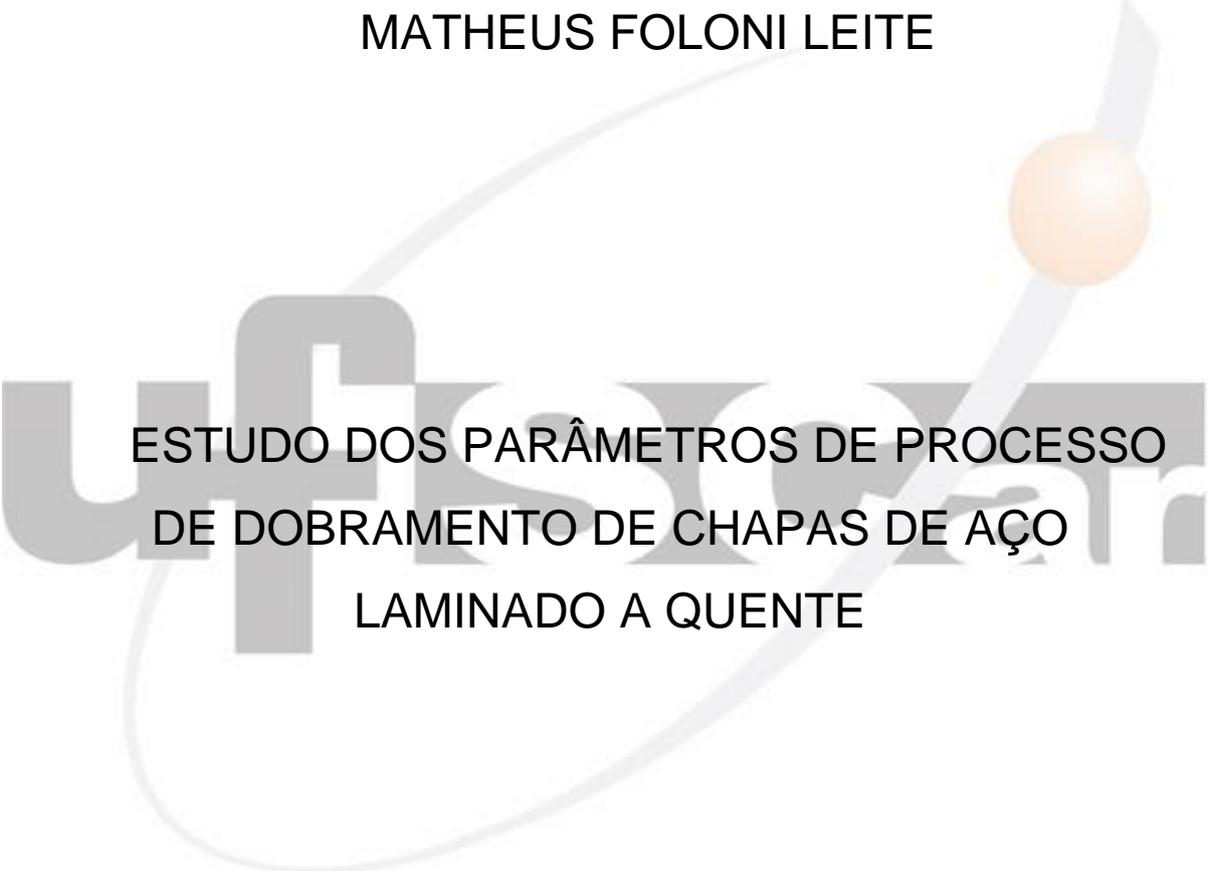


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MATHEUS FOLONI LEITE



ESTUDO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO  
DE DOBRAMENTO DE CHAPAS DE AÇO  
LAMINADO A QUENTE

SÃO CARLOS – SP

2022

MATHEUS FOLONI LEITE

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE DOBRAMENTO DE  
CHAPAS DE AÇO LAMINADO A QUENTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Zepon

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Gil Coury

São Carlos - SP

2022



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Matheus Foloni Leite

**RA:** 727408

**TÍTULO:** Estudo das condições e parâmetros do processo de dobramento de chapas de aço laminadas a quente

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Guilherme Zepon

**CO-ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Francisco Gil Coury

**DATA/HORÁRIO:** 22/04/2022, 16h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Guilherme Zepon	5,0	8,0
Prof. Dr. Claudio Shyinti Kiminami	5,0	8,0
<b>Média</b>	5,0	8,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Guilherme Zepon e Prof. Dr. Claudio Shyinti Kiminami e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

Prof. Dr. Guilherme Zepon

## FICHA CATALOGRÁFICA

## **DEDICATÓRIA**

Agradeço primeiramente a Deus por todas as graças recebidas.  
Dedico este trabalho ao meu pai, Marcos Antonio Leite, pelo exemplo de todos  
os tipos de força.

A minha mãe, Silvia Helena FOLONI Leite, por todo carinho e apoio.  
A minha irmã, Giovana FOLONI Leite, por sempre ajudar nas minhas decisões.  
A minha namorada, Debora Maffei, por todo amor e apoio, me motivando todos  
os dias.

Ao meu amigo Mike, por sempre estar ao meu lado.  
Dedico também ao Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira, por me incentivar aos  
estudos.

Aos meus amigos da república, Taitai, Tchelo, Buda, Draheim e Boleiro,  
verdadeiros amigos que a vida me deu.

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Guilherme Zepon, por toda sua contribuição durante a minha graduação assim como pela oportunidade de ser meu orientador do TCC, pela disposição em todos os momentos em que precisei de sua ajuda no curso, demonstrando compromisso, humildade e muito conhecimento a respeito do conteúdo ensinado.

Agradeço também ao Prof. Dr. Francisco Gil Coury, por toda sua disposição ao ministrar suas disciplinas, fato que me motivou a optar pela ênfase em materiais metálicos, bem como por ter aceitado ser o coorientador deste TCC.

Agradeço também a todos os outros professores e profissionais que dedicaram cada minuto de sua vida para transmitir seus conhecimentos para mim.

## RESUMO

Dentre os diversos processos de formabilidade de chapas metálicas, o dobramento se destaca por sua simplicidade e replicabilidade, sendo considerado uma das operações mais recorrentes em chapas metálicas. Em adição, modelos matemáticos foram desenvolvidos propiciando o entendimento das variáveis que envolvem este processo. Deste modo, o presente estudo buscou explicar e calcular equações encontradas na literatura relacionadas à alguns parâmetros de dobramento, esclarecendo suas influências na magnitude da força de dobramento, da recuperação elástica e da força gerada nos pontos de apoio, que podem acarretar efeitos negativos como a deformação localizada, marcações e trincas. Os parâmetros escolhidos foram divididos em grupos, sendo eles: relacionados as propriedades do material (limite de escoamento, limite de resistência à tração e módulo elástico), as dimensões da chapa (espessura, comprimento e largura) e à matriz (dos tipos em U, em L, em V e suas larguras de abertura do canal). Para auxílio da interpretação dos efeitos negativos e dos resultados numéricos foram utilizadas as propriedades mecânicas (incluídas na faixa de propriedades estudada) de oito tipos de chapas de aço laminadas a quente (aços baixo carbono, microligados e inox) comumente processadas por dobramento. Verificou-se que a magnitude da força de dobramento máxima atingida advém de propriedades mecânicas dos materiais mais elevadas, pelo aumento das dimensões da chapa, pela utilização de matriz em V com a menor largura de abertura do canal possível. Foi mostrado uma maior magnitude da força gerada nos pontos de apoio da chapa, quando somadas podem atingir duas vezes a força de dobramento. O retorno elástico foi demonstrado pelo raio interno da dobra após este fenômeno, apresentando pequenas variações que foram estudadas. Em face do exposto, discutiu-se todos os resultados e propôs-se soluções para os problemas encontrados neste processo.

**Palavras-Chave:** Dobramento. Parâmetros de Dobramento. Força de Dobramento. Força nos pontos de apoio. Retorno Elástico. Efeitos negativos na dobra.

## ABSTRACT

Among the several sheet metals forming processes, the bending process stands out for its simplicity and replicability, it's been considered one of the most recurrent operations in sheet metal. In addition, mathematical models have been developed to provide an understanding of the variables that involve this process. Therefore, the present study sought to explain and calculate equations found in the literature related to some bending parameters, clarifying their influences on the magnitude of the bending force, the springback and the force generated at the support points, which can lead to negative effects such as localized deformation, marks, cracks and chamfered bends. The chosen parameters were divided in groups according to the material properties (yield strength, tensile strength and elastic modulus), the sheet dimensions (thickness, length and width) and the matrix (U-, L- and V-shaped types and their channel opening widths). In order to help the interpretation of the negative effects and the numerical results we used the mechanical properties (included in the studies of the property range) of eight types of hot-rolled steel plates (carbon-steel, micro-alloyed and stainless steel) commonly processed by bending. The studies have showed that the magnitude of the maximum bending force achieved comes from higher mechanical properties of the materials, by increasing the dimensions of the sheet, by using a V-shaped die with the smallest possible width of the channel opening. A greater magnitude of the force generated at the support points of the sheet was shown to be up to twice the bending force when added together. The springback was demonstrated by the internal radius of the bend after this phenomenon, showing small variations, that were studied. In view of the above, all the results were discussed and solutions were proposed for the problems encountered in this process.

**Keywords:** Bending. Bending parameters. Bending force. Force in the support points. Springback. Negative effects on bending.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Aços selecionados para serem avaliados no presente trabalho: Denominação, Normas Técnicas e Graus dos representantes.....	33
<b>Tabela 2.</b> Composição química dos materiais selecionados.....	34
<b>Tabela 3.</b> Propriedades Mecânicas dos Materiais Selecionados.....	35

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Vista frontal do sistema de dobramento de uma peça ao ar em uma matriz em V.....	11
<b>Figura 2.</b> Representação bidimensional de uma prensa dobradeira.....	14
<b>Figura 3.</b> Representação esquemática das etapas do processo de dobramento.....	15
<b>Figura 4.</b> Forças compressivas e trativas no momento da dobra separadas pelo Eixo Neutro em um pedaço da chapa que sofreu a deformação plástica.....	16
<b>Figura 5.</b> Representação bidimensional de uma chapa dobrada e sua curva de limite de escoamento ( $\sigma_{0,2}$ ) e o limite de resistência à tração (LRT).....	17
<b>Figura 6.</b> Representação esquemática da matriz em U.....	19
<b>Figura 7.</b> Representação esquemática da matriz em L.....	19
<b>Figura 8.</b> Representações esquemática da matriz em V.....	20
<b>Figura 9.</b> Representação dos estilos de dobramento em matriz em V onde a) Dobramento ao Ar, b) Dobra de Fundo de Canal e c) Dobra Prensada.....	21
<b>Figura 10.</b> Representação esquemática de um pedaço cúbico de uma chapa de aço em contato com uma das faces da matriz em V e suas rugosidades superficiais.....	22
<b>Figura 11.</b> Diagrama esquemático tensão por deformação em tração mostrando os fenômenos de recuperação da deformação elástica e de encruamento. A resistência ao escoamento inicial é designada como $\sigma_{i0}$ ; $\sigma_{i1}$ é a resistência ao escoamento após a liberação da carga no ponto D e a subsequente reaplicação da carga.....	23
<b>Figura 10.</b> Duas peças de aço LNE 500 de mesmas dimensões dobradas com diferentes aberturas do canal da matriz.....	23
<b>Figura 12.</b> Duas peças de aço LNE 500 de mesmas dimensões dobradas com diferentes aberturas do canal da matriz.....	24
<b>Figura 13.</b> Vista frontal das dobras ao ar em matriz em V com 90° de ângulo de dobra da chapa de aço LNE 500 de 6,30 mm de espessura, com a) a abertura do canal da matriz em 63,0 mm e b) 10x a espessura.....	25
<b>Figura 14.</b> Vista frontal das dobras ao ar em matriz em V com 90° de ângulo de dobra da chapa de aço LNE 500 de 6,0mm com abertura do canal da matriz em 63,0 mm e b) 10x a espessura.....	26

