e Aço (<i>American Iron And Steel Institute</i>) |
| ANOVA | Análise de Variância (<i>Analysis of variance</i>) |
| CP | Corpo de Prova |
| DEMEC | Departamento de Mecânica |
| DEMET | Departamento de Metalurgia |
| HSLA | Aço de Alta Resistência e Baixa Liga (<i>High Sthenght Low Alloy Steel</i>) |
| LNE | Aço Especial para Longarinas |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| UFOP | Universidade Federal de Ouro Preto |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura de aço do automóvel..... | 1 |
| Figura 2 - Tensão máxima x Alongamento | 2 |
| Figura 3 - Curva Tensão x Deformação de Engenharia | 7 |
| Figura 4 - Dispositivo utilizado para realizar ensaio de tração | 9 |
| Figura 5 - Curva de Engenharia x Deformação..... | 10 |
| Figura 6 - Dimensões esquemáticas em um ensaio de tração..... | 11 |
| Figura 7 - Curva Tensão Deformação de Engenharia e Verdadeira..... | 12 |
| Figura 8 - Corpo de prova com seção retangular..... | 13 |
| Figura 9 - Direção do corte dos corpos de prova..... | 16 |
| Figura 10 - Perfis passíveis de serem fabricados por dobramento | 18 |
| Figura 11 - Processos de dobramento..... | 19 |
| Figura 12 - Representação de peça dobrada e linha neutra | 20 |
| Figura 13 - Primeira etapa (a) e segunda etapa (b) dobramento livre | 22 |
| Figura 14 - Modalidades do dobramento semi-guiado..... | 22 |
| Figura 15 - Representação do dobramento guiado (a) início e (b) final..... | 23 |
| Figura 16 - Representação do dobramento em V | 23 |
| Figura 17 - Representação do dobramento em U | 24 |
| Figura 18 - Representação do dobramento a fundo..... | 25 |
| Figura 19 - Representação do dobramento em matriz giratória | 25 |
| Figura 20 - Dobramento em matriz de deslizamento | 26 |
| Figura 21 - Representação do raio mínimo de dobra (r_{min})..... | 27 |
| Figura 22 - Esforços de tração e compressão no dobramento | 29 |
| Figura 23 - Representação do dobramento de chapas metálicas | 31 |
| Figura 24 - Tensões e deformações no dobramento elástico-plástico..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 - Representação dos raios de dobramento | 33 |
| Figura 26 - Deformações no dobramento | 33 |
| Figura 27 - Carregamento centralizado e ângulos considerados | 35 |
| Figura 28 - Ângulos considerados para cálculo da força de dobramento (F_d) | 35 |
| Figura 29 - Comparativo retorno elástico aço doce - aço alta resistência | 37 |
| Figura 30 - Representação do fenômeno retorno elástico | 38 |
| Figura 31 - Diferentes tipos de retorno elástico em perfil cartola | 40 |
| Figura 32 - Mecanismo de ondulação lateral..... | 41 |
| Figura 33 - Demonstração de torções no flange e parede do perfil | 42 |
| Figura 34 - Representação de uma matriz de dobramento | 45 |
| Figura 35 - Ilustração da geometria da amostra: dimensões em milímetro (esquerda), sentido de laminação (direita/superior) e sentido perpendicular (direita/inferior)..... | 50 |
| Figura 36 - Corpos de prova sentido laminação (inferior) sentido perpendicular (superior) ... | 51 |
| Figura 37 - Representação matriz giratória (esquerda) e dobramento guiado (direita)..... | 52 |
| Figura 38 - Torno Romi Centur 30D (esquerda) Fresa Romi D600 (direita)..... | 52 |
| Figura 39 - Prensa hidráulica 15ton..... | 53 |
| Figura 40 - Conformação da amostra em perfil cartola..... | 58 |
| Figura 41 - Máquina de medição tridimensional..... | 53 |
| Figura 42 - Projeto fabricação da matriz | 55 |
| Figura 43 - Vista explodida da matriz de dobramento | 56 |
| Figura 44 - Base, punção e roletes (esquerda) placas, eixos e rolamentos (direita)..... | 57 |
| Figura 45 - Início da montagem da matriz (esquerda) - Término da montagem (direita)..... | 57 |
| Figura 46 - Superfícies dos perfis cartola no sentido de laminação | 59 |
| Figura 47 - Superfícies dos perfis cartola no sentido perpendicular à laminação | 59 |
| Figura 48 - Superfície dos roletes após dobramento | 60 |
| Figura 49 - Superfície do punção após dobramento | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 50 - Perfis dobrados no sentido de laminação (inferior) sentido perpendicular (superior) | 61 |
| Figura 51 - Definição dos ângulos..... | 61 |
| Figura 52 - Medição do ângulo de dobramento (esquerda) e painel de demonstração do ângulo medido (direita) | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Raios mínimos para dobramento de chapas de aço com espessura de até 7mm conforme DIN 6935..... | 28 |
| Tabela 2 - Raios mínimos para dobramento de chapas de aço com espessura entre 7 até 20mm de espessura conforme DIN 6935..... | 29 |
| Tabela 3 - Tabela de equivalência de normas para aços HSLA | 43 |
| Tabela 4 - Tabela comparativa das propriedades químicas do aço LNE 380 entre norma e fabricante | 44 |
| Tabela 5 - Tabela comparativa das propriedades químicas do aço LNE 380 entre norma e fabricante | 44 |
| Tabela 6 - Composição química e propriedades mecânicas aço LNE 380..... | 49 |
| Tabela 7 - Resultados das medições dos ângulos após realização dos ensaios..... | 62 |
| Tabela 8 - Anova - Fator duplo com repetição..... | 64 |
| Tabela 9 - Comparação valor calculado e valor tabelado..... | 64 |
| Tabela 10 - Teste f: Duas amostras para variâncias | 72 |
| Tabela 11 - Teste t: Duas amostras presumindo variâncias equivalentes..... | 73 |
| Tabela 12 - Teste f: Duas amostras para variâncias | 74 |
| Tabela 13 - Teste t: Duas amostras presumindo variâncias equivalentes..... | 75 |
| Tabela 14 - Teste f: Duas amostras para variâncias | 76 |
| Tabela 15 - Teste t: Duas amostras presumindo variâncias equivalentes..... | 77 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Formulação do Problema..... | 1 |
| 1.2 | Justificativa..... | 3 |
| 1.3 | Objetivos..... | 4 |
| 1.3.1 | Geral | 4 |
| 1.3.2 | Específicos..... | 4 |
| 1.4 | Estrutura do Trabalho | 5 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1 | Propriedades Mecânicas dos Materiais..... | 6 |
| 2.1.1 | Conceitos sobre Tensão e Deformação | 7 |
| 2.1.2 | Curva tensão x deformação | 9 |
| 2.1.3 | Curva de Escoamento | 12 |
| 2.1.4 | Índice de Anisotropia..... | 15 |
| 2.2 | Processo de Dobramento | 17 |
| 2.2.1 | Tipos de Dobramento | 21 |
| 2.2.2 | Raio Mínimo de Dobra..... | 26 |
| 2.2.3 | Tensões no Dobramento | 29 |
| 2.2.4 | Deformações no Dobramento..... | 33 |
| 2.2.5 | Força de Dobramento | 34 |
| 2.2.6 | Retorno Elástico no Dobramento | 36 |
| 2.3 | Aço NBR 6656 LNE 380..... | 43 |
| 2.4 | Matriz de dobramento..... | 45 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 47 |
| 3.1 | Tipo de Pesquisa..... | 47 |
| 3.2 | Materiais e Métodos | 49 |
| 3.2.1 | Corpos de Prova | 50 |
| 3.2.2 | Elaboração da Matriz de Dobramento | 51 |
| 3.2.3 | Ensaio de Dobramento | 52 |
| 3.2.4 | Medição dos ângulos | 53 |
| 3.3 | Instrumento de Coleta de Dados..... | 54 |
| 3.4 | Tabulação e Análise de Dados..... | 54 |
| 3.5 | Conclusões Finais | 54 |

| | | |
|----------|---|--------------------------------------|
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 55 |
| 4.1 | Projeto da Matriz de Dobramento | 55 |
| 4.1.1 | Construção da matriz de dobramento | 57 |
| 4.2 | Realizados dos ensaios | 58 |
| 4.2.1 | Avaliação da superfície do material após o dobramento | 59 |
| 4.2.2 | Avaliação da superfície dos componentes da matriz após dobramento | 59 |
| 4.2.3 | Medição dos Ângulos de Dobramento | 61 |
| 4.2.4 | Retorno Elástico | 63 |
| 5 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 67 |
| 5.1 | Conclusões | 67 |
| 5.2 | Recomendações | Erro! Indicador não definido. |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 68 |
| | ANEXO A..... | 72 |
| | ANEXO B..... | 73 |
| | ANEXO C..... | 74 |
| | ANEXO D..... | 75 |
| | ANEXO E..... | 76 |
| | ANEXO F..... | 77 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Muitos governos, como é o caso do Brasil, estão tornando cada vez mais rigorosas as legislações de trânsito quanto a segurança dos passageiros. Diante disso a indústria automobilística vem sendo desafiada a propor e criar soluções em projetos que visam a economia de combustível e redução da emissão de poluentes. Visando atender essas demandas e exigências estão sendo empregados na estrutura automotiva os aços avançados de alta resistência (ULSAB AVC *apud* Brandão, 2015).

Com o alto consumo de bens de elevada tecnologia pela sociedade moderna, os processos de fabricação vêm se aprimorando para suprir tal demanda. No ano de 2011 foram emplacados em torno de 3,63 milhões de automóveis no Brasil conforme notícia vinculada à meios populares de comunicação (GLOBO, 2012). Sendo o automóvel um bem visado e amado pela maioria da população, e quase todo ele é constituído por peças de aço obtidas através de algum processo de conformação.

Na Figura 1 é possível observar que a estrutura veicular é composta por diversas partes as quais são produzidas com materiais metálicos e fabricadas pelo processo de conformação mecânica.

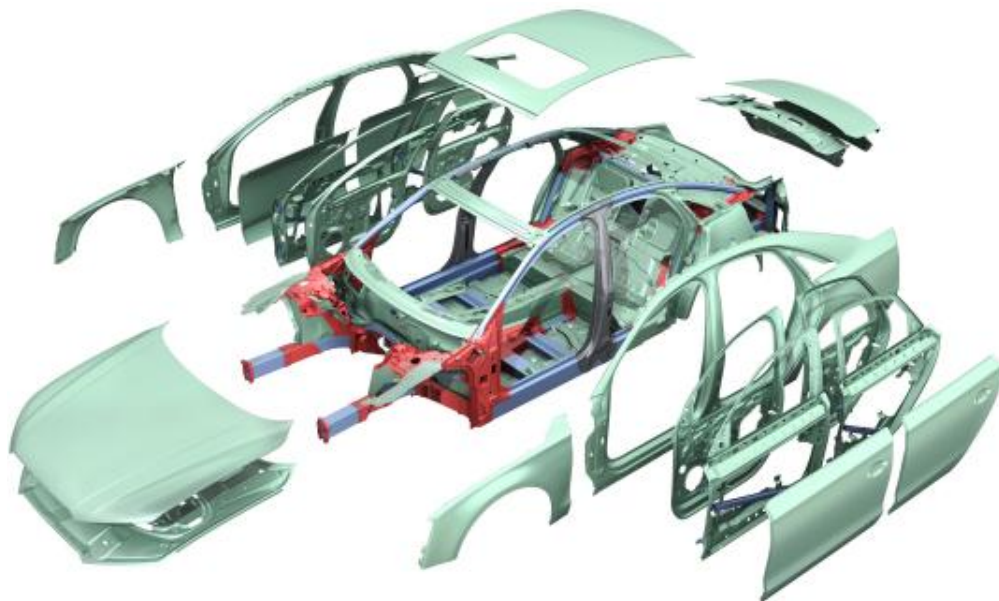


Figura 1 - Estrutura de aço do automóvel

Fonte: <https://www.greencarcongress.com/2017/05/20170512-audia8.html>, (2019).

Segundo Oshiro (2013), a indústria automobilística, por toda a história, tem utilizado predominantemente aços, sendo assim a principal matéria prima aplicada à fabricação de veículos. Nos últimos anos vêm substituindo estes por materiais mais leves e resistentes, como alumínio, compósitos, polímeros, etc, que apresentam vantagens em relação aos metais quanto à resistência mecânica, à corrosão, à conformidade e consumo de combustível devido à redução de peso das carrocerias. Acredita-se que a cada 10% de redução de peso, pode-se obter de 3 a 7% em economia de combustível e conseqüentemente a redução de emissão de poluentes.

No entanto, a indústria siderúrgica vem trabalhando para desenvolver aços que possuam alta resistência e boa conformabilidade, visando recuperar mercado e garantir as vendas no futuro. Aços que sejam capazes de aliar alta resistência mecânica, redução de peso e maior capacidade de absorção de impacto (OSHIRO, 2013).

Um dos principais objetivos do setor automobilístico vem sendo a redução de peso dos veículos, a fim de diminuir o consumo de combustíveis e, conseqüentemente, a emissão de gases provenientes da queima de hidrocarbonetos, que contribuem para o aumento do efeito estufa (GIRALT, 1999).

Em decorrência da demanda por veículos mais seguros e menos poluentes, as indústrias siderúrgicas têm investido em pesquisas de novos tipos de aços que possibilitem a combinação de elevada resistência mecânica e conformabilidade. Dentre esses novos desenvolvimentos, destacam-se os aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), que por possuírem propriedades mecânicas interessantes para este tipo de aplicação a utilização destes aços têm aumentado a cada ano (KEELER E KIMCHI, 2014). Na Figura 2 pode se observar a relação entre limite de resistência e alongamento de vários aços, dentre eles os aços HSLA.

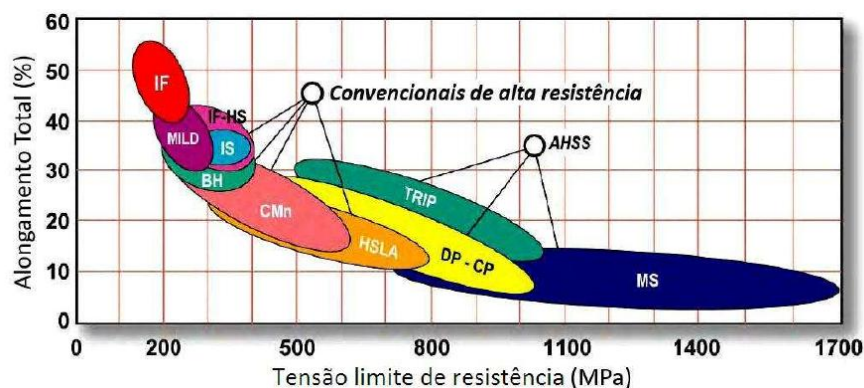


Figura 2 - Tensão máxima x Alongamento

Fonte: <https://www.lyengar.com.br> Lyengar *apud* Lajarim 2012

O aumento da resistência mecânica destes aços permite que chapas de menor espessura sejam usadas em componentes dos automóveis, sem comprometer a segurança e absorção de impacto em caso de colisão.

Um dos processos de conformação dos quais os aços de alta resistência são submetidos é o processo de dobramento, nele a conformação ocorre por flexão, no qual as modificações da geometria são provocadas pela presença de um momento fletor, mediante a aplicação de tensões. Esse princípio é utilizado para dobrar chapas, barras e outros produtos (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011). Embora seja um processo relativamente simples e há muitos anos aplicado na indústria, ele tem amplas aplicações, pois utilizando-o é possível produzir componentes com geometrias simples, mas também, estruturas complexas.

É importante que se conheça as propriedades mecânicas do material, produtos produzidos em aço utilizando o processo de dobramento, estão sujeitos, em sua maioria, a recuperação elástica. Este fenômeno tem de ser previsto para que o ângulo de dobramento seja ajustado de tal forma que após a conformação, e conseqüentemente, a recuperação elástica, o produto esteja com o ângulo final conforme o especificado no projeto. Diante disso através dos resultados produzidos e analisados neste trabalho, espera-se contribuir para uma maior aplicabilidade do aço NBR 6656 LNE 380 na indústria visando a redução de custos e a qualidade final do produto. Uma vez que este aço está sendo desenvolvido pela empresa Siderúrgica Usiminas e tem como aplicação primária a indústria automotiva, na fabricação de elementos estruturais dos veículos.

Tendo em vista a importância dos aços de alta resistência, e baseando-se no contexto descrito, tem-se a seguinte questão problemática:

Como analisar o retorno elástico do aço NBR 6656 LNE 380 submetido ao processo de dobramento guiado em matriz giratória?

1.2 Justificativa

O desenvolvimento de aços para aplicações na indústria automotiva é de suma importância, pois suas características e propriedades mecânicas podem levar ao desenvolvimento de veículos mais econômicos, mais seguros e menos poluentes, quando comparados a outros produzidos há poucas décadas atrás. Portanto o potencial destes novos

aços, como substituto barato e de qualidade para os aços em utilização corrente na indústria é enorme, o que justifica um estudo mais aprofundado, visando o aprimoramento deste aço e suas aplicações.

Além da análise mecânica do material, o projeto da matriz de dobramento, considerando a geometria das amostras deste trabalho, tem alta relevância, pois o custo de produção do ferramental e os esforços envolvidos neste processo são significativamente mais baixos, quando comparados com o processo de estampagem.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

- Analisar o retorno elástico do aço NBR 6656 LNE 380 durante processo de dobramento em perfil “cartola”.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre as propriedades do material estudado a partir de diversas bibliografias, incluindo livros, revistas, normas técnicas e artigos a respeito do processo de dobramento e aços de alta resistência e baixa liga;

- Projetar e construir uma matriz para execução de dobramento guiado em matriz giratória a fim conformar amostras em perfil “cartola”;

- Executar o dobramento com amostras retiradas no sentido de laminação da chapa e em sentido perpendicular;

- Avaliar o comportamento estrutural da matriz, por exemplo, integridade estrutural e repetibilidade dos ensaios;

- Medir e analisar o retorno elástico do aço LNE 380 após dobramento guiado em matriz giratória;

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos que se apresentam da seguinte forma:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica e teorias a respeito dos aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) e tipos de dobramento.

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados a partir do estudo de caso sobre os aços de alta resistência e baixa liga, bem como os resultados do ensaio de dobramento realizado em amostra do aço NBR LNE 380.

O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades Mecânicas dos Materiais

O comportamento mecânico de qualquer material utilizado no processo de conformação é caracterizado de acordo com sua estrutura interna e sua forma construtiva. No entanto, é necessário que se conheça as propriedades destes materiais. As propriedades mecânicas compreendem a resposta dos materiais às influências mecânicas externas, manifestadas pela capacidade de desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis, e resistirem à fratura. Essas características dos materiais são geralmente avaliadas por meio de ensaios que indicam dependências tensão-deformação (HARTER, 2013).

De acordo com Callister (2012), é possível a verificação das propriedades mecânicas dos materiais através de experimentos de laboratório, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Alguns fatores devem ser considerados como a natureza da carga aplicada e a duração da sua aplicação, bem como as condições ambientais. Esta carga aplicada pode ser de tração, compressão ou de cisalhamento, e sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou então flutuar continuamente. Esta carga pode ser aplicada em fração de segundo, ou pode se estender ao longo de um período de anos.

Segundo Schaeffer *apud* Frees (2017), existem testes e diferentes formas de análises que são realizados a fim de caracterizar as propriedades dos materiais, os principais testes são:

- O ensaio de tração que indica as principais propriedades (tensão de escoamento, tensão máxima, tensão de ruptura, módulo de elasticidade, ductilidade, energia por unidade de volume, etc);
- A curva de escoamento que é construída a partir de um ensaio de tração e descreve o comportamento plástico de um metal;
- O índice de anisotropia que caracteriza a influência das propriedades relacionadas com os efeitos das direções de conformação do processo de laminação;
- As curvas que demonstram os limites máximos de deformação relacionados com as três principais direções de deformação, denominadas curvas limites de conformação.

2.1.1 Conceitos sobre Tensão e Deformação

Os conceitos de tensão e deformação são muito úteis para definir grandezas que não dependem do tamanho relativo dos materiais envolvidos, como por exemplo, na caracterização de um material através de um ensaio de tração.

Um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais comuns é executado sob ‘tração’. O ensaio de tração pode ser utilizado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais que são importantes em projetos (CALLISTER, 2012).

No ensaio de tração é possível obter a curva tensão versus deformação de um material através da quantidade de carga exercida em um corpo de prova e seu alongamento. A Figura 3 exemplifica uma curva tensão versus deformação de engenharia junto ao comportamento de um corpo de prova submetido ao ensaio de tração descrito pelas etapas “1” a “4”.

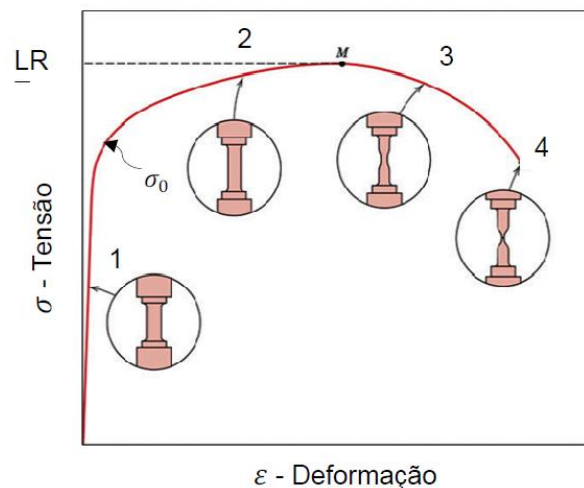


Figura 3 - Curva Tensão x Deformação de Engenharia

Fonte: Callister (2012)

Através da curva obtida no ensaio de tração, mostrada na Figura 3, pode-se observar que o corpo de prova na posição “1” está situado na região elástica, onde a tensão é linearmente proporcional a deformação. Com o aumento da carga, até o valor específico correspondente ao limite de escoamento, o “CP” sofre uma deformação plástica generalizada. Neste instante, o “CP” na condição “2” está deformado de forma permanente, embora ainda exista uma discreta recuperação elástica no material deformado. Neste momento, o aumento do encruamento do material faz com que o equipamento de ensaio produza mais tensão para aumentar a deformação plástica no “CP”. Conforme o “CP” se alonga, a área de sua seção transversal decresce uniformemente ao longo do seu comprimento útil.

No início, o encruamento consegue suprir a diminuição da área da seção transversal do “CP” e a tensão de engenharia continua a aumentar com o aumento da deformação. Entretanto, há um ponto onde toda deformação plástica posterior será concentrada e haverá a diminuição da área da seção reta do “CP”, conforme a condição “3”.

