

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

**ESTUDO DO RETORNO ELÁSTICO PARA PROCESSOS DE
DOBRAMENTO À FRIO DE CHAPAS DO AÇO ASTM A36**

Henrique André Heinen

**Porto Alegre
2021**

HENRIQUE ANDRÉ HEINEN

**ESTUDO DO RETORNO ELÁSTICO PARA PROCESSOS DE
DOBRAMENTO À FRIO DE CHAPAS DO AÇO ASTM A36**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

**Porto Alegre
2021**

Dedico este trabalho a minha esposa Nicole Henckes, e aos meus pais Irineu e Anelise, os quais nunca mediram esforços para me apoiar em minhas escolhas.

RESUMO

O processo de conformação de chapas metálicas, especificamente o processo de produção por dobramento, é amplamente utilizado para fabricação das mais variadas peças na construção metal mecânica. Dentro deste processo, existem vários fatores que precisam ser considerados e analisados, podendo citar como exemplo, o retorno elástico do aço. Devido a ocorrência de falhas, podem surgir divergências dimensionais, impossibilitando o processo seguinte, gerando a perda do material. Assim, este trabalho tem como objetivo, avaliar o retorno elástico do aço durante o processo de conformabilidade de chapas, utilizando o aço ASTM A36. As amostras de aço utilizadas neste trabalho, possuem espessuras de 4,75mm e 6,35mm. As amostras foram deformadas pelo processo de dobramento no formato V utilizando diferentes matrizes e velocidades. A avaliação e identificação do retorno elástico foram realizadas a partir da medição de abertura da parede da tira conformada. Foi possível verificar um aumento do retorno elástico, tanto na matriz de ângulo maior, quanto na velocidade de deslocamento durante o processo de dobramento. O aumento combinando destes dois parâmetros, demonstrou uma tendência de aumento no retorno elástico para as amostras conformadas. Logo, foi possível observar que ferramenta, velocidade, material utilizado são fatores determinantes para o ângulo de retorno elástico.

Palavras-chave: Retorno elástico, ensaio de dobramento, conformação de tiras.

ABSTRACT

The sheet metal folding process is widely used to produce a variety of mechanical metal construction. Many factors must be considered and analyzed for the folding process, such as the metal elastic deformation that can lead to the failure mode and result in dimensional divergences that break the next stage of the process and may result in material waste. The goal of this work is to study the metal elastic deformation during the metal sheet folding process using the high mechanical strength steel type ASTM A36. For this, metal sheets with thickness of 4,75mm and 6,35mm were deformed in the V-shaped bending process with different matrices and bending speeds to calculate the metal elastic deformation based on the based on the shape strip wall opening. It was possible to verify an increase in elastic deformation parameter in both greater angle matrix and displacement speed scenarios during the folding process, which demonstrates a tendency for elastic deformation increases for the conformed samples. Therefore, it was possible to conclude that tools, velocity and material used are all determinant factors for the elastic deformation angle.

Keywords: Springback, Bending test, Sheet metal forming

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de operações de dobramento.	22
Figura 2 - Representação das dimensões de um corpo de prova de seção retangular.	23
Figura 3 - Representação das tensões de dobramento e da linha neutra.....	24
Figura 4 - (a) Primeira etapa do dobramento livre e (b) segunda etapa do processo.	25
Figura 5 - Representação de um dobramento guiado.....	26
Figura 6 - Representação do dobramento em V. a) Deslocamento de 0mm do punção, b) Deslocamento de 2mm do punção, c) Deslocamento de 4,4mm do punção.	26
Figura 7 - Representação do dobramento semi-guiado. a) Ângulo de 90° b) Matriz dupla.	27
Figura 8 - Representação do dobramento semi-guiado. a) Modelo com ressalto na ponta b) Modelo conhecido como efeito mola.....	28
Figura 9 - Símbolo do dobramento.....	28
Figura 10 - Dobramento simples.	31
Figura 11 - Representação de um carregamento centralizado e os ângulos considerados no processo de dobramento.	32
Figura 12 - Ângulos considerados para calcular a força de dobramento (<i>F_d</i>).	32
Figura 13 - Esquema de demonstração da quantidade de retorno elástico proporcional a tensão.....	33
Figura 14 - Representação do fenômeno do retorno elástico.	34
Figura 15 - Terminologia de retorno elástico no dobramento.....	36
Figura 16 - Gráfico esquemático comparando os aços AHSS e HSS e de baixa resistência.....	38
Figura 17 - Curva de engenharia do aço ASTM A36.....	39
Figura 18 – Diagrama de fases de carboneto de ferro-ferro para aços hipoeutetóides (0,022% - 0,76%C).....	40
Figura 19 - Parte microestrutural do aço ASTM A36.....	41
Figura 20 - Representação esquemática do equipamento utilizado para realizar ensaios de tração.....	42

Figura 21 - Curva de engenharia tensão (σ) versus deformação (ϵ).....	43
Figura 22 - Processo de dobramento livre.	45
Figura 23 – Diferença de chapas deformadas nas abas	46
Figura 24 - Dobramento em "V"	48
Figura 25 - Fluxograma do planejamento experimental.	50
Figura 26 - Dimensões do corpo de prova do ensaio de tração.	50
Figura 27 - Corpos de prova com a marcação da malha de círculos.	51
Figura 28 - (a) Representação dos círculos gravados nos CP's antes da deformação com diâmetro $d_0=2,5\text{mm}$ (b) Círculos deformados em elipses após o ensaio de dobramento, com diâmetro maior d_1 e diâmetro menor d_2	52
Figura 29 – Gabarito utilizado para medição da deformação	52
Figura 30 - Grade utilizada para mensurar as deformações após dobramento.....	53
Figura 31 – Amostra durante o ensaio de dobramento.	56
Figura 32 - Demonstração do ângulo α_2 medido após o ensaio de dobramento.	57
Figura 33 - Demonstração dos ângulos medidos durante o ensaio.	57
Figura 34 – Sequência do processo de análise metalográfica	58
Figura 35 – Amostras de chapas embutidas. A: Chapa de 4,75mm e B: Chapa de 6,35mm.	59
Figura 36 - Curva de Engenharia média do aço ASTM A36 em espessura de 4,75 e 6,35mm.	60
Figura 37 - Curva de escoamento média para a espessura de 4,75mm e 6,35mm.	62
Figura 38 – Força de dobramento x Deslocamento do Punção para os corpos de prova de 4,75mm.	63
Figura 39 - Força de dobramento x Deslocamento do Punção para os corpos de prova de 6,35mm.	64
Figura 40 – Análise das diferenças dos ângulos α_1 e α_2 dos ensaios.....	65
Figura 41 - Variação do retorno elástico relacionado com o ângulo de abertura da matriz e velocidade.	67
Figura 42 - Variação do fator de retorno elástico K, em relação a matriz.....	67
Figura 43 – Deformação plástica média dos ensaios.....	69

Figura 44 – Análise metalográfica da chapa 4,75mm na região sem deformação. A: Aumento de 100x, B: Aumento de 200X, C) Aumento de 500X e D) Aumento de 1000x.	71
Figura 45 - Análise metalográfica da chapa 4,75mm na região da dobra. A: Aumento de 100x, B: Aumento de 200X, C) Aumento de 500X e D) Aumento de 1000x. Fonte: Autor, 2021.	71
Figura 46 - Análise metalográfica da chapa 6,35mm na região sem deformação. A: Aumento de 100x, B: Aumento de 200X, C) Aumento de 500X e D) Aumento de 1000x. Fonte: Autor, 2021.....	72
Figura 47 - Análise metalográfica da chapa 6,35mm na região da dobra.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de chapas(planos) em comparação a outros produtos siderúrgicos brasileiros.	20
Tabela 2 - Classificação de chapas por espessura.	20
Tabela 3 – Valores mínimos (<i>r_{mín}</i>).....	30
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A36 definidas pela <i>American Society for Testing and Materials</i> ASTM A36.....	39
Tabela 5 - Ensaio de dobramento em V para espessura de 4,75 mm.	54
Tabela 6 - Ensaio de dobramento em V para espessura de 6,35 mm.	55
Tabela 18: Valores de deformação relativa e verdadeira	70

LISTA DE ABREVIATURAS

AHSS	Aço Avançado de Alta Resistência (<i>Advanced High Strength Steel</i>)
CP	Corpo de Prova
DP	Aço Bifásico (<i>Dual Phase Steel</i>)
HSLA	Aço de Alta Resistência e Baixa Liga (<i>High Strength Low Alloy Steel</i>)
HSS	<i>High Strength Steel</i>
LdTM	Laboratório de Transformações Mecânicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
TRIP	Aço com Plasticidade Induzida por Transformação de Fases (<i>Transformation Induced Plasticity Steel</i>)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (mm ²)
A_0	Área inicial da secção (mm ²)
b	Largura da chapa (mm)
C	Coefficiente de resistência do material ($kf=C \cdot \varphi^n$)
d	Diâmetro
E	Módulo de elasticidade (N/mm ²)
F	Força (N)
$F_{máx}$	Força máxima (N)
F_d	Força de dobramento (N)
f_n	Frequência natural de vibração (Hz)
h	Deslocamento do punção (mm)
$h_{máx}$	Deslocamento máximo do punção (mm)
K	Fator de retorno elástico (-)
K_s	Fator de retorno elástico relativo
k_f	Tensão de escoamento (N/mm ²)
I	Momento de inércia (-)
L	Comprimento total do corpo de prova (mm)
l_0	Comprimento inicial (mm)
l_s	Comprimento do arco dobrado (mm)
l	Comprimento final (mm)
LM	Posição da linha média (mm)
LN	Posição da linha neutra (mm)
M	Momento de dobramento (N.mm)
n	Índice de encruamento (-)
R	Índice de Anisotropia (-)
$R_{méd}$	Valor médio de anisotropia (-)
r_m	Raio de dobra na meia espessura (mm)
r_n	Raio da linha neutra (mm)
r_{min}	Raio mínimo de dobramento (mm)
r_p	Raio do punção (mm)

r_i	Raio interno da dobra (mm)
r_e	Raio externo da dobra (mm)
r_0	Raio inicial - antes do retorno elástico (mm)
r_1	Raio final - após retorno elástico (mm)
S	Espessura da matéria prima
s_0	Espessura inicial da chapa (mm)
s_1	Espessura final da chapa (mm)
T	Espessura material
v	Velocidade do Punção (mm/min)
V	Volume (mm ³)
w	Distância entre apoios (mm)
y	Posição das fibras na chapa (mm)

SÍMBOLOS GREGOS

α	Ângulo de dobramento (°)
α_1	Ângulo de dobramento antes do retorno elástico (°)
α_2	Ângulo de dobramento após o retorno elástico (°)
α_s	Ângulo do retorno elástico (°)
α_f	Ângulo interno
α_i	Raio interno
β_1	Ângulo antes do retorno elástico segundo NBR ABNT 6153 (°)
β_2	Ângulo após retorno elástico segundo NBR ABNT 6153 (°)
d_0	Diâmetro inicial
δ	Alongamento no ensaio de tração (%)
ε	Deformação relativa (%)
ε_d	Deformação relativa no dobramento (%)
$\varepsilon_{máx}$	Deformação máxima relativa no dobramento (%)
ε_p	Deformação permanente no final da zona elástica (%)
σ	Tensão normal (MPa)
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima (MPa)
σ_{esc}	Tensão de escoamento convencional (MPa)

$\sigma_{0,2}$	Limite de escoamento convencional para 0,2% (MPa)
φ	Deformação verdadeira (-)
φb	Deformações principais da largura
φd	Deformação verdadeira no dobramento (-)
φ_{equ}	Deformação equivalente
φs	Deformação na espessura
ρ	Densidade do material (Kg/m ³)
Δb	Deformação absoluta na largura (mm)
Δl	Deformação absoluta no comprimento (mm)
Δs	Deformação absoluta na espessura (mm)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVO GERAL.....	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 PROCESSO DE ESTAMPAGEM	19
2.2 PROCESSO DE DOBRAMENTO	21
2.2.1 Corpos de provas conforme norma ABNT.....	23
2.2.2 Aspectos gerais.....	23
2.2.3 Tipos de Dobramento.....	25
2.2.4 Raio Mínimo de Dobra.....	29
2.2.5 Tensões no Dobramento	30
2.2.6 Força de Dobramento.....	31
2.3 RETORNO ELÁSTICO DO AÇO	32
2.4 AÇOS	37
2.4.1 Aços ASTM A36	38
2.5 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	41
2.5.1 Ensaio de tração.....	41
2.5.2 Curva de Engenharia.....	42
2.5.3 Curva de escoamento	44
2.5.4 Ensaio de dobramento	45
2.5.5 Dobramento em “V”	47
2.5.6 Deformação no Dobramento	48
3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	50
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	50
3.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO	50
3.3 DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO NO DOBRAMENTO	51
3.4 DOBRAMENTO EM “V”	53

3.5 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE DOBRAMENTO.....	55
3.6 MEDIÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO.....	56
3.7 ANÁLISE METALOGRÁFICA	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS	60
4.1.1 Curva de engenharia	60
4.1.2 Curva de escoamento	61
4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO	63
4.2.1 Medição da força do dobramento	63
4.2.2 Retorno elástico.....	64
4.2.3 Deformação plástica	68
4.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA	70
5. CONCLUSÃO	74
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS.....	76

1. INTRODUÇÃO

Uma das tecnologias que está em constante desenvolvimento envolve a fabricação dos aços no setor metalúrgico. Os aços que, atualmente, são produzidos possuem valores avançados de resistência mecânica, quando comparados a aços inoxidáveis. Portanto, esses novos modelos de aços acabam tendo suas estampabilidades prejudicadas, por apresentarem altos índices de resistência a conformação (ZHAO, 2018; ZANLUCHI, 2014).

A constante necessidade de aperfeiçoamento da qualidade e resistência do aço, estimula a indústria na produção de matéria prima com média resistência mecânica, resultando em um material mais fino, reduzindo os custos de fabricação (ALMANSBA, *et al.*, 2011).

Um dos principais fatores que deve ser considerado durante o processo de dobramento é o retorno elástico do aço. Se o retorno elástico não for corretamente controlado e analisado, podem ocorrer alterações na precisão dimensional e, de modo consequente, na qualidade e geometria final da peça. O controle do retorno elástico é difícil e complexo, e, geralmente, é resolvido por métodos de tentativa e erro. Estes métodos são demorados e implicam em custos elevados (SANTOS, 2013). Portanto, aprimorar as ferramentas e os métodos de processamento desses produtos a fim de evitar possíveis alterações, torna-se necessário.

Este projeto de pesquisa objetiva avaliar o retorno elástico do aço, formando variações dimensionais nas peças simuladas. A avaliação do retorno elástico permitirá compreender as variáveis que devem ser consideradas durante o processo de dobramento do aço, sem alterar a geometria da peça projetada, reduzindo a chance de gerar refugo para a empresa e aumento dos custos de produção.

Dessa maneira, foi estabelecido uma estratégia no processo de dobramento, a fim de avaliar os seguintes parâmetros de processo: o retorno elástico do aço, utilizado a mesma ferramenta de punção e dobradeira com duas espessuras, e alternância das matrizes e velocidade do processo. Este estudo busca estabelecer informações e definições sobre o comportamento dos aços de média resistência, e apresentar diferentes parâmetros evitando e/ou diminuindo o retorno elástico do aço durante o ensaio de dobramento.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a quantidade significativa de peças dobradas no dia-dia no setor metal mecânica, são constantes os problemas de retorno elástico gerados no processo de conformação de chapas de diferentes espessuras de material e ferramental. Em razão do constante retrabalho de dobramento, a fim de evitar a ocorrência do retorno elástico encontrado na indústria de elevadores, torna-se importante compreender e observar o comportamento do retorno elástico da matéria prima, em um processo de dobramento em formato “V”, na tentativa de melhorar os parâmetros, diminuir os transtornos do retrabalho do processo de dobramento, garantindo uma adequação nos ângulos, e, conseqüentemente, diminuir o tempo e o custo da mão de obra para realizar o processo.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é observar e discutir a influência de parâmetros específicos (matriz, velocidade e espessura) no processo de dobramento do aço ASTM A36 na indústria de elevadores.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Observar e discutir a influência da velocidade (10 e 15mm/s) no retorno elástico;
- Observar e discutir a influência do tamanho das matrizes V30, V40 e V50 no retorno elástico;
- Observar e discutir a influência das espessuras 4,75 e 6,35mm no retorno elástico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE ESTAMPAGEM

A indústria metal mecânica, nos últimos anos, vem evoluindo em uma tentativa de padronizar parâmetros que podem influenciar negativamente as propriedades mecânicas do material bem como o produto final. Compreender estas influências e parâmetros no processo de estampagem da chapa auxilia na otimização do processo, permitindo obter peças complexas de melhor qualidade (DELFINO, *et al.*, 2016).

A partir da análise de mercado envolvendo estampagem de metais e considerando as suas perspectivas, de acordo com dados gerados pelo relatório da *Grand View Research Inc*, é esperado que haja uma superação de 300 bilhões ainda até 2025. Diante da quantidade de peças produzidas, qualquer ganho de produtividade ou melhoria, em até mesmo centavos por peça, tem alta influência econômica (BERGS, *et al.*, 2019).

O processo de estampagem compreende em transformar uma simples chapa metálica em uma diversidade de peças nas mais variedades formas e tamanhos. Esse processo compreende vários modelos de matéria prima, podendo ser, além dos metais, o aço carbono e o aço inox. Com a gama de matéria prima que pode ser empregado, podemos citar alguns exemplos de indústrias que utilizam esse processo de fabricação: máquinas agrícolas, próteses médicas, automobilísticas; naval, refrigeração, entre outras (SCHAEFFER, 2017).

Podemos confirmar o processo de estampagem como um dos mais demandados, através da Tabela 1, a qual indica que, aproximadamente, 14 milhões de toneladas de chapas no formato plano são produzidas e comercializadas anualmente no Brasil.

Tabela 1 - Produção de chapas(planos) em comparação a outros produtos siderúrgicos brasileiros.

Fonte: INSTITUTO AÇO BRIL, (2019).

Produtos	Janeiro/julho		19/18 (%)	Maio 2019	Jun 2019	Julho		19/18 (%)	Últimos 12 meses Unid: 10 ^{3t}
	2019	2018				2019 (*)	2018		
Aço bruto	19.691	20.568	4,3	2.833	2.822	2.449	3.066	20,6	34.530
Laminados	13.513	13.843	2,4	2.019	1.830	1.905	1.947	2,2	23.366
Planos	8.056	8.301	3,0	1.233	1.092	1.173	1.143	2,6	14.012
Longos	5.457	5.542	1,5	786	738	732	804	9,0	9.354
Semi acabados p/ vendas	5.266	5.680	7,3	650	847	710	921	22,9	9.503
Placas	4.658	5.005	6,9	592	738	606	846	28,4	8.414
Lingotes, bloco e tarugos	608	675	9,9	58	109	104	75	38,7	1.089
Ferro-gusa	15.813	16.443	3,8	2.283	2.273	1.876	2.481	24,4	28.035

(*) Dados preliminares

Segundo SCHAEFFER (2004), o processo de laminação, que representa o processo de fabricação das chapas planas, são divididos em grupos diferentes, levando em consideração a espessura da matéria prima (S), temperatura de laminação, acabamento da superfície e demais propriedades.

