

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS – PPGE3M

JOSIMAR TEIXEIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE DOBRAMENTO DO AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA
QUARD 450, 500 E 550**

Porto Alegre

2023

JOSIMAR TEIXEIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE DOBRAMENTO DO AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA
QUARD 450, 500 E 550**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Coordenador: Prof. Dr. Eng. Afonso Reguly

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Folle (CIMATEC/BA) _____

Prof. Dr. Eng. Walter Andrey Fontana (UNISINOS) _____

Prof^a. Dra. Eng^a. Luana de Lucca de Costa (IFSUL) _____

Dedico este trabalho à minha esposa,
Manoela de Quadros dos Santos, e à minha
filha, Maria Cecília de Quadros dos Santos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus pelo dom da vida e por colocar no meu caminho pessoas tão maravilhosas.

Agradeço, a minha família, em especial, aos pais que sempre incentivaram meus estudos e fizeram de tudo para me dar condições de construir meu próprio caminho.

Ao professor Dr. Ing. Lirio Schaeffer por sempre estar disposto a orientar e ajudar da melhor forma durante este trabalho e pelo excelente profissional que é;

Aos colegas e amigos que fiz durante o Mestrado, que incentivaram e contribuíram com a minha formação, em especial, aos colegas Rafael Pandolfo da Rocha, Cristian Luiz Onzi e Matheus Riffel.

Aos laboratoristas da UFRGS e UNISINOS pelo apoio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Ciber Equipamentos rodoviários e à NLMK por me fornecerem os materiais para que fosse possível eu realizar os ensaios práticos.

À liderança da WEG por me liberar para realizar os ensaios sempre que foi preciso.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo geral encontrar o raio mínimo de dobramento para o Quard 450, 500 e 550 com espessura de 8 mm sem que ocorra o surgimento de trincas superficiais. Avaliar o retorno elástico, força de dobramento e a análise da deformação nas fibras externas destes materiais para os diferentes raios de punção utilizados no dobramento. Além do experimento prático (dobramento), este estudo também avaliou o comportamento destes materiais através de simulações, realizadas através do *software Simufact*. Optou-se também por estudar algumas equações encontradas na literatura, a fim de verificar se estas conseguem prever o comportamento dos materiais estudados. Ao total foram dobrados 75 corpos de prova, divididos em 15 grupos com 7 punções diferentes com raios variando de 30 a 42mm. Os resultados indicam que a dureza assim como o raio de dobra ou raio de punção são fatores que influenciam no retorno elástico e na força de dobra, sendo que quanto maiores forem esses parâmetros (dureza e raio) maior também será o efeito mola e o esforço de dobra necessário. Sobre a deformação nas fibras externas, o parâmetro que mais influencia é o raio de dobra, sendo que quanto menor o raio de dobra maior é a deformação nas fibras externas. Os dados coletados através da simulação numérica se aproximaram dos valores encontrados nos ensaios de dobramento, sendo a maior diferença para o retorno elástico de 2°; já a maior diferença para força de dobramento foi de 7 kN, e para a deformação nas fibras externas a maior discrepância encontrada entre a simulação e os ensaios experimentais foi de 0,03. Sobre as equações estudadas, tanto para o raio mínimo de dobra quanto para a força de dobramento, apenas as equações sugeridas pelo fabricante do aço Quard se aproximaram dos dados experimentais; já em relação às equações utilizadas para deformação nas fibras externas, ambas as equações estudadas obtiveram resultados similares com a avaliação experimental.

Palavras-chave: Dobramento. Alta resistência. Quard. Raio mínimo de dobra. Força de dobramento. Deformação. Simulação numérica.

ABSTRACT

The general objective of the present work is to find the minimum bending radius for Quard 450, 500 and 550 with 8 mm thickness without the occurrence of surface cracks. To evaluate the springback, bending strength and the analysis of the deformation in the external fibers, of these materials for the different radii of punch used in bending. In addition to the practical experiment (bending), this study also evaluated the behavior of these materials through simulations, performed using Simufact software. It was also decided to study some equations found in the literature, in order to verify if they can predict the behavior of the materials studied. A total of 75 specimens were bent, divided into 15 groups with 7 different punches with radii varying from 30 to 42mm. The results indicate that the hardness, as well as the bending radius or punch radius are factors that influence the elastic return and the bending force, and the greater these parameters (hardness and radius) the greater the springback and the required bending effort. Regarding the deformation in the external fibers, the most influential parameter is the bending radius, and the smaller the bending radius, the greater is the deformation in the external fibers. The data collected through numerical simulation were close to the values found in the bending tests, with the greatest difference for the elastic return being 2°, the greatest difference for bending force was 7 kN, and for the external fiber deformation the greatest discrepancy found between the simulation and the experimental tests was 0.03. About the studied equations, both for the minimum bending radius and the bending force, only the equations suggested by the Quard steel manufacturer were close to the experimental data, whereas the equations used for the external fiber deformation both studied equations obtained similar results with the experimental evaluation.

Keywords: Bending. High strength. Quard. Minimum bending radius. Bending force. Deformation. Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do trabalho.	17
Figura 2 – Classificação dos aços de alta resistência.	19
Figura 3 – Redução de espessura com uso do Hardox.	20
Figura 4 – Curva tensão x deformação de engenharia.	22
Figura 5 – Área inicial do corpo de prova antes do ensaio de tração.	23
Figura 6 – Limite de escoamento visível (a); Identificação do limite de escoamento através de reta paralela ao regime elástico (b).	24
Figura 7 – Tensão verdadeira x tensão de engenharia.	25
Figura 8 – Impressão causada por um penetrador.	26
Figura 9 – Processo de dobramento livre.	27
Figura 10 – Processo de dobramento semiguiaado.	28
Figura 11 – Processo de dobramento guiado.	28
Figura 12 – Processo de dobramento de uma chapa.	29
Figura 13 – Processo de dobramento em V.	29
Figura 14 – Tensões sofridas na peça.	30
Figura 15 – Retorno elástico no dobramento em V.	34
Figura 16 – Fatores que influenciam no retorno elástico: Raio do punção e abertura da matriz combinados (a); abertura da matriz (b); propriedades do material (c); espessura da chapa (d).	35
Figura 17 – Parâmetros para o retorno elástico.	36
Figura 18 – Círculo antes da deformação (a); elipse após a deformação (b).	38
Figura 19 – Representação das variáveis na geometria do dobramento de chapas.	39
Figura 20 – Fratura na fibra externa.	40
Figura 21 – Fluxograma dos ensaios.	41
Figura 22 – Corte das amostras.	42
Figura 23 – (a) Corpo de prova com laminação longitudinal; (b) Corpo de prova com laminação transversal.	43
Figura 24 – (a) Corpo de prova com laminação longitudinal; (b) Corpo de prova com laminação transversal.	44
Figura 25 – Máquina universal de ensaios EMIC®.	45
Figura 26 – Identificação dos corpos de prova de tração.	46

Figura 27 – Curva de engenharia média para a linha Quard.	47
Figura 28 – Definição do limite de escoamento Quard 450.....	47
Figura 29 – Curva de escoamento Quard 450.	48
Figura 30 – a) Durômetro <i>VEB Werkstoffprüfmaschinen</i> ; b) esfera de tungstênio. ...	51
Figura 31 – Medição da calota com auxílio do microscópio.	51
Figura 32 – Ferramentas desenvolvidas para realizar os ensaios de dobramento. ..	53
Figura 33 – a) Ferramental; b) marcação para posicionamento das peças.	54
Figura 34 – Identificação dos corpos de prova de dobramento.....	55
Figura 35 – a) tridimensional óptica. b) procedimento para medir o ângulo.	56
Figura 36 – a) modelo final da simulação. b) exportação do modelo no <i>simufact</i> ®. c) importação do modelo para <i>SolidWorks</i> ®. d) ângulo final da simulação.	56
Figura 37 – Curva força x deslocamento a partir dos ensaios práticos.	57
Figura 38 – Dados de força exportados do <i>simufact</i> ®.	58
Figura 39 – Curva força x deslocamento Simulada.....	58
Figura 40 – Preparação dos corpos de prova.	59
Figura 41 – a) Gravação da grade no corpo de prova; b) Corpo de prova gravado. .	60
Figura 42 – (a) Averiguação da deformação (b) Grade para verificar a deformação.	60
Figura 43 – Deformação nas fibras externas via simulação.	61
Figura 44 – a) posição inicial do punção; b) posição final do punção.	62
Figura 45 – Corpos de prova após o dobramento.	64
Figura 46 – Gráfico retorno elástico (grupo x retorno elástico [°])	67
Figura 47 – Gráfico retorno elástico experimental x simulado [°].	69
Figura 48 – Relação largura do <i>Rp</i> x abertura da matriz.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Processos de conformação mais comuns.....	14
Tabela 2 – Classificação de chapas laminadas.....	18
Tabela 3 – Composição química (%) do Quard 450, 500 e 550.....	21
Tabela 4 – Propriedades mecânicas da linha QUARD.....	21
Tabela 5 – Dimensionamento do ferramental indicado pela NLMK.....	21
Tabela 6 – Dimensões típicas em “mm” de corpos de prova planos à temperatura ambiente.....	42
Tabela 7 – Número de corpos de prova para o ensaio de tração.....	46
Tabela 8 – Resultados obtidos através do ensaio de tração.....	49
Tabela 9 – Resultados médio para o ensaio de tração.....	49
Tabela 10 – Resultados médios para dureza de cada material.....	52
Tabela 11 – Resultado do R_{min} para as equações apresentadas no tópico 2.4.1.	52
Tabela 12 – Número de corpos de prova para cada raio de dobra, dureza e sentido de laminação.....	55
Tabela 13 – Dados de entrada para os aços Quard 450, 500 e 550.....	63
Tabela 14 – Retorno elástico médio para cada grupo.....	65
Tabela 15 – Influência da dureza do material com retorno elástico.....	66
Tabela 16 – Influência do sentido de laminação com retorno elástico.....	66
Tabela 17 – Retorno elástico obtido pela simulação computacional.....	68
Tabela 18 – Média da força máxima de dobramento para cada grupo.....	70
Tabela 19 – Influência do sentido de laminação para força de dobramento.....	71
Tabela 20 – Influência da dureza do material para força de dobramento.....	72
Tabela 21 – Força máxima de dobramento simulado e teórico.....	72
Tabela 22 – Deformação verdadeira média para cada grupo.....	74
Tabela 23 – Influência do sentido de laminação para deformação nas fibras externas.....	75
Tabela 24 – Influência da dureza para deformação nas fibras externas.....	76
Tabela 25 – Deformação máxima simulado e teórico.....	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHSS	Aços Avançados de Alta Resistência (<i>Advanced High Strenght Steels</i>)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Desenho assistido por computador
CAM	Manufatura assistida por computador
CP	Corpo de prova
DP	Aço bifásico (<i>Dual Phase</i>)
FEM	Método dos elementos finitos (<i>Finite Element Method</i>)
HB	Dureza Brinell
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i>
HSLA	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (<i>High Strenght Low Alloy</i>)
IF-HS	Aços livres de interstício para estampagem a quente (<i>Instersticial Free</i>)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos (<i>Society of Autmotive Engineer</i>)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHSS	Aços de Ultra Alta Resistência (<i>Ultra High Strenght Steels</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Segmento menor	[mm]
a	Medida maior da elipse	[-]
A_0	Área inicial	[mm ²]
A_f	Área final	[mm ²]
A_i	Área instantânea	[mm ²]
A_l	Alongamento da chapa	[-]
B	Medida menor da elipse	[-]
B	Largura da chapa do corpo de prova	[mm]
b_0	Largura inicial do corpo de prova	[mm]
B_f	Largura final do corpo de prova	[mm]
C	Coefficiente de resistência	[MPa]
D	Diâmetro penetrador	[mm]
d	Deformação esférica	[mm]
d_0	Diâmetro inicial	[mm]
E	Módulo de elasticidade do material	[GPa]
F	Força	[N]
F_d	Força de dobramento	[N]
h_i	Deslocamento instantâneo	[mm]
h_0	Deslocamento inicial	[mm]
K	Fator k	[-]
k_f	Tensão verdadeira ou de escoamento	[MPa]
L	Comprimento instantâneo	[mm]
l_0	Comprimento inicial	[mm]
Q	Redução de área	[-]
R	Raio de dobra	[mm ²]
R_0	Raio inicial de dobramento	[mm]
R_e	Limite de escoamento	[Mpa]
R_f	Raio final de dobramento	[mm]
R_m	Tensão máxima	[MPa]
rm	Raio médio	[mm]
R_{min}	Raio mínimo de dobra	[mm]
R_p	Raio do punção	[mm]
s_0	Espessura final	[mm]

s_i	Espessura inicial	[mm]
t	tempo	[s]
W	Abertura da matriz	[mm]
X	Posição da linha central (linha neutra)	[-]

Símbolos Gregos

α	Ângulo	[°]
α_f	Ângulo final de dobramento	[°]
α_i	Ângulo inicial de dobramento	[°]
ε	Deformação relativa	[-]
σ	Tensão convencional de engenharia	[MPa]
φ	Deformação verdadeira	[-]

SUMÁRIO

RESUMO.....	IV
ABSTRACT.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	X
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 SITUAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVO.....	15
1.2.1 Objetivos Específicos	16
1.3 JUSTIFICATIVA	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA.....	18
2.1.1 Aço Quard	20
2.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	22
2.2.1 Curva de Engenharia Tensão-Deformação.....	22
2.2.2 Curva Tensão-Deformação Verdadeira.....	24
2.2.3 Dureza Brinell (HB).....	26
2.3 PROCESSO DE DOBRAMENTO.....	27
2.4 VARIÁVEIS DO DOBRAMENTO EM V.....	28
2.4.1 Raio Mínimo de Dobra	31
2.4.2 Força de Dobramento.....	32
2.4.3 Retorno Elástico	34
2.4.4 Deformações no Dobramento.....	37
2.4.5 Defeitos no Dobramento	39
2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CP).....	41

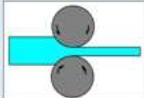
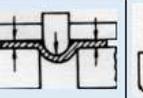
3.1.1	Corpos de Prova Ensaio de Tração	42
3.1.2	Corpo de Prova para o Dobramento	43
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	44
3.2.1	Verificação da Dureza Brinell	50
3.3	PROCESSO DE DOBRAMENTO EM V	52
3.3.1	Avaliação do Retorno Elástico	55
3.3.2	Avaliação da Força de Dobramento	57
3.3.3	Avaliação da Deformação nas Fibras Externas	59
4.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	62
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1	RETORNO ELÁSTICO	64
5.2	FORÇA DE DOBRAMENTO	69
5.3	DEFORMAÇÃO DAS FIBRAS EXTERNAS	74
6.	CONCLUSÕES	77
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXO A – CERTIFICADO QUARD 450	83
	ANEXO B – CERTIFICADO QUARD 500	84
	ANEXO C – CERTIFICADO QUARD 550	85
	APÊNDICE A – PROJETO 2D MATRIZ V	86
	APÊNDICE B – PROJETO 2D HASTE FIXAÇÃO MATRIZ	87
	APÊNDICE C – PROJETO 2D BASE DOS PUNÇÕES	88
	APÊNDICE D – PROJETO 2D HASTES DE FIXAÇÃO PUNÇÕES	89
	APÊNDICE E – PROJETO 2D RAIOS DOS PUNÇÕES	90

1. INTRODUÇÃO

A conformação dos metais nada mais é que a transformação de um corpo metálico em uma nova forma definida. Rocha (2012) explica que os processos de conformação podem ser divididos em duas formas: processos mecânicos, nos quais a modificação na forma do material ocorre através da aplicação de forças externas que causam a deformação plástica do material, e os processos metalúrgicos nos quais as alterações de forma acontecem devido à mudança de temperatura em conjunto com a aplicação de forças externas.

De acordo com Dieter (1981), a conformação mecânica possibilita a mudança da geometria do material e tem sido largamente utilizada na produção de materiais mecânicos. Dentre esses processos, os que mais se destacam são mencionados na tabela 1, onde é possível verificar o tipo de força atuante no processo, a temperatura (podendo ser a frio ou a quente) e também alguns exemplos de produtos fabricados a partir desses processos.

Tabela 1 – Processos de conformação mais comuns. Fonte: Adaptado Bresciani Filho *et al.* (2011)

Processo		Laminação	Trefilação	Extrusão	Forjamento	Estampagem (profunda)	Dobramento
Força	Compressão	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Tração	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Temperatura	Quente	✓	✗	✓	✓	✓	✓
	Frio	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ilustração							
Produtos		Placas Chapas Barras Perfis	Barras Arames Fios Tubos	Barras Tubos Perfis	Peças pequenas e grandes forjadas	Peças de chapas estampadas	Peças de chapas e tiras dobradas

Com o avanço tecnológico da indústria, a criação de chapas com maior resistência ao desgaste se tornou uma necessidade. Um exemplo é a linha Quard desenvolvida pela NLMK. A linha Quard pertence ao segmento de chapas com resistência à abrasão, e a dureza pode variar entre 400 a 550 HB. Este tipo de aço tem sido utilizado em diversos equipamentos que sofrem elevado desgaste, como, por exemplo, maquinário para mineração, aumentando a vida útil do equipamento.

1.1 SITUAÇÃO DO PROBLEMA

Devido ao grande avanço da indústria, com o passar do tempo, tornou-se cada vez mais necessária a redução de peso dos componentes automotivos, não só para que o produto tenha um custo menor e assim seja mais competitivo no mercado, mas também para que as empresas se adaptem às normas de emissão de gases conforme explica Frees (2017).

Por isso, tem-se tornado cada vez maior a procura por ligas mais resistentes, como a linha Quard. Esse material tem sido extremamente utilizado em equipamentos que sofrem elevado carregamento e/ou desgaste. Se, por um lado, a criação dessas novas ligas aumenta a vida útil de muitos produtos além de reduzir o peso dos equipamentos; por outro lado, essa elevada resistência dificulta os processos de conformação, dentre os quais o dobramento. Isso se deve à sua elevada dureza tornando-o mais suscetível a trincas quando conformado.

O processo de dobramento para esse tipo de aço é considerado difícil, devido à sua limitada conformabilidade a frio (Vorkov *et al*, 2018). Portanto, o surgimento de trincas nas fibras externas é um fator que deve ser observado. Assim, identificar o raio de dobra ideal para selecionar o punção correto é um dos grandes desafios para garantir a dobra e evitar possíveis fissuras. Outros fatores como o retorno elástico (*springback*) e a força de dobramento também devem ser estudados, uma vez que quanto maior a resistência do material, maior deverá ser o efeito mola e a força necessária para o dobramento. Contudo pouco ainda se sabe sobre esses parâmetros em relação à linha Quard. Diante disso, para a indústria é essencial conhecer os meios adequados para se conformar o aço sugerido neste trabalho, visto que, para grandes lotes de produção, pequenas melhorias ou ganho na produtividade e qualidade final do produto podem gerar uma grande redução de custos (Heinen, 2021).

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste estudo é encontrar o raio mínimo de dobra, o retorno elástico, a força máxima de dobramento assim como a deformação nas fibras externas para a linha de aços Quard 450, 500 e 550 com espessura de 8 mm

1.2.1 Objetivos Específicos

- a) Analisar o raio mínimo de dobra encontrado através das equações sugeridas, comparando com os punções utilizados na prática;
- b) Verificar o retorno elástico do Quard (450, 500 e 550) encontrado na prática comparando com as simulações e equações propostas;
- c) Verificar a força de dobramento encontrada através dos experimentos comparando com as simulações e as equações sugeridas no trabalho;
- d) Avaliar a deformação verdadeira máxima das fibras externas obtidas através do dobramento, comparando com os resultados da simulação, bem como das equações indicadas no presente trabalho.

1.3 JUSTIFICATIVA

Mesmo com o crescente uso de chapas com alta resistência na indústria (em especial, chapas com elevada resistência ao desgaste como o Quard), ainda há um conhecimento limitado sobre o comportamento desse tipo de material durante os processos de conformação especialmente o dobramento.

Para se atingir o dobramento em aços de alta resistência à abrasão, muitas técnicas são adotadas pelas empresas. Algumas preferem realizar o dobramento a quente, outras empresas preferem alterar o raio dobra, para o maior possível. Nesse caso, o tamanho do raio de dobra pode influenciar no retorno elástico, como será demonstrado no tópico 2.4.3. Por isso, estudos devem ser realizados com intuito de encontrar os melhores parâmetros para a conformação desses aços especiais.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi organizado em 7 capítulos, sendo eles: Introdução, revisão bibliográfica, materiais e métodos, simulação computacional, resultados e discussões, conclusão e sugestões de trabalhos futuros. A figura 1 apresenta resumidamente o fluxograma do presente trabalho.



Figura 1 – Fluxograma do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Através da conformação mecânica, ocorre a transformação do material metálico em decorrência da deformação plástica sofrida durante esse processo, por meio das forças externas que são aplicadas ao material (Bresciani Filho, 1991). Segundo Palmeira (2005), dentre os processos de conformação, o dobramento é o mais empregado para chapas metálicas.

Chapas planas são produzidas por meio de processos de laminação e são classificadas de acordo com a espessura (s) do aço laminado, temperatura de laminação, acabamento superficial e outras propriedades do material. A tabela 2 indica os três grupos principais de chapas de acordo com sua espessura (Heinen, 2021).

Tabela 2 – Classificação de chapas laminadas. Fonte: Heinen (2021).

Espessura	Denominação
$s < 3\text{mm}$	Chapa fina
$3\text{mm} \leq s < 4,76$	Chapa média
$4,76 \text{ mm} \leq s$	Chapa grossa

2.1 AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA

Aços de alta resistência passaram a ser desenvolvidos por volta da década de 70, com intuito de aumentar a resistência das estruturas e, como consequência, reduzir significativamente o peso de um determinado componente. Nos países desenvolvidos, a produção desse tipo de aço passou a ser prioridade devido aos seus diversos benefícios (Schaeffer, 2014). Ainda na década de 70, segundo Santos (2013), algumas empresas passaram a estudar alternativas para que fosse possível reduzir o consumo de petróleo preservando, assim, as reservas desse combustível.

Foi identificado, então, que o principal “consumidor” desse combustível eram os automóveis. Dentre as inúmeras pesquisas, uma das maiores “descobertas” foram os aços de alta resistência, já que com eles seria possível reduzir a massa dos veículos sem perder as propriedades mecânicas necessárias para garantir a segurança (Frees, 2017). As regulamentações mais rigorosas acerca das emissões de dióxido de carbono e as maiores exigências a respeito das condições estruturais

fizeram com que os fabricantes de automóveis precisassem desenvolver materiais mais leves e resistentes (Tsoupis, 2014).

Dentro desse contexto, surgiram os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (*High Strength Low Alloy – HSLA*), como uma microestrutura mais refinada e com adição de alguns elementos de liga, proporcionando maior resistência mecânica. Porém uma desvantagem desse novo produto foi a perda de estampabilidade, cuja solução foi o desenvolvimento dos aços bifásicos (*dual fase - DP*), que possuem uma elevada resistência e boa estampabilidade. A partir de 1990, esses novos materiais foram chamados de Aços Avançados de Alta Resistência (*Advanced High Strength Steels – AHSS*) (Lisboa, 2019).

Uma das fabricantes desse tipo de material é a empresa NLMK, que possui em sua linha o aço de alta resistência ao desgaste denominado Quard, o qual é classificado segundo a sua dureza, podendo ser 400, 450, 500 e 550 HB. Vale lembrar que para este trabalho, como já mencionado, serão usados o Quard 450, 500 e 550. A linha Quard, segundo o próprio fabricante, se enquadra dentro do segmento de aços AHSS martensíticos (MS) representados na Figura 2.

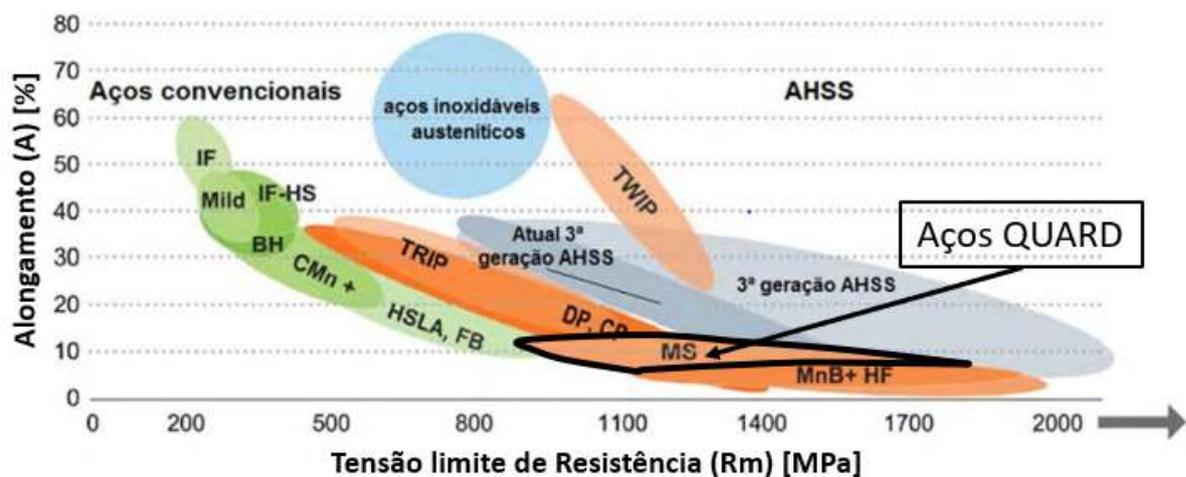


Figura 2 – Classificação dos aços de alta resistência. Fonte: World Auto Steel (2014).

