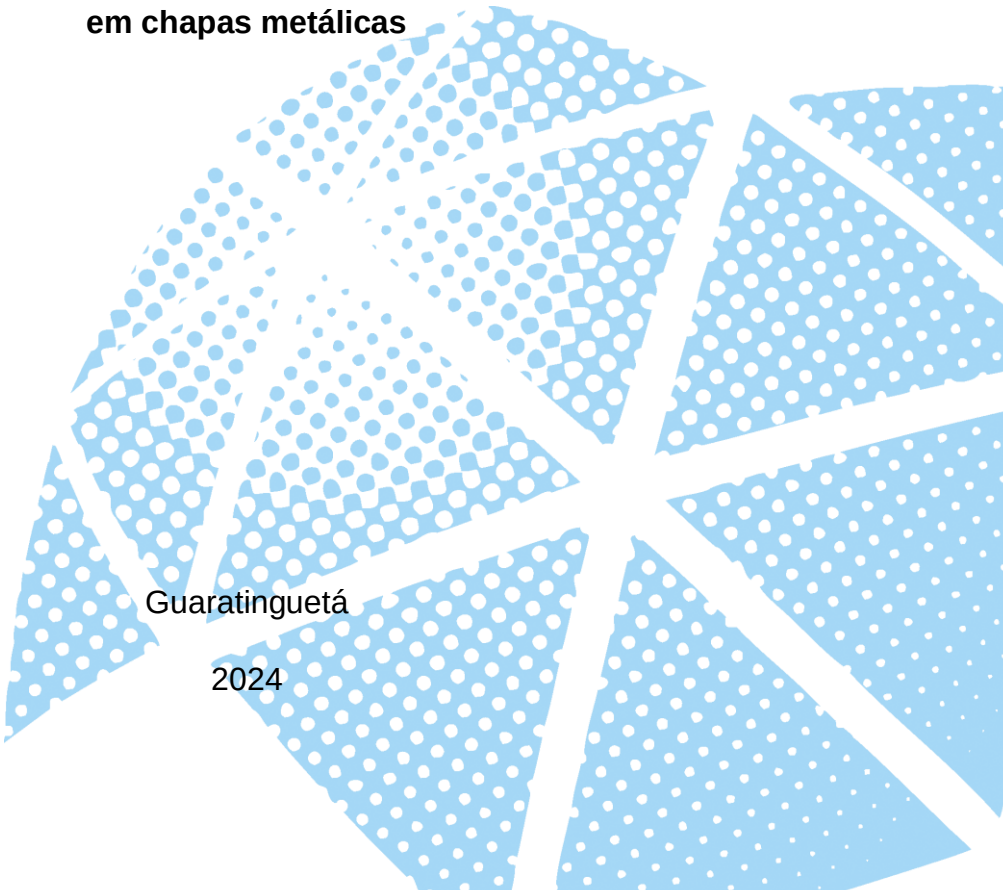
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá - Campus de Guaratinguetá**

**Lucas Esteves de Paula**

# Estudo e análise dos parâmetros de dobramento e da planificação de dobras em chapas metálicas



Guaratinguetá

2024

**Lucas Esteves de Paula**

# Estudo e análise dos parâmetros de dobramento e da planificação de dobras em chapas metálicas

Trabalho de Graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de engenharia e ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Dr. Francisco José Grandinetti

Guaratinguetá

2024

P324e

Paula, Lucas Esteves de
Estudo e análise dos parâmetros de dobramento e da planificação de dobras em chapas metálicas / Lucas Esteves de Paula - Guaratinguetá, 2024.
68 f : il.
Bibliografia: f. 66-68

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Grandinetti

1. Chapas de metal. 2. Conformação de metais. 3. Metalurgia l. I. Título.

CDU 669-41

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

**Lucas Esteves de Paula**

# Estudo e análise dos parâmetros de dobramento e da planificação de dobras em chapas metálicas

Trabalho de graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de engenharia e ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Grau acadêmico Bacharel em Engenharia mecânica.
Área de Concentração: Engenharia, Conformação mecânica.

Data da defesa: 14 / 11 / 2024

Banca Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
FRANCISCO JOSE GRANDINETTI
Data: 21/01/2025 22:40:25-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Prof. Dr. Francisco José Grandinetti
UNESP - Faculdade de engenharia e ciências - Campus de Guaratinguetá

gov.br Documento assinado digitalmente
ALVARO MANOEL DE SOUZA SOARES
Data: 22/01/2025 10:05:34-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Prof. Dr. Álvaro Manoel de Souza Soares
UNESP - Faculdade de engenharia e ciências - Campus de Guaratinguetá

gov.br Documento assinado digitalmente
THAIS SANTOS CASTRO
Data: 22/01/2025 10:49:31-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Prof. Dr. Thais Santos Castro
UNESP - Faculdade de engenharia e ciências - Campus de Guaratinguetá

## AGRADECIMENTOS

A minha mãe Lenita, e ao meu pai Leonel, o meu mais verdadeiro obrigado, pelo apoio incondicional em todos os momentos desta trajetória, pela educação, e pelos exemplos a seguir. A meus outros familiares e amigos pelo apoio e motivação durante este caminho.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá que direta ou indiretamente, contribuíram para o meu crescimento pessoal e formação profissional.

Em especial ao Professor Dr. Francisco José Grandinetti pela orientação tanto deste trabalho de graduação quanto do estágio supervisionado, pela paciência e compreensão.

A todos aqueles que não lembro, mas que com um gesto de apoio, uma palavra de motivação, ajudaram na minha formação pessoal e profissional.

Muito Obrigado!

## RESUMO

Dos processos de conformação mecânica empregados na indústria metalmecânica, o dobramento é um dos mais requisitados, devido sua simplicidade, baixo custo e entrega de resultados satisfatórios. Dobrar uma chapa metálica com precisão dentro das especificações do projeto, requer o conhecimento dos parâmetros fundamentais, das técnicas para determina-los corretamente e da ciência dos fenômenos que ocorrem no processo como: a forma da distribuição das tensões, a disposição da deformação e a ocorrência do efeito mola. O trabalho apresenta um estudo dos fenômenos e dos parâmetros relacionados ao dobramento, realizando um estudo teórico de cada um dos principais elementos, conceituando pontos como linha neutra, o raio mínimo de dobramento e o importante fator de dobramento (fator k), ainda se apresenta os conceitos gerais sobre o processo e os principais tipos de dobramento. O estudo inclui também a determinação da planificação (*blank*) em uma chapa metálica, mostrando os principais métodos para a realização do processo. Analisando casos simulados onde, busca-se compreender o comportamento dos planificados quando são realizadas variações nos parâmetros para dobra, quando se muda o método de determinação dos mesmos e altera-se a técnica de planificação. Assim conclui-se que os efeitos causados na peça pelo processo dobramento, estão diretamente relacionados aos fatores e condicionantes: o tamanho do raio de dobramento, o ângulo de dobra, o fator de dobramento (fator k), e o material. Esses fatores modificam as características da planificação da peça durante o processo.



**Palavras-chave:** dobra; dobramento de chapas; fator k; raio mínimo; planificação de dobras.

## ABSTRACT

Of the mechanical forming processes used in the metalworking industry, bending is one of the most requested, due to its simplicity, low cost and delivery of satisfactory results. Bending a sheet metal accurately within the design specifications requires knowledge of the fundamental parameters, the techniques to determine them correctly and the science of the phenomena that occur in the process such as: the shape of the stress distribution, the disposition of the strain and the occurrence of the spring effect. The work presents a study of the phenomena and parameters related to bending, performing a theoretical study of each of the main elements, conceptualizing points such as neutral line, the minimum bending radius and the important bending factor (k factor), as well as presenting the general concepts about the process and the main types of bending. The study also includes the determination of the flattening (blank) on a sheet metal, showing the main methods for carrying out the process. Analyzing simulated cases where it is sought to understand the behavior of the flattened ones when variations are made in the parameters for bending, when the method of determining them is changed and the planning technique is changed. Thus, it is concluded that the effects caused on the part by the bending process are directly related to the factors and constraints: the size of the bending radius, the bending angle, the bending factor (k-factor), and the material. These factors modify the characteristics of the workpiece planning during the process.



**Keywords:** fold; sheet metal folding; k-factor; minimum radius; Fold flattening.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma dos processos de conformação .....15
Figura 2 - Processo de conformação plástica .....18
Figura 3 - Conceito de tensão em uma barra .....19
Figura 4 - Diagrama tensão-deformação .....21
Figura 5 - Deformação plástica .....23
Figura 6 - Comportamento de materiais dúcteis e frágeis para ensaio de tração .....24
Figura 7 - Momento fletor .....25
Figura 8 - Flexão e deformação .....26
Figura 9 - Dobramento manual .....27
Figura 10 - Dobradeira hidráulica CNC e manual .....28
Figura 11 - Ferramental punção e matriz .....28
Figura 12 - Dobramento livre .....29
Figura 13 - Dobramento em “V” .....30
Figura 14 - Dobramento fundo .....31
Figura 15 - Dobramento em “U” .....31
Figura 16 - Dobramento de matriz deslizante .....32
Figura 17 - Dobramento giratório .....33
Figura 18 - Tensões no dobramento de chapas .....33
Figura 19 - Distribuição das tensões .....34
Figura 20 - Efeito mola em uma chapa .....35
Figura 21 - Distribuição das deformações no dobramento .....36
Figura 22 - Representação gráfica do fator k .....41
Figura 23 - Representação do comprimento AB .....43
Figura 24 - Planificação para dobras de 90º norma DIN 6935 .....45
Figura 25 - Planificação para dobra de ângulo agudo norma DIN 6935 .....47
Figura 26 - Planificação para dobra de ângulo obtuso norma DIN 6935 .....47
Figura 27 - Desenvolvimento planificado CAD parte 1 .....49
Figura 28 - Desenvolvimento planificado CAD parte 2 .....50
Figura 29 - Desenvolvimento planificado CAD parte 3 .....51
Figura 30 - Desenvolvimento planificado CAD parte 4 .....51
Figura 31 - Desenvolvimento planificado CAD parte 5 .....52

Figura 32 - Peça dobrada simulada .....52
Figura 33 - Desenho cotado da peça simulada .....53
Figura 34 - Desenho do planificado simulado .....54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Raio mínimo de dobra sugerido pela norma DIN 9635 .....37
Tabela 2 - Raio mínimo de dobra sugerido pela norma DIN 6935 .....38
Tabela 3 - Fator k sugerido para aços.....39
Tabela 4 - Fator k sugerido para aços 2.....40
Tabela 5 - Fator k simplificado .....41
Tabela 6 - Valores de compensação v norma DIN 6935.....45
Tabela 7 - Espessura das Chapas Metálicas .....55
Tabela 8 - Raio mínimo caso 1.....55
Tabela 9 - Fator k para caso 1 .....55
Tabela 10 - Dimensões planificado caso 1.....56
Tabela 11 - Fator k para caso 2 .....56
Tabela 12 - Dimensões planificado caso 2.....56
Tabela 13 - Dimensões planificado caso 3.....57
Tabela 14 - Dimensões do segmento de dobra caso 4 .....57
Tabela 15 - Dimensões planificado caso 4.....58
Tabela 16 - Raio mínimo caso 5.....58
Tabela 17 - Valores de compensação de dobra caso 5 .....59
Tabela 18 - Dimensões planificado caso 5.....59
Tabela 19 – Compilado de resultados das planificações.....61

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO ..... 11**

1.1 JUSTIFICATIVA ..... 12
1.2 OBJETIVO ..... 13
1.2.1 Objetivo Principal ..... 13
1.2.2 Objetivos Específicos ..... 13
1.3 METODOLOGIA ..... 13

**2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 15**

2.1 CONFORMAÇÃO DOS METAIS ..... 15
2.2 CONFORMAÇÃO MECÂNICA ..... 16
2.3 CONFORMAÇÃO POR DEFORMAÇÃO PLÁSTICA ..... 16
2.4 TENSÃO E DEFORMAÇÃO ..... 19
2.4.1 Tensão ..... 19
2.4.2 Deformação ..... 20
2.4.3 Diagrama tensão deformação ..... 20
2.4.4 Comportamento elástico ..... 21
2.4.5 Comportamento plástico ..... 22
2.5 DUCTILIDADE ..... 23
2.6 MOMENTO FLETOR ..... 25

**3 DESENVOLVIMENTO ..... 27**

3.1 PROCESSO DE DOBRAMENTO ..... 27
3.2 TIPOS DE PROCESSO DE DOBRAMENTO ..... 29
3.2.1 Dobramento Livre ou dobra de ar ..... 29
3.2.2 Dobramento em “V” ..... 30
3.2.3 Dobramento Fundo ..... 30
3.2.4 Dobramento em “U” ..... 31
3.2.5 Dobramento de matriz deslizante ou em “L” ..... 32
3.2.6 Dobramento Giratório ou rotativo ..... 32
3.3 ESFORÇOS NO DOBRAMENTO E LINHA NEUTRA ..... 33
3.4 EFEITO MOLA NO DOBRAMENTO ..... 35

3.5 RAIO MÍNIMO DE DOBRAMENTO....36
3.6 FATOR K....38
3.7 DESENVOLVIMENTO DE PLANIFICADOS....41
3.7.1 Método 1....42
3.7.2 Método 2....43
3.7.3 Método 3....44
3.7.4 Método 4....48
3.8 ANÁLISE DOS PARÂMETROS....52
3.8.1 Caso 1....55
3.8.2 Caso 2....56
3.8.3 Caso 3....57
3.8.4 Caso 4....57
3.8.5 Caso 5....58
**4 DISCUSSÃO....60**
**5 CONCLUSÃO....64**
**6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS....65**
**REFERÊNCIAS....66**

# 1 INTRODUÇÃO

Um dado material, normalmente em uma forma simples como uma chapa ou um tarugo, é transformado em um componente útil, através de um processo de fabricação. Este produto, na maioria das vezes, adquire geometria complexa com forma, tamanho, precisão, tolerâncias e propriedades bem definidas (ALTAN, 2012). Os processos de produção para a construção de objetos fazem parte da história da humanidade, desde as primeiras eras da civilização a capacidade de desenvolvimento e de construção de objetos, foi um fator importante para a evolução da sociedade.

A manufatura derivada de duas palavras originarias do latim, *manus* que significa mãos, e *factus* que significa fazer, unidas derivam o significado de feito à mão, é um dos setores da indústria mais importantes hoje em dia. Mesmo hoje onde grande parte dos processos de fabricação não são mais realizados por mãos humanas diretamente, e sim, por máquinas e ferramentais automatizados controlados por sistemas computacionais, os produtos manufaturados são indispensáveis a sociedade.

Durante as centenas de anos os materiais usados para produção foram mudando, uns caindo em desuso, outros perdendo importância e sendo substituídos, e até o desenvolvimento de novos materiais. Entretanto os materiais metálicos mesmo, sendo substituídos em muitas aplicações por polímeros, cerâmicas e compósitos, ainda ocupam um importante espaço na indústria, logo temos a necessidade de se transformar a forma deles.

De um parafuso, passando por uma panela ao motor de avião, são exemplos de produtos que em algum momento do seu processo de produção, tiveram ele mesmo ou peças que o compõem, submetidos a um ou mais processos de conformação. Os mais diversos processos foram desenvolvidos com o objetivo de se conformar e modificar a forma dos metais, assim agregando valor a cada etapa.