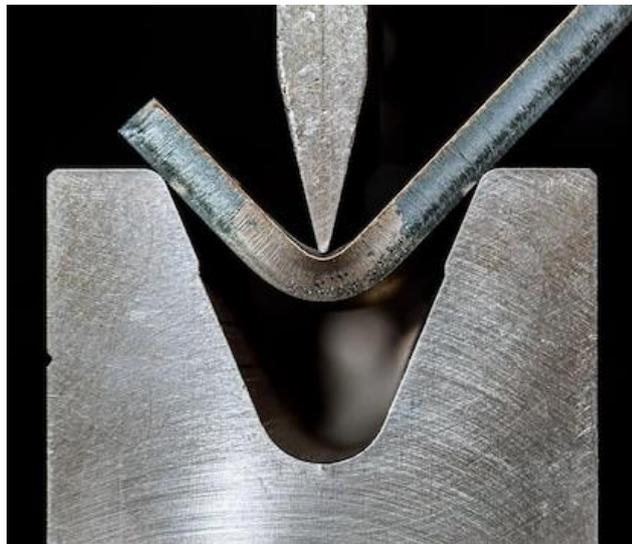
<b>Figura 15.</b> Vista da região externa da dobra de um aço Inox AISI 304, evidenciando as fissuras e a propagação da trinca.....	26
<b>Figura 16.</b> Geometria da dobra simplificada.....	28
<b>Figura 17.</b> Representação esquemática dos parâmetros de dobramento de uma chapa em matriz em V no início do processo.....	29
<b>Figura 18.</b> Representação esquemática dos parâmetros de dobramento de uma chapa em matriz em V no final do processo.....	30
<b>Figura 19.</b> Desenho esquemático dos parâmetros envolvidos na equação.....	31
<b>Figura 20.</b> Mapa de calor 2D do estudo da variação do limite de Resistência à tração pela variação de espessura da chapa em razão da magnitude da força de dobramento.....	36
<b>Figura 21.</b> Mapa de calor 2D do estudo da variação da Abertura do Canal da Matriz pela variação de espessura da chapa em razão da magnitude da força de dobramento.....	37
<b>Figura 22.</b> Mapa de calor 2D do estudo da variação do ângulo da face da matriz em V em relação ao ângulo de atrito, em razão da magnitude da força gerada nos pontos de apoio no momento da pancada.....	38
<b>Figura 23.</b> Mapa de calor 2D da variação do módulo elástico em relação a variação do limite de escoamento, em razão da magnitude do retorno elástico.....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>PROCESSO DE DOBRAMENTO</b>	<b>14</b>
2.1	PARÂMETROS DO PROCESSO DE DOBRAMENTO	16
<b>2.1.1</b>	<b>Propriedades Do Material</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Dimensões da Chapa</b>	<b>17</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Matrizes</b>	<b>18</b>
2.1.3.1	Matriz em U	18
2.1.3.2	Matriz em L	19
2.1.3.3	Matriz em V	20
<b>2.1.4</b>	<b>Coeficiente de Atrito</b>	<b>21</b>
2.2	PROBLEMAS RELACIONADOS AO PROCESSO DE DOBRAMENTO	22
<b>2.2.1</b>	<b>Retorno Elástico</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Deformação Localizada</b>	<b>24</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Deformações no Eixo De Apoio</b>	<b>25</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Fissuras</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODOS MATEMÁTICOS</b>	<b>27</b>
4.1	CÁLCULO DA FORÇA DE DOBRAMENTO	27
4.2	CÁLCULO DO RETORNO ELÁSTICO	28
4.3	CÁLCULO DA FORÇA MÁXIMA GERADA NOS PONTOS DE APOIO DA CHAPA	29
4.4	MATERIAIS ANALISADOS	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>36</b>
5.1	MAGNITUDE DA FORÇA DE DOBRAMENTO	36
5.2	MAGNITUDE DA FORÇA MÁXIMA GERADA NOS PONTOS DE APOIO DA CHAPA	38
5.3	MAGNITUDE DO RETORNO ELÁSTICO	39
	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os principais processos de formabilidade de chapas metálicas, o dobramento é um dos que mais se destaca, gerando formas relativamente simples através de diferentes maquinários (BEDDOES, 1999). O dobramento por prensa dobradeira é um dos processos mais utilizados, onde a chapa plana é colocada acima da matriz e o punção é abaixado, deformando a chapa para formar a dobra, o que possibilita a criação de diversos componentes de variados setores da indústria (SRINIVASAN, 2014). As prensas dobradeiras comumente realizam a dobra em linha reta, isto favorece estudos bidimensionais na frente do sistema como é mostrado na Figura 1.



**Figura 1.** Vista frontal do sistema de dobramento de uma peça ao ar em uma matriz em V.

**Fonte:** Freepik.

O sucesso da conformação das chapas de aço é frequentemente ligado ao domínio dos operadores em relação as máquinas (BEDDOES, 1999). Nas últimas três décadas, o desenvolvimento de modelos computadorizados surgiu em razão da importância da produção de chapas de aço com baixo teor de carbono (MILITZER, 2007). Dessa forma, equações que correlacionam os parâmetros de dobramento para possibilitaram a definição da magnitude ideal das cargas que serão aplicadas no processo de dobramento e a realização da

previsão dos os efeitos negativos pós dobra, resultando em uma maior qualidade de dobramento sob alta produtividade.

O processo de dobramento se dá através da solicitação mecânica exercida pelo punção na chapa alocada em uma matriz. Portanto, quando a força exercida na chapa pela ferramenta ultrapassa o limite de escoamento do material, ocorrerá a deformação plástica empregada até atingir-se o ângulo de dobra requerido, tendo como resultado a peça dobrada (CALLISTER, 2000). No momento em que o punção bate com a chapa no canal da matriz, popularizada como pancada, esta se movimenta sobre a matriz (com diferentes ângulos de face), gerando uma força de atrito contrária, portanto o coeficiente de atrito e os ângulos de face são levados em consideração para este cálculo (MARCINIAK, 2002). Quando a carga é removida da peça, ocorre um recuo no ângulo de dobramento devido ao retorno elástico, que poderá inviabilizar a montagem do produto (LIU; ZHONG, 2011). Sabe-se que quanto maior a força de dobramento menor será o retorno elástico, sendo esta força um dos parâmetros mais importantes para assegurar a qualidade da dobra (HINO; GOTO; YOSHIDA, 2003). O desuso da força ideal para o dobramento pode resultar em efeitos negativos encontrados na região da dobra, tais como deformação localizada, fissuras e marcações.

As equações para o cálculo do retorno elástico e da força de dobramento são estabelecidas através dos parâmetros que estão relacionadas ao material e as dimensões da peça, tais como: a espessura, o comprimento, o limite de escoamento, o limite de resistência à tração, módulo de elasticidade etc. E também às variáveis do maquinário, sendo elas: o ângulo do punção, altura do punção, raio do punção, entre outras relações geométricas dos componentes (CHIKALTHANKAR; BELURKAR; NANDEDKAR, 2014).

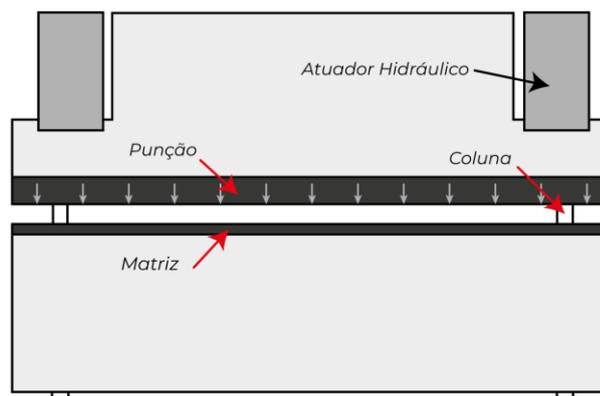
Com base nisso, o presente estudo buscou apresentar a influência dos diferentes parâmetros envolvidos no processo de dobramento, enfatizando seus impactos na força de dobramento, no retorno elástico e na força gerada nos pontos de apoio no momento de pico da solicitação mecânica, possibilitando o entendimento dos problemas encontrados em peças dobradas e justificando a importância da previsão desses últimos três parâmetros. Para isso, foram utilizadas equações estabelecidas na literatura, que envolvem variáveis

relacionadas ao material (limite de escoamento, limite de resistência, módulo elástico), as suas dimensões (espessura e comprimento) e aos parâmetros relacionados ao tipo de matriz (seja em L, em U ou em V), podendo cada uma delas variar a largura de abertura do canal da matriz de acordo com as necessidades industriais, o que servirá para a acomodação do material durante o processo (BEDDOES, 1999). Além disso, utilizou-se a interação entre o coeficiente de atrito e o ângulo de face da matriz em V que também podem variar (MARCINIAK, 2002).

Os resultados serão interpretados de acordo com a faixa de propriedades mecânicas e com o auxílio de imagens de peças de sete chapas de aço laminadas a quente dobradas, dos tipos aço baixo carbono, microligados e inoxidável.

## 2 PROCESSO DE DOBRAMENTO

Após cortes e furações, a peça plana seguirá para o dobramento, sendo este um processo simples, se comparado aos outros processos de conformação. Para a realização do processo, comumente utiliza-se prensas dobradeiras ilustrada na Figura 2, que podem ser adaptadas por meio de alterações na geometria do ferramental (punção e matriz) (LAVANYA et al., 2022). Uma prensa dobradeira comum possui o design de sua estrutura em C, com um êmbolo que segura o punção e uma matriz localizada na parte inferior para acomodar a chapa durante o dobramento, que é iniciado com atuadores hidráulicos que podem ser programados ou serem acionados manualmente em máquinas mais antigas (COELHO; FARIA; CARDOSO, 2005).

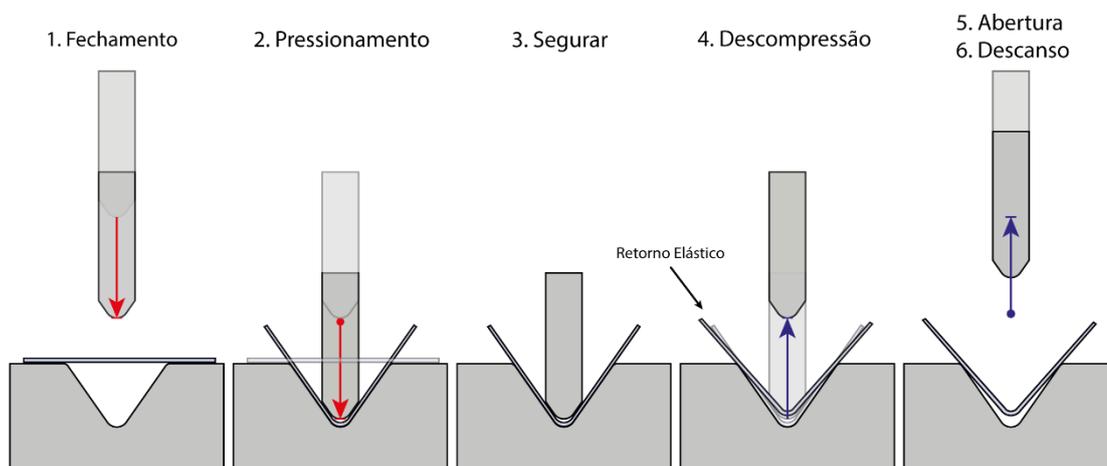


**Figura 2.** Representação bidimensional de uma prensa dobradeira

Fonte: Próprio autor.