Como resultado, há a formação de um pescoço no “CP” da condição “4”, que cada vez mais irá se afinar diminuindo a seção reta rapidamente e fazendo com que a carga necessária para deformar o “CP” diminua, até que ocorra o rompimento total do material ensaiado.

Callister (2012), diz que após ocorrer o escoamento do material, a tensão necessária para continuar a deformação plástica aumenta até um valor máximo, o ponto M, e em seguida diminui até ocorrer a fratura, no ponto 4. O limite de resistência a tração é a tensão no ponto máximo da curva tensão versus deformação de engenharia. Este limite corresponde à tensão máxima que o material suporta quando está sob tração. Após esta tensão aplicada, se ela for mantida, o resultado será uma fratura. Toda deformação até este ponto é uniforme ao longo da região estreita do corpo de prova que se encontra sob tração. Contudo, nessa tensão máxima, ocorre o fenômeno conhecido com empescoçamento, que acontece após uma pequena constrição, ou pescoço, que se forma em algum ponto e ficar confinada neste pescoço.

Perini (2008) afirma que o ensaio de tração é um ensaio destrutivo, ou seja, submete o material a um esforço uniaxial a fim de alongá-lo e deformá-lo até a ruptura; A partir desse ensaio é possível conhecer o comportamento dos materiais em relação às tensões de tração, identificar quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento pode se romper. O ensaio de tração é muito utilizado na engenharia com objetivo de fornecer informações básicas sobre as características mecânicas dos materiais para aplicação em projeto estrutural e seleção de materiais (SCHMITZ, 2013).

Callister (2012) ainda relata que, a máquina de ensaios de tração como mostra a figura 4, é projetada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, além de medir contínua e simultaneamente a carga instantânea aplicada (com uma célula de carga), e os alongamentos resultantes (usando um extensômetro). Tipicamente, um ensaio de tração leva vários minutos para ser executado e é destrutivo, isto é, a amostra testada é deformada de maneira permanente, sendo geralmente fraturada.

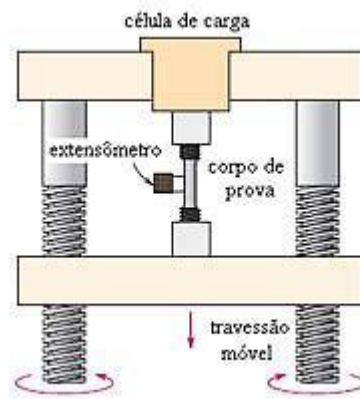


Figura 4 - Dispositivo utilizado para realizar ensaio de tração

Fonte: Callister (2012)

Como pode ser observado na Figura 4, o corpo de prova é alongado pelo travessão móvel, uma célula de carga e um extensômetro medem respectivamente, a magnitude da carga aplicada e o alongamento.

De acordo com Callister (2012), o resultado de um ensaio de tração deste tipo é registrado em um registrador gráfico ou por um computador, na forma de carga ou força em função do alongamento. Essas características carga-deformação são dependentes do tamanho da amostra. Por exemplo, se a área da seção reta do corpo de prova for dobrada será necessário o dobro da carga inicial para produzir o mesmo alongamento. Para minimizar esses fatores geométricos, a carga e o alongamento são normalizados de acordo com seus respectivos parâmetros de tensão de engenharia e deformação de engenharia.

2.1.2 Curva tensão x deformação

Durante o ensaio de tração, o gráfico obtido mostra as relações entre a força aplicada e as deformações ocorridas durante o período do ensaio. Mas, o objetivo principal do ensaio é a obtenção da relação entre a tensão e a deformação do material. A tensão é dada pela razão entre a força aplicada, denominada (F), pela área da seção do corpo de prova, denominada (A). Como a seção é variável com a deformação do corpo de prova, a área da seção utilizada para os cálculos é a área da seção inicial do corpo de prova, denominada (A_0).

A força e o deslocamento, que são medidos durante o ensaio de tração, são dependentes tanto da geometria do corpo de prova como do comprimento inicial, estes não

podem por si só descrever o comportamento do material sendo necessário definir alguns parâmetros que o façam. Os parâmetros obtidos no ensaio são mostrados na Figura 5 através da curva de engenharia.

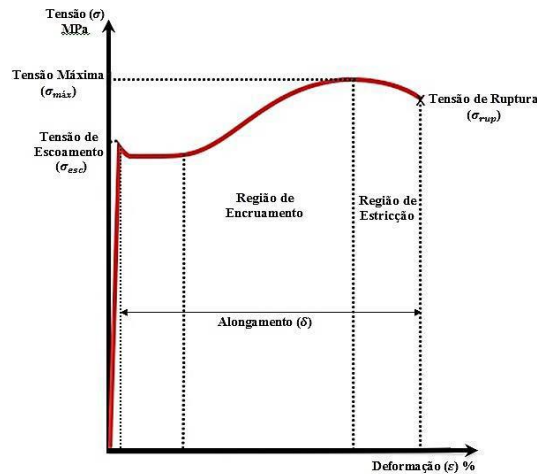


Figura 5 - Curva de Engenharia x Deformação

Fonte: Frees (2017)

Um dos parâmetros mais importante nos processos de conformação é a tensão de escoamento (σ_{esc}), pois após o escoamento inicia a fase de encruamento do material e a tensão máxima ($\sigma_{máx}$), a Figura 5 representa a máxima resistência a tração, a partir daí o material entra na região de instabilidade, ou seja, quando o material começa a sofrer estricção finalizando com o rompimento no ponto indicado como limite de ruptura (SCHAEFFER, 2009).

Matematicamente define-se na equação 1, a tensão de engenharia (σ) que é a razão entre a força (F) e a seção inicial transversal (A_0) do corpo de prova.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

As deformações podem ser caracterizadas como deformação absoluta (Δ_l) determinadas em função dos parâmetros de um ensaio de tração conforme mostra a Figura 6. Uma chapa metálica ou um corpo de prova quando submetido a algum tipo de carregamento diferente do ensaio de tração, está sujeito a um estado complexo de tensões e deformações. Partindo de uma geometria inicial conhecida de comprimento (l_0), largura (b_0), e espessura

(s_0), após findar o carregamento tem-se a geometria final de comprimento (l_1), largura (b_1) e espessura (s_1) também conhecida (NETTO, 2004).

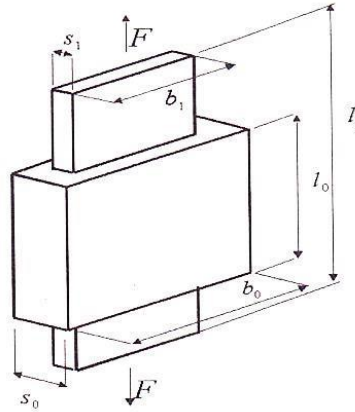


Figura 6 - Dimensões esquemáticas em um ensaio de tração

Fonte: Schaeffer (2004)

Deformações absolutas:

$$\Delta_l = l_1 - l_0 \text{ (No comprimento)} \quad (2)$$

$$\Delta_b = b_1 - b_0 \text{ (Na largura)} \quad (3)$$

$$\Delta_s = s_1 - s_0 \text{ (Na espessura)} \quad (4)$$

A deformação relativa (ε) em relação ao comprimento, também denominado deformação de engenharia e definida de acordo com a equação 5 descrita abaixo:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta_l}{l_0} (100\%) \quad (5)$$

Onde (l_1) é o comprimento instantâneo do corpo de prova e (l_0) é o comprimento inicial do corpo de prova.

Algumas vezes a quantidade ($l_1 - l_0$) é indicada como (Δ_l), e é a deformação no comprimento do corpo de prova. A deformação (ε) pode ser expressa em porcentagem, em que o valor da deformação é multiplicado por 100 (FREES, 2017).

2.1.3 Curva de Escoamento

Souza (1982), relata que a tensão de escoamento é uma propriedade mecânica comum e muito importante que é usada para avaliar a conformabilidade do material. Para tanto, ela decresce com o aumento da tensão de escoamento. A tensão de escoamento meramente indica a tensão onde se inicia a deformação plástica e não indica a quantidade de deformação plástica permissível antes do empescoamento ou estricção. Uma comparação de aço baixo carbono e aço inoxidável é um excelente exemplo. A tensão de escoamento do aço inoxidável pode ser o dobro do aço baixo carbono, mas a conformabilidade é geralmente melhor.

Considera-se uma região muito importante na conformação mecânica a região delimitada entre a tensão de escoamento (σ_{esc}) e a tensão máxima ($\sigma_{máx}$). Pois, nessa região, o limite de escoamento inicia na deformação plástica do material, e a partir do limite de resistência, a deformação deixa de ser generalizada e passa a ser concentrada na região de estricção, momento em que o material se aproxima da ruptura. Porém o comportamento da curva descrita, chamada de tensão versus deformação de engenharia, não fornece um comportamento real da deformação de um metal, pois é inteiramente baseada das dimensões originais do corpo de prova, que também mudam durante o ensaio.

Na Figura 7 é possível observar um exemplo de comparação entre as curvas de tensão versus deformação de engenharia e sua respectiva curva verdadeira.

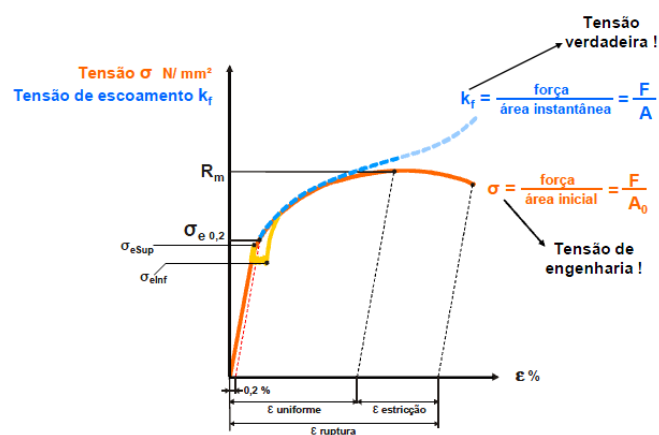


Figura 7 - Curva Tensão Deformação de Engenharia e Verdadeira

Fonte: Souza *apud* Harter (2013)

A curva verdadeira que pode ser observada na Figura 7, esta relaciona a tensão verdadeira (kf) com a deformação verdadeira (φ) e é denominada curva de escoamento.

A variação da tensão de escoamento (kf) que um material apresenta durante uma deformação em função da deformação verdadeira (φ) pode ser obtida por um ensaio de tração uniaxial e é expressa na equação (6).

$$kf = \frac{F}{A} [N/mm^2] \quad (6)$$

Onde (A) mm^2 é a área da seção do corpo de prova em cada instante. E essa seção instantânea (A) pode ser determinada a partir da Constância de Volume:

$$V_0 = V \quad (7)$$

$$A_0 l_0 = A l_1 \quad (8)$$

Rearranjando a equação 8:

$$A = \frac{A_0 l_0}{l_1} \quad (9)$$

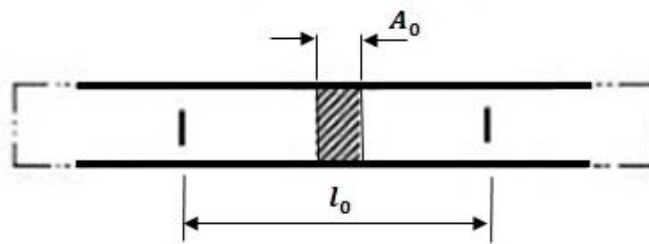


Figura 8 - Corpo de prova com seção retangular

Fonte: Frees (2017).

A Figura 8 mostra um corpo de prova de seção retangular, onde (A_0) é a seção inicial antes da aplicação da força, e (l_0) é o comprimento inicial do corpo de prova. E a deformação verdadeira em cada instante é determinada pela equação 10 expressa abaixo:

$$\varphi = l_n \frac{l_1}{l_0} \quad (10)$$

Callister (2012), relata que de acordo com a comparação esquemática dos comportamentos tensão versus deformação de engenharia e verdadeira mostradas na Figura 7, pode-se observar que a tensão verdadeira necessária para manter uma deformação crescente continua a aumentar após o limite de resistência. Ocorre a formação de um pescoço ou estricção no corpo de prova, onde se concentra um estado de tensão complexo, isto é, a existência de outros componentes de tensão além da tensão axial.

As curvas de escoamento que sempre são obtidas experimentalmente podem ser descritas por uma expressão matemática conhecida como equação de Ludwig. Em geral, na deformação a frio, essa equação tem a seguinte forma:

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad (11)$$

Em que (C) é uma constante do material, também conhecida como coeficiente de resistência do material (para $\varphi=1$) “ n ” é o coeficiente ou índice de encruamento.

De acordo com Souza (1982, p.29);

O limite convencional n de escoamento é um valor convencional internacionalmente para substituir o limite de escoamento. Como foi visto que a determinação dos limites elástico e de proporcionalidade é muito trabalhosa, a substituição pelo limite n é conveniente, porque esse último é determinado mais rapidamente, é mais prático e atende a todos os fins de aplicação dos materiais metálicos na Engenharia, quanto ao conhecimento do início da plasticidade dos metais. O limite n define mais realisticamente a plasticidade em termos de tensão necessária para produzir uma deformação mensurável ou que seja praticamente significativa.

Quando um material sofre deformação plástica, o mesmo sofre um endurecimento devido a modificações permanentes na rede cristalina. Este endurecimento por deformação plástica é chamado de encruamento. Para os aços de alta resistência, os valores de (N) podem ser estimados pela equação 12 descrita abaixo:

$$N = \frac{70}{LE} \quad (12)$$

Onde:

N = Coeficiente de encruamento

LE = Tensão limite de escoamento

Quanto maior o grau de encruamento, maior o grau de homogeneização das deformações, isto é, o material distribui melhor as deformações ao longo de seu volume. Há uma maior capacidade de suportar deformações em relação a outro material com menor grau de encruamento.

2.1.4 Índice de Anisotropia

Souza (1982) relata que em um material trabalhado mecanicamente, suas propriedades mecânicas variam de acordo com a direção em que se retira o corpo de prova para realização do ensaio. Anisotropia é o nome dado a este fenômeno. Isto ocorre devido a orientação preferencial dos grãos do material após uma grande deformação por trabalho mecânico, ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios, segregação ou alinhamento de uma segunda fase precipitada causado também por trabalho mecânico.

Os grãos cristalinos individuais do material são alongados na direção da maior deformação por tração. Este alongamento é consequência do processo de escorregamento do material durante a deformação. Nos materiais policristalinos os grãos tendem a girar para alguma orientação limite devido a um confinamento mútuo entre os grãos. Este mecanismo faz com que os planos atômicos e direções cristalinas dos materiais com orientação aleatória (materiais isotrópicos) adquiram uma textura, ou seja, uma orientação preferencial, fazendo com que os materiais se tornem anisotrópicos (HARTER, 2013).

A textura de um material pode ser avaliada através da relação entre a resistência oferecida à deformação nas diferentes direções do plano e na espessura da chapa, obtidos a partir de um ensaio de tração. O coeficiente de anisotropia plástica (R), é definido como o quociente entre a deformação verdadeira (φ_b) na largura e na espessura do corpo de prova ensaiado (φ_s).

$$R = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (13)$$

Para o ensaio em chapas, Schaeffer (2004), recomenda o uso da lei de constância de volume substituindo a deformação na espessura (φ_s) por $(\varphi_b + \varphi_l)$, visto que o erro para medida da deformação na direção da espessura pode ser grande.

$$R = \frac{\varphi_b}{-\varphi_b + \varphi_l} \quad (14)$$

Como as propriedades mecânicas do material podem ter diferentes direções no plano da mesma, é de interesse uma relação média do comportamento de deformação ao longo deste plano. Pode caracterizar, então, o coeficiente de anisotropia normal, determinado a partir de medidas nas direções paralela (0°), transversal (90°) e a (45°) da direção de laminação, conforme é mostrado na Figura 9.

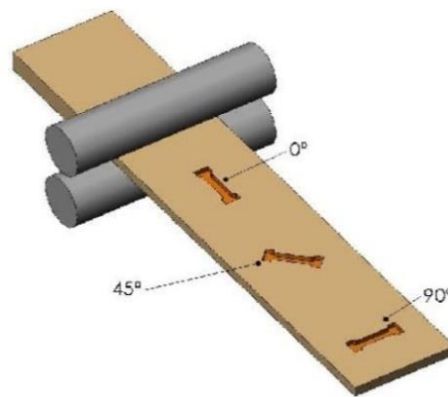


Figura 9 - Direção do corte dos corpos de prova

Fonte: Santos (2013)

Souza (1982), caracteriza a anisotropia planar como a variação dos valores de (R), determinados em corpos de prova situados num mesmo plano de um metal trabalhado, porém, retirados em diferentes direções. Trata-se de um valor muito importante, principalmente para estudos sobre estampagem dos metais. A equação para o cálculo de ($R_{méd}$) é a seguinte:

$$R_{méd} = \frac{1}{4}(R_{0^\circ} + 2.R_{45^\circ} + R_{90^\circ}) \quad (15)$$

Onde: R_{0° , R_{45° e R_{90° , são anisotropias plásticas do corpo de prova de eixo longitudinal a 0°, 45° e 90° respectivamente, em relação à direção de laminação (ABNT NBR 6673).

Um material que possui anisotropia = 1, ou seja, isotrópico, possui suas propriedades mecânicas iguais em todas as direções. Já os materiais anisotrópicos têm valor diferente da

unidade para o índice de anisotropia significando que a diminuição na espessura é menor do que a diminuição na largura em valor relativo para ($R_{méd}$) maior que 1.

De acordo com Srouf Jr, *apud* Frees (2017), quando um material é completamente isotrópico possui todas as propriedades mecânicas associadas, porém na maioria dos casos os grãos tendem a apresentar planos cristalográficos ou direções alinhadas com a direção da primeira conformação. Diante disso, alguns sistemas são orientados, permitindo uma deformação mais fácil em algumas direções do que em outras. E quando as propriedades na direção de laminação são diferentes das direções transversais, cria-se a condição de anisotropia plástica.

2.2 Processo de Dobramento

O termo conformação mecânica compreende uma série de operações responsáveis pela combinação de esforços mecânicos com o objetivo de alterar a forma e as dimensões de um corpo com a manutenção de seu volume. Essa alteração se dá através da ocorrência de deformação plástica, que pode ainda levar a modificações estruturais no material e, conseqüentemente, em suas propriedades mecânicas.

O processo de conformação de metais por dobramento tem substituído com vantagem alguns processos mecânicos como a utilização de chapas dobradas ao invés de perfis laminados. Este processo possui diversas variações do processo, utilizado tanto para produzir geometrias funcionais como para aumento de rigidez de peças (MARCONDES, 2014).

O processo de dobramento que é caracterizado pela versatilidade das formas possíveis de serem obtidas, se destaca dentre os diversos tipos de operações de conformação. Além de ser considerado um processo que possui de alta produtividade, tempo reduzido de processamento, simplificado controle dimensional e pelo consumo relativamente baixo de energia quando comparado a outras operações envolvendo deformação plástica (BRESCIANI FILHO, 2011). A Figura 10 apresenta alguns tipos de perfis passíveis de serem fabricados através do processo de dobramento.



Figura 10 - Perfis passíveis de serem fabricados por dobramento

Fonte: www.perficon.com.br/index.php.link=chapas_dobradas

Para Marcondes (2014), o processo de dobramento é um processo que consiste em deformar plasticamente uma chapa metálica ao longo de uma linha reta, em que na maioria das vezes apresenta uma deformação plana no canto da dobra. Este processo pode ser definido como um sistema de sete componentes: produto, peça/material, equipamento, punção/matriz, zona de deformação, interface e ambiente.

Souza (1982, p.138) relata que;

O ensaio de dobramento fornece uma indicação qualitativa da ductilidade do material. Por ser um ensaio de realização muito simples, ele é largamente utilizado nas indústrias e laboratórios, constando mesmo nas especificações de todos os países, onde são exigidos requisitos de ductilidade para um certo material. O ensaio de dobramento comum não determina nenhum valor numérico, havendo, porém, variação do ensaio que permite obter valores de certas propriedades mecânicas do material.

Segundo Benson (2002), o fato de se conseguir executar uma dobra em qualquer ângulo entre 180° até o ângulo da medida da matriz com as ferramentas, faz com que este processo seja considerado o mais versátil e econômico dentre os demais processos.

Muller (2013) menciona que após cessado o esforço durante um processo dobramento deve-se considerar que haverá certo retorno da peça dobrada, ficando a dobra com um ângulo maior que o obtido no momento da pressão da ferramenta. Isto ocorre devido à componente elástica do material, pois a deformação plástica permanente é conseguida apenas nas fibras mais externas do material, permanecendo às próximas à linha neutra no estado elástico. O ângulo de retorno depende principalmente do material, de sua espessura e do raio de curvatura.

Peças dobradas não somente produzem geometrias funcionais tais como bordas, flanges, curvas, emendas, mas também podem aumentar sua rigidez, aumentando o momento transversal de inércia. Atualmente, os perfis laminados estão sendo substituídos, quando necessário e possível, por elementos de chapa dobrados. A execução destes perfis em geral é feita nas dobradeiras, porém, quando os elementos são relativamente curtos ou com conformação especial, podem ser executados com vantagem por meio de matrizes e prensas, como mostrado na Figura 11.

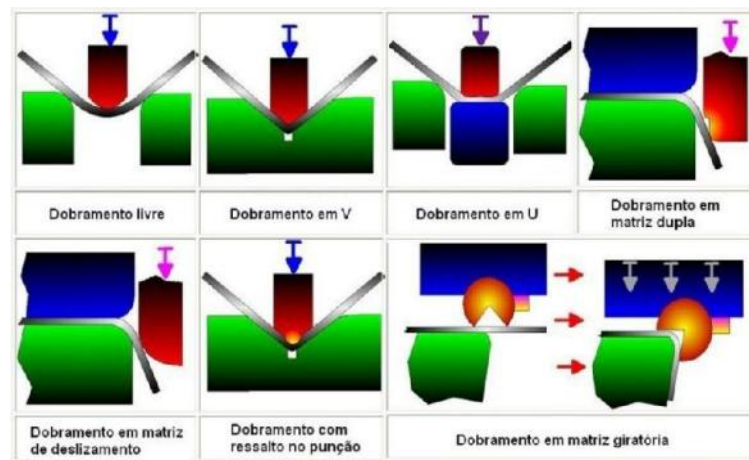


Figura 11 - Processos de dobramento

Fonte: Altan, *et al* (1999)

Para Altan, *et al* (1999), ao analisar uma peça após o processo de dobramento verifica-se que a parte externa é tracionada e a parte interna é comprimida. A deformação plástica ocorre apenas na região da dobra, no entanto o restante do material não sofre deformação. Ele ainda alega que este processo é considerado um dos processos mais simples de se conformar uma chapa, consistindo em realizar nela uma dobra linear.