Neste universo de processos temos o dobramento, o ato de dobrar para mudar uma forma, é utilizado em peças de um relógio mecânico, de um automóvel ou de uma estrutura metálica, e determinar corretamente como realizar esta dobra é permitir o correto funcionamento, é diminuir os custos, minimizar as perdas e aumentar a eficiência.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Entre os diversos processos de conformação mecânica empregados na indústria, o dobramento é um dos amplamente empregados, devido a seu baixo custo com entrega de resultados. O entendimento da engenharia por trás do processo, é importante para sua execução ocorra dentro da expectativa.

No período de estágio em uma empresa metalúrgica, o processo de dobramento de chapas metálicas, foi uma atividade realizada com muita frequência. A necessidade de projetar uma peça com dobra ou criar uma planificação (*blank*) de uma peça que apresentava uma dobra sempre se mostrava presente. Neste período os conceitos básicos para a realização destas atividades foram repassados, estes conceitos consistiam em informações dos padrões utilizados na empresa para o projeto das peças dobradas. Informações como o fator k empregado, qual raio de curvatura usar e principalmente a técnica usada para realizar as planificações.

Com esses dados foi possível fazer o desenvolvimento de inúmeras peças com sucesso, sendo realizadas as dobras dentro dos parâmetros e do dimensional solicitados. Porem mesmo apresentado um resultado geral satisfatório, algumas correções mostravam-se por vezes necessárias, principalmente com relação aos raios de dobra.

Sendo um processo de conformação mecânica muito difundido na indústria metalmecânica, o aprimoramento dos conhecimentos relacionados ao tema mostra-se justificável.

Assim com base nesta experiência construiu-se a ideia do desenvolvimento deste trabalho, como forma de procurar ampliar e consolidar os conhecimentos adquiridos e trabalhados no estágio.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo Principal

Analisar e comparar o comportamento dos planificados quando variando as formas de execução e os principais parâmetros de dobramento.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

A. Analisar o comportamento das planificações das peças.
B. Desenvolver uma revisão da teoria do processo de dobramento.
C. Buscar compreender melhor os conceitos do processo de dobramento.
D. Aprimorar o entendimento dos conceitos aprendidos no estágio.
E. Demostrar técnica de planificação aprendida.

## 1.3 METODOLOGIA

A realização do trabalho segue uma construção exploratória sobre o processo de dobramento de chapas metálicas, realizando um estudo sobre os princípios e parâmetros envolvidos no desenvolvimento das planificações necessárias a correta produção das dobras em chapas metálicas.

Primeiramente, desenvolve-se um estudo sobre os conceitos e princípios necessários ao processo de dobra, partindo de livros, manuais, apostilas e normas sobre o tema de dobramento. Com a reunião destas informações, construiu-se os fundamentos teóricos e a análise dos principais parâmetros relacionados ao processo de dobramento.

A partir da fundamentação desenvolvida inicia-se a exploração das técnicas de planificação. Escolhendo uma peça de dobra simples, determinado o material e dimensões, analisa-se o comportamento dos planificados quando a variação dos parâmetros de construção, a alteração dos parâmetros baseia-se em diferentes

recomendações descritas em normas e em manuais de dobramento. Na investigação compara-se também os diferentes métodos de planificação, indicados e recomendados por diferentes fontes para a realização do processo de dobramento.

Deste modo, o desenvolvimento do trabalho busca atender os objetivos descritos, focando no aprimoramento do conhecimento sobre o tema.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

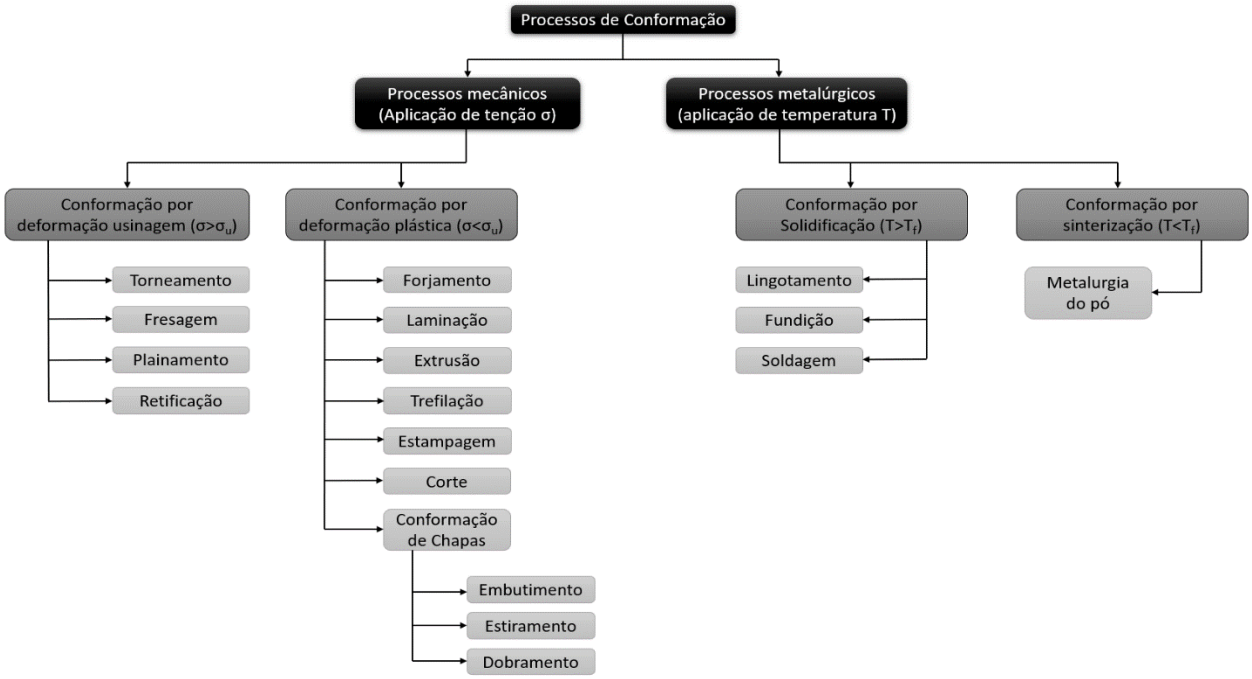
## 2.1 CONFORMAÇÃO DOS METAIS

Entende-se o processo de conformação dos corpos metálicos como o processo de modificação da forma desse corpo metálico para outra forma definida (BRESCIANI FILHO, 2011).

Os processos de modificação da forma de corpos metálicos podem ser divididos em dois principais grupos: processos mecânicos, nos quais as modificações de forma são provocadas pela aplicação de tensões externas, e processos metalúrgicos, nos quais as modificações de forma estão relacionadas com altas temperaturas (ROCHA, 2012).

A Figura 1 apresenta um fluxograma ilustrando os principais processos de conformação dos metais, tendo dois principais grupos.

Figura 1 - Fluxograma dos processos de conformação




Fonte: Adaptado de Rocha (2012).

## 2.2 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Define-se conformação mecânica como uma operação onde se aplicam solicitações mecânicas em metais, que respondem com uma mudança permanente das suas dimensões (HELMAN, 2010).

Nos processos de fabricação usando conformação mecânica, a geometria da peça é alterada para o formato desejado através de esforços mecânicos que como ilustrado na Figura 1 podem ocorrer de duas formas através da deformação onde a tensão aplicada é inferior a tensão de ruptura do material ($\sigma < \sigma_u$), ou através da ruptura onde a tensão aplicada é superior a tensão de ruptura do material ($\sigma > \sigma_u$).

Para Groover (2014), nos processos de conformação, o material muda de forma pela aplicação de forças que causam tensões superiores ao seu limite de escoamento. Para que o elemento se deforme desta maneira ele deve ser bastante dúctil para suportar a deformação plástica e evitar a ocorrência de fratura.

## 2.3 CONFORMAÇÃO POR DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Processos de conformação plástica, são processos de fabricação nos quais uma intensa força é aplicada na liga metálica no estado sólido provocando sua deformação plástica (deformação permanente) e, assim, mudando a sua forma até aquela da peça desejada. Esses processos usam uma ferramenta, geralmente chamada de matriz, com que se aplicam as forças necessárias. O metal, então, se deforma e toma a forma determinada parcialmente ou quase totalmente pela geometria da matriz (KIMINAMI, 2013).

Os processos de conformação por deformação plástica podem ser classificados de diversas forma como: o tipo de esforço predominante, a temperatura de trabalho, a forma do produto final, o tamanho da área de deformação e outras classificações. A classificação abaixo é orientada pelo tipo de esforço predominante no processo, sendo assim, subdividida em 5 tipos de conformação:

- Conformação por compressão direta

Nos processos de compressão direta, a força é aplicada à superfície da peça que está sendo trabalhada e o metal flui em ângulos retos com a direção da compressão. Os principais exemplos desta classe dos processos são o forjamento e laminação (DIETER, 1988).

- Conformação por compressão indireta

O processo de conformação indireta, as forças externas aplicadas sobre a peça podem ser tanto de tração como de compressão. Porém as que efetivamente provocam a conformação plástica do metal são de compressão indireta, forças desenvolvidas pela reação da matriz sobre a peça. Os principais processos que se enquadram nesse grupo são a trefilação e a extrusão, de tubos e fios, e a estampagem profunda (embutimento) de chapas (BRESCIANI FILHO, 2011).

- Conformação por tração

As forças aplicadas são frequentemente de tração, porém se desenvolvem forças compressivas elevadas devido à reação entre a peça que está sendo trabalhada e a matriz. O metal flui sob um estado de tensões combinadas em que há altas forças de compressão em pelo menos uma das principais direções. O melhor exemplo de um processo de conformação por tração, é o estiramento, na qual um metal se adapta ao contorno de uma matriz por aplicação de forças de tração (DIETER, 1988).

- Conformação por cisalhamento

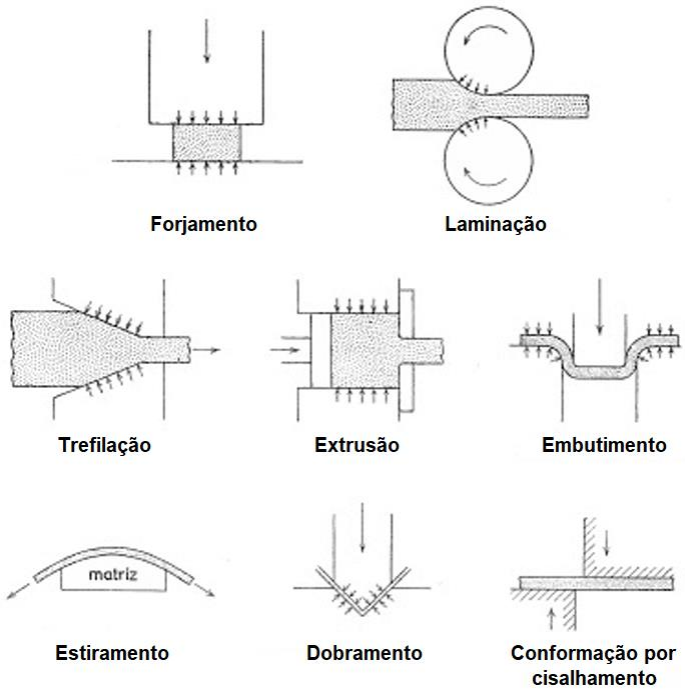
Os processos de conformação por cisalhamento envolvem forças cisalhantes suficientes ou não para romper o metal no seu plano de cisalhamento. Cita-se com exemplos desse tipo de processo, a torção de barras e o corte de chapas (BRESCIANI FILHO, 2011).

- Conformação por flexão

No processo de conformação por flexão as modificações de forma são obtidas mediante a aplicação de um momento fletor. Este processo é utilizado para dobrar chapas, barras e outros produtos. Como exemplos podem ser citados os processos de dobramento livre, dobramento de borda, dobramento de matriz e calandragem (BRESCIANI FILHO, 2011).

A Figura 2 ilustra os processos de conformação citados como exemplos da classificação.

Figura 2 - Processo de conformação plástica




Fonte: Adaptado de Dieter (1981).

## 2.4 TENSÃO E DEFORMAÇÃO

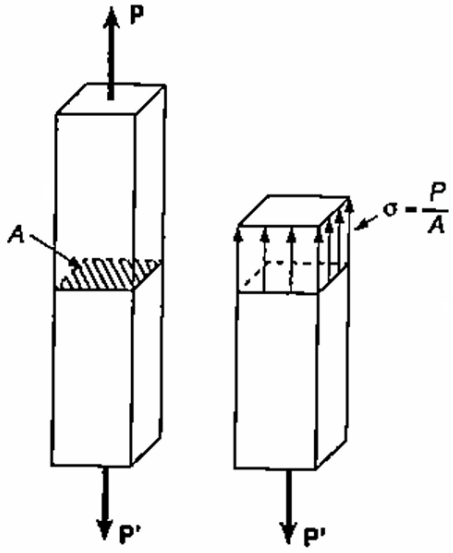
### 2.4.1 Tensão

Um corpo qualquer em repouso ou não, quando submetido a um carregamento externo (várias forças atuando), tem sua forma modificada. Estas forças podem provocar deformações elásticas e ou plásticas (SHAEFFER, 2004).

A força por unidade de área ou intensidade de forças distribuídas numa certa seção transversal é chamada tensão atuante, nessa seção, sendo indicada pela letra grega σ (sigma), conforme mostra-se na equação 1. A tensão em uma barra de seção transversal A, sujeita a uma força axial P, é obtida então dividindo-se o módulo P da força pela área A (BEER, 1995). A Figura 3 ilustra o conceito apresentado.

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

Figura 3 - Conceito de tensão em uma barra




Fonte: Beer (1995).

### 2.4.2 Deformação

Sempre que uma força é aplicada a um corpo, esta tende a mudar sua forma e o tamanho. Essas mudanças são denominadas deformações. (HIBBELER, 2010).

De modo geral, a deformação de um corpo não será uniforme em todo o seu volume e, portanto, a mudança na geometria a cada segmento de reta no interior do corpo pode variar ao longo de seu comprimento (HIBBELER, 2010).

A deformação ε é definida de acordo com a equação 2 apresentada.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2}$$

Onde: ε = deformação (adimensional).

Δl = variação do comprimento (mm).

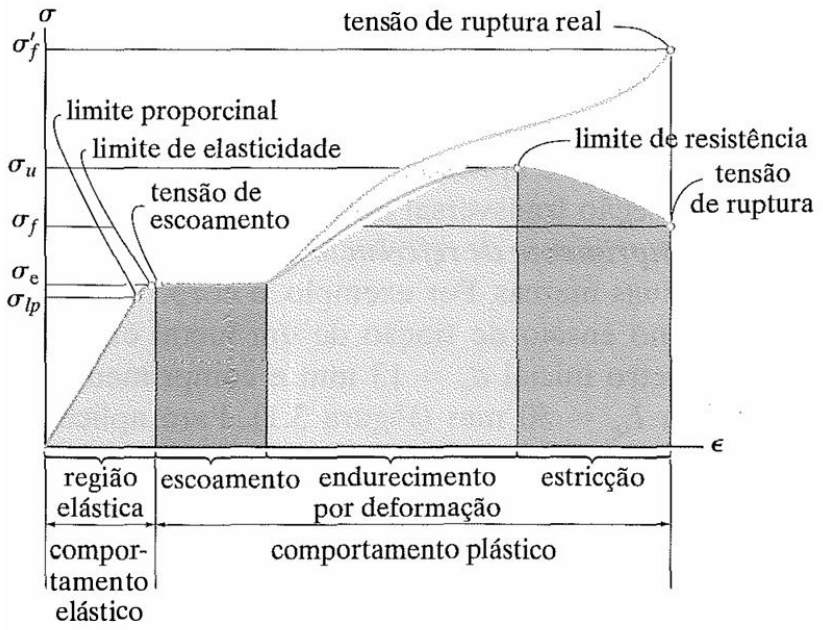
$l_0$ = comprimento inicial (mm).

