

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

DURVAL LEAL PIVA RAIMUNDO

**UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA CAD 3D NA DETERMINAÇÃO DO
FATOR K E PLANIFICAÇÃO DE PEÇAS EM CHAPA METÁLICA**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

DURVAL LEAL PIVA RAIMUNDO

UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA CAD 3D NA DETERMINAÇÃO DO FATOR K E PLANIFICAÇÃO DE PEÇAS EM CHAPA METÁLICA

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Professor orientador: Raimundo Ricardo Matos da Cunha, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Raimundo, Durval Leal Piva
Utilização de um sistema CAD 3D na determinação do
fator K e planificação de peças em chapa metálica / Durval
Leal Piva Raimundo ; orientação de Raimundo Ricardo
Matos da Cunha . - Florianópolis, SC, 2018.
62 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Chapa metálica . 2. Processo de dobramento .
3. Fator K. 4. Sistema CAD 3D. I. Cunha , Raimundo Ricardo
Matos da. II. Instituto Federal de Santa Catarina.
Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.

UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA CAD 3D NA DETERMINAÇÃO DO FATOR K E PLANIFICAÇÃO DE PEÇAS EM CHAPA METÁLICA

DURVAL LEAL PIVA RAIMUNDO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

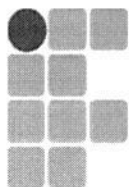
Florianópolis 13 de dezembro, 2018

Banca Examinadora:

Raimundo Ricardo Matos da Cunha, Dr. Eng. (Orientador)

Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng.

Erwin Werner Teichmann, Dr. Eng.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **DURVAL LEAL PIVA RAIMUNDO**, matrícula nº **151004734-4**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA CAD 3D NA DETERMINAÇÃO DO FATOR K E PLANIFICAÇÃO DE PEÇAS EM CHAPA METÁLICA**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 12 de dezembro de 2018.

Prof. Orientador do TCC: Raimundo Ricardo Matos da Cunha

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ivo e Santa, pela educação e por ser a minha maior fonte de inspiração. Por serem responsáveis por mostrar os valores mais básicos e importantes da vida.

A empresa Hydreco por dispor de todos os recursos necessários para que a pesquisa fosse realizada.

A todos os professores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, por me ensinarem muito nessa trajetória, em especial ao meu orientador professor Dr. Raimundo Ricardo Matos da Cunha, por toda a paciência e ensinamento transmitido nesse período de orientação.

Aos todos meus amigos que me ajudaram diretamente ou indiretamente na realização desse trabalho.

MUITO OBRIGADO!

“As grandes ideias surgem da
observação dos pequenos detalhes.”

Augusto Cury

RESUMO

O processo de dobramento de chapa é típico na indústria metalmeccânica, sendo considerado um dos principais processos de fabricação. O mercado, cada vez mais competitivo, exige processos mais eficientes e com menos desperdícios, buscando produtos de mais qualidade e menor custo. O projeto ou modelagem de uma peça de chapa metálica, que possui etapas de dobramento no sistema CAD 3D, é realizado com a peça na sua forma geométrica final, ou seja, já dobrada. Posteriormente, na fabricação da peça, é necessário obter o planificado da chapa. Para a planificação em dimensões precisas, e que seja realizada de forma automática no sistema CAD 3D, é necessário conhecer e informar o correto fator K. Esse trabalho de conclusão de curso busca esclarecer os conceitos para entendimento e identificação dos parâmetros de processo que influenciam a determinação do fator K na prática. Foram realizados experimentos com corpos de prova adaptados ao ferramental disponível e material utilizado. A partir dos dados coletados, o fator K foi calculado com base em equações obtidas da literatura técnica, e posteriormente adicionados ao sistema CAD 3D. Assim, a configuração dos parâmetros de dobras em chapa metálica ficou mais prático, pois o preenchimento automático do correto fator K usando o sistema CAD 3D, elimina ou reduz as possibilidades de erros. Todas as etapas dessa metodologia, desde a fabricação e medição dos corpos de prova, a preparação do ferramental, a configuração da máquina dobradeira, a coleta dos dados no chão de fábrica, e a implantação no sistema CAD 3D, foram descritas nesse trabalho e os resultados foram validados também na fabricação de peças comerciais.

Palavras-chaves: Chapa metálica. Processo de dobramento. Fator K. Sistema CAD 3D.

ABSTRACT

The sheet metal bending process is typical in the metalworking industry, being considered one of the main manufacturing processes. The increasingly competitive market demands more efficient and less wasteful processes, looking for higher quality and lower cost products. The design or modeling of a sheet metal part, which has bending steps in the 3D CAD system, having been done with final geometry shape. After, in the part manufacturing, the flatten sheet metal dimensions are necessary. However, to flattening sheet metal within precise or exact dimensions to be automatically done through 3D CAD system, is necessary to know and to input the correct K-factor. This final report seeks to clarify the definitions and concepts for understanding and identification of process parameters that influence the K-factor determination in practice. Experiments were carried out with specimens adapted to the available tooling and used material. From the data collected, the K-factor was calculated based on equations obtained from the technical books, and subsequently added to the 3D CAD system. Thus, the bend parameters settings in sheet metal became more feasible, due to automatic filling out with correct K-factor, when using the 3D CAD system, eliminating or reducing errors chances or mistakes. All stages in this methodology, from the manufacture and specimen measurement, the tooling preparation, the bending machine setup, the data collecting on the factory floor, and the 3D CAD system customizing, were described in this work and the results were also validated in the manufacturing of commercial parts.

Keywords: Sheet metal. Bending process. K-factor. 3D CAD system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes principais de uma prensa dobradeira hidráulica	15
Figura 2 - Ferramental de punção e matriz utilizados no dobramento de chapas	16
Figura 3 - Exemplo de perfis obtidos pelo processo de dobramento.....	16
Figura 4 - Modelo CAD com dimensões da peça projetada	17
Figura 5 - Dimensões do planificado da peça projetada com fator $K = 0,5$	18
Figura 6 - Dimensões do planificado da peça projetada com fator $K = 1$	18
Figura 7 - Dobramento no ar	21
Figura 8 - Dobramento em V	22
Figura 9 - Dobramento em U	22
Figura 10 - Dobramento a fundo.	23
Figura 11 - Dobramento em matriz deslizante.....	23
Figura 12 - Dobramento em matriz giratória.....	24
Figura 13 - Processo de dobramento em V utilizado no estudo	25
Figura 14 - Representação das tensões no processo de dobramento	25
Figura 15 - Corte de secção de peça dobrada com esforços de tensões e linha neutra	26
Figura 16 - Âncora em aço inoxidável AISI 316	27
Figura 17 - Parâmetros dimensionais para cálculo do fator K, segundo documentação do SolidWorks.....	27
Figura 18 - Parâmetros dimensionais para cálculo do fator K, segundo a norma DIN 6935	28
Figura 19 - Intervalo do ângulo de dobra para o cálculo do planificado, segundo norma DIN 6935	30
Figura 20 - Parâmetros dimensionais de uma peça em chapa metálica	32
Figura 21 - Tolerância de dobra, segundo a documentação do SolidWorks	33

Figura 22 - Dedução de dobra, segundo a documentação do SolidWorks	34
Figura 23 - Recuo externo, segundo documentação do SolidWorks®	35
Figura 28 - Prensa dobradeira utilizada no estudo – Modelo PSH 30030	36
Figura 29 - Dados técnicos da prensa dobradeira – Modelo PSH 30030	37
Figura 24 - Modelo das matrizes de dobra disponível	38
Figura 25 - Modelo CAD com dimensões do corpo de prova, no estado dobrado	39
Figura 26 - Modelo CAD com dimensões do corpo de prova de espessura 2mm, no estado planificado	40
Figura 27 - Corpo de prova cortado	41
Figura 30 - Corpo de prova dobrado	42
Figura 31 - Fluxograma de determinação do fator K calculado, obtido na prática	48
Figura 32 - Diretório de tabelas de calibres de chapa metálica, do SolidWorks	49
Figura 33 - Pasta das planilhas de tabelas de calibres, do diretório SolidWorks,	50
Figura 34 - Planilha do fator K, segundo diretório SolidWorks	50
Figura 35 - Configuração da tabela do fator K para espessura de 2mm	51
Figura 36 - Ambiente de chapa metálica, do SolidWorks	52
Figura 37 - Escolha da planilha de tabela de calibres no SolidWorks	53
Figura 38 - Configuração dos parâmetros de dobra	53
Figura 39 - Modelo CAD 3D do corpo de prova 45°	55
Figura 40 - Corpo de prova dobrado a 45°	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do fator K, sugeridos pela norma DIN 6935	29
Tabela 2 - Espessura e raio de dobra	39
Tabela 3 - Dimensões do planificado para o fator K = 0,5.....	40
Tabela 4 - Medidas da peça cortada	41
Tabela 5 - Variação das abas para fator K = 0,5.....	42
Tabela 6 - Valores calculados do recuo externo (OSSB) e dedução de dobra (BD) .	43
Tabela 7 - Valores da tolerância de dobra (BA) e do fator K calculados	44
Tabela 8 - Dimensões do planificado para o fator K calculado.....	45
Tabela 9 - Coleta de dados 2	45
Tabela 10 - Valor fator K recalculado	46
Tabela 11 - Coleta de dados 3	46
Tabela 12 - Variação das abas para o fator K calculado e obtido na prática	47
Tabela 13 - Coleta de dados para o corpo de prova a 45°	55
Tabela 14 - Variação das abas para o fator K = 0,5 e fator K calculado	57

SUMÁRIO

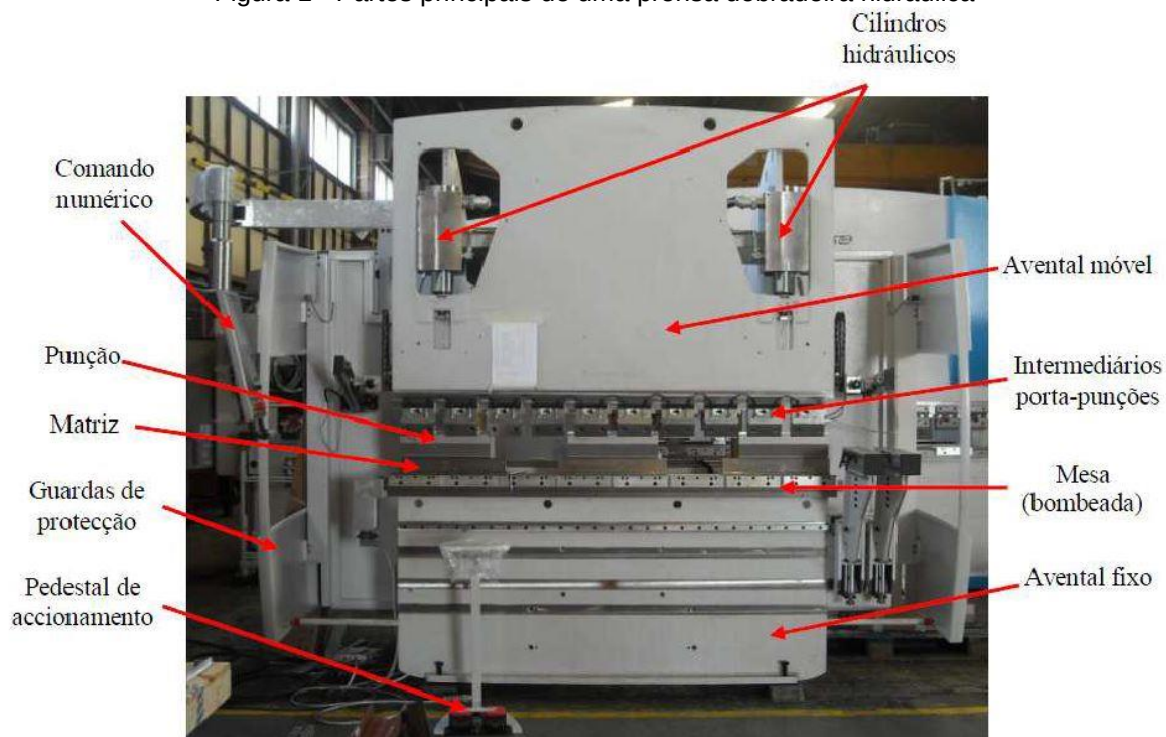
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	17
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	19
1.3 OBJETIVO PRINCIPAL	19
1.4 Objetivos específicos.....	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 PROCESSO DE DOBRAMENTO DE CHAPA	20
2.1.1 Dobramento no ar	20
2.1.2 Dobramento em V.....	21
2.1.3 Dobramento em U	22
2.1.4 Dobramento a fundo	22
2.1.5 Dobramento em matriz deslizante	23
2.1.6 Dobramento em matriz giratória.	23
2.2 LINHA NEUTRA	24
2.3 MATERIAL UTILIZADO	26
2.4 DEFINIÇÃO DO FATOR K	27
2.5 MÉTODOS DE CÁLCULO DO PLANIFICADO DA CHAPA METÁLICA.....	29
2.5.1 Cálculo do planificado, segundo a norma DIN 6935	29
2.5.2 Cálculo do planificado, segundo o sistema CAD 3D SolidWorks	31
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	36
3.1 DADOS DA MÁQUINA UTILIZADA	36
3.2 DADOS DO CORPO DE PROVA UTILIZADO	37
3.3 COLETA DE DADOS 1.....	41
3.4 PROCEDIMENTO DE DETERMINAÇÃO DO FATOR K CALCULADO	42
3.5 COLETA DE DADOS 2.....	44
3.6 COLETA DE DADOS 3.....	46

3.7 RESULTADO FINAL DAS COLETAS	46
3.8 IMPLANTAÇÃO NO SISTEMA CAD 3D SOLIDWORKS	49
3.9 EXPERIMENTO COM ÂNGULO DE DOBRA DE 45°	54
4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS.....	59
<u>APÊNDICE A – PLANILHA COMPLETA DO FATOR K.....</u>	<u>61</u>

1. INTRODUÇÃO

O processo de dobramento de chapa é típico na indústria metalmeccânica, sendo considerado um dos principais processos de fabricação. O dobramento de chapa à máquina costuma ser executado numa prensa dobradeira (Telecurso 2000). A Figura 1 ilustra um exemplo desse tipo de máquina, destacando suas partes principais.