Na Figura 12 são ilustrados o lado comprimido, lado tracionado e a linha neutra de uma peça submetida a dobra. A linha neutra é aquela que durante e após o processo de dobramento permanece com o mesmo comprimento.

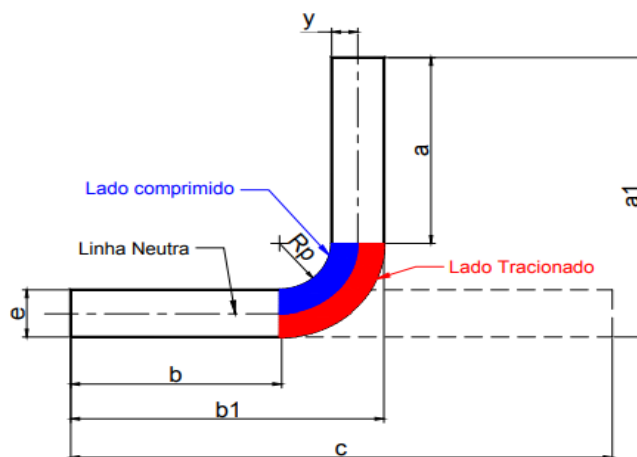


Figura 12 - Representação de peça dobrada e linha neutra

Fonte: Altan, et al (1999)

Para Dieter (1981), se for desprezada a variação da espessura, a linha neutra permanecerá no centro da dobra, e a deformação por tração na superfície externa será igual a deformação compressiva na superfície interna. Os esforços predominantes de flexão são responsáveis pelo dobramento elástico, abaixo do limite elástico em que a deformação passa por zero na linha neutra (metade da espessura da chapa), e pelo dobramento plástico, acima do limite elástico em que a deformação plástica é proporcional à distância da linha neutra. Nesse último caso, durante o processo a linha neutra se aproxima da superfície interna da dobra. No entanto as fibras da superfície externa sofrem maior deformação que as fibras da superfície interna que são contraídas.

Bresciani Filho *et al* (2011), afirma que durante a operação de dobramento os esforços aplicados se concentram na região de concordância entre as duas superfícies, que ocorre por meio da aplicação de esforços em direções opostas para provocar a flexão e consequentemente a deformação plástica, mudando assim a forma de uma superfície plana em duas concorrentes em ângulo. Na parte interna dessa região de concordância surgem esforços de compressão e na parte externa, de tração. O possível enrugamento da peça ocorre na parte interna e a eventual fratura ocorre normalmente na parte externa.

Para Tsoupis *et al* (2014), a região onde ocorrem as tensões de tração na parte externa da dobra é propícia ao aparecimento de trincas nas arestas da chapa. A frequência com que as trincas ocorrem é menor quando o corte é orientado paralelamente e a linha de dobra é orientada perpendicularmente à direção de laminação. Sendo assim é essencial que o material possua boa ductilidade a fim de evitar rupturas comuns na parte externa da dobra. Entretanto,

para Santos (2013), obter uma boa ductilidade não é a maior dificuldade no processo, mas sim, obter maior precisão dimensional e geométrica, em vista que o retorno elástico nesse tipo de conformação é considerável.

As tensões de tração durante o processo de dobramento provocam uma redução na espessura da chapa, em contrapartida, a largura da chapa tende a aumentar sob esforços de compressão. Como a largura da chapa é muito maior que a espessura o efeito dessa deformação concentra-se ao longo da espessura, fazendo com que ocorra pequenas distorções na seção transversal da chapa. No dobramento, quando os esforços de tensão na superfície externa da chapa ultrapassam o limite de resistência à tração do material, o material pode sofrer o fissuramento dessa região, ao contrário, na parte interna da chapa há possibilidade de enrugamento do material (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Maiores níveis de deformação plástica podem ser favorecidos através de alguns fatores como a redução do raio de curvatura, aumento da espessura da chapa e do ângulo de dobramento. Considerando o fenômeno de recuperação da deformação elástica, o ângulo de dobramento deve ser maior do que o determinado para a peça deformada durante a operação de conformação, este fenômeno será maior quanto maior for o limite de escoamento do material, maior for o ângulo de dobramento e quanto mais espessa for a chapa (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

2.2.1 Tipos de Dobramento

De acordo com Gaspar (2012), existem diversas formas de realizar o processo de dobramento de chapas, dependendo da geometria do punção e da matriz, o que irá possibilitar a construção de perfis dobrados de diferentes tipos. Os ensaios de dobramento podem ser classificados em três grupos: O dobramento livre, dobramento semi-guiado, e dobramento guiado.

Dobramento Livre - No processo de dobramento livre, também conhecido como dobramento no ar ou em vazio, o valor do ângulo de dobra é determinado pela penetração do punção na matriz, este processo possibilita obter diferentes ângulos de dobra sem a necessidade de substituição da ferramenta (BRAZ, 2010).

O início do processo de dobramento livre ocorre com a aplicação de força através do punção, a partir de determinado ponto a deformação é continuada pela aproximação da força das extremidades do corpo de prova, como pode ser visto na Figura 13.

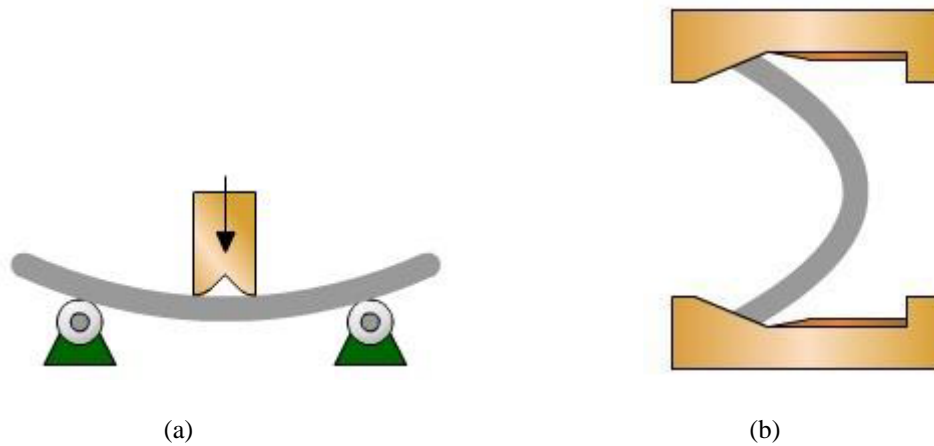


Figura 13 - Primeira etapa (a) e segunda etapa (b) dobramento livre

Fonte: www.cimm.com.br (2019)

Dobramento Semi-Guiado - Para esta classificação de dobramento, a deformação ocorre numa região determinada pela posição do punção, onde a força pode ser aplicada tanto na extremidade do corpo de prova quanto no centro do mesmo, dependendo da finalidade do ensaio. A Figura 14a mostra a modalidade de dobra com aplicação de força na extremidade e 14b mostra a modalidade de dobra com aplicação de força no centro com as extremidades apoiadas.

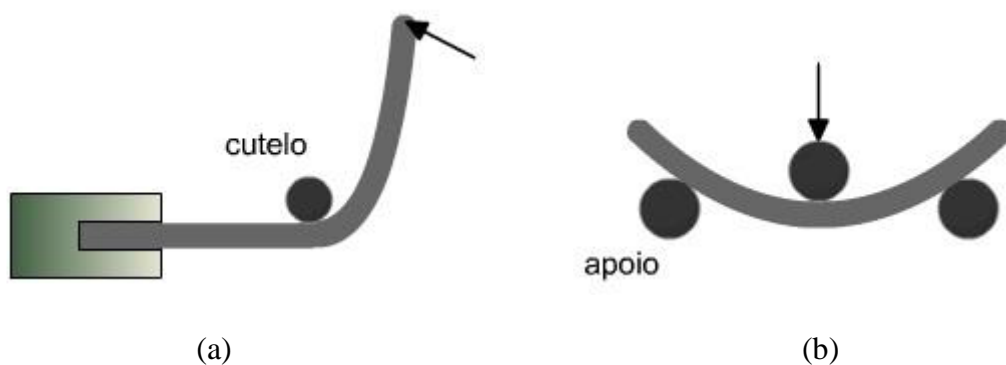


Figura 14 - Modalidades do dobramento semi-guiado

Fonte: www.cimm.com.br (2019)

Dobramento guiado – No dobramento guiado há um conjunto punção e matriz que faz com que o corpo de prova se deforme dentro de um espaço e forma pré-determinados como é

ilustrado na Figura 15 (a e b). A modalidade proposta nesse estudo é do tipo dobramento guiado, pois a conformação ocorre com o punção pressionando o corpo de prova em uma matriz com forma pré-determinada.

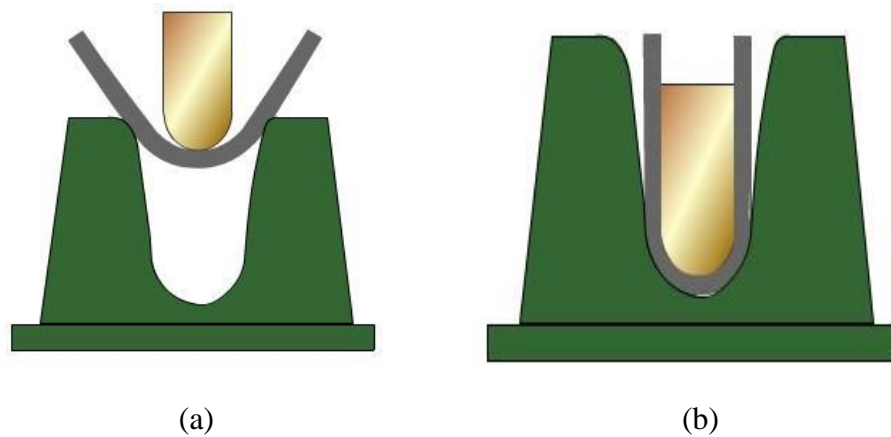


Figura 15 - Representação do dobramento guiado (a) início e (b) final

Fonte: www.cimm.com.br (2019)

Existem ainda variações de dobramento com a utilização de diferentes matrizes, de acordo com o formato desejado da peça. A seguir são descritos diversos tipos de dobra com diferentes matrizes de dobramento.

➤ Dobramento em V

De acordo com Braz (2010), no processo de dobramento em V, a deformação na chapa ocorre até encostar as ferramentas, sendo a folga entre punção e a matriz igual a espessura da chapa, conforme ilustrado na Figura 16. No dobramento em V acontece uma precisão maior que no dobramento livre, este processo é geralmente utilizado para dobras com ângulos de 90° ou ligeiramente inferiores.

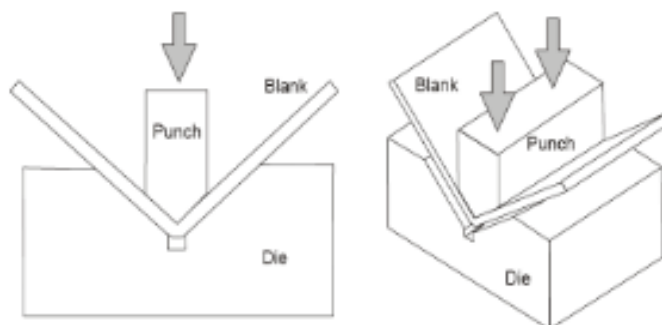


Figura 16 - Representação do dobramento em V

Fonte: Braz (2010)

Já Marcondes (2014), também reforça que a folga entre punção e matriz é constante e igual a espessura da chapa, que varia de aproximadamente de 0,5 a 25mm.

➤ Dobramento em U

Esta técnica é caracterizada pela existência de dois eixos de dobragem paralelos. Normalmente utiliza-se um encostador que promove o contato com a chapa na zona do fundo do punção, evitando defeitos de forma na peça enformada. Contudo, o dispositivo requer um acréscimo de força de dobramento na ordem dos 30 a 40%.

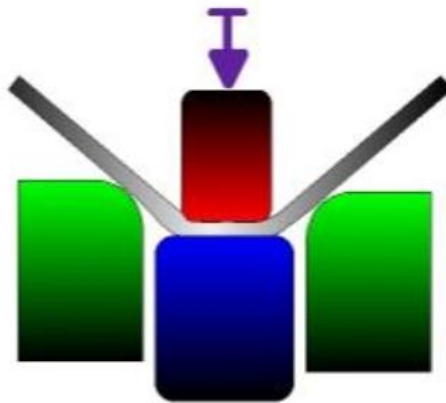


Figura 17 - Representação do dobramento em U

Fonte: Marcondes (2014)

Para Marcondes (2014), este tipo de dobramento é realizado em dois eixos paralelos de dobramento na mesma operação. Uma almofada é usada para forçar o contato da chapa com o fundo do punção, conforme mostra a Figura 17. Para realização deste dobramento é necessário em torno de 30% de força de dobra para que a almofada consiga pressionar a chapa.

➤ Dobramento de fundo

Na Figura 18 pode-se notar que no dobramento de fundo, há uma vantagem em relação ao retorno elástico, que é reduzido devido a posição final do punção, em que a folga entre o punção e a superfície da matriz é menor do que a espessura da chapa. Desta forma o escoamento do material é ligeiramente menor e ocorre a diminuição do retorno elástico. Este tipo de dobra requer uma força de aproximadamente 50 a 60% maior do que no dobramento livre (MARCONDES, 2014).

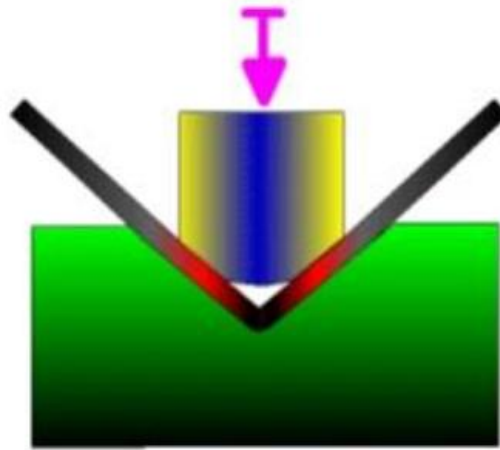


Figura 18 - Representação do dobramento a fundo

Fonte: Marcondes (2014)

Braz (2010), diz que no dobramento a fundo, muitas vezes chamado como dobramento “quebra do nervo”, a chapa é esmagada entre o punção e a matriz, o que contribui com a diminuição ou até mesmo a eliminação da recuperação elástica do material. Este processo é geralmente utilizado para chapas de espessuras reduzidas (inferior a 3mm). Este processo requer uma força de dobramento consideravelmente superior a requerida para o dobramento livre, cerca de 3 a 5 vezes maior.

➤ Dobramento em matriz giratória

De acordo com Braz (2010), neste tipo de dobramento têm-se a vantagem de não ter a necessidade da utilização de um encosto para a chapa a ser dobrada. O dobramento é realizado utilizando uma matriz como está representado na Figura 19.

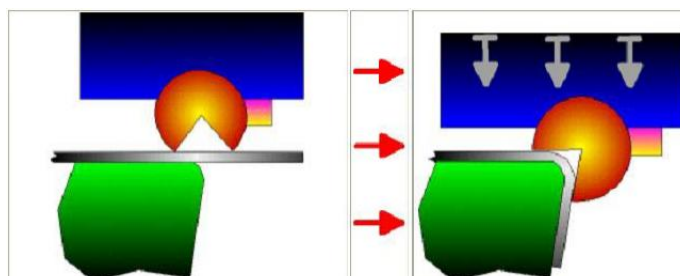


Figura 19 - Representação do dobramento em matriz giratória

Fonte: Adaptado de Altan, et al (1999)

➤ Dobramento em matriz de deslizamento

Neste processo uma das abas da chapa é fixada por um encostador, enquanto a outra é dobrada a 90° pela ação da descida do punção como mostra a Figura 20. Este processo tem a vantagem de permitir alterar com facilidade as dimensões da aba enformada e a do ângulo de dobragem (BRAZ, 2010).

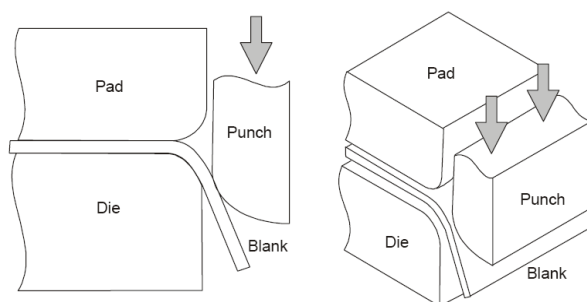


Figura 20 - Dobramento em matriz de deslizamento

Fonte: Braz (2010)

Marcondes (2014), diz que o dobramento em matriz de deslizamento, é conhecido também como flangeamento. Uma borda da chapa é dobrada a 90° enquanto a outra extremidade é fixada no prensa chapas. O comprimento do flange pode ser alterado com facilidade e o ângulo da curvatura pode ser controlado pela posição do deslocamento do punção.

2.2.2 Raio Mínimo de Dobra

A necessidade de raios de dobra muito pequenos, pode acarretar em fissuras na superfície externa da chapa na região da dobra, isto pode ocorrer devido à grande taxa de deformação ocorrida nesta região. Esta situação pode se agravar se for especificado um raio inferior a espessura com ângulos de dobra inferiores a 90° (GAUSMANN, 2017).

De acordo com Moro e Auras (2006, p.25);

Quanto menor o raio de dobramento, maior é a tensão desenvolvida na região tracionada. Um excessivo tracionamento provocado por um pequeno raio de dobramento pode vir a romper as fibras externas da chapa dobrada. Define-se o raio interno mínimo de dobra, como o menor valor admissível para o raio, para se evitar grande variação na espessura da chapa na região dobrada. Este valor é dado em função do alongamento longitudinal máximo do material e da espessura da chapa que está sendo dobrada.

Geralmente o raio mínimo de dobra é expresso em múltiplos da espessura da chapa, por exemplo, um material com um raio de dobramento de 3T indica que ele poder ser dobrado formando um raio de três vezes a sua espessura, sem que haja aparecimento de trincas. Portanto pode-se dizer que o raio mínimo é um limite de conformação, que indica o mínimo para o material não se romper, no entanto, metais muito dúcteis podem apresentar um raio mínimo igual a zero, que indica que as peças podem ser achatadas sobre si mesmas sem se romper, mesmo assim por expor as ferramentas a grandes esforços, este método não é muito utilizado.

Frees (2017) diz que a tensão de escoamento convencional ($\sigma_{0,2}$), no final da zona elástica é normalmente conhecida e, em consequência, a deformação relativa nesse mesmo instante (ε_p). Sendo assim tem-se a Lei de Hooke expressa na equação 16.

$$\sigma_{0,2} = \varepsilon_p \cdot E \quad (16)$$

Segundo Marcondes (2008), é inviável executar raios de dobra internos inferiores à espessura da chapa, pois as fibras externas seriam tracionadas acarretando no rasgamento do material, evitando também a possível formação de cantos vivos. No entanto é de extrema importância a definição do raio de dobramento expresso pela equação 17.

$$\varepsilon_p = \frac{y}{r_{\min}} = \frac{s_0}{2 \cdot r_{\min}} = \frac{\sigma_{0,2}}{E} \quad (17)$$

Onde $y = s_0 / 2$, conforme é mostrado na Figura 21.

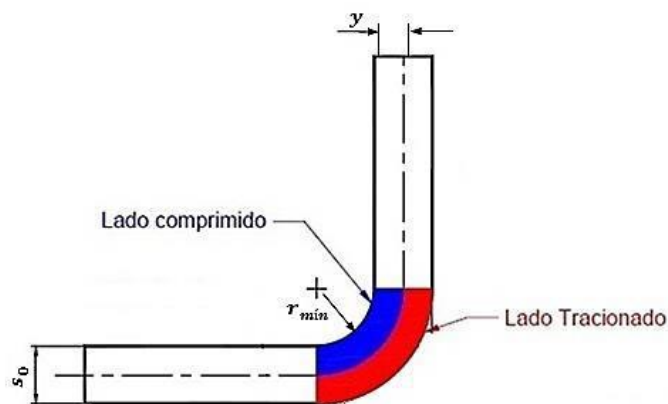


Figura 21 - Representação do raio mínimo de dobra (r_{\min})

Fonte: Frees (2017)

Logo, para o cálculo do raio mínimo (r_{\min}), tem-se:

$$\left(\frac{s_0}{r_{\min}} \right) = 2 \cdot \frac{\sigma_{0,2}}{E} \quad (18)$$

$$r_{\min} = \frac{s_0 \cdot E}{2 \cdot \sigma_{0,2}} \quad (19)$$

De acordo com a Norma DIN 6935 *apud* Gausmann (2017), o raio mínimo de dobramento é especificado de acordo com as propriedades mecânicas do material e o sentido de laminação do mesmo, como mostra as Tabelas 1 e 2. Esta especificação deve ser atendida tanto para o desenvolvimento do planejado quanto para o processo de conformação em si.

Tabela 1 - Raios mínimos para dobramento de chapas de aço com espessura de até 7mm conforme DIN 6935

| | | Raio mínimo de quinagem, r_{\min} , para ângulos de dobragem, α , até 120°, para chapas de aço com espessura h (mm) | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|--|------------|--------------|------------|----------|----------|----------|----------|
| Tensão de rotura mínima do aço (MPa) | Relação entre as direcções de quinagem e de laminagem | 1 | >1 até 1.5 | >1.5 até 2.5 | >2.5 até 3 | >3 até 4 | >4 até 5 | >5 até 6 | >6 até 7 |
| até 390 | Transversal | 1 | 1.6 | 2.5 | 3 | 5 | 6 | 8 | 10 |
| | Longitudinal | 1 | 1.6 | 2.5 | 3 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| de 390 a 490 | Transversal | 1.2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 8 | 10 | 12 |
| | Longitudinal | 1.2 | 2 | 3 | 4 | 6 | 10 | 12 | 16 |
| de 490 a 640 | Transversal | 1.6 | 2.5 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| | Longitudinal | 1.6 | 2.5 | 4 | 5 | 8 | 10 | 12 | 16 |

Fonte: Rodrigues, J.;Martins, P. *apud* Gausmann (2017)

Tabela 2 - Raios mínimos para dobramento de chapas de aço com espessura entre 7 até 20mm de espessura conforme DIN 6935

| | | Raio mínimo de quinagem, r_{\min} , para ângulos de dobragem, α , até 120°, para chapas de aço com espessura h (mm) | | | | | | |
|--------------------------------------|---|--|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Tensão de rotura mínima do aço (MPa) | Relação entre as direcções de quinagem e de laminagem | >7 até 8 | >8 até 10 | >10 até 12 | >12 até 14 | >14 até 16 | >16 até 18 | >18 até 20 |
| até 390 | Transversal | 12 | 16 | 20 | 25 | 28 | 36 | 40 |
| | Longitudinal | 16 | 20 | 25 | 28 | 32 | 40 | 45 |
| de 390 a 490 | Transversal | 16 | 20 | 25 | 28 | 32 | 40 | 45 |
| | Longitudinal | 20 | 25 | 32 | 36 | 40 | 45 | 50 |
| de 490 a 640 | Transversal | 16 | 20 | 25 | 32 | 36 | 45 | 50 |
| | Longitudinal | 20 | 25 | 32 | 36 | 40 | 50 | 63 |

Fonte: Rodrigues, J.;Martins, P. *apud* Gausmann (2017)

2.2.3 Tensões no Dobramento

O processo de dobramento do material caracteriza um estado duplo de tensão, visto que o material sofre tração do lado externo da dobra e compressão do lado interno. Assim sendo, as tensões a que está sujeito o material são decrescentes das faces externas em direção ao núcleo da peça e, como as mesmas são de sentido inverso haverá uma linha onde essas tensões se anulam, que é chamada de linha neutra (LN) (PENTEADO, 2019).