### 2.4.3 Diagrama tensão deformação

Existem três tipos de tensões mecânicas estáticas a que os materiais podem ser submetidos: tração, compressão e cisalhamento. As tensões de tração tendem a alongar o material, as tensões de compressão tendem a comprimi-lo e o cisalhamento envolve tensões que tendem a fazer com que partes adjacentes do material deslizem entre si. A curva tensão-deformação representa a relação básica que descreve as propriedades mecânicas dos materiais para todos estes três tipos de tensões (GROOVER, 2014).

Com os dados obtidos em um ensaio de tração ou compressão, é possível calcular vários valores da tensão e da deformação correspondentes no corpo de prova e, então, construir um gráfico com esses resultados. A curva resultante é denominada diagrama tensão-deformação Figura 4 (HIBBELER, 2010).

Figura 4 - Diagrama tensão-deformação




Fonte: Hibbeler (2010).

### 2.4.4 Comportamento elástico

Um material tem comportamento elástico quando as deformações causadas por um certo carregamento desaparecem com a retirada do carregamento. Chama-se limite de elasticidade do material ao maior valor de tensão para o qual o material ainda apresenta comportamento elástico (BEER, 1995).

Pode-se ver que a curva é na verdade uma linha reta em grande parte dessa região, de modo que a tensão é proporcional à deformação (HIBBELER, 2010).

A deformação elástica resulta em uma relação linear, como mostrado na Figura 4. A inclinação desse segmento linear corresponde ao módulo de elasticidade *E*. Esse módulo pode ser considerado como rigidez, ou uma resistência do material à deformação elástica. Quanto maior o módulo, mais rígido será o material, ou menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma dada tensão (CALLISTER, 2012).

A relação que rege a proporcionalidade entre a tensão e a deformação na fase elástica, é conhecida como lei de Hooke, equação 3.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

Onde: σ = Tensão (Pa).

*E* = Módulo de elasticidade ou modulo de Young (Pa).

ε = Deformação (adimensional).

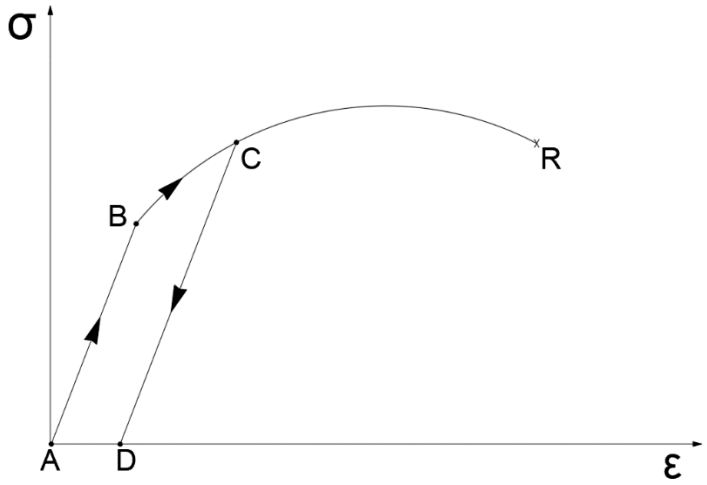
### 2.4.5 Comportamento plástico

Segundo Callister, (2012) para a maioria dos materiais metálicos, a deformação elástica ocorre apenas até as deformações de aproximadamente 0,005. Conforme o material é deformado além desse ponto, a tensão deixa de ser proporcional à deformação, e ocorre uma deformação permanente, não recuperável, a deformação plástica.

Um pequeno aumento na tensão acima do limite de elasticidade resultará no colapso do material e fará com que ele se deforme permanente. A partir deste ponto inicia-se o escoamento e o comportamento plástico do material (HIBBELER, 2010).

Uma carga é aplicada no material, e a mesma ultrapassar a tensão de escoamento do material, e após a retirada da carga as tensões e deformações decrescem de maneira linear, ao longo de uma linha reta CD, paralela à reta AB da curva de carregamento, conforme Figura 5. O fato de ε não voltar ao ponto zero indica que o material sofreu uma deformação permanente ou plástica (BEER, 1995).

Figura 5 - Deformação plástica




Fonte: Adaptado de Beer (1995).

Para os processos de conformação mecânica, a zona mais importante é aquela que vai do limite de escoamento até o limite de resistência. Nesta zona como mostrado na Figura 4, o material encontra-se no estado plástico. No limite de escoamento inicia a deformação plástica e no limite máximo o escorregamento dos cristais chegou a tal ponto que não há mais união entre eles e o material se aproxima da ruptura e inicia-se o estrangulamento no ensaio de tração (SHAEFFER, 2004).

## 2.5 DUCTILIDADE

Callister, (2014) descreve a ductilidade do material é a principal propriedade mecânica no processo conformação. A ductilidade é definida por Callister, (2014) como uma medida do grau de deformação plástica que foi suportado pelo material até a fratura.

A ductilidade pode ser especificada quantitativamente de maneira percentual de duas formas: um alongamento ou uma redução de área. A equação 4 mostra a forma de alongamento percentual.

$$\%AL = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0}\right) 100\% \quad (4)$$

Onde: %AL = porcentagem de deformação plástica na fratura (%).

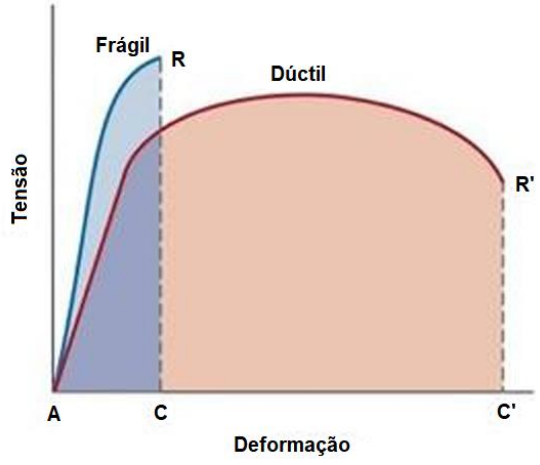
$l_f$ = comprimento no momento da fratura (mm).

$l_0$ = comprimento original (mm).

Ainda segundo Callister, (2014) o conhecimento da ductilidade dos materiais é importante por pelo menos duas razões. Primeiro ela indica ao projetista o grau ao qual uma estrutura irá se deformar plasticamente antes de fraturar. Segundo, especifica o grau de deformação permitido durante as operações de conformação.

Os materiais podem ser classificados quanto a sua ductilidade de duas formas, como materiais dúcteis ou materiais frágeis. A Figura 6 ilustra o comportamento do gráfico tensão-deformação para ambas as características.

Figura 6 - Comportamento de materiais dúcteis e frágeis para ensaio de tração




Fonte: Adaptado de Callister (2014).

Hibbeler, (2010) define um material como dúctil, como sendo qualquer material que possa ser submetido a grandes deformações antes de sofrer ruptura. E

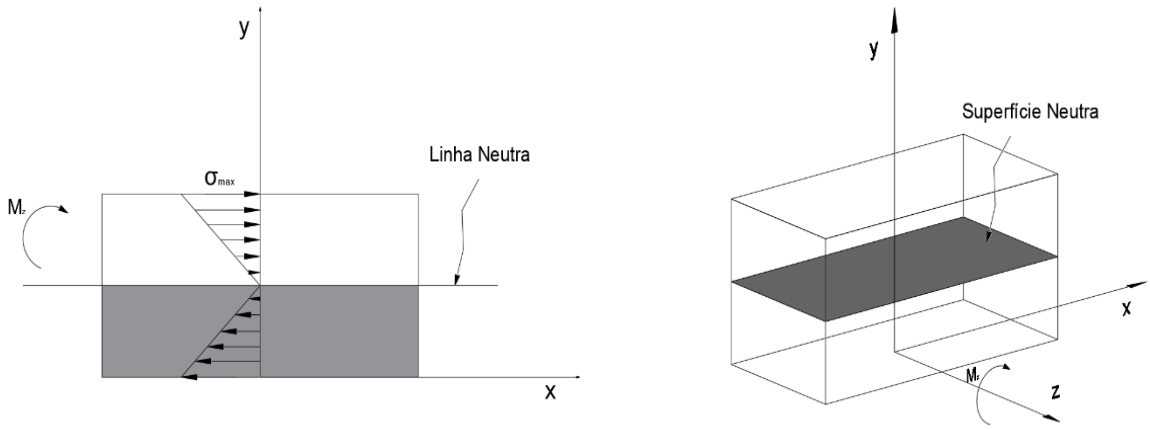
como material frágil, aqueles que exibem pouco ou nenhum escoamento antes da falha.

## 2.6 MOMENTO FLETOR

O processo de dobramento é caracterizado por ser um processo de conformação onde o esforço predominante é a flexão.

O momento fletor é causado pelas cargas externas que tendem a fletir o corpo em torno de um eixo que se encontra em um plano da área (HIBBELER, 2010). Ainda segundo Hibbeler, (2010) a seção transversal de uma viga reta permanece plana quando a viga se deforma por flexão. Isso provoca uma tensão de tração em um lado da viga e uma tensão de compressão do outro lado. Por consequência, entre essas duas regiões existe uma superfície, denominada superfície neutra, na qual não ocorrerá mudança nos comprimentos das fibras longitudinais do material. É mostrado o diagrama de momento fletor na Figura 7.

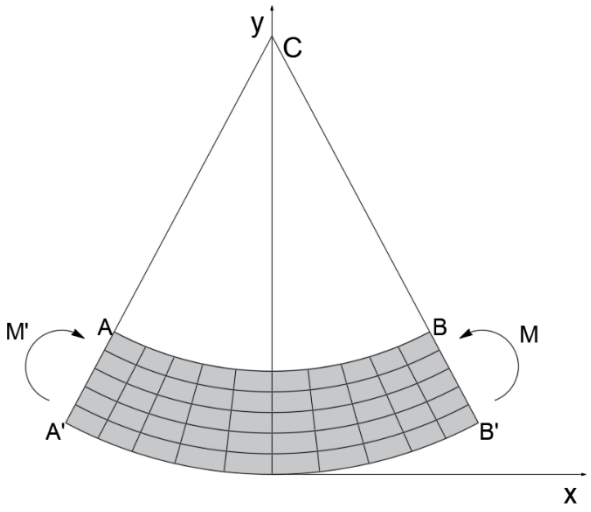
Figura 7 - Momento fletor




Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010)

Na Figura 8 Beer, (1995) diz que desse modo, em qualquer ponto de uma barra esbelta submetida à flexão pura, tem-se um estado uniaxial de tensões. A linha AB diminui de comprimento e a linha A' B' aumenta de comprimento, verifica-se que a deformação específica $\varepsilon_x$ e a tensão $\sigma_z$ são negativas na parte superior da barra, processo de compressão, e positivas na parte inferior, processo de tração.

Figura 8 - Flexão e deformação




Fonte: Adaptado de Beer (1995).

# 3 DESENVOLVIMENTO

## 3.1 PROCESSO DE DOBRAMENTO

Processo de dobramento (*bending*), é definido como sendo um fenômeno de deformação plástica, em uma chapa metálica ocorrendo ao longo de uma linha de dobra. É um processo citado por diversos autores com sendo largamente utilizado na indústria, segundo Barbosa, (2009) tem sido usado amplamente nas industrias em razão do bom acabamento superficial, redução de peso e baixo custo de fabricação.

O dobramento pode ser realizado de maneira manual com o emprego de ferramentas simples, como na antiguidade onde, o procedimento era realizado utilizando-se de um elemento de apoio, por exemplo uma bigorna ou uma pedra e um elemento que cause a deformação no metal, por exemplo um martelo ou uma outra pedra em casos de metais mais moles conforme simbolizado na Figura 9.

Figura 9 - Dobramento manual

Fonte: ABR Comércio[1].

Na indústria moderna o processo de dobramento raramente emprega-se de procedimentos manuais, salvo algum pequeno ajuste de montagem em componentes possíveis de realizar-se um ajuste manual. Na vasta maioria dos processos de dobragem, emprega-se máquinas-ferramenta de pequeno e grande porte, de operação manual ou CNC (Controle Numérico Computadorizado) simbolizadas na Figura 10.

[1] Disponível em :<https://abrcomercio.com.br/produto> Acesso em: 18 nov.2024.

Figura 10 - Dobradeira hidráulica CNC e manual

(a)

Fonte: Aguiar[2].

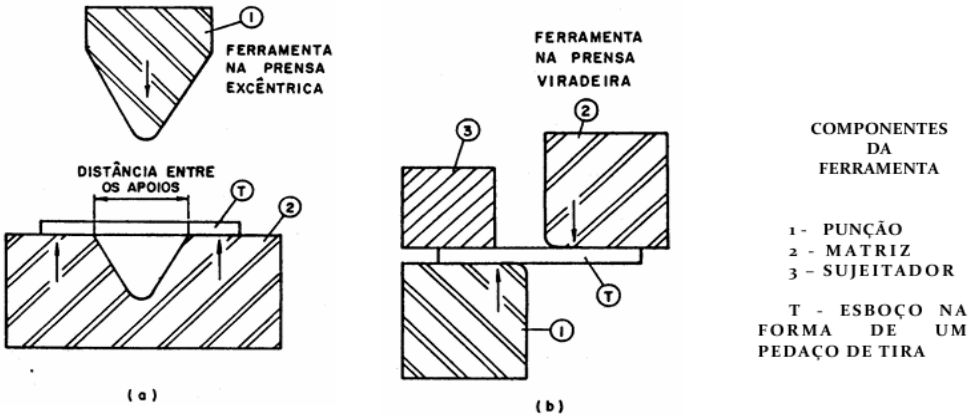
(b)

Fonte: Vega máquinas[3].

O processo de dobragem além de dobrar chapas metálicas, pode ser usado para a produção de diferentes geometrias como a criação de curvas, flanges, bordas e criar vincos para modificar a rigidez de chapas e peças permitindo assim, elevar seu momento de inércia de área.

Para isso podem ser empregados diferentes tipos de ferramentas para a realização da dobra, que se diferenciam pelas geometrias especificas para a punção e para a matriz (Figura 11), assim permitindo produzir as diversas geometrias.

Figura 11 - Ferramental punção e matriz




Fonte: Adaptado de Bresciani Filho (2011).

[2] Disponível em: <https://www.aguiar.ind.br/prensa-dobradeira-chapa>. Acesso em 2 set. 2024.
[3] Disponível em: <https://www.vegamaquinas.com.br/loja>. Acesso em 2 set 2024.

## 3.2 TIPOS DE PROCESSO DE DOBRAMENTO

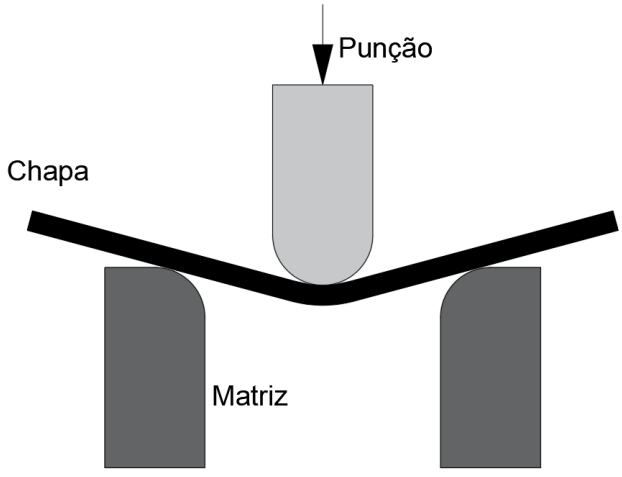
Diversos autores classificam diferentes tipos de dobramento, mas em sua maioria, seguem a classificação apresentada na norma DIN 8586, segundo a norma existem os seguintes tipos de dobramento usando matrizes.