Figura 1 - Partes principais de uma prensa dobradeira hidráulica



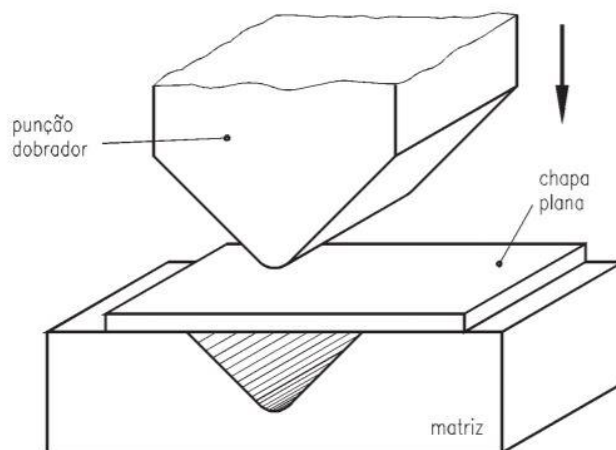
Fonte: Gaspar (2012)

Para realizar o processo de dobra é preciso definir o punção e a matriz. Essas duas ferramentas são selecionadas conforme a geometria e as dimensões a serem processadas pela máquina.

No processo de dobra, a chapa sofre uma deformação por flexão. A prensa dobradeira é quem fornece a energia e os movimentos necessários para realizar a operação. A forma é conferida mediante o emprego de punção e matriz específicos até atingir a geometria desejada, exemplificada na Figura 2. No processo, a chapa é submetida a esforços aplicados em duas direções opostas, o

que muda a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes em ângulo, com raio de concordância em sua junção. (Moro; Auras, 2014).

Figura 2 - Ferramental de punção e matriz utilizados no dobramento de chapas



Fonte: Telecurso 2000.

Segundo Barbosa (2009), “a alta taxa de produção de perfis variados fabricados pelo processo de dobramento em chapa metálica tem máxima importância na indústria automobilística”. A Figura 3 ilustra alguns perfis gerados pelo processo de dobramento.

Figura 3 - Exemplo de perfis obtidos pelo processo de dobramento



Fonte: Gaspar (2012)

Para fabricar peças dobradas dentro de um resultado dimensional satisfatório, é necessário que o planificado (*blank*) para dobrar a peça, também seja definido com uma precisão satisfatória (GAUSMANN, 2017, p.10).

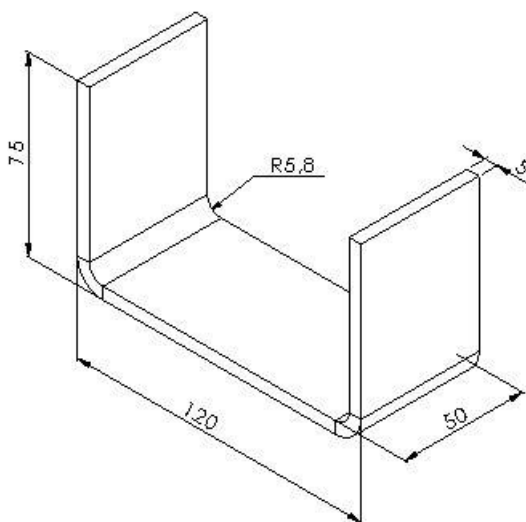
Esse trabalho de conclusão de curso – TCC utiliza um sistema CAD 3D como ferramenta para a modelagem tridimensional de peças em chapa e obtenção do planificado, a partir dos recursos que o programa disponibiliza durante a modelagem.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Para descrever e ilustrar o problema a ser tratado nesse TCC, será analisado o caso de uma peça projetada em chapa metálica, a qual foi modelada e planificada no sistema CAD 3D SolidWorks®, o qual será chamado somente de SolidWorks no restante do estudo.

A peça é ilustrada na Figura 4, onde apresentam-se as dimensões no seu estado dobrado. A partir do modelo 3D, o SolidWorks® permite planificar a peça, e assim determinar as dimensões do material bruto a ser cortado para a fabricação.

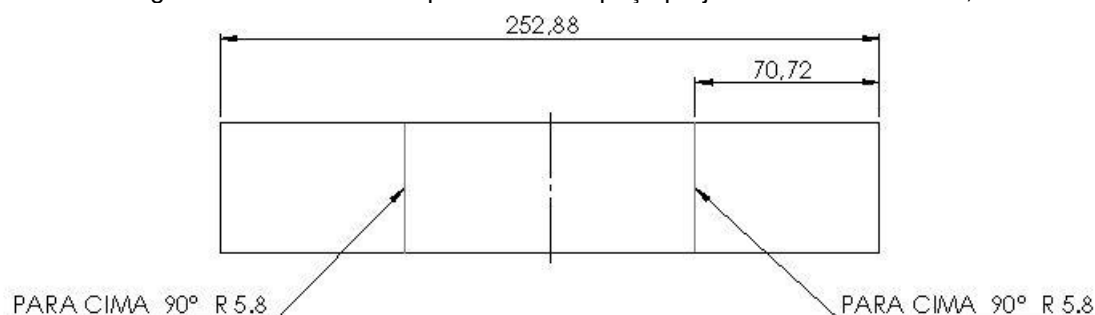
Figura 4 - Modelo CAD com dimensões da peça projetada



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 5, é ilustrada a mesma peça, agora em seu estado planificado e usando o valor do fator K que vem pré-definido no software que é igual a 0,5.

Figura 5 - Dimensões do planificado da peça projetada com fator $K = 0,5$

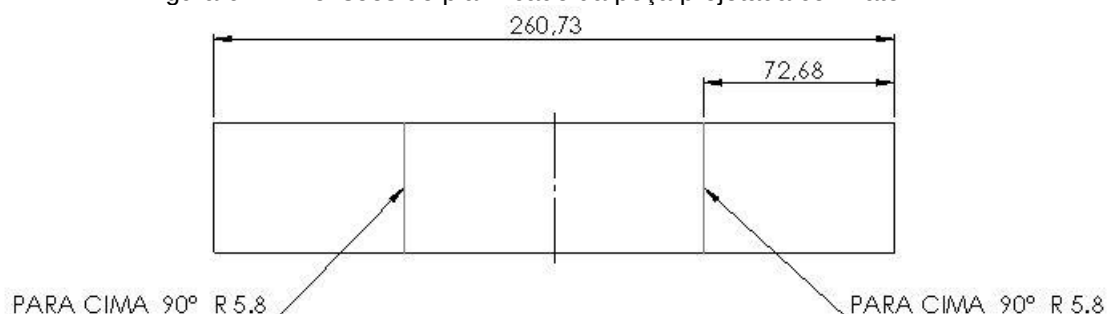


Fonte: Elaboração própria.

No SolidWorks, algumas configurações do processo de dobramento e parâmetros de modelagem no recurso chapa metálica podem ser definidas e/ou editadas. Neste caso, será alterado o valor do fator K .

O fator K pode variar no intervalo de 0 a 1. Como o objetivo é mostrar a diferença que se tem alterando esse valor, na Figura 6, é ilustrada a mesma peça, agora usando um valor do fator K igual a 1.

Figura 6 - Dimensões do planificado da peça projetada com fator $K = 1$



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que a simples alteração do fator K , gera dimensões de comprimento dos dois planificados com uma diferença de 7,85mm.

Assim, ao projetar dobras numa peça em chapa metálica no sistema CAD 3D, algumas perguntas surgem, e são enumeradas a seguir:

- a) Qual deve ser o valor do fator K informado, para que a peça seja dobrada nas dimensões de projeto?
- b) Quais parâmetros estão relacionados ao valor do fator K ?

- c) O que é o fator K?
- d) Como é calculado esse fator K?

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Com o mercado cada vez mais competitivo, as indústrias têm a necessidade de fazer seus produtos com a melhor qualidade e menor preço possível. O dobramento de chapas metálicas é um processo presente na fabricação de quase todos os equipamentos e máquinas do setor metalmeccânica. Diante disso, garantir que o processo ocorra sem perdas e/ou erros, também garante menos retrabalho e/ou refugos de peças, o que impacta no custo final do produto.

Diversos sistemas CAD 3D contêm ferramentas exclusivas para trabalhar com chapa metálica, o que auxilia o projetista a modelar peças com dobras, de maneira mais prática e intuitiva. Contudo após projetar no sistema CAD tem-se a necessidade de gerar o planificado das peças para que a mesma possa ser fabricada. Essa passagem ou conversão do modelo CAD do estado dobrado para o modelo CAD no estado planificado, necessita que o programa seja informado com o valor do fator K. Todavia, esse valor é dependente de uma série de variáveis relacionadas com a espessura do material, com o tipo do material, com o raio da ferramenta, e com o ângulo de dobra.

Para chegar num valor mais preciso desse fator K, é necessário saber os valores dessas variáveis, pois naturalmente esses diferem entre as empresas. As máquinas de dobra não têm um padrão de raio do punção, nem mesmo as empresas tem um padrão de ângulo de dobra e material, o que torna necessário que cada fabricante realize uma calibração específica e personalizada de forma a obter o valor real do fator K para o seu conjunto de equipamento, material, e ferramental utilizados.

1.3 OBJETIVO PRINCIPAL

Determinar o fator K para configuração de um sistema CAD 3D na geração automática do planificado, a partir do valor calculado na prática.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estudar os métodos de determinação do fator K;
- b) Realizar estudo de caso para estabelecimento de valores do fator K, na prática;
- c) Configurar o sistema CAD 3D com valores obtidos no estudo de caso;
- d) Propor metodologia de geração automática e precisa do planificado a partir do sistema CAD 3D;
- e) Analisar as vantagens e/ou desvantagens no projeto e fabricação de peças adotando a metodologia proposta.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE DOBRAMENTO DE CHAPA

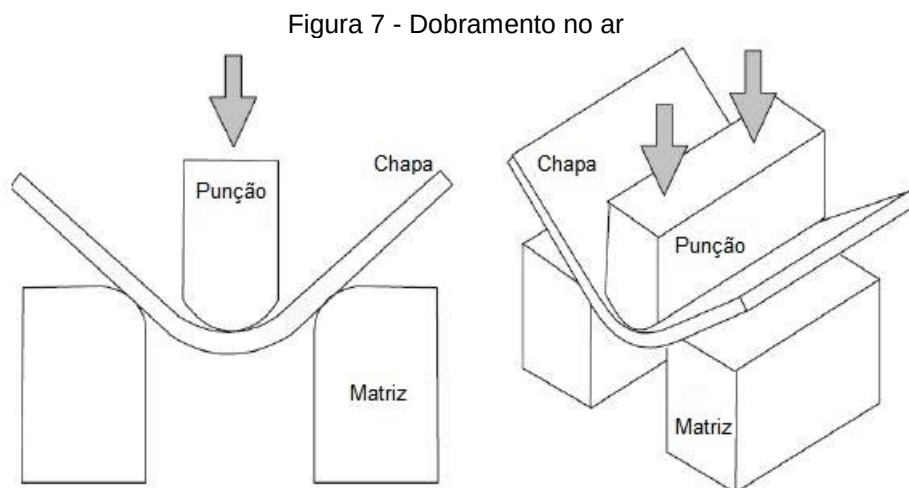
Existem diferentes modos de realizar o processo de dobramento de chapas, dependendo da geometria do punção e da matriz, o que por sua vez permite gerar perfis de secção diferentes na chapa a ser dobrada. (GASPAR, 2012, p.13)

A Norma DIN 8586 (2003, *apud* BRAZ, 2010, p.11) informa que “é habitual considerar os seguintes tipos de dobramento:”

- a) Dobramento no ar (*Air bending*);
- b) Dobramento em V (*V bending*);
- c) Dobramento em U (*U die bending*);
- d) Dobramento a fundo (*Bottom bending / Bottoming*);
- e) Dobramento em matriz deslizante (*Wiping die bending*);
- f) Dobramento em matriz giratória.