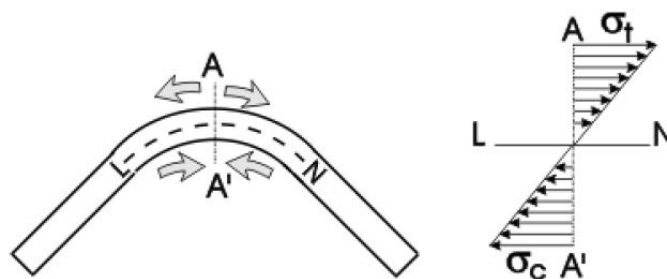


Figura 22 - Esforços de tração e compressão no dobramento

Fonte: Penteado (2019)

A Figura 22 representa esta linha neutra e as tensões durante a operação de dobramento. Penteado (2019) ressalta que devido a tensão na linha neutra ser igual a zero, ela não sofre alteração de comprimento durante a deformação, ao contrário das partes que estão sendo tracionadas e comprimidas, que aumentam ou diminuem o comprimento, respectivamente, após a operação. Ao iniciar o processo de dobramento, a linha neutra se

encontra no centro da espessura da chapa, e no decorrer da operação, a mesma tende a deslocar-se em direção ao lado interno da dobra, que é o lado que sofre a compressão.

Dieter (1981), considera que os esforços predominantes de flexão durante o processo de dobramento, são responsáveis pelo dobramento elástico e plástico no material. O dobramento elástico ocorre abaixo do limite elástico, em que a deformação passa por zero na linha neutra (LN), na metade da espessura da chapa. O dobramento plástico, ocorre acima do limite elástico em que a deformação plástica é proporcional à distância da linha neutra. Neste último caso, a medida que o processo ocorre, a linha neutra se aproxima da superfície interna de dobramento. Assim, as fibras da superfície externa são mais deformadas que as fibras da superfície interna que são contraídas.

Bresciani Filho *et al* (2011), reforça que as forças de tração ocorrem na parte externa da chapa e as forças de compressão atuam na parte interna. Ressalta ainda que existe um ponto, ao longo de uma linha perpendicular à chapa em que as tensões são nulas. E que estabelecendo a união destes pontos ao longo da chapa têm-se a chamada linha neutra. O fato de a linha neutra não ter seu comprimento alterado, faz com que ela seja usada como mecanismo de verificação do desenvolvimento da peça conformada. No entanto, as linhas entre as superfícies externa e interna e o plano transversal, não se mantêm inalteradas: a linha referente à superfície externa tem seu comprimento aumentado após o dobramento e a linha referente à superfície interna tem seu comprimento diminuído.

Para obtenção de uma peça dobrada, é importante conhecer suas dimensões, para assim determinar a linha neutra da chapa, sendo simples a realização de tal cálculo a partir de uma chapa do material pré-dobrada (CHIAVERINI, 1986). Sendo assim, procede-se a determinação da linha neutra do elemento dobrado, ou seja, a linha da seção transversal cuja fibra correspondente não foi submetida a nenhum esforço.

2.2.3.1 Dobramento na zona elástica

Pode-se observar na Figura 23, algumas variáveis do processo de dobramento. Através do ângulo de dobramento (α) e conhecendo o raio de dobra da metade da espessura da chapa (r_m), é possível calcular o comprimento do arco dobrado (l_s) na posição da linha neutra (LN) pela equação 20 expressa abaixo:

$$l_s = r_m \cdot \alpha \quad (20)$$

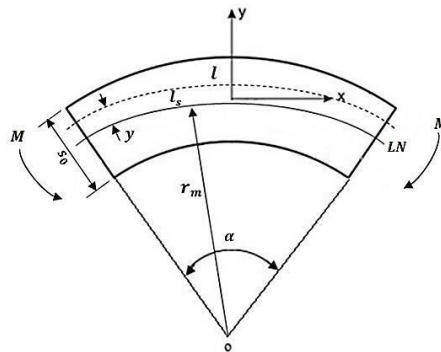


Figura 23 - Representação do dobramento de chapas metálicas

Fonte: Adaptado Barbosa *apud* Frees (2017)

O arco (l) representado na Figura 23, a uma distância (y) da linha neutra (LN), irá se deformar conforme a equação 21 expressa abaixo:

$$l = \alpha(r_m + y) = r_m \cdot \alpha \left(1 + \frac{y}{r_m} \right) = l_s \left(1 + \frac{y}{r_m} \right) \quad (21)$$

Como a deformação relativa (ε_d) é calculada em função da variação dos arcos dobrados, têm-se:

$$\varepsilon_d = \frac{l - l_s}{l_s} = \frac{\alpha(r_m + y) - r_m \cdot \alpha}{r_m \cdot \alpha} = \frac{y}{r_m} \quad (22)$$

2.2.3.2 Dobramento elástico-plástico

Para realização de um dobramento elástico-plástico espera-se que a relação tensão versus deformação do material sejam conhecidas, bem como, considera-se que a região de tração e de compressão sejam simétricas. Um dobramento de seção qualquer é mostrado na Figura 24, onde a máxima deformação relativa é mostrada no diagrama pelo ponto (A') (SCHAEFFER, 2004).

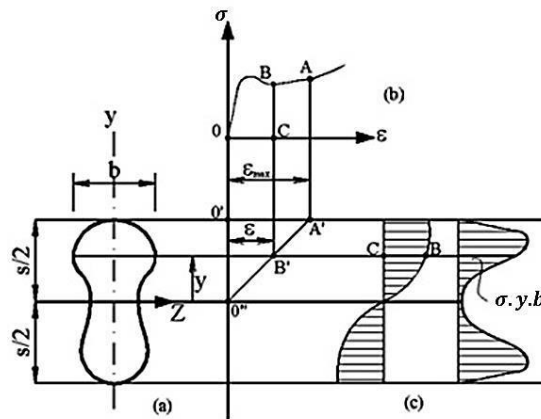


Figura 24 - Tensões e deformações no dobramento elástico-plástico

Fonte: Schaeffer (2004)

É possível observar na Figura 24 a distribuição de tensões ao longo de uma determinada seção. Considera-se que, com uma deformação relativa (ϵ) ponto B, respectivamente C, tem-se a tensão (σ), ponto B – Figura 24b. Obtém-se assim para as outras seções outros valores de tensões (B-C) que são distribuídas no diagrama da Figura 24c. O último diagrama da Figura 24c representa as seções com o produto ($\sigma \cdot y \cdot b$), onde “b” é a largura variável do perfil. Este produto é importante para o cálculo do momento de dobramento em cada seção dada por (SCHAEFFER, 2004).

$$M = \int \sigma \cdot y \cdot b \, dy \quad (23)$$

Sendo a deformação máxima nas fibras externas, calculadas por:

$$\epsilon_{\max} = \frac{s_0}{2} \cdot \frac{1}{r} \quad (24)$$

Em que, $r = r_m + y$, conforme mostra a Figura 25 abaixo:

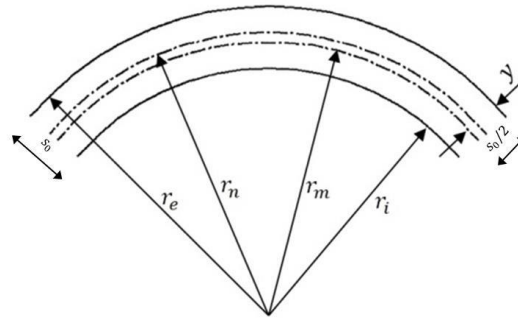


Figura 25 - Representação dos raios de dobramento

Fonte: Schaeffer (2004)

De acordo com a representação da Figura 25, têm-se:

- (r_e) – Raio externo da dobra;
- (r_n) – Raio da linha neutra;
- (r_m) – Raio de dobra na meia espessura;
- (r_i) – Raio interno da dobra

2.2.4 Deformações no Dobramento

Para Penteado (2019), em um processo de dobramento de tiras de seção retangular, o retângulo é formado pela largura da tira e pela sua espessura. No caso de uma chapa espessa ser dobrada com raios de curvatura muito pequenos, este retângulo inicial é distorcido para um trapézio, como mostra a Figura 26, onde o lado interno à curvatura tem suas dimensões aumentadas, devido aos esforços de compressão e o lado externo tem suas dimensões diminuídas, devido aos esforços de tração.

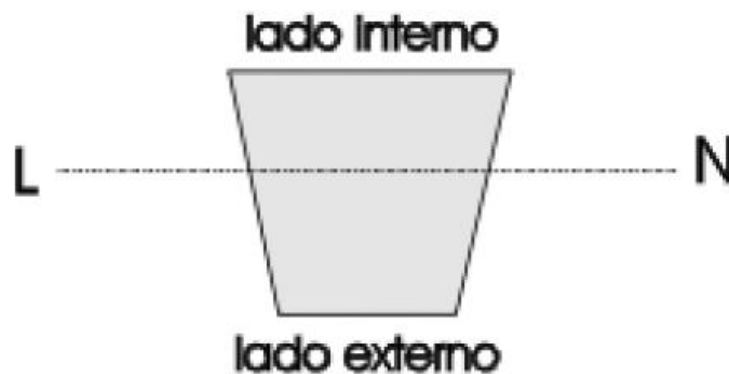


Figura 26 - Deformações no dobramento

Fonte: Penteado (2019)

Um material que possui um elevado alongamento total, determinado em ensaio de tração, pode permitir durante o dobramento um raio de curvatura menor, pois a deformação na superfície externa do material depende diretamente da capacidade de estiramento do mesmo. Este alongamento ajuda a sustentar um trecho maior da fibra externa do dobramento antes que ocorra a fratura superficial. Caso o alongamento total diminua devido ao aumento da resistência de uma determinada espessura da chapa, o raio mínimo de dobra de projeto deve ser aumentado (KEELER e KIMCHI, 2014).

Schaeffer (2004) relata ainda que os esforços os quais a chapa está exposta durante o processo de dobramento, podem causar alguns defeitos no material, ou tornar algum defeito visível já existente. O fato do material sofrer dois tipos de esforços simultaneamente, compressão na parte interna e tração na parte externa, potencializa o surgimento de novos defeitos, bem como o aparecimento de defeitos já existente no material.

Considerando que durante o processo de dobramento as fibras externas aumentam de tamanho devido aos esforços de tração, enquanto as fibras internas são comprimidas, pode-se definir a deformação verdadeira (φ_d) na equação 25.

$$\varphi_d = l_n \frac{l}{l_0} = l_n \left(1 + \frac{y}{r_m} \right) \quad (25)$$

Onde (r_m) é o raio de dobramento em meio espessura. Considerando-se as fibras externas na posição (y) como mostrado na Figura 25, têm-se como deformação nas fibras externas:

$$\varphi_d = l_n \left(1 + \frac{s_0}{2r_j + s_0} \right) \quad (26)$$

2.2.5 Força de Dobramento

De acordo com Penteadó (2016), para realização de um dobramento, é essencial saber como o mesmo será realizado, para assim determinar a força necessária para realização do mesmo, pois devido ao desenho da ferramenta, poderá haver uma variação na força de dobramento. Para o cálculo da força de dobramento, baseia-se nos carregamentos padrões de uma viga conforme já visto em resistência dos materiais, no entanto, para calcular a força de

dobramento deve-se associar o tipo de dobramento que será utilizado com um correspondente carregamento de uma viga.

Para Lange *apud* Frees (2017), quando o punção realiza seu deslocamento (h) no sentido vertical e perpendicular à chapa ele exerce a força de dobramento (F_d). Admitindo-se que a chapa a ser dobrada encontra-se apoiada nas extremidades e o carregamento se concentre no centro da chapa conforme é expresso na Figura 27, a determinação da força (F_d) é relativamente simples e pode ser determinada pela equação 27 mostrada a seguir:

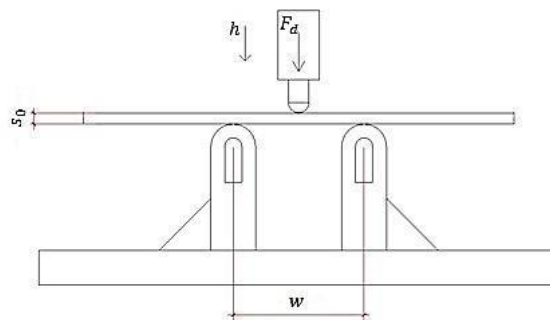


Figura 27 - Carregamento centralizado e ângulos considerados

Fonte: Lange *apud* Frees (2017)

Na Figura 28 é possível observar os ângulos a serem formados;

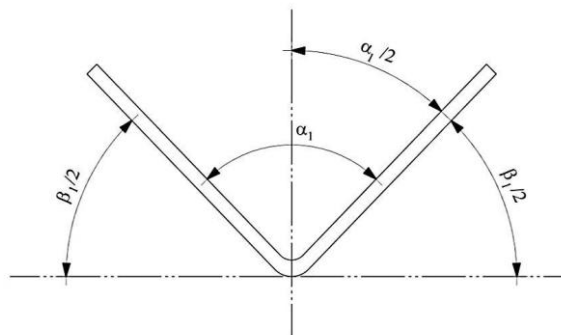


Figura 28 - Ângulos considerados para cálculo da força de dobramento (F_d)

Fonte: Lange *apud* Frees (2017)

Considerando o coeficiente de atrito ($\mu = 0,1$) têm-se:

$$F_d = \frac{kf.b.s_0^2 \cdot \cos \frac{\beta_1}{2} \left(\cos \frac{\beta_1}{2} + \mu \cdot \text{sen} \frac{\beta_1}{2} \right)}{w - 2(r_p + s_0) \text{sen} \frac{\beta_1}{2} + \mu \cdot s_0 \cdot \cos \frac{\beta_1}{2}} \quad (27)$$

No entanto, para realização do cálculo da força de dobramento (F_d), deve-se associar as variáveis: raio do punção (r_p) e ângulo no dobramento (β_1) com parâmetros fixos, tais como a espessura da chapa (s_0), a largura da chapa (b), a distância entre os apoios (w) e a tensão de escoamento (k_f).

2.2.6 Retorno Elástico no Dobramento

De acordo com Santos (2013), existe uma preocupação em manter a precisão das dimensões e da geometria dos produtos estampados. As tensões elásticas que ocorrem durante sua deformação, bem como o alívio destas tensões após o descarregamento do punção ou da remoção da matriz, acabam criando problemas dimensionais e geométricos em peças conformadas. Estes problemas estão presentes em todas as peças estampadas.

O módulo de elasticidade que os materiais possuem, conferem aos mesmos uma deformação elástica, quando estes são submetidos a algum tipo de esforço. Considerando na sequência do esforço aplicado, caso ocorra uma deformação plástica, sempre haverá uma recuperação elástica quando a carga aplicada for retirada, devido a elasticidade do material. Tal recuperação recebe o nome de retorno elástico, efeito mola ou *Springback*. Este fenômeno pode ser facilmente observado no simples dobramento de uma chapa ou arame metálico (TEKINER *apud* FREES, 2017).

Dieter (1981), denomina o retorno elástico como a variação dimensional da peça deformada decorrente da retirada dos esforços impostos pela ferramenta. Esta variação ocorre devido a capacidade elástica do material.

Quando o material sofre uma deformação plástica, a geometria da chapa sempre se desvia um pouco, após a remoção do ferramental. Este desvio dimensional da peça é conhecido como retorno elástico, e pode ser ilustrado pelas curvas tensão versus deformação conforme mostrado na Figura 29.

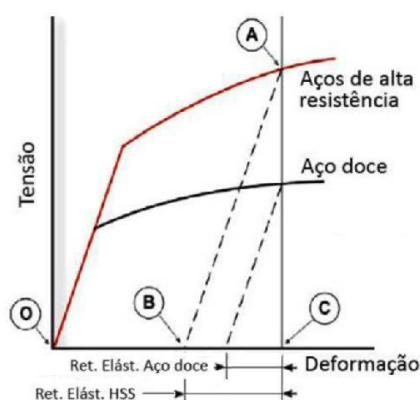


Figura 29 - Comparativo retorno elástico aço doce - aço alta resistência

Fonte: Santos (2013)

Após o material ser deformado e retirado todas as cargas, é possível observar no gráfico da Figura 29 que: do nível de deformação A segue a linha AB para B, onde OB é a deformação permanente, ou deformação plástica, e BC é a deformação recuperada ou deformação elástica. Embora esta deformação elástica recuperada em um determinado local seja muito pequena, pode causar mudanças significativas na forma da peça, devido ao seu efeito multiplicador mecânico em outros locais, por exemplo, dobra de superfícies curvas.

No passado, a principal preocupação em conformação de chapas era a eliminação de estricção local e trincas. Porém atualmente a precisão e consistência dimensional das peças é o mais preocupante. Lajarin (2012), relata que esses problemas dimensionais estão diretamente relacionados com as tensões elásticas residuais geradas durante o processo de conformação, ou seja, o retorno elástico. Os problemas dimensionais causados pelo retorno elástico estão relacionados com o aumento da resistência do aço, quanto maior o limite de resistência, maior a sua magnitude.

De acordo com Araújo (2007, p.47);

Na maioria das operações de conformação mecânica de metais, o processo de deformação não linear tende a gerar uma grande quantidade de energia elástica residual no metal conformado. Esta energia, que fica estocada na peça durante o carregamento, é moderadamente aliviada no descarregamento. Este alívio da energia imposta à peça causa na mesma um retorno à uma suposta posição de equilíbrio, como se fosse um retorno à sua posição inicial. Consequentemente, o formato final da peça no processo de deformação não apenas depende do contorno da matriz, mas também da quantidade de energia elástica estocada na peça enquanto ela está sendo plasticamente deformada.

Em função da recuperação elástica, ocorrida após a retirada da carga, há uma alteração em alguns parâmetros geométricos da chapa dobrada, como o raio de dobramento e o ângulo de dobramento, estes fenômenos podem ser observados abaixo pela Figura 30.

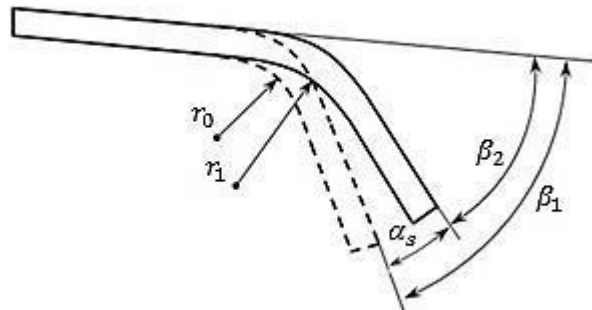


Figura 30 - Representação do fenômeno retorno elástico

Fonte: Dieter (1981)

Alguns parâmetros como a tensão limite de escoamento, o módulo de elasticidade e a ductilidade do metal, irão influenciar na magnitude da recuperação elástica do material. Neste caso, a princípio, quanto maior forem o limite de escoamento e a ductilidade e menor o módulo de elasticidade, mais acentuado será o efeito mola (DIETER, 1981).

Vantyne (2015) realizou experimentos em diversos tipos de aços, incluindo aços de alta resistência, em suas análises concluiu que o retorno elástico diminui com o aumento da espessura da tira. Fei e Hodgson (2006) alegam que a espessura do material, a folga da matriz e o ângulo de dobramento exercem grande influência no retorno elástico do material, e que a medida que se diminui a espessura da chapa dobrada, aumenta os valores de retorno elástico.

Desta forma, parte das tensões atuantes na seção dobrada estará abaixo do limite de proporcionalidade, ou seja, da máxima tensão abaixo do qual o material segue a lei de Hooke região de deformação elástica, enquanto a outra parte estará acima desse limite, conferindo ao material dobrado uma deformação plástica permanente. Após cessar a força de dobramento, a parte da seção submetida a tensões inferiores ao limite de proporcionalidade, tende a retornar à posição inicial por ter permanecido no domínio elástico, dando origem ao retorno elástico, efeito mola ou *Spring back* (MORO e AURAS, 2006).

Há diversos métodos propostos para quantificar ou avaliar a recuperação elástica dos metais no dobramento de chapas. Um método comum de análise da intensidade do retorno elástico é a determinação do fator (K), no qual são empregados nos cálculos os ângulos e raios obtidos antes e após o dobramento (r_0) e (r_1) (DIETER, 1981).

Sendo assim o retorno elástico, efeito mola ou *Spring back* pode ser calculado como a razão entre o ângulo de dobramento após (β_2) e antes (β_1) da retirada da carga como mostrado pela equação 28.

$$K = \frac{\beta_2}{\beta_1} = \left(\frac{r_0 + \frac{e}{2}}{r_1 + \frac{e}{2}} \right) \quad (28)$$

Onde (r_0) é o raio de curvatura antes da liberação da carga e (r_1) é o raio de curvatura após a retirada da carga. Dessa forma (r_0) é menor que (r_1) e o efeito mola nessa equação depende apenas da razão entre raio de curvatura e espessura (e).

De acordo com Gruning *apud* Frees (2017), o fator (K) pode ser calculado também por meio da equação 29 expressa a seguir, quando não se conhece os ângulos (β_1) e (β_2).

$$K = 1 - \left(\frac{12M(r_p + 0,5.s_0)}{E.b.s_0^3} \right) \quad (29)$$

Onde (E) é o módulo de elasticidade do material, (M) o momento de dobramento, (r_p) o raio do punção, (s_0) a espessura da chapa a ser dobrada e (b) a largura da chapa.

Lajarin (2007, p.44) relata que;

A magnitude do retorno elástico é descrita pelo modelo de encruamento e pela geometria do componente e da ferramenta. Quando a geometria impede o relaxamento completo das tensões elásticas durante o descarregamento, as tensões mantidas no componente são chamadas de tensões residuais. Com o objetivo de liberar ou se opor a essas tensões residuais o componente altera sua forma. Se todas as tensões elásticas não puderem ser relaxadas durante a estampagem, padrões geométricos podem ser criados para ajudar na distribuição uniforme das tensões através da espessura da chapa.