Aços martensíticos são obtidos através do processo de têmpera, no qual a austenita oriunda do processo de laminação a quente é transformada quase completamente em martensita durante o rápido resfriamento. Dentro da família AHSS, os aços MS estão entre os que possuem nível mais elevado de tensão de ruptura, podendo chegar em até 1700 MPa (World Auto Steel, 2014).

A SSAB (2019), fabricante do Hardox, aço do mesmo segmento que o Quard, afirma que o uso desse material, além de reduzir o peso do componente, pode também aumentar em até 20% a capacidade de carga de um caminhão, por exemplo. Logo, a partir da utilização desse tipo de aço, é possível reduzir a massa final da carroceria sem perder a sua resistência, permitindo que o veículo transporte uma carga com peso mais elevado do que caminhões com carrocerias fabricadas com aço comum. A figura 3 faz uma comparação entre a linha Hardox e o *Mildsteel S355/A36*. Pode-se perceber que a chapa de alta resistência com espessura de 18 mm pode substituir um aço *Mildsteel S355/A36* com uma espessura de 80 mm, mantendo a resistência.

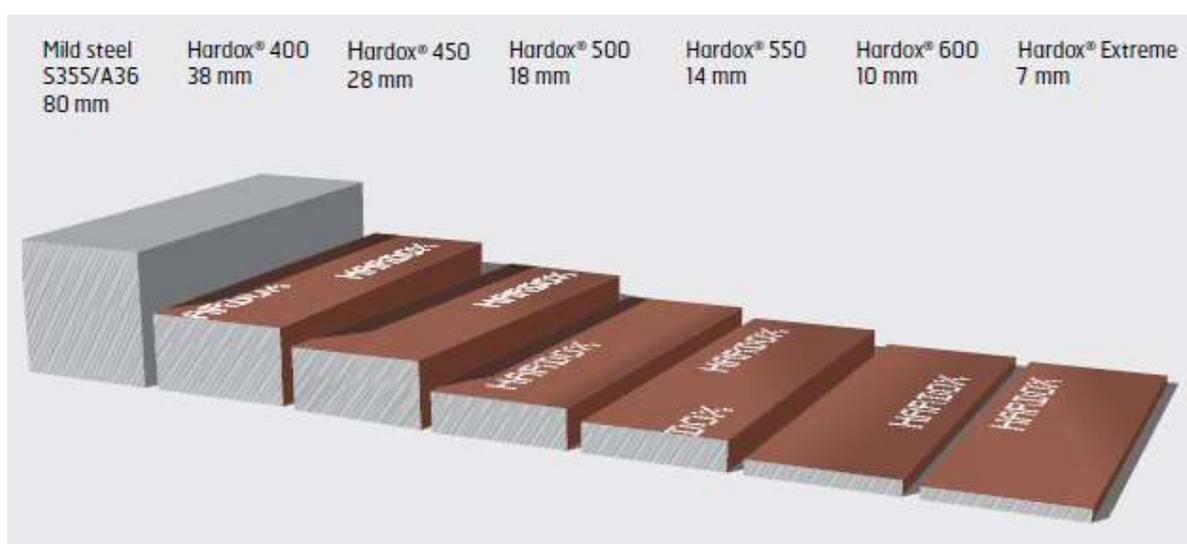


Figura 3 – Redução de espessura com uso do Hardox. Fonte: SSAB (2019, p. 5).

O segmento de aços Quard produzido pela NLMK é considerado uma linha de aços de alta resistência à abrasão. Devido à sua excelente resistência à abrasão (desgaste), a linha Quard tem sua maior aplicação em equipamentos de mineração, terraplanagem, equipamentos de britagem, escavadeiras, trituradores, entre outros (Patel *et al*, 2018).

2.1.1 Aço Quard

O uso desse aço especial permite uma redução significativa no peso final do componente. A tabela 3 apresenta a composição química dos materiais utilizados

neste trabalho. Quanto às suas dimensões, a chapa comercializada pode variar entre 4 e 40 mm de espessura com largura mínima de 1500 mm até 3100 mm.

Tabela 3 – Composição química (%) do Quard 450, 500 e 550. Fonte: NLMK (2019).

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
QUARD 450	0,20	0,60	1,40	0,025	0,01	0,20	0,10	0,25	0,005
QUARD 500	0,28	0,80	1,60	0,025	0,01	1,00	1,00	0,50	0,005
QUARD 550	0,35	0,80	1,60	0,025	0,01	1,10	1,00	0,50	0,005

É possível encontrar nos catálogos da linha Quard dados técnicos importantes para a análise desses materiais. Algumas equações para se obter o raio de dobra (mostradas no tópico 2.4.1) necessitam de valores, como limite de escoamento, limite de ruptura e alongamento do material. Esses dados podem ser encontrados através da tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas da linha QUARD. Fonte: NLMK (2019).

Material	Limite de escoamento (Re) [MPa]	Tensão máxima (Rm) [MPa]	Alongamento (A) [%]	Dureza [HB]	Retorno elástico (α) [°]
QUARD 450	1250	1400	10	450	8 a 12
QUARD 500	1500	1700	8	500	10 a 14
QUARD 550	1575	1750	7	550	12 a 18

A fabricante do aço Quard indica, através da tabela 5, uma relação para o dimensionamento correto para os raios dos punções e abertura da matriz. Essa relação deve ser multiplicada pela espessura da chapa de 8mm.

Tabela 5 – Dimensionamento do ferramental indicado pela NLMK.

Espessura 8mm	Raio do punção trans. à laminação (Rp)	Raio do punção long. à laminação (Rp)	Abertura mínima da matriz trans. (W)	Abertura mínima da matriz long. (W)
Quard 450	4	5	10	12
Quard 500	4,5	5	12	14
Quard 550	5	6	14	16

2.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O ensaio de tração é o método mais comum para determinar as propriedades mecânicas de um determinado material. Tal ensaio é realizado através de uma máquina de testes na qual o corpo de prova é fixado nas duas extremidades, enquanto uma força axial é aplicada causando o alongamento da peça, até que esta venha a se romper. Através desse ensaio, é possível determinar características importantes dos materiais, tais como: escoamento, deformação plástica, tensão máxima, fratura e alongamento do material (Dagnese, 2012). Ao decorrer do processo, as forças e a variação do comprimento da peça tracionada são coletadas quase que instantaneamente em intervalos de tempo predefinidos. Com os dados coletados, é possível, então, gerar a curva tensão-deformação de engenharia e/ou a verdadeira também conhecida como curva de escoamento (Souza, 2013).

2.2.1 Curva de engenharia tensão-deformação

A curva de engenharia ou curva convencional (Figura 4) é constituída pela tensão (equação 1). Ela é calculada pela divisão da força em cada instante pela área inicial do corpo de prova. Já a deformação relativa (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) é uma deformação linear média, encontrada pelo alongamento do comprimento útil do corpo de prova pelo comprimento inicial (Dieter, 1981).

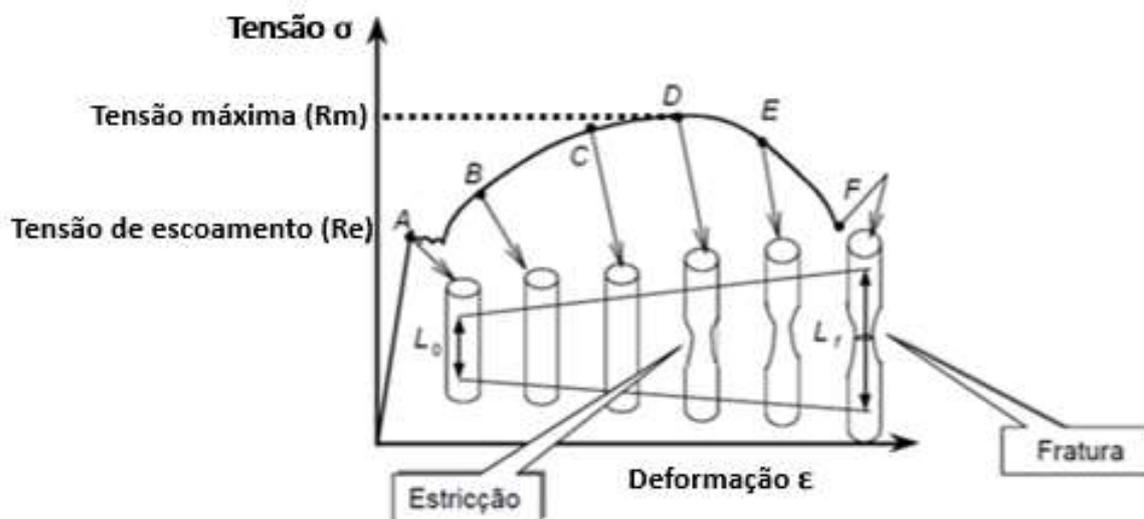


Figura 4 – Curva tensão x deformação de engenharia. Fonte: Souza (2013).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Equação 1}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

F = Força em cada intervalo de tempo [N];

A_0 = Área inicial (figura 5) do corpo de prova antes do ensaio de tração [mm²];

l = Comprimento instantâneo [mm];

l_0 = Comprimento inicial [mm].

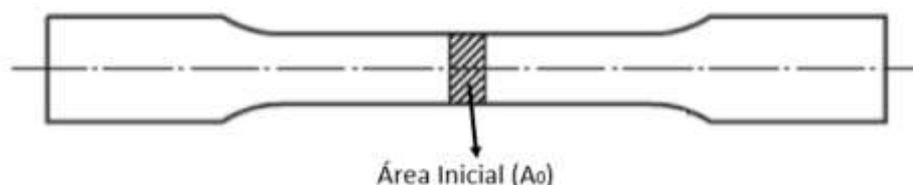


Figura 5 – Área inicial do corpo de prova antes do ensaio de tração.

Na região elástica, que compreende o início da curva até o limite de escoamento (ponto A), a tensão é proporcional à deformação. Seguindo a lei de Hooke, se a carga for removida, o material tende a retornar ao seu estado natural. A partir do momento quando a carga ultrapassa o limite de escoamento, inicia-se, então, a deformação plástica (Dieter, 1981). Na região de transformação plástica, que corresponde os pontos A-D, a deformação é permanente, ou seja, mesmo que se remova a força aplicada, o material tende a permanecer deformado. Por isso essa região é a mais importante na área de conformação dos materiais. O ponto D indica o momento em que a tensão máxima de resistência à tração foi encontrada e o início da estricção; já o ponto F indica a tensão de ruptura do material (Souza, 2013).

Souza (2013) explica, com o auxílio da figura 6, duas maneiras de identificar o limite de escoamento fornecido pela curva tensão-deformação. A curva gerada para alguns materiais indica uma espécie de divisão da região elástica para a região plástica caracterizando o limite de escoamento conforme observado na figura 6 (a). Já em outros materiais essa divisão não é clara: o limite de escoamento, nesse caso, deve ser definido traçando uma reta paralela à parte elástica da curva iniciando onde a deformação é 0,2% conforme mostrado na figura 6 (b).

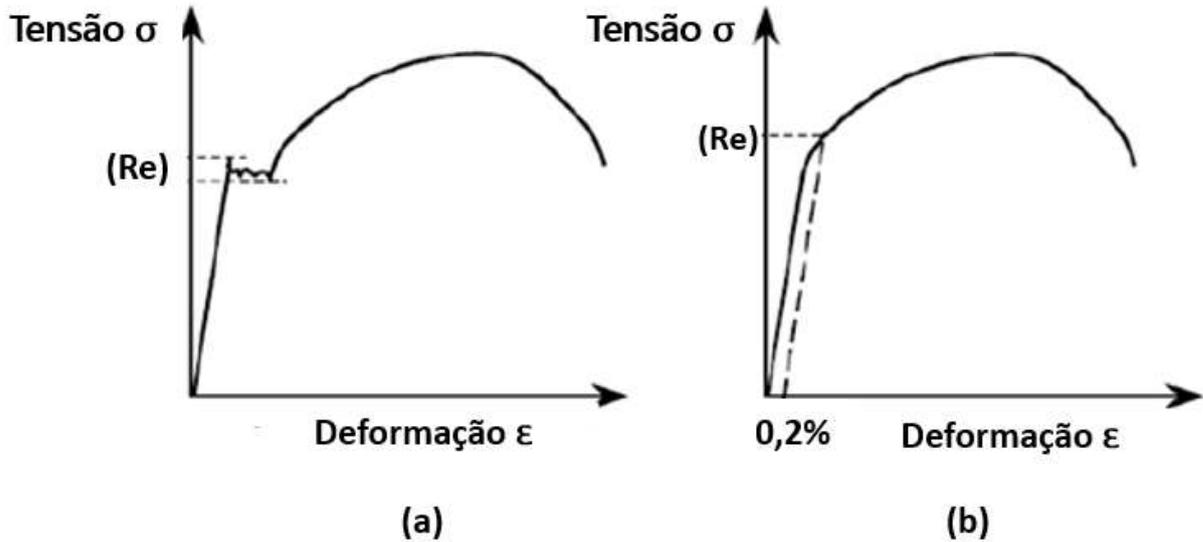


Figura 6 – Limite de escoamento visível (a); Identificação do limite de escoamento através de reta paralela ao regime elástico (b).

2.2.2 Curva tensão-deformação verdadeira

Na curva tensão-deformação verdadeira (figura 7), também conhecida como curva de escoamento, diferente da curva de engenharia, a tensão (equação 3) é encontrada pela razão da força em cada instante dividida pela área da seção transversal no mesmo instante. Já a deformação real (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) pode ser obtida pela mudança do comprimento em função ao comprimento-base de medida instantânea. Com o auxílio da figura 9, pode ser observado a diferença entre a curva de engenharia e a curva real (verdadeira).

$$k_f = \frac{F_i}{A_i} \quad \text{Equação 3}$$

$$\varphi = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

F_i = Força instantânea [N];

A_i = Área instantânea [mm²];

l_i = Comprimento instantâneo [mm];

l_0 = Comprimento inicial [mm].

Santos, *et al.* (2018) explica que a área instantânea pode ser encontrada com a lei da constância de volume (equação 5) a partir da área transversal inicial da amostra (A_0), deslocamento inicial (h_0) e o deslocamento instantâneo (h_i).

$$A_0 \times h_0 = A_i \times h_i$$

Equação 5

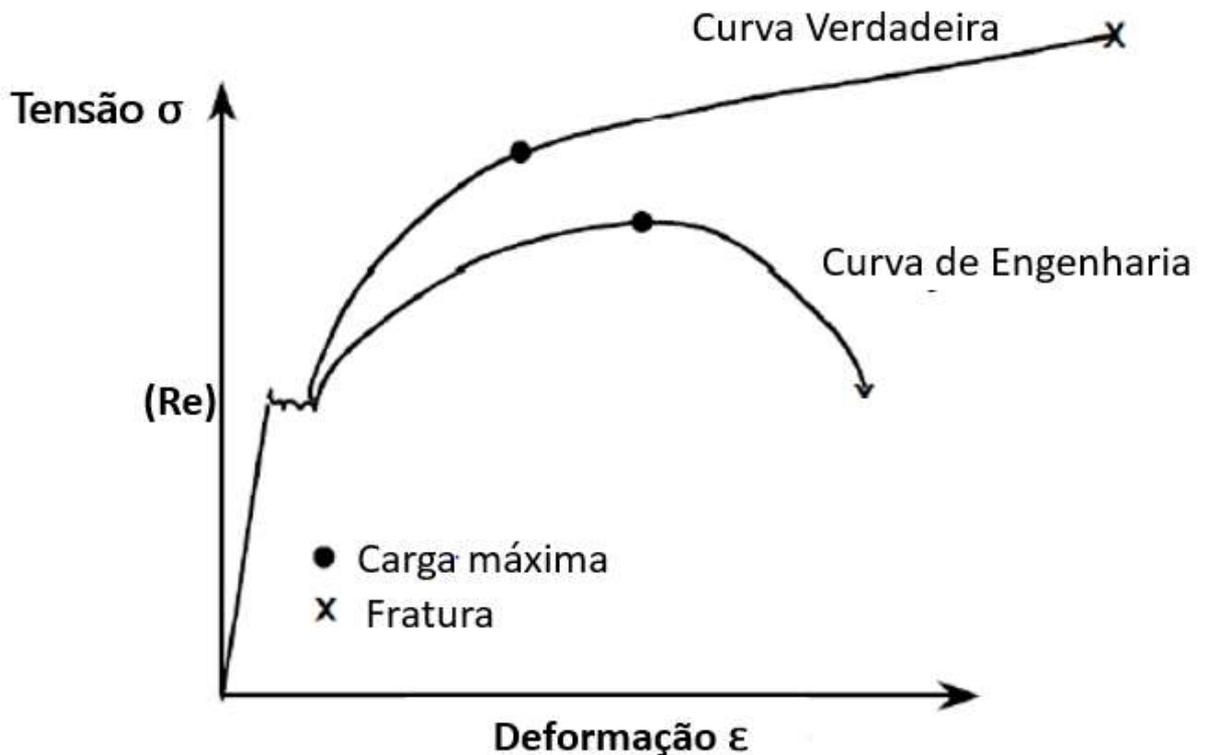


Figura 7 – Tensão verdadeira x tensão de engenharia.

A principal diferença entre as curvas se dá pelo fato de a tensão verdadeira ser calculada em função da área instantânea, enquanto a tensão convencional se dá pela área inicial do corpo de prova.

Através da curva de escoamento, é possível identificar a qualidade do aço testado. A curva se inicia no limite de escoamento do material, chegando até ao limite de resistência (tensão máxima), uma vez que, após esse limite, o material começa a entrar na fase de ruptura (Heinen, 2021). A curva de escoamento, que fica localizada entre a tensão de escoamento e a tensão máxima do material, é a mais importante para a conformação mecânica (Frees, 2017).

A curva de escoamento é influenciada pela temperatura, deformação e velocidade de deformação do material. A estrutura cristalina do material, tratamentos térmicos e composição química do material também podem influenciar na curva de escoamento (Souza, 2013).

2.2.3 Dureza Brinell (HB)

Os ensaios de durezas são normalmente utilizados para se obterem e qualificarem algumas propriedades mecânicas de materiais metálicos. A partir desse parâmetro (dureza), é possível determinar a resistência ao desgaste e obter informações importantes como: ductilidade, tratamento térmico, entre outras (Soares, 2022).

Um dos ensaios de dureza mais utilizados na indústria e também um dos mais antigos é o ensaio Brinell. Trata-se de um teste rápido, levando normalmente entre 10 a 30 segundos. Esse ensaio consiste em um penetrador esférico com diâmetro (D) determinado, que é pressionado contra a superfície do material por uma força (F), gerando uma deformação esférica com diâmetro (d) como mostrado na figura 8. O teste de dureza Brinell utiliza penetradores de aço temperado para durezas de até 350 HB; para durezas que variam de 350 a 650 HB; o penetrador deverá ser de metal duro (tungstênio) (Alexandria, 2010).

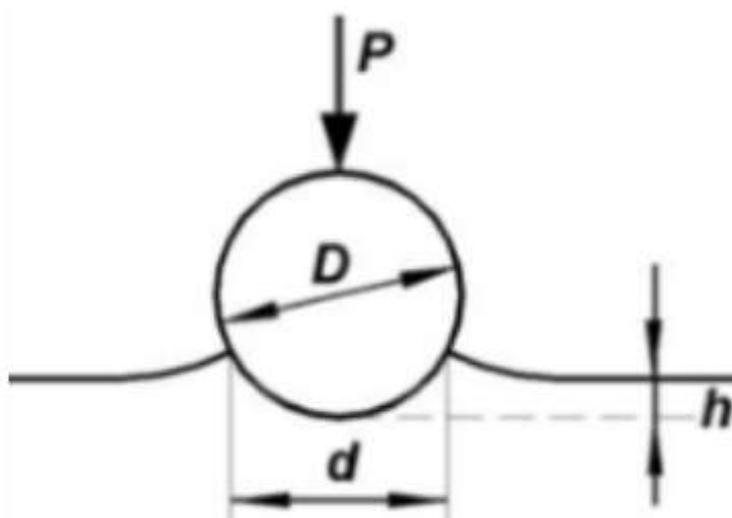


Figura 8 – Impressão causada por um penetrador. Fonte: Soares (2022).

De acordo com Callister (2006), o índice de dureza Brinell é uma função da carga aplicada com o da impressão resultante (diâmetro). Com auxílio de um microscópio, o diâmetro deixado pelo penetrador na superfície da peça é medido e convertido em Brinell com o uso de tabelas ou gráficos normalizados.

Para que a verificação da dureza ocorra de forma adequada, a superfície da peça precisa ser lisa e plana, sem oxidação, e livre de lubrificantes ou qualquer outro resíduo. A espessura do corpo de prova deve ser, no mínimo, 8 vezes a profundidade da impressão (Alexandria, 2010).

2.3 PROCESSO DE DOBRAMENTO

Souza (2019) salienta que o processo de dobramento em chapas pode ser realizado de diversas maneiras, dependendo do perfil final desejado. Por esse motivo, esse ensaio pode ser classificado em 3 grupos: o dobramento livre, dobramento semiguiado e dobramento guiado. O dobramento livre (figura 9) também é chamado de dobramento no ar ou em vazio. A chapa nesse tipo de dobramento fica apenas apoiada sobre a matriz e o ângulo final do perfil conformado é obtido através do deslocamento do punção. Esse processo é utilizado quando se desejam obter diversos dobramentos com ângulos diferentes sem a necessidade de substituição da ferramenta.

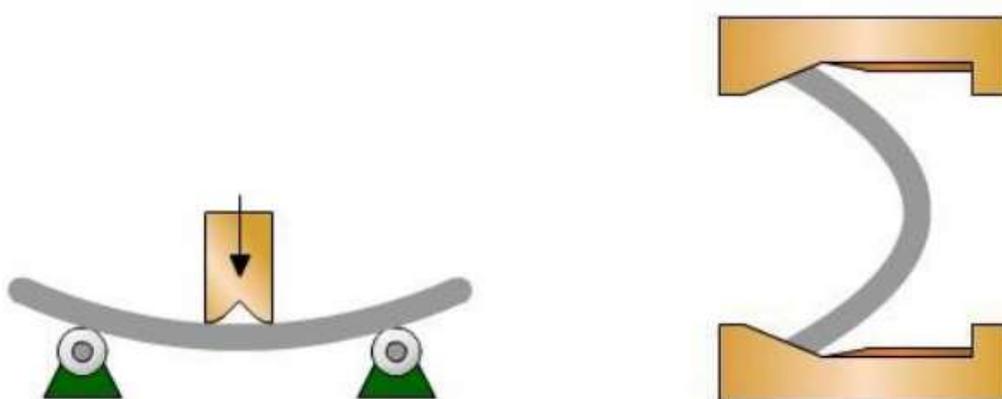


Figura 9 – Processo de dobramento livre. Fonte: Souza (2019).

No dobramento semiguiado (figura 10), uma das extremidades da chapa deve permanecer fixa enquanto o dobramento é realizado no outro lado do material ou em outro local do corpo de prova conforme a posição do cutelo.

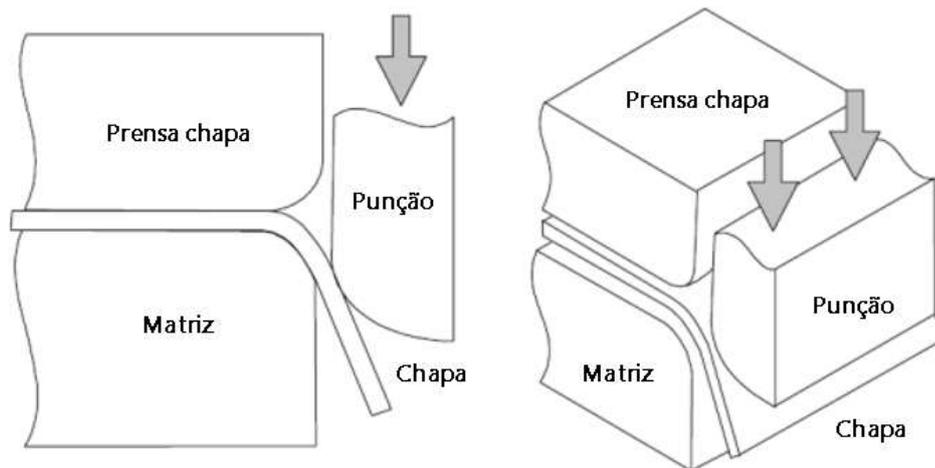


Figura 10 – Processo de dobramento semiguiado. Fonte: Marcondes (2012).