### 3.2.1 Dobramento Livre ou dobra de ar

Este tipo de dobramento é o mais comum de ser encontrado, pois é o mais simples e rápido de ser realizado. Muito utilizado para ensaios de dobramento. O processo usa uma ferramenta (punção) e uma matriz de duplo apoio para realizar a dobra. Possui também o nome dobra de ar pois, a dobra é realizada no “ar” com apenas três pontos de apoio com a chapa, conforme Figura 12.

É realizado posicionando a chapa metálica sob a matriz, na linha de dobra, o punção é pressionado contra a chapa realizando a dobra, mas sem ir até o final da matriz. O ângulo de dobra e o raio são ajustados controlando a carga aplicada e o perfil de punção. Este tipo de dobramento pode ser usado para realizar dobras com ângulos retos, agudos ou obtusos e qualquer raio de curvatura. No entanto é menos preciso e muito sujeito ao fenômeno de retorno elástico.

Figura 12 - Dobramento livre

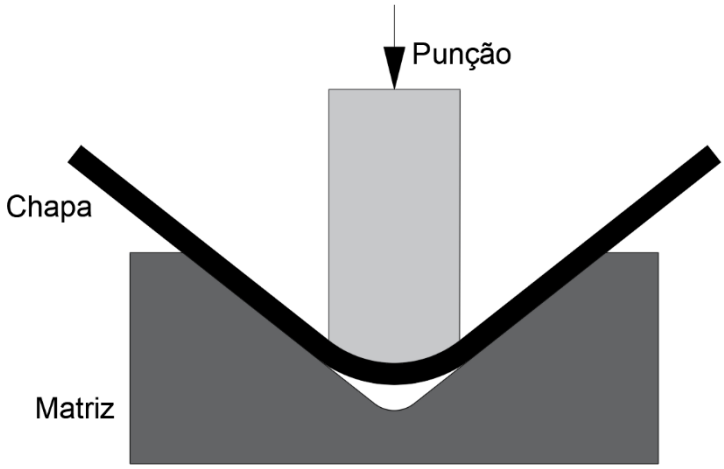



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

### 3.2.2 Dobramento em “V”

Neste processo a dobra a chapa metálica é inserida sob uma matriz em “V”, e o punção desce realizando a dobra, a chapa não preenche completamente a matriz sempre tendo uma área com ar (Figura 13). Apresenta boa precisão e utiliza uma carga para realizar a dobra menor quando comparada a outros tipos.

Figura 13 - Dobramento em “V”



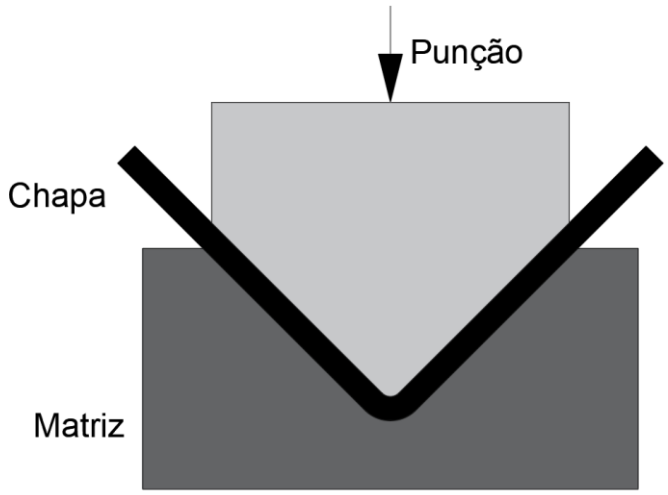

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

### 3.2.3 Dobramento Fundo

No processo de dobramento a fundo (Figura 14) também designado por alguns autores como dobramento cunhado, o punção desloca-se deformando a chapa metálica contra a matriz. No dobramento a fundo o punção e a matriz devem apresentar o mesmo ângulo de perfil, e para o processo é requerida uma carga superior, descrita por alguns autores como sendo de 4 a 5 vezes a carga usada no dobramento livre, portando, requerendo máquinas de grande capacidade e ferramentas com elevada resistência.

As enormes cargas envolvidas no processo de dobragem e consequentemente grande pressão aplicada, praticamente toda a área da seção transversal da dobra sofre deformação plástica, ocasionando um retorno elástico muito limitado e oferecendo uma dobra com alto nível de precisão.

Figura 14 - Dobramento fundo

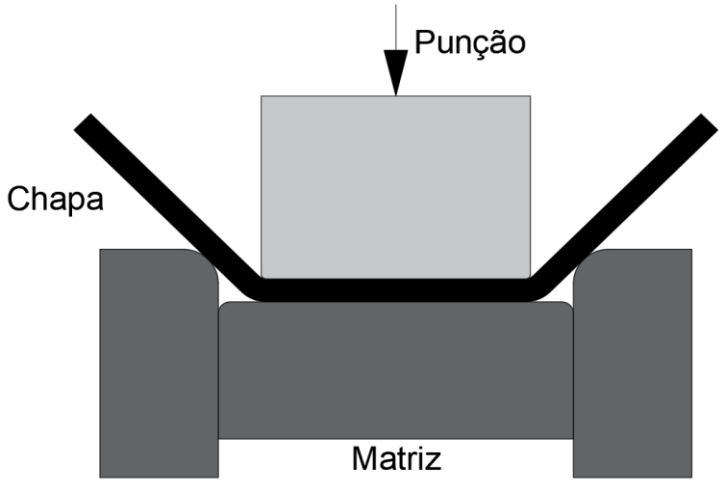



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

### 3.2.4 Dobramento em “U”

Esse tipo de dobramento utilizando matriz no formato de “U” (Figura 15), tem um comportamento muito semelhante ao dobramento fundo. Diferenciam-se pelo fato do dobramento em U ocorrer em dois eixos de forma simultânea. O processo requer maior carga e ferramentas bem especificas.

Figura 15 - Dobramento em “U”

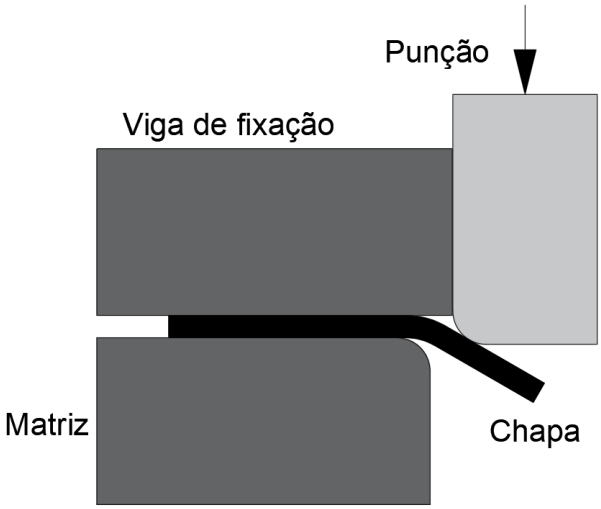



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

### 3.2.5 Dobramento de matriz deslizante ou em “L”

O processo de dobramento por matriz deslizante, ocorre prendendo-se a parte mais longa da peça entre duas vigas de fixação, movendo-se posteriormente a matriz realizando a dobra (Figura 16). É descrito como um processo que pode ser automatizado mais facilmente. Porém a técnica requer cuidado principalmente quanto à possibilidade de riscos superficiais nas peças.

Figura 16 - Dobramento de matriz deslizante




Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

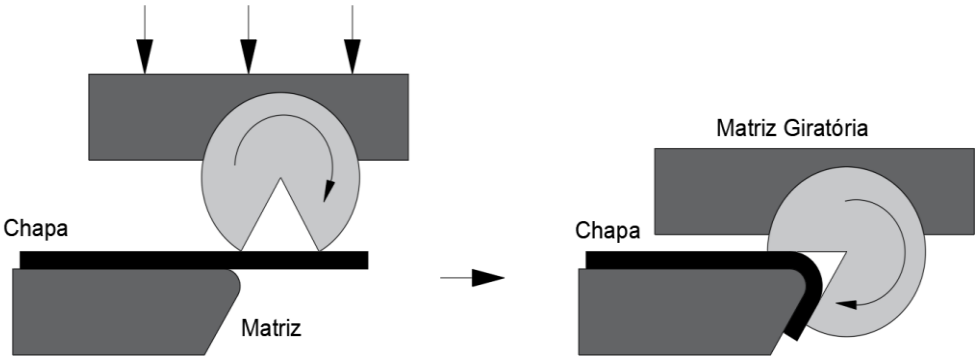
Existem diversas variações do processo quanto a forma que matriz se move, podendo ser descendente ou ascendente, as vigas que prendem a peça e a matriz podem per geometrias especificas para diferentes dobras.

### 3.2.6 Dobramento Giratório ou rotativo

No processo de dobramento giratório (*rotary bending*) o punção normalmente empregado para a dobra, e substituído por um balancim. Este balancim rotaciona a chapa sob a matriz realizando a dobra (Figura 17).

Apresenta-se como principais vantagens, o requerimento de menor carga e maior facilidade de realizar dobras com ângulos superiores a 90º. Porém o processo solicita um ferramental mais sofisticado e de maior custo.

Figura 17 - Dobramento giratório

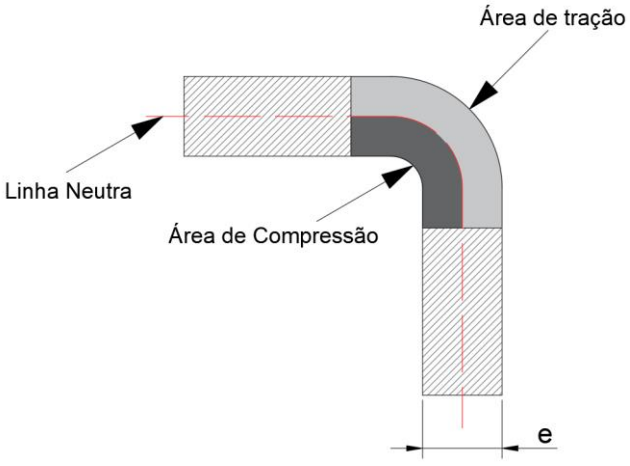



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

## 3.3 ESFORÇOS NO DOBRAMENTO E LINHA NEUTRA

O dobramento se caracteriza pela não-uniformidade e não homogeneidade da deformação. Conforme demostrado na Figura 18, num segmento de chapa dobrada, os valores da tensão e da deformação são dependentes da posição em relação à linha neutra da chapa metálica. (FERREIRA, 2010).

Figura 18 - Tensões no dobramento de chapas

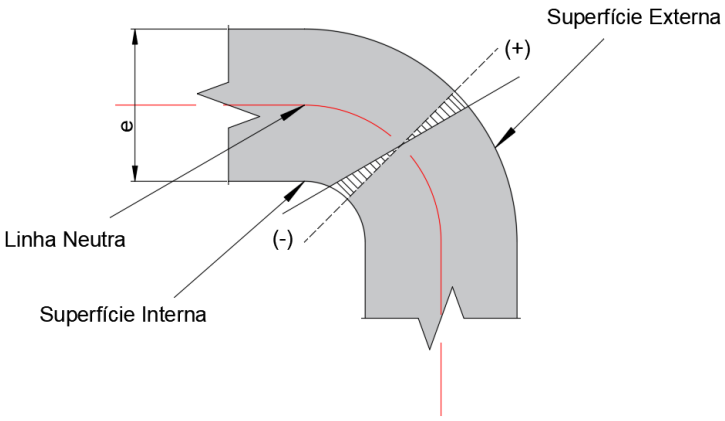



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

A linha neutra ou eixo neutro é uma linha teórica cujo é admitido que seu comprimento não varia após a deformação da chapa. É usada como referência para determinar as dimensões iniciais do planificado.

No dobramento de uma peça na forma de uma tira, os esforços são aplicados em duas direções opostas para provocar a flexão e a deformação plástica consequente, mudando a forma da peça de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em ângulo, e formando na junção, um raio de concordância. Os esforços de conformação se concentram na região de concordância das duas superfícies. Na parte interna da região de concordância, surgem esforços de compressão e, na externa, de tração (BRESCIANI FILHO, 2011). Conforme observa-se na Figura 19.

Figura 19 - Distribuição das tensões




Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

As tensões na peça aumentam como mostrado na Figura 19 a partir da linha neutra, assim chegando ao seu valor máximo nas superfícies interna e externa da peça. Em um ponto na direção do raio da dobra, as tensões se anulam, este ponto é chamado de ponto neutro. A união destes pontos ao longo de toda a chapa metálica recebe o nome de linha neutra. Esta linha teórica tem como característica que seu comprimento não varie com a dobra, portando admite-se que “acima” da linha neutra, na superfície externa da dobra existe um aumento da superfície, já “abaixo” da linha neutra, na superfície interna da dobra admite-se que existe uma redução da superfície. Já a linha neutra mantém exatamente o comprimento inicial que a chapa possuía antes do dobramento. Assim a linha neutra é uma referência para a determinação das dimensões iniciais da peça, a planificação.

## 3.4 EFEITO MOLA NO DOBRAMENTO

O efeito mola (*Springback*) é definido como sendo a recuperação elástica de um material após o processo de dobramento. Do ponto de vista dinâmico, o dobramento de uma chapa apresenta comportamento elástico-plástico (FERREIRA, 2010). Ilustrado na Figura 20.

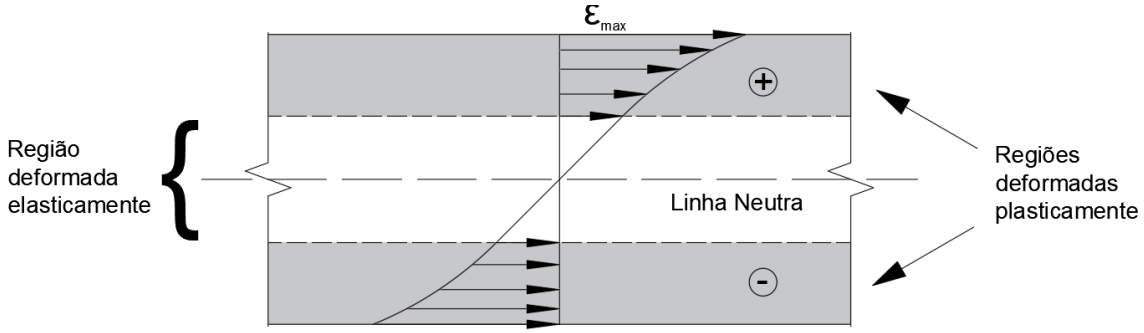
Figura 20 - Efeito mola em uma chapa

Fonte: Ferreira (2010).

Desta forma observa-se que uma parte das tensões que agem na área dobrada está abaixo do limite de proporcionalidade, este limite caracteriza-se por ser o limite onde as tensões são diretamente proporcionais as deformações causadas, sendo regidas pela lei de Hooke. Outra parte destas tenções supera o limite de proporcionalidade, causando na área uma deformação permanente.

O gradiente de deformação que é produzido pela dobragem é ilustrado na Figura 21. A região deformada elasticamente (em branco) tenderia a restaurar-se completamente da deformação sofrida, mas é impedida pelas regiões vizinhas (em cinza) que sofreram tensões maiores no dobramento e apresentam deformação plástica. O resultado do gradiente de deformação diferenciada entre plástica e elástica, é a recuperação parcial da deformação produzida pelo dobramento (FERREIRA, 2010).