Tabela 2 - Classificação de chapas por espessura.

Fonte: SHUKUR, 2020.

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

O processo de estampagem pode ser considerado através do processo de corte, embutimento e dobramento.

2.2 PROCESSO DE DOBRAMENTO

O processo de conformação de chapas consiste em deformar do material, com a necessidade de apresentar boa ductilidade, resistência a flexão e rigidez. Existem vários estudos sobre as propriedades mecânicas dos materiais, que envolvem parâmetros como resistência a tração, fadiga e dureza do material, porém pouco se conhece sobre o comportamento de flexão do material, durante o processo de dobramento (MAI, *et al.*, 2018).

O processo de conformação de chapas sofre alterações no modo de execução constantemente, além dos processos mais conhecidos. O processo de dobramento continua sendo um dos mais conhecidos e utilizados na operação de indústrias de segmentos variados que necessitam durante o seu processo realizar dobras em formato V, dobra em formato L, dobra em flexão, ou, até mesmo, dobras em perfis como tubo, por exemplo (SOFUOĞLU, *et al.*, 2017; MAI, *et al.*, 2018).

O processo de dobra de metais é um dos métodos mais simples e eficaz utilizado em grande escala nas indústrias. O procedimento pode ser usado em geometrias simples, até geometrias mais complexas. O processo consiste na deformação de uma chapa metálica ao longo de uma linha reta, através de um esforço de tração e compressão gerados por uma máquina de dobra (BOTH, 2017).

Para ZANLUCHI (2014), no método de dobramento a chapa sofre um processo de flexão em prensas, o qual fornece energia e movimentos necessários para a realização da operação através da utilização do conjunto punção e matriz, para que a peça atinja a forma pretendida no projeto.

Segundo MORO *et al.* (2006), no processo de dobramento são aplicados esforços em direções opostas sobre uma chapa de superfície plana, provocando flexão e deformação plástica. Inicialmente, a superfície plana muda o seu aspecto em duas superfícies concorrentes em ângulo e com um raio de concordância em sua junção.

Para PEROTONI (2008), o ensaio de dobramento é realizado para analisar conformação de segmentos e parâmetros como: encruamento do material (n), raio mínimo ($r_{mín}$) de dobra, o retorno elástico e a formação, ou não, de defeitos na região dobrada.

É necessário conhecer o ensaio de dobramento, pois o rigor do processo varia conforme a redução do raio do punção (rp), que, geralmente, é em função da espessura da chapa (S_0) ou largura (b) do corpo de prova. O punção e a matriz são os parâmetros responsáveis por conferir a forma desejada a chapa. Em algumas situações, o dobramento desejado pode ser alcançado com mais de uma operação, com mais de uma peça por vez, de forma progressiva, conforme exemplifica a figura 1 (MORO, *et al.*, 2006).

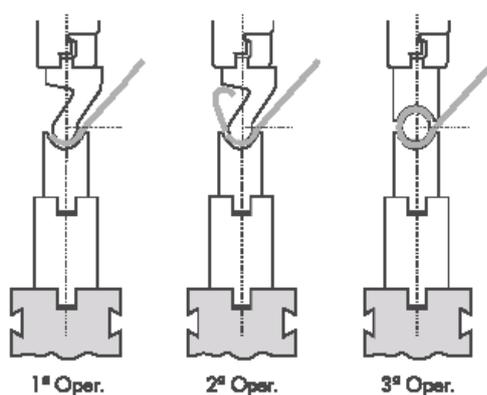


Figura 1 - Exemplo de operações de dobramento.

Fonte: MORO *et al* (2006).

Para PALMEIRA (2005), o ensaio de dobramento é considerado um ensaio de realização simples, no qual não é fornecido nenhum valor numérico, mas, sim, uma indicação qualitativa da ductilidade do material. Com a variação do ensaio, é possível verificar as propriedades mecânicas, como por exemplo a ductilidade.

O ensaio de dobramento, baseia se em um corpo de prova de eixo retilíneo e secção circular, tubular, retangular ou quadrada, sobreposto em dois apoios afastados a uma distância predeterminada, levando em consideração o tamanho do corpo de prova. O processo de dobra é executado por um punção, que aplica uma força de flexão no centro do corpo de prova até atingir o ângulo e formato desejado. Com a espessura, ou o diâmetro do corpo de prova, é determinado o raio do punção

para o processo de dobramento. Após o ensaio, é verificada a peça a olho nu, a qual não deve apresentar trincas, fissuras ou fendas (PALMEIRA, 2005).

2.2.1 Corpos de provas conforme norma ABNT

A confecção dos corpos de prova do ensaio de dobramento deve seguir a norma ABNT NBR 7438:2016. Tanto a amostragem quanto a preparação dos corpos de prova (figura 2) devem obedecer às normas do produto, e a espessura do corpo de prova precisa ser menor ou igual à sua largura ($s_0 \leq b$).

Esta mesma norma também orienta que as dimensões dos corpos de prova, quando não especificadas, devem estar entre 200mm e 500mm de comprimento (L) e entre 20mm e 50mm de largura (b) ou diâmetro (d).

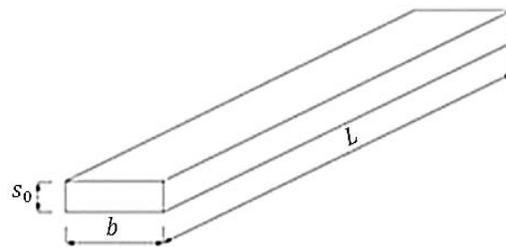


Figura 2 - Representação das dimensões de um corpo de prova de seção retangular.

Fonte: Autor (2021).

2.2.2 Aspectos gerais

Ao realizar o processo de dobramento em raios pequenos, essenciais nos projetos automotivos, o material sofre deformação local intensa, excedendo os limites de deformação de materiais de média resistência. A flexão da chapa gera um estado multiaxial não homogêneo de tensão e deformação, onde a tensão de tração está presente no exterior e a tensão de compressão no interior da zona de flexão (KAUPPER, *et al.*, 2013).

Para BENSON (2002), o processo de dobramento de estampagem de chapas metálicas, é considerado um método versátil e econômico, pois é possível executar qualquer ângulo de dobra, entre 180° , até o ângulo da medida da matriz.

Para ALTAN *et. al.* (1999), é possível considerar o processo de dobramento como um método simples, o qual compreende em realizar uma dobra. A deformação plástica irá ocorrer apenas na região onde é aplicada a força de dobramento, sendo que o restante do material não sofrerá deformação.

Com a constante evolução da composição do aço, torna-se cada vez mais difícil a realização de um processo de conformação a frio, resistente e econômico. Outro fator que aumenta a possibilidade de erro durante o processo, é a utilização de pequenos raios de dobra, no qual o material sofre alta deformação no local, excedendo os limites de conformação dos materiais de alta resistência (KAUPPER, *et al.*, 2013).

Entretanto, as falhas durante o processo são mais comuns de surgirem na região da fibra externa, local onde a peça sofre a tração. Isso é causado, pois o dobramento de chapas é guiado por um estado de tensão e deformação multiaxial não homogêneo. Na figura 3, é possível analisar a parte externa, representada na cor vermelha, sofrendo tensões de tração, e tensões de compressão na parte interna, representada pela cor azul. É possível também observar a linha neutra (LN) da peça. No processo de dobramento, a linha neutra deve permanecer com o mesmo comprimento antes e após a dobra.

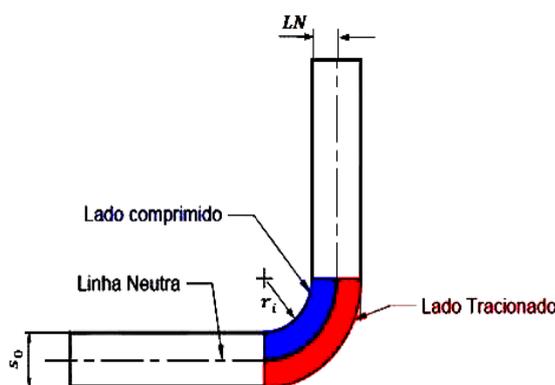


Figura 3 - Representação das tensões de dobramento e da linha neutra.

Fonte: FREES, (2017).

Durante o processo de dobramento, podem ocorrer fenômenos indesejados, como variação da secção ou a alteração da espessura da peça (SCHAEFFER, 2004). Entretanto, a linha neutra tende a permanecer no centro da dobra resultando na deformação por tração na superfície externa, que será igual a deformação compressiva na superfície interna (WANG, *et al.*, 2020; PURWADI, *et al.*, 2020).

2.2.3 Tipos de Dobramento

Na indústria metal mecânica, os ensaios de dobramento são classificados em três grupos: o dobramento livre, o dobramento guiado e o dobramento semiguiado.

Dobramento livre: É um processo em que há o apoio com punção e roletes (figura 4). O ensaio de dobramento livre inicia quando há a aplicação de força através do punção e a partir de um determinado ponto, ocorrendo a deformação pela aproximação forçada das extremidades do corpo de prova.

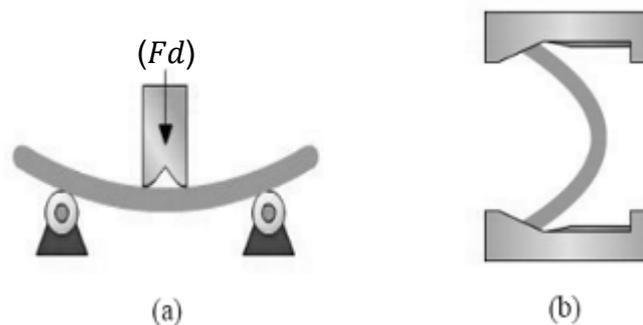


Figura 4 - (a) Primeira etapa do dobramento livre e (b) segunda etapa do processo.

Fonte: ZOLIN, 2016.

Dobramento guiado: É caracterizado por um sistema de punção e matriz, o qual irá exercer uma força no corpo de prova, ocasionando a deformação da peça dentro de um espaço e forma pré-determinados. Importaneamente, conhecer a localização do eixo neutro de uma peça auxilia na análise dos resultados obtidos após o procedimento de dobra (NIWIR, 2015). Esses dispositivos podem ser do tipo matriz e punção, ilustrado na figura 5.

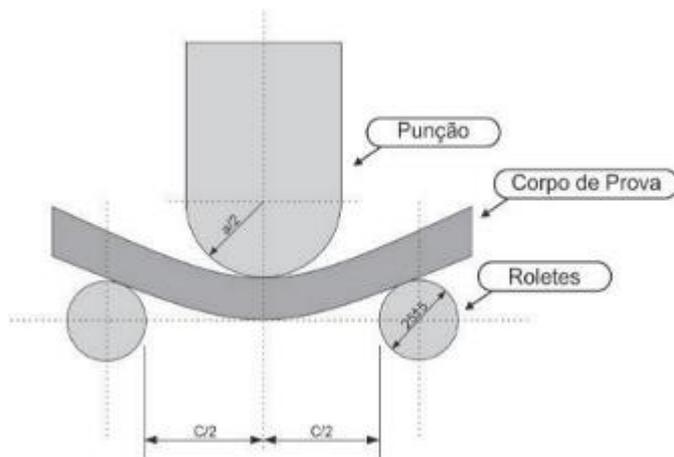


Figura 5 - Representação de um dobramento guiado.
Fonte: Do autor, adaptado da Norma ASME V, 2021.

Dobramento semiguiaado: É um dobramento onde há uma força (Fd) sendo aplicada na extremidade ou no centro da peça. Esse tipo de ensaio, pode ocorrer de formas diferentes dependendo da finalidade do ensaio. Na figura 6, estão ilustradas as formas de dobramento.

Para MARCONDES (2014), os ângulos de curvatura são determinados pelo deslocamento do punção. Para conseguir diferentes ângulos de dobra, não há a necessidade de troca de punção e matriz, porém é necessário controlar o deslocamento do punção a fim de garantir o ângulo desejado.

No processo de dobramento semiguiaado, podem ocorrer variações de dobramento quando utilizadas diferentes matrizes. A figura 6 apresenta um exemplo de dobramento em formato “V”. Nesse processo, a folga entre o punção e a matriz é constante e igual a espessura da chapa, com uma variação de aproximadamente 0,5 a 25 milímetros (MARCONDES, 2014).

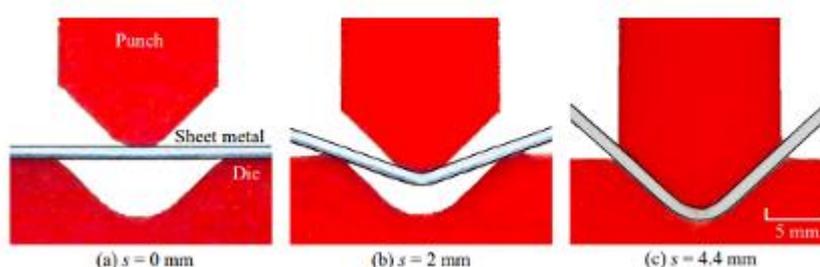


Figura 6 - Representação do dobramento em V. a) Deslocamento de 0mm do punção, b) Deslocamento de 2mm do punção, c) Deslocamento de 4,4mm do punção.

Fonte: NAKAMURA, 2018.

Já o dobramento em matriz U, é executado em dois eixos paralelos de dobramento na mesma operação. É utilizada uma força no processo para que o punção consiga pressionar a chapa e realizar o dobramento.

Existem outros modelos de dobramento semi-guiado, porém com características diferentes. Na figura 7, (a) apresenta uma chapa sendo dobrada em um ângulo de 90°, enquanto a outra extremidade é fixada na prensa chapas. O comprimento do flange e o ângulo de curvatura podem ser alterados com facilidade através do deslocamento da posição do punção (KOMGRIT, *et al.*, 2016; MARCONDES, 2014).

Na figura 7, (b) apresenta outra forma de realizar o dobramento a partir de uma matriz dupla. Esse formato é conhecido devido as duas operações de deslizamento que agem na chapa. Esse modo, pode reduzir o retorno elástico e aumentar o endurecimento por deformação (MARCONDES, 2014).

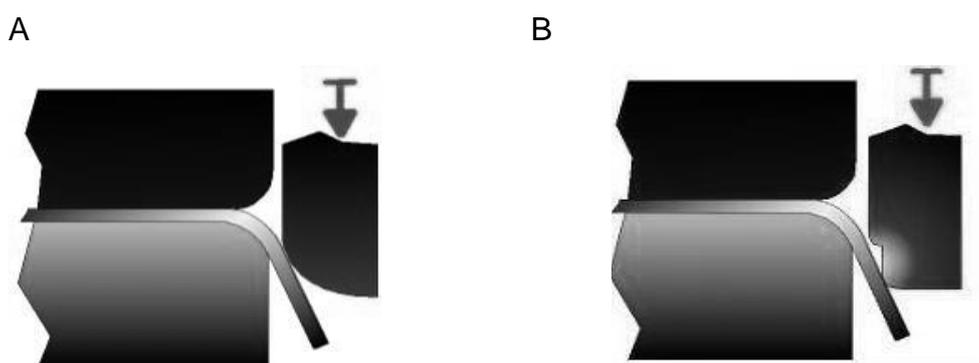


Figura 7 - Representação do dobramento semi-guiado. a) Ângulo de 90° b) Matriz dupla.

Fonte: Marcondes, 2014.

Na figura 8, (a) é possível verificar um modelo de dobramento semi-guiado com um ressalto na ponta que, durante a conformação, tem o objetivo de aplicar uma tensão de compressão e aumentar a quantidade de deformação plástica. Com esse método, a incidência do retorno elástico diminui. No processo representado na figura 8 (b), o qual também é conhecido como efeito mola ou molejo de retorno, é possível observar que o retorno elástico no dobramento de fundo é reduzido devido a posição final do punção, ocasionado através da folga entre o punção e a superfície

da matriz, que é menor do que a espessura da chapa. Com esse método, o escoamento do material é menor, ocasionando uma diminuição do retorno elástico. Na região do fundo, é necessária uma força de aproximadamente 50 a 60% maior do que no dobramento livre.

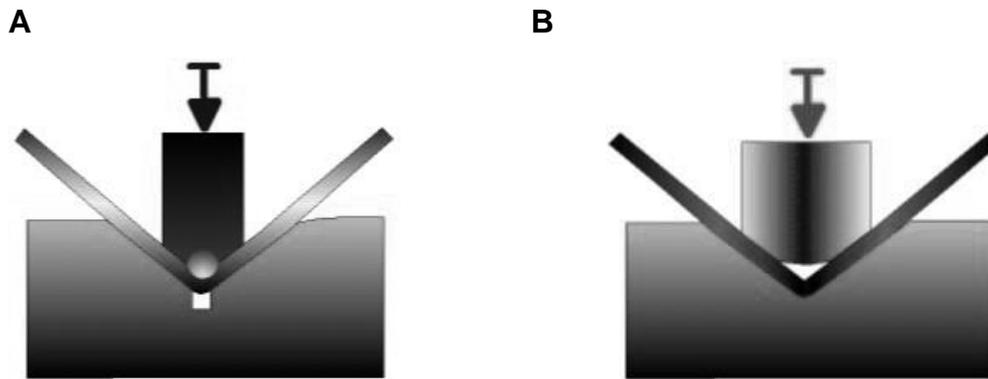


Figura 8 - Representação do dobramento semi-guiado. a) Modelo com ressalto na ponta b) Modelo conhecido como efeito mola.

Fonte: Marcondes, 2014.

Nas situações em que ocorre o dobramento reto, a deformação é concentrada na região da dobra. Nesse processo, a extremidade da chapa é presa e dobrada para cima em uma prensa matriz tipo V.

A figura 9 esquematiza um processo de dobramento e os demais fatores envolvidos durante o procedimento (FREES, 2017)

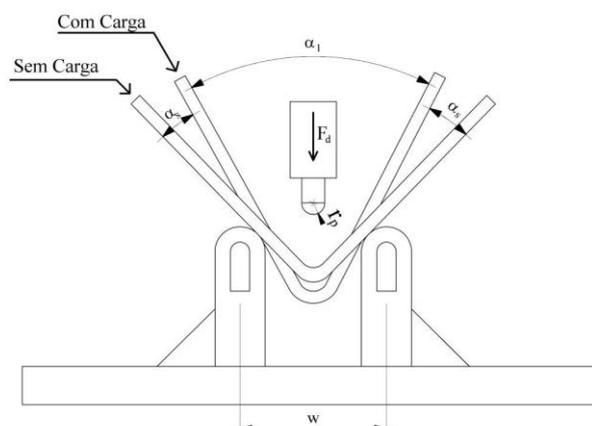


Figura 9 - Símbolo do dobramento. Fonte: FREES, (2017).

Outra variável a ser considerada no processo de dobramento, é o raio mínimo de dobra ($r_{mín}$), o qual precisa ser determinado para ser executado em perfeitas condições. O conhecimento do raio mínimo de dobra, é de extrema importância durante o processo, a fim de garantir que não ocorra nenhuma trinca nas chapas deformadas, e, conseqüentemente, a força necessária (F_d) para realizar o dobramento. Na figura 9, também é possível verificar os ângulos, antes (α_1) e após o retorno elástico (α_s), e a distância entre apoios (W) (FREES, 2017).