Já o dobramento guiado, diferente dos citados anteriormente, possui um conjunto de punção e matriz. Esse conjunto de ferramentas faz com que o corpo de prova se deforme dentro da matriz, assumindo, assim, a sua forma conforme mostrado na figura 11. O estudo apresentado neste trabalho será realizado por esse tipo de processo, no qual foram utilizados diversos punções com raios diferentes e uma matriz V para que fossem realizados os ensaios.

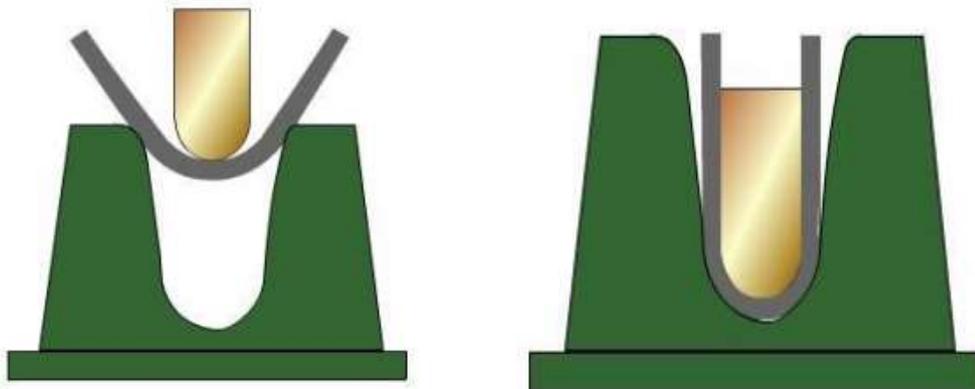


Figura 11 – Processo de dobramento guiado. Fonte: Souza (2019).

2.4 VARIÁVEIS DO DOBRAMENTO EM V

O dobramento em V (figura 12) consiste na adição de uma dobra em uma chapa metálica. Nessa etapa, o material é flexionado sobre uma base, que recebe o nome de matriz. Nesse processo, a peça é deformada por flexão, com o auxílio de prensas (maquinário geralmente utilizado para o dobramento) (Heinen, 2021). Esse

maquinário fornece a força e o deslocamento necessário para que a dobra seja realizada. A forma final da peça irá depender do tipo de punção e de matriz utilizados no processo (Secco *et al*, 1999).



Figura 12 – Processo de dobramento de uma chapa.

A partir desse processo, é possível obter peças com geometrias simples e/ou até componentes mais complexos, como: partes de um navio, ônibus ou avião. Além disso, a dobra também adiciona maior rigidez à peça (Kalpakjian *et al*, 2009). A fabricação de peças a partir da técnica de dobramento pode ser realizada em uma ou mais etapas conforme indicadas na figura 13 (Palmeira, 2005).

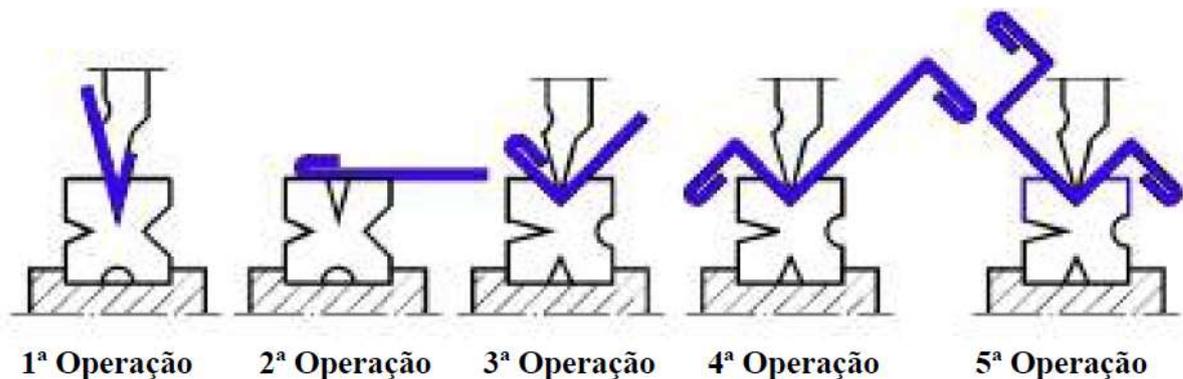


Figura 13 – Processo de dobramento em V. Fonte: Palmeira (2005).

O dobramento ocorre pela deformação plástica sofrida pelo material. Dentre os processos de conformação, esse é um dos que possui maior versatilidade, através do

qual as chapas dobradas podem ter ângulos que variam entre 180° até o ângulo projetado para a matriz (Frees, 2017). A chapa metálica é conformada através da força aplicada pela prensa com o auxílio do punção enquanto o material conformado é pressionado contra a matriz assumindo sua geometria final (Santos, 2013).

Durante a dobra em V, o material do lado do punção é submetido a esforços de compressão, enquanto, na parte externa, a esforços de tração, contudo existe uma linha na mesma direção do raio na qual não existem tensões atuantes, sendo conhecida como linha neutra (figura 14) (Baseri *et al*, 2011). A partir do desenvolvimento da linha neutra, é possível determinar o comprimento total da peça conformada (Rocha, 2012).

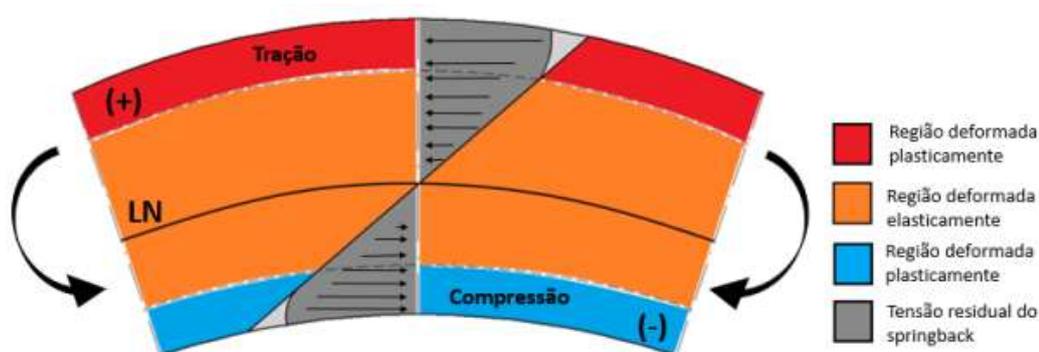


Figura 14 – Tensões sofridas na peça. Fonte: Onzi (2022).

Durante o dobramento, a deformação plástica causada ocasiona a redução da espessura do material conformado, em decorrência das tensões de tração; por outro lado, a largura da chapa tende a aumentar devido aos esforços de compressão. Quando as tensões na superfície externa são maiores que as de resistência à tração do material, existe a possibilidade de haver trincas nessa região enquanto nas fibras internas pode ocorrer o enrugamento (Paolinelli, 2017).

As chapas dobradas são usadas na indústria não apenas para atingir uma geometria específica na fabricação de determinados componentes, mas também para aumentar a rigidez destes. Atualmente, e em muitos segmentos, já são utilizadas chapas dobradas no lugar de perfis laminados ou extrudados. Esses itens são fabricados através do uso de dobradeiras com auxílio de matrizes podendo alcançar os mais diversos formatos (Santos, 2013).

2.4.1 Raio Mínimo de Dobra

Frees (2017) denomina o raio mínimo de dobra (R_{min}) como sendo o menor valor que o material a ser conformado pode suportar sem que ocorra o surgimento de trincas durante o processo, ou até mesmo, perda significativa da espessura da chapa. O valor do R_{min} é definido em função do alongamento longitudinal máximo da chapa em conjunto com a espessura dela: quanto menor for a espessura da chapa que irá ser submetida ao ensaio de dobramento, menor deverá ser o raio mínimo de dobra, de modo que, quanto maior for a espessura, maior também deverá ser o raio mínimo de dobra (Heinen, 2021). Deve-se ter cuidado ao dimensionar esse parâmetro tão importante, pois, se o raio de dobra for muito pequeno, as tensões na região de tração da chapa irão aumentar, podendo gerar rompimento nas fibras externas do material conformado.

Alguns autores, como Schaeffer (2017), salientam a importância de conhecer as tensões que serão geradas durante esse processo de conformação, uma vez que as tensões geradas nas fibras externas devem ser menores que a tensão máxima (R_m) do material (figura 4), que pode ser obtida pelo ensaio de tração. No caso de as tensões geradas no dobramento serem maiores que a tensão máxima suportada pelo material, poderão, então, ocorrer fraturas no raio externo da chapa conformada. Moro e Auras (2006) reforçam a importância do dimensionamento correto para a curvatura de dobra a fim de evitar danos a peça.

A maneira mais comum para dimensionar o raio de dobra é que este seja um valor múltiplo da espessura da chapa. Porém o R_{min} não deve ser dimensionado apenas observando a espessura da chapa a ser dobrada, pois materiais mais dúcteis como: alumínio, cobre, latão e aços com baixo carbono necessitam de raios menores se comparados a chapas de alta resistência, mesmo que tenham a mesma espessura (Secco *et al*, 1999). Seguindo essa mesma linha de raciocínio Palmeira (2005), indica a importância de conhecer o material que será conformado, pois aços com elevada dureza irão necessitar de raios de dobra maior. Com objetivo de facilitar o dimensionamento do raio mínimo de dobra, a seguir seguem algumas das equações encontradas na literatura e seus respectivos autores.

$$R_{min} = \left(\frac{1}{2q} - 1 \right) * s_i \quad \text{Equação 6} \quad \text{Dieter (1981)}$$

$$R_{min} = \left(\frac{(1 - q)^2}{2q - q^2} \right) * s_i \quad \text{Equação 7} \quad \text{Dieter (1981)}$$

$$q = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad \text{Equação 8} \quad \text{Dieter (1981)}$$

$$R_{min} = \frac{s_i * E}{2 * R_e} \quad \text{Equação 9} \quad \text{Tschätsch, (1997)}$$

$$R_{min} = \frac{50 * s_i}{Al} * \frac{s_i}{2} \quad \text{Equação 10} \quad \text{Palmeira (2005)}$$

Onde:

R_e = tensão de escoamento [MPa];

A_0 = Área inicial do corpo de prova antes do ensaio de tração [mm²];

A_f = Área final do corpo de prova após o ensaio de tração [mm²];

A_l = alongamento da chapa [%];

s_i = espessura inicial da chapa [mm];

E = módulo de elasticidade do material [MPa];

q = redução de área [mm²];

Dieter (1981) sugere as equação 6 e 7 sendo que ambas dependem da redução de área (q) do material que pode ser obtida pela equação 8. Dessa forma, se a redução de área for menor que 0,2, deve-se, então, ignorar o deslocamento da linha neutra, utilizando nesse caso a equação 6 para se obter o raio mínimo de dobra; caso a redução de área seja maior que 0,2, então, deverá ser utilizada a equação 7. Já Tschätsch (1997) e Palmeira (2005) sugerem as equação 9 e 10 respectivamente.

2.4.2 Força de Dobramento

A força de dobramento (F_d) (ou esforço de dobra) ocorre através do deslocamento vertical e perpendicular do punção em direção da chapa. Para que seja possível determinar de forma mais assertiva, a força de dobramento, é necessário conhecer como será realizado o processo (FREES, 2017). Conhecer a força de dobramento é extremamente importante para que se possa escolher o equipamento adequado, de acordo com a sua capacidade. Por esse motivo, alguns pesquisadores

desenvolveram equações para que se consiga prever o esforço de dobra necessário para realizar o processo e, então, selecionar a prensa corretamente.

Na sequência, podem ser observadas algumas equações sugeridas por diferentes autores, como Dieter (1981) que sugere a equação 11. Já Marcos (2007) e Tschätsch (1997) sugerem as equação 12 e 13 respectivamente. A fabricante do Quard indica a equação 14 para determinar o esforço de dobra para esse material. Por fim, Kalpakjian *et al* (2009) sugere a equação 15 com objetivo de encontrar a força de dobramento. Vale observar que entre as equações indicadas apenas a sugerida por Dieter (1981) leva em consideração o R_{min} como uma das variáveis para se obter a força de dobramento. As demais equações utilizam os mesmos parâmetros, alternando apenas a constante de multiplicação.

$Fd = \frac{R_e * l * s_i^2}{2 \left(R_{min} + \frac{s_i}{2} \right)} \tan \frac{\alpha_i}{2}$	Equação 11	Dieter (1981)
$Fd = 2 * \frac{R_m * b * s_i^2}{w}$	Equação 12	Marcos (2007)
$Fd = 1,2 * \frac{R_m * b * s_i^2}{w}$	Equação 13	Tschätsch (1997)
$Fd = 1,5 * \frac{R_m * b * s_i^2}{w}$	Equação 14	NLMK
$Fd = \frac{R_m * b * s_i^2}{w}$	Equação 15	Kalpakjian <i>et al.</i> (2009)

Onde:

F_d = força de dobramento [N];

R_e = tensão de escoamento ou resistência ao escoamento [MPa];

l = comprimento da chapa [mm];

s_i = espessura inicial da chapa [mm];

R_{min} = raio mínimo de dobra [mm];

α_i = ângulo inicial de dobramento [°].

R_m = tensão máxima [MPa];

b = largura [mm];

w = abertura da matriz [mm].

2.4.3 Retorno Elástico

No dobramento com matriz tipo V, a espessura da chapa, o sentido de laminação, as propriedades do material assim como o raio do punção e o atrito são alguns fatores que devem ser observados (Baseri *et al*, 2011). Vorkov *et al* (2018) explicam que, para atingir a precisão dimensional através do processo de dobramento é um grande desafio devido ao fenômeno conhecido como retorno elástico “K” (*Springback* ou efeito mola).

Esse fenômeno normalmente ocorre quando a força aplicada ao punção é interrompida, fazendo com que as tensões inferiores ao limite de escoamento do material, ou seja, as tensões que permaneceram dentro da zona elástica do material, tendem a retomar sua posição inicial (plana). Quanto maiores o limite de escoamento e a deformação plástica do material e menor o módulo de elasticidade, maior será o retorno elástico (Dieter, 1981). O encruamento também possui uma grande influência na recuperação elástica (Gusel, 2011). O raio de dobra, assim como o ângulo de dobramento, pode ser afetado pelo retorno elástico, uma vez que ambos podem ter suas dimensões aumentadas devido à liberação do punção, conforme pode ser observado na figura 15. Para aços de alta resistência, o retorno elástico tende a ser maior. É importante ressaltar que, para esse tipo de dobramento, o raio inicial (R_i) será igual ao raio do Punção (R_p), visto que a peça assume o raio do punção como observado na figura 15.

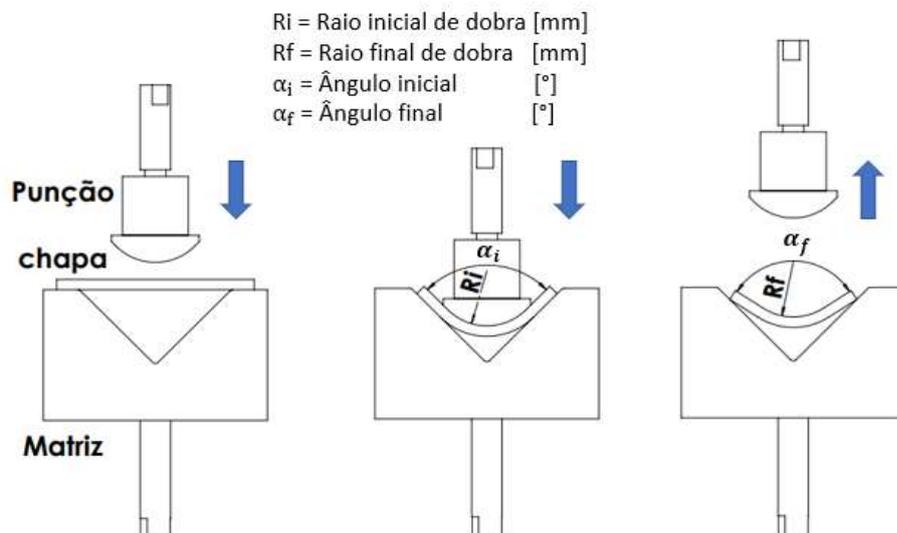


Figura 15 – Retorno elástico no dobramento em V.

A força exercida através do punção assim como o tempo que este permanece sobre a peça são fatores que podem influenciar no retorno elástico. Além disso, quanto maiores forem as dimensões do raio do punção (R_p) e a abertura da matriz (W), maior também poderá ser o *Spring Back* (Heinen, 2021). Entre os meios mais estudados a fim de minimizar a recuperação elástica, destacam-se: geometria da peça, sentido de laminação, atrito entre a peça e o ferramental e as condições de lubrificação (Tekaslan *et al*, 2006). Tsoupis (2014) complementa que o sentido de laminação paralelo ao ferramental tem maior tendência a gerar trincas durante o dobramento e que, quanto maior for a espessura da chapa, maior também deverá ser o efeito mola do material.

Quatro dos parâmetros que mais influenciam o efeito mola durante a conformação de chapas dobradas são: raio do punção, abertura da matriz, espessura e resistência do material (Santos *et al*, 2022). Vorkov *et al*, (2018), com o intuito de entender melhor a influência desses parâmetros, realizaram um estudo cujos resultados podem ser observados na figura 16.

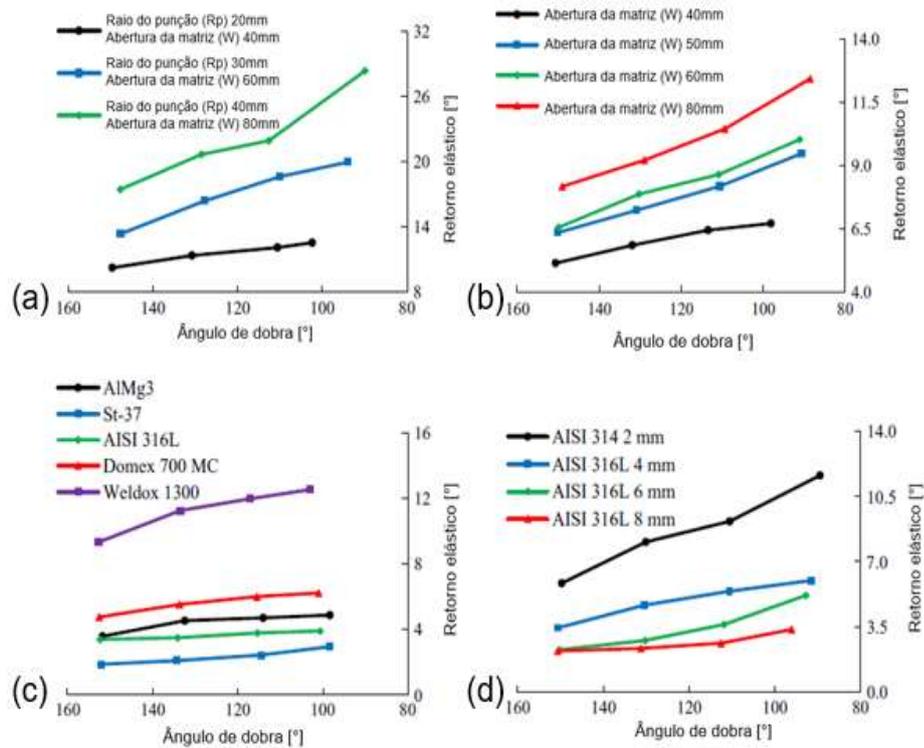


Figura 16 – Fatores que influenciam no retorno elástico: Raio do punção e abertura da matriz combinados (a); abertura da matriz (b); propriedades do material (c); espessura da chapa (d). Fonte: Vorkov *et al* (2018).

Observando o estudo realizado por Vorkov *et al*, (2018), é possível constatar, pela figura 16 (a), que, quando maior for a abertura da matriz (W) e o raio do punção (R_p) utilizado no dobramento, maiores também serão os efeitos do retorno elástico. O autor também estudou, isoladamente, apenas a influência da abertura da matriz. O experimento demonstra, através da figura 16 (b), a grande influência da matriz no dobramento, deixando clara a importância do dimensionamento da abertura dessa ferramenta. Para finalizar esse experimento, o autor realizou outros dois testes, com o objetivo de verificar a influência na resistência do material (figura 16 (c)) e da espessura da chapa (figura 16 (b)). Os resultados indicaram o que a literatura nos informa: quanto maior for a resistência do material, maior também será o efeito mola que esse irá sofrer; do mesmo modo: quanto maior for a espessura da chapa, maior será também o retorno elástico.

Para Dieter (1981), é possível prever o efeito mola (figura 17) de acordo com a equação 16. Para isso, é preciso conhecer o ângulo final (α_f) e inicial (α_i) ou o raio de curvatura (R_i) antes da liberação da carga exercida pelo punção, bem como o raio encontrado após a liberação do punção (R_f) e a espessura do material (s). Quanto maior o resultado para K (fator de retorno elástico), menor será o retorno elástico, ou seja, quando mais o resultado se aproxima de um, menor será o efeito mola do material.

$$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{R_i + s_i/2}{R_f + s_i/2}$$

Equação 16

Dieter (1981)

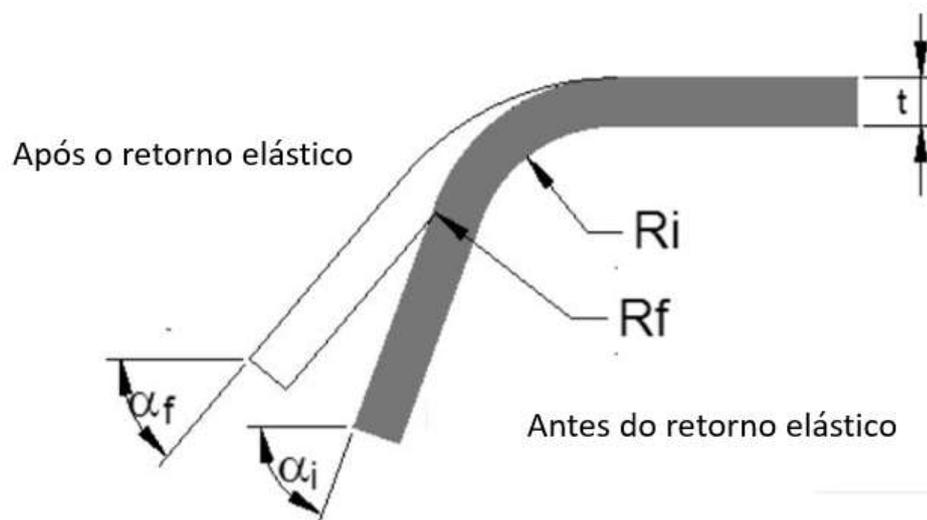


Figura 17 – Parâmetros para o retorno elástico.

O retorno elástico pode ser minimizado utilizando um raio de curvatura menor que o especificado no projeto. Ao utilizar um raio de dobra pequeno, maior será a zona plástica; assim, as forças elásticas que atuam sobre o material são menores, diminuindo o efeito mola (Schaeffer, 2017). O dobramento a quente também pode ser realizado com objetivo de reduzir o efeito mola (Dieter, 1981). Tekaslan *et al*, (2006), em suas experiências, comprovaram que deixar o punção por mais tempo “pressionando” a peça sobre a matriz reduz consideravelmente o retorno elástico.

2.4.4 Deformações no Dobramento

De acordo com Keeler e Kimchi (2014), a deformação de um determinado material pode ser associada ao alongamento total dele quando submetido ao ensaio de tração ou em um processo de dobramento. Quanto maior o alongamento do aço, maior deverá ser a sustentação da fibra externa quando for conformado, podendo, assim, ser usado um raio de dobramento menor. Caso o item a ser dobrado possua um alongamento menor, deve-se, então, aumentar o raio mínimo de dobra para que se evitem fraturas na fibra externa.

A deformação ocorre devido à alteração dimensional que um corpo de prova sofre. Já quando submetido à aplicação de forças externas, ela depende principalmente da força que está sendo aplicada, bem como das propriedades do material que está sendo conformado. No processo de dobramento, essa deformação ocorre quando o material conformado pelo punção assume a forma da matriz. Durante um processo de conformação, é comum a ocorrência de deformações no comprimento, largura e espessura da chapa (Bueno, 2021).

Uma das técnicas utilizadas para mensurar a distribuição das deformações de uma chapa após o processo de conformação é a processo eletrolítico. Esse método consiste na gravação de uma grade com geometria conhecida sobre a chapa a ser estampada. Após a conformação, medem-se as deformações no círculo gravado. A medida deve ser realizada no comprimento e na largura conforme evidenciado na figura 18 (Schaeffer, 2017). A técnica para gravar a grade na superfície da chapa é conhecida como método eletroquímico (Bueno, 2021).