Figura 21 - Distribuição das deformações no dobramento




Fonte: Adaptado de Ferreira (2010).

Esta diferença causa o efeito mola, assim pode-se entender como os autores sugerem, que uma forma de visualização do efeito mola é uma razão entre o ângulo inicial e o final, equação 5.

$$R = \frac{\alpha_0}{\alpha_F} \tag{5}$$

Onde: R = Efeito mola.

$\alpha_0$ = Ângulo inicial.

$\alpha_F$ = Ângulo final.

## 3.5 RAIO MÍNIMO DE DOBRAMENTO

O raio mínimo de dobramento pode ser definido como, o menor valor admissível para se evitar uma grande variação de espessura da chapa na região a ser dobrada. São vários os fatores que podem determinar o limite para o raio de dobra. As características mecânicas do material empregado, sendo ele um material mais frágil ou mais dúctil, os limites das ferramentas empregadas para o processo de dobragem, o tipo de dobra realizado e até a capacidade da máquina dobradeira empregada.

Quando menor o raio de dobramento, maiores são as tenções aplicadas na secção de dobra. Essas tenções elevadas podem ocasionar o aparecimento de trincas

(rompimento das fibras do material) na área tracionada da dobra, em outros casos, podem levar ao surgimento de rugas (processo de enrugamento) na área comprimida da dobra. Ambos os acontecimentos levam a não conformidade da peça ocasionado desperdício no processo, esta condição é apontada por autores como umas das principais fontes de perdas para este processo de conformação.

Para evitar-se este fenômeno existem diferentes recomendações para encontrar-se o raio mínimo de dobramento, indicado por autores e normas. A norma DIN 9635 sugere algumas relações de raio, que dependem do material a ser dobrado e da espessura da chapa, sugerindo um intervalo a ser aplicado como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Raio mínimo de dobra sugerido pela norma DIN 9635

| Material | Raio |
|---|---|
| Aço | r = (1 a 3)e |
| Cobre | r = (0,8 a 1,2)e |
| Latão | r = (1 a 1,8)e |
| Zinco | r = (1 a 2)e |
| Alumínio | r = (0,8 a 1)e |
| Ligas de Alumínio | r = (0,9 a 3)e |

Fonte: Adaptado de Benazzi (2007).

A equação 6 é diversas vezes recomentada por autores para o cálculo do raio mínimo.

$$r_{min} = \frac{50e}{Al\%} - \frac{e}{2} \quad (6)$$

Onde: $r_{min}$ = Raio mínimo.

e = Espessura da chapa (mm).

Al% = Alongamento percentual da chapa.

Outra norma a DIN 6935 apresenta uma tabela completa (Tabela 2) de raios mínimos recomendados para aços, usando como referência a resistência a tração do aço e espessura da chapa.

Tabela 2 - Raio mínimo de dobra sugerido pela norma DIN 6935

| Menor raio admissível para aço dobrado a frio | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Resistencia à tração mín. ($R_m$) em N/mm² | Menor Raio de dobra $r_{min}$ para espessura de chapa e em mm | | | | | | | | | | |
| | 1 | > 1 até 1,5 | > 1,5 até 2,5 | > 2,5 até 3 | > 3 até 4 | > 4 até 5 | > 5 até 6 | > 6 até 7 | > 7 até 8 | > 8 até 10 | > 10 até 12 |
| até 390 | 1 | 1,6 | 2,5 | 3 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 |
| de 390 até 490 | 1,2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 |
| de 490 até 640 | 1,6 | 2,5 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 |

Fonte: Adaptado de norma DIN 6935.

## 3.6 FATOR K

Partindo do eixo neutro, analisado anteriormente, que consiste no eixo onde a peça não sofre deformação mantendo assim sua dimensão. O fator k de dobra representa o quando este eixo se desloca em direção ao interior da dobra. Pois normalmente sempre que se realiza um dobramento em uma chapa o eixo neutro se desloca, indo para o interior da dobra, na área que sofre esforços compressivos. Como ele mantem sua dimensão faz com que a área que apresenta esforços de tração aumente e consequentemente, diminua a área sujeita aos esforços compressivos.

O fator k tem importância para o cálculo do planificado da peça dobrada. O uso do fator k correto durante este cálculo, permite determinar a posição para o eixo neutro da forma mais próxima a real, portando, minimiza-se a ocorrência de defeitos na dobra como as fissuras na parte tracionada e as rugas na comprimida.

O uso do fator k adequado adiciona uma margem de curvatura ao planificado, esta margem se representa no material a ser adicionado na planificação para acomodar o raio de curvatura a ser realizado na dobra. Este material busca evitar uma deformação da espessura da peça, desse modo, impedir o estiramento e ou compressão excessiva do material deforme a geometria da peça.

De forma matemática (equação 7) o fator k representa uma razão, entre a posição do eixo neutro e a espessura da chapa figura.

$$k = \frac{t}{e} \tag{7}$$

Onde: k = fator k.

t = distância da linha neutra para a superfície interna da dobra (mm).

e = espessura da chapa (mm).

O fator k é determinado por vários fatores, e como sua obtenção é empírica, sendo determinada por ensaios, existem diversas tabelas e formas de calcular o fator k. Pode-se citar algumas variáveis que influenciam em sua determinação, a principal variável está relacionada as propriedades mecânicas do material outras são: o raio de curvatura da dobra, a espessura do material e o tipo de dobramento.

Na Tabela 3 é demonstrada uma recomendação de fator k muito empregada e exibida na literatura.

Tabela 3 - Fator k sugerido para aços

| Espessura da chapa | Fator k |
|---|---|
| chapa = 1mm | 0,5 |
| chapa > 1mm | 0,33 |

Fonte: Adaptado de Rocha (2012).

Outra recomendação frequentemente vista em literaturas sobre dobramento é apresentada na Tabela 4 utilizando parâmetros de entrada diferentes da Tabela 3, mas com os mesmos valores para o fator k. Na relação de entrada tem-se: r = raio de dobra; t = espessura da chapa.

Tabela 4 - Fator k sugerido para aços 2

| Relação | Fator k |
|---|---|
| r ≥ 2t | 0,5 |
| r < 2t | 0,33 |

Fonte: Adaptado de Groover (2014).

A equação (8) é sugerida na apostila de conformação mecânica do Centro brasileiro de inovação em conformação mecânica (CBCM).

$$k = 0{,}5 + \frac{0{,}45}{4}\frac{r_i}{s} \tag{8}$$

Onde: k = Fator k.

$r_i$ = raio de dobra interno (mm).

s = espessura da chapa (mm).

Outra forma apresentada por diversas fontes, é a proposta presente na norma DIN 6935 que oferece recomendações para determinação do fator k para aços. A norma sugere uma equação (equação 9) e sua representação gráfica, está apresentada na Figura 22.

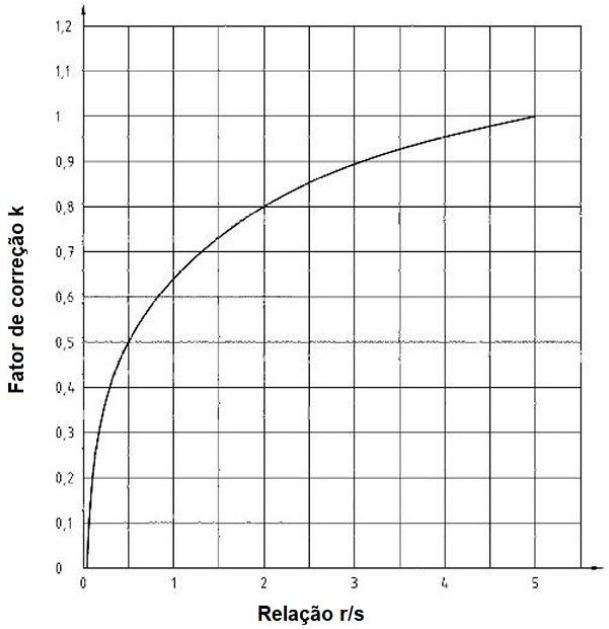
$$k = 0{,}65 + \frac{1}{2}\,log\frac{Ri}{e} \tag{9}$$

Onde: k = Fator k.

Ri = raio de dobra interno (mm).

e = espessura da chapa (mm).

Figura 22 - Representação gráfica do fator k




Fonte: Adaptado de norma DIN 6935.

A norma, ainda apresenta uma tabela para o fator k relacionando a razão entre o raio de dobra interno e a espessura da chapa. Sendo expressa como uma forma simplificada da determinação do fator k apresenta-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Fator k simplificado

| Ri/e | acima 0,65 até 1 | acima 1 até 1,5 | acima 1,5 até 2,4 | acima 2,4 até 3,8 | acima 3,8 |
|---|---|---|---|---|---|
| Fator k | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |

Fonte: Adaptado de norma DIN 6935.

## 3.7 DESENVOLVIMENTO DE PLANIFICADOS

Sempre que se realiza o dobramento de uma chapa altera-se suas propriedades e dimensões. O processo de planificação tem como objetivo determinar o comprimento de chapa necessário para formar-se a peça projetada quando dobrada.

A chapa planificada também chamada de *blank* da peça, é a chapa onde estão definidas as dimensões iniciais necessárias para a realização do processo de dobra. Nestas dimensões iniciais todas as correções devidas, relacionadas ao

tamanho do raio de dobra, ao número de dobras, ao ângulo das dobras e a espessura da chapa são adicionadas ao comprimento da chapa.

Existem normas e diferentes literaturas que indicam e recomendas diversas formas de se obter estas correções necessárias, algumas formas são mais simplificadas empregando apenas uma equação de aplicação geral, já outras são mais sofisticadas empregando equações de uso especifico para diferentes situações de dobra. Os métodos mais recomendados são apresentados, nas seções 3.7.1 a 3.7.4.

### 3.7.1 Método 1

O primeiro método é uma sugestão apresentada por diversos autores e empregada em programas de CAD, como DS Solid Works®, para a realização das planificações de maneira automatizada é utilizado a equação 10.

$$AB = \frac{\pi(R_i + kT)A}{180} \tag{10}$$

Onde: AB = tolerância de dobra (mm).

$R_i$ = raio interno da dobra (mm).

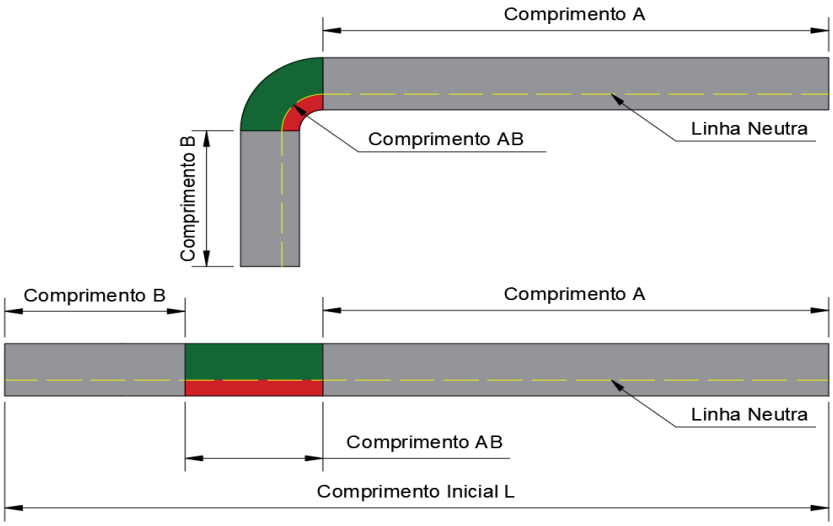
k = Fator k

T = espessura da chapa (mm).

A = ângulo de dobra (º).

A equação 10 representa o comprimento AB indicado na Figura 23, a equação desenvolve o comprimento AB dobrado para o comprimento AB estendido, realizando a compensação da dobra.

Figura 23 - Representação do comprimento AB




Fonte: Adaptado de ADH Machine Tool (2024).

O comprimento final do planificado é obtido somando os comprimentos das abas com o comprimento compensado (equação 11).

$$L = A + B + AB \tag{11}$$

Onde: L = comprimento Inicial (mm).

AB = tolerância de dobra (mm).

A = Comprimento da Aba A (mm).

B = Comprimento da Aba B (mm).

### 3.7.2 Método 2

Outro método apresentado no material do CBCM, indica a equação 12. Que é a combinação do método 1 exibido na seção 3.7.1, apresentado os parâmetros de forma mais ampla.

$$l_i = l_1 + \frac{\pi\alpha}{180}\left[r_i + \frac{s}{2}k\right] + l_2 \quad (12)$$

Onde: $l_i$ = comprimento inicial (mm).

$l_1$ e $l_2$ = comprimento das abas (mm).

α = ângulo de dobra (º).

$r_i$ = raio interno da dobra (mm).

s = espessura da chapa (mm).

k = fator k.

### 3.7.3 Método 3

Na norma DIN 6935 apresenta-se outro método para se obter a compensação da dobra. Baseada em uma série de equações especificas para intervalos de ângulo de dobra, é uma recomendação muito citada por autores pois apresenta boa precisão.

A norma apresenta a equação 13 para calcular o comprimento inicial de chapas com ângulo de dobra igual a 90º, conforme Figura 24.

$$L = A + B + C + \cdots - nv \quad (13)$$

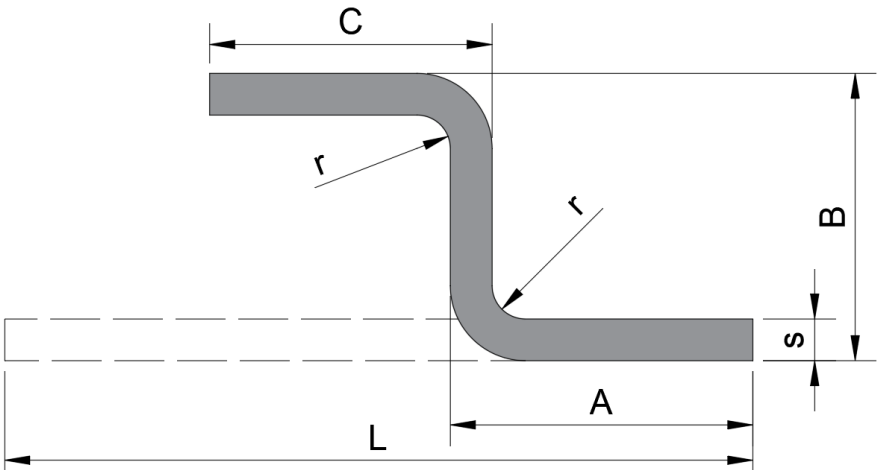
Onde: L = Comprimento inicial (mm).

A, B, C, = Comprimento das Abas. (mm)

n = número de dobras.

v = valor de compensação.

Figura 24 - Planificação para dobras de 90º norma DIN 6935




Fonte: Adaptado de norma DIN 6935.

Como o valor de compensação v é dependente do ângulo usado para a dobra, para ângulos iguais 90º a norma apresenta a Tabela 6, em função do raio de dobra e da espessura da chapa.

Tabela 6 - Valores de compensação v norma DIN 6935

| Valores de compensação para ângulo de dobra β = 90º | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Raio de dobra r em mm | Valores de compensação v em mm para espessura de chapa s em mm | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |
| 1 | 1,9 | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 3,0 | 4,5 | 6,0 | - | - | - | - | - |
| 6 | 3,8 | 5,2 | 6,7 | 8,3 | 9,9 | - | - | - |
| 10 | 5,5 | 6,7 | 8,1 | 9,6 | 11,2 | 12,7 | - | - |
| 16 | 8,1 | 9,3 | 10,5 | 11,9 | 13,3 | 14,8 | 17,8 | 21,0 |
| 20 | 9,8 | 11,0 | 12,2 | 13,4 | 14,9 | 16,3 | 19,3 | 22,3 |

Fonte: Adaptado de norma DIN 6935.