O processo mecanizado da prensa dobradeira é um ciclo que pode ser separado em seis estágios convencionais ilustrado na Figura 3. O primeiro é o fechamento, quando se inicia a descida do punção sem encostar na chapa, até parar em um ponto definido. Passado este ponto, chega-se no estágio de pressionamento, onde o punção normalmente é abaixado lentamente até atingir uma velocidade constante, encostando na chapa e iniciando sua conformação até atingir o ângulo de dobra. Passando para a terceira etapa, segurar, onde a chapa permanece sobre a aplicação de força do punção, normalmente no fundo

do canal. Em seguida a chapa passa pela descompressão, onde o retorno elástico se inicia, em que a força é retirada de maneira gradual, passando para a abertura, estágio contrário ao de fechamento, e, por fim, ao descanso (ROELANDS, 2000).



**Figura 3.** Representação esquemática das etapas do processo de dobramento.

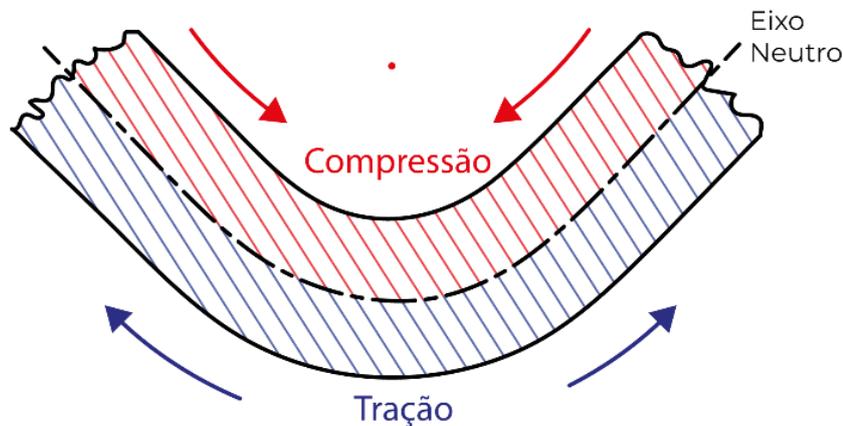
**Fonte:** Próprio autor.

Isto é, as peças dobradas são obtidas em resposta às solicitações mecânicas aplicadas pelo punção e pela matriz na chapa, alterando sua superfície plana para um perfil de superfícies concorrentes (KIMINAMI, 2013).

Microscopicamente a deformação plástica que se inicia durante a etapa de pressionamento da chapa corresponde ao movimento resultante dos inúmeros átomos, ou seja, o movimento de discordâncias em resposta à solicitação mecânica imposta pelo punção (CALLISTER, 2000). Dessa forma, as forças aplicadas durante o dobramento resultam na compressão da área interna (sem a formação de pescoço) e na tração da área externa da região deformada plasticamente, como ilustrado na Figura 4. (VOLK et al., 2019). Analisada em duas dimensões, separadas a partir do eixo neutro (MARCINIAK, 2002).

A terceira etapa, segurar, é extremamente necessária, pois as chapas deformadas plasticamente permanecem com uma parcela de aproximadamente 5% de energia de deformação armazenada internamente, associada às discordâncias, com isso dá-se tempo o suficiente para que haja sua distribuição

na região deformada, aliviando as tensões geradas pelo encruamento (CALLISTER, 2000).



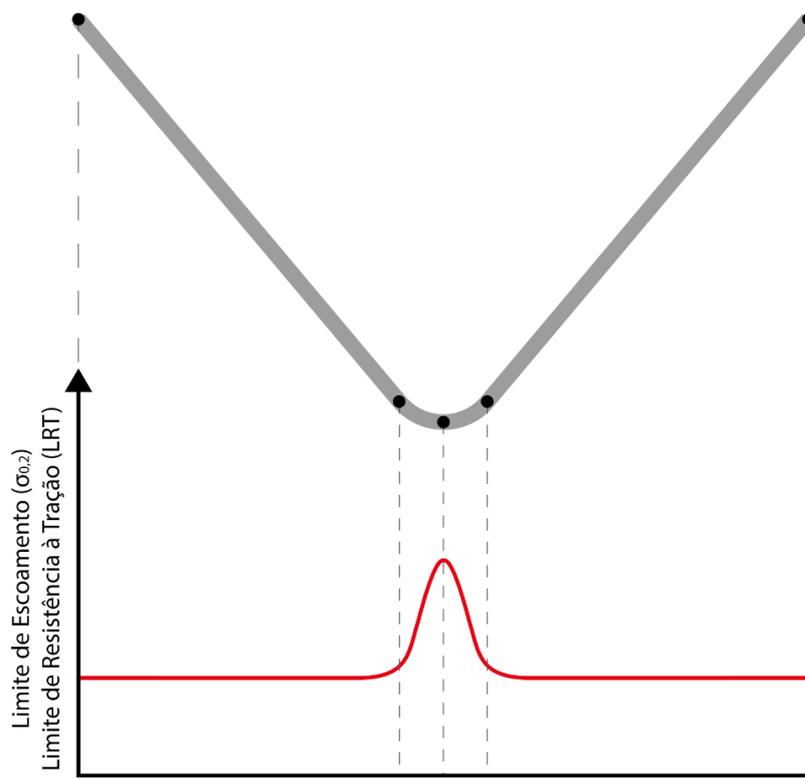
**Figura 4.** Forças compressivas e trativas no momento da dobra separadas pelo Eixo Neutro em um pedaço da chapa que sofreu a deformação plástica.

**Fonte:** Adaptado de FREES, 2017 e BEDDOES, 1999.

## 2.1 PARÂMETROS DO PROCESSO DE DOBRAMENTO

### 2.1.1 Propriedades do Material

A maioria das estruturas é projetada para suportar solicitações mecânicas até o limite de escoamento ( $\sigma_{0,2}$ ), sofrendo apenas deformações elásticas (CALLISTER, 2000). Porém o processo de dobramento é realizado através da imposição de uma força que ultrapassa o limite de escoamento, pertencente ao regime plástico, ou seja, entre o limite de escoamento e o limite de resistência à tração. A região endurecerá por deformação plástica (permanente), o que eleva o limite de escoamento e resistência à tração do material as custas da ductilidade, enquanto a região não afetada mantém suas propriedades conforme ilustrado na Figura 5 (CALLISTER, 2000).



**Figura 5.** Diagrama de limite de escoamento ( $\sigma_{0,2}$ ) e o limite de resistência à tração (LRT) pela extensão de uma chapa dobrada, analisado em 2D.

Fonte: Próprio autor.

A magnitude do módulo elástico ( $E$ ) varia de acordo com a força de ligação interatômica entre dois átomos vizinhos, obtido através do coeficiente angular da fração reta da curva carga e descarga (pertencente ao regime elástico) do gráfico de tensão por deformação do material (CALLISTER, 2000).

Esses parâmetros são obtidos pelo ensaio de tração e são disponibilizados em normas, com seus valores mínimos e em certificados de composição química fornecidos pelos fabricantes do material, exibindo os valores reais destes dados.

### 2.1.2 Dimensões da Chapa

As dimensões de uma chapa podem variar quanto a espessura ( $e$ ), comprimento ( $c$ ) e largura. Porém existem limites relacionados ao ferramental, ligados à capacidade da máquina, seja pela força de dobramento máxima por metro que ela pode exercer, como também pelo comprimento da peça que será

dobrada, que na maioria dos casos são encontradas de 4000 a 8000 mm (LIN; CHANG, 1996).

Estas chapas de aço podem ser obtidas em diferentes espessuras sendo separadas em dois subgrupos: chapas finas, encontradas até 5,00 mm; e chapas grossas acima de 5,00 mm, com até 12000 mm de comprimento (ABNT NBR 11888, 2018) (ABNT NBR 11889, 2013).

As larguras podem ser encontradas em variados tamanhos e muitas das vezes serão estratégicas para o corte de peças planificadas, evitando-se ao máximo o desperdício de material. Porém não possuem influência nos cálculos propostos.

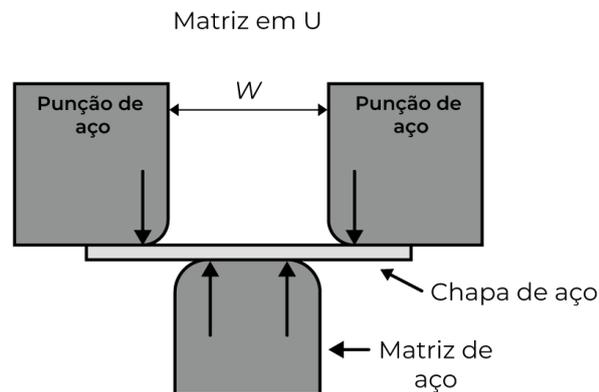
### **2.1.3 Matrizes**

Existem várias formas e geometrias das matrizes, com diferentes características. As formas mais usuais que serão consideradas são: em U, em L; e em V, com diferentes aberturas do canal da matriz ( $W$ ) (BEDDOES, 1999).

#### **2.1.3.1 Matriz em U**

O molde em U possui maior eficiência para fabricação de vigas de responsabilidade estrutural, muitas vezes sendo soldadas. Neste processo, o dobramento acontece em duas linhas no comprimento da chapa para formar essa geometria (PHANITWONG; BOOCHAKUL; THIPPRAKMAS, 2017).

A abertura do canal da matriz é definida pela distância entre os dois punções de aço. Assim a chapa será solicitada por duas forças do punção de aço e uma força contrária em resposta a pressão feita na chapa, que pode ser separada em duas forças próximas aos pontos de apoio da região de dobramento ilustradas na Figura 6.



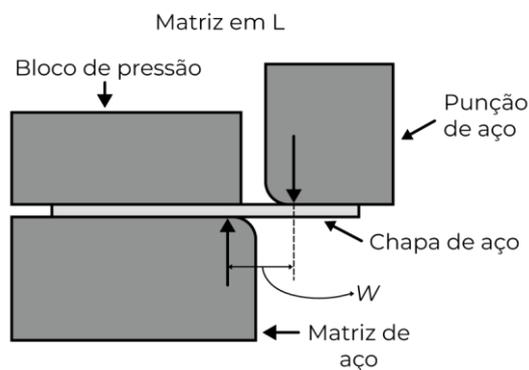
**Figura 6.** Representação esquemática da matriz em U.

**Fonte:** Adaptado de BEDDOES, 1999.

### 2.1.3.2 Matriz em L

A matriz em L é mais utilizada para processos de produção em massa contínuos, na maioria dos casos é introduzida lateralmente uma chapa longa, para o dobramento e corte das peças, aumentando a velocidade do processo (HAMBLI; MKADDEM; POTIRON, 2003).

A chapa dobrada na matriz em L é fixada por um bloco de pressão entre a matriz enquanto o punção desliza paralelamente a face da matriz. A abertura do canal da matriz neste caso se dá pela distância entre o ponto de apoio da chapa na matriz com o ponto de apoio da chapa no punção como mostrado na Figura 7.