2.2.4 Raio Mínimo de Dobra

Para MORO E AURAS (2006), o raio mínimo de dobramento é o menor valor aceitável para que não ocorra variação na espessura da chapa e nem trincas na região da dobra. Esse valor de raio mínimo é definido em função do alongamento longitudinal máximo da matéria e da espessura da chapa que está sendo dobrada.

Para LEU (1997), o raio mínimo de dobra ($r_{mín}$) é proporcional a sua espessura (S_0) e diminui com o aumento do coeficiente de anisotropia. Uma espessura menor, durante o processo de dobramento, resultará em um raio mínimo menor, e uma boa flexibilidade. Outro fator a ser destacado em sua pesquisa, é que o raio mínimo tende a diminuir acentuadamente com valores baixos de expoente de encruamento (n) e diminui levemente com valores de “ n ” maiores.

DATSKO e YANG (1960), classificam o raio mínimo de dobra para um material a partir da redução de área durante a tensão uniaxial.

Contrariando os estudos de LEU (1997), YOMAZAKI e colaboradores (1995), demonstraram que o raio mínimo de aços de alta resistência não foi correlacionado com o expoente de encruamento (n).

O limite de escoamento convencional ($\sigma_{0,2}$), a deformação relativa (ϵ_p), e o módulo de elasticidade (E), geralmente, são conhecidos no final da zona elástica segundo a Lei de Hooke, expressa na equação 01 (FREES, 2017).

$$\sigma_{0,2} = \epsilon_p * E \quad \text{Eq. (01)}$$

Segundo MORO e AURAS (2006), quanto menor o raio de dobramento, maior será a tensão na região de tração da chapa. O rompimento na região externa da

chapa pode ser acarretado a partir de um raio de dobramento pequeno, devido a um esforço de tração excessiva durante o dobramento.

A importância da observação do raio mínimo de dobra interna, é necessário para a operação de dobramento. O raio de punção deve ser escolhido de acordo com as características e espessuras do material. Caso os valores não sejam conhecidos, é possível utilizar a tabela 3 que apresenta valores determinados pela norma DIN 9635.

Tabela 3 – Valores mínimos ($r_{mín}$).

Fonte: DIN9635.

Material	Raio Mínimo $r_{mín}$ (mm)
Aço	(1 a 3) S_o
Cobre	(0,8 a 1,2) S_o
Latão	(1 a 1,8) S_o
Zinco	(1 a 2) S_o
Alumínio	(0,8 a 1) S_o
Ligas de Alumínio	(0,9 a 3) S_o

É possível verificar que a definição do raio mínimo de dobra ($r_{mín}$), para o aço, considera um valor de raio mínimo igual a espessura da chapa (S_o), variando até três (3) vezes essa dimensão de acordo com as especificações de cada aço, conforme tabela 3 (BENAZZI, *et al.*, 2012).

2.2.5 Tensões no Dobramento

Quando um metal é submetido ao processo de dobramento ocorre uma deformação por flexão, a superfície externa da chapa é tracionada e a interna comprimida. Os valores de tração e compressão expandem a partir da linha interna neutra (LN), chegando a valores máximos nas superfícies externa e interna (MORO e AURAS, 2006).

Na figura 10, é representado um processo de dobramento simples, indicando a região onde ocorre a deformação plástica, a zona onde atuam tensões de tração, e

uma linha de transição (linha neutra - LN), e outra zona onde indica os valores de compressão (SCHAEFFER, 2004).

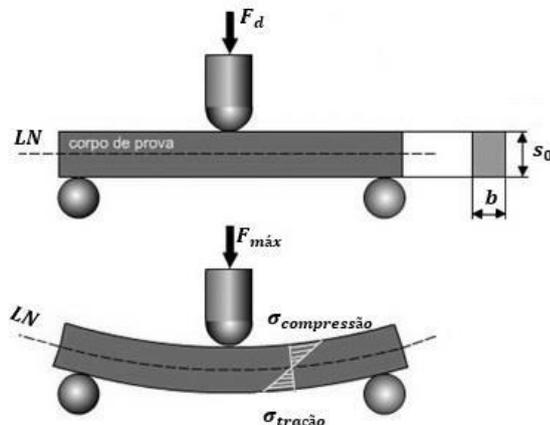


Figura 10 - Dobramento simples.
Fonte: Adaptado de SCHAEFFER, 2004.

Segundo SCHAEFFER (2004), para fins de cálculo, é considerado uma simetria em relação a linha neutra (LN), o qual indica a transição entre as tensões de tração e as tensões de compressão. A distribuição de deformações e tensões de dobramento não são constantes em relação ao centro da peça. Com a força de dobramento (F_d), as tensões apresentam comportamento somente na região elástica. Após o processo, a divisão das tensões altera, podendo ser elasto-plásticas ou totalmente plásticas na região de dobramento.

2.2.6 Força de Dobramento

Para poder realizar o processo de dobramento, é necessário conhecer alguns fatores antes da dobra ser executada: a forma da dobra pretendida, a força exigida durante o dobramento, e a ferramenta que será utilizada (PENTEADO, 2016).

Na figura 11, é representada uma dobra, indicando o deslocamento do punção (h) no sentido vertical perpendicular a chapa, onde ele atua com a força de dobramento (F_d). No processo de dobra, considerando que a chapa a ser dobrada encontra-se apoiada nas suas extremidades, e que a força de deslocamento se aplique no centro da chapa, a força (F_d) é considerada simples, e pode ser determinada pela equação 02, descrita por (LANGE, 1990).

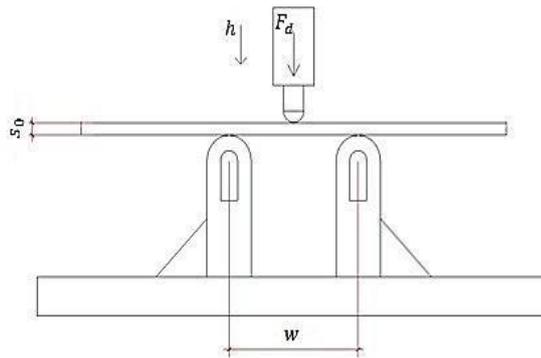


Figura 11 - Representação de um carregamento centralizado e os ângulos considerados no processo de dobramento.

Fonte: FREES, (2017).

Os ângulos formados após o processamento de dobra:

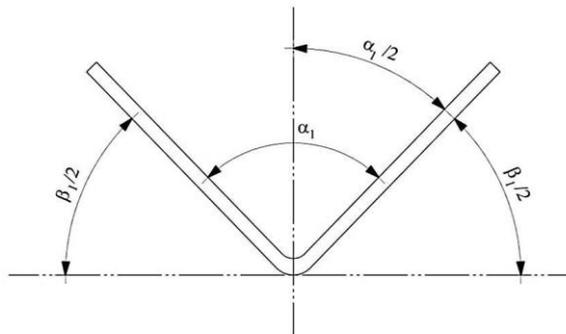


Figura 12 - Ângulos considerados para calcular a força de dobramento (F_d).

Fonte: FREES, (2017).

$$F_d = \frac{kf \cdot b \cdot s_0^2 \cdot \cos \frac{\beta_1}{2} (\cos \frac{\beta_1}{2} + \mu \cdot \sin \frac{\beta_1}{2})}{w - 2(r_p + s_0) \sin \frac{\beta_1}{2} + \mu \cdot s_0 \cdot \cos \frac{\beta_1}{2}} \quad \text{Eq. (02)}$$

Na equação de LANGE (1990), deve ser considerado o coeficiente de atrito $\mu = 0,1$. Para realizar o cálculo da força de dobramento (F_d), é necessário conhecer os valores do raio de punção (r_p) e o ângulo de dobramento (β_1), e, também, a espessura da chapa (s_0), e largura da chapa (b), a distância entre apoios (w) e a tensão de escoamento (kf).

2.3 RETORNO ELÁSTICO DO AÇO

Durante muito tempo, a maior preocupação das indústrias no processo de conformação de chapas era garantir, após o dobramento da peça, a não ocorrência de trincas e estrições. Atualmente, essa preocupação baseia-se também em outros fatores, como a precisão e consistência dimensional dos produtos, sendo o retorno elástico do aço um dos maiores problemas encontrados. Esse problema, acaba gerando uma distorção geométrica da peça, que pode ser prejudicial esteticamente e, até mesmo, impossibilitar a montagem dos componentes (LAJARIN, *et al.*, 2012).

KOMGRIT, *et al.* (2016), consideram o retorno elástico o maior problema evolido durante o processo de dobramento, e consideram a redução do momento de flexão um dos métodos mais eficazes para evitar a ocorrência do retorno elástico. Ao mesmo tempo, o resultado do processo de dobramento no limite da dobra da peça, também é capaz de reduzir efetivamente o retorno elástico do aço, no entanto, uma certa quantidade de retorno é esperada. (OGAWA, *et al.*, 2011). O retorno elástico do aço conformado ocorre devido as tensões elasto/plásticas criadas durante o processo de deformação (SANTOS, 2013), podendo ser observadas na curva tensão-deformação, conforme figura 13. No ponto “A” ocorre a remoção de todas as forças externas, até o ponto B. O ponto “OB” representa a deformação permanente (plástica) e o ponto “BC” representa a recuperação da deformação (retorno elástico). Apesar da deformação do ponto “BC” ser pequena, ela pode causar alteração significativa na geometria da peça (LAJARIN, *et al.*, 2012).

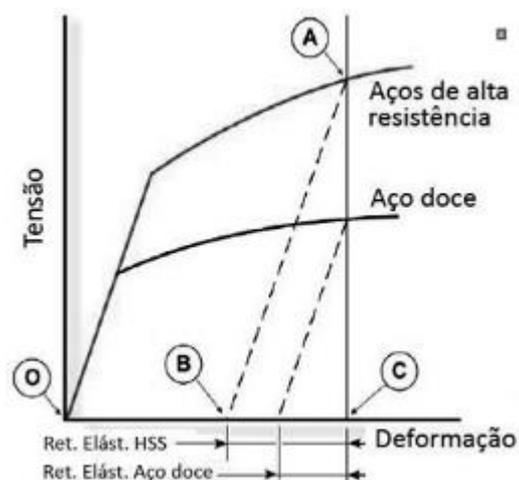


Figura 13 - Esquema de demonstração da quantidade de retorno elástico proporcional a tensão.

Fonte: WORLDAUTOSTEEL, (2009).

Para VORKOV e colaboradores (2014), a definição do retorno elástico é quando ocorre a recuperação da parte elástica após a conclusão do processo de dobramento. A figura 14, representa o processo com uma gama de imprecisões no processo de dobramento.

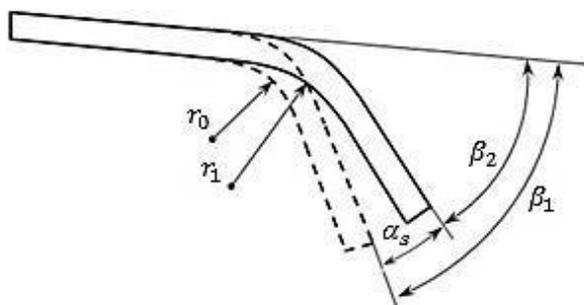


Figura 14 - Representação do fenômeno do retorno elástico.
Fonte: (DIETER, 1981).

Há muitos anos, pesquisadores tentam desenvolver um cálculo retorno elástico, porém, até o momento, não há nenhuma solução encontrada. Diante disto, é possível compreender a complexidade do retorno elástico, uma vez que apresenta inúmeros tipos de materiais e diferentes parâmetros que influenciam o processo e modificam o resultado (VORKOV, 2014).

As trincas e estrições por muito tempo foram os principais fatores de preocupações durante o processo de dobramento. Hoje em dia, além dessa preocupação já conhecida, existem mais fatores a serem considerados, como por exemplo a precisão e consistência dimensional nas peças, pois isso provoca uma distorção geométrica na qual é prejudicial durante a montagem dos demais componentes (LAJARIN, *et al.*, 2012).

A necessidade de realizar novos estudos, a fim de eliminar o retorno elástico, ainda é uma grande preocupação nas indústrias de estamparia em geral. Os estudos realizados por LAWANWONG (2014), apresentaram a maneira mais eficaz de anular a recuperação elástica é reduzir o momento fletor, que é a força motriz do retorno elástico.

BOFF e colaboradores, (2013), demonstraram que durante o processo de dobramento, apesar de ter uma distribuição de tensões elásticas e plásticas, a linha neutra (LN) da espessura da chapa apresenta apenas a deformação elástica,

quando aplicado há uma força de dobramento. Quando retirada a força aplicada do processo, a deformação elástica concentrada da linha neutra retorna o material para a sua forma inicial.

Para SCHAEFFER (2004), o retorno elástico do aço depende do limite de escoamento do material e do processo de dobramento. Quanto menor o raio de dobramento, maior será a zona plástica. Neste caso, se as forças elásticas são pequenas, o retorno elástico é pequeno.

Parte das tensões atuantes durante o processo de dobramento, acabam permanecendo abaixo do limite de proporcionalidade, enquanto a outra parte permanece acima desse limite, concedendo uma deformação plástica permanente. Após a retirada da força de dobramento, a região submetida a tensões abaixo dos limites de proporcionalidade tende a retornar para a posição inicial, sendo este processo conhecido como retorno elástico do aço (MORO, *et al.*, 2006).

Para SCHAEFFER (1999), o dobramento é um procedimento onde ocorre a deformação por flexão, onde a superfície externa do material é tracionada e a interna comprimida, gerando valores de tensões de tração na camada externa e de compressão na camada interna. Essa deformação no processo ocorre a partir do momento em que a tensão aplicada ultrapassa a zona elástica, (região que caracteriza o retorno ao estado inicial do material), e chega na região conhecida como zona plástica. Em razão disso, a chapa dobrada poderá apresentar um pequeno retorno elástico, que deve ser compensado durante a operação de dobramento (MORO e AURAS, 2006).

Assim, o fator de retorno elástico, identificado por (K) pode ser expresso pela equação 03.

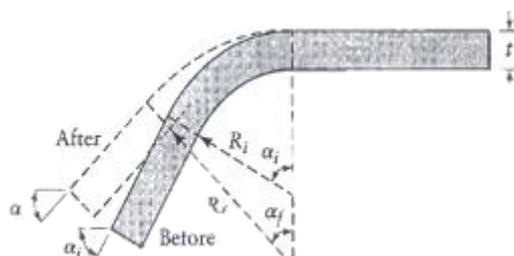
$$K = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad \text{Eq. (03)}$$

Ao término do processo de dobramento, a parte da seção submetida a tensões inferiores ao limite de proporcionalidade, ficando na região elástica, tende a retornar à posição inicial antes do início do processo, que é chamado de retorno elástico.

Segundo SCHAEFFER (2004), na passagem do limite de escoamento de compressão para o limite de escoamento de tração, ocorrem tensões correspondentes ao estado elástico do material, sofrendo somente deformações elasticamente. Ao término de atuação de forças internas, as partes sob deformações elásticas tendem a retornar a sua posição inicial. Por isso, há retornos elásticos das peças sobradas.

Segundo CHANDRASEKARAN, (2015) o retorno elástico pode ser descrito conforme a razão expressa na equação 04, ângulo externo (α_f), ângulo interno (α_i), raio interno (R_i), raio externo (R_f) são ilustrados na figura 15, e K_s é o fator de retorno elástico ou retorno elástico relativo da (equação 04).

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{2R_i/T+1}{2R_f/T+1} \quad \text{Eq. (04)}$$



**Figura 15 - Terminologia de retorno elástico no dobramento.
Fonte: CHANDRASEKARAN, (2015).**

O modelo de encruamento e a geometria da ferramenta, são de grande relevância para a magnitude do retorno elástico. Quando a geometria impede o retorno completo das tensões elásticas durante o processo, as tensões armazenadas são chamadas de tensões residuais. Quando essa força não é descarregada, o componente altera a sua forma durante o procedimento de estampagem (SCHAEFFER, 2004).

A ARCELORMITTAL (2009), recomenda os seguintes cuidados durante a fase do projeto: utilização de pequenos raios de ferramenta e criação de reforços geométricos a fim de aumentar a rigidez da peça e organizar a sequência de estampagem.

2.4 AÇOS

A classificação dos aços pode ser em três formas diferentes: denominação metalúrgica, resistência do aço, e outras propriedades mecânicas.

I: Denominação metalúrgica:

- Aços de baixa resistência: Livre de intersticiais (*interstitial-free* - IF®) e aço-carbono;
- Aços convencionais de alta resistência (*High Strength Steel – HSS*), e Livre de intersticiais de alta resistência HSLA);
- Aços de alta resistência mecânica como (*Advanced High Strength Steel – AHSS*), *Dual Phase*, Ferrítico-Bainíticos, *Complex Phase*, martensíticos e de plasticidade induzida por transformação (*Transformation-Induced Plasticity – TRIP*).

II: Resistência ao aço:

O segundo modelo de classificação é denominado de acordo com a resistência ao aço. É possível classificar como aço (HSS), quando apresentam limite de escoamento entre 210 e 550 MPa, e limite de resistência entre 270 a 700 MPa. Já os aços considerados de média resistência mecânica (AHSS), possuem limite de escoamento maior que 550MPa e limite de resistência maior que 700 MPa.

III: Outras propriedades:

A figura 16 compara diferentes forças de tração, as quais são diretamente relacionadas com a conformabilidade, para os diferentes tipos de aços. Os aços considerados de baixa resistência são apresentados em cinza escuro, HSS são indicados pelo cinza claro, e AHSS são indicados pelas cores amarelo, verde e azul escuro, respectivamente (ZHAO, 2018; ZHAO, 2017).

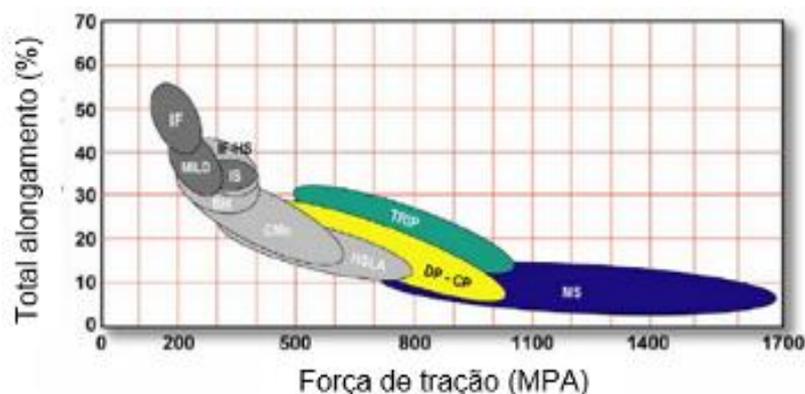


Figura 16 - Gráfico esquemático comparando os aços AHSS e HSS e de baixa resistência.

Fonte: ZHAO, 2018.

2.4.1 Aços ASTM A36

No cenário atual, existe uma grande variedade de aços disponíveis para diferentes aplicações capazes de apresentar diferentes formatos. Esta variedade de aços tem sido empregada na fabricação de componentes estruturais tais como, perfis, chapas, tubos e barras (DA SILVA, 2018).

Um dos aços é o A36, que tem como característica principal o aço carbono em sua composição e é considerado um aço hipoeutetóides. A36 é utilizado, geralmente, na parte estrutural de máquinas, implementos rodoviários, passarelas, entre outros. Um dos principais requisitos desse aço, é a homogeneidade, ductilidade, boa soldabilidade, suscetibilidades de corte a chama e uma resistência razoável a corrosão. Seu limite de resistência a tração varia de 390 a 490 MPa com alongamento em torno de 18% a 20% (ABS, 2014; DA SILVA, 2018). Na tabela 04, é possível verificar as propriedades mecânicas do aço A36.