2.1.1 Dobramento no ar

No processo de dobramento no ar, também conhecido por dobramento em vazio ou dobramento livre, o valor do ângulo de dobra é determinado pela penetração do punção na matriz, sendo possível obter diferentes ângulos de dobra sem a necessidade de substituir a ferramenta. (BRAZ, 2010, p.11). A Figura 7 ilustra o processo.

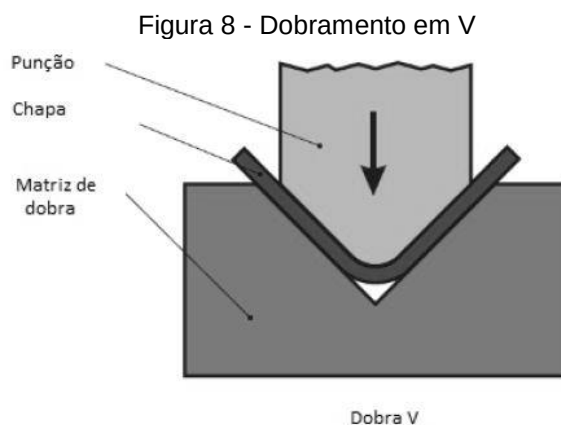


Fonte: Adaptado de: Braz (2010)

As forças envolvidas nesse processo são baixas, consequentemente o desgaste sofrido pelas ferramentas também é menor. Nesse processo existe a dificuldade de controlar o fenômeno de recuperação elástica do material. (LEIVA, 2012, p.21)

2.1.2 Dobramento em V

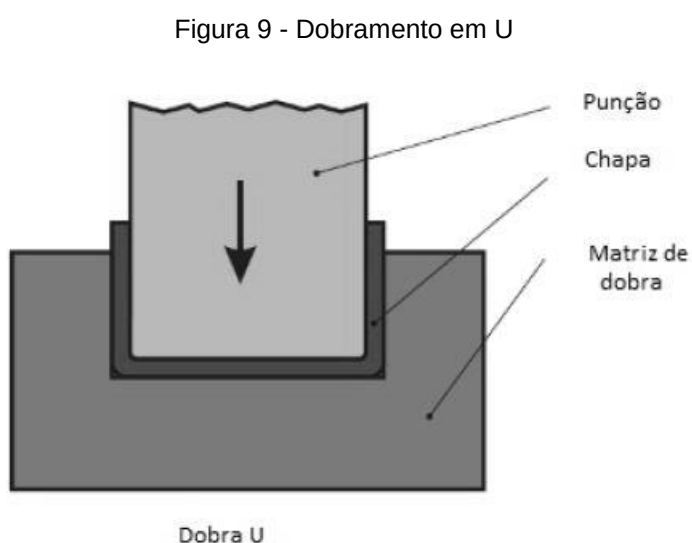
No processo de dobramento em “V”, a chapa é deformada até encostar as ferramentas, sendo a folga entre o punção e a matriz igual a espessura da chapa, conforme ilustrado na Figura 8. Este processo é mais preciso do que o dobramento livre, e é geralmente utilizado para dobras com ângulos de 90° ou ligeiramente inferiores. Nesse processo, a espessura pode variar entre valores de 0,5 mm a 25 mm. (BRAZ, 2010, p.12)



Fonte: Schuler (1998)

2.1.3 Dobramento em U

O dobramento em U, ilustrado na Figura 9, é realizado em dois eixos paralelos de dobramento na mesma operação. Porém este dispositivo exige um acréscimo de força de cerca de 30% a 40% (COELHO, 2011, p.13).

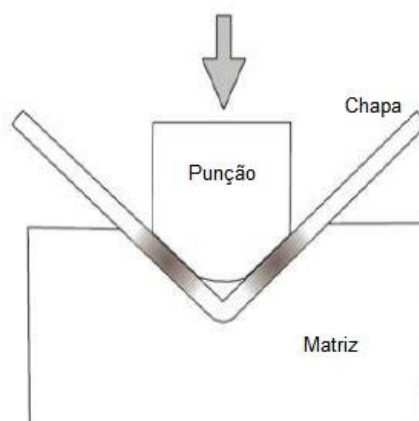


Fonte: Schuler (1998)

2.1.4 Dobramento a fundo

No processo de dobramento a fundo, ilustrado na Figura 10, o punção desce sobre a matriz de forma a esmagar a chapa. Este processo apresenta uma qualidade dimensional superior ao dobramento em V. (MIRANDA, 2014, p.8)

Figura 10 - Dobramento a fundo.

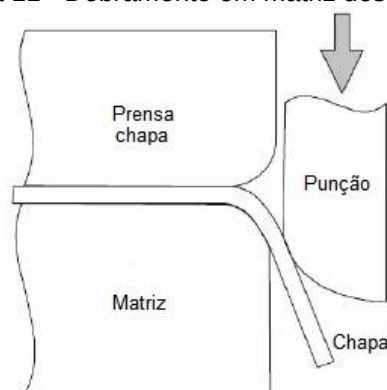


Fonte: Adaptado de: Braz (2010)

2.1.5 Dobramento em matriz deslizante

No dobramento em matriz deslizante da Figura 11, uma borda da chapa é dobrada enquanto a outra extremidade é mantida fixa pela força exercida através do prensa-chapas. O comprimento do flange pode facilmente ser mudado e o ângulo de dobra pode ser controlado pelo deslocamento do punção. (Santos, 2013, p.39)

Figura 11 - Dobramento em matriz deslizante.

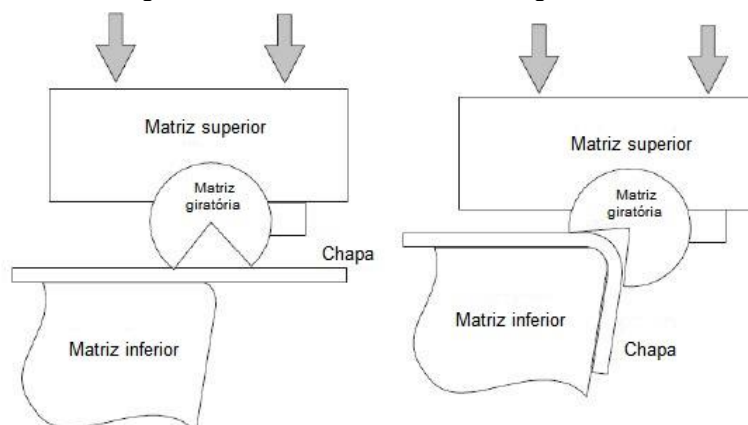


Fonte: Adaptado de: Braz (2010)

2.1.6 Dobramento em matriz giratória.

No processo de dobramento em matriz giratória utiliza-se uma matriz para conformar a chapa, como ilustrado na Figura 12. Este processo apresenta a vantagem de não ter a necessidade de utilizar um encosto para a chapa. (BRAZ, 2010, p.13)

Figura 12 - Dobramento em matriz giratória



Fonte: Adaptado de: Braz (2010)

2.2 LINHA NEUTRA

Conforme visto no tópico 2.1, existem vários tipos de dobramento de chapa. Contudo é importante destacar os esforços mecânicos que sofre o material ao ser conformado.

Nesse estudo foi utilizado o processo de dobramento em V, como ilustrado na Figura 13. Ao colocar o material na matriz e aplicar uma força com o punção, tem-se uma deformação por flexão. Após o processo de dobramento, o resultado final é o material com uma deformação plástica concentrada somente na região da dobra, sendo que restante do material não sofre alteração.

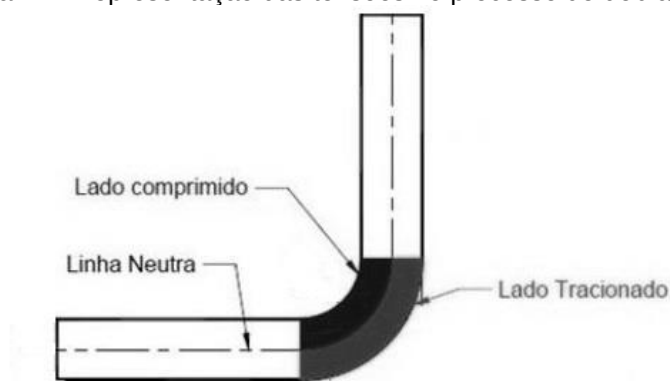
Figura 13 - Processo de dobramento em V utilizado no estudo



Fonte: Gaspar, 2012.

Conforme Gaspar (2012), no processo de flexão elastoplástica que produz uma dobra numa chapa, o material do lado interior, que está em contato com o punção, é comprimido; e o do lado exterior, é tracionado. A Figura 14 ilustra uma dobra, destacando os lados comprimido e tracionado.

Figura 14 - Representação das tensões no processo de dobramento

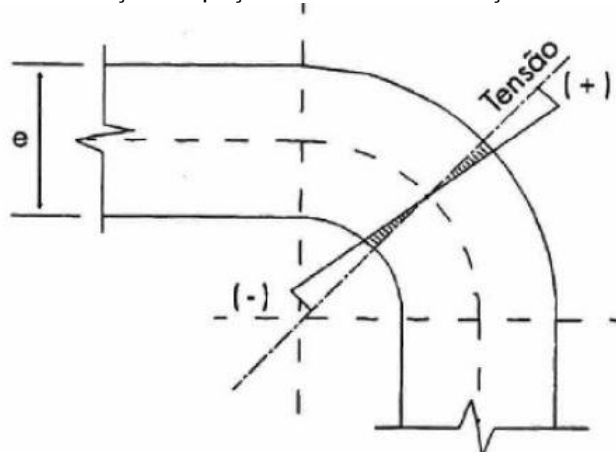


Fonte: Adaptador de: Frees (2017)

Para que ocorra essa deformação plástica é aplicada uma força, que por sua vez junto com o deslocamento da ferramenta, gera uma tensão no material. Estas tensões aumentam a partir de uma linha neutra, chegando a valores máximos nas camadas externas e internas. Na camada interna, tem-se a tensão máxima de

compressão, já na camada externa tem-se a tensão máxima de tração. A Figura 15 mostra uma representação da distribuição de tensão ao longo da espessura.

Figura 15 - Corte de secção de peça dobrada com esforços de tensões e linha neutra



Fonte: Palmeira(2005)

2.3 MATERIAL UTILIZADO

O material utilizado no estudo foi o aço inoxidável, o qual é amplamente aplicado nas indústrias, principalmente devido suas propriedades mecânicas e químicas.

“Os aços inoxidáveis são altamente resistentes a corrosão (*ferrugem*) em diversos ambientes, especialmente na atmosfera ambiente. Seu elemento de liga predominante é o cromo, onde uma concentração de pelo menos 11% é necessária.” (CALLISTER, 2012, p.340)

Os aços inoxidáveis são divididos em três classes: martensítico, ferrítico, austenítico. Os aços inoxidáveis martensíticos são capazes de ser tratados termicamente, de tal maneira que a martensita é o principal microconstituente. Os austeníticos apresentam boas propriedades mecânicas, boa soldabilidade e resistência a corrosão. Os ferríticos apresentam boa resistência à corrosão em meios menos agressivos, boa ductilidade, e razoável soldabilidade.

Essas propriedades os tornam amplamente utilizados na fabricação de utensílios decorativos e em equipamentos que têm contato com alimentos. Além disso, pela elevada resistência à corrosão, são também utilizados em produtos

náuticos. A Figura 16 ilustra um modelo de âncora, que é uma peça geralmente fabricada em aço inoxidável.

Figura 16 - Âncora em aço inoxidável AISI 316

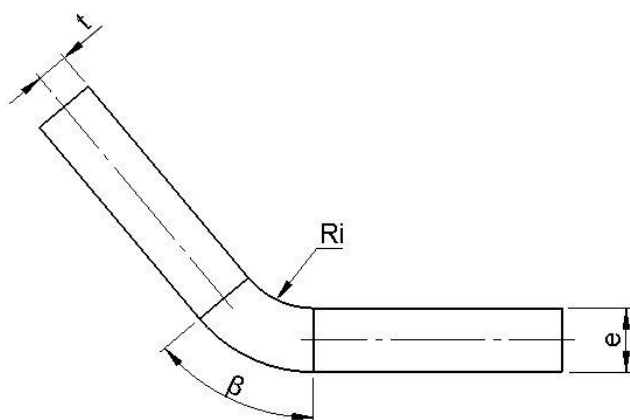


Fonte: Âncora modelo Bruce, revenda NAVETRON.