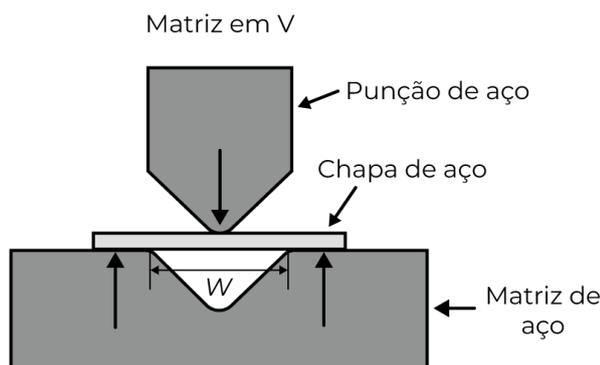
**Figura 7.** Representação esquemática da matriz em L.

**Fonte:** Adaptado de BEDDOES, 1999.

As peças dobradas que sofreram alterações em seu ângulo de abertura devido ao retorno elástico, podem reduzir a produtividade por serem reprocessadas, para isso, pode-se realizar uma pré-conformação reversa, favorecendo a diminuição deste fenômeno (CHEN; KO, 2011).

### 2.1.3.3 Matriz em V

A matriz em V é uma das geometrias de ferramentas mais utilizadas para o processo de dobramento, ilustrado na Figura 8 (FARSI, 2011). O dobramento nesta matriz pode variar de acordo com o seu ângulo de abertura, profundidade, e comprimento de abertura do canal. O punção normalmente possui um raio em seu nariz, que pode ser menor, maior ou igual ao raio da chapa (ASNAFI, 2000).

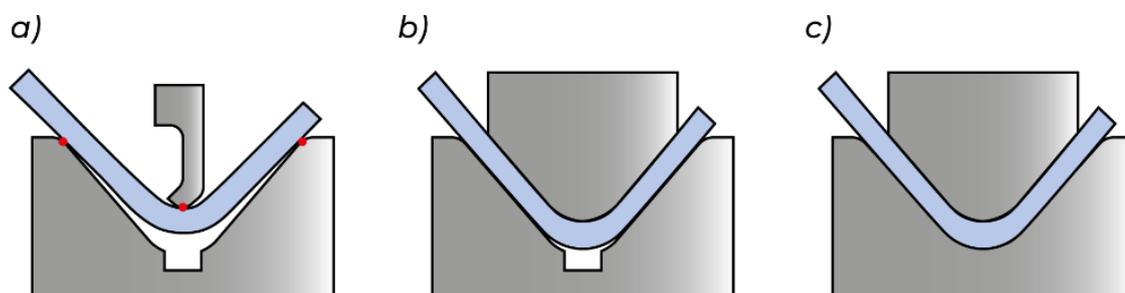


**Figura 8.** Representações esquemática da matriz em V.

**Fonte:** Adaptado de BEDDOES, 1999.

Existem algumas técnicas para realizar o dobramento em uma matriz em V, tais como: o dobramento ao ar (air bending), a dobra de fundo de canal e a dobra prensada, exemplificados na Figura 9. O dobramento ao ar possibilita a alteração rápida do ângulo de dobra obtido, permitindo maior liberdade ao operador e replicabilidade no processo, que é realizado com apenas três “pontos” de apoio (*A*), sendo eles a ponta do punção e os ombros da matriz. O outro método, conhecido como dobra prensada, é mais replicável, porém necessita de uma força maior para o dobramento, já que o punção e a chapa se

encostam totalmente em seus planos laterais, como também com as paredes da matriz em V (ZARAGOZA, 2019).



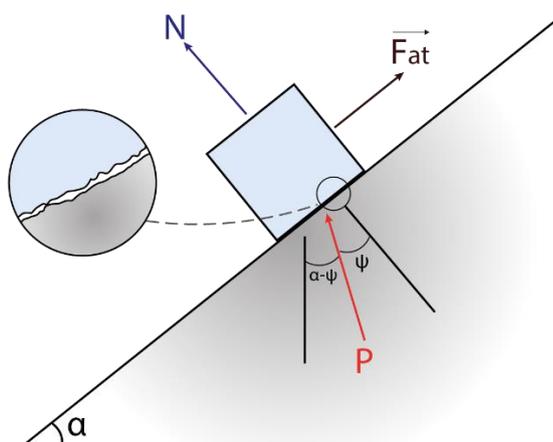
**Figura 9.** Representação dos estilos de dobramento em matriz em V onde a) Dobramento ao Ar, b) Dobra de Fundo de Canal e c) Dobra Prensada.

**Fonte:** Próprio autor.

#### 2.1.4 Coeficiente de Atrito

Devido as diferentes geometrias das matrizes em contato com a chapa de aço durante a ação de dobra, surge a força de atrito contrária ao movimento de deslize da chapa. Este atrito gerado entre o punção e a chapa possui um papel de suma importância para o processo, ou seja, quanto maior atrito, maior será a força aplicada para ocorrer o dobramento, para isso utilizam-se lubrificantes, resultando no decréscimo do atrito. Uma chapa de aço com maior rugosidade superficial resultará em uma maior força de atrito, devido à interação áspera, levando a uma maior força de dobramento, como mostrado na Figura 10 (SRINIVASAN, 2014).

Neste trabalho considerou-se que a força de atrito ( $F_{at}$ ), analisada a partir do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) e seu ângulo de atrito ( $\psi$ ), que age em conjunto com a força gerada pela matriz nos pontos de apoio da chapa ( $P$ ), que sofrerá influência do ângulo de abertura da face da matriz ( $\alpha$ ) como ilustrado na Figura 10, enquanto o punção realiza o pressionamento, deslizando a chapa até a posição final desejada.



**Figura 10.** Representação esquemática de um pedaço cúbico de uma chapa de aço em contato com uma das faces da matriz em V e suas rugosidades superficiais.

**Fonte:** Próprio autor.

## 2.2 PROBLEMAS RELACIONADOS AO PROCESSO DE DOBRAMENTO

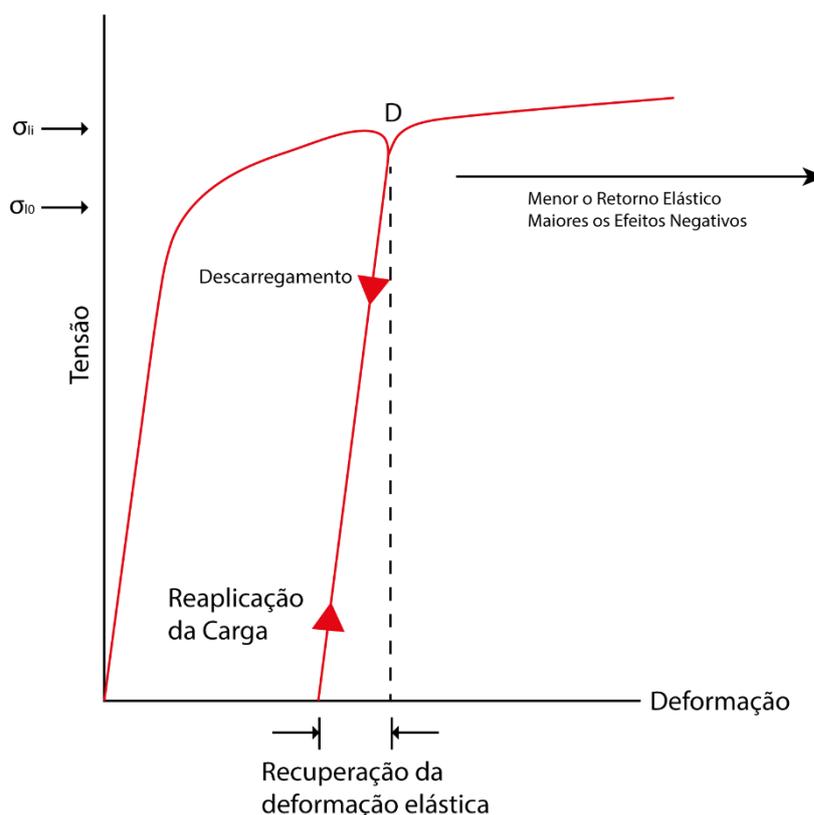
É notório que a indústria possui dificuldades no dobramento de aços de alta resistência, pois há chances de surgimento de fissuras, deformações localizadas, retorno elástico, entre outros problemas que afetarão a replicabilidade do processo (MARCINIAK, 2002).

Muitas vezes se a pressão aplicada pelo punção for muito baixa, poderá surgir rugas nas laterais da peça e se for muito elevada, a peça poderá se romper na prensa (KIMINAMI, 2013).

### 2.2.1 Retorno Elástico

Com o descarregamento pelo afastamento do punção após o dobramento, uma parte da deformação total atingida no processo é recuperada na forma de deformação elástica, fenômeno conhecido como retorno elástico, conforme ilustrado na Figura 11 (CALLISTER, 2000). Dessa forma, quanto maiores as

forças trativas resultantes da deformação plástica causadas por uma maior força de dobramento, menor será o retorno elástico, devido ao encruamento da região dobrada, onde aumenta-se o número de discordâncias próximas aos contornos de grão, que bloqueiam suas movimentações, ou seja, bloqueia a recuperação elástica, com o risco do aparecimento de outros efeitos negativos na dobra.



**Figura 11.** Diagrama esquemático tensão por deformação em tração mostrando os fenômenos de recuperação da deformação elástica e de encruamento. A resistência ao escoamento inicial é designada como  $\sigma_{l0}$ ;  $\sigma_{li}$  é a resistência ao escoamento após a liberação da carga no ponto D e a subsequente reaplicação da carga.

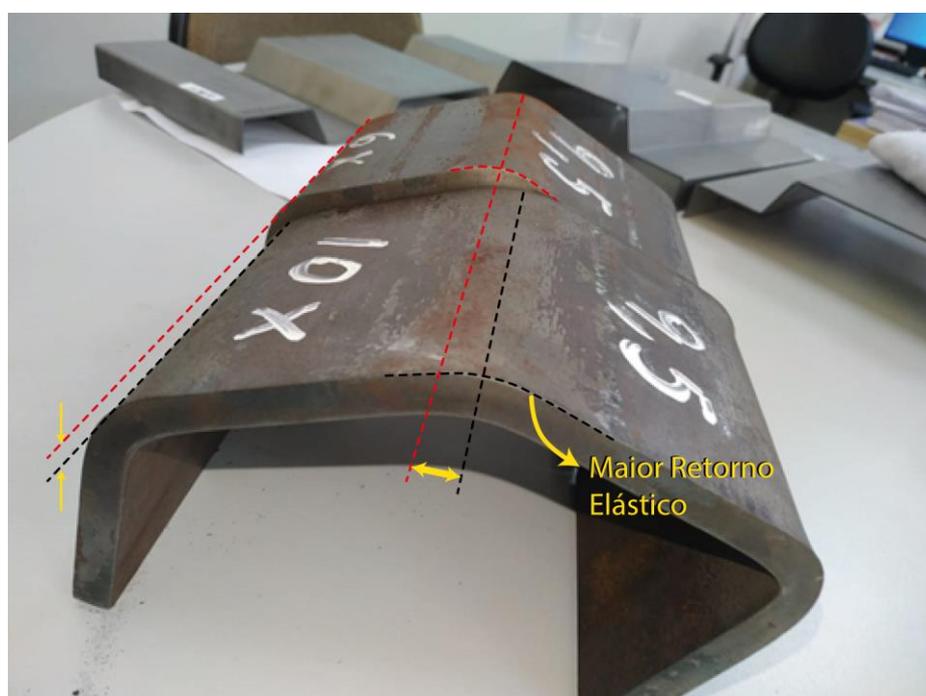
**Fonte:** Adaptado de CALLISTER, 2000.