O aço ASTM A36 também é um dos aços mais utilizados no processo de soldagem em virtude do material não alterar a estrutura do aço durante a solda. No entanto, quanto maior a quantidade de carbono no aço, menor será a sua soldabilidade, necessitando de um tempo maior de resfriamento para evitar características microestruturais indesejadas (CARLESSO, 2018). A figura 17 apresenta a curva tensão x deformação do aço ASTM A36.

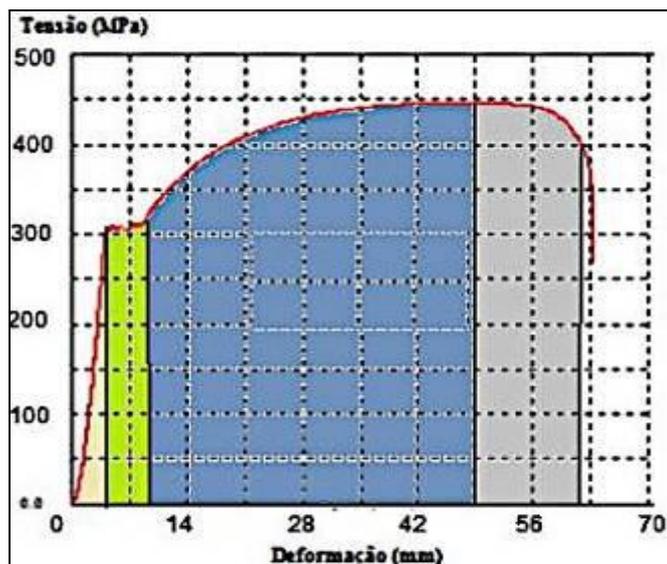


Figura 17 - Curva de engenharia do aço ASTM A36
 Fonte: CARLESSO, 2018.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A36 definidas pela *American Society for Testing and Materials* ASTM A36.

Fonte: Norma ASTM.

Aço	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento mínimo (% mm)
ASTM A36	250 (mínimo)	400 A 550	18 a 20

Existem parâmetros conhecidos nas propriedades mecânicas do aço A36 que envolvem o limite mínimo de escoamento e um limite mínimo de alongamento para a ruptura, sendo que estes parâmetros devem ser seguidos rotineiramente no setor industrial. Os valores de tensão e escoamento são possíveis alcançar a partir do médio teor de carbono presente no aço A36 proporcionando boa soldabilidade ao material (SCHAEFFER, 2004).

Os aços estruturais ASTM A36 possuem, em sua composição, baixo teor de carbono, geralmente, variando entre 0,05% a 0,2% em peso, sendo o máximo 0,30% de carbono KRAUSS (2015).

Sabe-se que a ruptura de materiais, normalmente, começa em áreas que apresentam algum tipo de falha microestrutural, que incluem deformações plásticas em grãos moles, incompatibilidade de tensão residual ou anisotropia elástica. Para

tanto, conhecer e caracterizar os parâmetros envolvidos no material tornam-se requerimentos indispensáveis (DE LOS RÍOS, *et. al.*, 2019).

Para a realização da caracterização do aço, devem ser analisadas frações de volume de ferrita e perlita, bem como o tamanho dos grãos em cada microestrutura, sendo esse último um parâmetro essencial para o aumento da resistência mecânica. Logo, quanto menor o diâmetro do grão, maior será a tensão de escoamento do material (WANDERLIND, 2018). Para a realização desse procedimento metalográfico, são necessárias técnicas específicas que envolvem amostras de aço cortadas, e embutidas utilizando resina epóxi. Após a peça embutida, é iniciado o procedimento lixamento utilizando várias medidas de lixa, e acrescidas de uma solução de Nital de 2%, o qual serve como um condicionador, geralmente, usado para aços de baixo carbono. Para realizar a leitura metalográfica deve ser utilizado microscópio óptico (VANDER VOORT, 2004; KRAUSS, 2015).

As micrografias têm como objetivo principal avaliar as frações volumétricas de perlita e ferrita, tamanho do grão de ferrita, e a colônia de perlita na microestrutura do aço. Essas fases são identificadas (figura 18) de modo direto usando o diagrama constitucional de referência de carboneto de ferro – ferro (Fe–Fe₃C) SAJID, 2020.

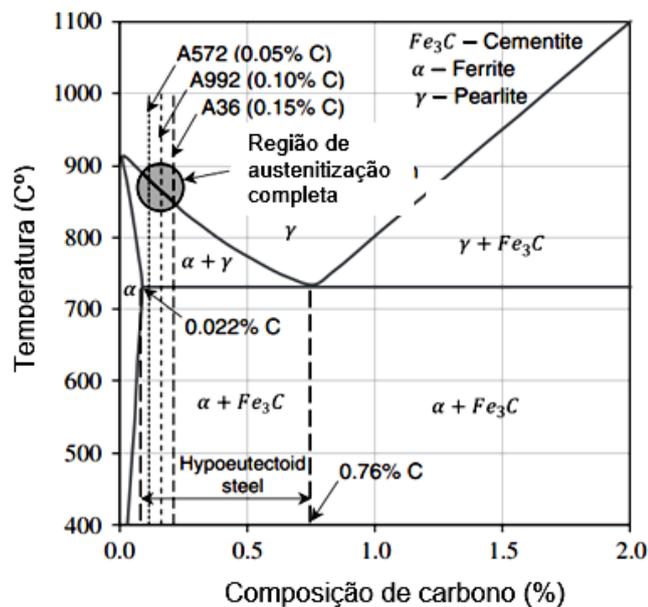


Figura 18 – Diagrama de fases de carboneto de ferro-ferro para aços hipoeutetóides (0,022% - 0,76%C).

Fonte: Adaptado de SAJID, 2020.

A parte microestrutural do aço ASTM A36 é composta por ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras), sendo em média 77%, \pm 2% de ferrita e 22%, \pm 2 % de perlita, conforme demonstra a figura 19.

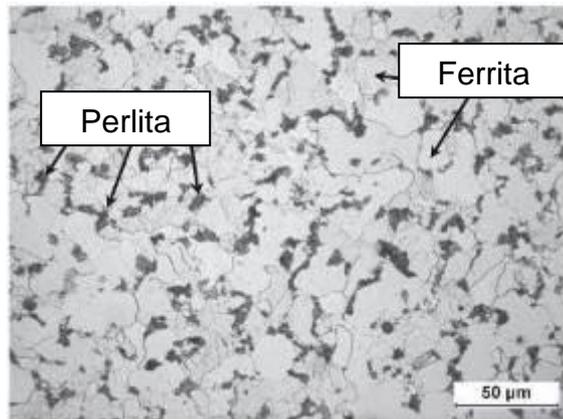


Figura 19 - Parte microestrutural do aço ASTM A36.

Fonte: SAJID, 2020.

2.5 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.5.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é considerado como um ensaio destrutivo. Isso se deve ao fato de o material receber um esforço uniaxial, criando um alongamento, seguido de uma deformação até a sua ruptura. Com os resultados do ensaio, é possível conhecer as características do aço em relação as tensões de tração, identificando os valores limites do ensaio de tração (PERINI, 2008).

Os ensaios de tração são de extrema importância para a caracterização inicial e final do processo de estampagem do material, podendo, ainda, apresentar informações sobre o desempenho do material durante o processo de conformação (SCHMITZ, 2013).

A figura 20 representa a máquina do ensaio de tração, que é capaz de alongar o corpo de prova a uma velocidade pré-determinada, podendo mensurar, simultaneamente, a força aplicada (F) e o alongamento durante o ensaio. Para

obtenção dos valores precisos da força aplicada, a máquina conta com uma célula de carga.

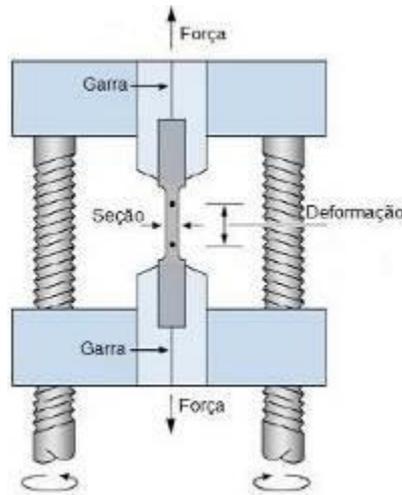


Figura 20 - Representação esquemática do equipamento utilizado para realizar ensaios de tração.

Fonte: FREES, 2017.

2.5.2 Curva de Engenharia

Com a realização do ensaio de tração, é possível obter a curva de engenharia. Com a deformação do material por uma força de tração uniaxial é possível obter valores de tensão que caracterizam o material (σ_{esc} e σ_{max}), e que geram a curva de engenharia ($\sigma \times \epsilon$). A figura 21 representa os parâmetros durante o ensaio.

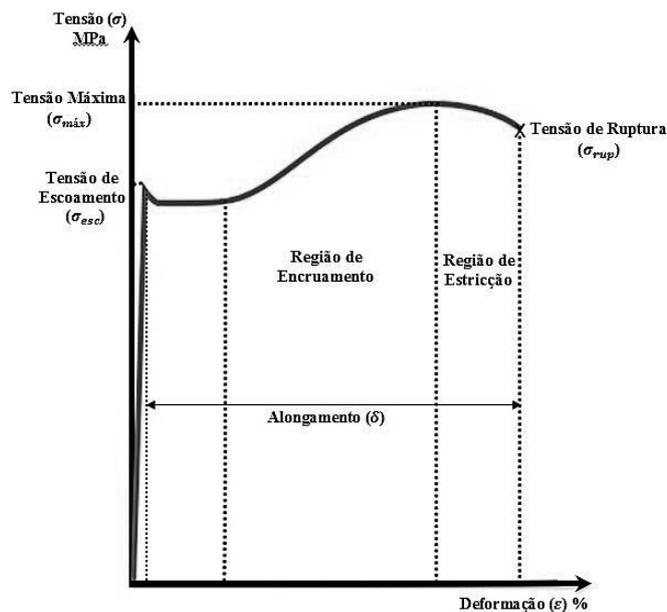


Figura 21 - Curva de engenharia tensão (σ) versus deformação (ϵ).
Fonte: SCHAEFFER, 2004.

A partir do ensaio de tração, é possível conhecer a tensão de escoamento (σ_{esc}), seguido pelo início do encruamento do material, até a tensão máxima ($\sigma_{máx}$) e tensão final de ruptura (σ_{rup}). Todas essas fases e parâmetros são encontrados na figura 21.

Os resultados do ensaio geram informações importantes como a força (F) versus deformação absoluta (Δl) e comprimento (l). Com essas variáveis conhecidas é possível determinar a tensão de engenharia (σ) e deformações relativas do material, descritas na equação 05.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [N/mm^2] \quad \text{Eq. (05)}$$

A força instantânea aplicada é denominada pela variável (F), aplicada, perpendicularmente, na seção A_0 que representa a secção inicial antes da aplicação da força (SCHAEFFER, 2009).

A deformação relativa (ϵ) em relação ao comprimento é descrita pela equação 06, onde o l_1 é o comprimento instantâneo do corpo de prova e o l_0 é o comprimento inicial do corpo de prova.

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} (100\%) \quad \text{Eq. (06)}$$

2.5.3 Curva de escoamento

A curva de escoamento é outro fator de engenharia, no qual é possível determinar a qualidade do material testado. A região de escoamento é iniciada na deformação plástica do material, chegando até ao limite de resistência, o qual, após essa fase, indica que o material está entrando na fase de ruptura.

Essa curva é gerada com informações de valores de tensão para cada valor da tensão no processo de carregamento. No diagrama convencional, a força (F) é relacionada com a área instantânea (A). A curva gerada compara a deformação verdadeira (φ) com a tensão verdadeira (σ) e, é conhecida como curva de escoamento (MORO, *et al.*, 2006).

Os valores de tensão verdadeira (kf) são determinados pela razão entre a força aplicada (F) e a secção instantânea (A) do corpo de prova, descritos na equação 07.

$$kf = \frac{F}{A} [N/mm^2] \quad \text{Eq. (07)}$$

As curvas de escoamento obtidas durante o ensaio de tração a frio, são descritas conforme a equação 08 de Ludwig. Onde, C representa o coeficiente de resistência ao material (para $\varphi=1$) e "n" é o coeficiente ou índice de encruamento.

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad \text{Eq. (08)}$$

A variável do encruamento (n) representa a capacidade de deformação plástica e uniforme do material (GARCIA, *et al.*, 2014). SILVA 2012, considera o encruamento como um dos principais mecanismos de endurecimento dos materiais e, geralmente, o aumento de resistência é acompanhado de uma diminuição da ductilidade.

2.5.4 Ensaio de dobramento

O processo de dobramento é considerado um processo simples e, devido a suas importantes características, tem sido aplicado há muitos anos na indústria. Esse processo envolve desde a conformação de componentes geometricamente simples até estruturas mais complexas, sendo possível produzir peças de uma grande variedade de formatos (NIWIR, 2015). No decorrer deste processo, podem ocorrer fenômenos de instabilidade que envolvem trincas na região da dobra, variações da seção e ruptura da peça (DAMETEW, *et. al.*, 2017).

No dobramento, a chapa a ser conformada sofre uma deformação por flexão em prensas, resultando em uma deformação por flexão na peça. A forma desejada do processo de dobramento, é conforme a utilização do punção e matriz específicos para cada caso. A figura 22 ilustra o caso SANTOS, (2013).

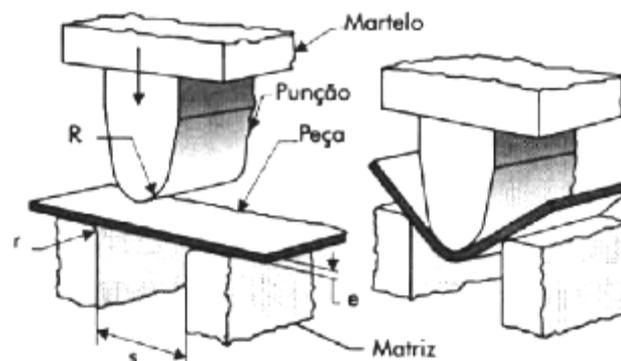


Figura 22 - Processo de dobramento livre.
Fonte: SANTOS, (2013).

Considerando que o processo de dobra pode ser programado de acordo com o formato e a espessura da peça, é esperado que ocorra uma variação na resistência do material. Logo, o processo de dobramento exige um planejamento e uma padronização nos parâmetros operacionais, uma vez que pode alterar o as propriedades do material (VAIBHAV, *et al.*, 2016)

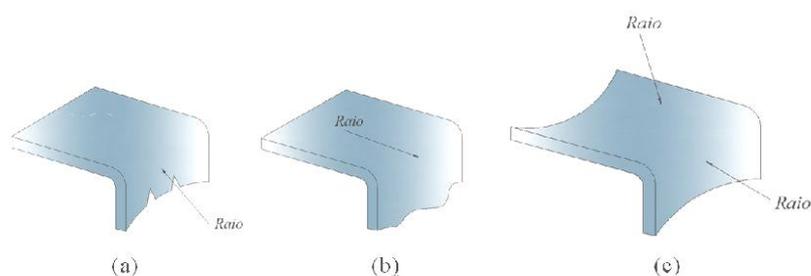
O dobramento é uma operação de formação no qual o metal é submetido a esforços de flexão, assim um metal em plano reto é transformado em curva. Este dobramento ocorre a partir da deformação plástica sem alteração na espessura. Uma vez que todos os materiais apresentam um módulo de elasticidade finito, a

deformação plástica é seguida pela recuperação elástica após a remoção da carga, que, durante flexão, é conhecido como retorno elástico (CHANDRASEKARAN, *et al.*, 2015).

O retorno elástico está entre uns dos principais problemas encontrados no processo de dobramento. Ao decorrer dos anos, diversos pesquisadores têm investigando os parâmetros que afetam o retorno elástico a fim de reduzi-lo, uma vez que afetam diretamente a qualidade das peças dobradas (DAMETEW, *et al.*, 2017; SHARAD, *et al.*, 2020; THIPPRAKMAS, 2020).

O processo de dobramento é semelhante a outros processos de conformação, sendo considerado as propriedades de deformabilidade. Se, durante o processo, o material é deformado abaixo de sua temperatura de recristalização, ocorre uma deformação elástica e, após, as deformações plásticas até a sua ruptura. Existe no processo de dobramento, dentro da região elástica, um desfavorável retorno elástico, que é visível após a aplicação da força de dobramento (SCHAEFFER, 2017).

MARCINIAK *et al.*, (2002), consideram que, caso a chapa a ser conformada não seja plana ou não ocorra linearmente, as deformações plásticas ocorrerão não somente na dobra, mas também nas juntas das chapas que estão sendo dobradas. Na figura 23 (a) é possível observar que quando a aresta é menor que a aba, esta pode se sobrepor; ou (b) se o comprimento da aba aumentar, fendas podem surgir. A figura 23 (c) apresenta a situação em que a chapa é curvada próxima a aba, ou em que tanto a chapa como a aba são curvadas. A aba pode, então, estirar-se ou comprimir-se (MARCINIAK, DUNCAN e HU, 2002).



**Figura 23 – Diferença de chapas deformadas nas abas
Fonte: MARCINIAK, DUNCAN e HU, 2002).**

Para RÈCHE *et al* (2012) para realizar o desenvolvimento de processos de dobra, é necessário ter um amplo conhecimento sobre as características da chapa de aço a ser conformada, como por exemplo, a sua resistência a conformação e a maleabilidade do aço, que é, geralmente, definida como a razão do raio mínimo de dobramento ($r_{mín}$) que pode ser alcançado sem falhas, e a espessura da chapa (S_0).

2.5.5 Dobramento em “V”

Um dos mais comuns processos de dobra utilizado na indústria, a fim de deformar chapas de metal em formas curvas, é o processo de dobra em matriz V. (THIPPRAKMAS, 2020; HUANG, 2007).

O processo de dobramento em “V” consiste, resumidamente, em uma matriz em forma de “V” e uma punção, conforme figura 24, no qual é exercida uma força no punção que, por sua vez, pressiona a chapa contra a matriz resultando no formado desejado da peça. Normalmente, a curvatura é programada para obter um ângulo de 90° (SHUKUR, 2020). É esperado um maior retorno elástico com o aumento da espessura e do ângulo de dobra, podendo ser reduzido segurando o punção por mais tempo na chapa (SRINIVASAN, *et. al.*, 2019).

A fim de explorar detalhadamente este processo, é possível classificá-lo em duas etapas, sendo que na primeira etapa ocorre a flexão e, quando a chapa atinge a posição de dobramento final, ocorre a segunda fase. Após a finalização da segunda fase, o punção não pressiona mais a chapa de metal contra a matriz causando uma variação dimensional na parte dobrada devido à recuperação elástica. Logo, este resultado refere-se ao retorno elástico, o qual afeta a precisão das peças dobradas, especialmente o ângulo de dobra. Por esta razão, torna-se uma questão prática prever o retorno elástico, fornecendo parâmetros pré-determinados para compensar este fenômeno (SRINIVASAN, *et. al.*, 2019; IVANIŠEVIĆ, *et al.*, 2013).