Para as dobras em qualquer outro ângulo, a norma sugere a equação 14.

$$L = A + B - v \tag{14}$$

Onde: L = Comprimento inicial (mm).

A, B = Comprimento das Abas (mm).

v = valor de compensação (mm).

O valor de compensação para a equação 14 é dependente do intervalo do ângulo de dobra. Para o fator de compensação “v” com:

- β maior 0º e menor que 90º (Figura 25 e equação 15).

$$v = 2(r + s) - \pi \left(\frac{180º - \beta}{180º}\right) - \left(r + \frac{s}{2}k\right) \quad (15)$$

Legenda para as equações 15, 16 e 17 e Figuras 24, 25 e 26:

Onde: v = Valor de compensação (mm).

r = Raio de dobra (mm).

s = Espessura da chapa (mm).

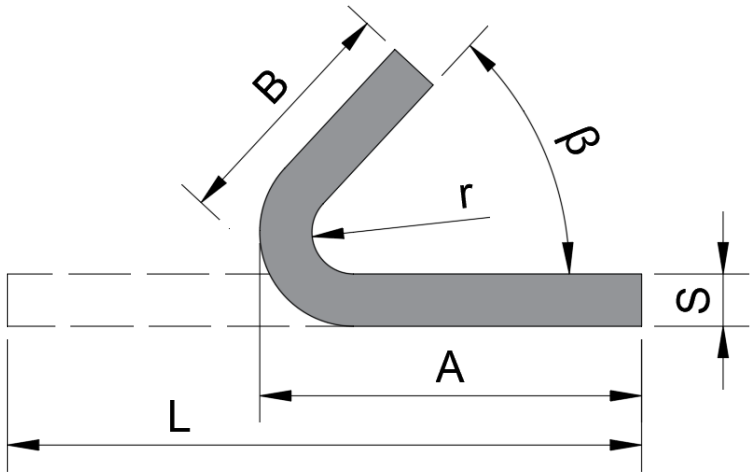
β = Ângulo de abertura (º).

k = Fator k.

A, B = comprimentos das abas (mm).

L = Comprimento planificado (mm).

Figura 25 - Planificação para dobra de ângulo agudo norma DIN 6935

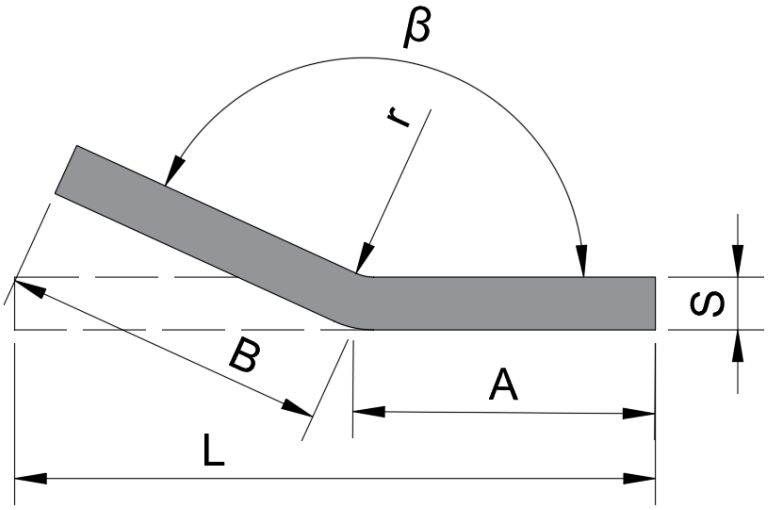



Fonte: Adaptado de norma DIN 6935.

- β maior que 90º até 165º (Figura 26 e equação 16).

$$v = 2(r+s)\ \tan\frac{180º-\beta}{180º} - \pi\left(\frac{180º-\beta}{180º}\right) * \left(r+\frac{s}{2}k\right) \quad (16)$$

Figura 26 - Planificação para dobra de ângulo obtuso norma DIN 6935




Fonte: Adaptado de norma DIN 6935.

- β maior que 165º até 180º, equação 17.

$$v \cong 0 \tag{17}$$

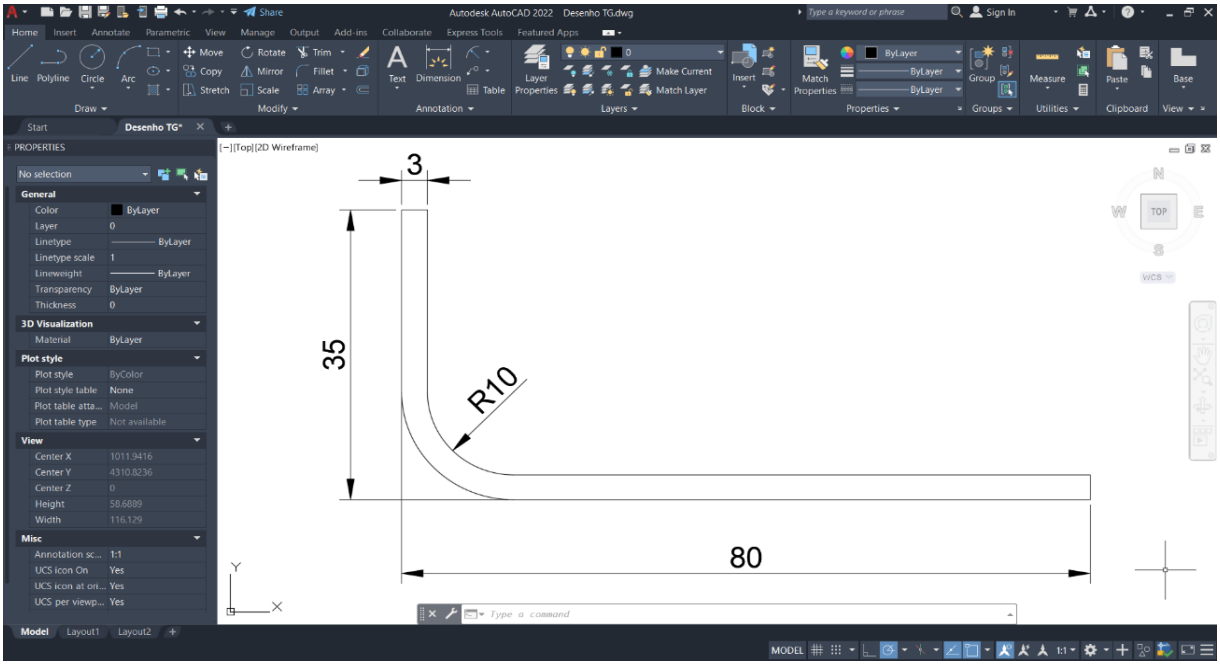
A norma apresenta algumas observações para estas equações: primeiro o valor de compensação v para β maior que 165º até 180º, é considerado muito pequeno a ponto de ser desprezível, sem interferir na precisão da medida. Segundo os valores de L devem ser arredondados para mm inteiros.

### 3.7.4 Método 4

O desenvolvimento de planificados também pode ser realizada com métodos empregados diretamente em programas de CAD. Um método muito apresentado, inclusive o mesmo desenvolvido no estágio realizado, é o processo de desenvolvimento de planificados descrito. Para a descrição utilizou-se do Autodesk AutoCAD® como programa de CAD.

Como exemplo, partindo do perfil da peça já em sua configuração final com todas as dimensões e parâmetros já definidos (Figura 27), o processo inicia-se determinando o fator k. No cenário em exemplo utilizou-se 0,33.

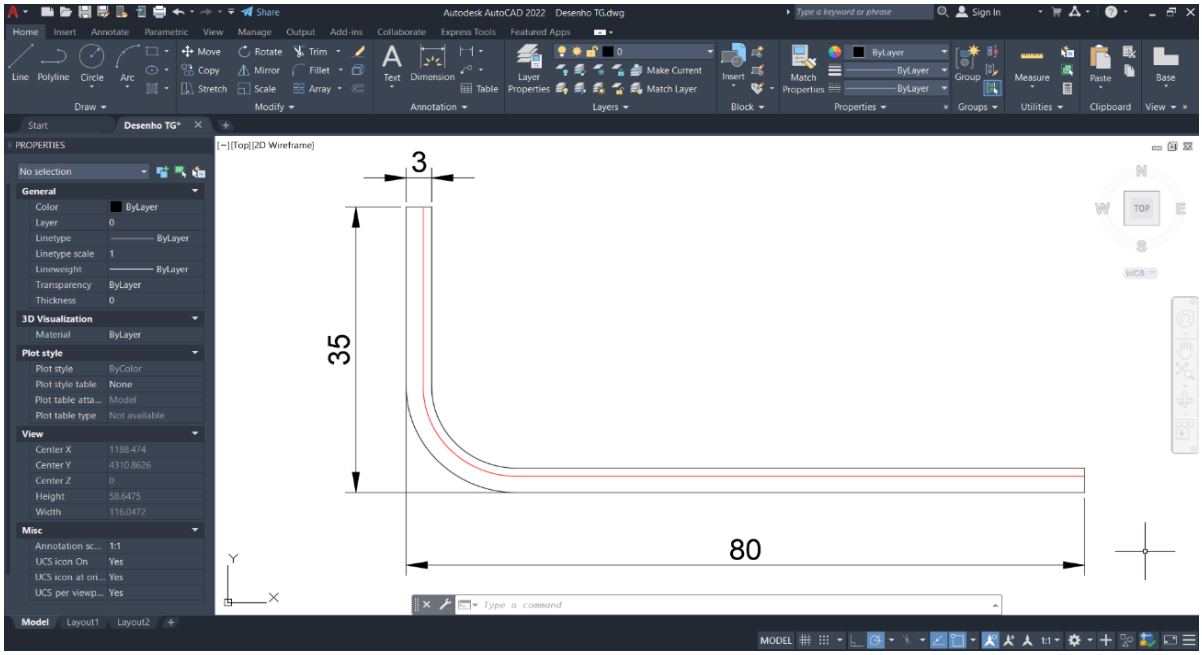
Figura 27 - Desenvolvimento planificado CAD parte 1




Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Com a determinação do fator k, inicia-se a construção da linha neutra da peça dobrada. Para esta etapa, multiplica-se o fator k pela espessura da peça, o resultado obtido desta multiplicação indica a distância entre a linha interna da dobra e a linha neutra da peça. Utilizando o comando *offset* e empregando o valor da multiplicação como parâmetro, realiza-se um *offset* a partir de todas as linhas internas da dobra em direção ao interior da peça (Figura 28), essas linhas (linhas em vermelho) representam a linha neutra da peça

Figura 28 - Desenvolvimento planificado CAD parte 2

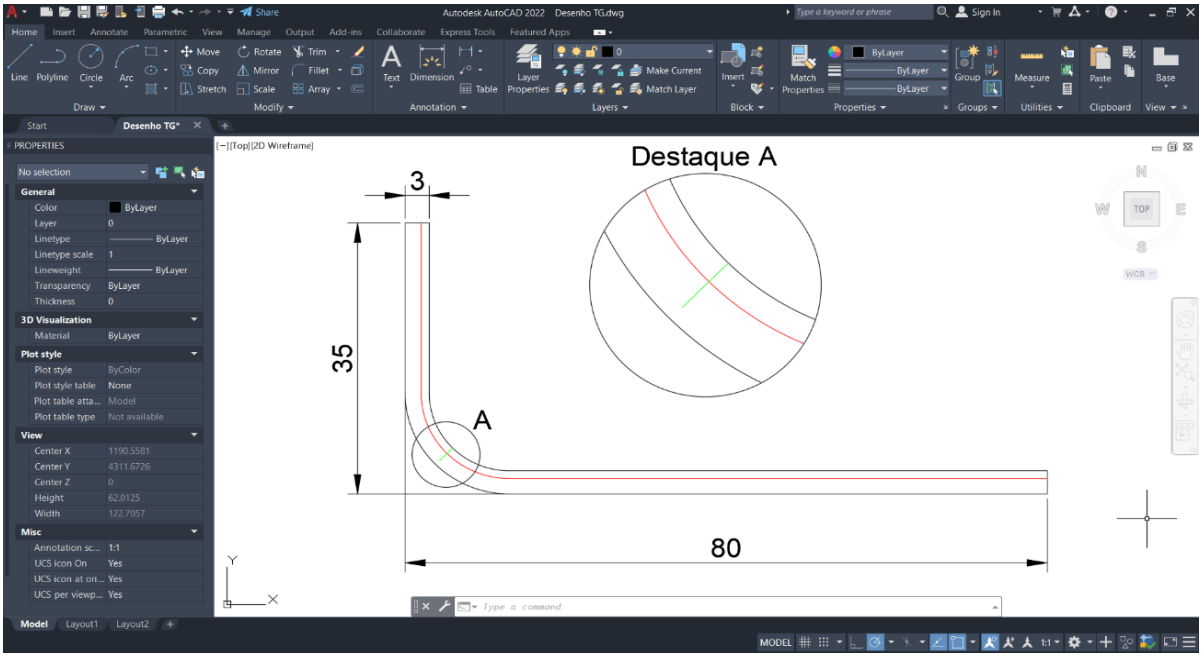



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Determinada a posição da linha neutra na peça, emprega-se o comando *join* na linha, este comando une as partes da linha em uma única linha, obtêm-se agora o primeiro parâmetro para a construção do planificado. O comprimento desta linha é equivalente ao comprimento da chapa metálica. Neste exemplo têm-se 106.2 mm.

Agora pode-se determinar, a posição onde o punção deve tocar a peça. Para isso constrói-se uma linha perpendicular (linha verde), partindo do centro de curvatura da dobra em direção ao interior da peça cruzando a linha neutra (linha vermelha) mostrado na Figura 29.

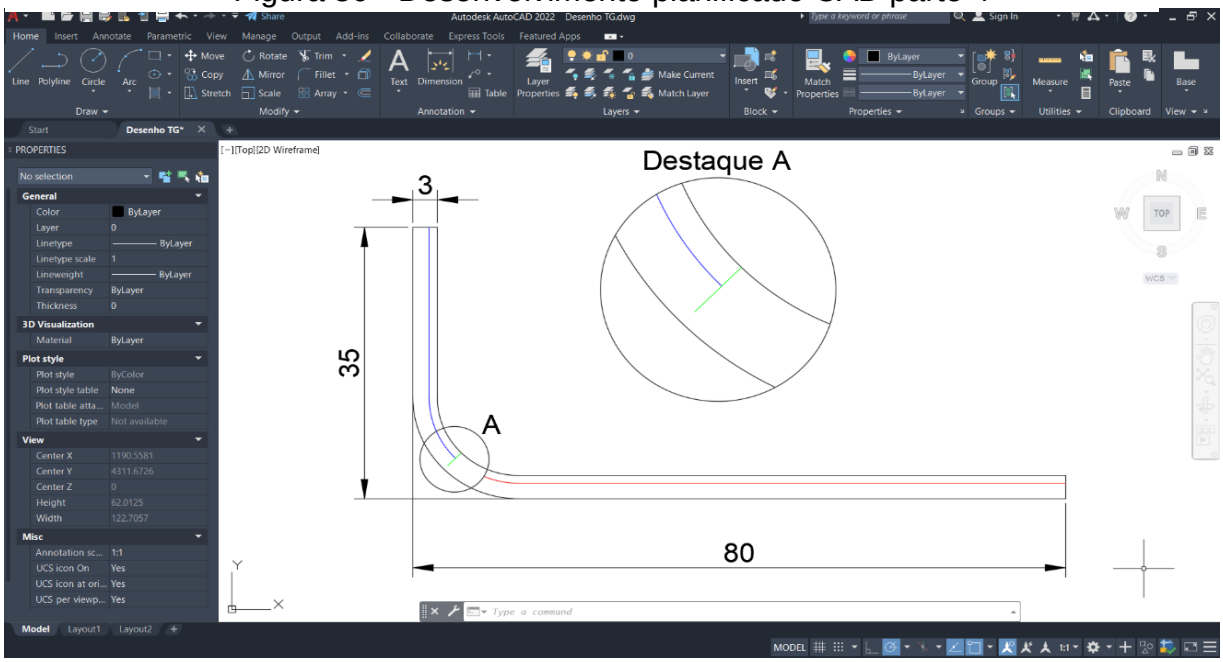
Figura 29 - Desenvolvimento planificado CAD parte 3




Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Utilizando o comando *trim*, realiza-se um corte no encontro entre as linhas verde e vermelha, criando-se um segmento de reta (linha azul Figura 30), o comprimento deste segmento de reta, indica a que distância da borda da chapa o punção deve ser posicionado para a dobra. Este é o segundo parâmetro necessário a criação do planificado, neste exemplo, 30,6 mm.