Este fenômeno pode não trazer o resultado esperado com relação ao dimensionamento, prejudicando as montagens e trazendo defeitos estéticos. Pode ser ainda mais prejudicial, para processo de solda entre componentes (PHANITWONG; BOOCHAKUL; THIPPRAKMAS, 2017).

O raio da matriz está diretamente relacionado à grandeza da recuperação elástica, verifica-se que quanto menor o raio, menor será acomodação da área

deformada plasticamente, ou seja, haverá uma maior pressão de contato nesta região, levando a diminuição do retorno elástico. (SRINIVASAN, 2014).

A Figura 12 mostra duas peças do mesmo tamanho e espessura (9,50 mm) dobradas em uma matriz em V, a peça do fundo foi acomodada em uma matriz de 63,0 mm de abertura do canal, enquanto a peça da frente foi dobrada em uma matriz de 100,0 mm de abertura, verificou-se que a peça dobrada com a menor largura da abertura do canal da matriz necessitou de uma maior força de dobramento, resultando num raio de dobra menor, e no efeito de recuperação elástica. Pode-se notar que a peça da frente aparenta ser maior que a peça do fundo.



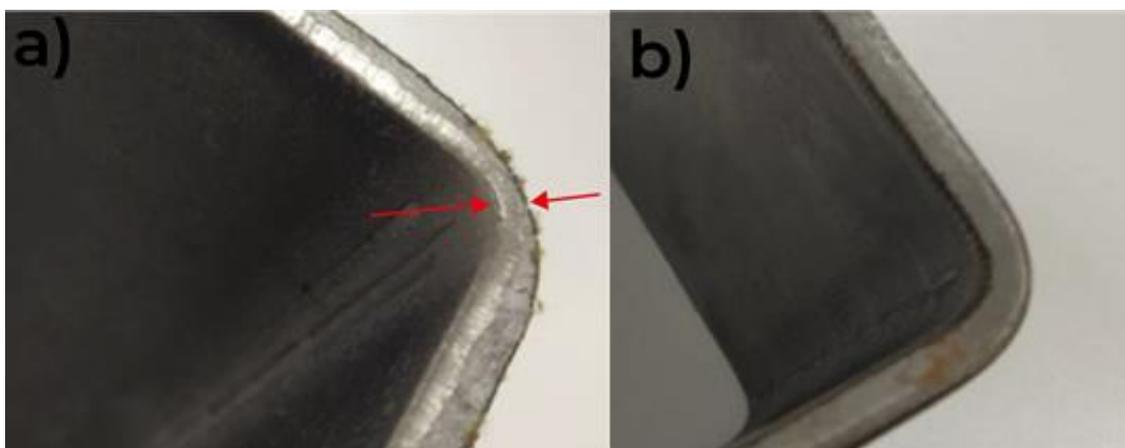
**Figura 12.** Duas peças de aço LNE 500 de mesmas dimensões dobradas com diferentes aberturas do canal da matriz.

**Fonte:** Próprio autor.

### 2.2.2 Deformação Localizada

A propriedade de dureza dos materiais indica à resistência a uma deformação localizada na superfície (CALLISTER, 2000). Tendo em vista que a região de dobra será submetida a deformação plástica, ilustrado na Figura 4,

durante o dobramento haverá a geração de forças compressivas (na área interna da dobra) e forças trativas (na área externa da dobra). O tracionamento causado pelo dobramento levará ao estiramento do material, resultando na estrição localizada antes do seu rompimento, mostrado na Figura 13 a).

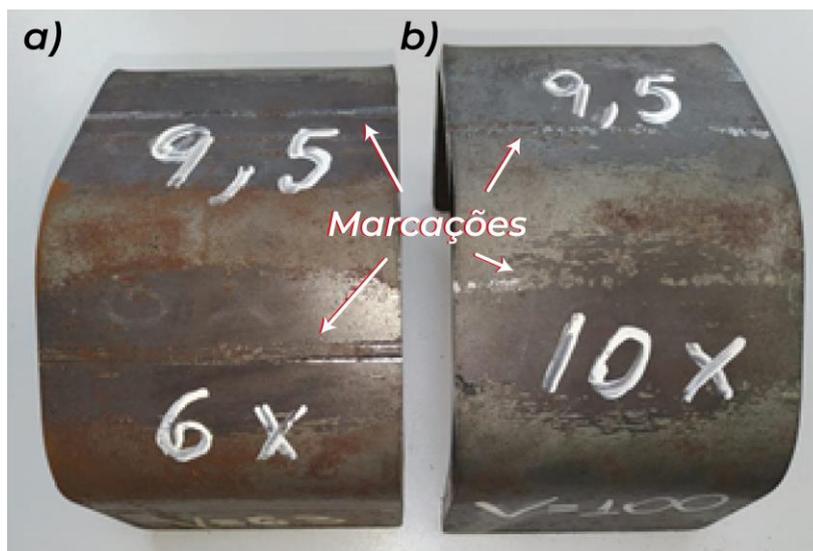


**Figura 13.** Vista frontal das dobras ao ar em matriz em V com 90° de ângulo de dobra da chapa de aço LNE 500 de 6,30 mm de espessura, com a) a abertura do canal da matriz em 63,0 mm e b) 10x a espessura.

Fonte: Próprio autor.

### 2.2.3 Deformações no Eixo de Apoio

As deformações no eixo de apoio estão relacionadas a pressão exercida nesta linha de contato. Na Figura 14, ilustram-se as diferenças entre duas chapas de aço LNE 500 com o mesmo comprimento e espessura (9,50 mm), com três dobras em matriz em V ao ar (que possui apenas três eixos de apoio). Evidenciou-se que para a chapa que foi submetida a uma maior força de dobramento, houve uma maior marcação gerada pela deformação plástica nesta região, devido a compressão e o atrito no momento em que o punção atinge sua posição final de pressionamento contra a matriz.



**Figura 14.** Vista frontal das dobras ao ar em matriz em V com  $90^\circ$  de ângulo de dobra da chapa de aço LNE 500 de 6,0mm com abertura do canal da matriz em 63,0 mm e b) 10x a espessura.

Fonte: Próprio autor.

#### 2.2.4 Fissuras

O aumento da força de dobramento induz instabilidades na região da dobra deformada plasticamente, quando as forças trativas ultrapassam o limite de resistência à tração do material, pode ocorrer a formação de fissuras, iniciadas no lado externo da dobra, ilustrada na Figura 15 (KIMINAMI, 2013).



**Figura 15.** Vista da região externa da dobra de um aço Inox AISI 304, evidenciando as fissuras e a propagação da trinca.

Fonte: Próprio autor.

### 3 OBJETIVOS

Avaliar o efeito do limite de escoamento, limite de resistência à tração, módulo de elasticidade, espessura e comprimento da chapa, tipo e largura da abertura da matriz, coeficiente de atrito e o ângulo de abertura da face do canal em V, na magnitude da força de dobramento, retorno elástico e força máxima gerada nos pontos de apoio, no processo de dobramento de chapas de aço laminadas a quente normalmente disponíveis no mercado brasileiro.

### 4 MÉTODOS MATEMÁTICOS

#### 4.1 CÁLCULO DA FORÇA DE DOBRAMENTO

Ao tratar a chapa como uma viga em flexão, chega-se a uma aproximação da força de dobramento (em Newtons), calculada através da equação 1, a partir da teoria simples da viga (BEDDOES, 1999).

$$F = K \frac{c \times e^2 \times LR}{W} \quad (1)$$

Onde:

$c$  é o comprimento da dobra;

$W$  é a largura da abertura da matriz;

$LRT$  é o limite de resistência à tração do material;

$K$  é o fator de geometria da matriz para os diferentes tipos, sendo eles:

Para a matriz em V:  $1\frac{1}{3} \cong 1,33$

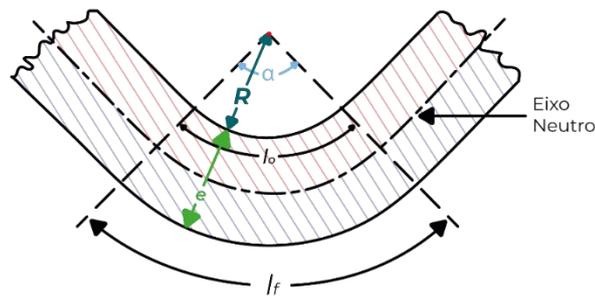
Para a matriz em L:  $\frac{1}{3} \cong 0,33$

Para a matriz em U:  $\frac{2}{3} \cong 0,66$

Assim, mapeou-se por meio de mapas de calor, a magnitude da força de dobramento, variando-se os parâmetros expostos acima, fixando apenas o comprimento da dobra na chapa em 1 metro, para obter-se os resultados na unidade de medida Kilonewton por metro (kN/m).

## 4.2 CÁLCULO DO RETORNO ELÁSTICO

Analisando a geometria de uma dobra como ilustrado na Figura 14, sabe-se que o raio exterior da dobra está sob tração e o raio interior se encontra sob compressão. A formação do raio mínimo absoluto é limitada pela tensão verdadeira no raio exterior, que não pode atingir a deformação de fratura da chapa.



**Figura 16.** Geometria da dobra simplificada.

Fonte: Adaptado de BEDDOES, 1999.

Onde os parâmetros estudados são:

- $R_b$  é raio no momento de pressionamento da chapa;
- $R_f$  é o raio final da dobra após a recuperação elástica;
- $\sigma_{0,2}$  é o limite de escoamento;
- $e$  é a espessura da chapa;
- $E$  é o módulo elástico do material;

Uma das dificuldades que deve ser considerada durante as operações de dobramento é o retorno elástico. Quando essas forças são liberadas, o ângulo  $\alpha$  na Figura 16 aumenta ligeiramente, levando a imprecisão dimensional. A relação matemática entre o raio de dobra e o raio após o retorno elástico pode ser dada pela Equação 2:

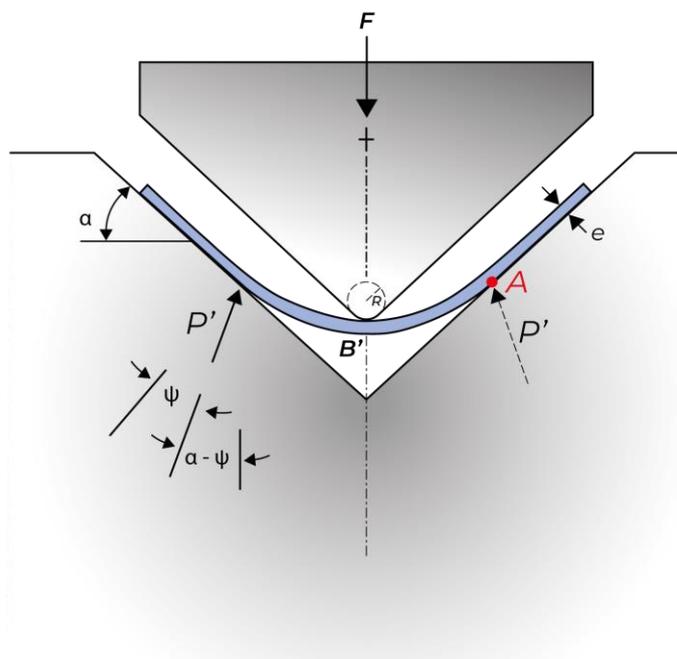
$$\frac{R_b}{R_f} = 4 \left[ \frac{R_b \sigma_{0,2}}{eE} \right]^3 - 3 \left[ \frac{R_b \sigma_{0,2}}{eE} \right] + 1 \quad (2)$$

Isolando  $R_f$  para descobrirmos o valor do raio após o retorno elástico, temos:

$$R_f = R_b / \left( 4 \left[ \frac{R_b \sigma_{0,2}}{eE} \right]^3 - 3 \left[ \frac{R_b \sigma_{0,2}}{eE} \right] + 1 \right) \quad (3)$$

#### 4.3 CÁLCULO DA FORÇA MÁXIMA GERADA NOS PONTOS DE APOIO DA CHAPA

Calculou-se a força máxima que a matriz exerce nos pontos de apoio da chapa em resposta a solicitação mecânica pelo pressionamento efetuado com a descida do punção. Esta ação foi equacionada por meio de análises bidimensionais especificamente para a matriz em V para o caso de uma dobra de fundo de canal, como ilustrado na Figura 17.