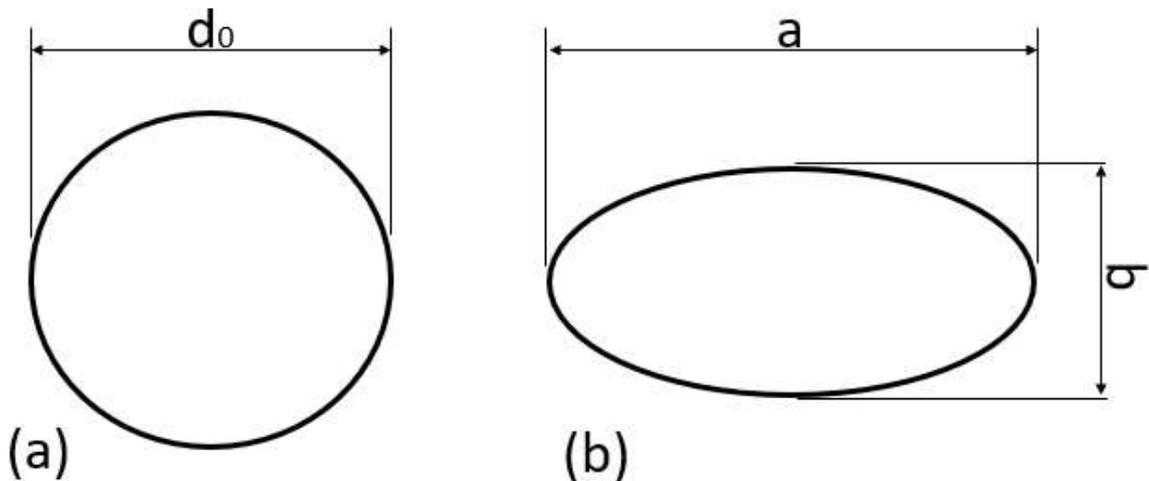


Figura 18 – Círculo antes da deformação (a); elipse após a deformação (b). Fonte: Bueno (2021).

As deformações localizadas na superfície da chapa são denominadas φ_1 e φ_2 (nas duas direções principais mostradas na imagem acima) pelas equações 17 e 18 respectivamente, onde " d_0 " representa o diâmetro inicial do círculo gravado na peça, " a " é a medida maior e " b " o comprimento menor.

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{d_0} \quad \text{Equação 17} \quad \text{Schaeffer, (2017)}$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{b}{d_0} \quad \text{Equação 18} \quad \text{Schaeffer, (2017)}$$

As fibras na região de tração aumentam de tamanho enquanto as fibras internas são comprimidas. A partir disso, é possível prever a deformação verdadeira na região de tração (φ_{ext}) através da equação 19, onde r_m (figura 19) é o raio de dobramento na meia espessura da peça. Considerando as fibras externas na posição y (figura 19), tem-se a equação 20.

$$\varphi_{ext} = \ln \left(1 + \frac{y}{r_m} \right) \quad \text{Equação 19} \quad \text{Schaeffer, (2017)}$$

$$\varphi_{ext} = \ln \left(1 + \frac{s_0}{2r_i + s_0} \right) \quad \text{Equação 20} \quad \text{Schaeffer, (2017)}$$

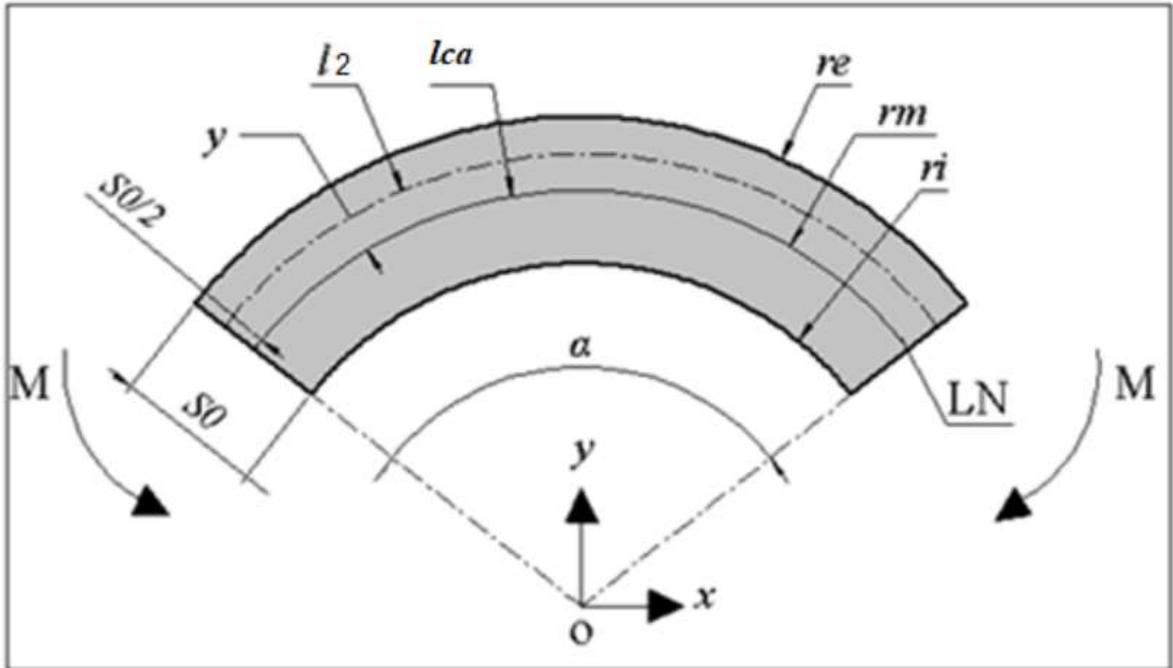


Figura 19 – Representação das variáveis na geometria do dobramento de chapas.

Fonte: Onzi (2022).

A equação 21 apresenta outro método para estimar a deformação verdadeira (φ_{ext}). De acordo com Lange (1990), neste caso, em vez de ser utilizado o r_m , são considerados o raio do punção (R_p) e a espessura da chapa (S_0).

$$\varphi_{ext} = \ln \sqrt{1 + \frac{S_0}{R_p}} \quad \text{Equação 21} \quad \text{Lange (1990)}$$

2.4.5 Defeitos no Dobramento

Um defeito comum é o surgimento de trincas no processo de dobramento (figura 20) na fibra externa, ocasionada, na maioria das vezes, quando as tensões aplicadas nessa região são maiores que o limite de resistência à tração do componente dobrado. Já nas fibras internas pode ocorrer o enrugamento em decorrência das forças de compressão, sendo esse defeito o mais comum em chapas com espessuras menores.

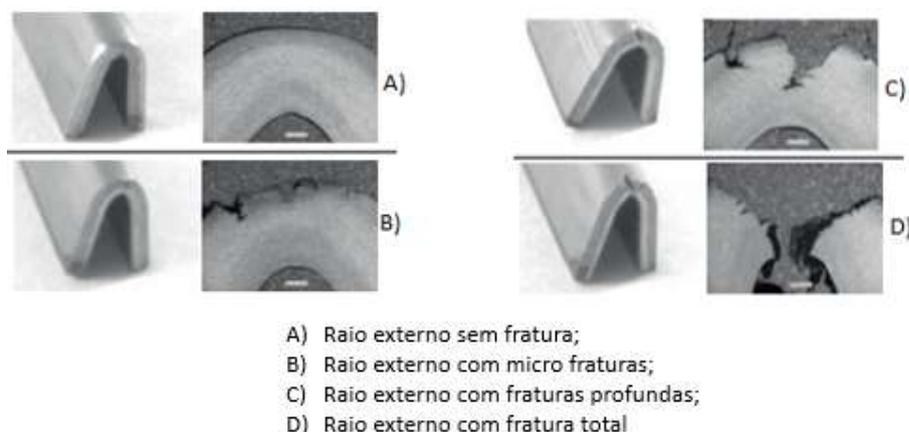


Figura 20 –Fratura na fibra externa. Fonte Tsoupis (2014).

De acordo com Kalpakjian *et al*, (2009), a anisotropia é um dos fatores mais importantes durante o dobramento de chapas, pois o mesmo material pode ter propriedades físicas distintas conforme as diferentes orientações da peça. A laminação a frio pode resultar em anisotropia por orientação ou por fibragem. Souza (2019) explica que a anisotropia ocorre devido à orientação preferencial dos grãos, normalmente, devido a uma grande deformação por trabalho mecânico, ou também pelo alinhamento das inclusões, vazios e segregação ou alinhamento de uma segunda fase precipitada também ocasionado por trabalho mecânico.

2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Cada vez mais a simulação computacional tem sido usada com intuito de encontrar o retorno elástico e a força de dobramento ou até mesmo para a fabricação do ferramental utilizado no processo de dobramento sem a necessidade de realizar inúmeros testes práticos (Wahed *et al*, 2019). Para Dagnese (2012), o modelo numérico de Ludwig-Hollomon é o mais adequado para se obter a curva de escoamento como dado de entrada para simulações numéricas.

De acordo com Wahed *et al*, (2019), para realizar a simulação, o *software* precisa ter as propriedades corretas do material a ser conformado, tais como: resistência máxima, limite de escoamento, alongamento, entre outras. Tais informações podem ser facilmente encontradas através do ensaio de tração. Com auxílio da simulação, podem-se evitar problemas comuns no dobramento como o surgimento de trincas ou enrugamento (Paolinelli, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma indicado na figura 21, apresenta, resumidamente, a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho, sendo que cada procedimento é detalhado nos tópicos a seguir.

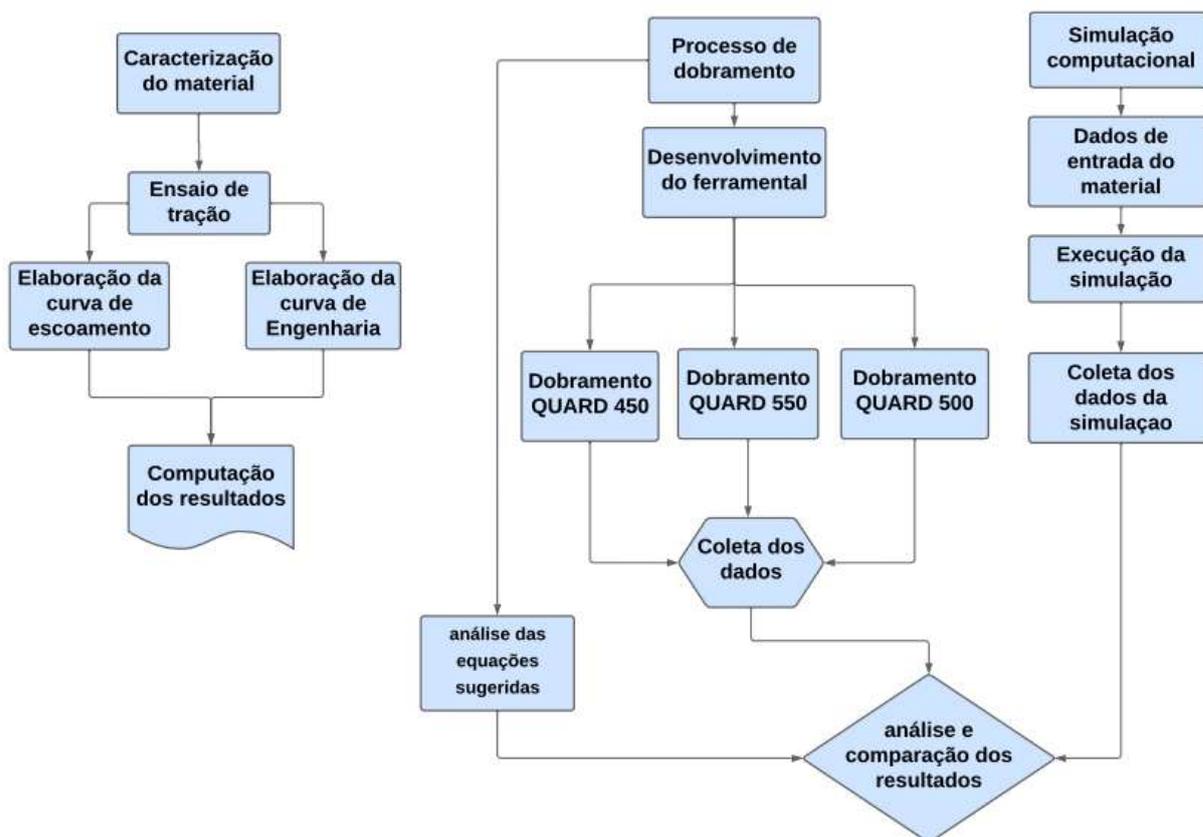


Figura 21 – Fluxograma dos ensaios.

3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CP)

Conforme já mencionado anteriormente, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento dos aços Quard 450, 500 e 550 com 8mm de espessura quando submetidos ao processo de dobramento em V à temperatura ambiente. A fabricante deste material (NLMK) forneceu amostras equivalentes a uma chapa de 600 x 600 mm conforme mostrado na figura 10. Os corpos de prova foram cortados a *laser* pela Innova do Brasil Localizada em Serra, no estado do Espírito Santo, e pela Metalúrgica Gans Indústria e Comércio LTDA, sediada em Campo Largo, no Paraná, ambas especializadas na fabricação de componentes pesados para mineração. As

peças para o processo de dobramento, assim como para o ensaio de tração, foram cortadas longitudinalmente e transversalmente (Figura 22).

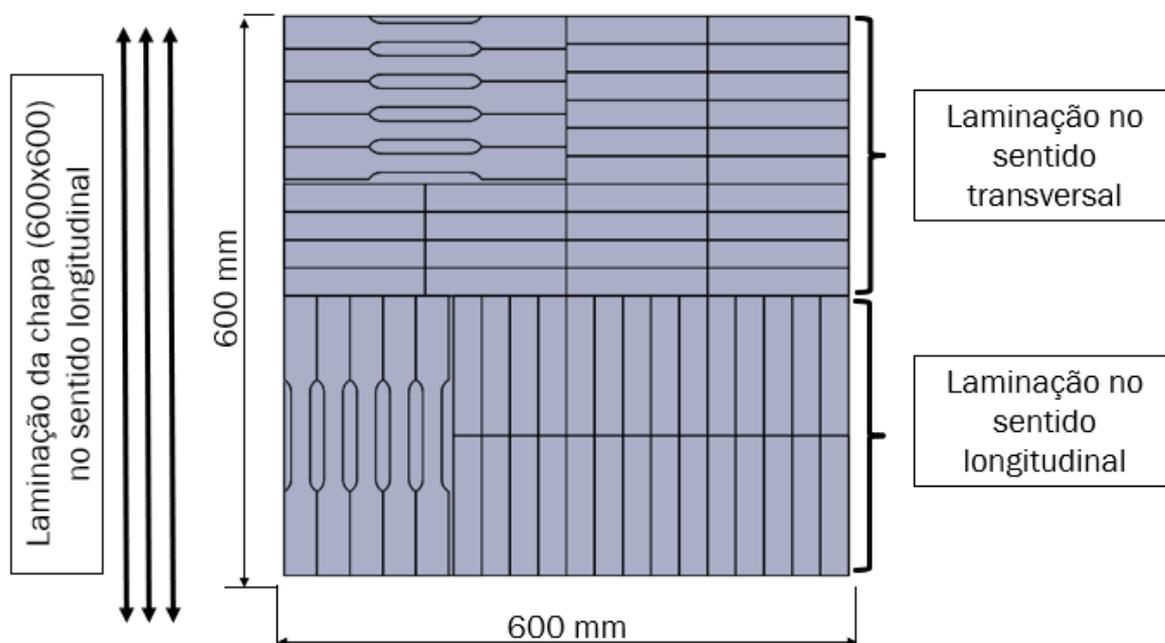


Figura 22 – Corte das amostras.

3.1.1 Corpos de Prova Ensaio de Tração

Os corpos de prova utilizados no ensaio de tração à temperatura ambiente foram confeccionados conforme a orientação da ABNT NBR ISO 6892-1. Na tabela 6, são indicadas as dimensões típicas para peças planas utilizadas no ensaio de tração.

Tabela 6 – Dimensões típicas em “mm” de corpos de prova planos à temperatura ambiente.

Fonte: ABNT NBR ISO 6892-1 (2013, p. 46).

Largura b_0	Comprimento de medida inicial L_0	Comprimento paralelo mínimo L_c	Comprimento total aproximado L_t
40	200	220	450
25	200	215	450
20	80	90	300

Para que houvesse melhor aproveitamento do material cedido, foi escolhida a largura (b_0) de 20 mm com comprimento total (L_t) de 300 mm. Definida a dimensão do corpo de prova, foram, então, modeladas e detalhadas (figura 23) as amostras

utilizando o *software* SolidWorks, no qual também foi possível identificar o sentido de laminação das peças para que as amostras pudessem ser cortadas corretamente.

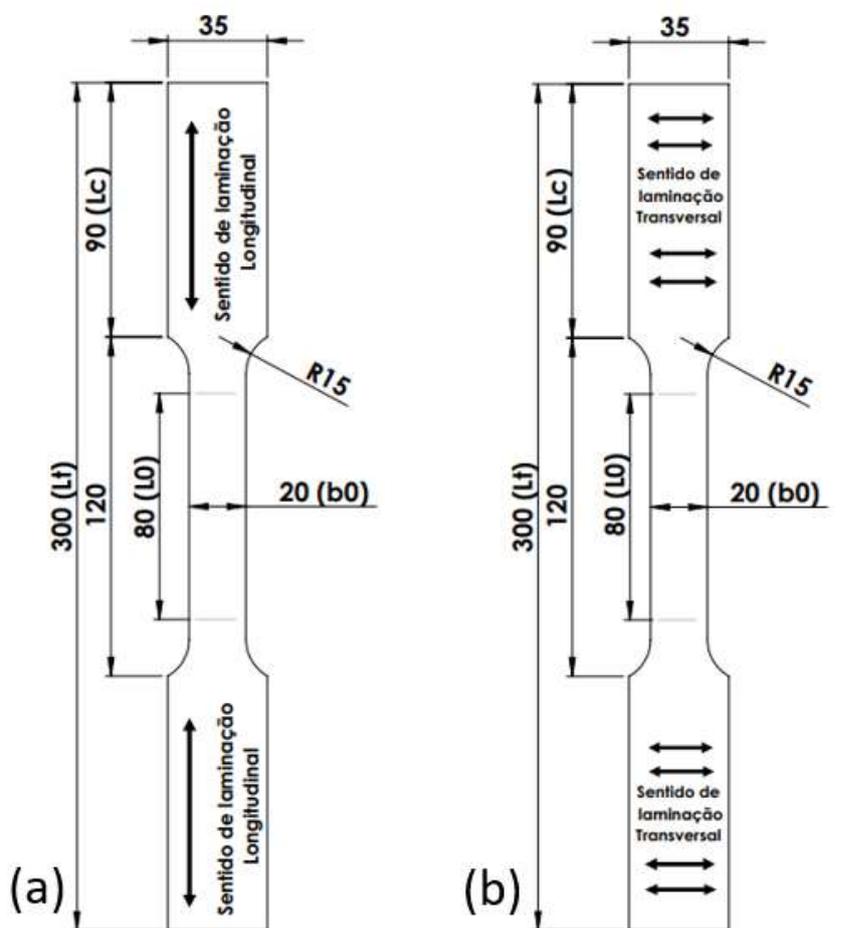


Figura 23 – (a) Corpo de prova com laminação longitudinal; (b) Corpo de prova com laminação transversal.

3.1.2 Corpo de Prova para o Dobramento

A fabricação das amostras para os ensaios de dobramento foram confeccionadas de acordo com a ABNT NBR ISO 7438. De acordo com essa norma, para uma chapa com espessura superior a 3 mm, a largura do material deve ser entre 20 mm e 50 mm. Porém essa mesma norma não diz nada quanto ao comprimento do corpo de prova: apenas indica que deve ser adequado para a espessura do material, assim como para os equipamentos de ensaios utilizados.

As dimensões do corpo de prova foram determinadas de modo que houvesse um melhor aproveitamento do material cedido pela NLMK e que contemplasse a ABNT NBR ISO 7438. Desse modo, as dimensões utilizadas no dobramento foram de

8x30x150mm (espessura, largura e comprimento). Para que as peças fossem enviadas corretamente pela fabricante, foi necessário modelar e detalhar no *software* SolidWorks. Conforme evidenciado na figura 24, foram criados dois desenhos indicando o sentido de laminação, para que fosse possível realizar a conformação nos dois sentidos de laminação (transversal e longitudinal).

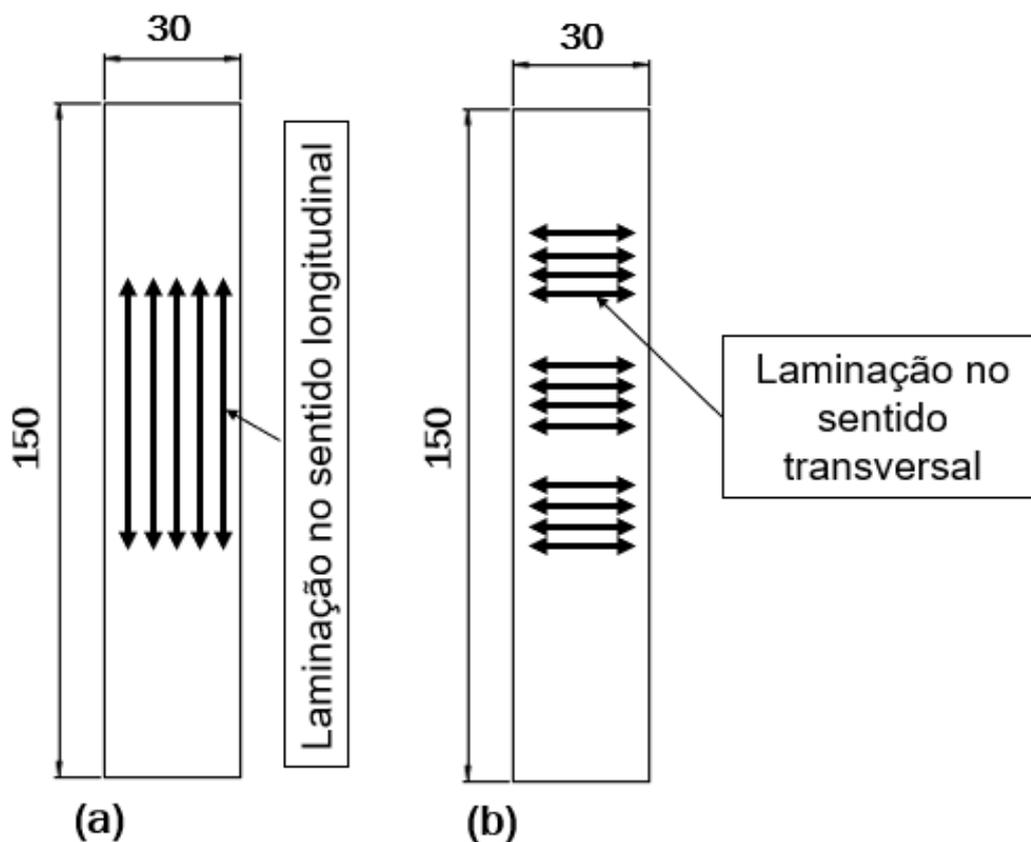


Figura 24 – (a) Corpo de prova com laminação longitudinal; (b) Corpo de prova com laminação transversal.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os ensaios de tração foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC, indicada na figura 25, presente no LTDM (laboratório de transformação mecânica da UFRGS). Devido à falta do extensômetro, o deslocamento foi medido pelo avanço da máquina universal de ensaios e, posteriormente, utilizada a equação 22 como fator de correção para esse deslocamento. Essa máquina atinge uma força máxima de 600 kN. O ensaio foi realizado com objetivo de determinar as propriedades mecânicas dos

aços (QUARD 450, QUARD 500 e QUARD 550) utilizados nesse estudo, tais como o limite de escoamento (R_e), a redução de área (ε_a) do material, a tensão máxima (R_m), o alongamento (A_l). Esses parâmetros foram utilizados para determinar o raio mínimo de dobra através das equações sugeridas no tópico 2.3.1. A velocidade para a realização do ensaio foi de 0,02 mm/s, e se manteve constante, conforme indicado pela ABNT NBR ISO 6892-1.

$$F_c = \frac{L_f - L_0}{D_t} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

L_f = Comprimento final do corpo de prova [mm];

L_0 = Comprimento inicial do corpo de prova [mm];

D_t = Deslocamento total da máquina de ensaios [mm];



Figura 25 – Máquina universal de ensaios EMIC®.

Para o aço Quard 450, foram utilizados 5 corpos de prova no sentido de laminação transversal (90°). Nesse caso, não foi possível estudar a laminação longitudinal para o Quard 450, pela falta de amostras. Já para o Quard 500, foram

realizados 10 ensaios, sendo 5 no sentido de laminação longitudinal (0°) e 5 no sentido transversal (90°). Do mesmo modo para o Quard 550, foram realizados 5 ensaios de tração a 0° e outros 5 a 90°, totalizando um total de 25 peças para o ensaio de tração. A tabela 7 apresenta os corpos de prova que foram utilizados para cada material, bem como o sentido de laminação. Cada CP foi identificado de acordo com sua dureza e sentido de laminação (0° ou 90°) Do mesmo modo, todos foram marcados com o comprimento útil de 80mm. As identificações podem ser vistas na figura 26.

Tabela 7 – Número de corpos de prova para o ensaio de tração.

Quard (dureza) [HB]	450	500	500	550	550
Sentido de laminação	90°	0°	90°	0°	90°
Corpo de prova	01 - 05	06 - 10	11 - 15	16 - 20	21 - 25



Figura 26 – Identificação dos corpos de prova de tração.