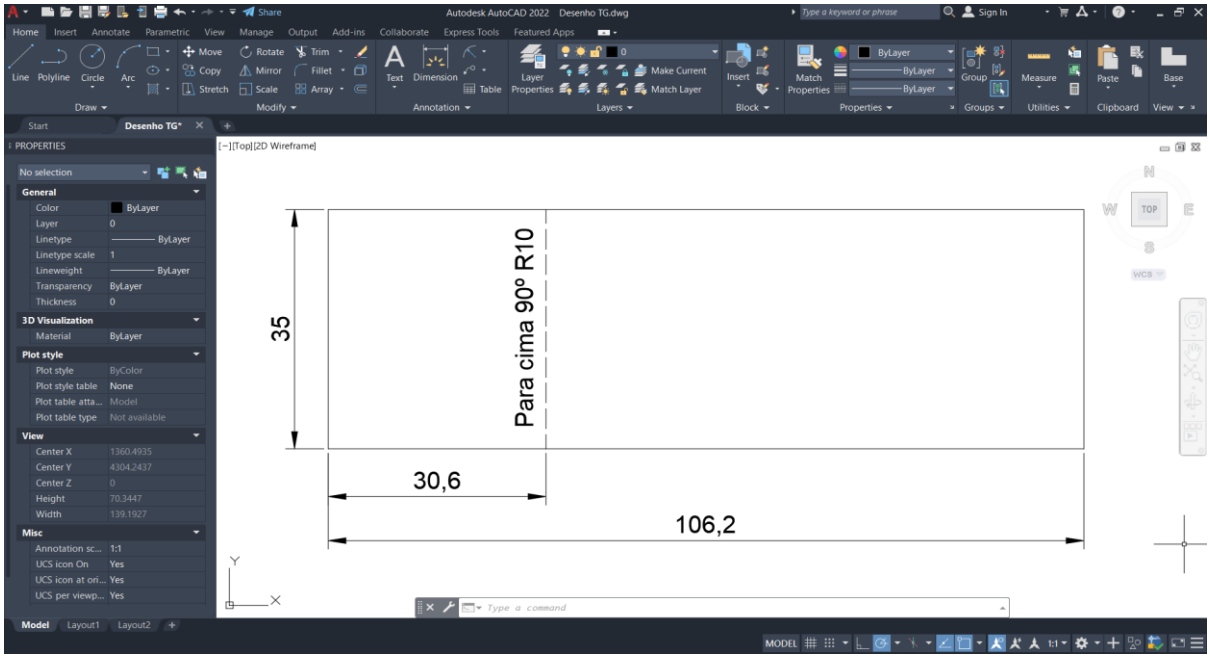
Figura 30 - Desenvolvimento planificado CAD parte 4




Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com ambos os parâmetros determinados, apresenta-se as dimensões do planificado, que representa com exatidão a peça a ser dobrada (Figura 31).

Figura 31 - Desenvolvimento planificado CAD parte 5

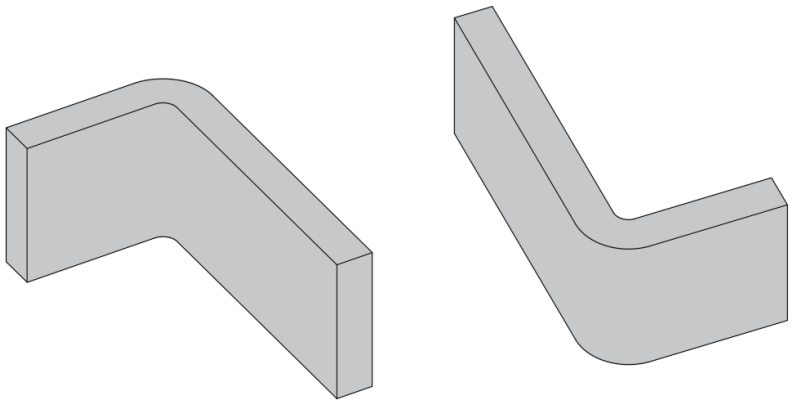



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

## 3.8 ANÁLISE DOS PARÂMETROS

A geometria escolhida para os testes é uma dobra simples em uma chapa metálica de aço. A dobra é realizada no último terço da peça conforme a Figura 32.

Figura 32 - Peça dobrada simulada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O material escolhido para as analises foi o aço carbono ASTM A36, a escolha deve-se a esta especificação de aço ser amplamente utilizada na indústria, na fabricação de estruturas metálicas, equipamentos rodoferroviários e na construção civil. Sua popularidade na indústria deve-se ao aço ASTM A36 ser de fácil usinagem, conformação e soldagem, o que o torna muito versátil sendo de grande disponibilidade e uma opção de bom custo benefício para a indústria.

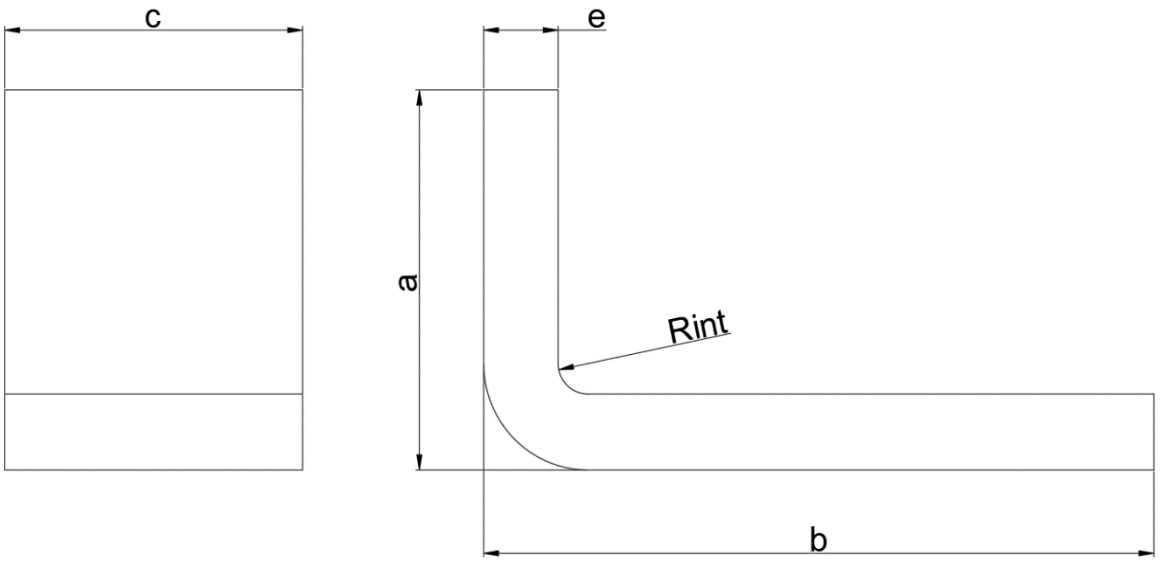
Propriedades mecânicas de interesse típicas: ASTM A36.

Resistência a tração mínima = 400 MPa.

Limite de escoamento mínimo = 250MPa.

Na Figura 33 exibe-se o desenho técnico representado as dimensões da peça de forma genérica.

Figura 33 - Desenho cotado da peça simulada




Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Onde: e = espessura da peça (mm).

Rint = raio interno da dobra (mm).

a = comprimento da aba menor (mm).

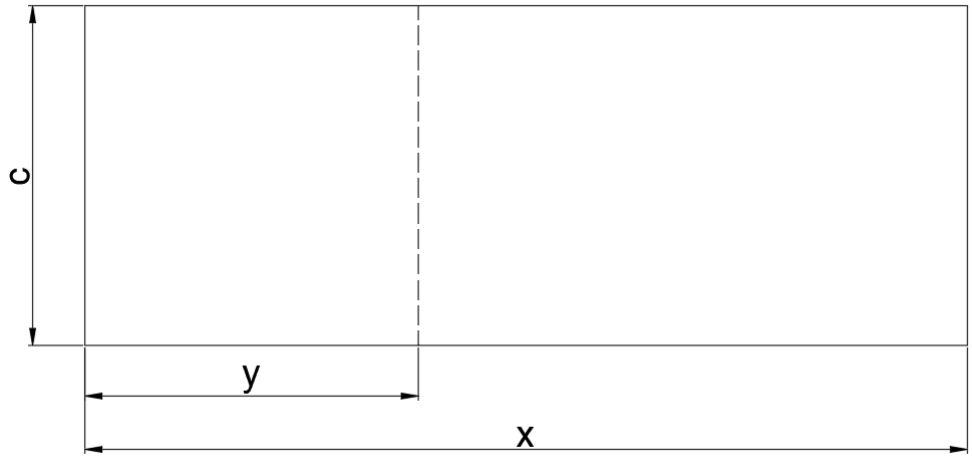
b = comprimento da aba maior (mm).

c = largura (mm).

O comprimento das abas e a largura da peça, foi determinado com a escolha de uma dimensão igual para cada variável sendo: a = 40 mm, b = 80 mm e c = 40 mm.

A forma como o resultado da planificação das peças simulados será exibido, é mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Desenho do planificado simulado




Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Onde: c = largura da peça (mm).

x = comprimento inicial da peça planificada (mm).

y = linha de dobra (mm).

As medidas escolhidas para a espessura da chapa estão representadas na Tabela 7. Estas medidas são baseadas nas medidas de espessura de chapa metálica encontradas no mercado. Foram escolhidas por serem utilizadas amplamente na indústria, e de terem sido as medidas mais empregadas nas atividades realizadas no estágio.

Tabela 7 - Espessura das Chapas Metálicas

| Espessura das Chapas Metálicas | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Símbolo | $e_1$ | $e_2$ | $e_3$ | $e_4$ |
| Espessura (mm) | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| Espessura (pol.) | 1/8'' | 3/16'' | 1/4'' | 3/8'' |

Fonte: Adaptado de Oxfer (2024).

### 3.8.1 Caso 1

Na Tabela 8 é exibido os valores dos raios mínimos recomendados pela norma DIN 9635 para aços, usando como parâmetro 1 vez a espessura. A escolha do parâmetro 1 vez a espessura deve-se a ser este o padrão desenvolvido no estágio para dobras a 90º.

Tabela 8 - Raio mínimo caso 1

| Raio mínimo recomendado pela norma DIN 9635 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Espessura (mm) | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| Raio mínimo $R_{int}$ (mm) | 3 | 4,5 | 6,3 | 9,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Tabela 9 apresentam-se o importante parâmetro de desenvolvimento para as planificações, o fator k para cada espessura de chapa. O fator k apresentado na Tabela 9 é o mesmo empregado nas atividades de estágio.

Tabela 9 - Fator k para caso 1

| Fator k | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Espessura (mm) | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| Fator k | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com ambos os parâmetros definidos, utilizando a técnica de panificação assistida por CAD (método 4, seção 3.7.4), desenvolve-se a planificação de cada espessura. Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dimensões planificado caso 1

| Dimensões do planificado padrão | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dimensões (mm) | Espessura (mm) | | | |
| | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| x | 114,28 | 110,94 | 107,99 | 101,88 |
| y | 37,14 | 35,47 | 33,99 | 30,94 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 3.8.2 Caso 2

A primeira modificação nos parâmetros escolhidos, dar-se-á no fator k utilizando a tabela recomendada pela norma DIN 6935. Para entrada na tabela usa-se a relação raio de dobra interno pela espessura. A Tabela 11 retorna o resultado para cada espessura.

Tabela 11 - Fator k para caso 2

| Fator k segundo norma DIN 6935 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Espessura (mm) | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| Fator k | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Realizando a planificação empregando o método auxiliado por CAD (método 4, seção 3.7.4), obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Dimensões planificado caso 2

| Dimensões do planificado | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dimensões (mm) | Espessura (mm) | | | |
| | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| x | 115,5 | 113,3 | 110,6 | 105,6 |
| y | 37,7 | 36,6 | 35,3 | 33,0 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 3.8.3 Caso 3

Para complementar a comparação foi adotado um raio de dobra comum a todas as espessuras, r = 10mm a escolha desta medida deve-se a necessidade de atender o raio mínimo para todas as espessuras. O fator k para este caso foi mantido o inicial 0,33. A Tabela 13 exibe os resultados das planificações auxiliadas por CAD (método 4, seção 3.7.4).

.

Tabela 13 - Dimensões planificado caso 3

| Dimensões do planificado | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dimensões (mm) | Espessura (mm) | | | |
| | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| x | 111,2 | 108,6 | 106,4 | 101,6 |
| y | 35,6 | 34,3 | 33,2 | 30,8 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 3.8.4 Caso 4

Utilizando o método representado na Figura 23 (método 1, seção 3.7.1), para a realização da planificação, os parâmetros de dobra foram mantidos sendo: o raio o mínimo igual a 1 vez a espessura, e o fator k igual 0,33. O cálculo do comprimento AB foi feito usando a equação 10. Os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Dimensões do segmento de dobra caso 4

| Dimensões do seguimento AB | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Espessura (mm) | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| Comprimento AB (mm) | 4,66 | 9,92 | 13,16 | 19,84 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O comprimento inicial x foi obtido usando a equação 11. A localização da linha de dobra (y) foi obtida, usando a relação que indica como sendo, a metade do

comprimento AB somado a uma das abas da peça, por padrão, foi escolhida a aba menor. As dimensões do planificado é mostrado na  Tabela 15.

Tabela 15 - Dimensões planificado caso 4

| Dimensões do planificado | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dimensões (mm) | Espessura (mm) | | | |
| | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| x | 114,30 | 110,94 | 107,98 | 101,88 |
| y | 37,15 | 35,47 | 33,99 | 30,94 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 3.8.5 Caso 5

Realização do planificado usando a recomendação da norma DIN 6935. Na Tabela 16 apresentam-se os valores para os raios mínimos que a norma DIN 6935 recomenda na Tabela 2. O parâmetro de entrada nesta tabela é a resistência a tração mínima do aço escolhido, sendo 400 MPa ou N/mm$^2$.

Tabela 16 - Raio mínimo caso 5

| Raio mínimo recomendado pela norma DIN 6935 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Espessura (mm) | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| Raio mínimo $R_{int}$ (mm) | 4 | 8 | 10 | 20 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Como a peça simulada é uma dobra a 90º. O comprimento inicial é o recomendado pela norma na equação 14. Na Tabela 17 obtêm-se os valores de compensação para cada espessura.