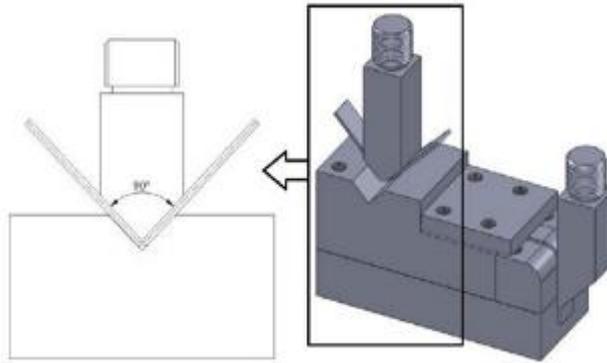


Figura 24 - Dobramento em "V".

Fonte: SANTOS (2013).

2.5.6 Deformação no Dobramento

KEELER e KIMCHI (2014), consideram que a capacidade de deformação do material é relacionada ao estiramento total em que o material se alonga durante um ensaio de tração ou em um processo de dobramento. O índice de alongamento alto, significa uma sustentação maior da fibra externa antes da fratura superficial, mantendo um raio de curvatura menor. Com o alongamento diminuindo através do aumento da resistência em uma determinada espessura de chapa, o raio mínimo de dobra do projeto deve ser aumentado.

A equação para definir a deformação verdadeira (φ_d) na região de tração é apresentada na equação 12, onde r_m é o raio de dobramento na meia espessura e α é o ângulo de dobramento (FLIMM, 1996 *apud* SCHAEFFER, 2004).

$$\varphi_d = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{y}{r_m} \right) \quad \text{Eq. (12)}$$

Considerando as fibras externas na posição y (equação 13), tem-se como deformação nas fibras externas:

$$\varphi_d = \ln \left(1 + \frac{s_0}{2r_i + s_0} \right) \quad \text{Eq. (13)}$$

A equação 14 apresenta outra forma de medir a deformação verdadeira no dobramento, sendo considerado a espessura da chapa (s_0) e o raio do punção (r_p) ao invés do raio médio (r_m).

$$\varphi_d = \ln \sqrt{1 + \frac{s_0}{r_p}} \quad \text{Eq. (14)}$$

Para SCHAEFFER (2004), as deformações de um componente variam de um ponto ao outro. Portanto, para calcular a deformação em cada ponto, devem ser utilizadas as equações 15 e 16, a fim de determinar o φ_1 e φ_2 , respectivamente. a representa a medição após a deformação e A_0 a medida antes da deformação.

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{A_0} \quad \text{Eq. (15)}$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{b}{b_0} \quad \text{Eq. (16)}$$

Conhecendo essas duas equações, é possível calcular a deformação equivalente da peça estudada, conforme equação 17.

$$\varphi_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_1 \cdot \varphi_2 + \varphi_2^2} \quad \text{Eq. (17)}$$

3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

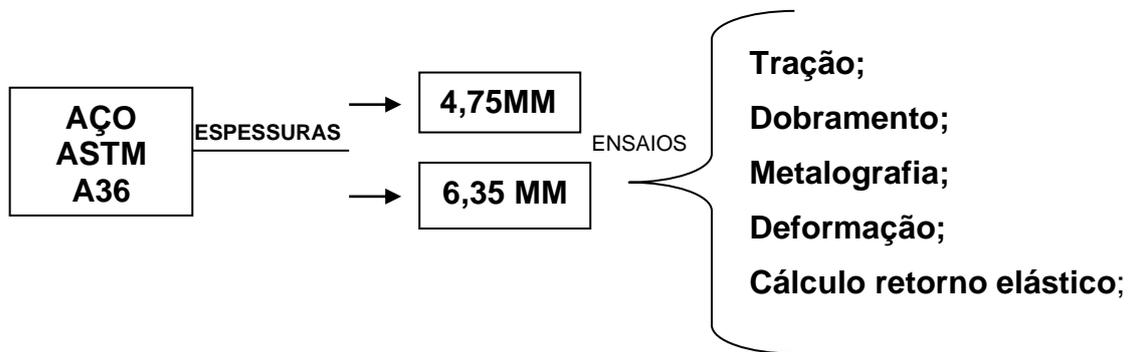


Figura 25 - Fluxograma do planejamento experimental.

Fonte: Autor, 2021.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento dos testes, foram utilizadas chapas de aço A36 com espessura de 4,75mm e 6,35mm. A36 é um aço de média resistência mecânica, apresentando limite de escoamento de 250 MPa, limite de resistência de 400 a 550 MPa.

3.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO

O procedimento empregado para a realização do ensaio de tração, seguiu a norma ABNT NBR 6152. Foram confeccionados 12 corpos de prova com espessuras de 4,75mm e 6,35 mm. As dimensões estão descritas na figura 26.

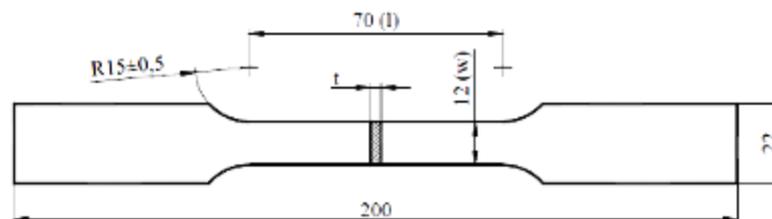


Figura 26 - Dimensões do corpo de prova do ensaio de tração.

Fonte: Autor, 2021.

Os testes foram realizados em temperatura ambiente, na máquina universal de ensaios EMIC DL 6000, alocada no Laboratório de Transformação Mecânica

(LdTM) para obtenção das seguintes propriedades mecânicas: Limite de Escoamento (LE) e Limite de Resistência (LR).

3.3 DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO NO DOBRAMENTO

Antes dos corpos de prova serem submetidos ao ensaio de dobramento, 4 corpos de prova de espessura 4,75mm e 6,35mm foram gravados com uma malha de círculos na sua superfície. Esse processo envolve uma marcação com diâmetro inicial (d_0) igual a 2,5mm, conforme apresentado na figura 27, com a finalidade de medir a deformação externa sofrida pelo material após o processo de dobramento.

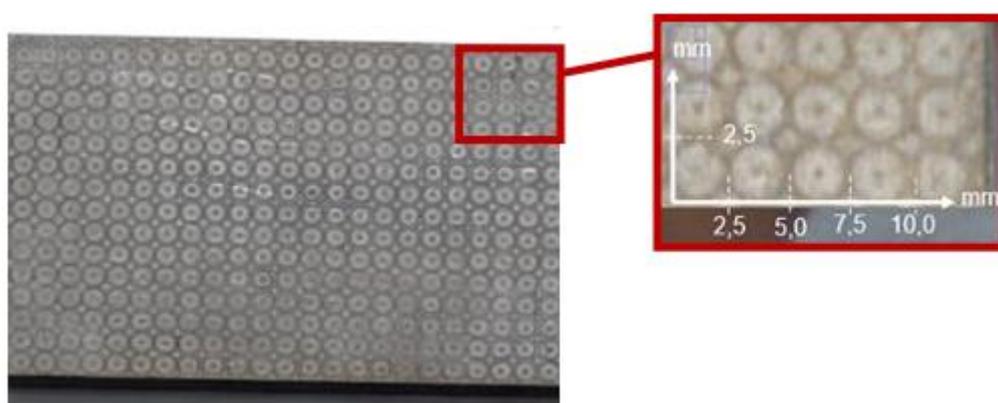


Figura 27 - Corpos de prova com a marcação da malha de círculos.
Fonte: Autor, 2021.

Segundo SCHAFFER (2008), para a realização desse processo é necessário seguir algumas orientações e métodos, a fim de garantir a qualidade do experimento. Como orientação, os corpos de prova devem estar limpos e sem sinal de sujeira e/ou gordura na superfície e o gerador de energia deve estar regulado. O método deve seguir o processo de marcação da malha: limpeza superficial das amostras e colocação de tela: i) sobre os corpos de prova deve ser colocado uma tela semipermeável com a geometria da malha a ser gravada, ii) sobre a tela é adicionado um feltro embebido em solução eletrólito, iii) passagem do rolo de material inoxidável (ligado ao outro pólo do gerador) sobre o feltro, gerando uma corrente elétrica circular entre o rolo e a chapa, que resultará no ataque químico dos corpos de prova, iv) aplicação de solução neutralizadora nos corpos de prova para cessar o ataque químico.

Após o processo de deformação, onde as amostras já possuem os círculos com as deformações em elipses (figura 28), foi possível mensurar as deformações na direção de tracionamento pelo diâmetro maior (d_1) e pelo diâmetro menor (d_2).

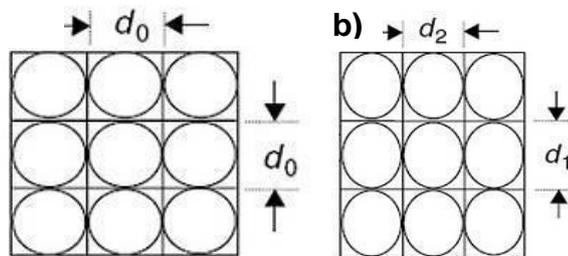


Figura 28 - (a) Representação dos círculos gravados nos CP's antes da deformação com diâmetro $d_0=2,5\text{mm}$ (b) Círculos deformados em elipses após o ensaio de dobramento, com diâmetro maior d_1 e diâmetro menor d_2 .

Fonte: SCHAEFFER, 2008.

Após o processo de dobramento das amostras, foram realizadas medições da deformação, conforme gabarito da figura 29. Este gabarito é relacionado a serigrafia para fazer a gravação das grades na chapa de aço. A tela de serigrafia apresenta este gabarito, sendo que a partir do valor inicial pré-definido em zero foi possível comparar com o gabarito as deformações ocorridas.

Along %	Grau de Def %
190	1,06
180	1,03
170	0,99
160	0,96
150	0,92
140	0,88
130	0,83
120	0,79
110	0,74
100	0,69
90	0,64
80	0,59
70	0,53
60	0,47
50	0,41
40	0,34
30	0,26
20	0,18
10	0,10
0	0,00
-10	-0,11
-20	-0,22

Figura 29 – Gabarito utilizado para medição da deformação.

Fonte: Autor, 2021.

A medição da deformação verdadeira (φ_d) na região externa da dobra, foi obtida através do software *ImageJ*. A figura 30 apresenta a linha de medição (cor verde) do software.



Figura 30 - Grade utilizada para mensurar as deformações após dobramento.

Fonte: Autor, 2021.

3.4 DOBRAMENTO EM “V”

Os processos de dobramento em “V”, para ambas as espessuras, foram realizados em uma máquina de dobramento da marca LVD com capacidade de 170 toneladas. Para os corpos de prova com espessura de 4,75 mm, foi utilizada uma matriz em V30 e uma em V40 com punção de raio de ponta de 4mm, e duas velocidades. A tabela 5 ilustra os ensaios e ferramentas utilizadas.

Tabela 5 - Ensaio de dobramento em V para espessura de 4,75 mm.
Fonte: Autor, 2021.

Ensaio 1			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
1	4,75 mm	R4 e V30	10 mm/s
2	4,75 mm	R4 e V30	10 mm/s
3	4,75 mm	R4 e V30	10 mm/s
Ensaio 2			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
4	4,75 mm	R4 e V30	15 mm/s
5	4,75 mm	R4 e V30	15 mm/s
6	4,75 mm	R4 e V30	15 mm/s
Ensaio 3			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
7	4,75 mm	R4 e V40	10 mm/s
8	4,75 mm	R4 e V40	10 mm/s
9	4,75 mm	R4 e V40	10 mm/s
Ensaio 4			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
10	4,75 mm	R4 e V40	15 mm/s
11	4,75 mm	R4 e V40	15 mm/s
12	4,75 mm	R4 e V40	15 mm/s

Para os corpos de prova de espessura 6,35mm foram utilizadas duas matrizes (V40 e V50) com a utilização de punção de raio 4mm, e com as duas velocidades de deslocamento do punção. A tabela 6 ilustra os ensaios dos corpos de prova.

Tabela 6 - Ensaio de dobramento em V para espessura de 6,35 mm.
Fonte: Autor, 2021.

Ensaio 5			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
13	6,35 mm	R4 e V40	10 mm/s
14	6,35 mm	R4 e V40	10 mm/s
15	6,35 mm	R4 e V40	10 mm/s
Ensaio 6			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
16	6,35 mm	R4 e V40	15 mm/s
17	6,35 mm	R4 e V40	15 mm/s
18	6,35 mm	R4 e V40	15 mm/s
Ensaio 7			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
19	6,35 mm	R4 e V50	10 mm/s
20	6,35 mm	R4 e V50	10 mm/s
21	6,35 mm	R4 e V50	10 mm/s
Ensaio 8			
Corpo de Prova	Espessura	Raio de punção + matriz	Velocidade
22	6,35 mm	R4 e V50	15 mm/s
23	6,35 mm	R4 e V50	15 mm/s
24	6,35 mm	R4 e V50	15 mm/s

Ao todo, foram utilizados 12 corpos de prova de 4,75mm e 6,35mm com dimensões de 250m x 40mm, totalizando 24 ensaios em dobramento em “V”. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente de 25°C.

3.5 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE DOBRAMENTO

A partir da força de dobramento foi possível definir as condições necessárias para a realização do ensaio. A força de dobramento (F_d) foi registrada durante todos os ensaios, sendo medidas e definidas as deformações (φ_d) para determinar a

tensão de escoamento (k_f) necessária na aplicação da equação da força de dobramento (F_d).

3.6 MEDIÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO

Os cálculos do retorno elástico foram determinados a partir da medição individual do ângulo de dobra antes (α_1) e após a retirada da força (α_2) de dobramento, e o Fator de Retorno Elástico (K) definido pela razão entre os ângulos medidos α_1 e α_2 , conforme equação 03.

$$K = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad \text{Eq. (03)}$$

As medições do retorno elástico foram realizadas com a utilização de um goniômetro. Durante o procedimento de dobra, a máquina foi programada para parar ao final do curso, conforme ilustra a figura 31, para, então, ser realizar a medição do ângulo α_1 exercido na dobra.

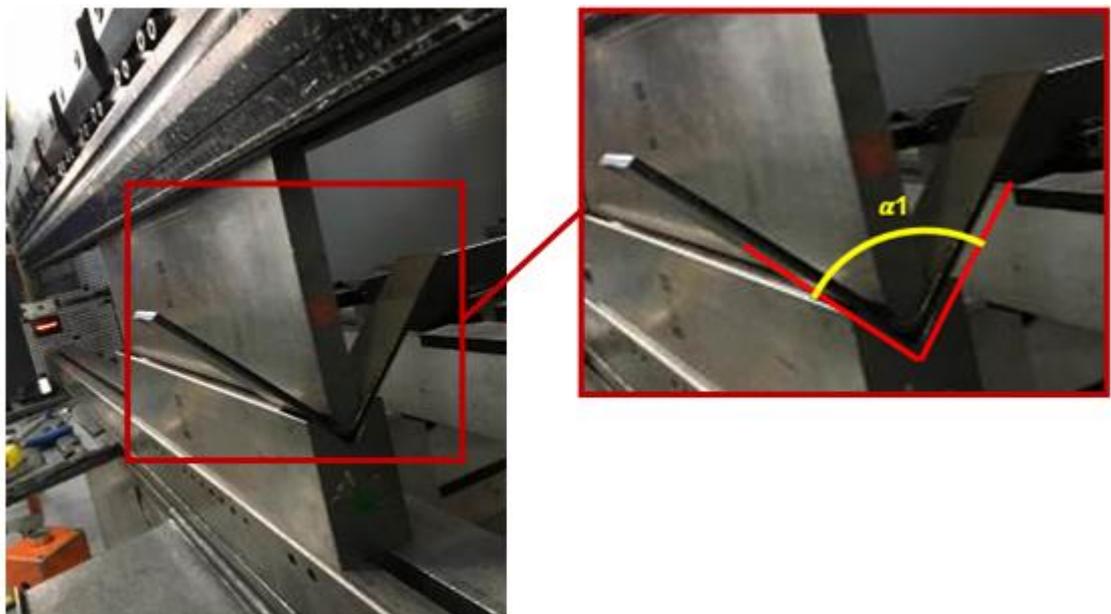


Figura 31 – Amostra durante o ensaio de dobramento.

Fonte: Autor, 2021.

A figura 32 apresenta o ângulo α_2 que deve ser medido após o retorno do punção ao formato original.

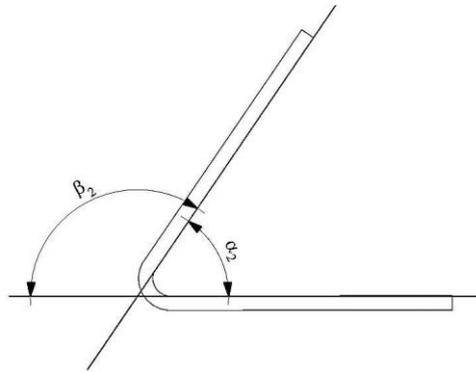


Figura 32 - Demonstração do ângulo α_2 medido após o ensaio de dobramento.
Fonte: Autor, 2021.

Após o processo de dobramento, foram realizadas as medições do ângulo seguindo as normas NBR ABNT 6153. É esperado que ao atingir o ângulo β_1 obtenha-se uma medição, e, após, obtenha-se o valor de α_1 , sendo a soma dos ângulos equivalente a 180° , respectivamente.

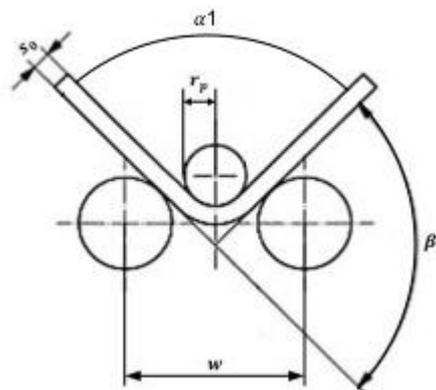


Figura 33 - Demonstração dos ângulos medidos durante o ensaio.
Fonte: Autor, 2021.

Após a obtenção das medidas dos ângulos, antes (α_1) e depois (α_2) da retirada da força, conforme figura 33, foi determinado o ângulo de retorno elástico do material (α_s) em graus ($^\circ$) através do cálculo da diferença dos ângulos medidos ($\alpha_2 - \alpha_1$).

3.7 ANÁLISE METALGRÁFICA

Com a finalidade de realizar uma análise metalográfica do material, a fim de identificar as fases de composição das amostras, após o processo de dobramento, foram cortadas quatro amostras, com dimensões 10x10 cm (4,75 e 6,35 mm), em plano longitudinal, sendo que duas amostras foram extraídas na região da dobra e duas na região onde não ocorreu deformação, com o objetivo de analisar o comportamento do material na região onde houve deformação e uma região sem deformação. As etapas do processo estão descritas na figura 34.

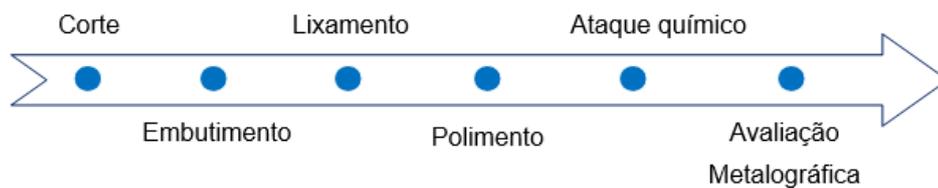


Figura 34 – Sequência do processo de análise metalográfica

Fonte: Autor, 2021.