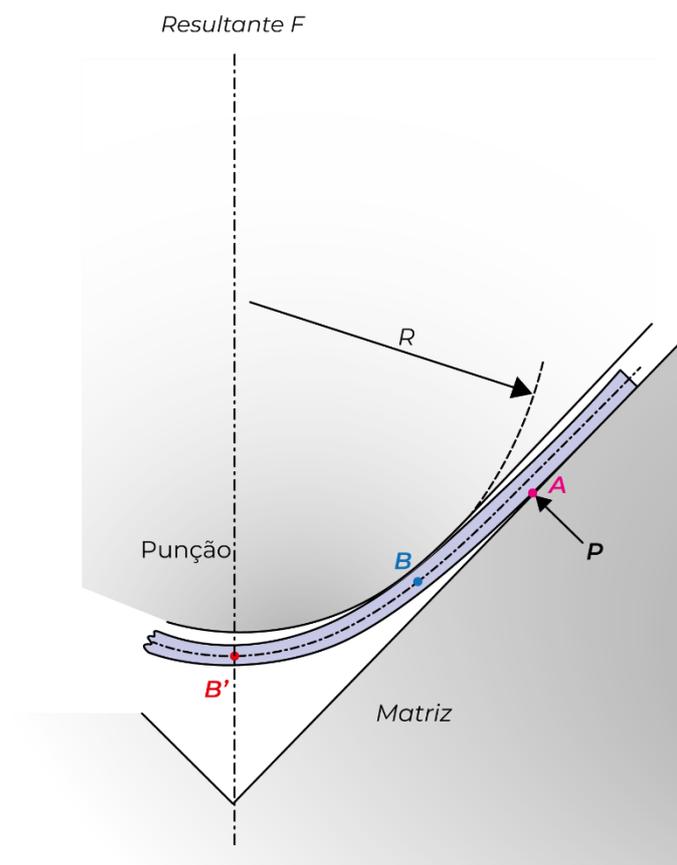


**Figura 17.** Representação esquemática dos parâmetros de dobramento de uma chapa em matriz em V no início do processo.

**Fonte:** Adaptado de MARCINIAK, 2002.

A força gerada nos pontos de apoio no início do processo ( $P'$ ) é aplicada em ambas as faces, já que se trata de um processo simétrico. Neste momento o pressionamento do punção faz com que a chapa deslize sobre a matriz, dessa forma, dá-se início as forças de atrito e as forças geradas nos pontos de apoio. Onde se estudará o coeficiente de atrito entre a chapa e a matriz ( $\mu$ ) pelo ângulo (de atrito  $\psi$ ) do vetor normal da face da matriz, localizada no último ponto de apoio A entre a chapa e a matriz.

Este ponto se desloca até encontrar o ponto B ao final do processo, ilustrada na Figura 18. B tenderá a B' apenas para o caso do dobramento em matriz em V prensada, em que a chapa, matriz e o punção ficam completamente em contato MARCINIAK, 2002.



**Figura 18.** Representação esquemática dos parâmetros de dobramento de uma chapa em matriz em V no final do processo.

**Fonte:** Adaptado de MARCINIAK, 2002.

Sabendo que o coeficiente de atrito estático  $\mu$ , expresso na Equação 4, se dá por:

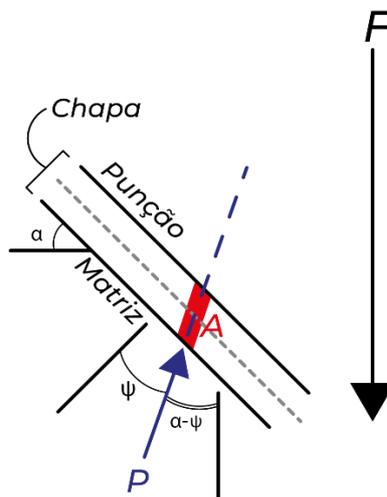
$$\mu = \tan(\psi) \quad (4)$$

Pela manipulação matemática da Equação 4, chegou-se relação trigonométrica expressa pela Equação 5, mostrando o ângulo de atrito.

$$\psi = \arctan(\mu) \quad (5)$$

A partir da Equação 5 chegamos à Equação 6 para o cálculo da força  $P$ , representada na Figura 19, cuja magnitude será estudada em função dos parâmetros de processo:

$$P = 2 \cos(\alpha - \psi) * F \quad (6)$$



**Figura 19.** Desenho esquemático dos parâmetros envolvidos na equação 6

Fonte: Próprio autor.

#### 4.4 MATERIAIS ANALISADOS

Para o auxílio do entendimento dos resultados obtidos pelas equações propostas, alguns representantes de chapas de aço laminadas a quente foram selecionados, por atenderem a uma grande faixa de propriedades mecânicas, que poderão ser replicadas para outras chapas semelhantes.

Os representantes selecionados podem foram escolhidos a partir do catálogo online da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN, 2020), conforme a classificação abaixo, listados na Tabela 1:

**Classe Comercial:** atende os aços mais simples, também denominados "classe uso geral". São do tipo ferro-carbono-manganês, sem adição de elementos microligantes, normalmente disponibilizados apenas com um certificado de composição química. Estes aços podem ser aplicados em quase todos os segmentos consumidores de aços planos laminados a quente, tais como construção civil e mecânica, autopeças, tubos e perfis, implementos agrícolas e outros.

**Aços Estruturais:** são utilizados em casos de peças com grandes quantidades de solda, em conjunto a uma média ou alta resistência mecânica, com garantia de composição química e propriedades mecânicas, podendo ou não conter elementos microligantes adicionados. Podem ser encontrados nas estruturas de pontes, prédios, na forma de perfis, de tubos, esquadrias, em containers, e na construção civil em geral.

**Classe Estrutural de Alta Resistência:** apresentam um balanço entre elevadas propriedades mecânicas, boa tenacidade e soldabilidade. Comumente empregados em estruturas, implementos agrícolas e máquinas.

**Classe Estrutural Resistente a Corrosão Atmosférica:** São aços do tipo patináveis, ou seja, devido à formulação com pequenas adições de elementos de liga (Cu, P, Ni e Cr) apresentam a formação de uma pátina sob determinadas condições, aumentando a resistência à corrosão atmosférica no mínimo quatro vezes mais se comparados aos aços estruturais convencionais. Tendo sido desenvolvida para aplicação na construção civil, esta família de aços também apresenta elevada resistência mecânica, aliada à boa tenacidade e

soldabilidade. Como exemplos de aplicação podem ser citados estruturas em geral, vigas, pilares e tubos.

Classe Estrutural de Boa Conformabilidade: Esta classe é marcada pelos aços com excelentes propriedades mecânicas para uso estrutural, com boa conformabilidade a frio. Estes são disponibilizados atendendo às normas, com garantias de composição química e propriedades mecânicas. Na maioria dos casos, são formulados com elementos microligantes para que as propriedades requeridas sejam alcançadas, sem comprometer sua conformabilidade e soldabilidade, já que apresentam baixos teores de carbono. Como exemplos de aplicação cabe mencionar: longarinas, travessas de chassi, aros e discos de rodas e peças em geral.

**Tabela 1.** Aços selecionados para serem avaliados no presente trabalho: Denominação, Normas Técnicas e Graus dos representantes.

Denominação	Norma Técnica	Grau
Classe Comercial	SAE J403	1012
		1020
Classe Estrutural	ASTM	A36
Classe Estrutural de Alta Resistência	CSN	ARC 400
	ASTM	A572 G50
Classe Estrutural Resistente à Corrosão Atmosférica	CSN	COR 500
Classe Estrutural de Boa Conformabilidade	ABNT NBR 6656	LNE 500

**Fonte:** Catálogo online da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN, 2020)

Os representantes descritos na Tabela 1, seguem as normas: da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6656:2016 (referente a

bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade); da Companhia Siderúrgica Nacional, ARC 600 ou COR 500; bem como as normas internacionais Society of Automotive Engineers (SAE) J403, e American Society for Testing and Materials (ASTM) A36 ou A572.

Os cálculos efetuados neste estudo levam em conta as propriedades ditas pelas normas, onde pelo mínimo imposto pode-se ter ideia das forças mínimas dos processos para cada representante. Para facilitar a construção do estudo, é necessário ter-se em mente a composição química dos materiais escolhidos, expressos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição química dos materiais selecionados

<b>Material</b>	<b>Composição Química</b>
SAE 1012	C - 0,10 a 0,15; Mn - 0,30 a 0,60; S - 0,05 Máx.; P - 0,04 Máx; Fe - Balanço
SAE 1020	C - 0,18 a 0,23; Mn - 0,30 a 0,60; S - 0,05 Máx.; P - 0,04 Máx; Fe - Balanço
ASTM A36	C - 0,26 Máx.; S - 0,05 Máx.; P - 0,04 Máx; Si - 0,40 Máx.; Cu - 0,20 Mín. Quando especificado; Fe - Balanço
ARC 400	C - 0,15 Máx.; Mn - 0,9 Máx.; S - 0,020 Máx.; P - 0,025 Máx.; Si - 0,30 Máx.; Fe - Balanço
ASTM A572 G50	C - 0,23 Máx.; Mn - 1,35 Máx.; S - 0,030 Máx.; P - 0,030 Máx.; Si - 0,40 Máx.; Fe - Balanço
COR 500	C - 0,17 Máx.; Mn - 1,20 Máx.; S - 0,025 Máx.; P - 0,025 Máx.; Si - 0,35 Máx.; Cu - 0,20 a 0,50; Cr - 0,55 a 0,80; Al - 0,015 a 0,070; Fe - Balanço
LNE 500	C - 0,12 Máx.; Mn - 1,50 Máx.; S - 0,015 Máx.; P - 0,025 Máx.; Si - 0,35 Máx.; Al - 0,015 Máx.; Nb - 0,12 Máx.; V - 0,12 Máx.; Ti - 0,20 Máx.; Fe - Balanço

**Fonte:** SAE J403, ASTM A36/A36M, Catálogo online da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN, 2020), ASTM A572/A572M, ABNT NBR 6656:2016.

Observa-se que os aços COR 500 e LNE 500, são aços microligados, ou seja, possuem pequenas adições de elementos microligantes (V, Nb e Ti) que possuem mecanismos de endurecimento por precipitação e refino de grão, elevando a resistência destes materiais. Dentre estes elementos, o vanádio confere a melhor combinação entre resistência mecânica e boa ductilidade, presente no LNE 500, justificando sua ótima conformabilidade e soldabilidade (DAROIT, 2012).