2.4 DEFINIÇÃO DO FATOR K

Segundo a documentação do SolidWorks o fator K é uma razão entre a distância da linha neutra em relação a borda superior (t) dividido pela espessura da chapa (e). A Figura 17 ilustra a definição do fator K.

Figura 17 - Parâmetros dimensionais para cálculo do fator K, segundo documentação do SolidWorks



Fonte: Adaptado de: (SolidWorks).

A Equação 1 ilustra a relação matemática para obtenção do fator K.

$$K = \frac{t}{e} \quad (1)$$

Onde:

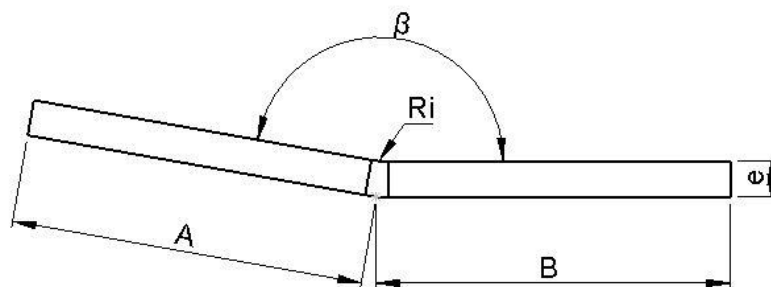
K = Fator K (adimensional)

t = Distância da borda superior a linha neutra (mm)

e = Espessura da chapa metálica (mm)

A norma DIN 6935 propõe outra maneira para se obter o fator K, chamado na norma como fator correção K. A Figura 18 ilustra o dimensionamento para entendimento da Equação 2.

Figura 18 - Parâmetros dimensionais para cálculo do fator K, segundo a norma DIN 6935



Fonte: Adaptado de: (Norma DIN 6935).

$$K = 0,65 + \frac{1}{2} \log \frac{R_i}{e} \quad (2)$$

Onde:

K = Fator K

Ri = Raio de dobra (mm)

e = Espessura da chapa metálica (mm)

A norma também disponibiliza uma tabela com valores de fator correção K, definidos através da relação entre o raio de dobra e a espessura da chapa. A Tabela 1 ilustra os valores sugeridos pela norma DIN 6935.

Tabela 1 - Valores do fator K, sugeridos pela norma DIN 6935

TABELA FATOR CORREÇÃO k NORMA DIN 6935					
Ri/e	0,65≤1	1≤1,5	1,5≤2,4	2,4≤3,8	>3,8
Fator correção K	0,5	0,7	0,8	0,9	1

Fonte: Adaptado de: (Norma DIN 6935).

2.5 MÉTODOS DE CÁLCULO DO PLANIFICADO DA CHAPA METÁLICA.

Para a fabricação de uma peça de chapa metálica dobrada é preciso saber as dimensões da chapa antes da dobra, ou seja, da chapa metálica planificada, que é comumente chamado de planificado.

O cálculo do planificado tem como principal parâmetro o comprimento da linha neutra, explicado no tópico 2.2. A posição desta linha depende de alguns fatores como as características mecânicas do material, da espessura e geometria das ferramentas. (GAUSMANN, 2017, p.25)

2.5.1 Cálculo do planificado segundo a norma DIN 6935

Geralmente a determinação do comprimento do planificado faz-se recorrendo a normas. Assim sendo, a norma DIN 6935 é utilizada habitualmente pelos fabricantes e projetistas de máquinas-ferramentas. (BRAZ, 2010, p.33)

O comprimento do planificado segundo a norma DIN 6935 é determinado pela Equação 3, apresentada a seguir:

$$L_t = A + B + \Delta l \quad (3)$$

Onde:

L_t = Comprimento do planificado (mm)

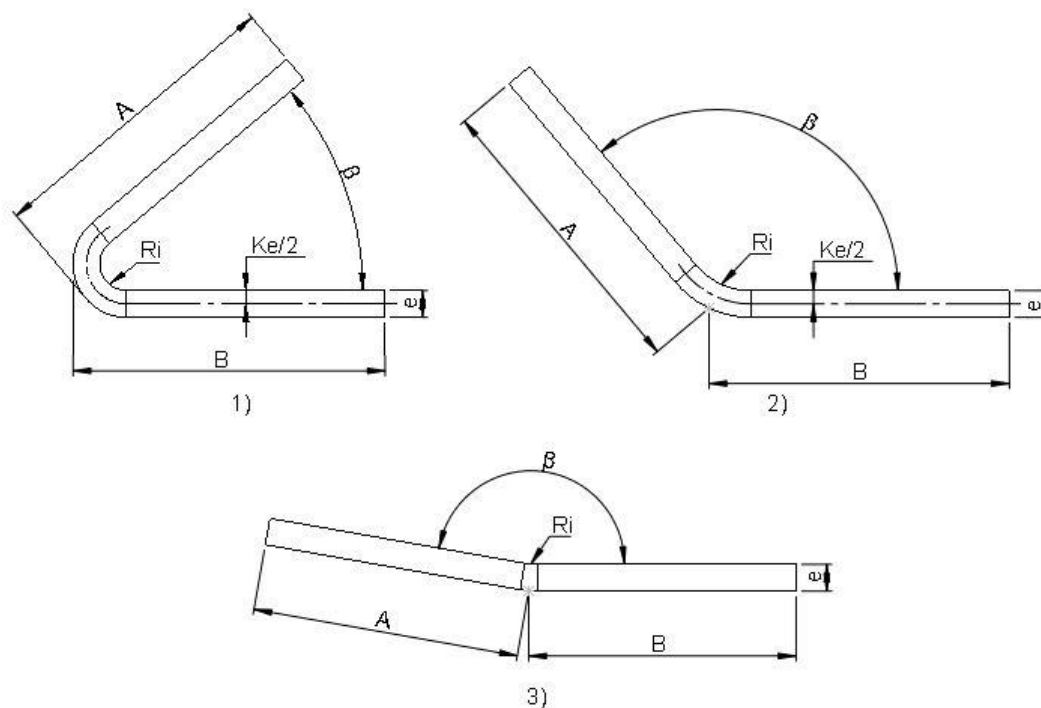
A = Comprimento da aba A (mm)

B = Comprimento da aba B (mm)

Δl = Fator de compensação (mm)

A norma classifica três intervalos de ângulos, o que difere a equação do seu fator de compensação Δl . A Figura 19 ilustra as abas de acordo com a classificação da norma, todos definidos de acordo com o ângulo de dobra β .

Figura 19 - Intervalo do ângulo de dobra para o cálculo do planificado, segundo norma DIN 6935



Fonte: Adaptado de: (Norma DIN6935).

1) A Equação 4 apresenta o cálculo do fator de compensação Δl para o intervalo $0 \leq \beta \leq 90^\circ$

$$\Delta l = \pi \left(\frac{180 - \beta}{180} \right) \left(R_i + \frac{e}{2} K \right) - 2(R_i + e) \quad (4)$$

Onde:

Δl = Fator de compensação (mm)

β = Ângulo de dobra (graus)

R_i = Raio de dobra (mm)

K = Fator K

e = Espessura da chapa metálica (mm)

2) A Equação 5 apresenta o cálculo do fator de compensação Δl para o intervalo $90^\circ \leq \beta \leq 165^\circ$

$$\Delta l = \pi \left(\frac{180-\beta}{180} \right) \left(R_i + \frac{e}{2} K \right) - 2(R_i + e) \tan \frac{180-\beta}{2} \quad (5)$$

Onde:

Δl = Fator de compensação (mm)

β = Ângulo de dobra (graus)

R_i = Raio de dobra (mm)

K = Fator K

e = Espessura da chapa metálica (mm)

3) A Equação 6 apresenta o cálculo do fator de compensação Δl para o intervalo $165^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

$$\Delta l = 0 \quad (6)$$

Onde:

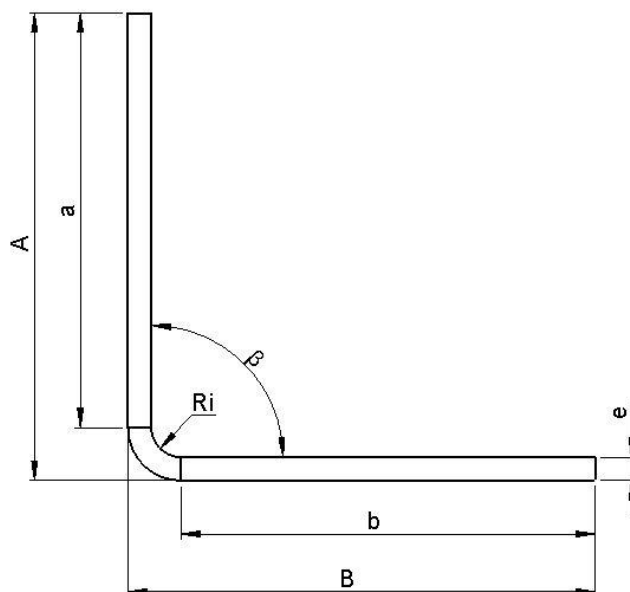
Δl = Fator de compensação (mm)

2.5.2 Cálculo do planificado, segundo o sistema CAD 3D SolidWorks

As equações encontradas na documentação do SolidWorks demonstram como é calculado o planificado. No menu de ajuda, sobre o tópico tolerância de dobra e dedução de dobra, é descrito como é calculado o planificado seguindo esses dois modos, a saber:

A Figura 20 ilustra os parâmetros dimensionais da peça.

Figura 20 - Parâmetros dimensionais de uma peça em chapa metálica



Fonte: Elaboração própria.

A Equação 7 do planificado (L_t) é descrita pelo modo tolerância de dobra (*Bending allowance*) como:

$$L_t = a + b + BA \quad (7)$$

Onde:

L_t = Comprimento total do planificado (mm)

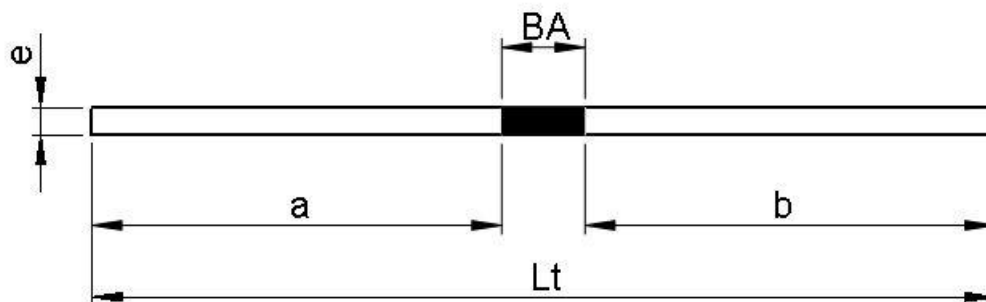
a = Comprimento da perna de dobra vertical (mm)

b = Comprimento da perna de dobra horizontal (mm)

BA = Tolerância de dobra (*Bending allowance*) (mm)

A Figura 21 ilustra a peça no seu estado planificado, para facilitar o entendimento.

Figura 21 - Tolerância de dobra, segundo a documentação do SolidWorks



Fonte: Elaboração própria.

No menu de ajuda, no tópico fator K tem-se a Equação 8 que mostra como é calculado o valor da tolerância de dobra BA.

$$BA = \pi \cdot (R_i + K \cdot e) \cdot \frac{\beta}{180} \quad (8)$$

Onde:

BA = Tolerância de dobra (mm)

R_i = Raio de dobra (mm)

K = Fator K

e = Espessura da chapa metálica (mm)

β = Ângulo de dobra (graus)

No entanto, a Equação 8 do BA, contém a variável do fator K, cujo valor ainda não é conhecido. Correlacionando as Figuras 20 e 21, é possível verificar que a tolerância de dobra BA é a diferença entre o planificado Lt e a soma das pernas de dobra a e b, conforme a Equação 7. Mas medir as pernas de dobra a e b, não é algo fácil ou prático de fazer.