O processo de corte foi realizado por serra manual e, em seguida, realizada a remoção de rebarbas com lixa d'água de granulometria 80. O embutimento em resina foi realizado com prensa embutidora metalográfica Fortel EFD30, sendo a pressão controlada por manômetro com variações de 150kgf/cm² a 200kgf/cm², e temperatura de 250°C. O tempo de embutimento para cada amostra foi de aproximadamente 20 minutos. O lixamento foi iniciado com granulometria 150 seguindo com 220, 320, 400, 600, 800 e 1200, respectivamente. Em seguida, foi realizado o polimento com pano de polimento e óxido de alumina em suspensão. O processo foi realizado com a politriz lixadeira Fortel PFL a 250rpm para o processo de lixamento e 600rpm para polimento. As amostras foram atacadas pelo método de imersão de aproximadamente 15 segundos em Nital 2%. As análises das microestruturas foram obtidas com o microscópio óptico com aumento de 50X, 100X, 200X, 500X e 1000X. Toda a análise metalográfica foi realizada LtDM da UFRGS.



Figura 35 – Amostras de chapas embutidas. A: Chapa de 4,75mm e B: Chapa de 6,35mm.

Fonte: Autor 2021.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O ensaio de tração teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas da tensão de escoamento (σ_{esc}), tensão máxima ($\sigma_{máx}$) e alongamento total do material.

4.1.1 Curva de engenharia

Os dados obtidos para realizar a curva de engenharia foram gerados pelo sistema computacional ligado a máquina de ensaio. Com os valores de força aplicada (F) em cada seção (A_0) do corpo de prova, foi possível determinar a tensão de engenharia (σ), enquanto a razão entre o alongamento (Δl) sofrido pelo CP e o seu comprimento inicial (l_0) definiu o alongamento total do material. A figura 36 apresenta a curva de engenharia média ($\sigma \times \varepsilon$) para o aço ASTM A36 de espessura de 4,75mm e 6,35 mm, respectivamente.

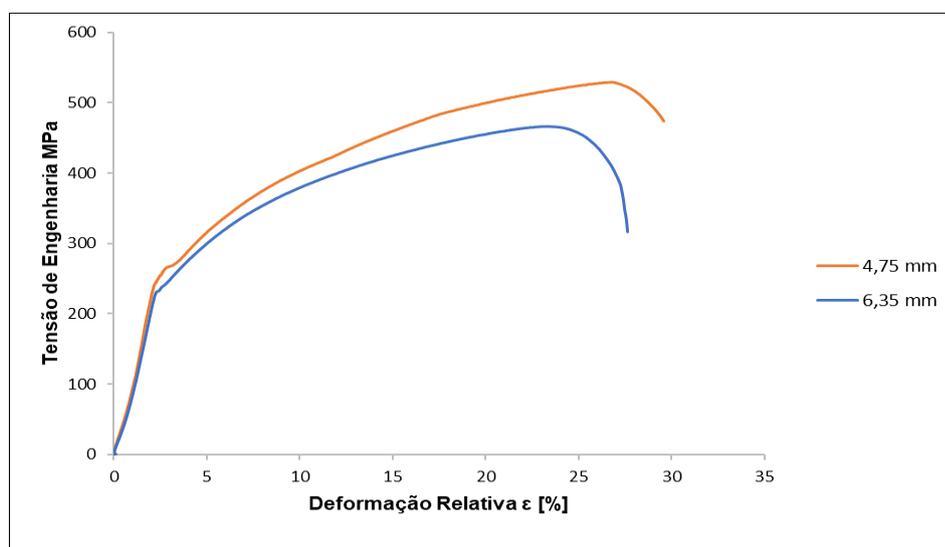


Figura 36 - Curva de Engenharia média do aço ASTM A36 em espessura de 4,75 e 6,35mm.

Fonte: Autor, 2021.

O ensaio foi realizado em duas espessuras para verificar uma possível diferença mecânica ou resistência entre as amostras. Na figura 36 foi possível observar que ambas as espessuras apresentaram variações durante o ensaio de tração. O ensaio com espessura de 4,75mm, apresentou uma variação na tensão de escoamento (σ_{esc}) de ± 15 MPa, e uma variação na tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) de $\pm 10,0$ MPa. A espessura de 6,35mm apresentou uma variação menor, sendo de ± 5 MPa na tensão de escoamento (σ_{esc}) e uma variação de 10,0 MPa na tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$). O desvio padrão ficou em 10MPa e 5MPa para o aço de 4,75mm e 6,35mm, respectivamente. As variações encontradas neste teste podem ter ocorrido, possivelmente, em virtude da fixação dos corpos de prova na máquina.

Após os ensaios de tração, os valores obtidos foram os seguintes:

- Espessura de 4,75mm: tensão de escoamento (σ_{esc}) e tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) média foi de 265 MPa e 475 MPa, respectivamente, e com uma média de alongamento (δ) de 26,9%;
- Espessura de 6,35mm: tensão de escoamento (σ_{esc}) ficou em 245 MPa e a tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) foi de 470 MPa, com um alongamento de aproximadamente de 24,2%.

Apesar dos ensaios utilizarem o mesmo material, é possível, em alguns casos, que eles se comportem de maneira não homogênea.

A partir dos valores de limite de escoamento e tensão máxima conhecida, foi possível comparar com as informações fornecidas pelo fabricante do material (limite de resistência de 400 a 550 MPa; limite de escoamento 250 MPa mínimo) confirmando que os resultados encontrados permanecerem de acordo com o descrito pelo fabricante.

4.1.2 Curva de escoamento

Para a construção do gráfico da curva tensão x deformação verdadeira ($k_f \times \varphi$) do aço ASTM A36, com espessuras de 4,75mm e 6,35mm, foram utilizadas as médias dos seis ensaios para cada material. Em cada ensaio do corpo de prova, foi gerada uma curva de escoamento. A partir da curva de escoamento foram

demonstrados os valores de coeficiente de resistência (C), índice de encruamento (n) e a curva real, ajustando o modelo em relação aos valores medidos.

A equação $kf = 833 \varphi^{0,333}$ representa a curva de escoamento para o aço 4,75mm, e a equação $kf = 814 \varphi^{0,333}$ para a espessura de 6,35mm. A partir das equações, foi possível determinar o comportamento plástico do material e a tensão de escoamento do aço ASTM A36 para diferentes valores de deformação verdadeira (φ).

A curva $kf \times \varphi$, demonstrada na figura 37, apresenta o comportamento plástico dos materiais durante os ensaios experimentais, e, com a equação de Ludwig (equação 08, onde C representa o coeficiente de resistência ao material (para $\varphi=1$) e “ n ” é o coeficiente ou índice de encruamento), foi possível determinar, matematicamente, a curva de escoamento. Os coeficientes da equação do gráfico foram obtidos das médias dos resultados dos ensaios.

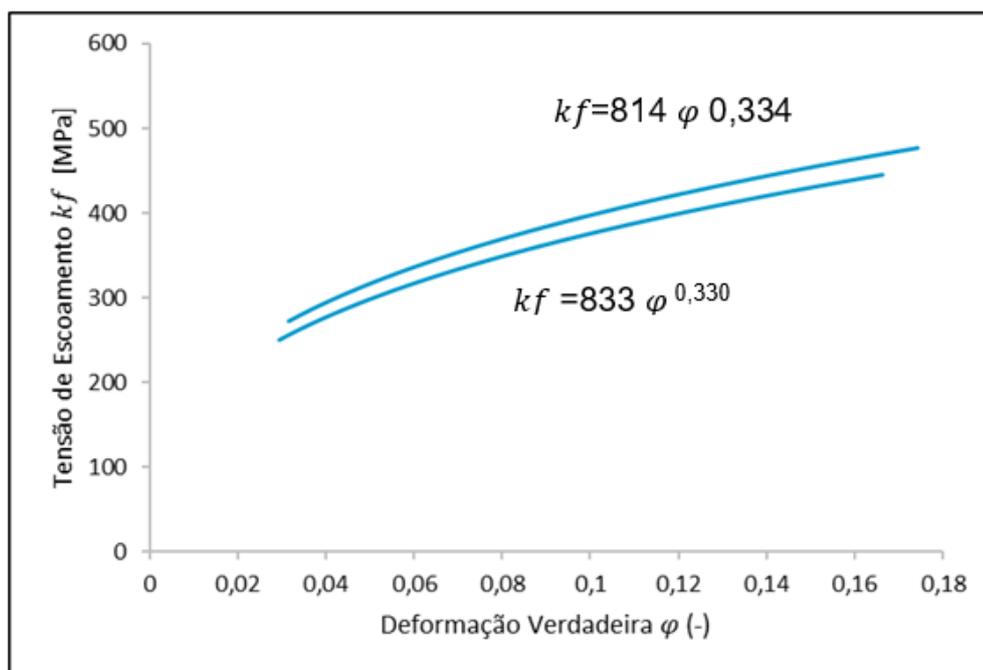


Figura 37 - Curva de escoamento média para a espessura de 4,75mm e 6,35mm.

Fonte: Autor, 2021.

Uma vez conhecida a tensão de escoamento (kf), foi possível determinar a deformação verdadeira (φ) e vice-versa. A variação encontrada pode,

provavelmente, ter sido ocasionada por alguma falha ocorrida durante o processo, gerando uma alteração nos valores.

4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento foi realizado para ambas as espessuras (4,75mm e 6,35mm) com duas velocidades diferentes (10m/s e 15 m/s) e com um raio de punção de 4mm, porém com matrizes diferentes, seguindo a tabela 5.

4.2.1 Medição da força do dobramento

Para a criação do gráfico de deslocamento do punção (h) x Força de dobramento (F_d), foram considerados todos os corpos de prova, e realizado uma média aritmética simples de cada ensaio. Na figura 38 foi possível observar que, para efetuar a dobra em V do aço ASTM A36, no ensaio 1 e 2, com espessura de 4,75mm, foram necessárias aproximadamente 24 toneladas de força aplicada pela máquina. Ainda, foi possível verificar que a força (F_d) aplicada não variou com o deslocamento do punção (h), apresentando um comportamento similar em ambos os ensaios para os corpos de prova de 4,75mm.

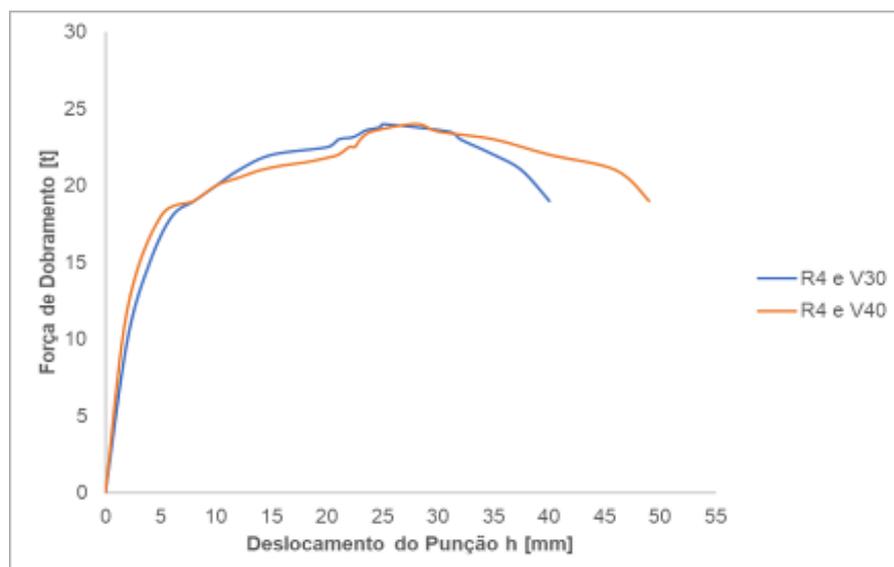


Figura 38 – Força de dobramento x Deslocamento do Punção para os corpos de prova de 4,75mm.

Fonte: Autor, 2021.

A figura 39 apresenta a curva de Força de dobramento (Fd) x deslocamento do punção (h), para o aço ASTM A36 no ensaio 3 e 4 de espessura 6,35mm.

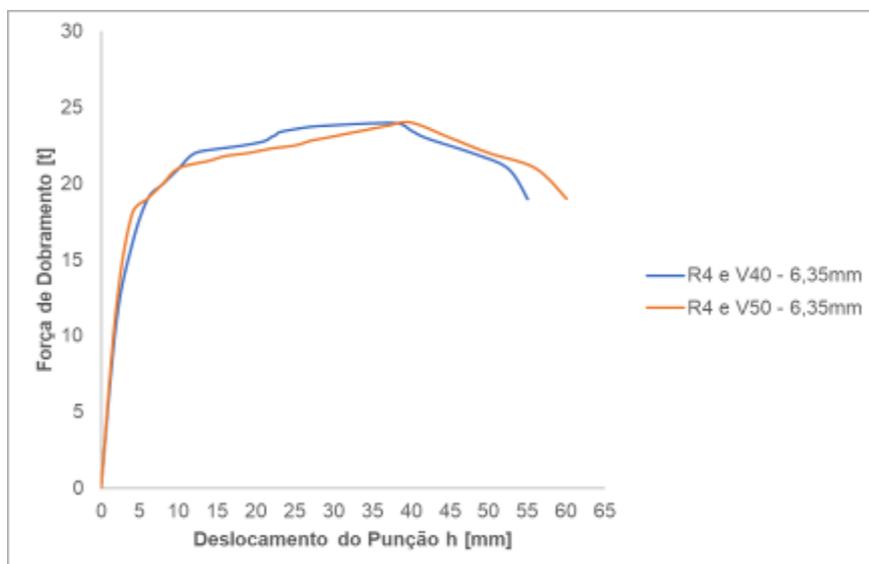


Figura 39 - Força de dobramento x Deslocamento do Punção para os corpos de prova de 6,35mm.

Fonte: Autor, 2021.

Para todos os ensaios, a força que a máquina utilizou para realizar os dobramentos descritos nesse trabalho, foi de, aproximadamente, 24 toneladas, de uma capacidade máxima de força de 170 toneladas.

4.2.2 Retorno elástico

Após o processo de dobra dos 24 corpos de prova, foi realizada a medição do ângulo de dobramento, durante o dobramento e após o dobramento, com o auxílio do goniômetro. O fator de retorno elástico (K) foi determinado pela equação 03. A tabela 5 apresenta o ensaio para o material com espessura de 4,75mm e 6,35mm com as médias das diferenças dos ângulos α_1 e α_2 . O desvio padrão do ângulo médio ficou em $0,55^\circ$.

Após a realização do processo de dobramento e a obtenção das medições, os valores médios dos ângulos e dos coeficientes (K) de retorno elástico foram mensurados e demonstrados na figura 40 para ambas as espessuras.

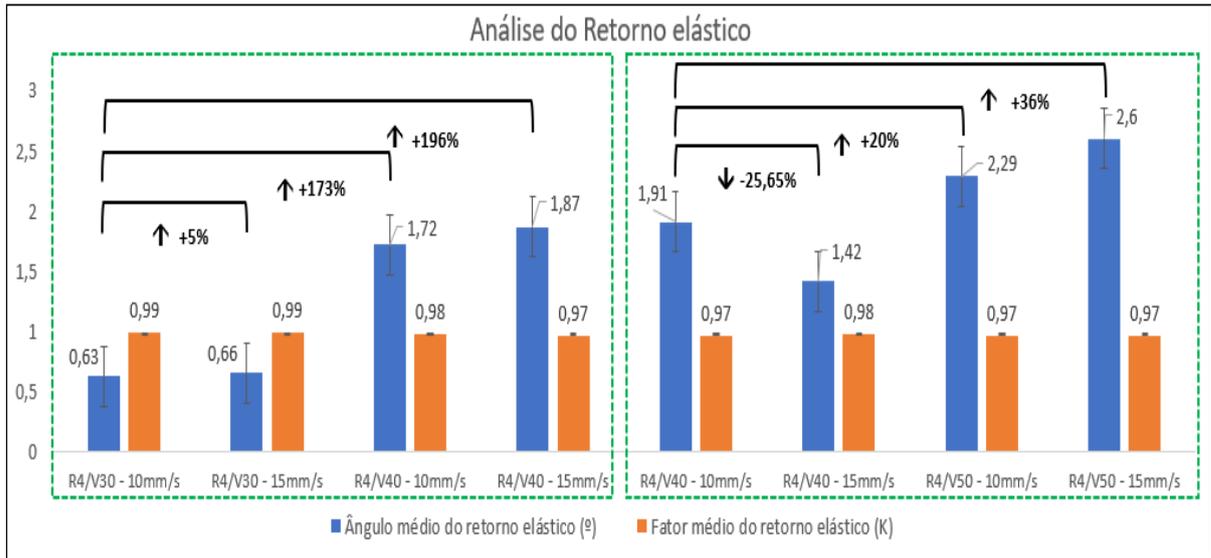


Figura 40 – Análise das diferenças dos ângulos α_1 e α_2 dos ensaios.

Fonte: Autor, 2021.

Analisando os valores obtidos no ensaio de dobramento, foi possível observar que a velocidade demonstrou pouca influência no ângulo de retorno elástico, quando utilizada a mesma matriz (V30) e raio de punção (R4). O ângulo médio manteve-se em $0,63^\circ$ no primeiro ensaio e $0,66^\circ$ no segundo ensaio, apresentando uma diferença em torno de $0,03^\circ$.

Para os ensaios 3 e 4, a velocidade também não apresentou uma diferença relevante, apresentando o ângulo médio de retorno elástico em $1,72^\circ$ e $1,87^\circ$ para o terceiro e quarto ensaio, respectivamente, sendo a diferença do ângulo de retorno elástico permanecendo em torno de $0,15^\circ$. Foi possível observar que quanto maior a abertura da matriz, maior é o ângulo de retorno encontrado. O mesmo ensaio foi realizado para a espessura de 6,35mm.

Nos ensaios 5, 6, 7 e 8, a média do ângulo de retorno elástico teve uma tendência de alta à medida que aumentou o ângulo da matriz e a velocidade. No ensaio 5 e 6, utilizando a mesma matriz, porém com velocidades diferentes, a diferença de ângulo ficou em $0,49^\circ$. Somente neste ensaio a velocidade maior (15mm/s) teve um retorno elástico do aço menor $1,42^\circ$, que em relação a velocidade de 10mm/s apresentou retorno elástico de $1,91^\circ$. Essa diferença pode ter sido gerada por um defeito na hora do processo. Os ensaios 7 e 8, seguiram a mesma lógica dos demais, resultando em uma diferença de $0,31^\circ$ com um ângulo médio de retorno de $2,29^\circ$ para a velocidade de 10mm/s, e $2,60^\circ$ para a velocidade de

15mm/s. Para a espessura de 6,35mm, da mesma forma, foi possível concluir que quanto maior a abertura da matriz, maior foi a variação média do ângulo.

Com todos os valores do retorno elástico calculados, foi possível observar que a velocidade não teve influência significativa durante os ensaios. O erro relativo foi calculado a partir da subtração do valor médio do ângulo de retorno elástico com o valor teórico de 0,99. Na análise 1, que representa a espessura de 4,75mm, matriz de 30mm, com velocidades diferentes, o erro relativo ficou em 0,68% no primeiro ensaio e 0,72% no segundo ensaio. A diferença de velocidades alterou 0,04% no valor K do retorno elástico.