Arcelor Mittal *apud* Lajarin (2019), sugere alguns cuidados para reduzir o retorno elástico:

- Durante a fase de projeto, estudar cuidadosamente a geometria do componente a ser dobrado;

- Criar reforços geométricos, buscando aumentar a rigidez do material, bem como planejar cuidadosamente a sequência a ser adotada durante a estampagem;
- Utilizar pequenos raios de ferramenta, sempre que possível;

2.2.6.1 Tipos de retorno elástico

Há três tipos de retorno elástico comumente encontrados em materiais conformados, e para estudo deste fenômeno normalmente é utilizado componentes estruturais com perfil cartola. O uso deste se dá por se tratar de um perfil de usos recorrente em componentes estruturais de carrocerias automotivas e por apresentar os tipos clássicos de retorno elástico, são eles: mudança angular, ondulação lateral e torção (empenamento ou “*twist*”).

- Mudança angular

De acordo com Lajarin (2012), este tipo de retorno elástico ocorre quando a deformação produzida durante o processo de dobramento faz com que o perfil de uma parede da chapa dobrada se desvia do perfil original da matriz. Este fenômeno é ilustrado na Figura 31. Devido ao tipo de perfil “cartola” utilizado a mudança angular ocorre duas vezes, e comumente conhecida como mudança angular de parede (θ_1) e mudança angular no flange (θ_2).

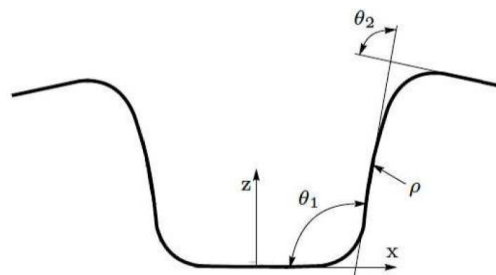


Figura 31 - Diferentes tipos de retorno elástico em perfil cartola

Fonte: Lajarin (2012)

A diferença de esforço no sentido da espessura do material, cria um momento de flexão no raio da matriz, o que resulta na mudança angular. Para minimizar esta variação angular deve-se eliminar ou minimizar este momento de flexão na região da parede lateral (SANTOS, 2013).

➤ Ondulação lateral

Como no caso anterior a causa principal deste fenômeno, conhecido também como curvatura de parede, consiste na distribuição irregular de tensão ou gradiente de tensões ao longo da espessura do material dobrado. Trata-se de um fenômeno muito comum de ser observado em operações e estampagem por embutimento profundo, consiste da curvatura criada na região lateral do canal estampado.

A Figura 32 ilustra a curvatura que é criada na parede lateral do perfil dobrado, causada pela distribuição irregular da tensão através da espessura da chapa.

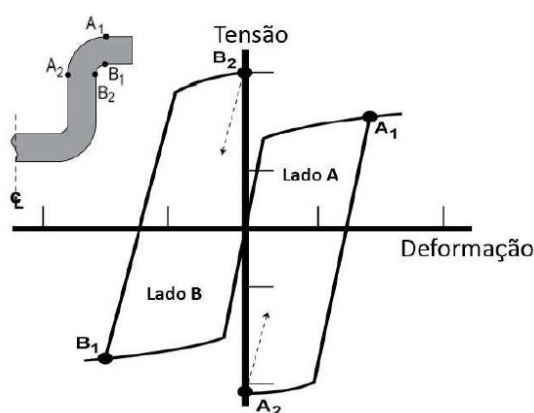


Figura 32 - Mecanismo de ondulação lateral

Fonte: World Auto Steel *apud* Lajarin (2012)

Analisando a Figura 32 é possível verificar as deformações que ocorrem com o perfil durante o processo de dobramento. No lado (A) observa-se a deformação por tração (A_1) e a deformação por compressão (A_2). No lado (B) observa-se a deformação de compressão (B_1) e a deformação por tração (B_2). Quando ocorre o descarregamento dos esforços de compressão, com a retirada do punção da matriz, o lado (A) tende a prolongar-se, ao contrário, o lado (B) tende-se a criar uma onda na parede lateral, devido a recuperação elástica.

Santos (2013), menciona que a diferença de recuperação elástica que ocorre entre os lados (A e B), é a principal fonte de ondulação ao longo da parede do perfil. Esta diferença pode ser ainda maior quanto maior for a resistência do metal deformado.

Este fenômeno é indesejável e pode dificultar ou impossibilitar a montagem de peças e perfis que exigem precisão e possuem tolerâncias mínimas. No entanto para minimizar o aparecimento deste fenômeno deve-se minimizar o gradiente de tensões na espessura da chapa (WORLD AUTOSTEEL *apud* LAJARIM, 2012).

➤ Torção

Este fenômeno, conhecido também como (Empenamento ou “*twist*”), ocorre quando há uma rotação diferenciada das seções transversais ao longo dos respectivos eixos, que tendem a rotacionar uma parte do perfil para uma direção e o restante para outra direção, ocasionando a rotação de duas ou mais seções transversais de maneira diferente ao longo do eixo longitudinal do perfil dobrado.

Conforme mostra a Figura 33 o retorno elástico desequilibrado causa o deslocamento de torção, que ocorre devido as tensões residuais no flange e ou na lateral do perfil.

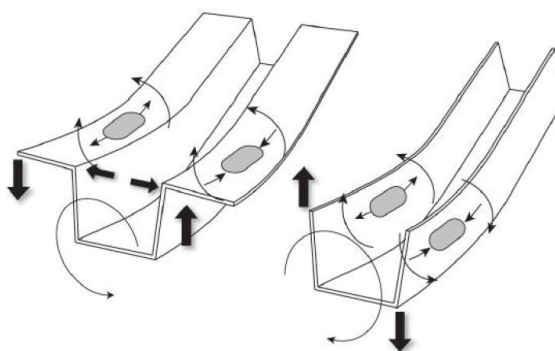


Figura 33 - Demonstração de torções no flange e parede do perfil

Fonte: Yoshida *apud* Santos (2013)

De acordo com World Auto Steel *apud* Lajarin (2012, p.47);

A magnitude da torção em um componente é determinada pela reação desbalanceada e pela rigidez do componente na direção longitudinal. Componentes com baixa rigidez, assimetria, grande comprimento longitudinal, estreitos, com grandes flanges, altas paredes laterais e com mudanças súbitas na seção transversal são propícios a ocorrência de torção. Algumas causas muito comuns de deformação não simétricas são causadas pelo posicionamento incorreto da chapa, lubrificação irregular, polimento irregular da matriz, pressão irregular ou irregularidades no acabamento superficial do cordão estirador.

Yoshida *apud* Santos (2013), reforça que o que determina a quantidade de torção em um componente após o dobramento é relação entre as tensões desequilibradas e rigidez do material. Em dobramento de chapas finas, baixos valores de rigidez torcional podem ter grande influência e causar maior torção no perfil dobrado.

2.3 Aço NBR 6656 LNE 380

O aço LNE 380, fruto de estudo do presente trabalho faz parte do grupo dos aços de alta resistência e baixa liga (HSLA). Estes aços possuem normas que regulamentam sua fabricação e fornecimento, tais como suas propriedades mecânicas e químicas. A Tabela 3 estabelece diversas normas regulamentadora para os aços de alta resistência e baixa liga, e o aço do presente estudo está regulamentado através da norma ABNT NBR 6656:2008.

Tabela 3 - Tabela de equivalência de normas para aços HSLA

| ABNT NBR 6656:2008 | NBR 14965:2003 | DIN 1623 P.2 | DIN EN 10149-2 | ASTM A 715/98 | SAE J 1392/89 | SEW 092 |
|-----------------------|-------------------|--------------|-------------------|------------------|---------------|-------------|
| LNE 380 | ML 380 | ST 50-2 | S 355 MC | - | 050 Y | QStE 380 TM |
| LNE 420 | ML 420 | ST 50-2 | S 420 MC | Gr 60 | 060 X | QStE 400 TM |
| LNE 460 | ML 460 | ST 52-3 | S 460 MC | - | 060 Y | QStE 460 TM |
| LNE 500 | ML 500 | ST 52-3 | S 500 MC | Gr 70 | 070 X, Y | QStE 500 TM |
| LNE 550 | ML 550 | ST 60-2 | S 550 MC | Gr 80 | 080 X | QStE 550 TM |
| LNE 600 | ML 600 | ST 60-2 | S 600 MC | - | 080 X, Y | - |

Fonte: Frees, (2017)

De acordo com a norma ABNT NBR 6656 (2008, p.5)

Esta norma estabelece os requisitos exigíveis para encomenda, fabricação e fornecimento que devem obedecer às bobinas e chapas de aço laminado a quente de 2,00mm até 16,00mm de espessura, de aço carbono e aço de baixa liga, acalmado, tipo perlita reduzida, para aplicações em pelas de conformabilidade crítica, onde requisitos especiais de propriedades mecânicas e de soldabilidade são fundamentais, como longarinas, travessas e suportes.

O aço NBR 6656 LNE 380 a ser estudado no presente trabalho é produzido pela empresa Usiminas, de acordo com informações do fabricante este tipo de aço é laminado a quente, produzido nas espessuras de 2,00mm até 13,00mm de espessura e larguras que variam de 750 a 2100mm, no entanto tais dimensões podem sofrer alterações para maiores ou menores de acordo com características técnicas ou especificações de norma. Estes aços são elaborados com aços de Alta Resistência e Baixa Liga (HSLA) submetidos à laminação controlada, permitindo a obtenção de altos valores de resistência mecânica com relativamente baixo carbono equivalente. São produtos que apresentam bom desempenho para conformação a frio, soldabilidade e resistência a fadiga, empregados em componentes automotivos.

A Tabela 4 faz um comparativo entre as informações obtidas através da norma que regulamenta esse aço e a composição real do material estudado, mostrando as propriedades químicas em cada caso.

Tabela 4 - Tabela comparativa das propriedades químicas do aço LNE 380 entre norma e fabricante

| Fonte | Material | C máx. | Mn máx. | Si máx. | P máx. | S máx. | Al Metálico | Nb máx. | V | Ti |
|----------|----------|--------|---------|---------|--------|--------|-------------|---------|------|--------|
| NBR 6656 | LNE 380 | 0,12 | 1,10 | 0,35 | 0,025 | 0,015 | 0,015 | 0,12 | 0,12 | 0,20 |
| USIMINAS | LNE 380 | 0,12 | 1,10 | 0,30 | 0,030 | 0,030 | ≥ 0,01 | 0,04 | - | ≥ 0,02 |

Fonte: Frees, (2017)

De acordo com Frees (2017), pequenas diferenças na composição de alguns elementos entre o que é descrito pela norma e o fabricante são notadas. Pode-se observar através da Tabela 4 as diferenças citadas, como, diferença de 0,05% de Silício (Si). Observa-se também a diferença de 0,05% a menos a quantidade de fósforo (P) para o aço NBR LNE 6656, nota-se também a diferença de Enxofre (S), sendo o dobro para o aço Usiminas, que possui também 0% Vanádio (V) e um terço da quantidade de Nióbio (Nb).

Na Tabela 5, observa-se o alongamento mínimo (δ) especificado pela norma é de 23% enquanto o fabricante estipula um valor de 20%. Em contrapartida a Usiminas, fabricante do aço estudado determina uma tensão de escoamento (σ_{esc}) de 540Mpa e tensão máxima ($\sigma_{máx}$) e até 620Mpa, ou seja, existe uma maior tolerância nessas propriedades em comparação ao que a norma estabelece.

Tabela 5 - Tabela comparativa das propriedades químicas do aço LNE 380 entre norma e fabricante

| Fonte | Material | Tensão de Escoamento σ_{esc} (MPa) | Tensão Máxima $\sigma_{máx}$ (MPa) | Alongamento δ (%) |
|----------|----------|---|------------------------------------|--------------------------|
| NBR 6656 | LNE 380 | 380 a 530 | 460 a 600 | 23 |
| USIMINAS | LNE 380 | 380 a 540 | 460 a 620 | 20 |

Fonte: Frees, (2017)

O aço LNE 380 possui ótimas características quanto a conformabilidade e soldabilidade, apresentam boa resistência a fadiga, bem como um desempenho considerável em se tratando de conformação a frio. Devido a estas características chapas deste aço possuem

diversas aplicações como: rodas, longarinas, chassis, guindastes, equipamentos agrícolas, travessas, entre outros (FREES, 2017).

2.4 Matriz de dobramento

Para Schaeffer *et al* (2008), a matriz é o elemento de estampo que suporta maior esforço, e, no entanto, o de maior responsabilidade. Suas superfícies devem ser lisas, sem rebarbas e paralelas. Geralmente é montada sobre a base, de forma que se mantenha estática, para evitar qualquer tipo de movimento durante o processo de dobramento.

Para construção de uma matriz, deve-se determinar o material a ser utilizado levando em consideração a função que a mesma irá desempenhar. Um cuidado especial com o punção e a matriz é de extrema importância, pois são os elementos que estarão em contato direto com o material a ser deformado.

Para Schaeffer *et al* (2008, p.4): “O projeto auxilia na criação de matrizes eliminando os erros encontrados em projetos anteriores. A diminuição do tempo de produção através da diminuição do número de estágios de produção está entre os objetivos”. A Figura 34 ilustra uma matriz de dobramento.

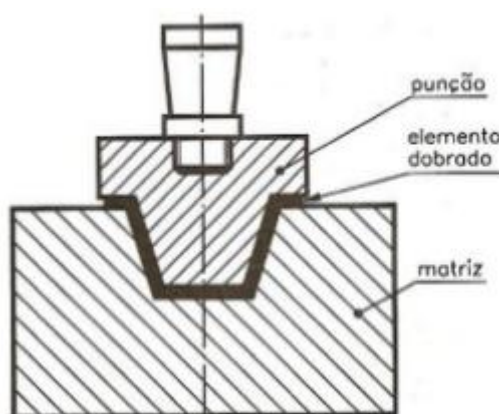


Figura 34 - Representação de uma matriz de dobramento

Fonte: Adaptado de Palmeira (2005)

Pode-se observar na Figura 34 os principais elementos que compõe uma matriz de dobramento, sendo o punção, o elemento dobrado e a base da matriz. As matrizes de dobramento são consideradas como moldes, que são construídos de forma a conferir ao material dobrado as características e formatos usinados destas matrizes. Para este tipo de

dobramento com a geometria definida e considerando a espessura do material, a folga entre punção e matriz é constante, igual a espessura da chapa 2mm.

Para Penteado (2019), a folga entre punção e matriz para este tipo de dobramento deve ser igual a espessura da chapa, a menos que a peça for submetida ao processo de cunhagem que aumentará as forças para o dobramento.

Schaeffer *et al* (2004), relata que a matriz serve de molde para o produto, no entanto é construída com geometria semelhante ao produto desejado. O punção também é construído com a geometria da peça, porém descontado da espessura do material a ser dobrado.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo tem como intuito descrever as características do desenvolvimento da pesquisa, dando ênfase a sua natureza e tipo, aos materiais e métodos, as suas variáveis e indicadores, aos instrumentos de captação de dados, bem como a forma de organização dos mesmos.

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Prodanov e Freitas (2013, p. 42), a pesquisa científica é definida como “a realização de um estudo planejado, sendo o método de abordagem do problema o que caracteriza o aspecto científico da investigação”. Gil (2002) relata que a pesquisa tem como objetivo procurar respostas aos problemas propostos. Desta forma ela se desenvolve em um processo de diversas fases da formulação do problema até a obtenção dos resultados.

A pesquisa pode ser classificada quanto a natureza de duas formas, qualitativa e quantitativa.

Para Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa qualitativa é aquela em que os dados coletados são descritivos e o ambiente é a fonte direta dos dados, a preocupação é maior com o processo do que com o produto. Já a pesquisa quantitativa ocorre quando se traduz em números, opiniões e informações para o posterior tratamento desses dados, em que requer o uso de técnicas estatísticas.

Segundo Gil (2002), as pesquisas podem ser classificadas com base em seus objetivos gerais, deste modo é possível classificá-las em três grupos:

➤ Exploratórias

Tais pesquisas tem como objetivo deixar o problema mais palpável e explícito ou criar hipóteses, ou seja, estas pesquisas objetivam principalmente o desenvolvimento das ideias ou descoberta de intuições. No entanto envolvem, em sua grande maioria: levantamento bibliográfico, entrevista com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado e análise de exemplos que facilitam a compreensão.

➤ Descritivas

Têm como objetivo principal a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre as variáveis. Algumas pesquisas descritivas pretendem, além de identificar a existência de relações entre variáveis, a

determinação da natureza de tais relações, aproximando-se assim de uma pesquisa explicativa. Todavia, existem pesquisas descritivas que, por proporcionarem uma nova perspectiva do problema, aproximou-se das exploratórias.

➤ Explicativas

A preocupação central de tais pesquisas é a identificação de fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. As pesquisas explicativas são as que mais aprofundam o conhecimento da realidade, pois explicam as causas das coisas. Dessa maneira, é, também, o tipo de pesquisas de maior complexidade, já é maior a possibilidade de ocorrência de erros.

As pesquisas poderão ainda ser classificadas, no que diz respeito aos procedimentos técnicos (GIL, 2008):

➤ Pesquisas Bibliográfica

Quando é desenvolvida com base em material já elaborado e publicado, constituída principalmente de livros, artigos de periódicos e atualmente com material disponibilizado na internet, antes não recomendados.

➤ Pesquisa Documental

Muito semelhante a bibliográfica, sua principal diferença é que é elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico, ou que ainda podem ser reelaborados de acordo com os objetivos da pesquisa.

➤ Pesquisa Experimental

Quando é determinado um objeto de estudo, selecionadas as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

➤ Estudo de Caso

Consiste em um estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que possibilite seu amplo e detalhado conhecimento.

➤ Pesquisas Ação

Quando concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

➤ Pesquisa Participante

Quando se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e membros das situações investigativas.

Diante do exposto, pode se dizer que, quanto a abordagem esta pesquisa tem caráter quantitativa, pois utiliza de dados numéricos obtidos na análise do retorno elástico, após processo de dobramento guiado em matriz giratória aço NBR 6656 LNE 380. Quanto ao objetivo, trata-se de uma pesquisa de caráter exploratória, pois trata-se de um processo experimental para análise do retorno elástico, afim de descrever, registrar e comparar os resultados obtidos. O trabalho ainda abrange uma pesquisa de caráter bibliográfico e experimental, pois é fundamentada em uma variedade de livros, teses, dissertações e artigos, além do ensaio de dobramento do aço estudado.

3.2 Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi utilizado o aço de Alta Resistência e baixa Liga (HSLA), NBR 6656 LNE 380. A amostra para realização do estudo foi doada por uma empresa siderúrgica situada Vale do Aço em MG.

O aço LNE 380 é um aço laminado a quente, submetido a laminação controlada, o que lhe permite altos níveis de resistência mecânica e boa soldabilidade. Devido sua qualidade estrutural e características interessantes, possui grande aplicação em componentes automotivos onde dobramentos são empregados. A Tabela 6 ilustra a composição química e as propriedades mecânicas deste aço conforme descritas no catálogo do fabricante Usiminas.

Tabela 6 - Composição química e propriedades mecânicas aço LNE 380

| AÇO NBR 6656 LNE 380 - USIMINAS | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------|-----|------|-------|-------|------------------------|-----------|-----------|------------|
| Faixa Espess. (mm) | Composição Química (%p/p) | | | | | Propriedades mecânicas | | | |
| | C | Mn | Si | P | S | Direção Ensaio Tração | LE(Mpa) | LR(Mpa) | Along %mín |
| 2 - 13mm | 0,12 | 1,1 | 0,35 | 0,025 | 0,015 | Transversal | 380 - 530 | 460 - 600 | 23 |

Fonte: Adaptado Catálogo Usiminas (2013)

3.2.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram retirados de amostra fornecida pela Usiminas nas dimensões 500mm x 500mm e 2mm de espessura. Para realização dos ensaios, os corpos de prova foram retirados da amostra no sentido de laminação da chapa e no sentido perpendicular à laminação da chapa. Foram preparados um total de 12 corpos de prova para realização do ensaio, sendo 6 retirados no sentido de laminação da chapa e 6 no sentido perpendicular à laminação, nos tamanhos 200mm de comprimento x 72mm de largura. A Figura 35 ilustra a geometria da amostra após dobramento com as dimensões em milímetros, bem como demonstra o sentido de laminação da chapa.

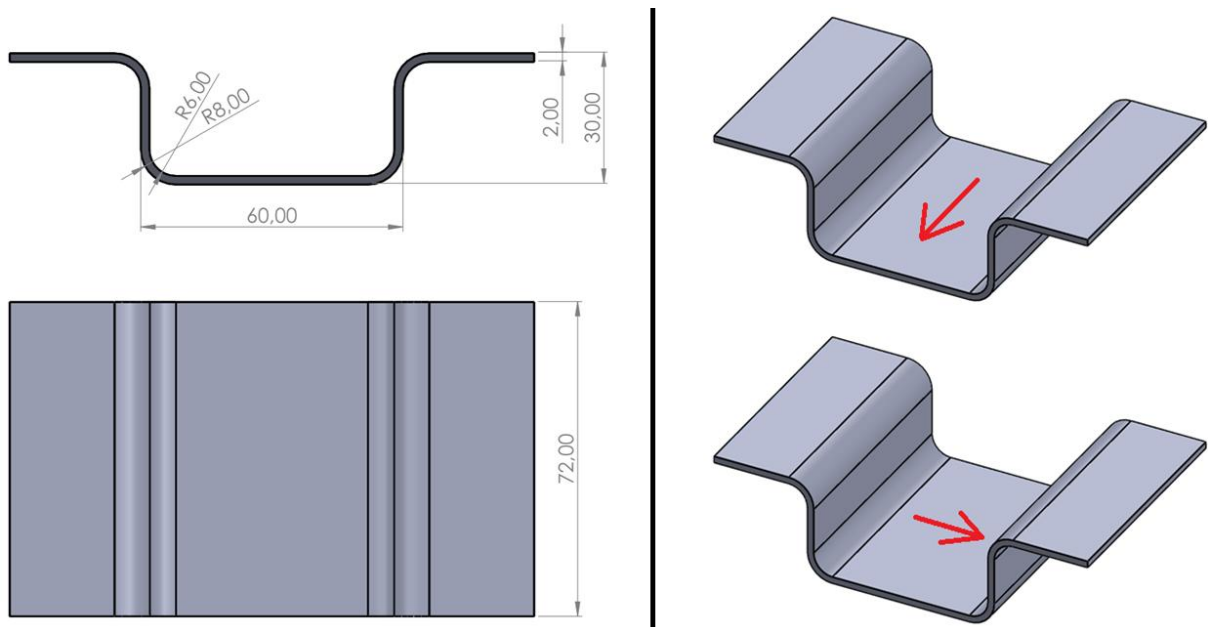


Figura 35 - Ilustração da geometria da amostra: dimensões em milímetro (esquerda), sentido de laminação (direita/superior) e sentido perpendicular (direita/inferior)

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para preparação dos corpos de prova, os mesmos foram cortados em uma guilhotina e tiveram suas arestas desbastadas com lixa, para remover qualquer rebarba que pudesse interferir nos resultados do ensaio. Os corpos de prova (CP) foram identificados em duas seqüências de 1 a 6 sendo: CP01, CP02, CP03, CP04, CP05 e CP06 sendo um conjunto retirado no sentido de laminação e outro em sentido perpendicular.