Tabela 17 - Valores de compensação de dobra caso 5

| Valor de compensação DIN 6935 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dimensões (mm) | Espessura (mm) | | | |
| | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| v | 6,0 | 8,3 | 12,7 | 22,3 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com os valores de compensação v encontrados, empregando-se a equação 14 para determinar as dimensões do planificado segundo a norma DIN 6935. Os valores de y são obtidos subtraindo a metade do valor v de uma das abas, por padrão, escolheu-se a aba menor. Os resultados estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Dimensões planificado caso 5

| Dimensões do planificado DIN 6935 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dimensões (mm) | Espessura (mm) | | | |
| | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| x | 114,0 | 111,7 | 107,3 | 97,7 |
| y | 37,0 | 35,8 | 33,6 | 28,8 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

# 4 DISCUSSÃO

O estudo dos conceitos básicos para a realização do processo de dobramento, introduziu novas visões do processo principalmente quanto a parâmetros que aparentemente nas atividades do estágio pareciam de simples aplicação.

Durante as pesquisas e estudos mostrou-se que a determinação do raio mínimo, depende principalmente da espessura da chapa utilizada, os principais métodos e as normas apresentadas, todos tinham a espessura da chapa como fator de escolha ou parâmetro da equação. Sua determinação de maneira correta e segura minimiza a principal inconformidade encontrada para o processo de dobramento, o aparecimento de fissuras e trincas na área tracionada, e a deformação do raio interno na área comprimida (enrugamento).

O fator k, determinar o posicionamento da linha neutra da peça dobrada, é de fundamental importância, para estimar o correto dimensional da peça. Por ser um parâmetro determinado de forma empírica através de ensaios apresenta muitas variações, como visto existem diferentes recomendações para esta constante, algumas mais simples como a recomendação da Tabela 3 e outras mais elaboradas com o indicado pela norma DIN 6935. No desenvolvimento da pesquisa diferentes empresas e até os fabricantes de máquinas de dobramento, apresentam diferentes tabelas próprias para determinar o fator k, normalmente já adequadas e devidamente ensaiadas aos seus processos e máquinas de forma a obter os resultados mais satisfatórios.

No processo de simulação para determinar as planificações, procura-se entender, a forma como as variações dos parâmetros principais altera seu comportamento. No caso 1 este inspirado nas atividades realizadas no estágio e em recomendações de manuais e fabricantes de máquinas, o desenvolvimento do planificado apresenta-se dentro das recomendações mínimas e padrão. Portanto como realizou-se dentro do padrão do estágio, é usado como referência de comparação para as demais simulações.

Na Tabela 19 é apresentado o compilado dos resultados das planificações. Os valores de $\Delta x$ e $\Delta y$ representam, o diferencial em porcentagem das medidas

obtidas para cada caso com relação ao caso 1, usado como referência para a comparação.

Tabela 19 – Compilado de resultados das planificações

| Compilado de resultados das planificações. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Dimensões (mm) | | Espessura das chapas (mm) | | | |
| | | 3,00 | 4,75 | 6,30 | 9,50 |
| Caso 1 | x | 114,28 | 110,94 | 107,99 | 101,88 |
| | y | 37,14 | 35,47 | 33,99 | 30,94 |
| Caso 2 | x | 115,5 | 113,3 | 110,6 | 105,6 |
| | y | 37,7 | 36,6 | 35,3 | 33 |
| | Δx (%) | 1,07 | 2,13 | 2,42 | 3,65 |
| | Δy (%) | 1,51 | 3,19 | 3,85 | 6,66 |
| Caso 3 | x | 111,2 | 108,6 | 106,4 | 101,6 |
| | y | 35,6 | 34,3 | 33,2 | 30,8 |
| | Δx (%) | -2,70 | -2,11 | -1,47 | -0,27 |
| | Δy (%) | -4,15 | -3,30 | -2,32 | -0,45 |
| Caso 4 | x | 114,3 | 110,94 | 107,98 | 101,88 |
| | y | 37,15 | 35,47 | 33,99 | 30,94 |
| | Δx (%) | 0,02 | 0,00 | -0,01 | 0,00 |
| | Δy (%) | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Caso 5 | x | 114,0 | 111,7 | 107,3 | 97,7 |
| | y | 37,0 | 35,8 | 33,6 | 28,8 |
| | Δx (%) | -0,25 | 0,69 | -0,64 | -4,10 |
| | Δy (%) | -0,38 | 0,93 | -1,15 | -6,92 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No caso 2 apresenta-se uma modificação no parâmetro principal da planificação, o fator k, agora determinado pelas recomendações da norma DIN 6935. Essa modificação na determinação do mesmo resulta em um comportamento diferente, o fator k apresenta valor superior 0,5, indicando que a linha neutra para a condição apresentada se desloca para a superfície externa da peça. Essa condição aumenta em poucos milímetros o planificado, em uma condição que, na medida que a espessura da chapa aumenta, crescia a proporção da diferença entre as medidas do planificado. Indicando que os resultados aumentavam a divergência para espessuras maiores, e para espessuras menores, apresentavam-se próximos com a

diferença de 1 ou 2 milímetros. Mostrando de forma significativa a importância do fator k no dimensionamento do planificado da peça dobrada, e como a sua escolha pode alterar o comportamento do planificado.

Na terceira situação modificou-se o raio adotado para a dobra de todas as espessuras, o aumento do raio mantendo o fator k na condição inicial 0,33, o ângulo de dobra e a forma de construção do planificado. Resultando na redução do tamanho dos planificados para todas as espessuras. Mostrando que quanto maior o raio de dobra, mais a peça acabada se aproxima do planificado inicial. Mas isso para a condição de que a relação raio de dobra por espessura não altere o fator k, como apresentado existem métodos em que essa relação altera o fator k. Assim este caso mostra que o aumento do raio de dobra deve ser realizado mantendo-se atento na sua influência no fator k.

O quarto caso de teste o planificado foi desenvolvido utilizando o primeiro método apresentado na Figura 23 e usando as equação 10 e 11, os resultados apresentados pela Tabela 15 são muito próximos dos resultados apresentados na Tabela 10, mostrando que os métodos de planificação são idênticos. Considero que o método aprendido no estágio é a versão desenhada ajustada para o CAD das equações 10 e 11, entretanto uma observação realizada consiste em, na necessidade de se realizar o dimensionamento de uma peça já pronta para realizar o planificado dela, no emprego das equações 10 e 11, existiria uma dificuldade em se encontrar com precisão os comprimentos das abas. Principalmente devido a ter que se determinar, onde termina a zona de influência do raio de dobramento e onde começa a aba da peça, assim, para situações como essa, desenhar a peça em CAD e realizar o desenvolvimento do planificado no CAD é um processo mais preciso do que realizar o cálculo pelas equações 10 e 11.

No caso 5 realiza-se o desenvolvimento e a planificação de toda a peça seguindo as recomendações presentes na norma DIN 6935. A norma recomenda valores de raio mínimo a depender da resistência a tração mínima do aço e essa recomendação é apresentada pela própria norma como sendo conservadora, como ela indicando que testes devem ser realizados. Na Tabela 16 vemos que os valores de raio mínimo são maiores que os apresentados pela norma DIN 9635 no estágio e no caso 1, porém a norma DIN 9635 apresenta um intervalo que indica que o raio mínimo pode ser até 3 vezes a espessura da chapa para aços, apresentando-se como

uma indicação mais genérica. Essa situação demonstra mais uma vez que, ensaios devem ser realizados para confirmar a escolha dos parâmetros para dobragem assim, mitigando a ocorrência de falhas.

Como o ângulo de dobra escolhido era 90º a norma já apresenta os valores de compensação para as principais medidas em uma tabela simplificando o processo. Os resultados das dimensões vistos na Tabela 18 monstrão que, para os valores de espessura menor onde o raio de dobra foi mais próximo a relação r/s igual a 1, apresentaram valores muito próximos aos dos outros métodos, já onde a relação r/s se afastou de 1 indicando um raio mínimo grande a dimensão do planificado seguiu a condição de quanto maior o raio, menor o comprimento inicial do planificado.

A norma DIN 6935 apresenta um método muito completo, podendo ser aplicado a mais diversas condições de dobra e materiais, mas como já expressado, apresenta uma aplicação mais conservadora principalmente quanto aos raios mínimos que podem ser aplicados as espessuras maiores. Portanto, entende-se ao que a própria norma apresenta em diversas ocasiões que, ensaios e testes devem ser realizados para validar os valores.

# 5 CONCLUSÃO

O processo de dobramento de chapas metálicas, é um processo de conformação mecânica muito aplicado na indústria. A literatura disponibiliza diferentes técnicas e formas para desenvolver as peças dobradas, com os programas de CAD utilizando também diferentes adaptações para permitir prever as condições iniciais da peça dobrada. Contudo no desenvolvimento das planificações ou dos *blanks* como são comumente citados, existem situações onde a escolha dos parâmetros ou do método para a dobragem apresentam pouca diferença entre si, já em outras situações dependendo do método adotado, apresenta-se diferenças consideráveis como na definição do raio mínimo de dobra suportado, onde a depender da aplicação pode inviabilizar a peça projetada. Assim a escolha da técnica de planificação e dos parâmetros, deve-se como é regularmente descrito pelos autores e pelas normas, passar por testes e ensaios onde o tipo de dobramento, a máquina empregada e as ferramentas usadas, vão entregar os resultados projetados sendo, a peça ser dobrada no raio estabelecido, dentro das dimensões propostas, sem sofrer de estiramento ou corrugação danosos.

A realização do trabalho permitiu ampliar e consolidar os conhecimentos adquiridos na realização do estágio, principalmente introduzindo novos fundamentos como o entendimento das relações do fator k, constante empírica que a depender do método de obtenção pode apresentar diferenças em sua determinação. No geral o estudo de alguns dos principais métodos e dos principais parâmetros para a realização processo de dobramento, permitiu aprofundar-se no conhecimento de uns dos mais difundidos e amplamente utilizado processo de conformação mecânica na indústria.

# 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

— Analisar as técnicas planificação fabricando as peças para verificar-se atendem as especificações de projeto.

— Estudar a influência dos diferentes tipos de ferramenta de dobra no comportamento das peças dobradas.

— Verificar o comportamento das planificações de peças dobradas para outros materiais de uso disseminado na indústria como alumínio e de uso em aplicações especiais como o cobre e o latão.

# REFERÊNCIAS


ADH MACHINE TOOL. **Compreender o fator k, a tolerância de curvatura e a dedução de curvatura**. Machine Tool, Ma'anshan, 2024. Disponível em: https://www.adhmt.com/pt/k-factor-bend-allowance-and-bend-deduction/#:~:text=O%20fator%20K%20determina%20o,de%20trabalho%20antes%/20da%20dobragem. Acesso em 02 jul. 2024.

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. **Processos de conformação dos materiais**: introdução aos processos de conformação parte I. São Carlos: EESC-USP, 2012.

BARBOSA, G. M. Processo de dobramento de chapas metálicas. **Exacta**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 109-120, 2009. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Processo+de+dobramento+de+chapas+met%C3%A1licas&btnG=. Acesso em: 22 maio 2024.

BEER, F. P. **Resistência dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 1995.

BENAZZI, I. **Apostila de tecnologia em estampagem**. Sorocaba: FATEC, 2007. Disponível em: https://vivianedorneles.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/07/te-j07.pdf. Acesso em: 04 jul. 2024.

BOLANHO, P. D. **Manufatura mecânica**: conformação dos metais. Londrina: Educacional S.A., 2017.

BRESCIANI FILHO, E. **Conformação plástica dos metais**. São Paulo: EPUSP, 2011.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTD, 2012.

CENTRO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO EM CONFORMAÇÃO MECÂNICA. **Capitulo 4 – dobramento.** Disponível em: https://cbcm-metalforming.com/cbcm/restrito/LvChapas/Cap%C3%ADtulo%204.pdf. Acesso em: 23 jul. 2024.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Classificação dos tipos de dobramento**. [Material didático]. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6593-classificacao-dos-tipos-de-dobramento. Acesso em: 04 jul. 2024

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Dobramento**. [Material didático]. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6484#01. Acesso em: 04 jul. 2024.

DASSULT SISTÈMES. **Uso dos parâmetros de dobra de chapa metálica**. Disponível em: https://help.solidworks.com/2024/Portuguese-brazilian/SolidWorks/sldworks/c_Using_Sheet_Metal_Band_Parameters.htm?id=582282db37a74e2ab5e62f66f3d7552e#Pg0. Acesso em: 16 jul. 2024.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 6935**: dobra a frio de produtos de aço plano. Berlin: DIN, 2010.

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

FERREIRA, R. A. S. **Conformação plástica**: fundamentos metalúrgicos e mecânicos. 2. ed. Recife: Ed. UFPE, 2010.

FISCHER, U. *et al*. **Manual de tecnologia metal mecânica**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

GANS METALÚRGICA. **ASTM A36**. Gans: Tecnologia em aço, [*S.d*.]. Disponível em: https://www.gans.com.br/astm-a36#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20o%20ASTM,utilizado%20na%20ind%C3%BAstria%20de%20constru%C3%A7%C3%A3o.&text=Carbono%20(C)%3A%200%2C25,%25%20a%201%2C20%25.. Acesso em: 19 ago. 2024.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação.** Rio de Janeiro: LTD, 2014.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

KIMINAMI, C. S. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

MAGALHÃES, R. **6 tipos de processo de dobra de dobradeira**. COMPRACO, 2024. Disponível em: https://compraco.com.br/blogs/industria/6-tipos-de-processo-de-dobra-de-dobradeira?srsltid=AfmBOoqvKT6Vr3WeC4nDyg0_L3ptofJ_GUOEEll2HpI3fo_HM1kQCJwK. Acesso em: 02 jul. 2024.

MALAVOLTA, A. T. *et al*. **Análise do retorno elástico em dobramentos de chapas via método dos elementos finitos**. Joinville: ABCM, 2005. Disponível em:https://scholar.google.com.br/scholar?hl=ptBR&as_sdt=0%2C5&q=An%C3%A1lise+do+retorno+el%C3%A1stico+em+dobramentos+de+chapas+via+m%C3%A9todo+dos+elementos+finitos&btnG=. Acesso em 02 jul. 2024.

MARCONDES, P.V.P. **Manufatura de chapas metálicas - Dobramento**. 2012. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Manufatura+de+chapas+met%C3%A1licas-Dobramento&btnG=. Acesso em: 02 jul. 2024.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Apostila de conformação mecânica II**: extrusão, trefilação e conformação de chapas. Florianópolis: IFSC, 2006. Disponível em: https://www.pavanati.com.br/disciplinas/processos-de-fabricacao/. Acesso em: 11 jul. 2024.

OBERG, E. *et al*. **Machinery's Handbook**. 27. ed. Nova Iorque: Industrial Press, 2004.

OXFER. **Chapa de aço carbono ASTM A36.** Disponível em: https://www.oxfer.com.br/chapa-aco-carbono-astm-a36. Acesso em: 19 jul. 2024.

RAPIDDIRECT. **O que é dobra de chapa metálica**. Rapid direct, 2022. Disponível em: https://www.rapiddirect.com/pt/blog/how-to-bend-sheet-metal/. Acesso em: 02 jul. 2024.

ROCHA, O. F. L. **Conformação mecânica**. Santa Maria: UFSM, 2012.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

STELL Componentes. **Processo de dobra para chapas.** Stell Componentes, Bento Gonçalves, 2024. Disponível em: https://steel-rs.com.br/curiosidades/processo-de-dobra-para-chapas-tudo-o-que-voce-precisa-saber/. Acesso em: 04 jul. 2024.