Durante os ensaios, as amostras 9,10,24 e 25 precisaram ser descartadas pois houve escorregamento durante o ensaio de tração, tornando os resultados inviáveis para serem utilizados. Os corpos de prova tiveram seus resultados coletados e, através das equações 1 e 2, foi calculada a tensão (σ), bem como a deformação relativa (ϵ) para a construção da curva de engenharia ($\sigma \times \epsilon$) (figura 27) dos aços QUARD 450, 500 e 550. Conforme observado na figura 27 não foi possível identificar o limite de escoamento para esses corpos de prova. Dessa forma, foi traçada uma reta paralela à parte elástica da curva iniciando onde a deformação é 0,2% conforme mostrado na figura 28.

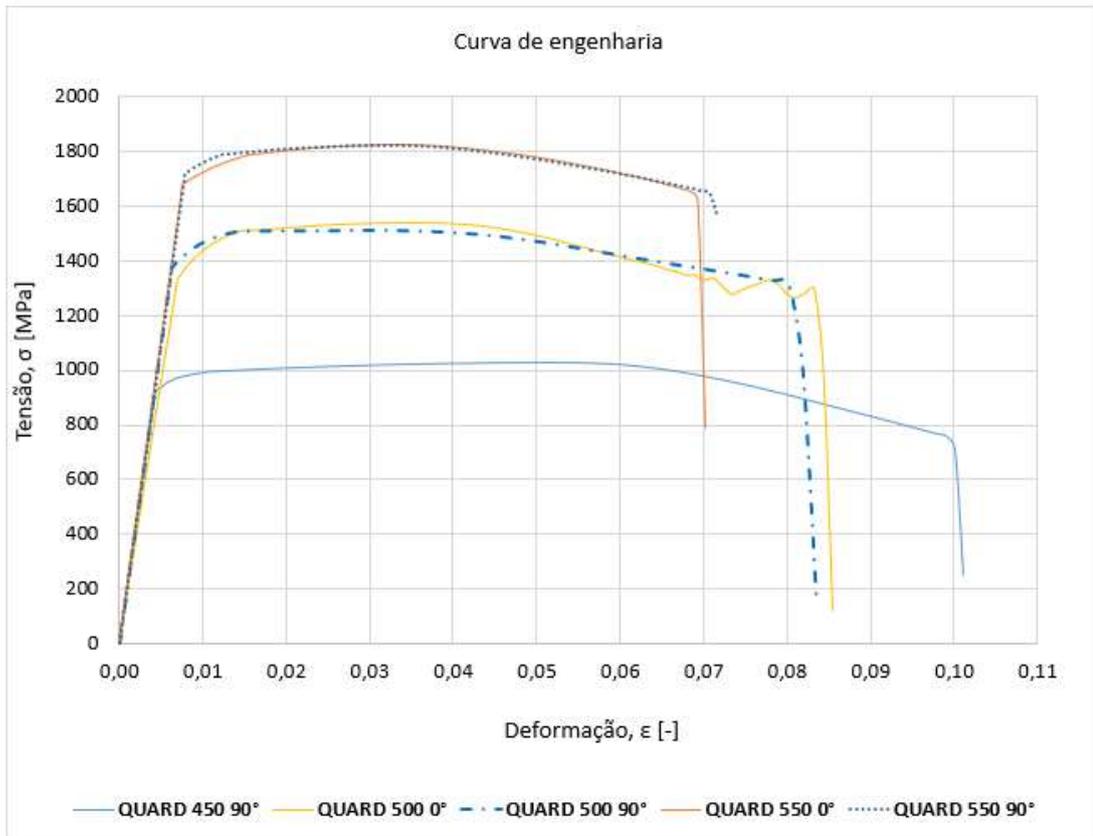


Figura 27 – Curva de engenharia média para a linha Guard.

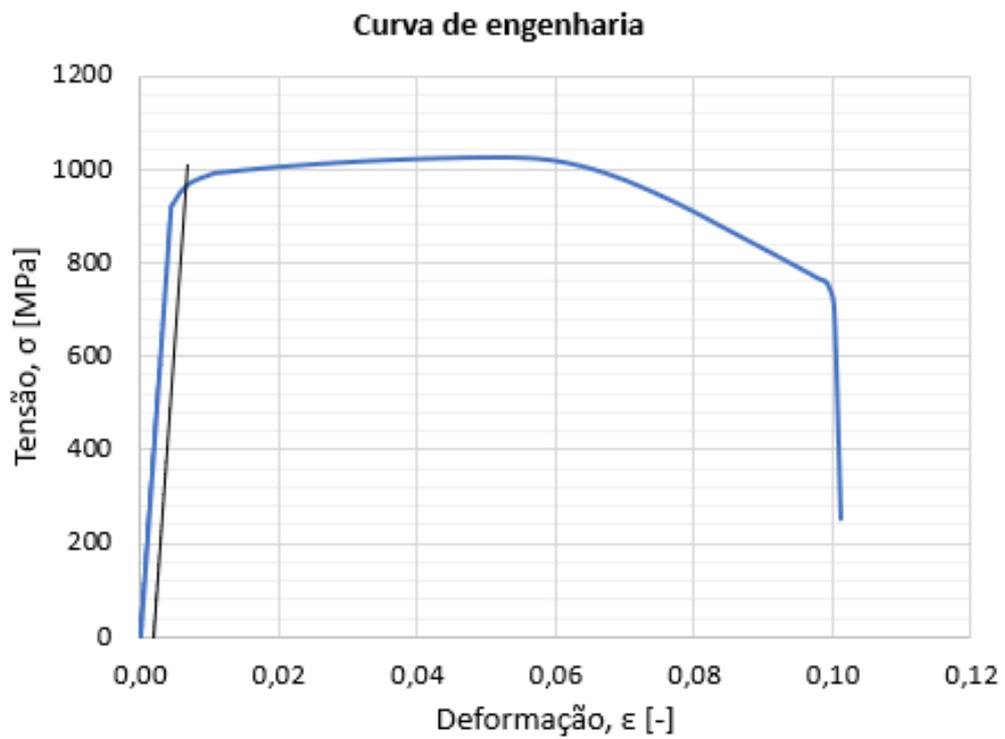


Figura 28 – Definição do limite de escoamento Guard 450.

A curva de escoamento foi desenvolvida a partir da região plástica da curva tensão (σ) x Deformação (ϵ). A zona plástica do material se inicia após o limite de escoamento até a tensão máxima do material. A partir desses dados, foi possível transformar esses valores em tensão de escoamento (k_f) e deformação (φ) através das equações 3 e 4. Desse modo, obteve-se a curva de escoamento (figura 29). Através do *software* Excel, a partir da curva de escoamento, foi possível chegar à equação de Hollomon, obtendo-se uma reta através da linearização da curva. Com a ajuda dessa equação, chegou-se ao resultado da constante (C) do material, assim como ao coeficiente de encruamento (n).

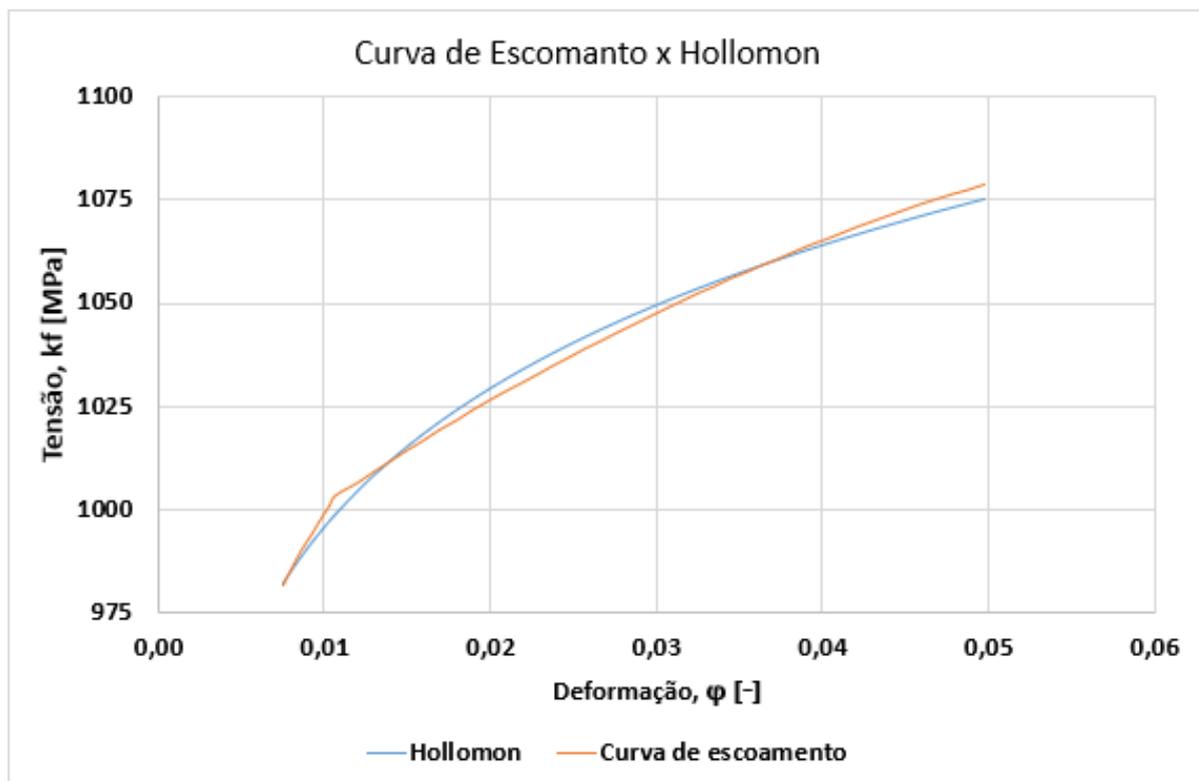


Figura 29 – Curva de escoamento Quard 450.

A tabela 8 mostra os resultados para tensão de escoamento (R_e), tensão máxima (R_m), deformação (ϵ), coeficiente de encruamento (C) e índice de encruamento (n), encontradas para o Quard 450 com sentido de laminação 90° , assim como para os aços Quard 500 e 550 nos dois sentidos de laminação (0° e 90°).

Tabela 8 – Resultados obtidos através do ensaio de tração.

Corpo de prova (CP)	Material	Laminação	Tensão de escoamento (R_e) [MPa]	Tensão Máxima (R_m) [MPa]	Deformação ϵ [%]	Coefficiente de encruamento (C) [MPa]	Índice de Encruamento (n) [-]	Redução de área (q) [-]
CP1	450	90°	942	999	10,5%	2429	0,26	0,43
CP2	450	90°	964	1025	9,5%	2232	0,23	0,41
CP3	450	90°	964	1017	9,8%	2446	0,24	0,41
CP4	450	90°	1000	1059	10,4%	1983	0,24	0,38
CP5	450	90°	1030	1101	9,9%	2762	0,28	0,47
CP6	500	0°	1525	1551	9,1%	4154	0,30	0,36
CP7	500	0°	1498	1509	8,2%	4148	0,27	0,32
CP8	500	0°	1491	1543	8,4%	4432	0,31	0,33
CP11	500	90°	1481	1504	8,2%	3985	0,27	0,31
CP12	500	90°	1480	1514	8,6%	3572	0,25	0,30
CP13	500	90°	1504	1512	8,1%	3518	0,23	0,32
CP14	500	90°	1460	1505	8,4%	3627	0,24	0,31
CP15	500	90°	1485	1540	7,9%	3246	0,23	0,31
CP16	550	0°	1744	1838	6,6%	4847	0,37	0,24
CP17	550	0°	1760	1829	7,5%	5626	0,33	0,29
CP18	550	0°	1795	1828	7,2%	6795	0,38	0,22
CP19	550	0°	1807	1847	7,4%	7665	0,41	0,26
CP20	550	0°	1616	1748	6,8%	4813	0,35	0,30
CP21	550	90°	1827	1857	7,4%	4767	0,30	0,30
CP22	550	90°	1800	1825	7,8%	5992	0,38	0,26
CP23	550	90°	1730	1824	7,2%	5903	0,39	0,26

A tabela 9 apresenta a média dos valores de tensão de escoamento (R_e), tensão máxima (R_m) e deformação (ϵ) obtida nos ensaios de tração para cada dureza e seu respectivo sentido de laminação. A tabela também apresenta os valores de desvio padrão para cada um dos resultados.

Tabela 9 – Resultados médio para o ensaio de tração.

CP	Material	Laminação	Tensão de escoamento (R_e) [MPa]	Desvio Padrão (R_e) [MPa]	Tensão Máxima (R_m) [MPa]	Desvio Padrão (R_m) [MPa]	Deformação ϵ [%]	Desvio padrão ϵ [%]
1 a 5	450	90°	980	31	1040	36	10,0%	0,39%
6 a 8	500	0°	1505	15	1534	18	8,6%	0,39%
11 a 15	500	90°	1482	14	1515	13	8,2%	0,09%
16 a 20	550	0°	1744	68	1818	36	7,1%	0,35%
21 a 23	550	90°	1786	41	1835	15	7,5%	0,25%

Comparando os resultados obtidos nos ensaios com os valores fornecidos pela fabricante NLMK na tabela 4, é possível perceber algumas diferenças. De acordo com a fabricante desse material, o Quard 450 possui limite de escoamento de 1250 MPa e tensão máxima de 1400 MPa e alongamento de 10%. Esses valores diferem dos resultados práticos conforme observado na tabela acima, na qual esse material obteve na média a tensão de escoamento de 980 MPa, tensão máxima de 1040 MPa. Já o

alongamento foi o único parâmetro cujo resultado prático foi igual ao indicado no catálogo.

Já nos ensaios do material Quard 500, o limite de escoamento médio foi de 1505 e 1482 MPa, aproximando-se do valor de 1500 MPa fornecido pela fabricante. Porém a média da tensão máxima encontrada para esse material (Quard 500), nos ensaios práticos, foi de 1534 e 1515 MPa, diferente do valor de 1700 MPa fornecido pela fabricante. Por fim, a deformação [%] média foi de 8% nos CP's: mesmo valor indicado pelo fabricante do material.

Por último, comparando os resultados obtidos nos ensaios do Quard 550, os resultados práticos foram maiores que os valores fornecidos pelo fabricante em relação à tensão de escoamento e à tensão máxima, sendo, na prática, os valores médios para a tensão de escoamento de 1744 e 1786 para os sentido de laminação 0° e 90° respectivamente, maiores do que o valor de 1575 MPa informado pela fabricante. Já os valores médios da tensão máxima encontrados na prática foi de 1818 e 1835 MPa para os sentido de laminação 0° e 90° respectivamente, enquanto o valor informado no catálogo é de 1750. Nesse caso, os valores dos ensaios se aproximaram com os informados pelo fabricante. O alongamento médio foi de 7%, igualando-se ao valor indicado na tabela 4.

A falta do extensômetro pode justificar a diferença encontrada experimentalmente com os resultados fornecidos pela fabricante da linha Quard, uma vez que o fator de correção utilizado não possui a precisão de um extensômetro.

3.2.1 Verificação da Dureza Brinell

Foram analisadas as durezas dos materiais utilizados neste trabalho, a fim de verificar se estão de acordo com a especificação do fabricante, visto que a linha de aços Quard é classificada de acordo com sua dureza Brinell. O teste de dureza foi realizado através do durômetro (figura 30, (a)) *VEB Werkstoffprüfmaschinen* Presente no laboratório de ensaios da UNISINOS. A carga aplicada foi de 187,55 kgf, utilizando uma esfera de metal duro (tungstênio) com Ø2,5 mm (figura 30, (b)) própria para durezas superiores a 350 HB.

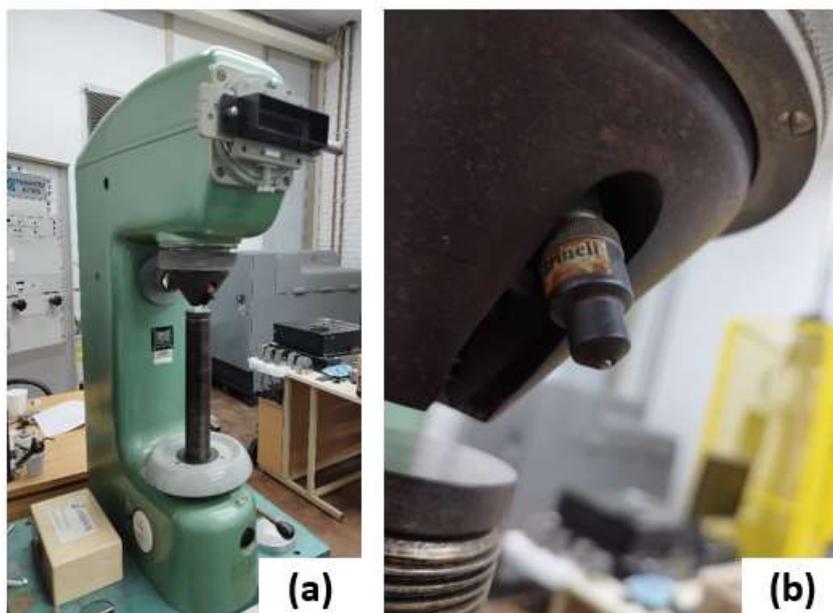


Figura 30 – a) Durômetro *VEB Werkstoffprüfmaschinen*; b) esfera de tungstênio.

Após a impressão com auxílio do próprio microscópio contido no durômetro, foi possível medir (figura 31) o diâmetro das calotas em cada amostra testada. E com o auxílio da tabela de valores de dureza Brinell, segundo a NBR 6394/80, encontrada a dureza para cada um dos corpos de prova analisados.



Figura 31 – Medição da calota com auxílio do microscópio.

Para cada lote de material recebido, foi realizado o teste de dureza em 3 corpos de provas diferentes. Em cada CP, foram realizadas 3 medições. A tabela 10 apresenta os valores encontrados para cada diâmetro medido e a dureza correspondente, assim como a média para cada corpo de prova e, por fim, a dureza média para cada material analisado.

Tabela 10 – Resultados médios para dureza de cada material.

CP	Material (aço Quard)	Medição 1 (Ø) [mm]	Dureza 1 [HB]	Medição 2 (Ø) [mm]	Dureza 2 [HB]	Medição 3 (Ø) [mm]	Dureza 3 [HB]	Dureza média por CP [HB]	Dureza média por material [HB]
1	450	0,70	477	0,70	477	0,71	473,9	476	476
2	450	0,71	473,9	0,70	477	0,70	477	476	
3	450	0,71	473,9	0,70	477	0,70	477	476	
4	500	0,66	538,4	0,66	538,4	0,67	522,2	533	529
5	500	0,67	522,2	0,67	522,2	0,67	522,2	522	
6	500	0,66	538,4	0,67	522,2	0,66	538,4	533	
7	550	0,64	573,3	0,64	573,3	0,64	573,3	573	575
8	550	0,64	573,3	0,64	573,3	0,64	573,3	573	
9	550	0,64	573,3	0,63	591,9	0,64	573,3	580	

Os resultados médios encontrados para dureza Brinell indicam que os materiais recebidos estão conforme a especificação do fabricante, a qual indica uma tolerância de +/- 30HB para a linha Quard.

3.3 PROCESSO DE DOBRAMENTO EM V

Para cada classe de dureza do aço Quard conformado, foram escolhidos 3 raios de punções. O dimensionamento desses raios foi obtido através das equações sugeridas no tópico 2.4.1, cujos resultados podem ser observados na tabela 11.

Tabela 11 – Resultado do R_{min} para as equações apresentadas no tópico 2.4.1.

Material	Equação 7 Dieter (1981) (Rmin) [mm]	Equação 9 Tschätsch, (1997) (Rmin) [mm]	Equação 10 Palmeira (2005) (Rmin) [mm]	Equação NLMK (tabela 5) (Rmin) [mm]
Quard 450	4	845	202	32
Quard 500	7	550	227	36
Quard 550	9	464	160	40

De acordo com os resultados obtidos na tabela acima, é notório que as equações para dimensionamento do raio mínimo divergem umas das outras, com grande diferença entre elas. A equação 7, por utilizar variáveis com grandezas pequenas, como a redução de área (q), obteve os menores resultados para raio mínimo de dobra. Já na equação 9 o autor indica variáveis com grandezas muito elevadas, como, por exemplo, o módulo de elasticidade (E) multiplicado pela espessura da chapa, que, quando dividido pela tensão de escoamento (R_e) e multiplicado por dois, obtém-se resultados elevados para raio mínimo de dobra.

Por fim, a equação 10 utiliza um fator de multiplicação muito alto (50), o que ocasiona em um aumento muito expressivo no valor, pois este fator quando multiplicado pela espessura da chapa, por sua vez, tem um valor alto (8mm) e dividido pelo alongamento do material, sendo que a linha de aços Quard possui um baixo alongamento devido sua à elevada dureza. Sendo assim, os resultados encontrados pela equação 10, foram considerados altos para que fossem utilizados neste trabalho como raio do punção. Assim optou-se por utilizar a indicação sugerida pela fabricante do aço de alta resistência à abrasão (Quard), na qual a NLMK sugere de acordo com a tabela 5, os raios de 32, 36 e 40 mm para os aços Quard 450, 500 e 550 respectivamente.

Para cada dureza do material conformado, foram utilizados 3 raios diferentes de punções, conforme observado na figura 32. Para o Quard 450 foram utilizados os punções com raio de 30, 32 e 34 mm, já para o Quard 500 os raios de 34, 36 e 38 mm e, finalmente, para o Quard 550 os raios de 38, 40 e 42 mm. Os punções foram projetados e confeccionados para este trabalho, assim como a matriz com abertura de 115 mm e ângulo de 90°. Todas as ferramentas foram projetadas no *software Solidworks* e fabricadas pela empresa Demore, localizada em Caxias do Sul – RS. A empresa Ciber Equipamentos Rodoviários, localizada em Porto Alegre – RS, foi quem financiou os custos de todo o ferramental utilizado neste trabalho.

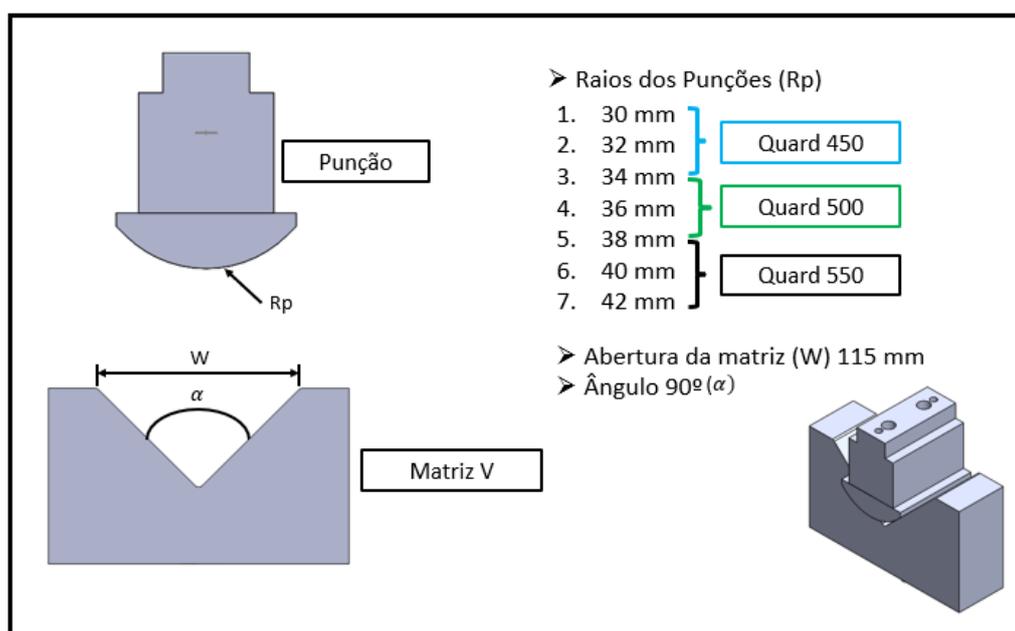


Figura 32 – Ferramentas desenvolvidas para realizar os ensaios de dobramento.

Este trabalho tem o intuito de avaliar o dobramento do aço Quard com três diferentes durezas (450, 500 e 550), sendo para o Quard 450 avaliado apenas o sentido transversal (90°). Não foi possível realizar os ensaios para o Quard 450 com laminação 0° devido à falta de material. Já para os aços Quard 500 e 550 serão analisados os dois sentidos de laminação (0° e 90°). Todos os ensaios foram realizados com a velocidade de 1 mm/s conforme indicado na ABNT NBR ISO 7438. O ferramental (punções e matriz V) foram fixadas (figura 33 (a)) na máquina universal de ensaios MTS Landmark, com capacidade máxima de 250kN, presente no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UNISINOS. A matriz foi marcada com caneta permanente (figura 33 (b)) de modo que ajudasse a deixar as amostras centralizadas e sempre na mesma posição.