No ensaio 2, também foram utilizadas duas velocidades diferentes com espessura de 4,75mm, porém com uma matriz de 40mm. Nesse ensaio com velocidade de 10mm/s o erro relativo ficou em 1,86% e para a velocidade de 15mm/s o erro relativo ficou em 2,03%, apresentando uma diferença de fator k de retorno elástico 0,17%.

No ensaio 3, foi utilizado o aço de 6,35mm, com uma matriz de 40mm e duas velocidades diferentes. Com a velocidade de 10mm/s, a variação do fator K permaneceu em 2,09%, e para a velocidade de 15mm/s permaneceu em 1,55%, com uma diferença de 0,54%. Somente este ensaio a velocidade menor teve uma variação maior do fator K.

No ensaio 4, foram utilizadas duas velocidades diferentes e espessura de 6,35mm, porém com uma matriz de 50mm. A velocidade de 10mm/s apresentou erro relativo em 2,49%, e na velocidade de 15mm/s o erro relativo permaneceu em 2,83%, apresentando uma diferença de fator k de retorno elástico 0,34%.

Após todos os processos e cálculos, foi possível analisar os valores significativos durante o ensaio de dobramento, sendo observada uma variação maior do fator K, quando utilizada uma matriz de ferramenta de ângulo de abertura maior. Quando comparado com diferentes velocidades, foi encontrada uma leve variação, resultando um valor de retorno elástico (fator K) superior, quando utilizada uma velocidade de punção maior.

A figura 41 demonstra que houve uma variação maior do fator K, quando utilizado uma matriz de ferramenta de ângulo de abertura maior.

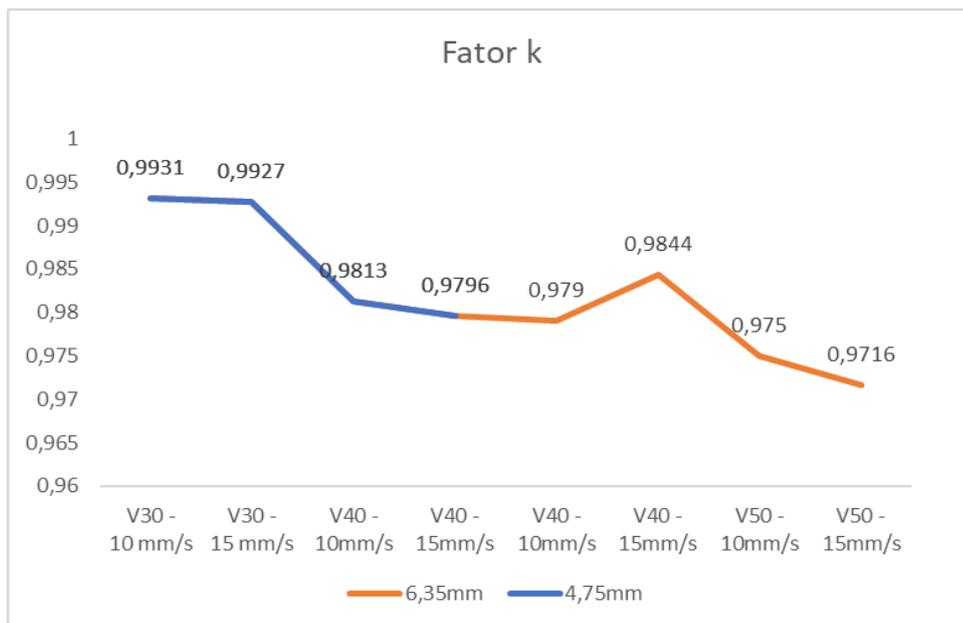


Figura 41 - Variação do retorno elástico relacionado com o ângulo de abertura da matriz e velocidade.

Fonte: Autor, 2021.

Na figura 42 é possível observar a variação dos resultados à medida que a matriz da ferramenta aumenta o diâmetro do canal, o valor K do retorno elástico tende a demonstrar um retorno elástico maior do aço.

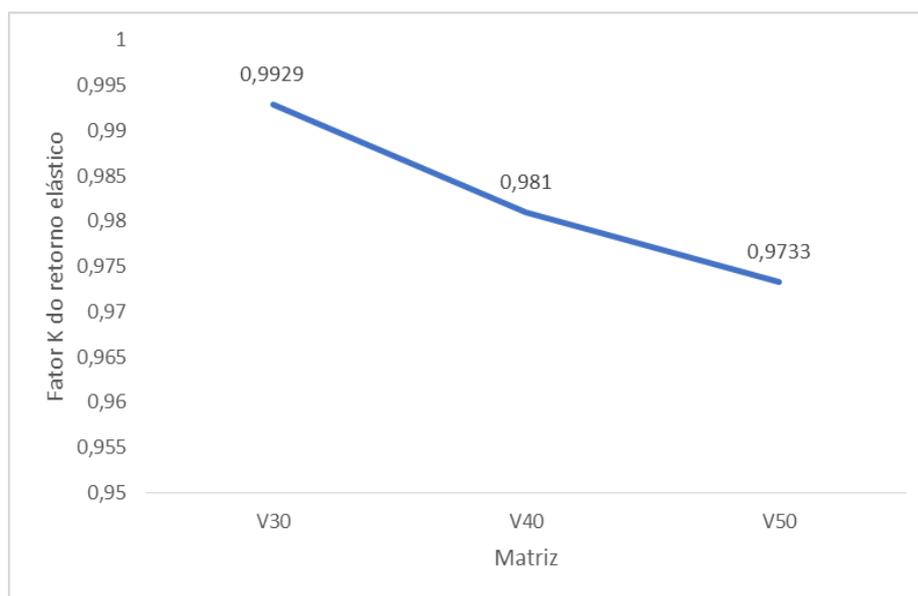


Figura 42 - Variação do fator de retorno elástico K, em relação a matriz.

Fonte: Autor, 2021.

Segundo LAL *et al.*, (2018), o retorno do aço afeta a dimensão e as formas do material, ocasionado pela remoção da carga da ferramenta punção, gerando, então, a recuperação elástica do material. Este fenômeno é, geralmente, determinado pelo ângulo de dobra da chapa de aço. Quanto maior o ângulo de dobra maior o retorno elástico (WANG *et al.*, 2017).

Para BRESCIANI *et al.*, (2011) os fatores determinantes para o aumento do retorno elástico são curvatura de dobramento, aumento da espessura da chapa e do ângulo de dobramento que favorecem maiores níveis de deformação plástica. Segundo HUANG *et al.*, (1998) o maior retorno elástico do aço foi evidenciado na medida que o ângulo das matrizes era maior. De forma similar, conforme esperado, o resultado obtido a partir do ensaio de dobramento evidenciou que quanto maior a abertura de matriz utilizada, maior foi o retorno elástico. Foi possível observar também, que alterando a velocidade do ensaio, obteve-se uma variação do ângulo, e, conseqüentemente, do fator K, porém uma variação muito baixa. No entanto, a variação foi aumentando à medida que a abertura do canal da matriz do processo aumentava.

4.2.3 Deformação plástica

Após o processo de dobramento, utilizando 4 corpos de prova com marcação de deformação de ambas as espessuras, foi possível medir a região externa da dobra, sendo realizada a medição de 5 valores em A1 e de A2 para cada corpo de prova. A figura 43 apresenta a deformação plástica média encontrada em todos os ensaios. O desvio padrão da deformação em A1 e A2 foi de 0,46 e 0,07, respectivamente.

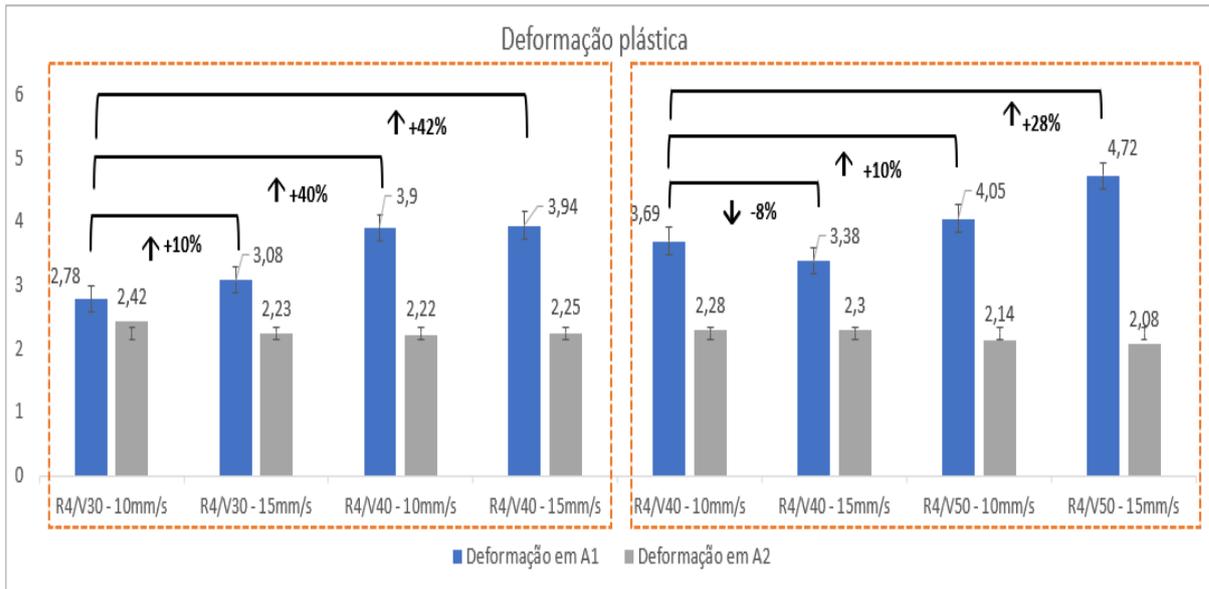


Figura 43 – Deformação plástica média dos ensaios.

Fonte: Autor, 2021.

A deformação ocorrida no processo de dobramento obteve uma variação de 42% quando comparando os ensaios 1 e 4. Estes ensaios, tiveram uma alteração da matriz de V30 para V40 bem como da velocidade de 10mm/s para 15mm/s na espessura de 4,75mm. A análise do ensaio 5 e 8, a diferença foi de 28% quando alterada a matriz de V40 para V50 e a velocidade de 10mm/s. Em todos os ensaios foi verificada uma possível tendência de aumento de variação de deformação em A1 e A2, quando utilizadas matrizes e velocidades maiores. A deformação dos ensaios 5 e 6 não foi aplicada essa comparação, ficando a deformação equivalente maior na velocidade de 10mm/s. A tendência de diminuição do ângulo de dobra, provavelmente, deve-se a alguma possível falha durante o processo de dobramento. Com base nisso, foi possível deduzir que quanto maior a velocidade para o processo, maior é a deformação.

4.2.3.2 – Medição da deformação utilizando o gabarito

Após as medições utilizando o *software ImageJ*, os mesmos corpos de prova foram utilizados para medição utilizando o gabarito representado pela figura 29.

Tabela 7: Valores de deformação relativa e verdadeira

Fonte: Autor, 2021.

Ensaio	Espessura	Raio de Punção e Matriz	Velocidade (mm/s)	Deformação Relativa ϵd (%)	Deformação Verdadeira ϕd (-)
1	4,75	R4 + V30	10	10	0,10
2			15	12	0,12
3		R4 + V40	10	10	0,10
4			15	14	0,14
5	6,35	R4 + V40	10	20	0,18
6			15	22	0,20
7		R4 + V50	10	28	0,25
8			15	30	0,26

Com a utilização do gabarito foi possível identificar que quanto maior a velocidade e a abertura da matriz, maior foi a deformação relativa e verdadeira do processo. Sendo assim a máxima deformação (ϕd) obtida foi de 0,26 e deformação relativa (ϵd) igual a 30% para o ensaio 8.

4.3 ANÁLISE METALGRÁFICA

A partir da análise metalográfica, foi possível reconhecer as fases (ferrita e perlita) de cada material bem como observar possíveis defeitos no aço. Após a análise metalografica foi determinada a composição das fases do material, conforme apresentado nas figuras 44, 45, 46 e 47.

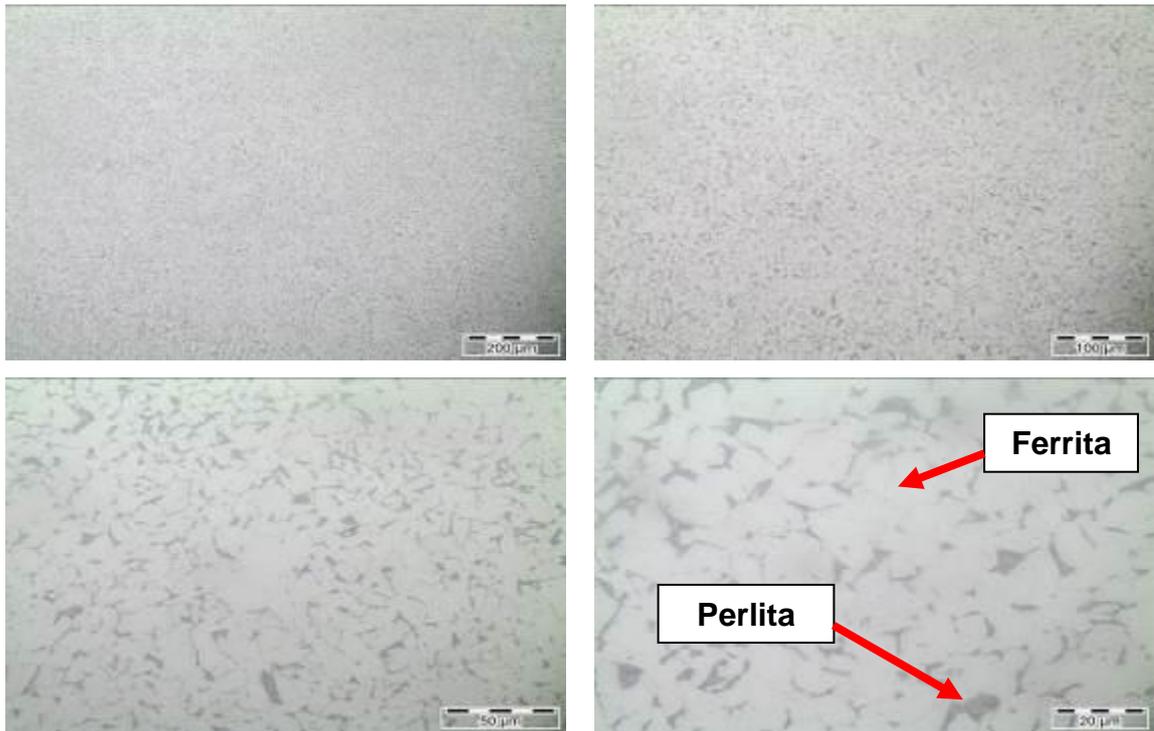


Figura 44 – Análise metalográfica da chapa 4,75mm na região sem deformação. A: Aumento de 100x, B: Aumento de 200X, C) Aumento de 500X e D) Aumento de 1000x.

Fonte: Autor, 2021.

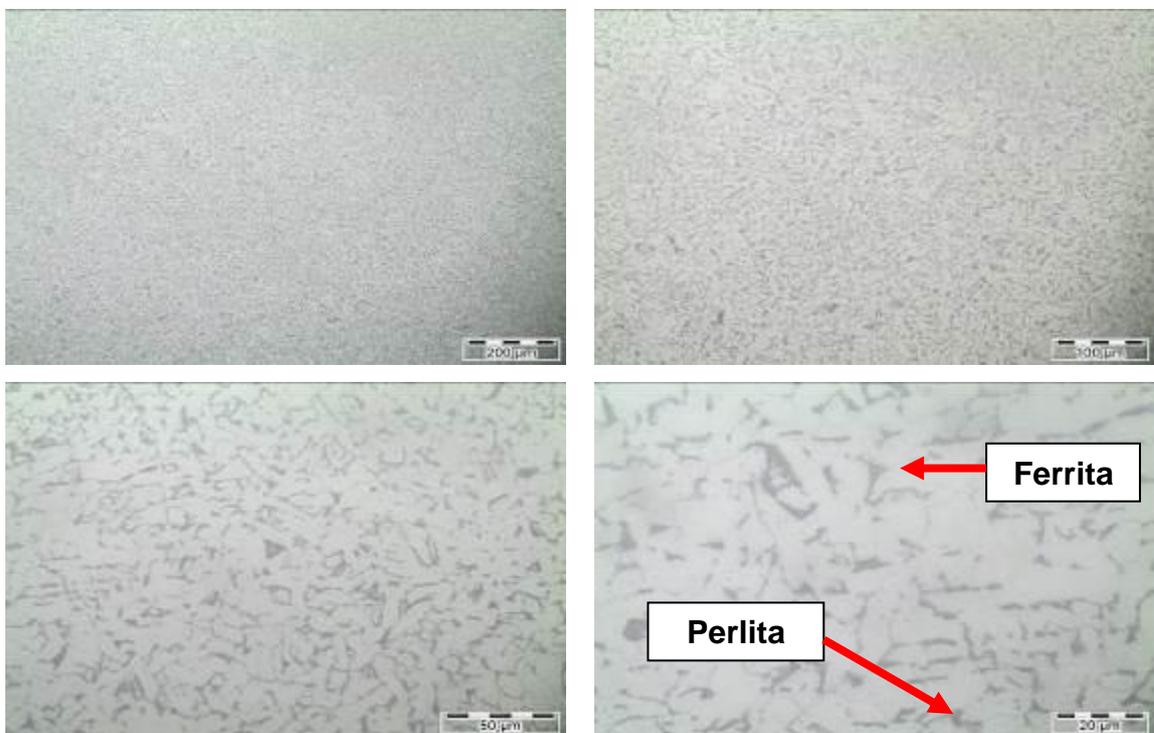


Figura 45 - Análise metalográfica da chapa 4,75mm na região da dobra. A: Aumento de 100x, B: Aumento de 200X, C) Aumento de 500X e D) Aumento de 1000x. Fonte: Autor, 2021.