Pelo modo chamado de dedução de dobra (*Bending deduction*), a Equação 9 do planificado descrita pelo método é:

$$Lt = A + B - BD \quad (9)$$

Onde:

L_t = Comprimento do planificado (mm)

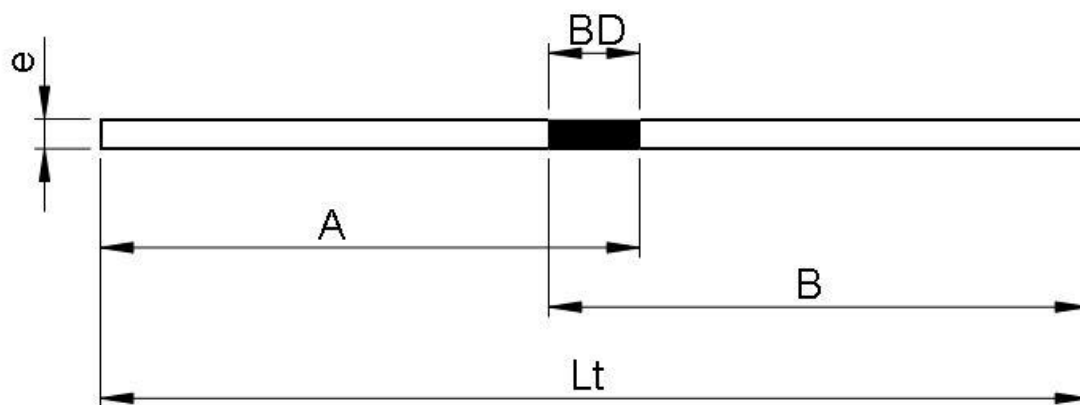
A = Comprimento da aba vertical (mm)

B = Comprimento da aba horizontal (mm)

BD = Dedução de dobra (*Bending deduction*) (mm)

A Figura 22 ilustra a peça no planificado seguindo esse método.

Figura 22 - Dedução de dobra, segundo a documentação do SolidWorks



Fonte: Elaboração própria.

Nesse método, é mais fácil obter a medida das abas A e B . Correlacionando as Figuras 20 e 22, é possível verificar que a dedução de dobra BD é a diferença entre a soma das abas de dobra A e B e o planificado L_t ,

No menu de ajuda do SolidWorks, no tópico dedução de dobra é ilustrado a Equação 10 que relaciona a dedução de dobra BD e a tolerância de dobra BA . Essa equação é útil para obter o valor de BA , e por conseguinte, o valor do fator K .

$$BD = 2 * OSSB - BA \quad (10)$$

Onde:

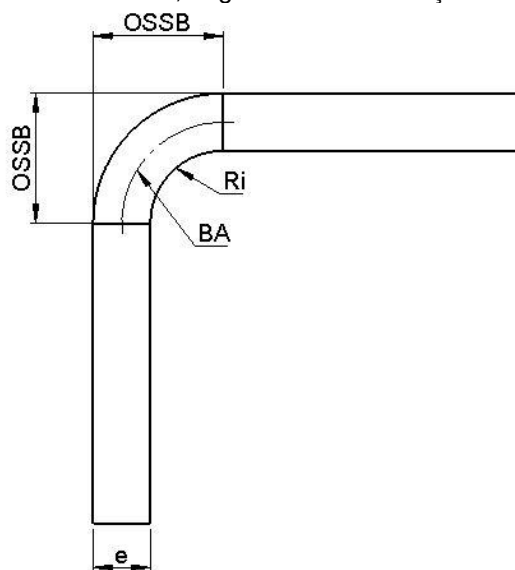
BD = Dedução de dobra (mm)

$OSSB$ = Recuo externo (mm)

BA = Tolerância de dobra (mm)

Porém, a Equação 10 apresenta outra variável desconhecida, chamada de OSSB (*Outside setback*), que é o recuo externo. Trata-se da distância linear entre as duas tangentes do raio externo da dobra, como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Recuo externo, segundo documentação do SolidWorks®



Fonte: Adaptado de: (SolidWorks).

Contudo, essa variável OSSB, pode ser calculada sem a necessidade de proceder a alguma medição a partir da chapa metálica dobrada. A Equação 11 apresenta como pode ser calculado o valor de OSSB.

$$OSSB = \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) * (Ri + e) \quad (11)$$

Onde:

OSSB = Recuo externo (mm)

β = Ângulo de dobra (graus)

Ri = Raio de dobra (mm)

e = Espessura da chapa metálica (mm)

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Conforme GONÇALVES (2018), para levantar o valor do fator K na prática, primeiramente tem-se que desenhar e fabricar um corpo de prova com o valor pré-definido de 0,5. Após retirar as medidas da peça fabricada, basta manipular as equações para obter os valores do recuo externo (OSSB), dedução de dobra (BD), tolerância de dobra (BA) e fator K.

Para adotar essa sequência, inicialmente é necessário o conhecimento do ferramental disponível, e que assim possibilite projetar o corpo de prova.

3.1 DADOS DA MÁQUINA UTILIZADA

O processo de dobramento foi realizado por uma prensa dobradeira modelo PSH 30030, ilustrado na Figura 28.

Figura 24 - Prensa dobradeira utilizada no estudo – Modelo PSH 30030



Fonte: Fabricante de prensa dobradeira Newton.

A Figura 29 apresenta os dados técnicos da máquina.

Figura 25 - Dados técnicos da prensa dobradeira – Modelo PSH 30030

PSH - Características Técnicas				
Tipo	PSH			
Modelo		25040	25060	30030
Força Máxima	Tons	250	250	300
	KN	2500	2500	3000
Comprimento máximo de dobra (trabalho)	mm	4000	6150	3050
Comprimento das ferramentas	mm	4050	6200	3100
Distância entre as laterais	mm	3150	5100	2550
Cava	mm	525	525	525
Curso máximo	mm	220	220	220
Abertura máxima (sem ferramentas)	mm	440	440	440
Abertura mínima (sem ferramentas)	mm	230	230	230
Largura da mesa	mm	200	200	200
Velocidade de aproximação	mm/s	100	100	100
Velocidade de trabalho	mm/s	8	8	8
Velocidade de retorno	mm/s	90	90	90
Potência do motor	KW	18,5	18,5	18,5
Volume de óleo hidráulico	L	210	210	210
Vazão da bomba	L/min	56	56	56
Regulagem da válvula de segurança	Bar	280	280	280
Pesos (aproximado)				
Total da máquina	Kg	18000	26000	15000
Avental Superior/Prensador	Kg	3250	6800	2600
Avental Fixo	Kg	-	7400	-
Dimensões gerais (A x C x L acima do solo)	mm	3000x4950x2050	3490x7100x2200	3000x4000x2050

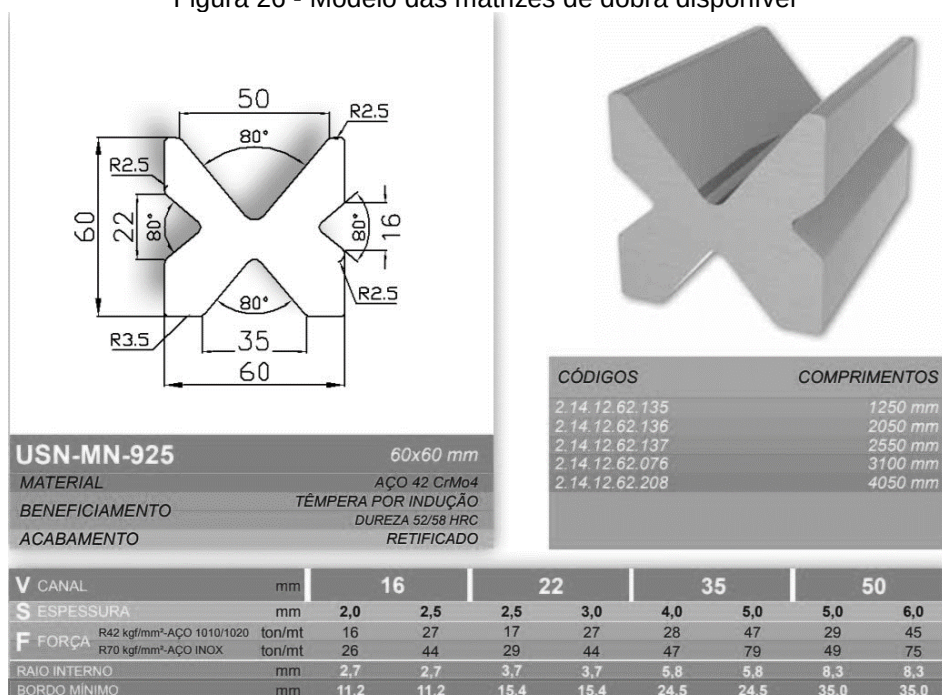
Fonte: Manual técnico da prensa dobradeira.

3.2 DADOS DO CORPO DE PROVA UTILIZADO

Inicialmente, foi realizada uma análise para dimensionar o corpo de prova padrão, baseando-se nas especificações do ferramental disponível para o dobramento.

Nessa análise, foi usada a tabela fornecida pelo fabricante da máquina, ilustrada na Figura 24, a qual apresenta a especificação das matrizes disponíveis para dobra, e informações dimensionais que correlacionam para cada espessura de material, a abertura do canal V indicado e seu bordo mínimo correspondente.

Figura 26 - Modelo das matrizes de dobra disponível



Fonte: Fabricante de máquinas dobradeira Newton.

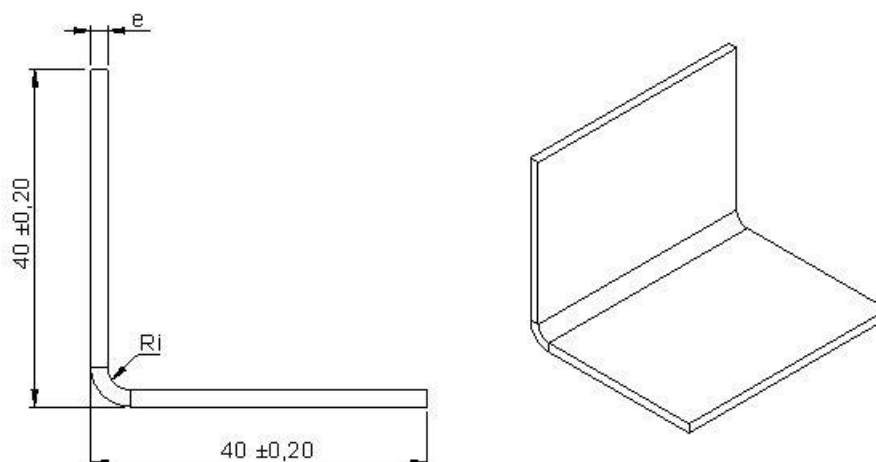
O objetivo é dimensionar um corpo de prova que contenha as medidas iguais de aba, e varie somente a espessura e raio de dobra.

Ao projetar o corpo de prova, foi atribuída a tolerância de $\pm 0,20$ mm para as abas e $\pm 0,40$ mm para o planificado. Essa tolerância foi definida levando-se em consideração os processos de fabricação de corte e dobramento das peças de interesse nesse estudo, além de permitir uma margem de repetibilidade para produção seriada das peças.

Com isso é possível verificar na última linha da Figura 24, a dimensão do bordo mínimo deve ser de 35 mm, a fim de que possa ser dobrada em qualquer uma das espessuras permitidas com esse modelo de ferramenta. Baseado nessa informação foi projetado um corpo de prova utilizando o sistema CAD 3D SolidWorks, com a dimensão da aba padrão e variando somente a espessura (e), e raio interno ou raio de dobra (R_i), conforme ilustra a Figura 25.

As peças que sofrem dobramento durante o processo de fabricação ficam sujeitas a condições externas diversas, tais como: o mau posicionamento da peça no momento da dobra; e/ou peças que contém rebarbas oriundas do processo de corte. Além dessas, outras condições também interferem diretamente na precisão dimensional da peça fabricada.

Figura 27 - Modelo CAD com dimensões do corpo de prova, no estado dobrado



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 2 contém as informações de espessuras disponíveis para experimento junto com o seu respectivo raio de dobra.

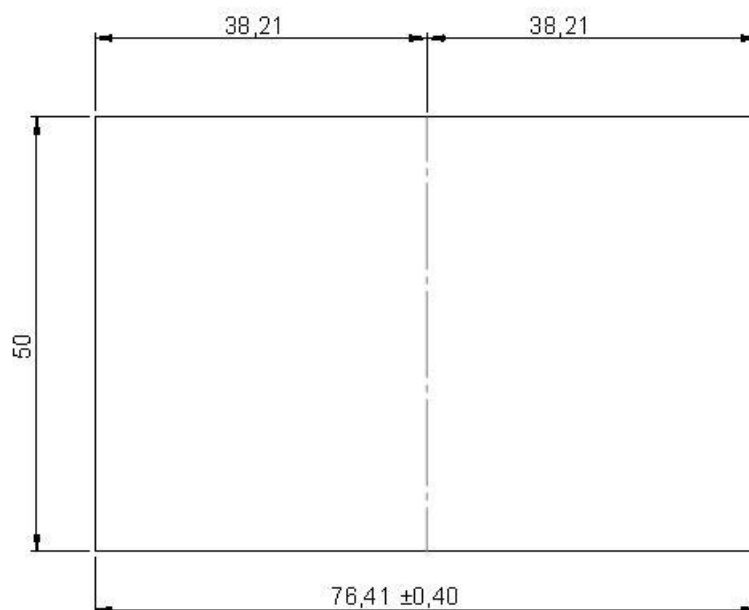
Tabela 2 - Espessura e raio de dobra

Espessura da chapa (e)	Abertura (V)	Raio de dobra (Ri)
2mm	16	2,7mm
3mm	22	3,7mm
4mm	35	5,8mm
5mm	35	5,8mm
5mm	50	8,3mm
6mm	50	8,3mm

Fonte: Elaboração própria.