As propriedades mecânicas, como limite de escoamento, limite de resistência à tração, módulo de elasticidade disponíveis na tabela 3, servirão para efetuar os cálculos expostos na seção 4 (Métodos Matemáticos). Complementarmente, os valores médios e mínimos dos alongamentos, que servirão como base da discussão dos resultados, são também apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Propriedades Mecânicas dos Materiais Selecionados

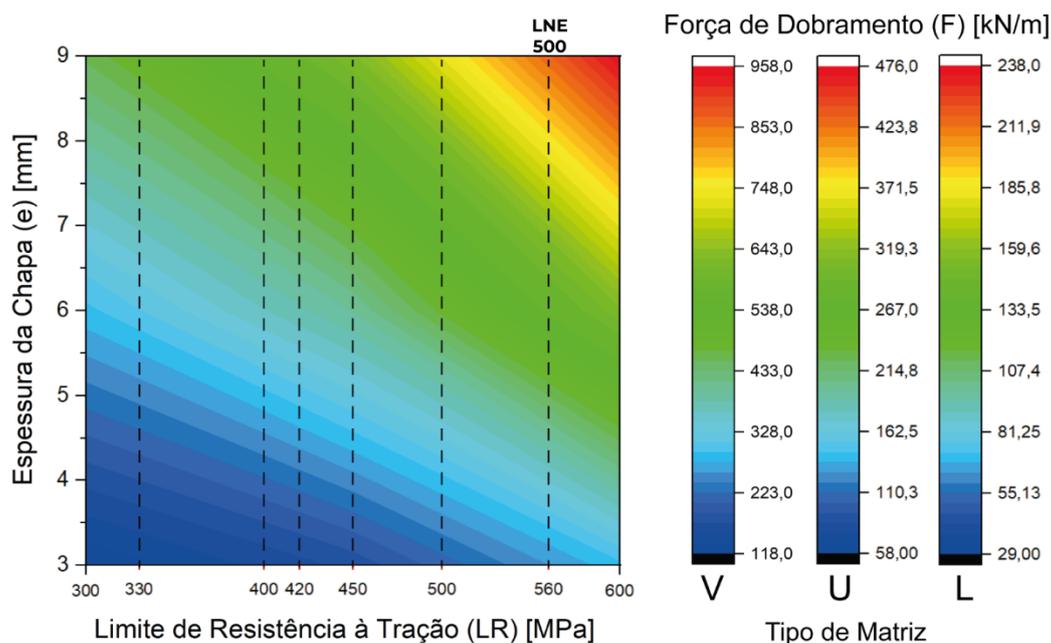
<b>Material</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
SAE 1012	≥ 185	≥ 330	~200
SAE 1020	≥ 205	≥ 380	~186
ASTM A36	≥ 250	400 – 550	~200
ARC 400	≥ 300	≥ 400	-
ASTM A572 G50	≥ 345	≥ 450	-
COR 500	≥ 380	≥ 500	-
LNE 500	500 a 620	560 a 700	-

**Fonte:** SAE J403, ASTM A36/A36M, Catálogo online da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN, 2020), ASTM A572/A572M, ABNT NBR 6656:2016.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 MAGNITUDE DA FORÇA DE DOBRAMENTO

A partir da Equação 1 gerou-se o mapa de calor da força de dobramento, possibilitando a leitura da influência dos parâmetros que foram variados na equação, sendo eles: a espessura da chapa, o limite de resistência à tração, e os tipos de matrizes. Observou-se que a magnitude da força de dobramento se eleva com o aumento da espessura da chapa e também pelo aumento do limite de resistência à tração do material, assim como mostrou-se que a matriz em V necessita de uma força de dobramento aproximadamente duas vezes maior que a matriz em U, e quatro vezes maior que em L, ilustrado na Figura 20.



**Figura 20.** Mapa de calor 2D do estudo da variação do limite de Resistência à tração pela variação de espessura da chapa em razão da magnitude da força de dobramento.

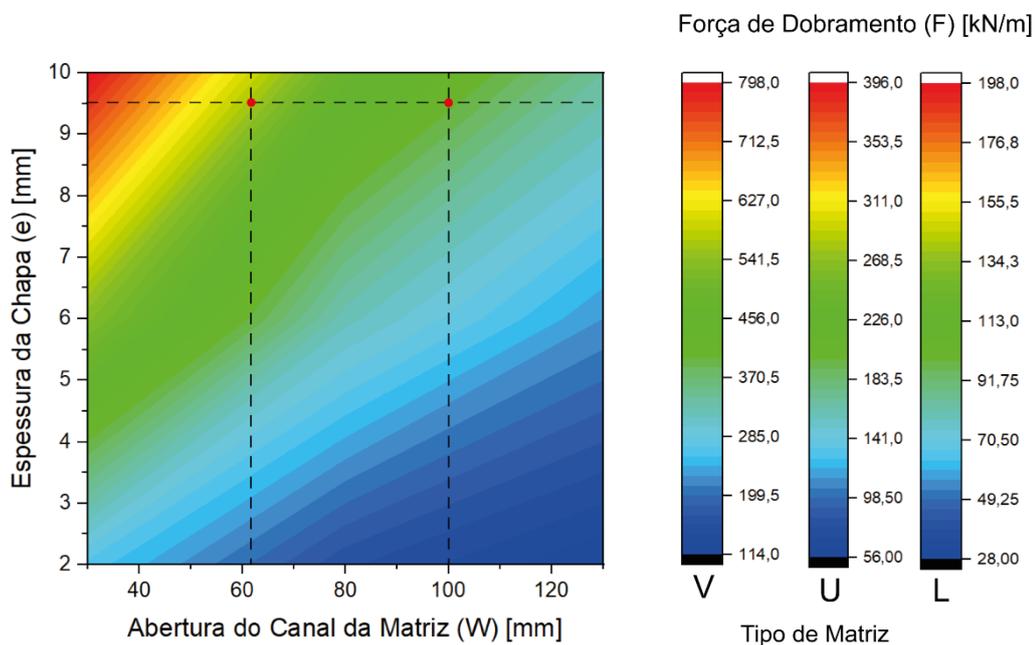
**Fonte:** Próprio autor

As linhas tracejadas ilustram o limite de resistência à tração dos aços estudados, evidenciando a que a maior força necessária está no dobramento do

aço LNE 500. De tal forma que os materiais mais dúcteis apresentam forças de dobramentos menores, porém isto não impede que os efeitos negativos apareçam, já que seus limites de escoamento e limites de resistência à tração também são menores.

A variação da abertura do canal da matriz se deu juntamente com a variação da espessura da chapa. Observa-se que quanto maior a espessura e menor a abertura do canal da matriz, maior é a magnitude da força de dobramento. Novamente o tipo de matriz que requer maior força de dobramento para o processo é a matriz em V, aproximadamente duas vezes maior que a matriz em U e quatro vezes que a matriz em L, ilustrado na Figura 21.

As linhas tracejadas indicam as aberturas do canal da matriz utilizados para o dobramento das peças LNE 500 mostradas neste trabalho (63,0mm e 100,0mm), ambos com 9,50mm de espessura atingindo um valor de aproximadamente 540kN/m para a matriz mais em V mais fechada e 370kN/m para a matriz mais aberta, uma redução de aproximadamente 31% na força de dobramento.



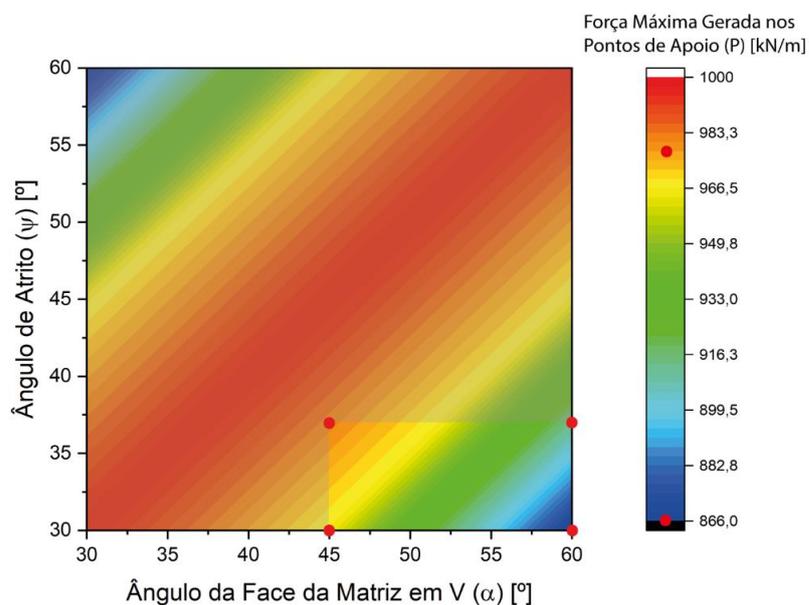
**Figura 21.** Mapa de calor 2D do estudo da variação da Abertura do Canal da Matriz pela variação de espessura da chapa em razão da magnitude da força de dobramento.

Fonte: Próprio autor

## 5.2 MAGNITUDE DA FORÇA MÁXIMA GERADA NOS PONTOS DE APOIO DA CHAPA

Para o cálculo da magnitude da força máxima gerada nos pontos de apoio (P), variou-se o ângulo da face da matriz em V ( $\alpha$ ) em relação ao ângulo de atrito ( $\psi$ ) obtido pelo coeficiente de atrito ( $\mu$ ). Fixou-se uma força de dobramento (F) de 500kN/m e observou-se que quando estes ângulos são iguais, a força P atinge seu valor máximo, sendo duas vezes maior que a força de dobramento (1000 kN/m).

Sabe-se que o ângulo de face da matriz em V normalmente varia muito pouco, e ligado a isso o ângulo de atrito deve variar também. O coeficiente de atrito entre dois aços varia de 0,57 a 0,74, resultando em um ângulo de atrito de aproximadamente  $30^\circ$  e  $37^\circ$  respectivamente, representadas pelas linhas tracejadas em azul. E sabendo que a matriz em V normalmente apresenta ângulos de face igual à  $45^\circ$  e  $60^\circ$  área representada na Figura 22, que possui valor mínimo em 866kN/m e máximo em 975kN/m, caracterizando um aumento de 12,5%, assim pode-se afirmar que a força máxima gerada nos pontos de apoio dependerá mais da pressão imposta pelo punção.



**Figura 22.** Mapa de calor 2D do estudo da variação do ângulo da face da matriz em V em relação ao ângulo de atrito, em razão da magnitude da força gerada nos pontos de apoio no momento da pancada.

**Fonte:** Próprio autor.

Este tipo de solicitação mecânica pode gerar marcas de dobramento na peça, que resultam em problemas de acabamento (pintura), diminuindo a estética e padrão de qualidade do produto, e com isso necessita passar por um processo de acabamento superficial, que resultará no aumento do tempo total e nos custos de produção, algo indesejado do ponto de vista industrial.

O coeficiente de atrito pode ser reduzido com a utilização de lubrificantes, levando a menores ângulos de atrito, enquanto que o ângulo de abertura da face da matriz continuará fixo, dessa forma reduz-se a força gerada nos pontos de apoio no momento da pancada, na tentativa de se evitar marcas significantes na peça.