Os corpos de prova foram retirados da amostra do material como recebido, ou seja, não foi realizado nenhum tratamento das amostras. Todos os corpos de prova possuem a

mesma espessura (S_0) e as mesmas dimensões de largura e comprimento. A Figura 36 ilustra os corpos de prova preparados para realização do ensaio.

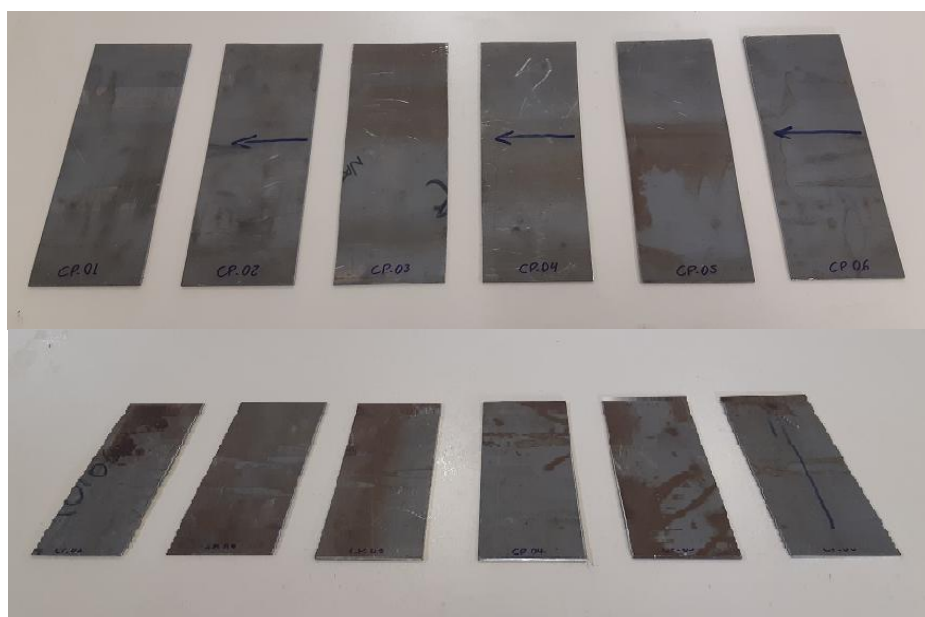


Figura 36 - Corpos de prova sentido laminação (inferior) sentido perpendicular (superior)

Fonte: Pesquisa direta (2019)

3.2.2 Elaboração da Matriz de Dobramento

Para realização do ensaio de dobramento das amostras em perfil “cartola”, foi projetada e construída uma matriz de dobramento utilizando o *software Solidworks®*. Para construção da base da matriz e do punção utilizou o aço AISI 1045. Para construção dos roletes e das placas de base e superior, foi utilizado o aço AISI 1020. Estes aços foram utilizados para construção da matriz da forma que foram adquiridos, ou seja, não passaram por nenhum tratamento térmico ou mecânico para aumento de dureza. O tipo de matriz projetada para realização da pesquisa é uma matriz giratória, e a modalidade de dobramento chamada de dobramento guiado que ocorre quando o punção e a matriz forçam o corpo de prova a se deformar dentro de um espaço e forma pré-estabelecidos. Este modelo de construção da matriz favorece que a deformação ocorra com baixos níveis de esforços durante a realização do dobramento. A Figura 37 representa as matrizes de dobramentos que serviram de exemplo para a construção da matriz para realização deste estudo.

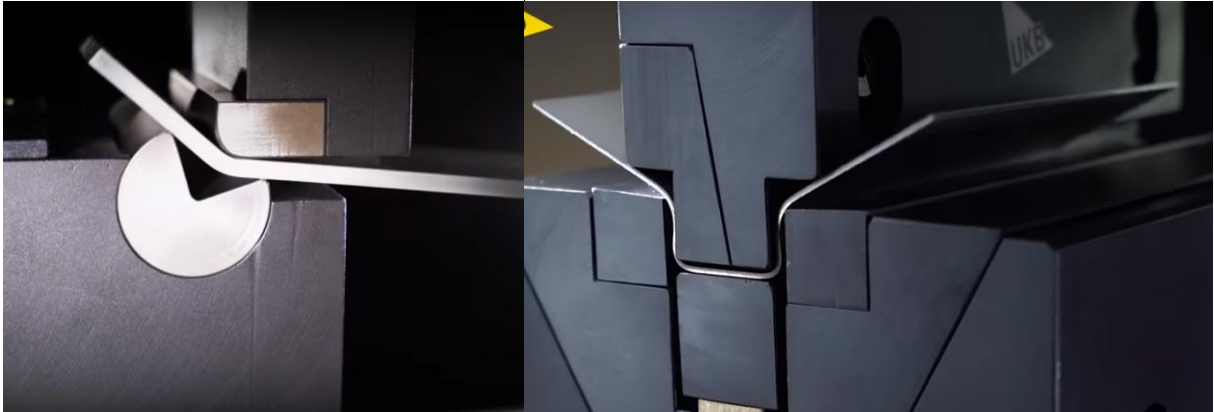


Figura 37 - Representação matriz giratória (esquerda) e dobramento guiado (direita)

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=-eykdYvws4k>, 2019.

Para construção da matriz, as peças foram usinadas no torno ROMI Centur 30D e no centro de usinagem ROMI D600, tais equipamentos fazem parte do laboratório de Usinagem do Departamento de Mecânica da UFOP. A Figura 38 demonstra os equipamentos citados.



Figura 38 - Torno Romi Centur 30D (esquerda) Fresa Romi D600 (direita)

Fonte: Pesquisa direta (2019)

3.2.3 Ensaio de Dobramento

A realização do ensaio tem por objetivo a análise do retorno elástico após o dobramento das amostras em perfil “cartola”. O ensaio foi realizado com a utilização de uma presa hidráulica da marca *NOWAK* com capacidade de 15ton, alocada no Laboratório de Sinterização do Departamento de Engenharia Mecânica da UFOP como ilustra a Figura 39. Foi utilizado o lubrificante DCP 35X para execução do dobramento. A velocidade média de avanço do cilindro hidráulico foi de aproximadamente 9 mm/s, uma vez que essa prensa é acionada por uma bomba hidráulica acoplada a um motor Trifásico de 2 hp.



Figura 39 - Prensa hidráulica 15ton

Fonte: Pesquisas direta (2019)

3.2.4 Medição dos ângulos

Após realização dos ensaios nos corpos de prova, os ângulos finais de dobramento para todas as condições estudadas foram medidos com auxílio da máquina de medição tridimensional *TESA Micro-Hite 3D*, que pode ser vista através da Figura 41, esta máquina faz parte do Laboratório de Usinagem do Departamento de Mecânica da UFOP. Tal medição permite o cálculo, a partir da diferença entre o ângulo de dobramento fornecido pela matriz e o ângulo medido após realização do ensaio.



Figura 40 - Máquina de medição tridimensional

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para análise destes resultados foi utilizado o método *Anova*, que é uma técnica de teste de hipóteses usada para comparar as médias de três ou mais populações, baseado na análise das variâncias amostrais. De acordo com Bussab *et al* (1987), “*Anova* é uma coleção de modelos estatísticos no qual a variância amostral é particionada em diversos componentes devido a diferentes fatores, que nas aplicações estão associados a um processo, produto ou serviço”. As hipóteses do *Anova* são as seguintes:

- Hipótese nula (H_0) – a média de todas as populações são iguais, ou seja, não há variação em média entre os grupos;

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

- Hipótese alternativa (H_1) – nem todas as médias populacionais são iguais, ou seja, pelo menos uma média é diferente. Não quer dizer que todas as médias são diferentes, alguns pares podem ser iguais.

$$H_1 = \text{Nem todos } \mu_k \text{ são iguais}$$

3.3 Instrumento de Coleta de Dados

Nesta etapa acontece a coleta de dados em torno do tema abordado afim de obter embasamento necessário para a realização da pesquisa através de revisões bibliográficas, observações e experimentos. Assim, o levantamento de dados será feito por meio de registros documentais, bem como a utilização do *Microsoft Excel*®.

3.4 Tabulação e Análise de Dados

A tabulação dos dados fornecidas pelos documentos e *softwares* citados anteriormente foram dispostos em planilhas do *Microsoft Excel*®.

3.5 Conclusões Finais

Neste capítulo foi apresentada toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho, bem como o tipo de pesquisa, os materiais e métodos utilizados, as variáveis e indicadores utilizados no desenvolvimento da pesquisa, instrumentos de coleta de dados e análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Projeto da Matriz de Dobramento

O projeto da matriz de dobramento foi desenvolvido através do *software Solid works®*. Na matriz desenvolvida encontra-se a geometria da peça a ser produzida, que neste caso trata-se de dobramento do tipo perfil cartola. A matriz foi construída com os seguintes raios de dobramento, 6mm para os raios internos e 8mm para os raios externos. O projeto foi desenvolvido com alguns cuidados, visto que a matriz é responsável por receber todo esforço para conformação do material, no entanto as peças foram usinadas mantendo as superfícies bem lisas, sem rebarbas e completamente paralelas, bem como o projeto buscou a construção de uma matriz de dobramento giratória de forma que se consiga: minimizar os esforços durante a dobra, facilitar a execução e manutenção das parte, aumento da vida útil da matriz, utilização de aços como AISI 1020 e 1045 visando menor custo de projeto e construção.

A Figura 42 mostra as vistas do projeto e as dimensões de construção da matriz.

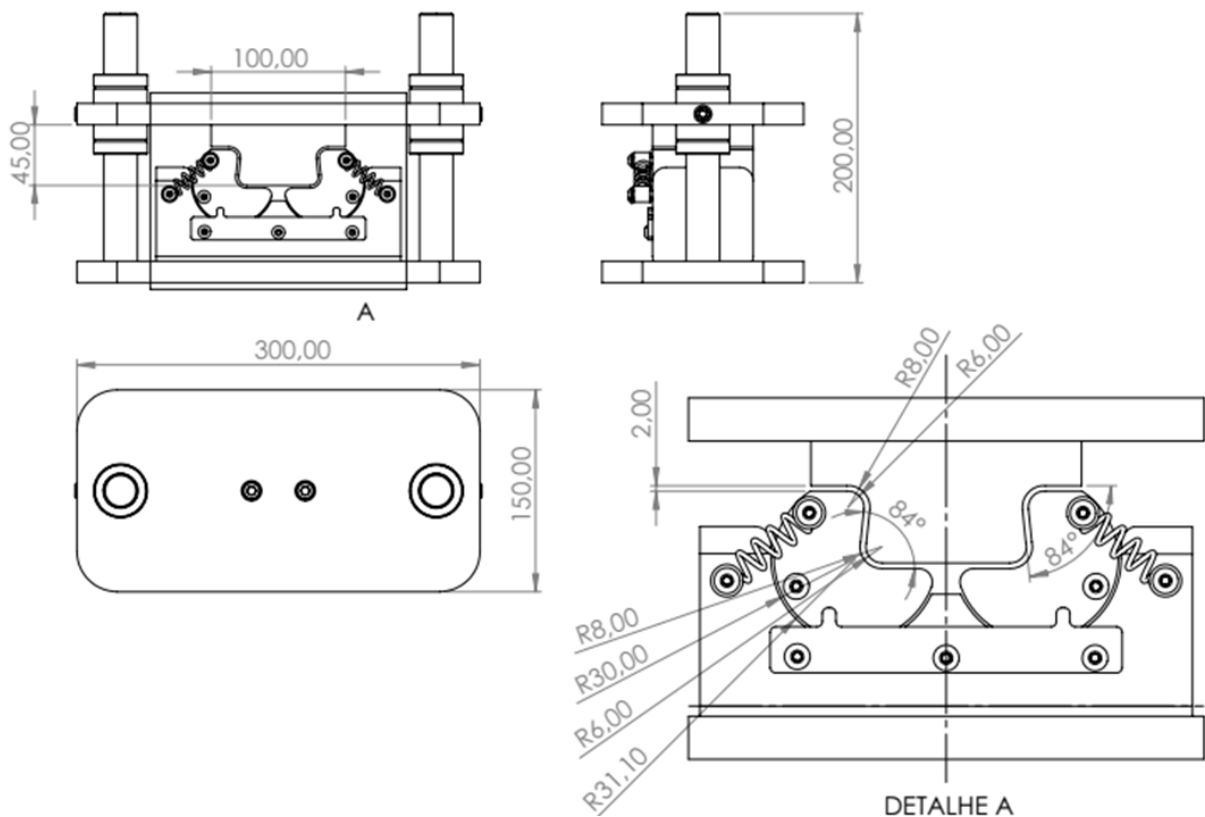


Figura 41 - Projeto fabricação da matriz

Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Os ângulos da matriz, punção e rolos de conformação (Figuras 41 e 42), foram definidos a partir de premissas definidas por Frees (2017), o qual também investigou o retorno elástico do aço LNE 380, no entanto, o tipo de dobramento e a espessura do corpo de prova (6,35 mm) foram diferentes dos estabelecidos neste trabalho. Frees (2017) realizou um dobramento do tipo semi-guiado (biapoiado) no qual o punção tinha um raio de 6 mm, assim, após os ensaios, os resultados referentes ao retorno elástico foram de 6°. A partir desses resultados foram definidos, para o presente trabalho, que os ângulos da matriz seriam de 84° e os raios internos seriam de 6 mm, o objetivo de utilizar essas condições iniciais foi de estabelecer uma correlação ou referência de retorno elástico do material estudo.

A matriz foi desenvolvida exclusivamente para este estudo, e embora este processo de dobramento já exista, foi desenvolvida toda geometria e dinâmica do dobramento, o qual, não encontrou-se nada similar no mercado. A Figura 43 ilustra uma vista explodida da matriz, onde é possível ver todos os itens para construção, a identificação de cada item na matriz, a tabela com a descrição, quantidade dos itens e material de construção, bem como a sequência de montagem do conjunto.

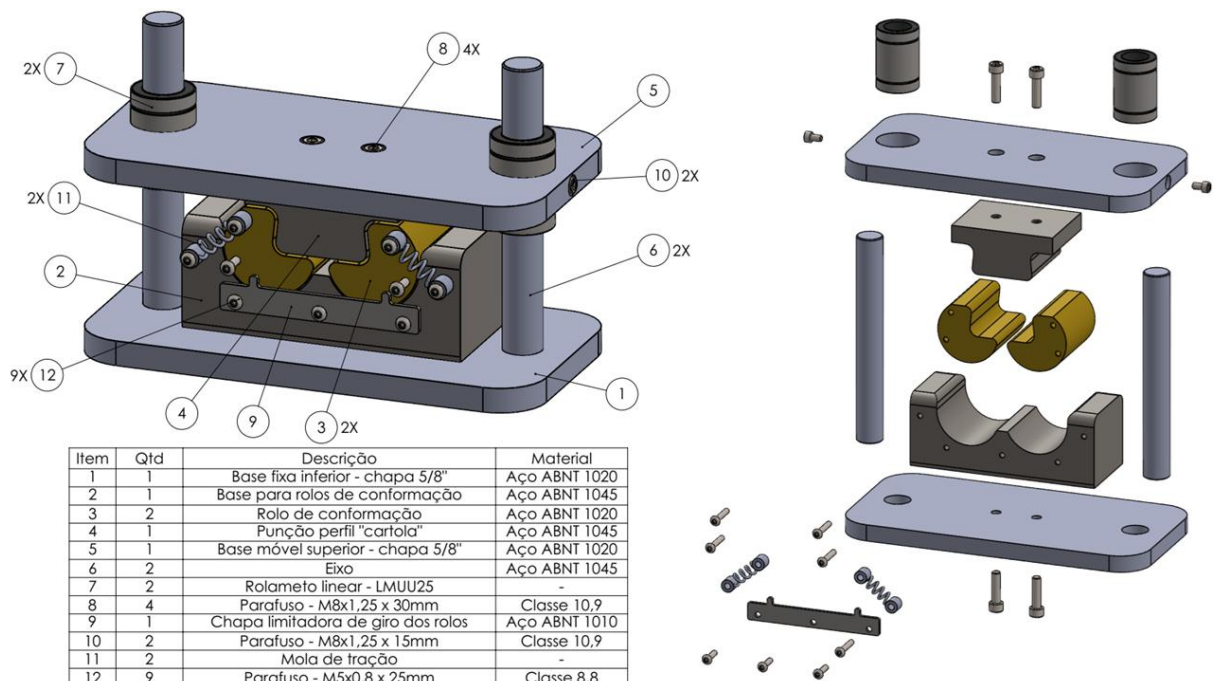


Figura 42 - Vista explodida da matriz de dobramento

Fonte: Pesquisa Direta (2019)

4.1.1 Construção da matriz de dobramento

O conjunto matriz de dobramento, idealizado e projetado foi dividido em dois sistemas, o primeiro, é composto por componentes de base ou componentes fixos e, o segundo, por componentes móveis que conformam uma chapa de 2 mm de espessura. Na Figura 44 pode-se observar os componentes fabricados pelo processo de usinagem e os comprados no mercado para construção da matriz.



Figura 43 - Base, punção e roletes (esquerda) placas, eixos e rolamentos (direita)

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Após fabricação e ajustes dos componentes, iniciou-se a montagem da matriz, na Figura 45 é possível observar o início da montagem dos eixos na placa de base e a montagem dos rolamentos lineares na placa superior à esquerda e a direita o término da montagem da matriz. Após montagem foi realizado o alinhamento da base, punção e roletes.



Figura 44 - Início da montagem da matriz (esquerda) - Término da montagem (direita)

Fonte: Pesquisa direta (2019)

4.2 Realizados dos ensaios

Para realização dos ensaios foi utilizado o lubrificante líquido DCP 35X entre a base da matriz e os roletes. O objetivo do uso de lubrificantes é basicamente criar uma camada na superfície das partes de modo a facilitar o escorregamento da amostra e da ferramenta, a fim de evitar seu desgaste e outros defeitos.

Durante a realização dos ensaios, foi possível observar que a força necessária para conformação das amostras foi de aproximadamente 50 kN. Na figura 40 é possível observar a amostra sendo conformada em um perfil “cartola”.

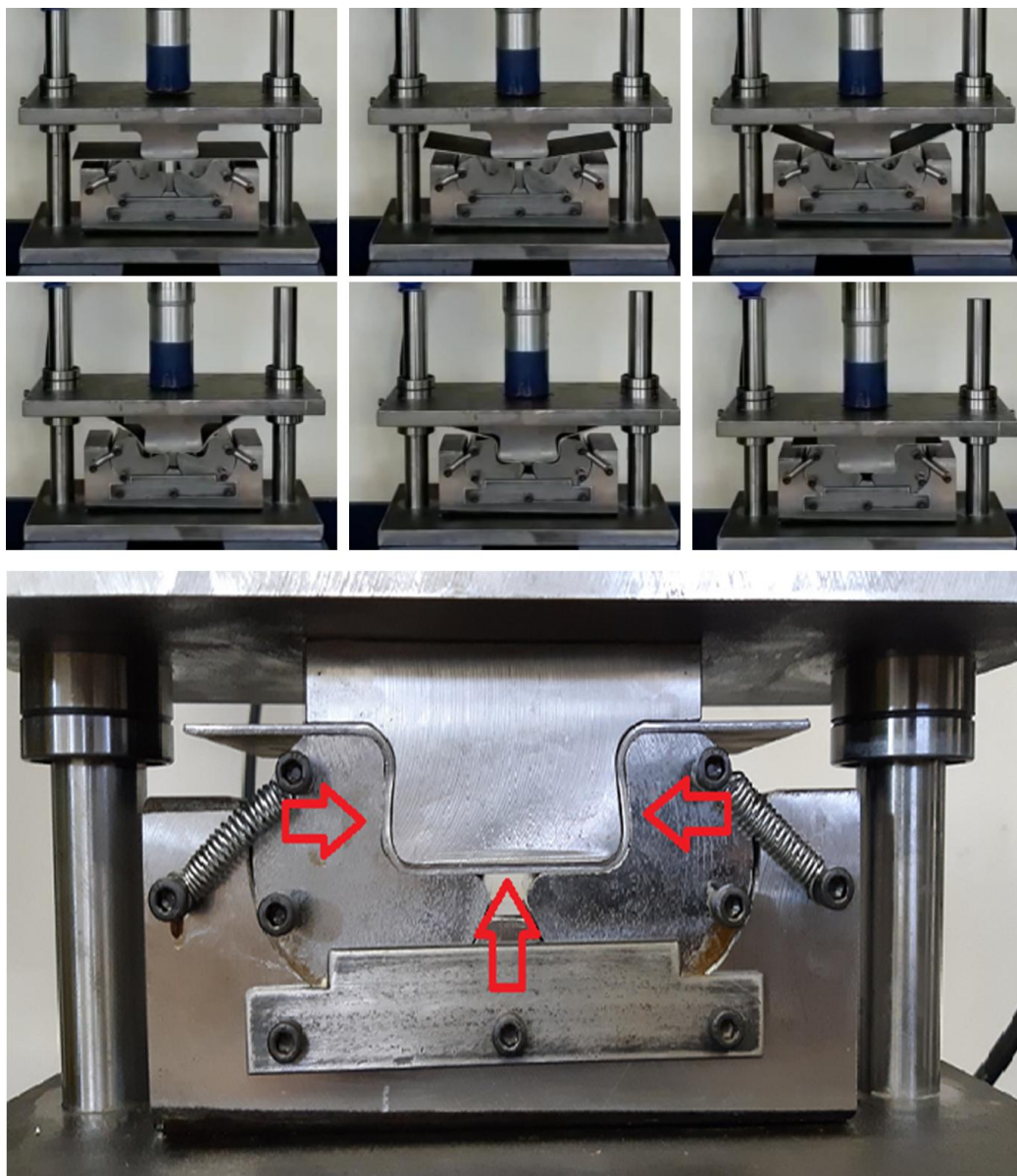


Figura 45 - Conformação da amostra em perfil cartola

Fonte: Pesquisa direta (2019)

4.2.1 Avaliação da superfície do material após o dobramento

As condições das superfícies internas e externas de dobramento de todas as amostras foram analisadas visualmente e não foram observadas trincas ou outras irregularidades decorrentes do processo de dobramento. Nas Figuras 46 e 47 são apresentadas como exemplo, imagens das superfícies internas e externas do aço NBR6656 LNE 380 após realização do dobramento em perfil “cartola”.