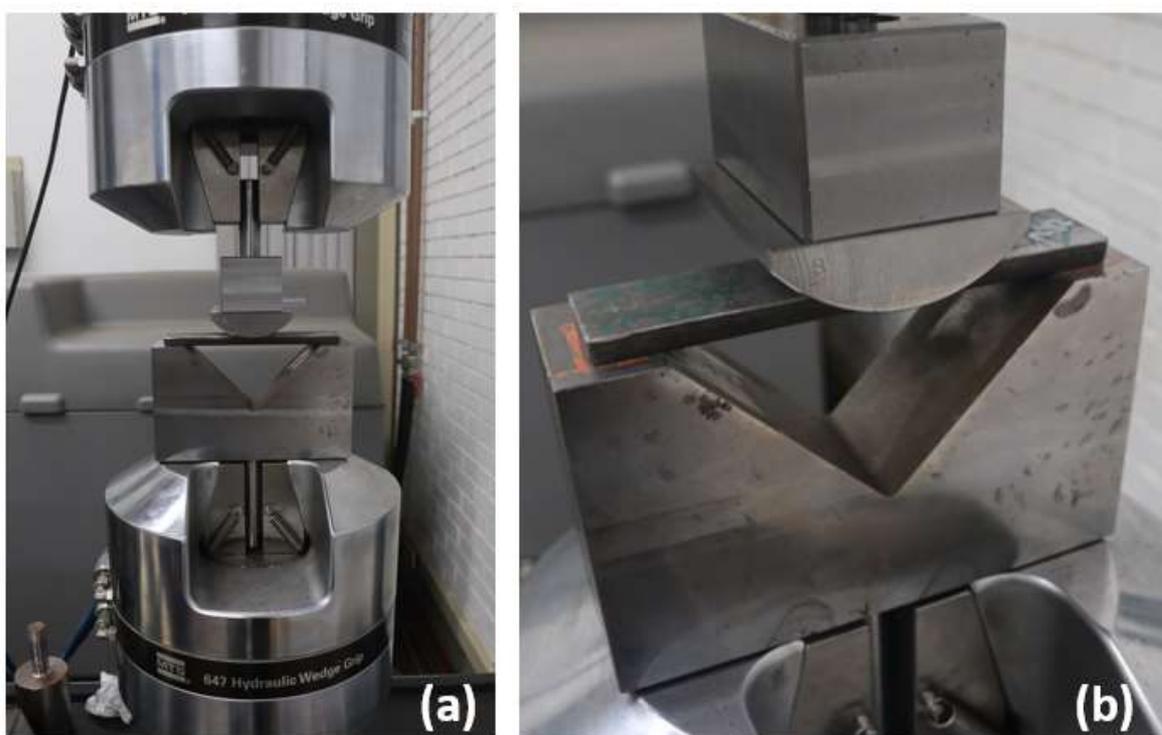


Figura 33 – a) Ferramental; b) marcação para posicionamento das peças.

A tabela 12 indica com mais detalhes a quantidade de amostras para cada parâmetro utilizado. Com intuito de facilitar a discussão dos resultados, foram criados grupos, onde se encontram os CP com mesmo parâmetro. Todas as peças foram identificadas com sua dureza, sentido de laminação, número do CP e raio do Punção (R_p) conforme mostrado na figura 34. Ao todo, foram dobradas 75 Corpos de prova (CP's).

Tabela 12 – Número de corpos de prova para cada raio de dobra, dureza e sentido de laminação.

Grupo	CP		Dureza [HB]	Laminação [°]	Raio do punção (Rp) [mm]
1	1	a 5	450	90	30
2	6	a 10	450	90	32
3	11	a 15	450	90	34
4	16	a 20	500	0	34
5	21	a 25	500	0	36
6	26	a 30	500	0	38
7	31	a 35	500	90	34
8	36	a 40	500	90	36
9	41	a 45	500	90	38
10	46	a 50	550	0	38
11	51	a 55	550	0	40
12	56	a 60	550	0	42
13	61	a 65	550	90	38
14	66	a 70	550	90	40
15	71	a 75	550	90	42



Figura 34 – Identificação dos corpos de prova de dobramento.

Finalizados todos os ensaios de dobramento, cada peça foi analisada individualmente. Primeiramente, foi verificado se não houve a ocorrência de trincas superficiais observadas a olho nu e posteriormente foi analisado o retorno elástico de cada CP.

3.3.1 Avaliação do Retorno Elástico

Todas as peças dobradas tiveram seu ângulo final medido através da tridimensional óptica Starrett AV300+ (figura 35 (a)) presente no Laboratório de Metrologia da Unisinos. Para encontrar o ângulo final do dobramento, o equipamento necessita que sejam selecionados dois pontos em cada aba do Corpo de prova. A partir desses pontos, o projetor traça duas linhas retas (figura 35 (b)) para calcular o ângulo no *display* do equipamento em graus decimais. Dessa forma, foi possível identificar qual das durezas da linha Quard obteve o menor retorno elástico, assim como a influência do raio de dobra e do sentido de laminação no efeito mola.

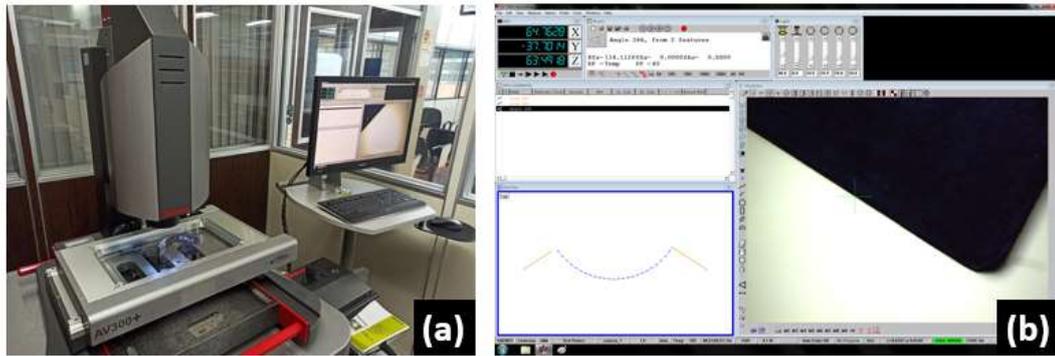


Figura 35 – a) tridimensional óptica. b) procedimento para medir o ângulo.

Encontrado o ângulo final para cada CP sendo, então, calculado o retorno elástico para todas as peças dobradas. Posteriormente, foi realizada a média do retorno elástico para cada grupo. Importante lembrar que os corpos de prova tiveram o punção imediatamente recuados quando o dobramento chegou ao final.

Com auxílio da equação 16, foi calculado o fator de retorno elástico (K) com os valores coletados do ângulo final (α_f) e inicial (α_i). Complementando o estudo sobre o efeito mola, também foram analisados os resultados encontrados via simulação numérica. Para isso, precisou-se salvar a geometria da peça (figura 36 (a)) conformada no *simufact*. Logo após, ela foi exportada para o formato slt. (figura 36 (b)) para que a mesma fosse aberta no *software* SolidWorks (figura 36 (c)). Dessa forma, foi possível cotar o ângulo final (figura 36 (d)) de dobramento.

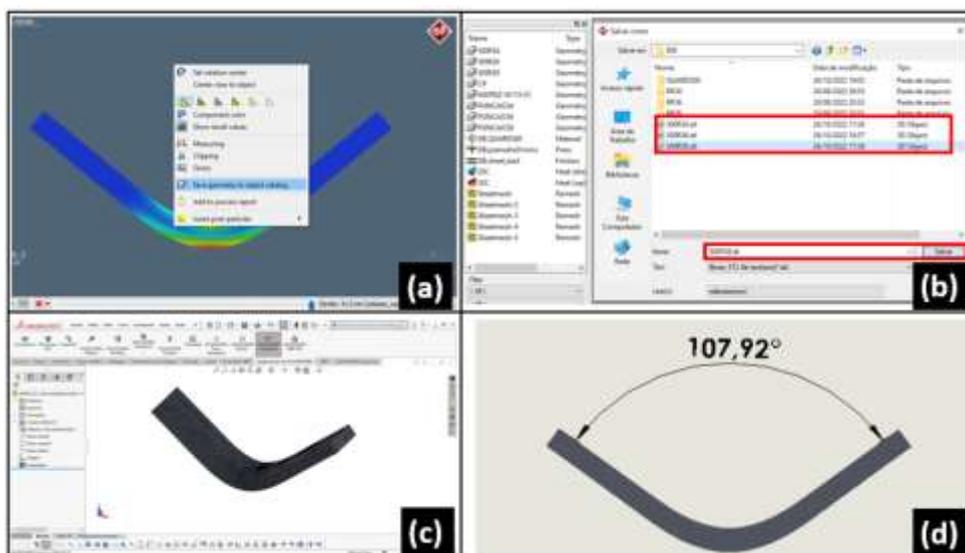


Figura 36 – a) modelo final da simulação. b) exportação do modelo no *simufact*®. c) importação do modelo para *SolidWorks*®. d) ângulo final da simulação.

3.3.2 Avaliação da Força de Dobramento

A análise da força de dobramento foi realizada em 4 etapas. Primeiramente, foi analisado o esforço de dobra. Com os dados coletados pela máquina de ensaio universal (figura 25), foi criada a curva força x deslocamento (figura 37) para todas as 75 amostras. Com isso, foi, então, encontrada a força máxima de dobramento para cada um dos corpos de prova.

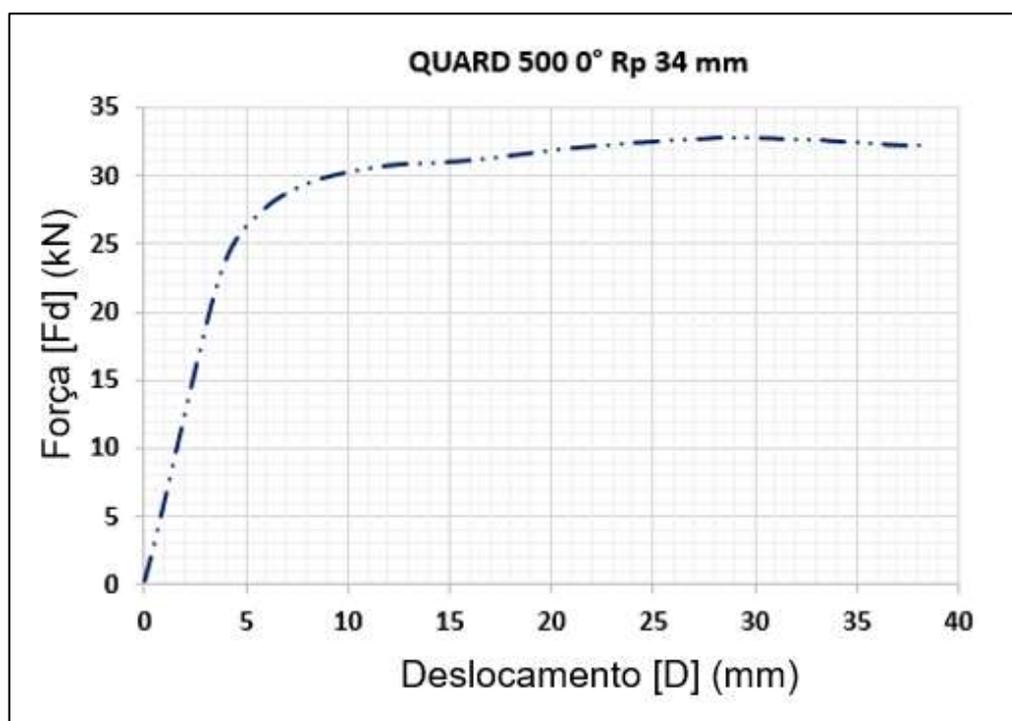


Figura 37 – Curva força x deslocamento a partir dos ensaios práticos.

Na segunda etapa, foram analisados os resultados das simulações. Com auxílio do *software*, foi possível exportar os resultados de força de dobramento do *simufact*, conforme mostrado na figura 38, e então, construir a curva força x deslocamento (figura 39) e, posteriormente, analisar qual o maior esforço de dobra para cada material e raio utilizado na simulação numérica.

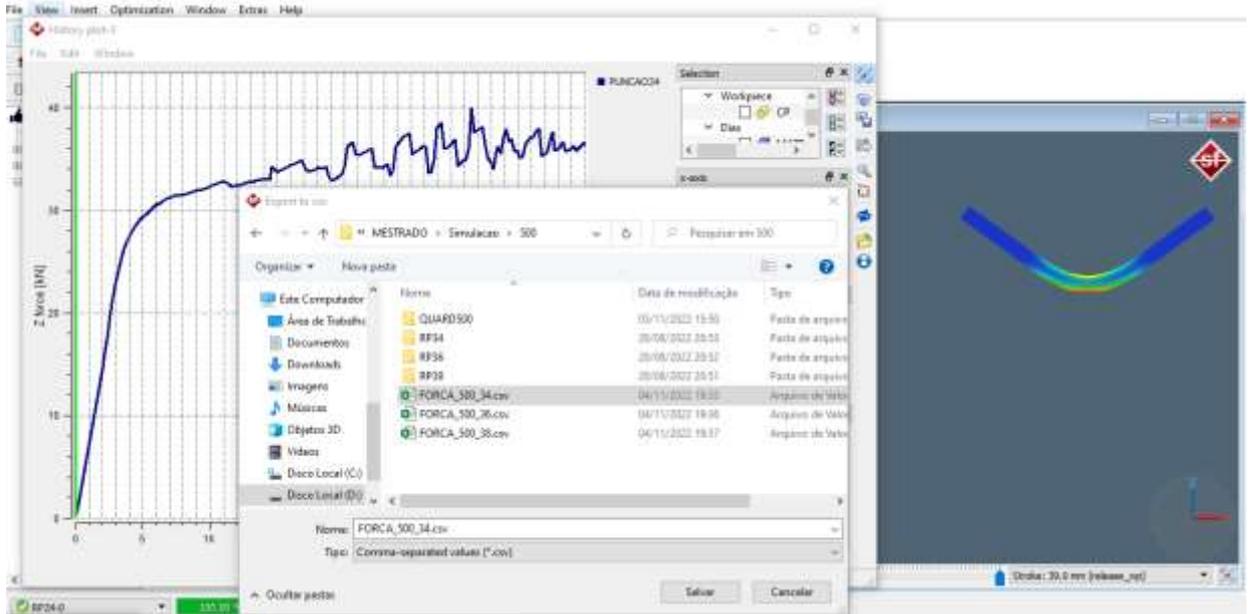


Figura 38 – Dados de força exportados do *simufact*®.



Figura 39 – Curva força x deslocamento Simulada

Logo após, estimou-se a força de dobramento máxima para cada uma das equações indicadas no tópico 2.3.2. Por último, esses resultados foram comparados com os valores reais médios obtidos pelos resultados encontrados durante os ensaios práticos, bem como os resultados oriundos das simulações realizadas. Comparando os resultados teóricos e práticos, foi possível determinar qual equação mais se aproximou dos resultados práticos e, então, descobrir qual delas pode ser utilizada

para prever a força de dobramento desses materiais (Quard 450, 500 e 550). Do mesmo modo, foi possível determinar se a simulação numérica consegue estimar a força de dobramento para esse tipo de aço.

3.3.3 Avaliação da Deformação nas Fibras Externas

Para avaliar a deformação relativa e verdadeira nas fibras externas, foram gravadas grades circulares nas superfícies das amostras, com as grades possuindo círculos com diâmetro de 2,5 mm. A gravação foi realizada pelo processo eletrolítico (figura 41) nos 75 corpos de prova, para que fosse analisada a deformação nas fibras externas. Para que a gravação fosse realizada de forma que as grades ficassem “legíveis”, foi necessário lixar anteriormente todos os corpos de prova, conforme pode ser observado na figura 40.



Figura 40 – Preparação dos corpos de prova.



Figura 41 – a) Gravação da grade no corpo de prova; b) Corpo de prova gravado.

Com todas as amostras gravadas e finalizado o dobramento, iniciou-se a averiguação (figura 42 (a)) das deformações relativas e verdadeiras para cada CP com auxílio da régua (figura 42 (b)). Todas as medidas foram realizadas no centro das fibras externas. Não foram averiguadas as deformações nas bordas, pois devido à presença de “cantos vivos” nessa região, pode haver acúmulo de tensão. Logo após foi calculada a média para cada um dos grupos determinados.

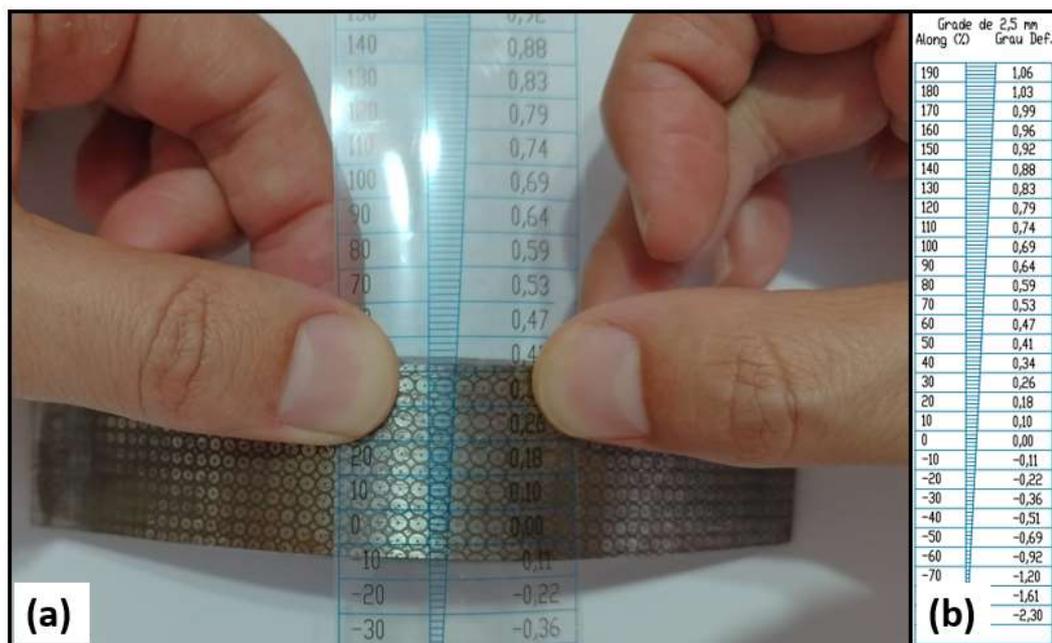


Figura 42 – (a) Averiguação da deformação (b) Grade para verificar a deformação.

Também foram calculadas as deformações verdadeiras através da equação 20 e equação 21 com intuito de compará-las com os resultados encontrados no dobramento. Da mesma forma, foram coletadas as deformações obtidas pelo *simufact* (figura 43) para que fosse possível analisar se a simulação numérica pode prever tais deformações.

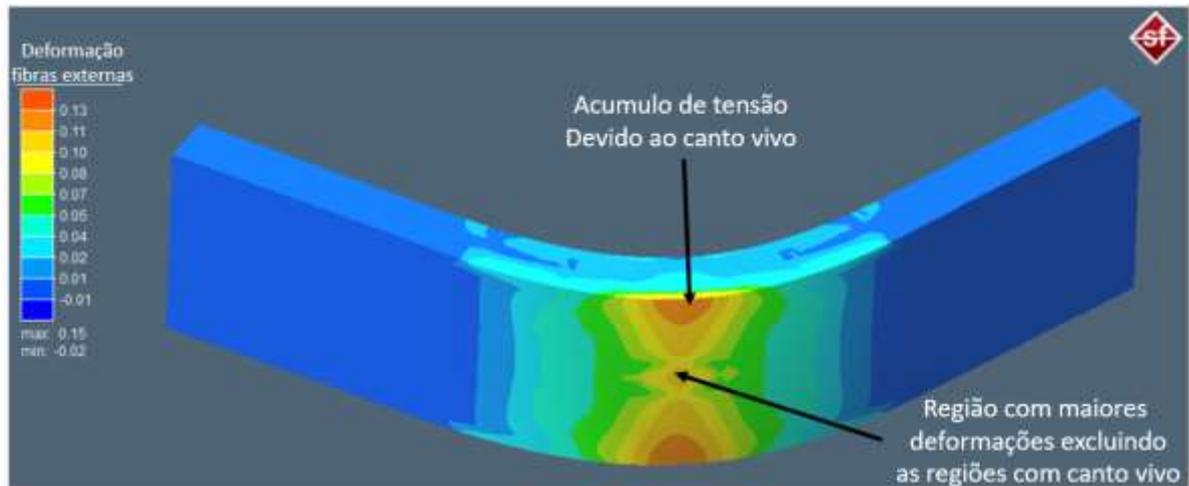


Figura 43 – Deformação nas fibras externas via simulação.

4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste trabalho, optou-se por utilizar o *software Simufact Forming 15*[®] fornecido pela empresa *Msc Software Company*, subsidiária do grupo Hexagon. As simulações (figura 44) foram realizadas nas dependências da UFRGS. A Matriz V utilizada na simulação, os punções e o corpo de prova foram modelados no *Soliworks* e, posteriormente, importadas para o *Simufact* no formato *stl*. Durante a simulação, a chapa foi considerada como objeto elastoplástico, em contrapartida o ferramental (matriz V e punções) foi considerado rígido (não deformável).

A escolha da malha foi feita de acordo com o manual do *software Simufact Forming 15*[®], no qual é aconselhado o uso do gerador de malha *Sheetmesh* para simulações de dobramento. Esse gerador cria elementos de malha quadrados e sólidos. De acordo com a geometria da peça, podem assumir o formato hexaédrico, evitando a sobreposição dos elementos de malha, além de fornecer uma distribuição mais eficiente.

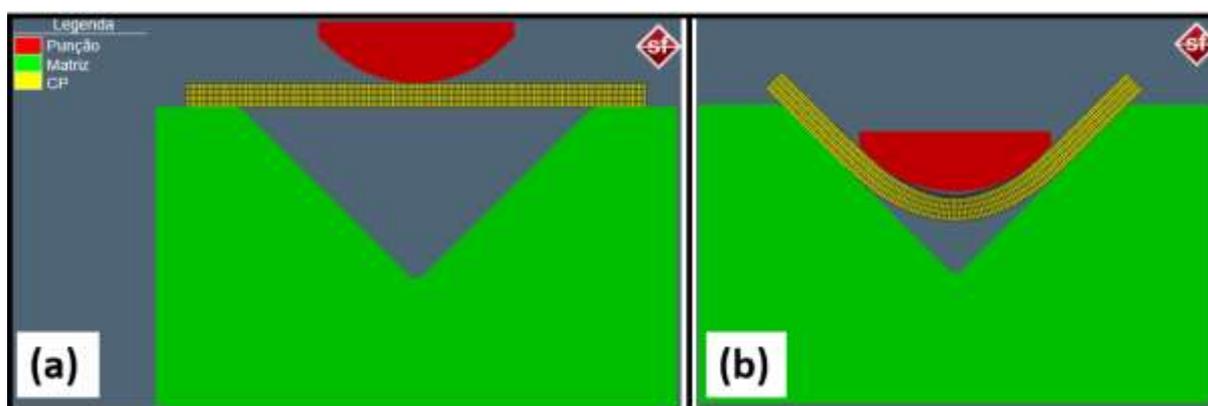


Figura 44 – a) posição inicial do punção; b) posição final do punção.

Por se tratar de uma linha de aço relativamente nova, os aços Quard 450, 500 e 550 precisaram ser adicionados manualmente na biblioteca do *software*. Para isso, foram utilizadas as informações recolhidas através do ensaio de tração. A tabela 13 indica os parâmetros que foram inseridos no *simufact* para cada um dos materiais. Em todas as simulações realizadas, foi considerado um material isotrópico.

Tabela 13 – Dados de entrada para os aços Quard 450, 500 e 550.

Dados de entrada	QUARD 450	QUARD 500	QUARD 550
Raio do Punção (Rp) [mm]	30, 32 e 34	34, 36 e 38	38, 40 e 42
Coefficiente de atrito [-]	0,1	0,1	0,1
Coefficiente de Poisson, ν [-]	0,3	0,3	0,3
Coefficiente de resistência, C [MPa]	2370	3917	5752
Densidade, ρ [kg/m]	7860	7860	78760
Espessura da chapa (S0) [mm]	8	8	8
Índice de Encruamento (n) [-]	0,25	0,29	0,36
Límite de escoamento, Re [MPa]	980	1493	1765
Material dos ferramentais	SAE 1045	SAE 1045	SAE 1045
Módulo de Elasticidade, E [GPa]	210	210	210
Número de elementos [mm]	18000	18000	1800
Tamanho de elementos [mm]	1	1	1
Temperatura de trabalho da ferramenta [°C]	20	20	20
Temperatura de trabalho da peça [°C]	20	20	20

Finalizada a simulação, os resultados encontrados foram descritos ao decorrer do capítulo 5 e, posteriormente, comentados e comparados com os resultados práticos no capítulo 6. Os requisitos avaliados foram: retorno elástico, força de dobramento e deformação nas fibras externas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e discussões para os ensaios experimentais, comparando esses valores com os encontrados através das equações que foram analisadas. Do mesmo modo, serão comparados os valores obtidos via simulação numérica com os encontrados através dos experimentos práticos.