Como visto na Tabela 2, existem seis possíveis situações de dobra. Isso cria a necessidade de se preparar um corpo de prova para cada uma das combinações possíveis dos parâmetros de espessura da chapa e raio de dobra. O desenvolvimento do primeiro planificado se deu com os valores de parâmetros predefinidos do sistema CAD 3D. Nessa configuração o valor do fator K é de 0,5. A Figura 26 ilustra o corpo de prova de espessura 2mm, no estado planificado.

Figura 28 - Modelo CAD com dimensões do corpo de prova de espessura 2mm, no estado planificado



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 3 mostra os valores do planificado para cada configuração de peça.

Tabela 3 - Dimensões do planificado para o fator $K = 0,5$

Espessura chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Planificado (Lt)
2mm	16	2,7mm	76,41mm
3mm	22	3,7mm	74,77mm
4mm	35	5,8mm	72,65mm
5mm	35	5,8mm	71,44mm
5mm	50	8,3mm	70,36mm
6mm	50	8,3mm	69,15mm

Fonte: Elaboração própria.

Com a informação do planificado da peça, foi iniciado o processo de corte dos corpos de prova. A Figura 27 ilustra um dos corpos de prova cortado.

Figura 29 - Corpo de prova cortado



Fonte: Elaboração própria.

Todos os corpos de prova foram fabricados em aço inoxidável. É importante que após a fabricação do corpo de prova, seja realizada a medida do planificado, levando em consideração a tolerância do processo de corte. A Tabela 4 contém os valores da peça cortada, mostrando que todos estão dentro da tolerância especificada de $\pm 0,40$ mm..

Tabela 4 - Medidas da peça cortada

Espessura chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Planificado (Lt)	Peça cortada (Lc)	Variação (Lc-Lt)
2mm	16	2,7mm	76,41mm	76,30mm	-0,11mm
3mm	22	3,7mm	74,77mm	74,83mm	0,06mm
4mm	35	5,8mm	72,65mm	72,72mm	0,07mm
5mm	35	5,8mm	71,44mm	71,53mm	0,09mm
5mm	50	8,3mm	70,36mm	70,31mm	0,05mm
6mm	50	8,3mm	69,15mm	69,34mm	0,19mm

Fonte: Elaboração própria.

Para definir a linha de dobra, por se tratar de uma peça em L de abas iguais, basta dividir pela metade o valor medido da peça cortada.

3.3 COLETA DE DADOS 1

Após realizado todas as dobras, usando o processo de dobramento em V, foi realizado a etapa de medição das abas, o objetivo é verificar a diferença entre o projetado e o planificado. A figura 30 ilustra dois corpos de prova dobrados.

Figura 30 - Corpo de prova dobrado



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 5 mostra o resultado das medidas das abas e sua variação em relação ao valor nominal do projeto.

Tabela 5 - Variação das abas para fator $K = 0,5$.

Espessura chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Abas	Variação abas
2mm	16	2,7mm	40,54mm	0,54mm
3mm	22	3,7mm	40,29mm	0,29mm
4mm	35	5,8mm	40,45mm	0,45mm
5mm	35	5,8mm	40,31mm	0,31mm
5mm	50	8,3mm	40,29mm	0,29mm
6mm	50	8,3mm	40,43mm	0,43mm

Fonte: Elaboração própria.

Como pode se observar, as variações coletadas são superiores ao que permite a tolerância especificada pelo projeto do corpo de prova.

No tópico 3.4, será demonstrado o procedimento de cálculo do fator K , a partir dos dados obtidos nessa primeira coleta, e das equações obtidas da literatura técnica, e demonstradas no tópico 2.5.2.

3.4 PROCEDIMENTO DE DETERMINAÇÃO DO FATOR K CALCULADO

Primeiramente, a Equação 11 é usada para calcular o recuo externo. Os valores para o cálculo, constam na Tabela 4, e todas as dobras são a 90° .

Para calcular o valor da dedução de dobra (BD), foi manipulado a Equação 9, conforme ilustra a Equação 12.

$$BD = A + B - Lt \quad (12)$$

Onde:

BD = Dedução de dobra (mm)

A = Comprimento da aba de dobra A (mm)

B = Comprimento da aba de dobra B (mm)

Lt = Comprimento do planificado (mm)

Para a variável Lt será usado o valor da peça cortada Lc, como consta na Tabela 4; e para os valores de A e B, na Tabela 5, Aba A e Aba B, respectivamente. A Tabela 6 mostra os valores calculados do recuo externo (OSSB) e da dedução de dobra (BD).

Tabela 6 - Valores calculados do recuo externo (OSSB) e dedução de dobra (BD)

Espessura chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Abas	OSSB	BD
2mm	16	2,7mm	40,54mm	4,70	4,78
3mm	22	3,7mm	40,29mm	6,70	5,75
4mm	35	5,8mm	40,45mm	9,80	8,18
5mm	35	5,8mm	40,31mm	10,80	9,09
5mm	50	8,3mm	40,29mm	13,30	10,27
6mm	50	8,3mm	40,43mm	14,30	11,52

Fonte: Elaboração própria.

Para calcular o valor da tolerância de dobra BA, foi manipulado a Equação 10, conforme ilustra a Equação 13.

$$BA = 2.OSSB - BD \quad (13)$$

Onde:

BA = Tolerância de dobra (mm)

OSSB = Recuo externo (mm)

BD = Dedução de dobra (mm)

Para calcular o valor do fator K, basta manipular a Equação 8, conforme ilustra a Equação 14.

$$K = \frac{BA.180 - Ri.\pi.\beta}{e.\beta.\pi} \quad (14)$$

Onde:

K = Fator K

BA = Tolerância de dobra (mm)

Ri = Raio de dobra (mm)

β = Ângulo de dobra (graus)

e = Espessura da chapa metálica (mm)

A Tabela 7 mostra os valores calculados da tolerância de dobra (BA) e do fator K.

Tabela 7 - Valores da tolerância de dobra (BA) e do fator K calculados

Espessura chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	BA	Fator K
2mm	16	2,7mm	4,62	0,12
3mm	22	3,7mm	7,65	0,39
4mm	35	5,8mm	11,42	0,37
5mm	35	5,8mm	12,51	0,43
5mm	50	8,3mm	16,33	0,42
6mm	50	8,3mm	17,08	0,43

Fonte: Elaboração própria.

3.5 COLETA DE DADOS 2

Após calcular os valores do fator K, a partir dos dados obtidos da primeira coleta, foi realizado a alteração no sistema CAD 3D SolidWorks, que inicialmente

estava configurado com o fator K padrão de 0,5. Todos os modelos CAD foram atualizados com o valor de fator K calculado, conforme a Tabela 7.

A Tabela 8 ilustra os valores do planificado para cada configuração de dobra.

Tabela 8 - Dimensões do planificado para o fator K calculado

Espessura chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Fator K	Planificado (Lt)
2mm	16	2,7mm	0,12	75,22mm
3mm	22	3,7mm	0,39	74,25mm
4mm	35	5,8mm	0,37	71,84mm
5mm	35	5,8mm	0,43	70,89mm
5mm	50	8,3mm	0,42	69,74mm
6mm	50	8,3mm	0,43	68,49mm

Fonte: Elaboração própria.

Após definido o comprimento do planificado de cada corpo de prova no sistema CAD 3D, as etapas de corte e dobramento dos corpos de prova foram novamente realizadas, num procedimento igual ao adotado na coleta de dados 1.

A Tabela 9 ilustra os valores obtidos durante esses processos e o valor da variação em relação ao definido no projeto do corpo de prova, ilustrado na Figura 25.

Tabela 9 - Coleta de dados 2

Espessura Chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Planificado (Lt)	Peça cortada (Lc)	Variação (Lc-Lt)	Abas	Variação abas
2mm	16	2,7mm	75,22mm	75,56mm	0,34mm	39,90mm	-0,10mm
3mm	22	3,7mm	74,25mm	74,04mm	-0,21mm	39,96mm	-0,04mm
4mm	35	5,8mm	71,84mm	71,93mm	0,09mm	40,14mm	0,14mm
5mm	35	5,8mm	70,89mm	71,16mm	0,27mm	40,32mm	0,32mm
5mm	50	8,3mm	69,74mm	69,74mm	0	40,18mm	0,18mm
6mm	50	8,3mm	68,49mm	68,80mm	0,31mm	40,30mm	0,30mm

Fonte: Elaboração própria.

Conforme definido no projeto do corpo de prova, duas configurações de ferramental e espessura de chapa não ficaram dentro da tolerância especificada de $\pm 0,20\text{mm}$: a chapa de 5mm abertura do V de 35, e a chapa de 6mm abertura do V de 50.

Para essas duas combinações é preciso calcular novamente o valor do fator K, com os valores obtido na coleta 2, usando os passos descritos no tópico 3.4.

O objetivo de refazer os cálculos é obter um valor do fator K que atenda a medida projetada, respeitando a tolerância definida.

3.6 COLETA DE DADOS 3

A Tabela 10 apresenta os valores recalculados do fator K para essas duas configurações.

Tabela 10 - Valor fator K recalculado

Espessura Chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Fator K
5mm	35	5,8mm	0,38
6mm	50	8,3mm	0,40

Fonte: Elaboração própria.

Esses novos valores calculados foram substituídos no sistema CAD 3D SolidWorks, e novamente foi gerado o processo de corte e dobramento conforme etapas anteriores. A Tabela 11 apresenta os valores coletados para essas duas configurações.

Tabela 11 - Coleta de dados 3

Espessura Chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Planificado (Lt)	Peça cortada (Lc)	Variação (Lc-Lt)	Abas	Variação abas
5mm	35	5,8mm	70,50mm	70,70mm	0,20mm	40,03mm	0,03mm
6mm	50	8,3mm	68,21mm	68,30mm	0,09mm	40,04mm	0,04mm

Fonte: Elaboração própria.

Observando os valores da variação pode-se verificar que os valores do fator K correspondentes, calculados a partir da coleta de dados 2, ficaram dentro do permitido pela tolerância do corpo de prova.

3.7 RESULTADO FINAL DAS COLETAS

A Tabela 12 ilustra todas as configurações finais de dobra, juntamente com o fator K calculado e obtido pelos experimentos, e o valor das variações.

Tabela 12 - Variação das abas para o fator K calculado e obtido na prática

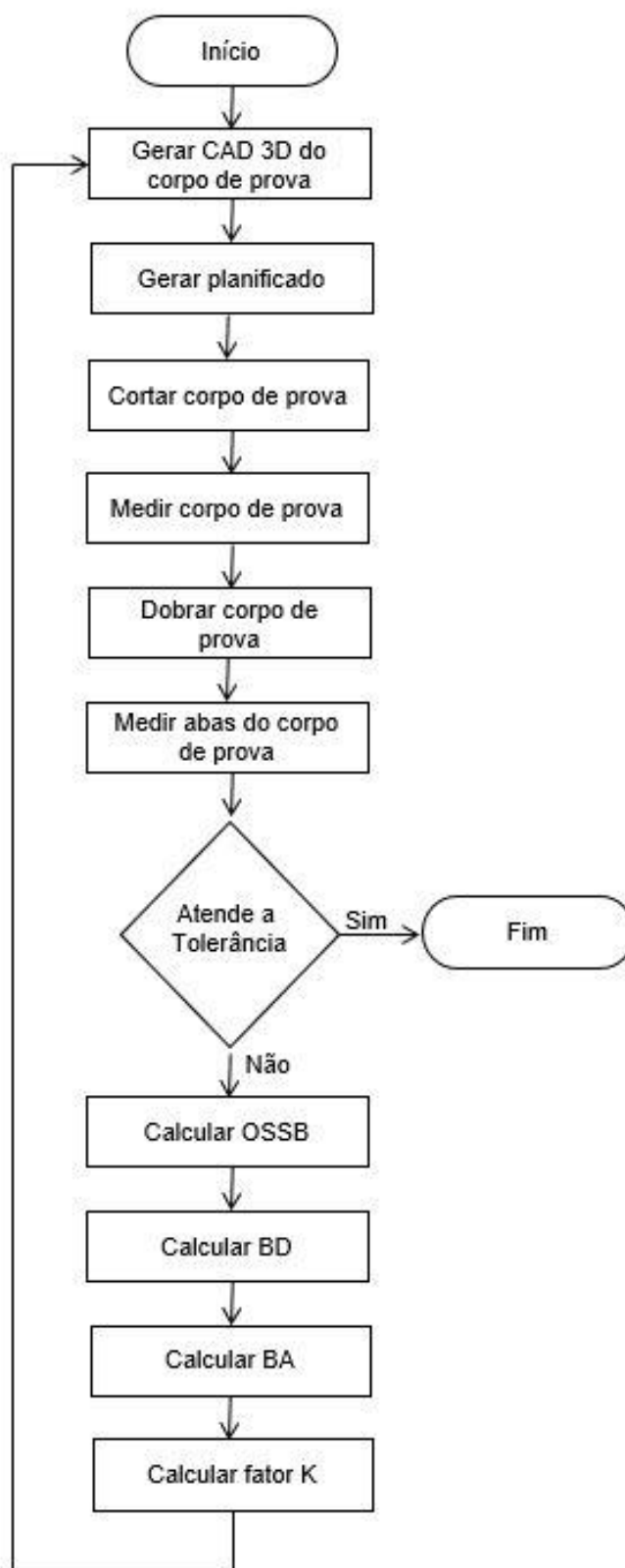
Espessura Chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Fator K	Abas	Variação abas
2mm	16	2,7mm	0,12	39,90mm	-0,10mm
3mm	22	3,7mm	0,39	39,96mm	-0,04mm
4mm	35	5,8mm	0,37	40,14mm	0,14mm
5mm	35	5,8mm	0,38	40,03mm	0,03mm
5mm	50	8,3mm	0,42	40,18mm	0,18mm
6mm	50	8,3mm	0,40	40,04mm	0,04mm

Fonte: Elaboração própria.