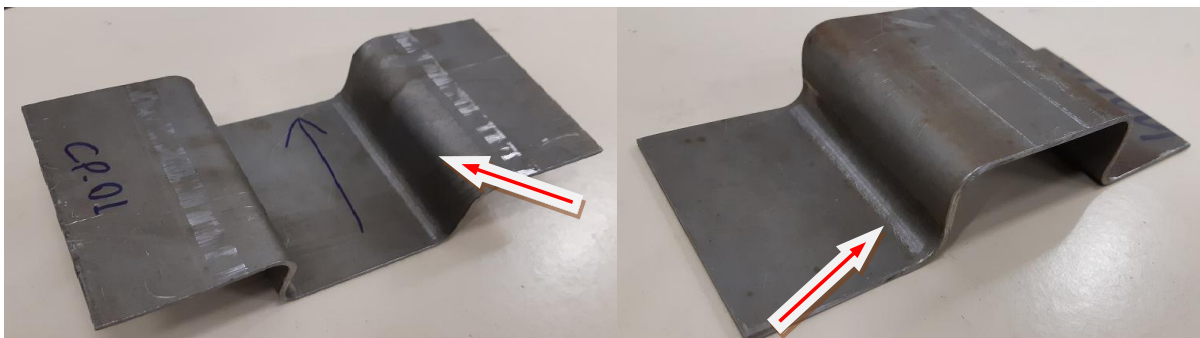


Figura 46 - Superfícies dos perfis cartola no sentido de laminação

Fonte: Pesquisa direta (2019)

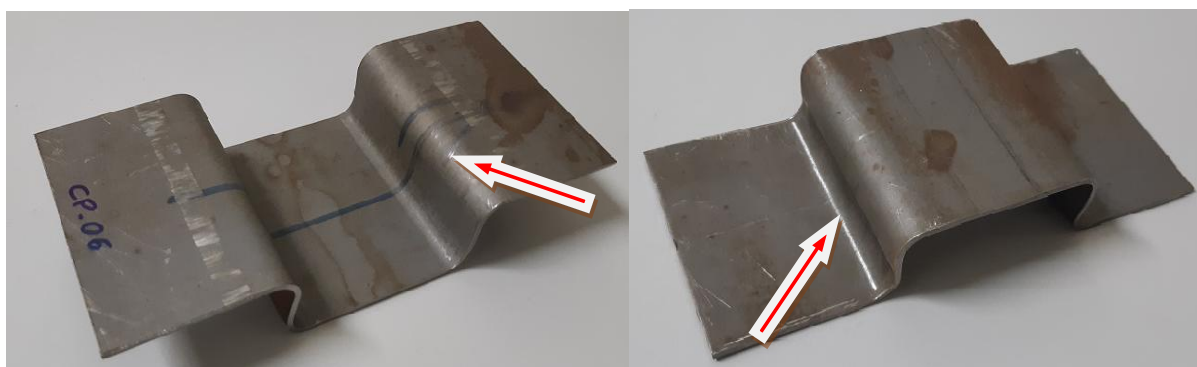


Figura 47 - Superfícies dos perfis cartola no sentido perpendicular à laminação

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A ausência de trincas e outras irregularidades podem ser confirmadas através da observação das imagens.

4.2.2 Avaliação da superfície dos componentes da matriz após dobramento

Após realização dos ensaios, pode-se observar nas Figuras 48 e 49 que, os componentes da matriz não apresentaram danos estruturais ou perda de forma (alteração da geometria) em decorrência do dobramento. Foi realizado uma análise visual principalmente nas partes que estiveram em contato direto com o material a ser dobrado, no caso, o punção e

os roletes. O punção fabricado com aço AISI 1045 e os roletes que foram fabricados com aço AISI 1020. É importante frisar que nenhum dos componentes da matriz foram submetidos a tratamento térmico ou mecânicos para aumento da dureza, esse resultado sugere que os esforços envolvidos no processo de dobramento são relativamente baixos.

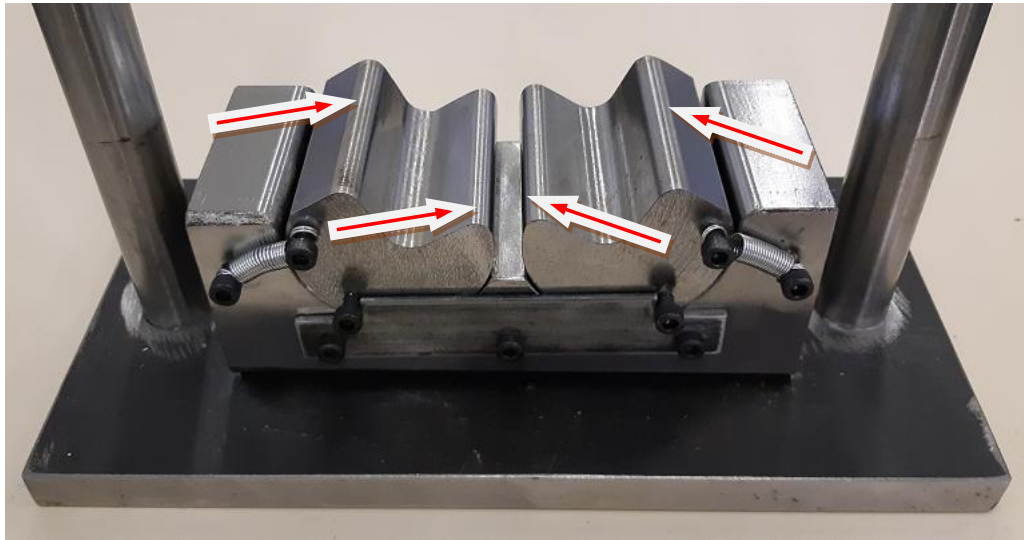


Figura 48 - Superfície dos roletes após dobramento

Fonte: Pesquisa direta (2019)

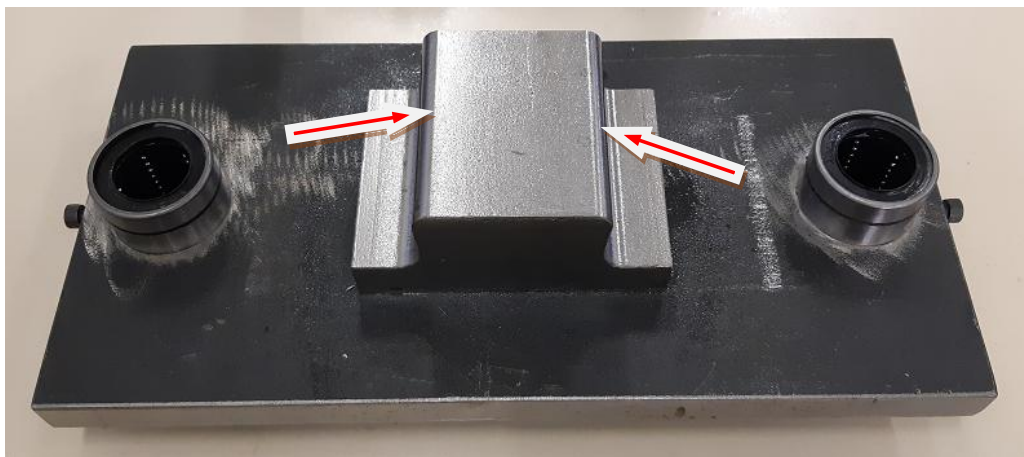


Figura 49 - Superfície do punção após dobramento

Fonte: Pesquisa direta (2019)

4.2.3 Medição dos Ângulos de Dobramento

A Figura 50 mostra todos os perfis dobrados com os corpos de prova retirados em sentido de laminação e perpendicular ao sentido de laminação da chapa, respectivamente.



Figura 50 - Perfis dobrados no sentido de laminação (inferior) sentido perpendicular (superior)

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A identificação dos ângulos de dobramento das amostras, foram definidos conforme ilustrado na Figura 51, os ângulos θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4 .

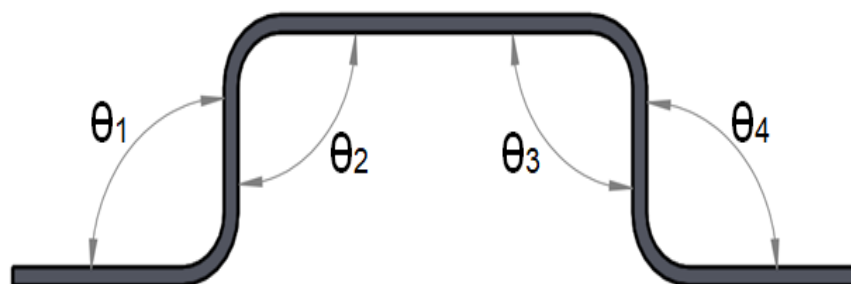


Figura 51 - Definição dos ângulos

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Cada ângulo de cada corpo de prova foi medido individualmente. Através da Figura 52 pode-se observar uma demonstração do perfil dobrado cujo corpo de prova CP02 e o painel da máquina para medição em três coordenadas demonstrando o ângulo medido (θ_1) no valor de 84,465°.

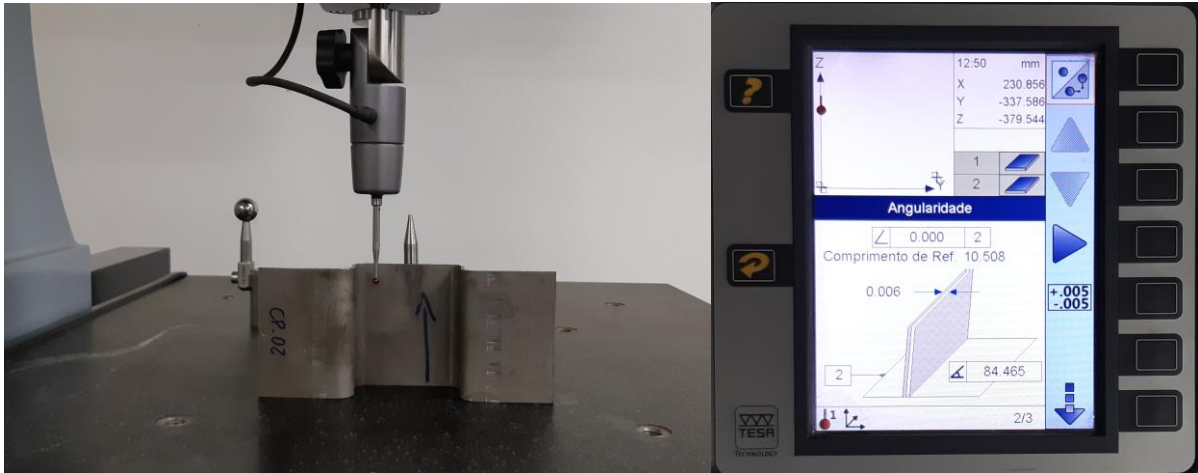


Figura 52 - Medição do ângulo de dobramento (esquerda) e painel de demonstração do ângulo medido (direita)

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A Tabela 7 descreve os resultados das medições dos ângulos e valores do retorno elástico obtido em cada ângulo após realização dos ensaios com os 12 corpos de prova.

Tabela 7 - Resultados das medições dos ângulos após realização dos ensaios

| Sentido de retirada dos corpos de prova | Corpos de prova | Valores dos ângulos de dobramento e Retorno Elástico | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|--|-------------------------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| | | Ângulo de construção da Matriz (°) | Ângulo de construção θ_1 (°) | Retorno Elástico (°) | Ângulo de construção da Matriz (°) | Ângulo de construção θ_2 (°) | Retorno Elástico (°) | Ângulo de construção da Matriz (°) | Ângulo de construção θ_3 (°) | Retorno Elástico (°) | Ângulo de construção da Matriz (°) | Ângulo de construção θ_4 (°) | Retorno Elástico (°) |
| Sentido de laminação | CP-01 | 83,905 | 84,96 | 1,055 | 83,911 | 85,675 | 1,764 | 83,955 | 87,296 | 3,341 | 84,109 | 86,729 | 2,62 |
| | CP-02 | 83,905 | 84,465 | 0,56 | 83,911 | 85,543 | 1,632 | 83,955 | 87,597 | 3,642 | 84,109 | 86,974 | 2,865 |
| | CP-03 | 83,905 | 85,666 | 1,761 | 83,911 | 85,783 | 1,872 | 83,955 | 88,207 | 4,252 | 84,109 | 87,241 | 3,132 |
| | CP-04 | 83,905 | 85,273 | 1,368 | 83,911 | 85,814 | 1,903 | 83,955 | 86,745 | 2,79 | 84,109 | 86,096 | 1,987 |
| | CP-05 | 83,905 | 84,646 | 0,741 | 83,911 | 85,521 | 1,61 | 83,955 | 87,326 | 3,371 | 84,109 | 86,565 | 2,456 |
| | CP-06 | 83,905 | 85,4 | 1,495 | 83,911 | 86,195 | 2,284 | 83,955 | 87,243 | 3,288 | 84,109 | 86,763 | 2,654 |
| Perpendicular ao sentido de laminação | CP-01 | 83,905 | 84,5 | 0,595 | 83,911 | 85,922 | 2,011 | 83,955 | 88,017 | 4,062 | 84,109 | 86,557 | 2,448 |
| | CP-02 | 83,905 | 84,961 | 1,056 | 83,911 | 85,748 | 1,837 | 83,955 | 87,967 | 4,012 | 84,109 | 85,342 | 1,233 |
| | CP-03 | 83,905 | 84,629 | 0,724 | 83,911 | 85,731 | 1,82 | 83,955 | 87,911 | 3,956 | 84,109 | 86,52 | 2,411 |
| | CP-04 | 83,905 | 84,742 | 0,837 | 83,911 | 85,756 | 1,845 | 83,955 | 87,339 | 3,384 | 84,109 | 86,192 | 2,083 |
| | CP-05 | 83,905 | 84,908 | 1,003 | 83,911 | 86,074 | 2,163 | 83,955 | 87,816 | 3,861 | 84,109 | 86,579 | 2,47 |
| | CP-06 | 83,905 | 84,155 | 0,25 | 83,911 | 85,416 | 1,505 | 83,955 | 87,664 | 3,709 | 84,109 | 86,347 | 2,238 |

Fonte: Pesquisa direta (2019)

4.2.4 Retorno Elástico

Analisando os resultados das medições descritos na Tabela 7 é possível observar que houve pouca diferença entre as medições dos ângulos dos corpos de prova comparando sentido de laminação e perpendicular ao sentido de laminação, entretanto percebe-se também diferenças maiores quando se compara valores medidos entre os ângulos no mesmo sentido.

Brandão (2015) relata que há vários fatores que influenciam no retorno elástico do material como a anisotropia, espessura, geometria da peça, processo e parâmetros de conformação, ferramental, lubrificação dentre outros.

Frees (2017), obteve em seus resultados valores de retorno elástico em torno de 6 e 7° na realização de dobramento em V semi-guiado utilizando corpo de prova de 6,35mm de espessura do mesmo aço utilizado neste trabalho.

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, observou-se diferenças significativas nos valores de retorno elástico quando comparados com o trabalho de Frees (2017), visto que o maior valor de retorno elástico obtido neste trabalho foi de $\theta_3=4,2^\circ$, valor este que corresponde ao corpo de prova CP03, retirado da amostra no sentido de laminação da chapa, como demonstra a Tabela 7. Verificou-se que o fato dos valores encontrados serem menores que os valores obtidos por Frees (2017), ocorreu devido a diferença de espessura do material trabalhado e as características geométricas da operação, ou seja, o tipo de construção da matriz de dobramento que favorece para que se tenha um retorno elástico menor, essa afirmativa está em consonância com o trabalho de Brandão (2015).

No entanto no experimento realizado neste estudo sugere-se que o material está controverso ao que diz (VANTYNE, 2015) e (FEI E HODGSON, 2006), pois obteve-se baixos valores de retorno elástico para a espessura trabalhada de 2mm, que foram de 0,2 a 4,2°. Enquanto Frees (2017) obteve valores de retorno elástico na faixa de 6 a 7° para espessura de 6,35mm. Sendo assim sugere-se que o aço estudado LNE 380 se comportou ao contrário, pois para espessura menor o retorno elástico obtido também foi menor.

A Tabela 8 mostra a distribuição dos valores da soma, média e variância de cada ângulo em cada sentido de laminação, bem como o resultado global destes itens.

Tabela 8 - Anova - Fator duplo com repetição

| RESUMO | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | Total |
|--|------------|------------|------------|------------|---------|
| <i>Sentido de laminação</i> | | | | | |
| Contagem | 6 | 6 | 6 | 6 | 24 |
| Soma | 510,41 | 514,53 | 524,44 | 520,37 | 2069,72 |
| Média | 85,1 | 85,75 | 87,40 | 86,73 | 86,24 |
| Variância | 0,21 | 0,06 | 0,23 | 0,15 | 0,97 |
| <i>Perpendicular ao sentido de laminação</i> | | | | | |
| Contagem | 6 | 6 | 6 | 6 | 24 |
| Soma | 507,89 | 514,65 | 526,72 | 517,54 | 2066,79 |
| Média | 84,65 | 85,77 | 87,78 | 86,26 | 86,12 |
| Variância | 0,09 | 0,05 | 0,063 | 0,22 | 1,41 |
| <i>Total</i> | | | | | |
| Contagem | 12 | 12 | 12 | 12 | |
| Soma | 1018,30 | 1029,18 | 1051,13 | 1037,90 | |
| Média | 84,86 | 85,77 | 87,59 | 86,49 | |
| Variância | 0,18 | 0,05 | 0,17 | 0,23 | |

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A Tabela 9 mostra os resultados das três fontes de variação, bem como os valores da soma dos quadrados, os graus de liberdade, os múltiplos quadrados, além do valor de F crítico tabelado e o valor de F calculado.

Tabela 9 - Comparação valor calculado e valor tabelado

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F (calculado)</i> | <i>Valor-P</i> | <i>F crítico (tabelado)</i> |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|----------------|-----------------------------|
| Comparação entre os sentidos | 0,178852 | 1 | 0,178852 | 1,327 | 0,256146 | 4,085 |
| Comparação entre os ângulos | 48,17796 | 3 | 16,05932 | 119,169 | 5,544620 | 2,839 |
| Comparação entre sentidos e ângulos | 1,458085 | 3 | 0,486028 | 3,607 | 0,021371 | 2,839 |

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Analisando a Tabela 9, pode-se comparar os resultados calculados com os resultados tabelados, e assim pode-se afirmar que:

- **Entre os sentidos de laminação** – $F < F$ crítico, significa que o sentido de laminação não faz diferença no retorno elástico;
- **Entre os ângulos** – $F > F$ crítico, significa que os ângulos são diferentes;
- **Entre os sentidos e os ângulos** – $F > F$ crítico, significa que o sentido de laminação e os ângulos são diferentes.

Diante dos resultados obtidos e mostrados na Tabela 9, pode-se afirmar que o sentido de laminação da chapa não tem influência no retorno elástico do material para o dobramento do aço NBR 6656 LNE 380.

Através da distribuição de *Fischer* para Análise de Variância, foi calculado os valores de P que é a probabilidade de estar certo ou não, logo foi calculado o Teste F (duas amostras para variância) entre os ângulos de cada grupo, ou seja, amostras em sentido de laminação e perpendicular ao sentido de laminação da chapa, onde obteve em todas comparações o valor de $P > 0,05$ que significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. As tabelas com estes cálculos são demonstradas no ANEXO A. Tendo calculado os valores de P , foi utilizado o método da distribuição *T-Student* através do Teste T (duas amostras presumindo variâncias equivalentes) para encontrar os valores de T entre os ângulos dos dois grupos. O ANEXO B ilustra as tabelas com as comparações entre todos os ângulos, com valores de $T > T_{crítico}$, significando que todos os ângulos comparados são iguais.

Após análise entre os grupos, foi realizado análise dentro de cada grupo fazendo uma comparação entre os ângulos, para o grupo sentido de laminação, foi calculado os valores de P através do Teste F onde obteve como resultado todos os valores de $P > 0,05$ que significa que as variâncias entre os ângulos são iguais, dados mostrados nas Tabelas contidas no ANEXO C. Porém realizando o Teste T (duas amostras presumindo variâncias equivalentes) para os ângulos dentro deste grupo obteve como resultado todos os $T < T_{crítico}$, significando que os ângulos são diferentes. Estes dados são mostrados através das Tabelas do ANEXO D.

Da mesma forma a análise foi feita para o grupo de amostras retiradas em sentido perpendicular a laminação da chapa, em uma comparação entre os ângulos deste grupo como mostra as Tabelas do ANEXO E, através do Teste F chegou aos valores de $P > 0,05$ significando que as variâncias entre os ângulos são iguais. Realizando o Teste T (duas amostras presumindo variâncias equivalentes) para os ângulos deste grupo teve como resultado todos os $T < T_{crítico}$, significando que os ângulos são diferentes, como mostra as Tabelas do ANEXO F.

O fato dos resultados apresentarem diferenças significativas para comparações entre os ângulos e entre os sentidos e os ângulos, já era esperado devido as pequenas dispersões encontradas nos resultados vistos na Tabela 7, quando se compara os valores entre os ângulos. Verificando tal situação, concluiu-se que a escolha da fixação do punção na placa superior e também a fixação da base da matriz na placa inferior foi equivocada, por maior cuidado que

se teve durante a montagem da matriz o posicionamento do punção e da base não estavam centralizados. Entende-se que tal fato poderia ser evitado modificando a forma de construção da matriz, fazendo um rebaixo na placa superior para encaixe do punção, bem como um rebaixo na placa inferior para encaixe da base da matriz. Assim evitando qualquer folga na furação dos elementos de fixação, eliminando qualquer liberdade durante a montagem, o que certamente ocasionou as diferenças encontradas na medição dos ângulos.

Embora tenha-se observado os fatos citados, observou-se também que mesmo com esta descentralização entre punção e matriz os ângulos θ_1 com θ_1 , θ_2 com θ_2 , θ_3 com θ_3 e θ_4 com θ_4 se mostraram constantes, concisos e com repetibilidade. A estatística mostra isso, os ângulos de um grupo com o outro são os mesmos, isso indica que mesmo não sendo exato, o resultado foi preciso, ou seja, a divergência foi acompanhada em todas as etapas.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

Pode-se concluir que as diferenças encontradas entre os valores de retorno elástico obtidos por Frees (2017), e valores obtidos neste estudo ocorreu devido a diferença da espessura do material trabalhado e características geométricas da operação. Deve-se ressaltar que o projeto da matriz foi desenvolvido exclusivamente para este estudo, e embora seja um processo já existente, a geometria da ferramenta e a dinâmica para realização do dobramento, a qual não foi encontrado igual no mercado, foi idealizada e desenvolvida para realização deste estudo.