Finalizado o dobramento, foi, então, observado se algum corpo de prova apresentou alguma fissura que pudesse ser vista a olho nu. Conforme evidenciado na figura 45, não foram percebidas trincas nas fibras externas, tampouco nas fibras internas. Feita essa análise, iniciou-se a verificação dos demais parâmetros como: retorno elástico, força de dobramento e deformação nas fibras externas, conforme será mostrado a seguir.

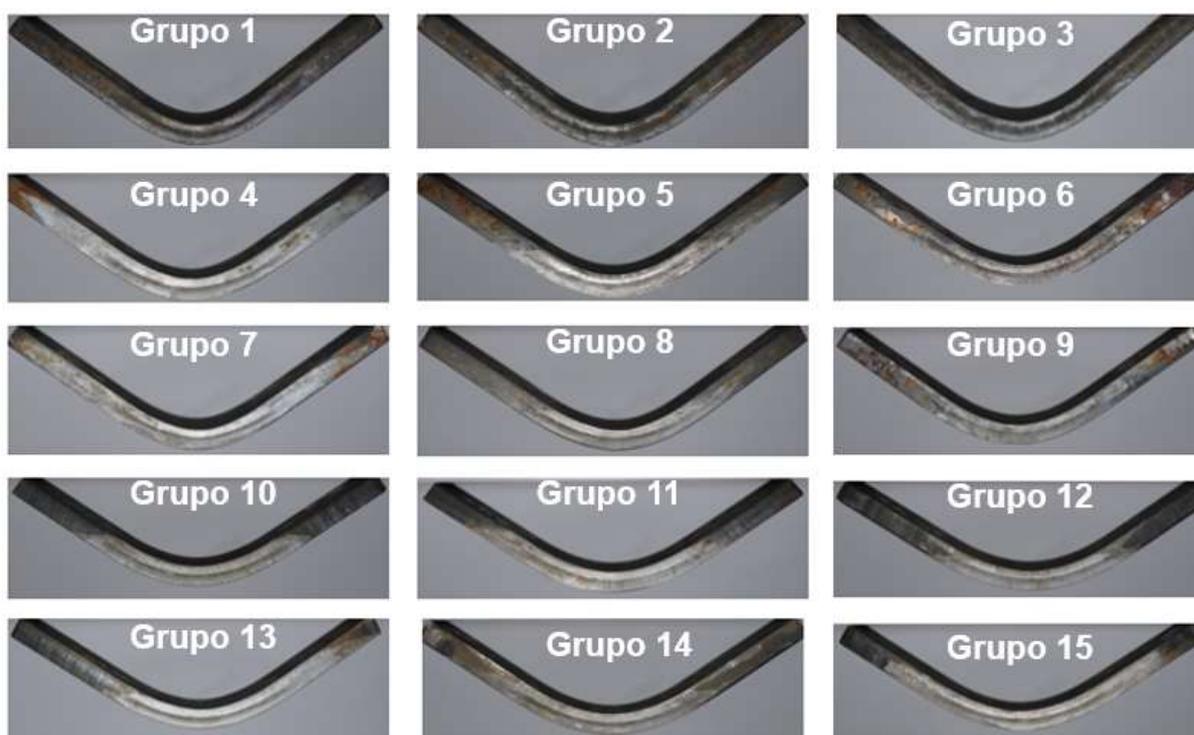


Figura 45 – Corpos de prova após o dobramento.

5.1 RETORNO ELÁSTICO

Após realizar a medição de todos os CP's, referente ao retorno elástico, os resultados foram tabelados, conforme descrito no tópico 3.3.1 para que fossem melhor

analisados. A tabela 14 apresenta os resultados médios para cada grupo de amostras bem como o valor K médio.

Tabela 14 – Retorno elástico médio para cada grupo.

RETORNO ELÁSTICO PARA ENSAIOS REALIZADOS									
Grupo	CP	Dureza [HB]	Sentido de Laminação [°]	Rp [mm]	Retorno elástico [°]	Desvio padrão Retorno elástico [°]	Constante k equação 16 [-]		
1	1 a 5	450	90	30	11,3	0,28	0,87		
2	6 a 10	450	90	32	12,6	0,38	0,86		
3	11 a 15	450	90	34	13,7	0,60	0,85		
4	16 a 20	500	0	34	20,4	0,54	0,77		
5	21 a 25	500	0	36	20,5	0,06	0,77		
6	26 a 30	500	0	38	20,6	0,10	0,77		
7	31 a 35	500	90	34	19,9	0,14	0,78		
8	36 a 40	500	90	36	20,4	0,20	0,77		
9	41 a 45	500	90	38	20,7	0,43	0,77		
10	46 a 50	550	0	38	22,9	0,17	0,75		
11	51 a 55	550	0	40	23,0	0,47	0,74		
12	56 a 60	550	0	42	23,8	0,45	0,74		
13	61 a 65	550	90	38	22,6	0,12	0,75		
14	66 a 70	550	90	40	23,0	0,18	0,74		
15	71 a 75	550	90	42	24,0	0,23	0,73		

Com auxílio da tabela 14, pode-se verificar a influência do raio de dobra com o retorno elástico. O efeito mola aumenta de 11,3° no grupo 1 para 13,7° no grupo 3, conforme o raio do punção aumenta de 30 para 34 mm. Já do grupo 4 ao grupo 15, há um incremento próximo de 1° no efeito mola, à medida que o raio de punção aumenta de 34 para 38 mm no aço Quard 500 e de 38 a 42 mm para o Quard 550.

É possível analisar com mais detalhes a influência da dureza do material com o efeito mola através da tabela 15, comparando o grupo 3 (Quard 450) com o grupo 7 (Quard 500). Nesses dois casos, todas as amostras foram dobradas no mesmo sentido de laminação (90°) e com mesmo raio de punção (34 mm) mudando apenas a dureza. Sendo assim, as peças do grupo 3 obtiveram um ângulo de retorno elástico médio de 13,7° enquanto para o grupo 7 foi detectado um ângulo de retorno elástico médio de 19,9°. O mesmo é possível observar quando comparado o grupo 6 (Quard 500) com o grupo 10 (Quard 550). Em ambos os grupos as amostras possuem sentido de laminação longitudinal (0°) e mesmo raio de punção. Nesse caso, o grupo 10 obteve o ângulo de retorno em torno de 2° maior em comparação ao grupo 6. A mesma diferença próxima de 2° foi encontrada entre os grupos 9 (Quard 500) e 13 (Quard

550). Também fica nítida a influência da dureza, pois, de modo geral, o Quard 550 apresentou um efeito mola maior que o Quard 500, quando conformado com mesmo sentido de laminação e raio.

Tabela 15 – Influência da dureza do material com retorno elástico.

Rp [mm]	Grupo [-]	Dureza [HB]	Sentido de Laminação [°]	Retorno elástico [°]	Constante k equação 16 [-]
34	3	450	90	13,7	0,85
34	7	500	90	19,9	0,78
38	6	500	0	20,6	0,77
38	10	550	0	22,9	0,75
38	9	500	90	20,7	0,77
38	13	550	90	22,6	0,75

Quando analisada a influência do sentido de laminação (tabela 16) para as peças dobradas com o Quard 500 a 0° e a 90° com mesmo raio de dobra (raio de punção), não foi notada nenhuma grande diferença no retorno elástico. Pelo contrário: o efeito mola se manteve praticamente o mesmo em todos os casos.

Tabela 16 – Influência do sentido de laminação com retorno elástico.

Rp [mm]	Grupo [-]	Dureza [HB]	Sentido de Laminação [°]	Retorno elástico [°]	Constante k equação 16 [-]
34	4	500	0	19,9	0,78
34	7	500	90	19,9	0,78
36	5	500	0	20,5	0,77
36	8	500	90	20,4	0,77
38	6	500	0	20,6	0,77
38	9	500	90	20,7	0,77
38	10	550	0	22,9	0,75
38	13	550	90	22,6	0,75
40	11	550	0	23,0	0,74
40	14	550	90	23,0	0,74
42	12	550	0	23,8	0,74
42	15	550	90	24,0	0,73

Do mesmo modo, para o Quard 550 não foi evidenciada nenhuma diferença para o retorno elástico em relação ao sentido de laminação, pois, conforme visto na tabela 16, os grupos que foram dobrados com mesmo raio de punção obtiveram resultados semelhantes para o retorno elástico, independente do sentido de laminação.

Pode-se observar, com o auxílio da figura 46, que, quanto maior a dureza do material e o raio do punção, maior será a tendência de se ter um retorno elástico mais elevado ao final do dobramento. Os resultados experimentais confirmam o que a literatura relata sobre o retorno elástico. Conforme já dito no tópico 2.4.3, quanto maior o raio de dobra e a resistência do material, maior poderá ser o efeito mola encontrado.

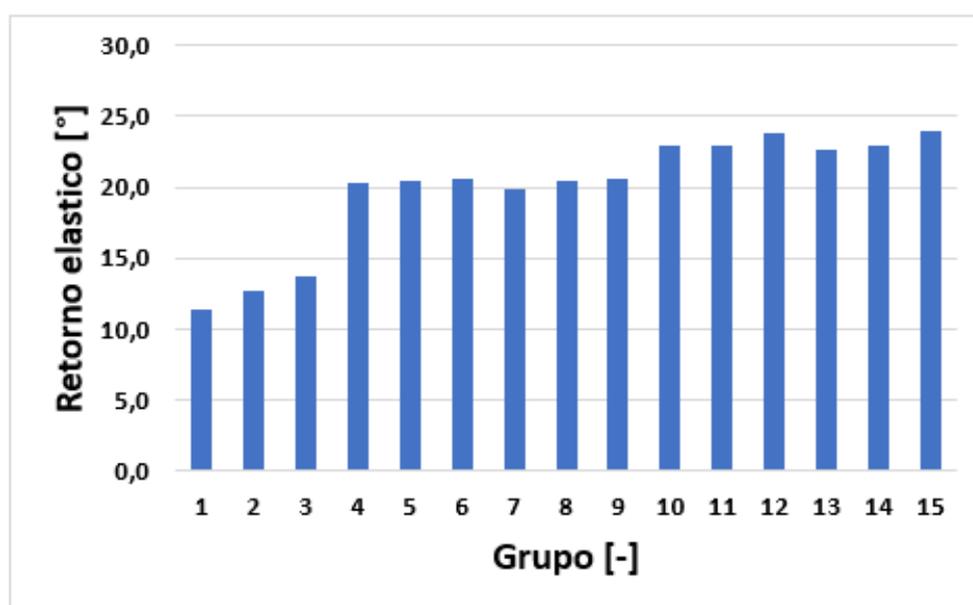


Figura 46 – Gráfico retorno elástico (grupo x retorno elástico [°])

Os resultados obtidos mostram que o valor do efeito mola indicado pela fabricante na tabela 4 não confere com os valores encontrados neste estudo para os aços Quard 500 e 550, pois os resultados evidenciados na tabela 14 apresentam valores maiores do indicado pelo fabricante. Apenas o efeito mola encontrado no Quard 450 se aproximou dos valores indicados pelo fabricante.

Um dos fatores que podem ter influenciado nessa diferença é o fato de que a dureza medida está acima da dureza nominal desses materiais, conforme mostrado no tópico 3.2. Mesmo estando dentro da tolerância de +/-30 HB, esse incremento da dureza pode ser o motivo da diferença encontrada no retorno elástico experimental

para o informado pelo fabricante. Além desse fator, outro motivo que pode justificar a diferença encontrada é a abertura e o tipo de matriz utilizada, uma vez, que neste trabalho, se optou por utilizar a mesma abertura em todos os materiais testados, enquanto o fabricante indica uma abertura (W) diferente para cada linha de aço Quard. Já modelo da matriz escolhida foi do tipo V, visto que o catálogo do fabricante não indica qual tipo de matriz foi utilizado.

Os valores referentes à simulação numérica também foram tabelados conforme observado na tabela 17, na qual é possível verificar o ângulo de retorno elástico para cada material analisado, de acordo com o raio de punção utilizado. A tabela indica o fator K encontrado via simulação para que, posteriormente, possa ser comparado com os valores experimentais. É possível perceber que, a exemplo dos resultados práticos, a simulação indica um aumento do retorno elástico à medida que a dureza do material aumenta, também semelhante ao resultado prático a um pequeno incremento quando o raio de dobra é aumentado.

Tabela 17 – Retorno elástico obtido pela simulação computacional.

Dureza [HB]	Rp [mm]	Retorno elástico [°]	Constante k equação 16 [-]
450	30	10	0,90
450	32	11	0,89
450	34	12	0,88
500	34	18	0,83
500	36	18	0,83
500	38	19	0,83
550	38	22	0,80
550	40	23	0,80
550	42	23	0,79

Quando comparados os resultados práticos (tabela 14) com os resultados da simulação (tabela 17), nota-se que a simulação numérica se aproximou dos valores obtidos na prática. Para o Quard 450, a maior diferença foi em torno de 2° para os raios de 32 e 34 mm sendo o efeito mola da simulação menor do que o encontrado

nos ensaios. Já para o Quard 500, quando comparados os resultados práticos com o *simufact*, é possível notar que a diferença também se aproximou de 2°, semelhante aos resultados para o Quard 450. Essa diferença diminui ainda mais quando são comparados os resultados práticos do Quard 550 com os valores da simulação para este mesmo material. Nesse caso a diferença foi de apenas 1° conforme observado na figura 47.



Figura 47 – Gráfico retorno elástico experimental x simulado [°].

5.2 FORÇA DE DOBRAMENTO

De acordo com os resultados apresentados na tabela 18, é possível verificar que, à medida que o raio de punção (R_p) aumenta, do mesmo modo a força de dobramento se eleva, ou seja, quanto maior a área de contato do punção com o corpo de prova, maior será o esforço de dobramento. A figura 48 ajuda a compreender esse fato tomando como exemplo os raios de punção 34 e 38 mm (utilizados para o Quard 500), visto que o punção com raio de 38 possui uma largura maior que o de 34, ele se aproxima mais dos apoios da matriz, o que, por sua vez, irá necessitar de uma força maior para poder efetuar o dobramento.

Tabela 18 – Média da força máxima de dobramento para cada grupo.

Grupo	CP	Dureza [HB]	sentido de Laminação [°]	Rp [mm]	Força máxima de dobra [kN]	Desvio padrão Força máxima de dobra [kN]
1	1 a 5	450	90	30	28	0,53
2	6 a 10	450	90	32	28	0,60
3	11 a 15	450	90	34	29	1,55
4	16 a 20	500	0	34	33	2,43
5	21 a 25	500	0	36	35	1,00
6	26 a 30	500	0	38	36	0,91
7	31 a 35	500	90	34	35	0,93
8	36 a 40	500	90	36	36	1,44
9	41 a 45	500	90	38	38	1,86
10	46 a 50	550	0	38	45	2,03
11	51 a 55	550	0	40	50	1,97
12	56 a 60	550	0	42	52	1,44
13	61 a 65	550	90	38	48	1,21
14	66 a 70	550	90	40	51	0,91
15	71 a 75	550	90	42	52	1,49

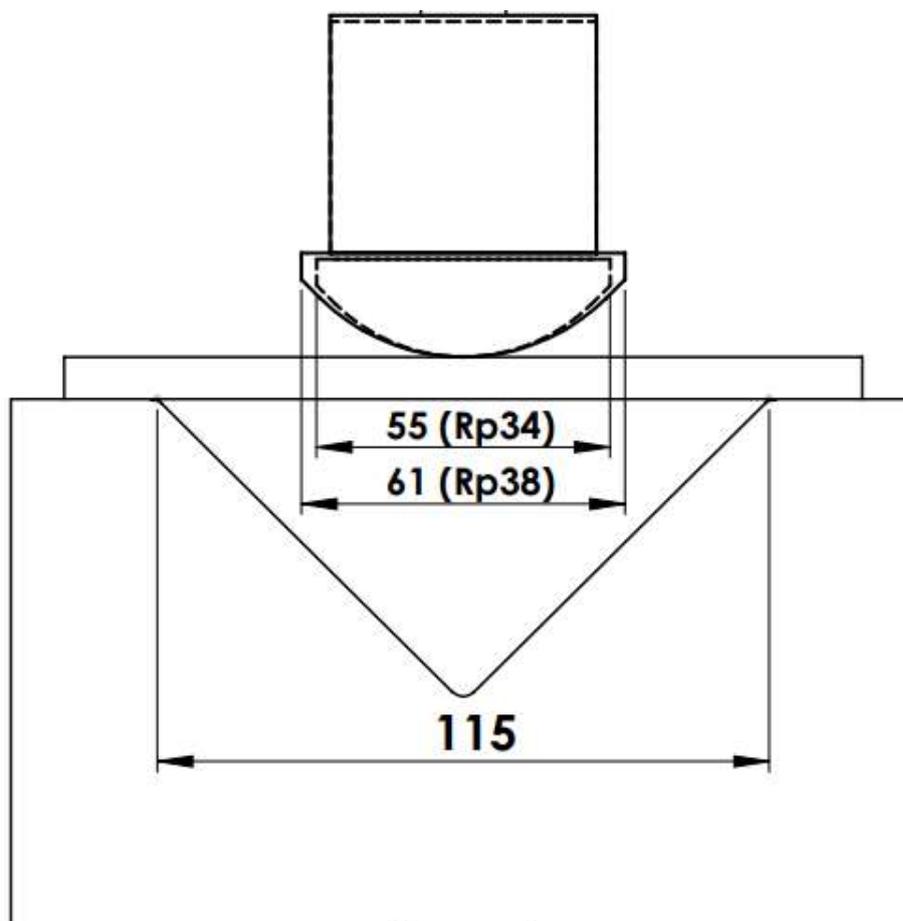


Figura 48 – Relação largura do Rp x abertura da matriz

Em relação ao sentido de laminação, o resultado médio apresentou maior esforço de dobra para as peças dobradas com sentido de laminação 90°. A tabela 19 deixa isso claro, quando observados os resultados para as amostras dobradas com Quard 500: os grupos 7, 8 e 9 apresentaram maior força de dobramento quando comparados com os grupos 4,5 e 6 respectivamente. O mesmo se observa para os corpos de prova conformados com o Quard 550: os grupos 13 e 14 apresentaram maior esforço de dobra quando comparados com os grupos 10 e 11 respectivamente. Já para os grupos 12 e 15 a força máxima se manteve a mesma, não havendo incremento para o grupo 15 com sentido de laminação 90°.

Tabela 19 – Influência do sentido de laminação para força de dobramento

Rp [mm]	Grupo [-]	Dureza [HB]	Sentido de Laminação [°]	Força máxima de dobra [kN]
34	4	500	0	33
34	7	500	90	35
36	5	500	0	35
36	8	500	90	36
38	6	500	0	36
38	9	500	90	38
38	10	550	0	45
38	13	550	90	48
40	11	550	0	50
40	14	550	90	51
42	12	550	0	52
42	15	550	90	52

A dureza do material se mostrou um fator relevante para o incremento da força de dobramento, como evidenciado na tabela 20. Nesse caso, houve um incremento da força de dobramento para os grupos com maior dureza, mantendo os demais parâmetros, como raio de dobra e sentido de laminação iguais.

Tabela 20 – Influência da dureza do material para força de dobramento

Rp [mm]	Grupo [-]	Dureza [HB]	sentido de Laminação [°]	Força máxima de dobra [kN]
34	3	450	90	29
34	7	500	90	35
38	6	500	0	36
38	10	550	0	45
38	9	500	90	38
38	13	550	90	48

Quando comparados os resultados obtidos via simulação (tabela 21) com os resultados práticos (tabela 18), nota-se que para o Quard 450 a simulação aproximou-se muito dos dados coletados durante o dobramento dos grupos 1,2 e 3, sendo a maior diferença para o raio de punção 30. Nesse caso, a simulação encontrou uma força máxima de 26 kN, e o valor médio para o grupo 1 foi 28 kN, apenas 2 kN de diferença. Para o Quard 500 a simulação em média obteve uma força de dobra máxima maior em 7 kN para as amostras dobradas com laminação longitudinal (0°) (grupos 4,5 e 6). Essa diferença diminui para 5 kN com relação às amostras do Quard 500 conformadas com laminação transversal. Por fim, os dados coletados do *simufact* para o Quard 550 em média tiveram um valor de 5 kN maior em relação às peças de Quard 550 dobradas com laminação 0°. Comparando com as peças dobradas com laminação 90°, essa diferença diminui para 3 kN em média. De modo geral, a simulação se aproximou bem dos resultados práticos, o que mostra que esse *software* pode, sim, ser utilizado como meio de prever a força máxima para, então, selecionar a prensa correta para efetuar o dobramento.

Tabela 21 – Força máxima de dobramento simulado e teórico.

Material	Raio do punção (Rp) [mm]	Simulado [kN]	Equação 11 Dieter (1981) [kN]	Equação 12 Marcos (2007) [kN]	Equação 13 Tschätsch, (1997) [kN]	Equação 14 NLMK [kN]	Equação 15 Kalpakjian (2009) [kN]
Quard 450	30	26	224	35	21	26	17
	32	27	212				
	34	28	201				
Quard 500	34	40	308	51	31	38	26
	36	41	292				
	38	43	279				
Quard 550	38	52	331	61	37	46	31
	40	53	316				
	42	56	302				

Os resultados para as equações 11, 12, 13, 14 e 15 (tabela 21) quando comparados com os valores médios na tabela 18 para os resultados práticos, nota-se que a equação 14 indicada pela fabricante da linha Quard foi a que mais se aproximou dos resultados práticos, tendo para o Quard 450 um resultado de 26 kN enquanto, na prática, a maior força para esse material foi de 29 kN quando utilizado o R_p de 34mm (grupo 3), ou seja, apenas 3 kN menor do que o maior resultado encontrado para tal aço durante o dobramento. Já o Quard 500 obteve para essa equação um valor de 38 kN, o mesmo valor registrado para a maior força encontrada na prática (grupo 9). Por último, a mesma equação apresentou um valor de 46 kN para o Quard 550, enquanto nos ensaios o maior valor observado foi para os grupos 12 e 13 sendo de 52 kN, ou seja, 6 kN menor. De modo geral, pode-se assumir que essa equação pode auxiliar na escolha da prensa para o dobramento deste tipo de material, uma vez que os valores apresentados se aproximaram da realidade.

As demais equações não chegaram tão próximas, porém cabe ressaltar a grande diferença dos resultados encontrados para equação 11 chegando à casa de 200 kN para o Quard 450, próximo dos 300 kN para o Quard 500 e 550. A equação 12 apresentou valores maiores que os observados na prática, sendo para o Quard 450 35 kN contra 29 kN dos testes realizados, indicando 6 kN a mais em relação ao grupo 3, que obteve a maior média para esse material. Do mesmo modo para o Quard 500 e 550, essa equação apresentou 13 e 10 kN a mais respectivamente para os grupos de 9 e 15 dos corpos de prova analisados. A equação 13 apresentou resultados menores dos encontrados nos dobramentos. Para o Quard 450 a equação apresentou 8 kN a menos comparada com o grupo de amostras número 3. No Quard 500, essa diferença foi de 7 kN quando comparado com a força máxima encontrada no grupo 9, essa diferença aumenta ainda mais quando analisado os resultados para o Quard 500, sendo a diferença de 15 kN a menos, uma vez que pela equação, a força máxima foi de 34 kN enquanto, na prática (grupos 12 e 15), a força máxima obtida foi de 52 kN. Por fim, os resultados para a equação 15 foram ainda menores, o que impossibilita o uso dessa equação como meio de prever a força máxima de dobramento para essa linha de aço.

5.3 DEFORMAÇÃO DAS FIBRAS EXTERNAS

Por fim, foi avaliada a deformação nas fibras externas de cada um dos corpos de prova, e, então, realizada a média para cada grupo. Desenvolveu-se a tabela 22, em que são visualizados os valores médios para deformação relativa e verdadeira em cada grupo de amostra analisado. Os resultados para as equações sugeridas no tópico 2.3.4, a deformação máxima encontrada através do *simufact* também podem ser vistas na tabela 25.

Tabela 22 – Deformação verdadeira média para cada grupo.

Grupo	CP	Dureza [HB]	Sentido de laminação [°]	Raio do punção (Rp) [mm]	Deformação relativa (ϵ) [%]	Deformação verdadeira (ϕ_{ext}) [-]	Desvio padrão Deformação verdadeira (ϕ_{ext}) [-]
1	1 a 5	450	90	30	12,80	0,12	0,008
2	6 a 10	450	90	32	12,80	0,12	0,008
3	11 a 15	450	90	34	12,80	0,11	0,008
4	16 a 20	500	0	34	10,80	0,11	0,008
5	21 a 25	500	0	36	10,80	0,11	0,008
6	26 a 30	500	0	38	10,40	0,10	0,006
7	31 a 35	500	90	34	10,80	0,11	0,008
8	36 a 40	500	90	36	10,80	0,11	0,006
9	41 a 45	500	90	38	10,40	0,10	0,006
10	46 a 50	550	0	38	7,60	0,08	0,018
11	51 a 55	550	0	40	7,20	0,07	0,010
12	56 a 60	550	0	42	6,80	0,07	0,010
13	61 a 65	550	90	38	7,60	0,08	0,008
14	66 a 70	550	90	40	7,20	0,07	0,008
15	71 a 75	550	90	42	6,80	0,07	0,010

Observando a tabela 22, fica evidente, à medida que o raio do punção aumenta, a deformação verdadeira diminui, iniciando em 0,12 para o R_p de 30 mm e terminando em 0,07 para o raio de punção de 42 mm. Esses resultados estão de acordo com a literatura, conforme já mencionado no tópico 2.4.4: a deformação do material tende a ser maior no dobramento com raios de dobra menores, podendo ocasionar maior deformação nas fibras externas.