É importante destacar que em nenhuma das combinações de ferramenta e espessura de chapa, ficaram sem atender a tolerância definida pelo projeto do corpo de prova.

A Figura 31 ilustra o fluxograma que foi seguido para realização do estudo.

Figura 31 - Fluxograma de determinação do fator K calculado, obtido na prática



Fonte: Elaboração própria.

3.8 IMPLANTAÇÃO NO SISTEMA CAD 3D SOLIDWORKS

Será demonstrado o passo a passo da implantação no sistema SolidWorks®. A implantação justifica-se uma vez que facilita o trabalho do projetista, diminuindo a chance de erro quando modelado a peça em chapa metálica. O objetivo é dispor de modo automático na tela de modelagem do sistema CAD 3D SolidWorks de informação de ferramental, material e fator K de maneira organizada e correta.

Para isso, o primeiro passo é acessar o diretório de localização das tabelas de calibres de chapa metálica, como ilustra a Figura 32.

Figura 32 - Diretório de tabelas de calibres de chapa metálica, do SolidWorks

Arquivos de Programas > SolidWorks Corp > SolidWorks > lang > portuguese-brazilian > Sheet Metal Gauge Tables

Fonte: Elaboração própria.

Nesse diretório existem planilhas do pacote Microsoft Office Excel®, conforme ilustrado na Figura 33. A planilha que será usada para configuração de ferramental, espessura de material e fator K é a “*K factor mm sample*”.

As demais tabelas utilizam os valores de tolerância de dobra (BA), e dedução de dobra (BD), os quais foram demonstrados no tópico 3.4, nas Equações 13 e 12, respectivamente.

Conforme pode-se verificar na Figura 34, o tópico denominado N° do calibre refere-se ao nome para essa configuração. Neste caso, o termo calibre será substituído por um prefixo “Espessura”, seguido por um sufixo, de acordo com o valor da espessura inserida na linha abaixo.

Tem-se também uma coluna destacada de ângulo, onde nota-se que os valores crescem de 15° a 15°. Porém, vale lembrar que no caso desse estudo foi levantado o fator K somente para ângulos de dobra de 90°. Ao lado da coluna de ângulo existe a coluna raio, que apresenta os raios possíveis de dobra para aquela determinada espessura da chapa metálica.

Ao cruzar a informação do raio junto com o ângulo de dobra, o sistema CAD 3D SolidWorks® busca nessa planilha o valor já tabelado do fator K.

Nota-se que essa configuração é dada para uma espessura de material e os raios e ângulos disponíveis, ou seja, para as demais espessuras é necessário replicar essa configuração nas linhas abaixo, da correspondente planilha.

A Figura 35 ilustra a planilha já com a configuração e o correspondente valor de fator K atribuído. Para os demais ângulos diferentes de 90°, é repetido o mesmo valor de fator K.

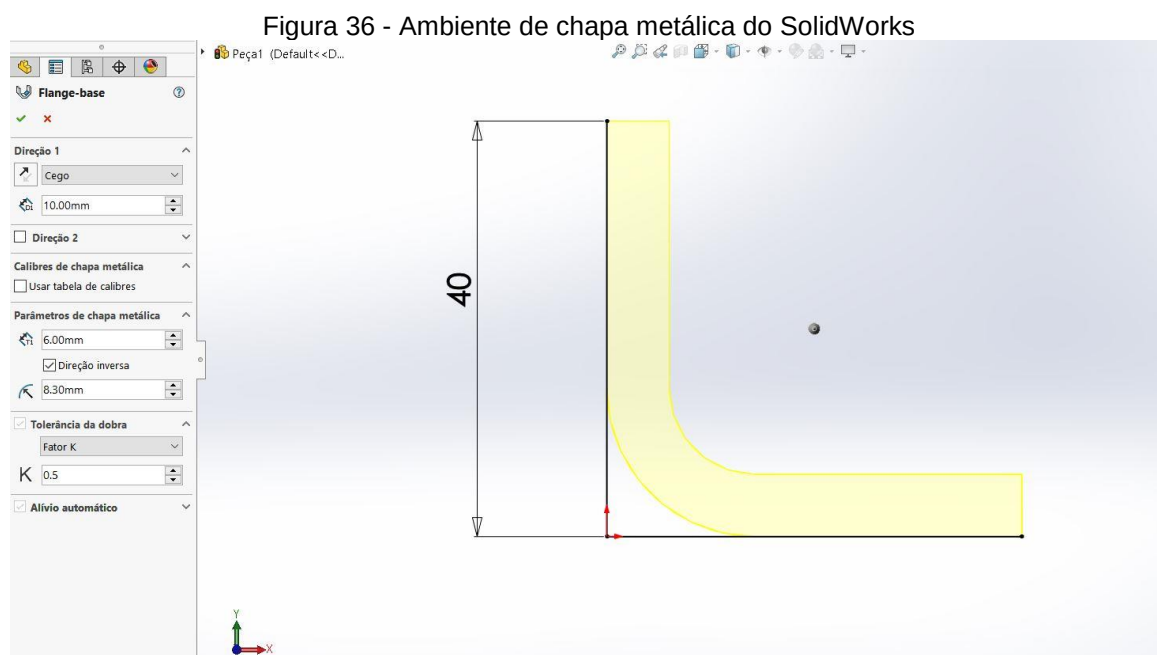
Figura 35 - Configuração da tabela do fator K para espessura de 2mm

	A	B	C	D
3	Processo	Dobragem de aço (Air Bending)		
4	Tipo de dobra:	Fator K		
5	Unidade:	milímetros		
6	Material:	Aço inoxidável		
7				
8				
9				
10				
11	N° do calibre	Espessura 2		
12	Espessura:	2		
13	Ângulo	Raio		
14		2,7		
15	15	0,12		
16	30	0,12		
17	45	0,12		
18	60	0,12		
19	75	0,12		
20	90	0,12		

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 35 apresenta os dados da chapa de 2mm. Todas as outras configurações foram preenchidas seguindo esse mesmo padrão. No apêndice A encontra-se a planilha completa, com todos as configurações disponíveis.

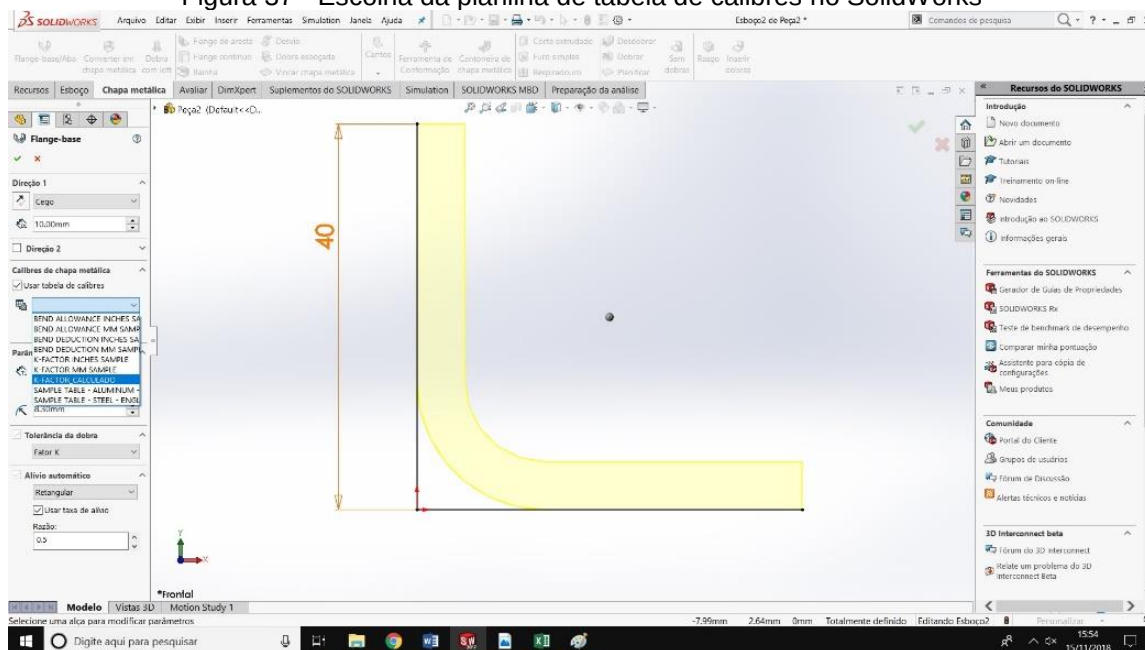
Com a planilha configurada, basta utilizá-la dentro do ambiente de modelagem de chapa metálica do sistema CAD 3D SolidWorks. Nota-se que na lateral esquerda, existem as configurações disponíveis para a modelagem em chapa metálica. Para utilizar a planilha configurada, basta ativar a opção usar tabela de calibres, disponível no campo calibres de chapa metálica. Nesse campo, seleciona-se a planilha que foi atribuída os valores do fator K calculado, obtido na prática. A Figura 36 ilustra essa configuração.



Fonte: SolidWorks®

Ao selecionar a planilha, os parâmetros de dobra, ficarão pré-definidos, conforme ilustrado na Figura 37.

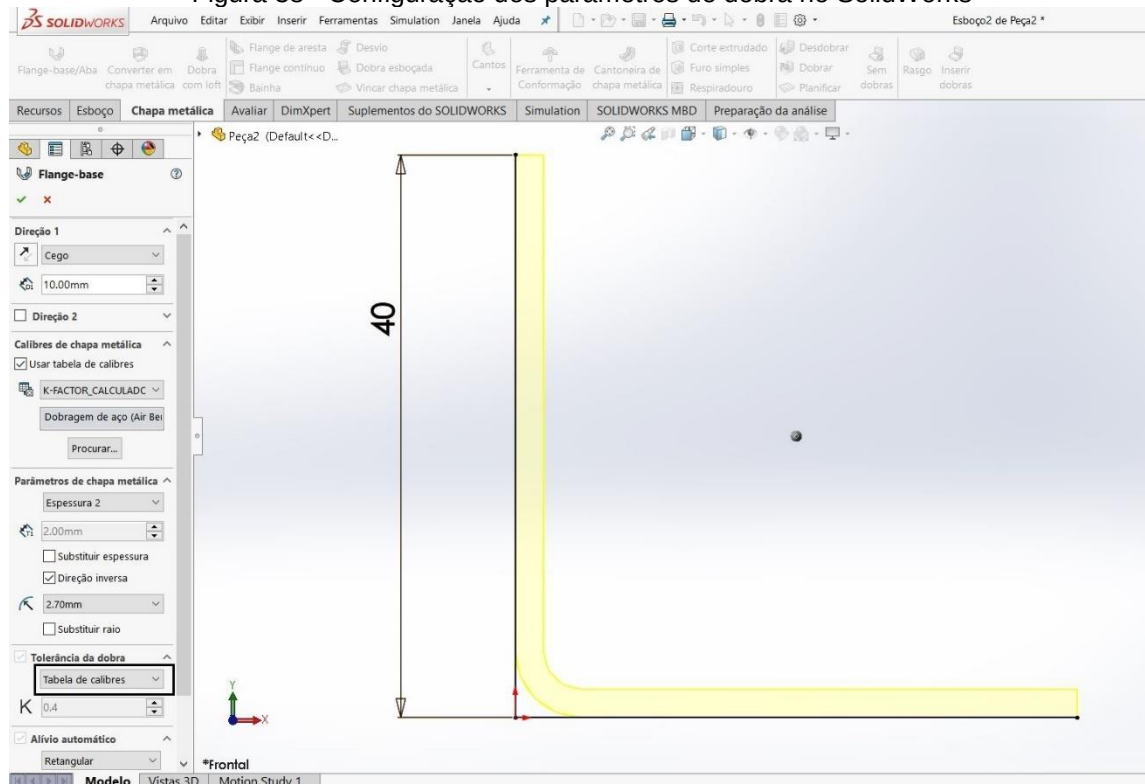
Figura 37 - Escolha da planilha de tabela de calibres no SolidWorks



Fonte: SolidWorks®

A Figura 38 ilustra a tela do SolidWorks, já com a definição desses parâmetros.