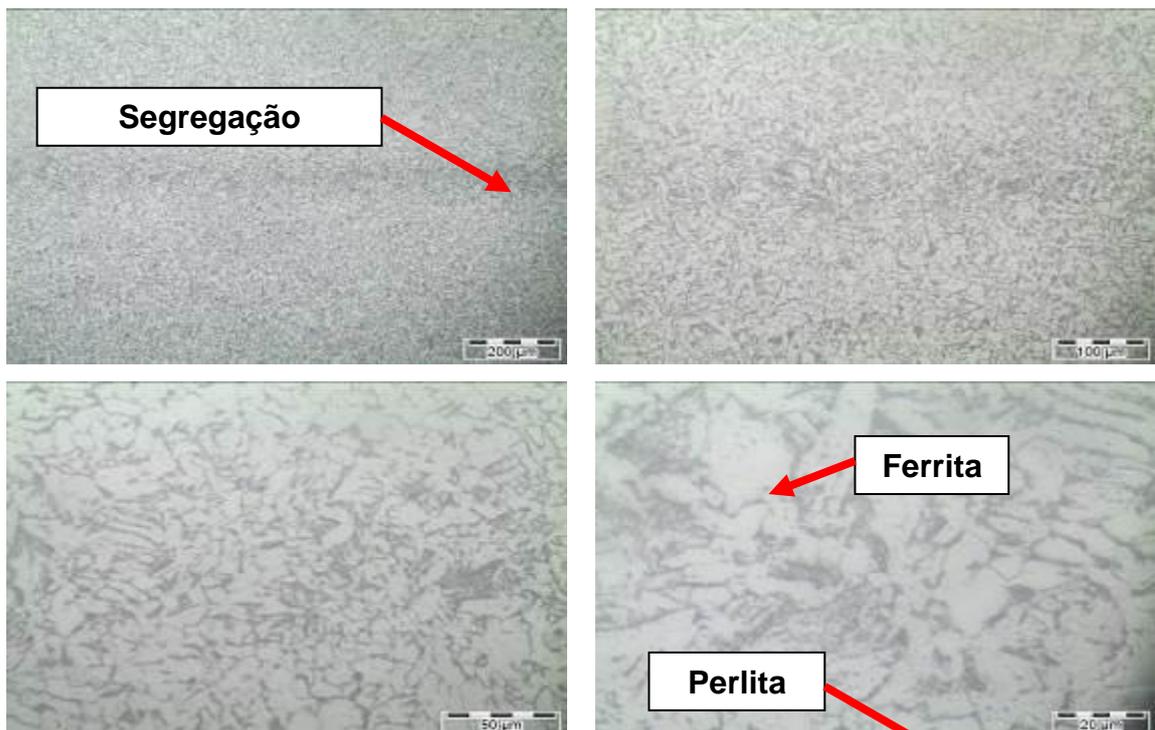


Figura 46 - Análise metalográfica da chapa 6,35mm na região sem deformação. A: Aumento de 100x, B: Aumento de 200X, C) Aumento de 500X e D) Aumento de 1000x. Fonte: Autor, 2021.

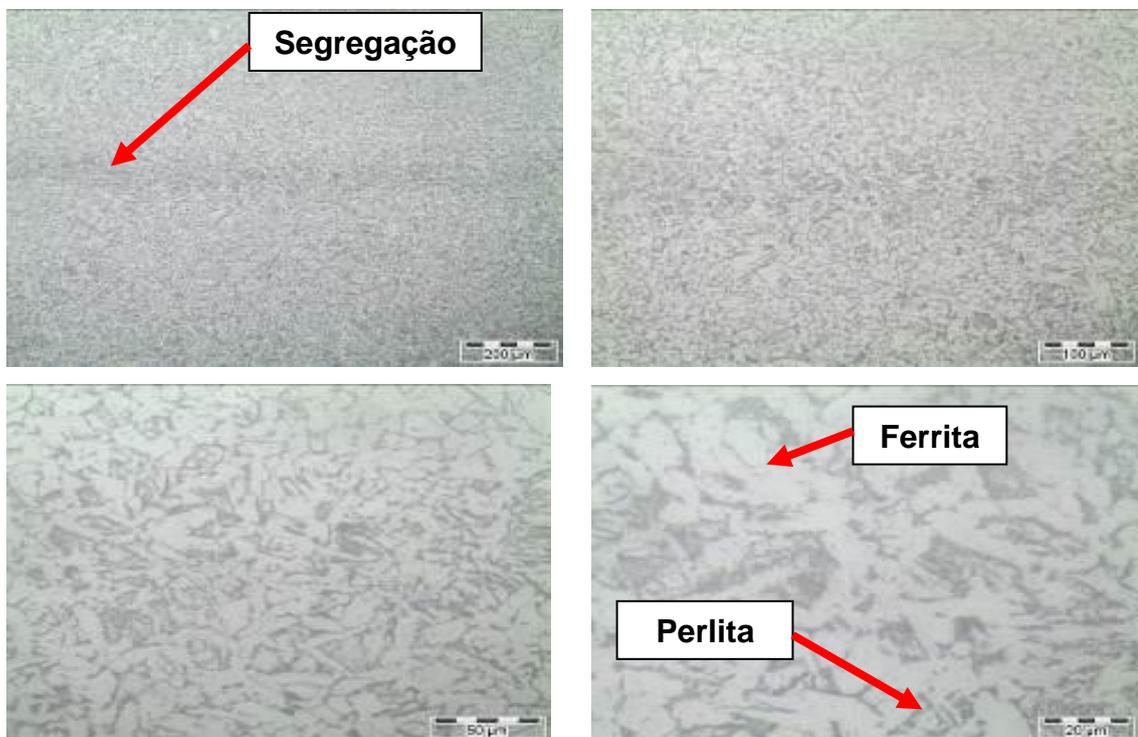


Figura 47 - Análise metalográfica da chapa 6,35mm na região da dobra. A: Aumento de 100x, B: Aumento de 200X, C) Aumento de 500X e D) Aumento de 1000X. Fonte: Autor, 2021.

As análises do material anterior ao processo permitiram observar que o aço ASTM A36 apresentava fases bem definidas de grãos de perlita fina e ferrita, conforme indicado pelo fabricante do material. Todas as amostras apresentaram microestruturas parecidas, o que justifica os resultados de resistência mecânica terem ficado próximos. Na análise metalográfica das amostras dobradas, foi observado (figura 47), que houve uma segregação, possivelmente, ocasionado durante o processo de fabricação do aço. Esse defeito, possivelmente, foi formado pelo lingotamento contínuo no agitador magnético do fabricante, sendo que esse defeito pode, de forma negativa, interferir na qualidade do aço, ocasionando uma ruptura do processo, apesar de que isto não foi verificado nas amostras testadas.

5. CONCLUSÃO

Foi possível concluir que o objetivo proposto foi atendido, possibilitando compreender o comportamento do retorno elástico do aço ASTM A36, para ambas as espessuras e em determinadas situações.

- O retorno elástico é dependente de fatores/parâmetros, incluindo espessura do material, velocidade de dobramento e ângulo de abertura da matriz, que implicam diretamente no bom desempenho do produto;
- Parâmetros que envolvem tanto espessura do material quanto velocidade de conformação no processo e ferramentas utilizadas são algumas características indicadas pela literatura como essenciais dentro deste processo;
- Conforme aumentam as alterações das variáveis (velocidade, espessura e ângulo), o fator K do retorno elástico também aumenta;
- A combinação desses fatores interfere diretamente no desempenho do fator K;
- O aprimoramento de todos os parâmetros influencia o bom desempenho e funcionamento do aço após o processo de dobra;
- Para determinar os parâmetros necessários para otimizar o processo, é necessário recorrer a processos de otimização o que envolve uma perspectiva futura de continuação deste trabalho.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Analisar alterando o raio de punção do processo, detalhando as variações do retorno elástico causado pelo raio de punção;
- Analisar o retorno elástico utilizando lubrificantes durante o ensaio de dobramento, a fim de identificar possíveis variações do fator K durante o processo;
- Realizar simulação computacional do material durante ensaios de dobramento, com o objetivo de prever seu comportamento e pré-definir parâmetros de ensaio, realizando um comparativo com dados obtidos experimentalmente;
- Verificar as deformações e retorno elástico do aço ASTM A36 em diferentes processos de dobramento tais como, dobramento em U, dobramento em matriz de deslizamento e dobramento com ressalto no punção, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- ABDULHAY, B.; BOUROUGA, B.; DESSAIN, C. Experimental and theoretical study of thermal aspects of the hot stamping process. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 5, p. 674-685, 2011.
- ALMANSBA, M.; OUALI, M. Ould; HANNACHI, N. E. **Micromechanical and phenomenological approaches of the sheet folding process**. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 3359-3368, 2011.
- ALTAN, T.; OH, S.; GECEL, H. L. **Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações**. Publicação EESC-USP, São Carlos, 1999.
- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. ABS. **Materials and Welding**. Houston: ABS, 2014, Chapt 3-4.
- ARCELORMITTAL, 2009. **Dual Phase and Complex Phase steels**. Automotive Worldwide.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6153: **Produtos metálicos – Ensaio de dobramento semi-guiado**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASTM A36 / 36M. **Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards**. USA: [s.n.]. 2008. 4p.
- BENAZZI JUNIOR, I; CAVERSAN, E.G. **Tecnologia de Estampagem 2: Dobra e Repuxo**. Fatec: São Paulo, 2012.
- BENSON, Steve D. **Reviewing bottom bending and nested parts**, April 2002.
- BERGS, Thomas et al. **Modelagem de processos de estampagem em uma Internet de produção**. CIRP TESConf, 2019.
- BOFF, U.; ZANLUCHI, J.J.D.; SCHAEFFER, L. **A Influência da Lubrificação no Retorno Elástico em Tiras Conformadas de Aço Dual Phase DP600 e DP800**. In: **SEMINÁRIO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA DO IFSul**, 2. 2013, Sapucaia do Sul. Anais Inovtec, 2013.

BRESCIANI FILHO, Ettore et al. **Conformação Plástica Dos Metais. 6. ed.** Campinas: Epusp, 2011. 254 p.

CARLESSO, Amanda et al. Análise comparativa dos aços ASTM A131 AH36 e ASTM A36: **Um estudo de caso do uso de um dos aços no piso de um módulo para FPSO.**, 2018.

CHANDRASEKARAN, P.; MANONMANI, K. **A review on springback effect in sheet metal forming process.** In: **Int Conf Syst Sci Control Commun Eng Technol. 2015.** p. 43-49.

DA SILVA, Rival Coelho; GHENO, Simoni Maria. **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ESTRUTURAL DO AÇO ASTM A131 CLASSE DH36 EM COMPARAÇÃO COM AÇO ASTM A36 UTILIZADO PARA PROJETOS ESTRUTURAIS.** SITEFA-Simpósio de Tecnologia da Fatec Sertãozinho, v. 1, n. 1, p. 153-168, 2018.

DAMETEW AW, Gebresenbet T (2017) **Study the Effects of Spring Back on Sheet Metal Bending using Mathematical Methods.** J Material Sci Eng 6: 382.

DATSKO, J; YANG, C.T. **Correlation of bendability of materials with their tensile properties.** **Journal of Engineering for Industry, USA,** v. 82, n. 4, p. 309-313, Nov. 1960.

DELFINO, Lincoln Cristiano; DE CASTRO, Sylvio Mauro; FRANCO, Renato Ribeiro. **Eliminação de deformação e engripamento no processo de estampagem utilizando o eletrodo revestido N9025.** 2016.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica. 2a Edição,** Ed. Guanabara, Rio de Janeiro, 1981.

FLIMM, J. **Spanlosen Formgebung.** 7 ed. München: Hanser Lehrbuch, 1996. apud SCHAEFFER.

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

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. **Ensaaios de Materiais.** LTC, 2ª ed. 2014.

GORNI, A. A.; SILVEIRA, J. H. D.; REIS, J. S. S. **Um panorama do Desenvolvimento Recente de chapas grossas e suas Aplicações. Corte e Conformação de Metais**, 2:19, pp. 78-93, novembro 2006.

GRUPIONI, C. V.; FAKUGAUCHI, C. S.; RIBEIRO, R. B.; SILVA, M. B.; PEREIRA, M. S.; **Procedimento para caracterização microestrutural de um aço bifásico**, Contribuição Técnica apresentada no VIª Conferência Brasileira sobre temas de Tratamento Térmico, 2012.

HORNBOGEN, E.; Becker, E; Becker, J; Stratmann, **P-Dual-Phase Gefüge. Zeitschrift für Metallkunde**, 71 (1), January, p 27-31, 1980.

HU, Jack; MARCINIAK, Zdzislaw; DUNCAN, John (Ed.). **Mecânica de conformação de chapas** . Elsevier, 2002.

HUANG, Y.; LEU, D. **Effects of process variables on v-die bending process of steel sheet**. J. Mech. Sci., 1998.

HUANG, Yuung-Ming. **Finite element analysis on the V-die coining bend process of steel metal. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 34, n. 3-4, p. 287-294, 2007.

IVANIŠEVIĆ, Aljoša et al. **Stress state and spring back in v-bending operations**. Journal for Technology of Plasticity, v. 39, n. 2, p. 157-167, 2013.

JUNG, Jaebong et al. **Anisotropic hardening behaviour and springback of advanced high-strength steels**. Metals, v. 7, n. 11, p. 480, 2017.

KAUPPER, Markus; MERKLEIN, Marion. **Bendability of advanced high strength steels—A new evaluation procedure**. CIRP Annals, v. 62, n. 1, p. 247-250, 2013.

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

KOMGRIT, L. et al. **Elimination of springback of high-strength steel sheet by using additional bending with counter punch**. Journal of Materials Processing Technology, v. 229, p. 199-206, 2016.

KRAUSS, G. 2015. **Steels: Processing, structure, and performance**. Materials Park, OH: ASM International

LAJARIN, Sérgio Fernando et al. **Estudo do Retorno Elástico em Dobramento de Chapas Metálicas**. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA. 2012.

LAL, Radha Krishna et al. **Study of factors affecting Springback in sheet metal forming and deep drawing process**. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 2, p. 4353-4358, 2018.

LANGE, K.; LIEWALD, M. **Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft**. Bearb. 2. Springer-Verlag: Berlin, 1990. p. 629.

LAWANWONG, K; HAMASAKI, H; HINO, R; YOSHIDA, F. **A novel technology to eliminate U-bending springback of high strength steel sheet by using additional bending with counter punch**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY OF PLASTICITY 11., 2014. Nagoya. Procedia Engineering, Oct. 2014. p.957-962.

LEU, D. **A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals**. Journal of Materials Processing Technology, Taiwan, n.66, pp. 9-17, Oct. 1997.

MAI, S.P., Wen, C.S., Lu, J., **Surface-modified steel sheets and corrugated panels in three-point**. International Journal of Mechanical Sciences, 2018. p. 10-20.

MALCIOĞLU, Ali Ulaş; DOĞAN, Çisem; İNEL, Canan. **Comparison of diversified casting methods on mechanical and microstructural properties of 5754 aluminum alloy for automotive applications**. In: Light Metals 2019. Springer, Cham, 2019. p. 409-415.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L. **The Mechanics of Sheet Metal Forming**, Ed. Edward Arnold, Inglaterra, 2002

MARCONDES, P.V.P. **Manufatura de Chapas Metálicas – Dobramento**. Disponível

em:<ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM297TM159/Artigos/Edicao25_Art_Tec_UFRP_R_PauloMarcondes_Dobramento_Versao01.pdf>.

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.

MURARI, F. D.; **Dissertação de Doutorado em engenharia mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais. Cinética de envelhecimento de aços dual phase de baixa resistência mecânica laminados à frio.**, Belo Horizonte, 2009.

NIWIR, M. A. **Bending of Sheet Metal (st37) Using 90 Degree to Estimate Blank Dimensions.** 2015.

OGAWA, T., YOSHIDA, F., 2011. **Springback analysis on U-bending with bottoming. Proceedings of the 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET)**, 1129–1136.

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

PENTEADO, F. **Processos de Estampagem.** Disponível em: <http://bmalbert.yolasite.com/resources/Estampagem.pdf>. Acesso em: 20 novembro 2020.

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

PEROTONI, L. **Ensaio de dobramento em chapas de aço a avaliação do retorno elástico.** Porto Alegre: UFRGS, 2008. 15f. Relatório Técnico do Laboratório de Transformação Mecânica/UFRGS.

PURWADI, W.; BANDANADJAJA, B.; IDAMAYANTI, D. **Shifting of the neutral line at a v-bending process of AISI 1015 steel plate.** In: Journal of Physics: Conference Series. 2020. p. 012126.

RÈCHE, D; BESSON, J; STUREL, T; LEMAINÉ, X; GOURGUES-LORENZON, A.F. **Analysis of the air-bending test using finite-element simulation: application to steel sheets.** International Journal of Mechanical Sciences, France, n.57, pp. 43-53, Feb. 2012.

SAJID, Hizb Ullah; NAIK, Dayakar L.; KIRAN, Ravi. **Microstructure–Mechanical Property Relationships for Post-Fire Structural Steels.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, n. 6, p. 04020133, 2020.

SANTOS, R. A. D.; **Dissertação de doutorado em engenharia mecânica. Universidade Federal do Paraná. Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processo de dobramento de aço de alta resistência.**, Curitiba, 2013.

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

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 1999.

SCHAEFFER, L.; NUNES, R. M.; BRITO, A. M. G. **Tecnologia da Estampagem de Chapas Metálicas: 1. ed.** Editora Imprensa Livre, Gráfica da UFRGS, 2017.

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

SHARAD, Gawade; NANDEDKAR, V. M. **Effect of sheet thickness and R/t ratio on Springback in sheet metal forming.** 2020.

SHUKUR, Jalil. **Metal Forming Processes Production Engineering.** 2020. DOI: 10.13140 / RG.2.2.29269.24804.

SILVA, L.F.M. **Comportamento Mecânico dos Materiais.** Porto: Publindústria, 2012.

SOFUOĞLU, M.A., Gürgen, S., Çakır, F.H., Orak, s., **Springback Behavior of AA6082T6 Tubes in Three-point Bending Operation**. Procedia Engineering, 2017. p. 658-664. thefabricator.com, 2002.

SRINIVASAN, R.; RAJA, G. Karthik. **Experimental study on bending behaviour of aluminium-copper clad sheets in V-bending process**. Mechanics & Industry, v. 20, n. 6, p. 618, 2019.

THIPPRAKMAS, Sutasn. **Spring-back factor applied for V-bending die design**. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, v. 14, n. 3, p. JAMDSM0037-JAMDSM0037, 2020.

VAIBHAV Jain *, P. S. (2016). **A STUDY OF STRENGTH ANALYSIS IN SHEET METAL BY BENDING PROCESS: A REVIEW**. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY, 5(9), 55–60.

VANDER VOORT, G. F. 2004. **ASM handbook volume 9: Metallography and microstructures**. Materials Park, OH: ASM International

VORKOV, V; AERENS, R; VANDEPITTE, D. **Springback prediction of high-strength steels in large radius air bending using finite element modeling approach**. Procedia Engineering, v. 81, p.1005-1010, Oct. 2014.

WANDERLIND, A., **“Efeitos Dos Parâmetros De Soldagem GMAW com Curva Controlada na União dos Aços dissimilares ASTM A572 Grau 50 E ASTM A36”**. Trabalho de Mestrado. Universidade Do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

WANG, Ailing et al. **Springback analysis of AA5754 after hot stamping: experiments and FE modelling**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 89, n. 5-8, p. 1339-1352, 2017.

WANG, Bao Shan et al. **Modelling of Neutral Line Parameter for Sheet Metal Stamping and Roll Forming Processes**. In: Solid State Phenomena. Trans Tech Publications Ltd, 2020. p. 41-47.

ZANLUCHI, J. J. D.; Dissertação de mestrado em engenharia mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Avaliação de Retorno elástico para**

processos de Estampagem à frios dos aços bifásicos DP 600 e DP 800., Porto Alegre, 2014.

ZHAO, Jingwei; JIANG, Zhengyi. **Processamento termomecânico de aços avançados de alta resistência.** Progresso em Ciência dos Materiais, v. 94, p. 174-242, 2018.

ZHAO, Yixi et al. **In-situ bending under tension shear fracture analysis and microstructure “earthquake” of DP780 dual phase steels.** Materials Science and Engineering: A, v. 695, p. 80-91, 2017.

ZOLIN, Ivan. **Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas.** 2016.