É possível observar uma discrepância de valores encontrados no retorno elástico entre os quatro ângulos de dobramento de cada perfil. Diante das diferenças encontradas concluiu-se que este fato ocorreu devido ao tipo de fixação do punção e base da matriz, e que tal fato poderia ter sido evitado modificando o tipo de construção da matriz, fazendo um rebaixo nas placas para encaixe do punção e base da matriz, de forma a evitar qualquer folga de fixação. Mesmo com as observações mencionadas, foi possível concluir que os resultados se mostraram concisos e com repetibilidade, pois os valores dos ângulos entre os grupos (sentido de laminação) e (perpendicular ao sentido de laminação) são os mesmos, ou seja, a diferença de valores foi acompanhada em todas as etapas. Tal fato foi verificado através do método de análise de variância *ANOVA*, e pode-se afirmar que para este estudo o sentido de laminação do aço NBR 6656 LNE 380 não influencia no retorno elástico após etapa de dobramento.

Portanto, conclui-se que o presente estudo alcançou todos os objetivos previstos, a matriz construída foi eficiente para realização do trabalho, o método de medição dos ângulos de dobramento foi satisfatório para análise do retorno elástico e a estatística comprovou que mesmo os resultados não sendo exatos, foram precisos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6656: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade** - Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Critério de Classificação dos Aços, NBR NM 172/2000**. Rio de Janeiro, 2000.

ARAUJO, Daniele Dias. **Estudo do *Springback* na conformação mecânica de segmentos totoidais em chapas grossas**. 2007. 138p. Dissertação de Mestrado, pós-graduação em Engenharia de Materiais REDEMAT UFOP. Ouro Preto MG.

AGUILAR, M. T. P. **Aula 2 – Ensaio de tração**. 2011. Disponível em: <http://www.demc.ufmg.br/teresa/>. Acesso em 09 de Agosto 2019.

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. L. **Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações**. Publicação EESC-USP, São Carlos, 1999.

BENSON, S. **Reviewing Bottom Bending and Nested Parts**. Disponível em: <<http://www.thefabricator.com/article/bending/reviewing-bottom-bending-and-nested-parts>>. Acesso em: 19 Agosto 2019.

BRANDÃO, E. F. **Avaliação da estampabilidade de uma travessa de suspensão utilizando aços de alta resistência em substituição a um aço HSLA com 410 MPa de limite de resistência**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

BRAZ, Edson Márcio Cadete. **Análise de quinadora e estudo da recuperação elástica das chapas quinadas em V no ar**. 2010. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade de Aveiro, Aveiro

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica dos metais**. 6 ed (1 digital). Campinas: EPUSP, 2011. 258p.

Bussab, W. O. & Morettin, P. A. (1987), **Estatística Básica**, 4ª Edição, Atual, São Paulo.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de matérias uma introdução**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Grupo CIMM**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/>>. Acesso em: 14 Junho de 2019.

CHITÃO, Carllos Victor Cavalcanti Gastaldoni. **Efeito das características geométricas do processo e do material no dobramento de chapas de latão**. 2017. 50p. Departamento de Engenharia de Materiais. CEFET MG.

DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1981.

DIN 6935. **Cold Bending of Flat Rolled Steel Products**.

FEI, DONGYE; HODGSON, PETER. **Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels**. School of Engineering and Technology, Deakin University, Geelong, Vic. 3217, Australia. January 2006.

FREES, Monique Valentim da Silva. **Avaliações sobre o processo de dobramento do aço NBR6656 LNE 380**. 2017. Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do sul. Porto alegre.

GAUSMANN, Francis. **A influência da fibra neutra no desenvolvimento do planificado**. 2017. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi.

GASPAR, João Carlos Santos. **Optimização estrutural aplicada à melhoria da precisão de quinagem**. 2012. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, v. 5, n. 61, p. 2002.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 5. Ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIRALT, E. **Bainitic transformations in TRIP-assited steels its influence on mechanical properties**. PH.D. Thesis. Katholieke Universiteit Leuview, Mar. 1999.

GLOBO.COM, **AutoEsporte**. Disponível em:
<http://g1.globo.com/carros/noticia/2012/01/venda-de-veiculos-bate-novo-recorde-em-2011-segundo-fenabreve.html>. Acesso em 12 de Agosto de 2019.

<https://www.greencarcongress.com/2017/05/20170512-audia8.html>. Acesso em 10 de Novembro de 2019.

GORNI, A. A. **Aços Avançados de Alta Resistência: Microestrutura e Propriedades Mecânicas**. 5º Congresso de Corte e Conformação de Metais, Aranda Eventos, São Paulo, Outubro de 2009.

HARTER, Ibson Ivan. **Estudo para determinação dos parâmetros ideais para simulação dos processos de conformação de chapas grossas.** Panambi, 2013. <https://www.youtube.com/watch?v=-eykdYvws4k>, 2019.

KEELER S; KIMCHI, M. **Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0.** Disponível em: <<http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>>. Acesso em: 20 Maio 2019.

LAJARIM, Sérgio Fernando. **Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência.** 2012. Universidade Federal do Paraná, Curitiba PR.

Manual de Aços Gerdau – Aços Finos Piratini. Ed 2003; Disponível em <https://www.feis.unesp.br/departamentos/maprotec/catalogo_acos_gerdau>. Acesso em 16 Novembro 2019.

MARCONDES, P.V.P. **Manufatura de Chapas Metálicas – Dobramento.** Disponível em: <<ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM297TM159>>UFPR. Acesso em 10 julho 2019.

MARCONDES, P.V.P. **Projeto de Ferramentas para Conformação de Chapas.** UFPR 2008.

MORO, N; AURAS, A.P. **Processos de Fabricação: Conformação Mecânica II – Extrusão, Trefilação e Conformação de Chapas.** 2006. 34f. Apostila do Curso Técnico de Mecânica Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.

MULLER, FÁBIO. **Otimização de componentes fundidos utilizados em projetos de ferramentas para estampagem.** 2013. p. 156. Monografia. Engenharia Mecânica. Departamento de ciências exatas e engenharias. Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Panambi, 2013.

NETTO, Sérgio Eglan Silveira. **Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação.** (Dissertação para obtenção de Mestre de Engenharia) – Porto Alegre RS, 2004.

OSHIRO, Alfredo Yassuo. **Processamento e caracterização estrutural de aços com diferentes microestrutura obtidas a partir do aço GRAU LNE 380 visando aplicação veiculares** –Volta Redonda, 2013.

PALMEIRA, A.A. **Processos de Dobramento e Calandragem.** 2005. 38f. Apostila de Processos de Fabricação IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

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

PENTEADO, F. **Processos de Estampagem**. Disponível em: <http://bmalbert.yolasite.com/resources/Estampagem.pdf>. Acesso em: 10 Agosto 2019.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2a** Edição. Editora Feevale, 2013.

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

SANTOS, R.A. **Influência da Força Pós Dobra e da Geometria da Ferramenta no Retorno Elástico em Processos de Dobramento de Aços de Alta Resistência**. 2013. 115f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SCHAEFFER, L.; SILVEIRA, F, D. **Diretrizes para projeto de ferramenta de estampagem**. Parte II. Porto Alegre RS.

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

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

SCHMITZ, S. **Aços planos aplicados na indústria automobilística**. 2013. 87f. Material do Departamento de Engenharia de Materiais da UFPR.

SOUZA, S.A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo, 1982.

TSOUPIS, I; HILDERING, S; MERKLEIN, M. **Bending oh high-strength low-alloyed steel with respect to edge crack sensitivity caused by shearing operantios**. Procedia Engineering, v. 81, pp.712-717, Oct. 2019.

Usiminas, **Catálogo Tiras a Quente**. Disponível em <<https://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2013/11/us-0073-15f-cat-tiras-a- quente.pdf> 2013>.

VANTYNE, CHESTER. **Analytical prediction of springback based on residual differential strain during sheet metal bending**. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, January 2015.

ANEXO A

Tabela 10 - Teste f: Duas amostras para variâncias

| | θ1 | θ1 | | θ2 | θ2 |
|----------------------|-------------|--|----------------------|------------|--|
| Média | 85,06833333 | 84,64916667 | Média | 85,7551667 | 85,7745 |
| Variância | 0,212641867 | 0,087942167 | Variância | 0,06079297 | 0,0485831 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| gl | 5 | 5 | gl | 5 | 5 |
| F | 2,417973934 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. | F | 1,25131922 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. |
| P(F<=f) uni-caudal | 0,177361485 | | P(F<=f) uni-caudal | 0,40583314 | |
| F crítico uni-caudal | 5,050329058 | | F crítico uni-caudal | 5,05032906 | |

| | θ3 | θ3 | | θ4 | θ4 |
|----------------------|-------------|--|----------------------|------------|--|
| Média | 87,40233333 | 87,78566667 | Média | 86,728 | 86,25616667 |
| Variância | 0,231998267 | 0,063467867 | Variância | 0,1501808 | 0,222479767 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| gl | 5 | 5 | gl | 5 | 5 |
| F | 3,65536576 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. | F | 0,67503127 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. |
| P(F<=f) uni-caudal | 0,090589706 | | P(F<=f) uni-caudal | 0,33840286 | |
| F crítico uni-caudal | 5,050329058 | | F crítico uni-caudal | 0,1980069 | |

Fonte: Pesquisa direta (2019)

ANEXO B

Tabela 11 - Teste t: Duas amostras presumindo variâncias equivalentes

| | $\vartheta 1$ (sentido de laminação) | $\vartheta 1$ (perpendicular a laminação) | | $\vartheta 2$ (sentido de laminação) | $\vartheta 2$ (perpendicular a laminação) |
|----------------------|---|--|----------------------|---|--|
| Média | 85,06833333 | 84,64916667 | Média | 85,75516667 | 85,7745 |
| Variância | 0,212641867 | 0,087942167 | Variância | 0,060792967 | 0,0485831 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| Variância agrupada | 0,150292017 | | Variância agrupada | 0,054688033 | |
| Hip difer média | 0 | | Hip difer média | 0 | |
| gl | 10 | | gl | 10 | |
| Stat t | 1,872748295 | T < Tcrítico, significa que os ângulos são iguais. | Stat t | -0,14319281 | T < Tcrítico, significa que os ângulos são iguais. |
| P(T<=t) uni-caudal | 0,045298892 | | P(T<=t) uni-caudal | 0,44449109 | |
| t crítico uni-caudal | 1,812461123 | | t crítico uni-caudal | 1,812461123 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 0,090597784 | | P(T<=t) bi-caudal | 0,88898218 | |
| t crítico bi-caudal | 2,228138852 | | t crítico bi-caudal | 2,228138852 | |
| | $\vartheta 3$ (sentido de laminação) | $\vartheta 3$ (perpendicular a laminação) | | $\vartheta 4$ (sentido de laminação) | $\vartheta 4$ (perpendicular a laminação) |
| Média | 87,40233333 | 87,78566667 | Média | 86,728 | 86,25616667 |
| Variância | 0,231998267 | 0,063467867 | Variância | 0,1501808 | 0,222479767 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| Variância agrupada | 0,147733067 | | Variância agrupada | 0,186330283 | |
| Hip difer média | 0 | | Hip difer média | 0 | |
| gl | 10 | | gl | 10 | |
| Stat t | 1,727421642 | T < Tcrítico, significa que os ângulos são iguais. | Stat t | 1,893248076 | T < Tcrítico, significa que os ângulos são iguais. |
| P(T<=t) uni-caudal | 0,057395638 | | P(T<=t) uni-caudal | 0,043795993 | |
| t crítico uni-caudal | 1,812461123 | | t crítico uni-caudal | 1,812461123 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 0,114791275 | | P(T<=t) bi-caudal | 0,087591986 | |
| t crítico bi-caudal | 2,228138852 | | t crítico bi-caudal | 2,228138852 | |

Fonte: Pesquisa direta (2019)

ANEXO C

Tabela 12 - Teste f: Duas amostras para variâncias

| <i>Sentido de laminação</i> | $\vartheta 1$ | $\vartheta 2$ | <i>Sentido de laminação</i> | $\vartheta 2$ | $\vartheta 3$ |
|-----------------------------|---------------|--|-----------------------------|---------------|--|
| Média | 85,06833 | 85,75516667 | Média | 85,75517 | 87,4023333 |
| Variância | 0,212642 | 0,060792967 | Variância | 0,060793 | 0,23199827 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| gl | 5 | 5 | gl | 5 | 5 |
| F | 3,497804 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. | F | 0,262041 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. |
| P(F<=f) uni-caudal | 0,097803 | | P(F<=f) uni-caudal | 0,083965 | |
| F crítico uni-caudal | 5,050329 | | F crítico uni-caudal | 0,198007 | |

| <i>Sentido de laminação</i> | $\vartheta 1$ | $\vartheta 3$ | <i>Sentido de laminação</i> | $\vartheta 2$ | $\vartheta 4$ |
|-----------------------------|---------------|--|-----------------------------|---------------|--|
| Média | 85,06833 | 87,40233333 | Média | 85,75517 | 86,728 |
| Variância | 0,212642 | 0,231998267 | Variância | 0,060793 | 0,1501808 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| gl | 5 | 5 | gl | 5 | 5 |
| F | 0,916567 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. | F | 0,404799 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. |
| P(F<=f) uni-caudal | 0,463083 | | P(F<=f) uni-caudal | 0,171751 | |
| F crítico uni-caudal | 0,198007 | | F crítico uni-caudal | 0,198007 | |

| <i>Sentido de laminação</i> | $\vartheta 1$ | $\vartheta 4$ | <i>Sentido de laminação</i> | $\vartheta 3$ | $\vartheta 4$ |
|-----------------------------|---------------|--|-----------------------------|---------------|--|
| Média | 85,06833 | 86,728 | Média | 87,40233 | 86,728 |
| Variância | 0,212642 | 0,1501808 | Variância | 0,231998 | 0,1501808 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| gl | 5 | 5 | gl | 5 | 5 |
| F | 1,415906 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. | F | 1,544793 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. |
| P(F<=f) uni-caudal | 0,356028 | | P(F<=f) uni-caudal | 0,322417 | |
| F crítico uni-caudal | 5,050329 | | F crítico uni-caudal | 5,050329 | |

Fonte: Pesquisa direta (2019)

ANEXO D

Tabela 13 - Teste t: Duas amostras presumindo variâncias equivalentes

| <i>Sentido de laminação</i> | ϑ_1 | ϑ_2 | <i>Sentido de laminação</i> | ϑ_2 | ϑ_3 |
|-----------------------------|---------------|--|-----------------------------|---------------|--|
| Média | 85,06833 | 85,75516667 | Média | 85,75517 | 87,40233333 |
| Variância | 0,212642 | 0,060792967 | Variância | 0,060793 | 0,231998267 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| Variância agrupada | 0,136717 | | Variância agrupada | 0,146396 | |
| Hip difer média | 0 | | Hip difer média | 0 | |
| gl | 10 | | gl | 10 | |
| Stat t | -3,21736 | | Stat t | -7,45648 | |
| P(T<=t) uni-caudal | 0,004608 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. | P(T<=t) uni-caudal | 1,08E-05 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. |
| t crítico uni-caudal | 1,812461 | | t crítico uni-caudal | 1,812461 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 0,009216 | | P(T<=t) bi-caudal | 2,17E-05 | |
| t crítico bi-caudal | 2,228139 | | t crítico bi-caudal | 2,228139 | |

| <i>Sentido de laminação</i> | ϑ_1 | ϑ_3 | <i>Sentido de laminação</i> | ϑ_2 | ϑ_4 |
|-----------------------------|---------------|--|-----------------------------|---------------|--|
| Média | 85,06833 | 87,40233333 | Média | 85,75517 | 86,728 |
| Variância | 0,212642 | 0,231998267 | Variância | 0,060793 | 0,1501808 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| Variância agrupada | 0,22232 | | Variância agrupada | 0,105487 | |
| Hip difer média | 0 | | Hip difer média | 0 | |
| gl | 10 | | gl | 10 | |
| Stat t | -8,57378 | | Stat t | -5,188 | |
| P(T<=t) uni-caudal | 3,19E-06 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. | P(T<=t) uni-caudal | 0,000204 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. |
| t crítico uni-caudal | 1,812461 | | t crítico uni-caudal | 1,812461 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 6,39E-06 | | P(T<=t) bi-caudal | 0,000408 | |
| t crítico bi-caudal | 2,228139 | | t crítico bi-caudal | 2,228139 | |

| <i>Sentido de laminação</i> | ϑ_1 | ϑ_4 | <i>Sentido de laminação</i> | ϑ_3 | ϑ_4 |
|-----------------------------|---------------|--|-----------------------------|---------------|--|
| Média | 85,06833 | 86,728 | Média | 87,40233 | 86,728 |
| Variância | 0,212642 | 0,1501808 | Variância | 0,231998 | 0,1501808 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| Variância agrupada | 0,181411 | | Variância agrupada | 0,19109 | |
| Hip difer média | 0 | | Hip difer média | 0 | |
| gl | 10 | | gl | 10 | |
| Stat t | -6,74915 | | Stat t | 2,671879 | |
| P(T<=t) uni-caudal | 2,52E-05 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. | P(T<=t) uni-caudal | 0,011708 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. |
| t crítico uni-caudal | 1,812461 | | t crítico uni-caudal | 1,812461 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 5,05E-05 | | P(T<=t) bi-caudal | 0,023417 | |
| t crítico bi-caudal | 2,228139 | | t crítico bi-caudal | 2,228139 | |

Fonte: Pesquisa direta (2019)

ANEXO E

Tabela 14 - Teste f: Duas amostras para variâncias

| <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 1$ | $\vartheta 2$ | <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 2$ | $\vartheta 3$ |
|----------------------------------|---------------|--|----------------------------------|---------------|--|
| Média | 84,64917 | 85,7745 | Média | 85,7745 | 87,78566667 |
| Variância | 0,087942 | 0,0485831 | Variância | 0,048583 | 0,063467867 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| gl | 5 | 5 | gl | 5 | 5 |
| F | 1,810139 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. | F | 0,765476 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. |
| P(F<=f) uni-caudal | 0,265332 | | P(F<=f) uni-caudal | 0,388235 | |
| F crítico uni-caudal | 5,050329 | | F crítico uni-caudal | 0,198007 | |
| <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 1$ | $\vartheta 3$ | <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 2$ | $\vartheta 4$ |
| Média | 84,64917 | 87,7856667 | Média | 85,7745 | 86,25616667 |
| Variância | 0,087942 | 0,06346787 | Variância | 0,048583 | 0,222479767 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| gl | 5 | 5 | gl | 5 | 5 |
| F | 1,385617 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. | F | 0,218371 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. |
| P(F<=f) uni-caudal | 0,364579 | | P(F<=f) uni-caudal | 0,060201 | |
| F crítico uni-caudal | 5,050329 | | F crítico uni-caudal | 0,198007 | |
| <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 1$ | $\vartheta 4$ | <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 3$ | $\vartheta 4$ |
| Média | 84,64917 | 86,2561667 | Média | 87,78567 | 86,25616667 |
| Variância | 0,087942 | 0,22247977 | Variância | 0,063468 | 0,222479767 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| gl | 5 | 5 | gl | 5 | 5 |
| F | 0,395282 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. | F | 0,285275 | P>0,05, significa que as variâncias entre os ângulos são iguais. |
| P(F<=f) uni-caudal | 0,165671 | | P(F<=f) uni-caudal | 0,097438 | |
| F crítico uni-caudal | 0,198007 | | F crítico uni-caudal | 0,198007 | |

Fonte: Pesquisa direta (2019)

ANEXO F

Tabela 15 - Teste t: Duas amostras presumindo variâncias equivalentes

| <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 1$ | $\vartheta 2$ | <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 2$ | $\vartheta 3$ |
|----------------------------------|---------------|--|----------------------------------|---------------|--|
| Média | 84,64917 | 85,7745 | Média | 85,7745 | 87,78566667 |
| Variância | 0,087942 | 0,0485831 | Variância | 0,048583 | 0,063467867 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| Variância agrupada | 0,068263 | | Variância agrupada | 0,056025 | |
| Hip difer média | 0 | | Hip difer média | 0 | |
| gl | 10 | | gl | 10 | |
| Stat t | -7,4602 | | Stat t | -14,7169 | |
| P(T<=t) uni-caudal | 1,08E-05 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. | P(T<=t) uni-caudal | 2,1E-08 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. |
| t crítico uni-caudal | 1,812461 | | t crítico uni-caudal | 1,812461 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 2,16E-05 | | P(T<=t) bi-caudal | 4,2E-08 | |
| t crítico bi-caudal | 2,228139 | | t crítico bi-caudal | 2,228139 | |

| <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 1$ | $\vartheta 3$ | <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 2$ | $\vartheta 4$ |
|----------------------------------|---------------|--|----------------------------------|---------------|--|
| Média | 84,64917 | 87,78566667 | Média | 85,7745 | 86,25616667 |
| Variância | 0,087942 | 0,063467867 | Variância | 0,048583 | 0,222479767 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| Variância agrupada | 0,075705 | | Variância agrupada | 0,135531 | |
| Hip difer média | 0 | | Hip difer média | 0 | |
| gl | 10 | | gl | 10 | |
| Stat t | -19,7444 | | Stat t | -2,26614 | |
| P(T<=t) uni-caudal | 1,22E-09 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. | P(T<=t) uni-caudal | 0,023438 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. |
| t crítico uni-caudal | 1,812461 | | t crítico uni-caudal | 1,812461 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 2,43E-09 | | P(T<=t) bi-caudal | 0,046877 | |
| t crítico bi-caudal | 2,228139 | | t crítico bi-caudal | 2,228139 | |

| <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 1$ | $\vartheta 4$ | <i>Perpendicular a laminação</i> | $\vartheta 3$ | $\vartheta 4$ |
|----------------------------------|---------------|--|----------------------------------|---------------|--|
| Média | 84,64917 | 86,25616667 | Média | 87,78567 | 86,25616667 |
| Variância | 0,087942 | 0,222479767 | Variância | 0,063468 | 0,222479767 |
| Observações | 6 | 6 | Observações | 6 | 6 |
| Variância agrupada | 0,155211 | | Variância agrupada | 0,142974 | |
| Hip difer média | 0 | | Hip difer média | 0 | |
| gl | 10 | | gl | 10 | |
| Stat t | -7,06505 | | Stat t | 7,006189 | |
| P(T<=t) uni-caudal | 1,72E-05 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. | P(T<=t) uni-caudal | 1,84E-05 | T > Tcrítico, significa que os ângulos são diferentes. |
| t crítico uni-caudal | 1,812461 | | t crítico uni-caudal | 1,812461 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 3,44E-05 | | P(T<=t) bi-caudal | 3,69E-05 | |
| t crítico bi-caudal | 2,228139 | | t crítico bi-caudal | 2,228139 | |

Fonte: Pesquisa direta (2019)