### 5.3 MAGNITUDE DO RETORNO ELÁSTICO

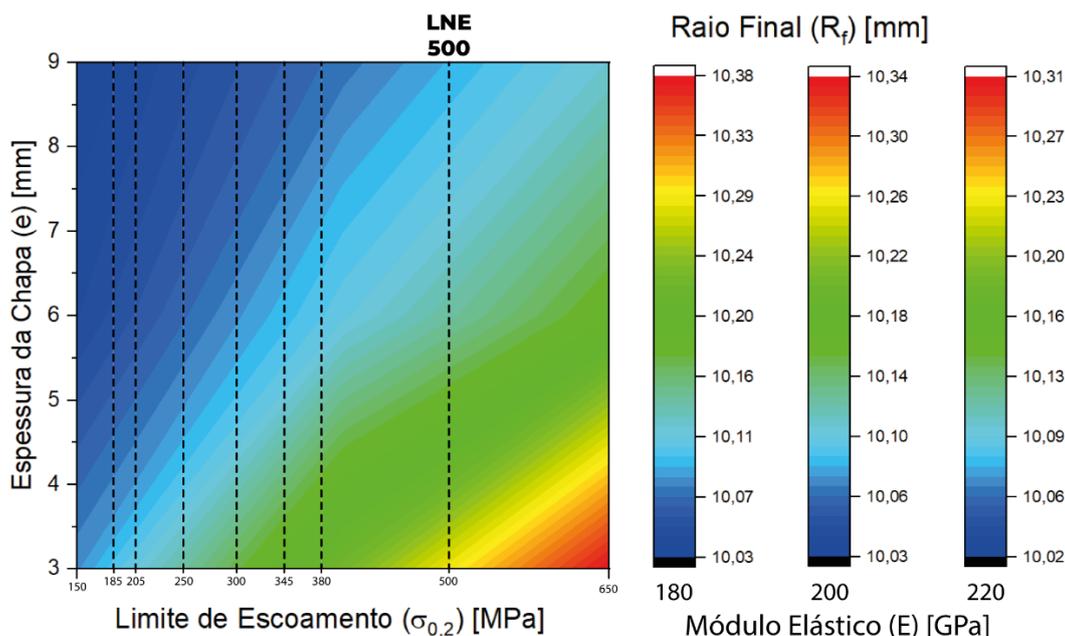
Por meio da Equação 3, pode-se calcular o raio final da dobra após o retorno elástico. O raio inicial utilizado foi de 10,0 mm, e variou-se o módulo de elasticidade ( $E$ ), e o limite de escoamento ( $\sigma_{0,2}$ ).

Observou-se que a magnitude do retorno elástico variou muito pouco, atingindo um raio final máximo de aproximadamente 10,30 mm para a chapa de aço LNE 500 com 500 MPa de limite de escoamento mínimo, na situação onde o módulo elástico era de 180 GPa, valor 3% superior ao inicial, respeitando o conceito de que o raio final ( $R_f$ ), deverá ser maior que o raio inicial.

Sabe-se que os materiais comumente são fornecidos com as propriedades variando acima do mínimo estabelecido para suas normas, com isso, o mesmo LNE 500 poderia apresentar 650 MPa de limite de escoamento em uma situação real, desta forma, seu retorno elástico seria de aproximadamente 4%, conforme mostrado na Figura 23.

Com isso, os laminados apresentarão diferentes faixas de retorno elástico perante as alterações em suas propriedades mecânicas que estarão disponíveis nos certificados de composição química.

Observa-se que chapas com menores espessuras apresentam maior retorno elástico, pois possuem uma menor concentração de discordâncias após a deformação plástica se comparadas as de maior espessura. As alterações no módulo de elasticidade contribuíram pouco para a variação do retorno elástico.



**Figura 23.** Mapa de calor 2D da variação do módulo elástico em relação a variação do limite de escoamento, em razão da magnitude do retorno elástico

**Fonte:** Próprio autor.

Existem técnicas com o objetivo de eliminar o retorno elástico, como o método “além-da-dobra” que é utilizado para dobrar a chapa no ângulo requerido, esta técnica se dá pelo abaixamento do punção além do ângulo especificado para a peça, dessa forma, após a descompressão o material tende a retornar elasticamente, chegando até o ângulo definido no projeto (WANG; KINZEL; ALTAN, 1993).

Em razão do exposto os efeitos negativos serão encontrados com mais frequência nos materiais que possuem maior limite de escoamento, maior limite de resistência à tração e um menor módulo de elasticidade, pois carecem de uma maior deformação plástica para a realização da dobra, podendo levar a deformação localizada e ao aparecimento de fissuras.

Para evitar esses problemas, algumas alterações nas geometrias das ferramentas de dobra devem ser levadas em considerações. Neste estudo, apresentou-se alguns desses parâmetros, tais quais: A abertura do canal da

matriz, o tipo de matriz e para a matriz em V utilizou-se o ângulo de abertura da face.

A utilização de lubrificantes auxiliará a redução do coeficiente de atrito, facilitando o deslizamento da chapa durante a etapa de prensagem, isso reduzirá a força necessária para realizar o dobramento, porém levará a um maior efeito do retorno elástico, já que para a mesma dobra, será realizada uma menor força de dobramento, ou seja, menos discordâncias se concentrarão nos contornos de grão do material, consistindo em uma maior mobilidade e capacidade para a recuperação da deformação elástica.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos através dos cálculos esclareceram os impactos na magnitude da força de dobramento, da força máxima gerada nos pontos de apoio e do retorno elástico, através de diferentes parâmetros que variaram e foram relacionados entre si, sendo eles: a espessura da chapa, as propriedades mecânicas do material (limite de escoamento, limite de resistência à tração e módulo de elasticidade), e em relação aos tipos de matrizes (em U, em L e em V) e suas larguras de aberturas do canal e por último o ângulo da face da matriz em V pelo ângulo de atrito.

Concluiu-se que os tipos de matrizes possuem o maior grau de impacto em relação aos outros parâmetros, onde a matriz em V necessita de uma força duas vezes maior que a matriz em U, e quatro vezes maior que a matriz em L. Entretanto, mesmo carecendo de uma maior força de dobramento, a matriz em V é muito utilizada pela sua facilidade na troca dos ferramentais, assim pode-se utilizar matrizes roletadas, atendendo de maneira rápida e eficiente as diferentes dobras solicitadas.

As forças de dobramento encontradas estão abaixo do limite trabalhado pelas prensas dobradeiras disponíveis no mercado, já que estas podem oferecer uma força de aproximadamente 1300 kN/m.

A força máxima calculada nos pontos de apoio atingiu o máximo de duas vezes a magnitude da força de dobramento, contudo, como se trata de um sistema simétrico, onde P foi aplicado em ambas as faces da matriz em V, esta força pode ser dividida por dois, com isso, a força P pode no máximo ser a resposta contrária da força F, seguindo a terceira lei de Newton, já que a matriz permanece fixa. Esta força máxima gerada nos pontos de apoio é momentânea, e ocorre até o final da etapa de prensagem e neste caso foi calculada apenas para o momento máximo, desconsiderando toda a ação desde o início do deslize da chapa.

O cálculo do valor teórico do raio interno da dobra após o retorno elástico apresentou um impacto na magnitude do retorno elástico considerável, esta variação pode ser prejudicial ao projeto, podendo levar ao reprocesso da peça.

Os efeitos negativos foram esclarecidos a partir dos conceitos estabelecidos e podem ser evitados com a utilização de cálculos e técnicas de prevenção.

Estes conceitos são pouco explorados pela maioria das empresas convencionais brasileiras, que muitas vezes acabam terceirizando seus serviços de cálculos e utilizando um valor único padronizado de força de dobramento para diferentes materiais, gerando resultados inconsistentes.

As possíveis novas abordagens deste tema podem tentar reequacionar as fórmulas utilizadas neste trabalho, para incluir outros parâmetros como a altura de trabalho do punção, geometria do fundo da matriz, raio do nariz do punção, a área de atrito durante o deslizamento, entre outras propriedades que refinem os resultados.

Como também utilizar os conceitos do mecanismo de endurecimento por deformação plástica para definir a força de dobramento exata para ultrapassar o limite de escoamento do material na região de dobra, minimizando a recuperação elástica, porém respeitando o limite de resistência à tração do material.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASNAFI, N. Springback and fracture in v-die air bending of thick stainless steel sheets. **Materials and Design**, v. 21, n. 3, p. 217–236, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11888**: Informação e documentação: Referências. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11889**: Informação e documentação: Referências. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6656**: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BEEDEES, J.; BIBBY, M. J. **Principles of Metal Manufacturing Process**. Ottawa: Carleton University, 1999.

CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. **John Wiley & Sons**, Inc., 2002.

CHEN, F. K.; KO, S. F. Deformation analysis of springback in L-bending of sheet metal. **Advanced Science Letters**, v. 4, n. 6–7, p. 1928–1932, 2011.

CHIKALTHANKAR, S. B.; BELURKAR, G. D.; NANDEDKAR, V. M. Factors Affecting on Springback in Sheet Metal Bending : A Review. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, v. 3, n. 4, p. 247–251, 2014.

COELHO, P. G.; FARIA, L. O.; CARDOSO, J. B. Structural analysis, and optimization of press brakes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 12–13, p. 1451–1460, 2005.

CSN. **Laminados a quente**. [online]. 2020. Disponível em: <https://www.csn.com.br/homepage/acos-planos/laminados-a-quente/>. Acesso em: 7 abr. 2022

DAROIT, M. Estudo de Aço Microligado ao Vanádio para a Produção de Barra Nervurada para Concreto Armado com Característica de Soldabilidade Segundo Norma ABNT NBR 8965:1985. Prof. Dr. Afonso Reguly, 56. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

FARSI, M. A.; AREZOO, B. Bending force and spring-back in V-die-bending of perforated sheet-metal components. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 33, n. 1, p. 45–51, 2011.

FREES, M. V. S. **Avaliações sobre o processo de dobramento do aço NBR 6656 LNE 380**. 2017.

HAMBLI, R.; MKADDEM, A.; POTIRON, A. Damage prediction in L-bending processes using FEM. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 22, n. 1–2, p. 12–19, 2003.

HINO, R.; GOTO, Y.; YOSHIDA, F. Springback of sheet metal laminates in draw-bending. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 139, n. 1- 3, p. 341–347, 2003.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. Introdução aos processos de fabricação de Produtos Metálicos. São Paulo: **Blucher**, 2013.

LAVANYA, S. et al. Acoustic Emission during Press-Brake Bending of SS 304L Sheets and its Correlation with Residual Stress Distribution after Bending. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 31, n. 2, p. 1550–1561, 2022.

LIN, Z. C.; CHANG, D. Y. The selection system for sheet bending tooling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 11, n. 2, p. 127–135, 1996.

LIU, G. W.; ZHONG, Z. L. Study and design of sheet metal bending springback adjustable die. **Advanced Materials Research**, v. 152–153, p. 1092–1096, 2011.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S. J. **Mechanics of Sheet Metal Forming**. 2a. ed. Londres: Butterworth-Heinemann, 2002.

MILITZER, M. Computer simulation of microstructure evolution in low carbon sheet steels. **ISIJ International**, v. 47, n. 1, p. 1–15, 2007.

PHANITWONG, W.; BOOCHAKUL, U.; THIPPRAKMAS, S. Design of U-geometry parameters using statistical analysis techniques in the U-bending process. **Metals**, v. 7, n. 7, 2017.

ROELANDS, R. P. P. **Modeling the Dynamics of Hydraulic Press Brakes**. 2000. 89 p. Dissertation (Master of Engineering) - Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2000.

SRINIVASAN, R.; VASUDEVAN, D.; PADMANABHAN, P. Influence of friction parameters on springback and bend force in air bending of electrogalvanized steel sheet: An experimental study. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 36, n. 2, p. 371–376, 2014.

VOLK, W. et al. Models and modelling for process limits in metal forming. **CIRP Annals**, v. 68, n. 2, p. 775–798, 2019.

WANG, C.; KINZEL, G.; ALTAN, T. Mathematical modeling of plane-strain bending of sheet and plate. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 39, n. 3–4, p. 279–304, 1993.

ZARAGOZA, V. G. et al. Sheet metal bending with flexible tools. **Procedia Manufacturing**, v. 29, p. 232–239, 2019.