Quando analisado o resultado para deformação verdadeira média ocorrida nos ensaios práticos (tabela 23) em relação ao sentido de laminação, nota-se que não há alteração na deformação quando comparados os grupos com mesmo material e raio de dobra. Para o Quard 500 a deformação encontrada para os raios de punção 34 mm foi de 0,11 para os grupos 4 e 7; do mesmo modo, os grupos 5 e 8, que foram dobrados

com raio de 36 mm, obtiveram a mesma deformação: 0,11. Por fim, os grupos 6 e 9, ambos dobrados com raio de 38 mm, tiveram a deformação média de 0,11. Igualmente ocorreu para o Quard 550. Nesse caso, os grupos 11, 12 e 13 obtiveram os mesmos resultados que os grupos 13, 14 e 15, mostrando não haver influência do sentido de laminação nesse parâmetro analisado.

Tabela 23 – Influência do sentido de laminação para deformação nas fibras externas

Raio do punção (Rp) [mm]	Grupo [-]	Dureza [HB]	Sentido de laminação [°]	Deformação relativa (ϵ) [%]	Deformação verdadeira (ϕ_{ext}) [-]
34	4	500	0	10,80	0,11
34	7	500	90	10,80	0,11
36	5	500	0	10,80	0,11
36	8	500	90	10,80	0,11
38	6	500	0	10,40	0,10
38	9	500	90	10,40	0,10
38	10	550	0	7,60	0,08
38	13	550	90	7,60	0,08
40	11	550	0	7,20	0,07
40	14	550	90	7,20	0,07
42	12	550	0	6,80	0,07
42	15	550	90	6,80	0,07

Quanto à dureza (tabela 24) dos materiais analisados, é difícil afirmar que a deformação nas fibras externas possui uma relação com esse parâmetro, uma vez que o grupo 3 (Quard 450) com raio de dobra 34 mm obteve a mesma deformação (0,11) que o grupo 4 (Quard 500) com mesmo raio de dobra. Porém o mesmo não ocorre quando comparados os grupo 6 e 9 (Quard 500) com os grupos 10 e 13 (Quard 550). Nesses casos, os grupos 10 e 13 apresentaram uma deformação de 0,08, menor que a deformação de 0,10 observada nos grupos 6 e 9.

Tabela 24 – Influência da dureza para deformação nas fibras externas

Raio do punção (Rp) [mm]	Grupo [-]	Dureza [HB]	Sentido de laminação [°]	Deformação relativa (ϵ) [%]	Deformação verdadeira (ϕ_{ext}) [-]
34	3	450	90	12,80	0,11
34	7	500	90	10,80	0,11
38	6	500	0	10,40	0,10
38	10	550	0	7,60	0,08
38	9	500	90	10,40	0,10
38	13	550	90	7,60	0,08

Analisando os resultados para as equações 20 e 21 (tabela 25), nota-se que os resultados de ambas são muito similares e, quando comparados com os resultados práticos (tabela 22), ambas as equações se aproximam muito dos resultados obtidos durante o dobramento, tendo a equação 21 os resultados mais próximos para o Quard 450 e 500. Já a equação 20 apresentou resultados mais próximos para as amostras dobradas com Quard 550.

Tabela 25 – Deformação máxima simulado e teórico.

Material	Raio do punção (Rp)	Equação 20 Schaeffer (2017)	Equação 21 Lange (1990)	Simulado
Quard 450	30	0,11	0,12	0,15
	32	0,11	0,11	0,14
	34	0,10	0,11	0,13
Quard 500	34	0,10	0,11	0,12
	36	0,10	0,10	0,11
	38	0,09	0,10	0,10
Quard 550	38	0,09	0,10	0,10
	40	0,09	0,09	0,10
	42	0,08	0,09	0,09

Sobre as deformações encontradas pela simulação (tabela 25), nota-se uma aproximação grande dos resultados práticos. De modo geral, a deformação encontrada no *Simufact* foi em média 0,02 maior quando comparada com os resultados experimentais. A maior diferença foi o material Quard 450 quando o Raio de dobra foi de 30mm. Nesse caso, a simulação apresentou uma deformação máxima de 0,15 contra a deformação média de 0,12 para o grupo 1.

6. CONCLUSÕES

O estudo realizado neste trabalho foi fundamental para que se possa ter maior entendimento a respeito dos aços Quard 450, 500 e 550, uma vez, que esse material carece de pesquisas não só no Brasil, mas no mundo todo. A seguir, são apresentadas as conclusões que puderam ser tiradas deste estudo.

Dentre as equações avaliadas para o raio mínimo de dobra ou (raio do punção), a relação sobre a espessura da peça apresentada pelo fabricante (NLMK) foi a que mais se aproximou de resultados usuais na indústria.

Quanto ao retorno elástico, pôde-se verificar que o raio de dobra (ou raio do punção) assim como a dureza do material são fatores relevantes, já que quanto maiores esses parâmetros maiores também foram os resultados para o retorno elástico nos materiais avaliados. Já em relação ao sentido de laminação, neste estudo não houve nenhum incremento significativo no efeito mola para as amostras dobradas com laminação 0° e 90° . Os resultados encontrados com auxílio da simulação numérica se aproximaram bastante dos valores médios experimentais.

Sobre a força máxima de dobramento, é possível notar que quanto maior o raio de dobra e a dureza do material maior também foi a força de dobramento em cada material analisado. Quanto ao sentido de laminação, as peças dobradas a 90° foram as que obtiveram maior força de dobramento. Dentre as equações estudadas, a equação 14 indicada pela NLMK foi a que mais se aproximou dos resultados práticos. Do mesmo modo, os valores encontrados com auxílio do *Simufact* apresentam resultados semelhantes aos obtidos experimentalmente.

A deformação verdadeira nas fibras externas tende a diminuir com o aumento do raio do punção (R_p). Sendo assim, é possível afirmar que a deformação na região de tração está relacionada com o raio de dobra. Quanto aos demais parâmetros, como, dureza e sentido de laminação, não foi encontrado nenhum acréscimo ou decréscimo na deformação com a variação desses dois parâmetros. As equações 20 e 21 se aproximaram dos resultados práticos. Do mesmo modo os resultados obtidos pelo *Simufact* também se aproximaram significativamente dos resultados coletados através dos ensaios práticos, mostrando-se uma excelente alternativa para se prever esse fenômeno.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Abaixo, são descritas algumas análises que podem ser consideradas para trabalhos futuro.

- a) Avaliar os parâmetros analisados neste trabalho para o Aço Quard 450 com laminação 0° e para o Quard 400 em ambos os sentido de laminação;
- b) Verificar alternativas para se reduzir o retorno elástico na linha de aços Quard;
- c) Avaliar a possibilidade de realizar o dobramento dos materiais testados com raios de dobra menores;
- d) Avaliar a influência do retorno elástico para o dobramento a quente.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRIA, A. R. de *et al.* Aplicação do Método de Contornos Ativos Radial para Medição de Dureza Brinell Utilizando Energia Hilbertiana. **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. p. 1 – 9. 2010.
- BASERI, H., BAKHSHI-JOOYBARI, M., RAHMANI, B. Modeling of Spring-Back in V-Die Bending Process by Using Fuzzy Learning Back-Propagation Algorithm. **Expert Systems with Applications**. V. 38. p. 8894-8900. 2011.
- BAÚ, A. R. **Estudo do Processo de Estampagem Para Materiais Alternativos na Fabricação de um Componente para a Indústria de Máquinas Agrícolas**. p. 83. Dissertação de mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Matérias – PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- BUENO, T. G. M. **Análise e Comparação dos Processos de Estampagem a Quente e Estampagem a Frio de um Aço Avançado de Ultra Alta Resistência 22MnB5**. p. 95. Dissertação de mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Matérias – PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2021.
- DAGNESE, J. **Análise do Comportamento Elasto-Plástico de um Aço AISI 1045 em Baixas Deformações**. p. 84. Dissertação de mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Matérias – PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2012.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª ed. Editora Guanabara, Rio de Janeiro. 1981.
- FILHO, E. B., *et al.* **Conformação Plástica dos Metais**. 6ª ed. P. 383. Livro. 1991.
- FREES, M. V. da S. **Avaliação Sobre o Processo de Dobramento do Aço NBR 6656 LNE 380**. p. 100. Dissertação de mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Matérias – PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017.
- GUSEL, L. Analysis of Elastic Recovery Phenomena in Bending Process. **Annals e Processing of DAAAM International**, v. 22, p. 39-40, 2011.
- HEINEN, H. A. **Estudo do Retorno Elástico para Processos de Dobramento à Frio de Chapas do Aço ASTM A36**. p. 82. Dissertação de mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Matérias – PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2021.
- KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. R., MUSA, H. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6th ed., Pearson Publications, Singapore. 2009

KEELER, S., KIMCHI, M. **Advanced High-Strength Steels Application Guidelines** V.5. WorldAutoSteel, 2015.

KEELER, S., KIMCHI, M., MOONEY, P. J. **Advanced High-Strength Steels Guidelines**. WorldAutoSteel, V. 6, p. 314, 2017.

LANGE, K. **Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft**. Ed. 3. V. 3. Book. Berlin Springer, 1990.

LISBOA, C. P. **Avaliação da Estampagem a Quente do Aço USIBOR® 1500 Utilizando Estratégia de Refrigeração Diferencial para Obtenção de Peças com Propriedades Tailored**. p. 70. Dissertação de mestrado em Engenharia de minas, metalurgia e matérias – PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2019.

MARCONDES, P. **Manufatura de Chapas Metálicas – Dobramento**. Apostila. DEMEC/UFPR. 2012.

MORO, N., AURAS, A. P. **Conformação mecânica II: extrusão, trefilação e conformação de chapas**. Apostila de Processos de Fabricação, Cefet-SC, p. 24-27, 2006.

NLMK. **AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA AO DESGASTE QUARD 500**, [s. L.], CA. 2019. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://INNOVA.VIX.BR/WP-CONTENT/UPLOADS/2018/09/FICHA-TECNICA_QUARD-500-1.PDF](https://innova.vix.br/wp-content/uploads/2018/09/FICHA-TECNICA_QUARD-500-1.pdf). ACESSO EM: 22 OUT. 2019.

NLMK. **TECHNICAL RECOMMENDATIONS**, [s. L.], CA. 2019. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://QT.NLMK.COM/UPLOAD/IBLOCK/A01/2019_BROCH%20TECHNIQUE%203EN1_UK%20LD.PDF](https://qt.nlmk.com/upload/iblock/a01/2019_broch%20technique%203en1_uk%20ld.pdf). ACESSO EM: 22 OUT. 2019.

PALMEIRA, A. **Processos de Dobramento e Calandragem**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2005. Disponível em: [HTTPS://PT.SLIDESHARE.NET/THRUNKS/CAP-7-DOBRAMENTO](https://pt.slideshare.net/thrunks/cap-7-dobramento). Acesso em: 15 de maio 2019.

PAOLINELLI, A. L. G. S. **Análise do Retorno Elástico no Dobramento de Chapas de Aço com Baixo Teor de Carbono**. p. 59. Centro Federal de Educação Tecnologia de Minas Gerais – Engenharia de Materiais. 2017.

PATEL, P., *et al.* Study the Effect of Process Parameters in Plasma Arc Cutting on Quard-400 Material Using Analysis of Variance. **MaterialsToday: Proceedings**. V. 5, n. 2, p. 6023-6029, 2018.

ROCHA, O. F. L. da. **Conformação Mecânica**. Belém: IFPA. Apostila. 2012.

SANTOS, L. H. dos, *et al.* Estudo da Influência dos Tratamentos Térmicos de Recozimento Pleno e Esferoidização nas Curvas de Escoamento a Frio do Aço ABNT 1045. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, V. 15, n. 1, p. 75-79, 2018.

SANTOS, R. A. dos. **Influência da Força Pós Dobra e da Geometria da Ferramenta no Retorno Elástico em Processos de Dobramento de Aços de Alta Resistência**. p. 114. Tese de Doutorado. Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013.

SANTOS, J. T. dos, *et al.* Avaliação do retorno elástico do aço de alta resistência Quard 500. **Brazilian Journal of Development**. v. 8, n. 1, p. 4152-4164, 2022.

SCHAEFFER, L. Ligas Mais Leves e Mais Resistentes Podem Reduzir o Peso dos Automóveis. **Revista Forge**. V.1. Nº 15. p. 24. 2014.

SCHAEFFER, L., NUNES, R. M., BRITO, A. M. G. **Tecnologia da Estampagem de Chapas Metálicas Ligas Mais Leves e Mais Resistentes Podem Reduzir o Peso dos Automóveis**. p. 133. Porto Alegre: Imprensa Livre. 2017.

SECCO, A. R., FILHO, D. do A., OLIVEIRA, N. C. de. **Processos de Fabricação IV**. p. 542. São Paulo: Globo, 1999.

SOARES, L. de O. **Comparação Entre os Resultados dos Testes de Dureza Apresentados Pelas Rockwell e Brinell em Alumínio Aeronáutico**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica. Centro Universitário do Sul de Minas. p. 50. 2022.

SOUZA, J. F. de. **Estudo Para Diminuição do Grau de Redução por Passe na Laminação a Frio de Aço Baixo Carbono**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Materiais. p. 46. 2013.

SOUZA, V. F. de. **Análise do Retorno Elástico do Aço NBR 6656 LNE 380 Submetido ao Processo de Dobramento Guiado em Matriz Giratória**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica. p. 77 2019.

TEKASLAN, O., SEKER, U., OZDEMIR, A. Determining Springback Amount of Steel Sheet Metal has 0.5mm Thickness in Bending Dies. **Materials e Design**, V. 27, p. 251-258, 2006.

TSCHATTSCH, H. **Praxiswissen Umformtechnik. Capter: 16 - Biegen**. p. 164 - 181 Springer Book. 1997.

TSOUPIS, L., HILDERING, S., MERKLEIN, M. Bending of High-Strength Low-Alloyed Steel With Respect to Edge Crack Sensitivity Caused by Shearing Operations. **Procedia Engineering**. V. 81, p. 712-717. 2014.

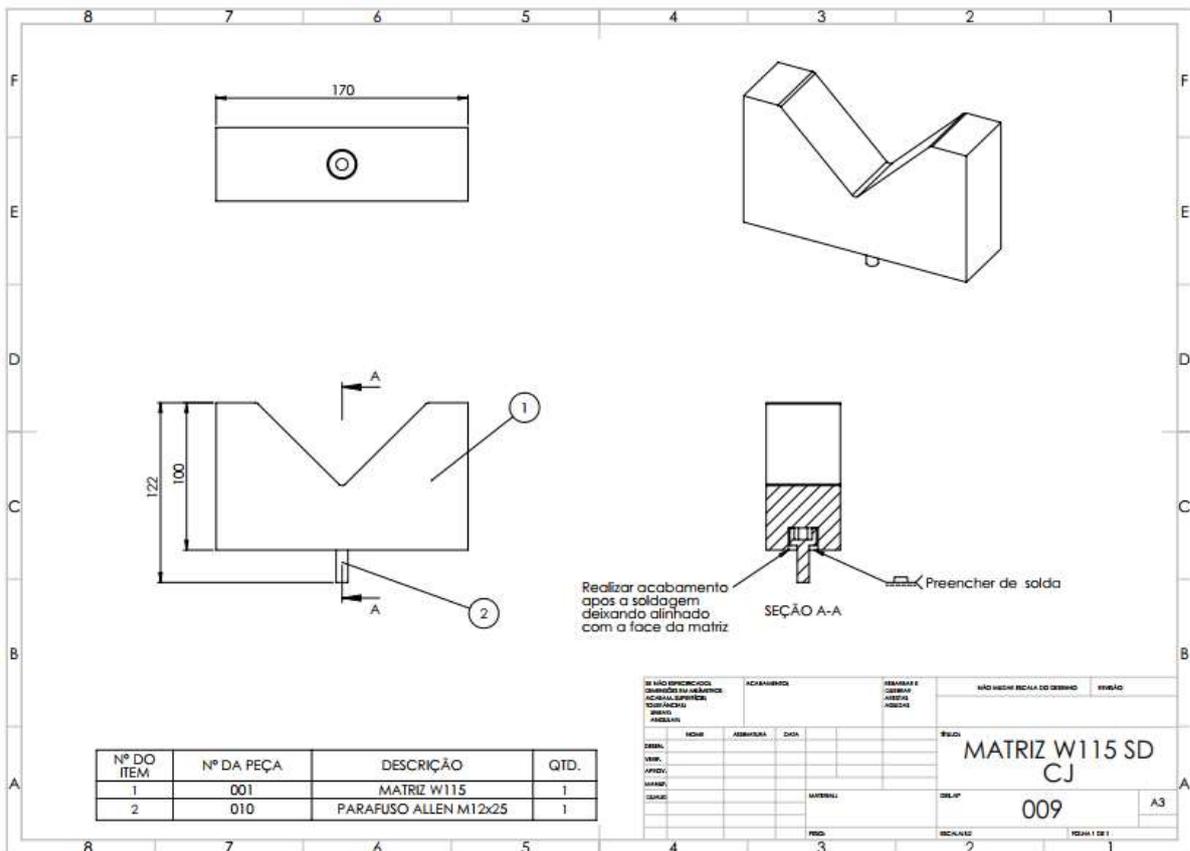
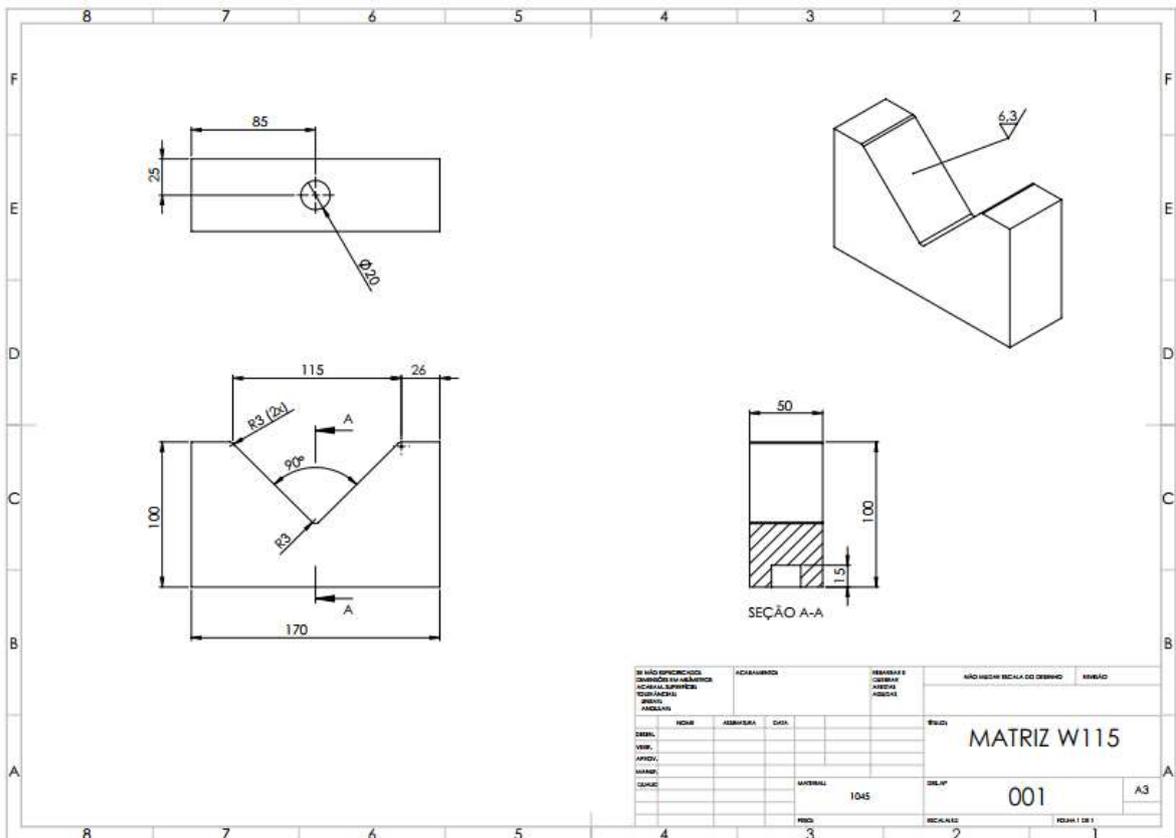
VORKOV, V., *et al.* Analytical Prediction of Large Radius Bending by Circular Approximation. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. V. 140, nº. 12. p. 121010-0 a 121010-12. 2018.

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

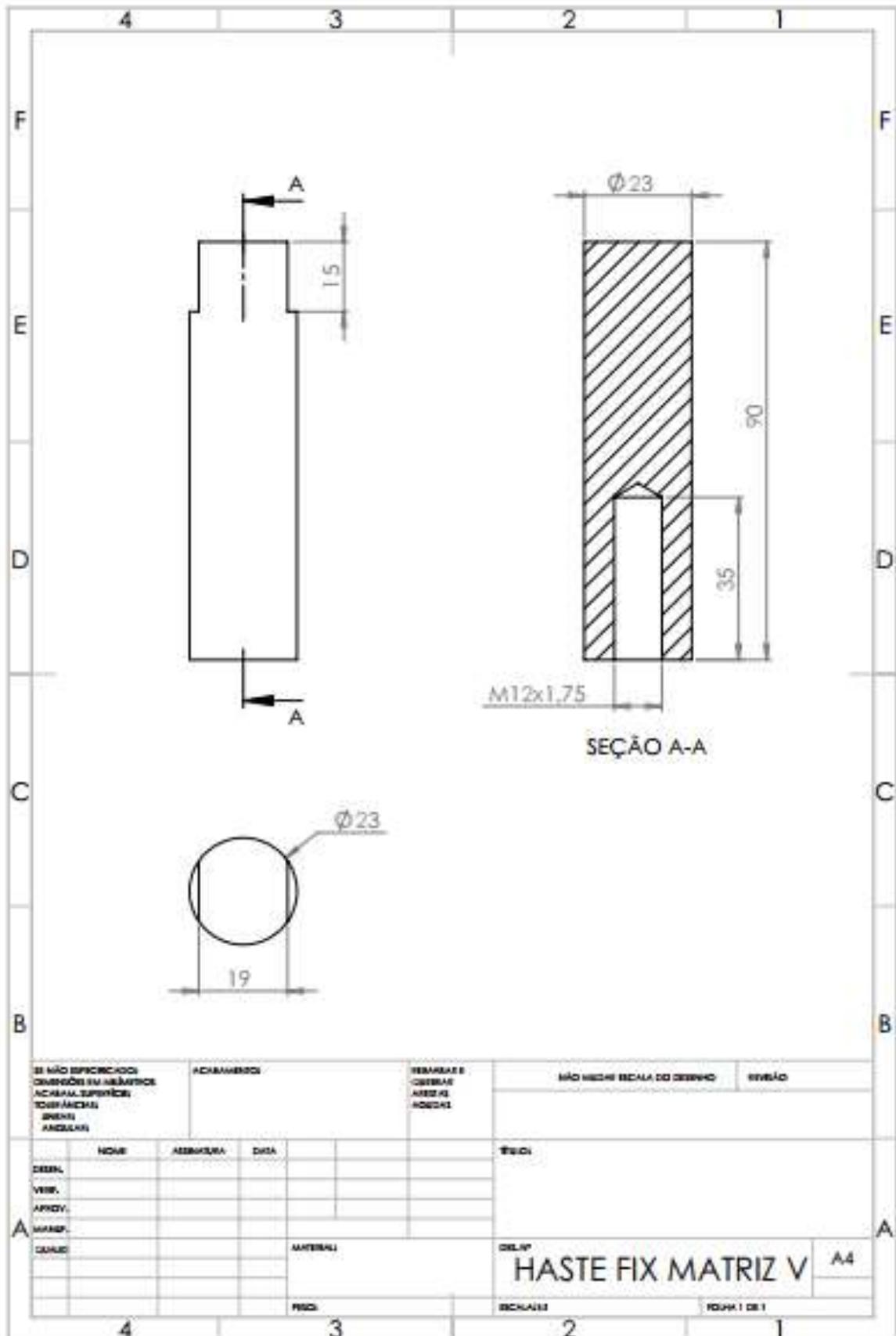
WAHED, M. A., *et al.* Finite Element Analysis of Springback in Ti-6Al-4V Alloy. **Materials Today: Proceedings**. V. 18. p. 2693-2699. 2019.

WORLD AUTO STEEL. **Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines**. Versão 5.0. 2014. Disponível em: < www.worldautosteel.org >

APÊNDICE A – PROJETO 2D MATRIZ V.



APÊNDICE B – PROJETO 2D HASTE FIXAÇÃO MATRIZ.



APÊNDICE D – PROJETO 2D HASTES DE FIXAÇÃO PUNÇÕES.