Figura 38 - Configuração dos parâmetros de dobra no SolidWorks



Fonte: SolidWorks®

Observa-se que para a espessura de 2 mm, já assume o raio de dobra configurado. Nota-se também, na parte de tolerância de dobra, que o valor do fator K está suprimido, e o que está selecionado para uso é a tabela de calibres, com os valores que foram adicionados.

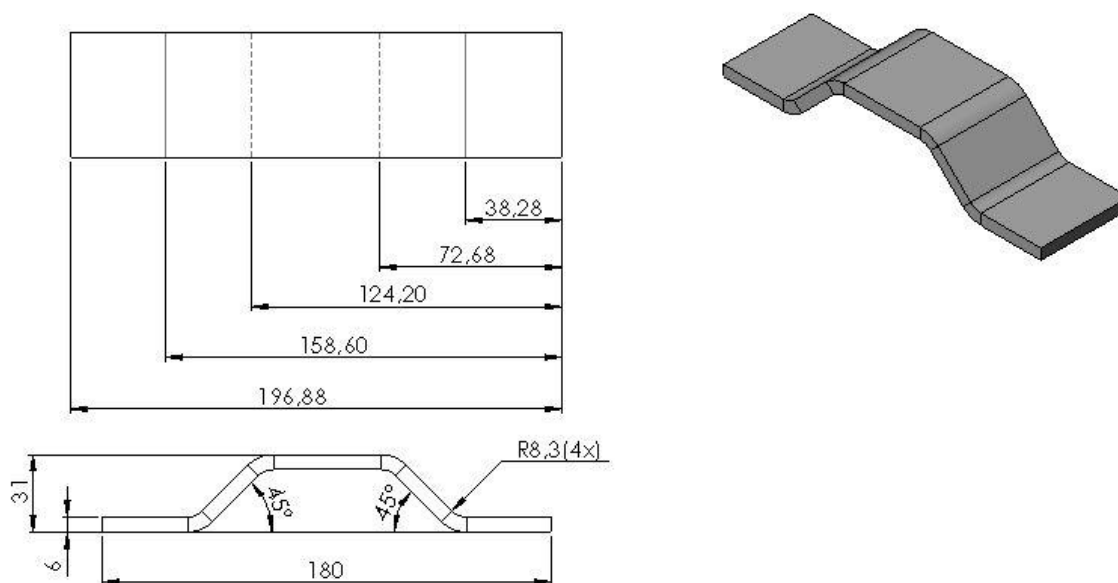
3.9 EXPERIMENTO COM ÂNGULO DE DOBRA DE 45°

Conforme visto no tópico 3.6, a planilha de implantação no sistema CAD 3D SolidWorks® também permite que seja utilizado valores de fator K para ângulos diferentes de 90°. Todavia, antes de proceder aos experimentos com outros valores de ângulo de dobra, importante ponderar sobre a efetividade desses experimentos.

Para cada configuração de ângulo, precisa ser preparado pelo menos dois corpos de prova. Assim, quanto mais ângulos sejam necessários os experimentos e o tipo de material, o custo pode tornar-se muito elevado. Por isso aconselha-se que sejam realizados apenas com os ângulos mais usados pela empresa, e que seja feito um corpo de prova que satisfaça o estudo da dobra. Dessa forma, evita-se preparar um corpo de prova com dimensões desnecessárias, e elimina-se o custo associado.

Tendo em vista esses aspectos, e visando medir a variação do dimensional da peça, foi preparado mais um corpo de prova, o qual foi planificado usando o fator K para o ângulo de dobra 90°. A Figura 39 ilustra o corpo de prova com duas dobras em ângulo de 45°.

Figura 39 - Modelo CAD 3D do corpo de prova a 45°



Fonte: Elaboração própria.

Com o corpo de prova definido, foi realizado o processo de fabricação do mesmo. A Figura 40 ilustra a peça fabricada.

Figura 40 - Corpo de prova dobrado a 45°



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 13 contém os valores medidos do corpo de prova, antes e depois da dobra.

Tabela 13 - Coleta de dados para o corpo de prova a 45°

Espessura Chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Planificado (Lt)	Peça cortada (Lc)	Altura medido	Comprimento medido
6mm	50	8,3mm	196,88mm	196,70mm	31,12mm	180,16mm

Fonte: Elaboração própria.

Como verificado na Tabela 13, as variações das dobras ficaram dentro do intervalo de $\pm 0,20\text{mm}$.

Assim, é possível concluir pelo experimento, que se a peça a ser dobrada tiver uma tolerância igual ou maior que $0,20\text{ mm}$, os mesmos valores de fator K para 90° , também podem ser usados para o ângulo de 45° . O que implica diretamente em redução da quantidade de experimentos e custos com a fabricação de corpos de prova.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do estudo foram explicados todos os parâmetros envolvidos para a determinação do fator K. Além de apresentar, demonstrar e validar a metodologia de obtenção do fator K na prática. Foi demonstrado de forma detalhada os cálculos e a implantação no sistema CAD 3D dos valores de fator K calculado, obtidos na prática.

O uso da metodologia para a obtenção do fator K, destaca-se em torno da tomada de decisão, se os mesmos atendem ou não a tolerância de fabricação especificada. O objetivo é obter um valor de fator K, que permita a peça ser fabricada de forma seriada dentro de uma margem de tolerância especificada, e adequada tecnicamente ao produto/peça.

É importante compreender que o ajuste do fator K calculado está diretamente ligado com os processos envolvidos para a fabricação, como pode-se concluir a partir dos valores apresentados pelas Tabelas 5 e 12, as quais foram agrupadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Variação das abas para o fator K = 0,5 e fator K calculado

Espessura chapa (e)	Abertura V	Raio de dobra (Ri)	Abas (Fator K = 0,5)	Abas (Fator K calculado)
2mm	16	2,7mm	40,54mm	39,90mm
3mm	22	3,7mm	40,29mm	39,96mm
4mm	35	5,8mm	40,45mm	40,14mm
5mm	35	5,8mm	40,31mm	40,03mm
5mm	50	8,3mm	40,29mm	40,18mm
6mm	50	8,3mm	40,43mm	40,04mm

Fonte: Elaboração própria.

Os valores de fator K calculado, conforme descritos nesse estudo, foram para ângulos de dobra de 90°. Mas também, como verificado no tópico 3.9, foi realizado um experimento para um corpo de prova com ângulo de dobra de 45°. Desse experimento, foi possível concluir que os valores de fator K para um ângulo de 90°, também podem ser usados para ângulos de dobra de 45°, respeitando a margem de tolerância.

É importante destacar que uma vez configurado o sistema CAD 3D com o fator K calculado; os valores de espessura da chapa, o raio de dobra e o fator K são inseridos de forma automática durante o processo de projeto e/ou modelagem da

peça. A vantagem disso é que diminui a chance de erros de digitação, além de que a informação dimensional do ferramental também é durante essas fases.

Destaca-se também o fato que essa metodologia de determinação do fator K, desenvolvida e validada nesse trabalho de conclusão de curso, também vem sendo aplicada e validada na rotina de projetos e fabricação de peças em chapa metálica da linha de produtos da empresa onde foram realizados os experimentos.

É sugerido para estudos futuros, a realização de experimentos com peças de ângulos diferentes do intervalo que foi abordado no estudo. Além de realizar o teste em materiais diferentes para entendimento da influência para o fator K. Outra sugestão é a de verificar a possibilidade de realizar programação da metodologia, integrando-a ao sistema CAD 3D utilizado. Dessa forma, o usuário apenas informaria qual as dimensões da peça em chapa metálica no modelo CAD 3D, e o sistema calcularia todos os parâmetros e iterações necessários à determinação do fator K calculado a partir dos dados da prática.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, Geraldo Magela. **Processo de dobramento de chapas metálicas**. Exacta, São Paulo, No. 7, 1, p. 109-120, 2009.
- BRAZ, Edson Márcio Cadete. **Análise de quinadora e estudo da recuperação elástica das chapas quinadas em V no ar**. 2010. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade de Aveiro, Aveiro.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de matérias uma introdução**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 845 p..
- COELHO, Daniel Alves. **Ensino rápido de células de quinar ADIRA**. 2011. 110p.. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Doblado en frío de productos planos de acero: DIN6935**. 2007. 13 p..
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Manufacturing processes forming by bending – Classification, subdivision, terms and definitions: DIN8586**. 2003. 11 p..
- FREES, Monique Valentin da Silva. **Avaliações sobre o processo de dobramento do aço NBR 6656 LNE 380**. 2017. 100p. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Minas) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.
- GASPAR, João Carlos Santos. **Optimização estrutural aplicada à melhoria da precisão de quinagem**. 2012. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- GAUSMANN, Francis. **A influência da fibra neutra no desenvolvimento do planificado**. 2017. 60p. Monografia (Pós-graduação Lato Sensu em Engenharia Industrial) Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.
- GONÇALVES, Alexandre. **SKA, referente as tabelas de sheet metal**. Disponível em: <<http://www.ska.com.br>>. Acesso em 07 de abril de 2018.
- LEIVA, Filipe Coelho. **Relatório de dissertação do MIEM**. 2012. 80p.. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- MESQUITA, Eduardo Luiz Alvares; RUGANI, Léo Lucas. **Conformação dos aços inoxidáveis**. 1997. Acesita.

MIRANDA, Sara Esmeralda Silva Correia de. **Análise do processo de quinagem**. 2014. 172p. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **Processos de fabricação. Conformação mecânica II - Extrusão trefilação e conformação de chapas**. Florianópolis, 2006. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.

NAVETRON. **Âncora bruce aço inox 316 5 Kg nauparts**. Disponível em: <<http://www.navetron.com/br/produtos/exibir.asp?id=1&produto=ancora-bruce-aco-inox-316-5-kg-nauparts>>. Acesso em 22 de junho de 2018.

NEWTON. **Modelo PSH 35030 - 350ton x 3050mm**. Disponível em: <http://www.newton.com.br/pt_BR/produtos/psh-35030-350ton-x-3050mm>. Acesso em 22 de junho de 2018.

PALMEIRA, Alexandre Alvarenga. **Processos de dobramento & calandragem**. Resende, 2005. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

PAVANATI, Henrique Cezar. **Introdução à tecnologia dos materiais**. Florianópolis, 2008. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.

SANTOS, Ricardo Adriano dos. **Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processos de dobramento de aços de alta resistência**. 2013. 115p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Paraná, Paraná.

SOLIDWORKS®. **SOLIDWORKS HELP**. Disponível em: <<http://help.SolidWorks®.com/HelpProducts.aspx>>. Acesso em 22 de junho de 2018.

SCHULER. **Metal Forming Handbook**. Springer-Verlang, Berlin, Heidelberg, 1998.

TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE. **Mecânica processo de fabricação**. São Paulo, 1997, 159 p..

ZHENHUAN. **SERIE WC67Y**. Disponível em: < http://www.rollforming-line.com.br/4punching_1.html >. Acesso em 05 de agosto de 2018.

APÊNDICE A – PLANILHA COMPLETA DO FATOR K

Tipo:	Tabela de Calibres de Aço		
Processo	Dobragem de aço (Air Bending)		
Tipo de dobra:	Fator K		
Unidade:	milímetros		
Material:	Aço inoxidável		
Nº do calibre	Espessura 2		
Espessura:	2		
Ângulo	Raio		
	2,7		
15	0,12		
30	0,12		
45	0,12		
60	0,12		
75	0,12		
90	0,12		
Nº do calibre	Espessura 3		
Espessura:	3		
Ângulo	Raio		
	3,7		
15	0,39		
30	0,39		
45	0,39		
60	0,39		
75	0,39		
90	0,39		
Nº do calibre	Espessura 4		
Espessura:	4		
Ângulo	Raio		
	5,8		
15	0,37		
30	0,37		
45	0,37		
60	0,37		
75	0,37		
90	0,37		

Nº do calibre	Espessura 5		
Espessura:	5		
Ângulo	Raio		
	5,8	8,3	
15	0,38	0,42	
30	0,38	0,42	
45	0,38	0,42	
60	0,38	0,42	
75	0,38	0,42	
90	0,38	0,42	
Nº do calibre	Espessura 6		
Espessura:	6		
Ângulo	Raio		
	8,3		
15	0,40		
30	0,40		
45	0,40		
60	0,40		
75	0,40		
90	0,40		