

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA - CAMPUS PONTA GROSSA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**PIETRO CALDEIRA SETIN
THOMAS SIQUEIRA PEREIRA**

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EQUAÇÃO DE DEDUÇÃO
DE DOBRA PARA PLANIFICAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS:
UMA ABORDAGEM PRÁTICA PARA INDÚSTRIAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2021**

**PIETRO CALDEIRA SETIN
THOMAS SIQUEIRA PEREIRA**

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EQUAÇÃO DE DEDUÇÃO
DE DOBRA PARA PLANIFICAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS:
UMA ABORDAGEM PRÁTICA PARA INDÚSTRIAS**

**Experimental procedure to determine the bend deduction formula used in flat
patterning of sheet metal parts: a practical approach for industries.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Luciano Augusto Lourencato

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



TERMO DE APROVAÇÃO

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EQUAÇÃO DE DEDUÇÃO DE DOBRA PARA PLANIFICAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS: UMA ABORDAGEM PRÁTICA PARA INDÚSTRIAS

por

THOMAS SIQUEIRA PEREIRA E PIETRO CALDEIRA SETIN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 7 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Orientador

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Membro Titular

Prof. Me. Jose Roberto Okida
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

RESUMO

SETIN, Pietro C., SIQUEIRA, Thomas P. Determinação experimental da equação de dedução de dobra para planificação de peças metálicas: uma abordagem prática para indústrias. 2021. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Em um contexto industrial moderno, o processo de conformação mecânica de chapas metálicas assume lugar de importância para as indústrias, uma vez que este representa grande parte dos processos de conformação. A crescente demanda por produtos, aliada a grande competitividade entre empresas faz necessária a otimização dos processos. As indústrias que fabricam peças metálicas, em especial as metalúrgicas, são grandemente beneficiadas por processos cada vez mais rápidos e assertivos. Tendo em vista a criação de novos produtos, as metalúrgicas devem se basear em normas e diretrizes bem estabelecidas. Para as indústrias que estão no ramo de peças metálicas dobradas, um fator de projeto importante diz respeito ao comprimento do planificado. A determinação correta do planificado resulta em processos de produção mais assertivos, e, conseqüentemente, mais lucrativos. Este estudo tem por objetivo determinar experimentalmente uma equação para o cálculo da dedução de dobra no comprimento do planificado metálico. O resultado final é similar ao equacionamento clássico encontrado na literatura, porém traz consigo as particularidades dos processos produtivos da empresa na qual ocorreram os experimentos. O procedimento experimental conta com a fabricação e o posterior ensaio de corpos de prova especiais feitos em aço. A partir dos dados obtidos é proposta uma nova versão do método para a determinação do comprimento do planificado. Esta nova equação conta com suas constantes adaptadas para o contexto do material e maquinário onde se seguiu o experimento, assim, passa a fornecer resultados mais confiáveis e específicos deste processo produtivo, e apresenta conseqüente diminuição de erros e sobras se comparada ao método conhecido da literatura.

Palavras-chave: Comprimento do planificado. Parâmetros de projeto. Conformação de chapas. Perfis metálicos. Experimentos ágeis.

ABSTRACT

SETIN, Pietro C., SIQUEIRA, Thomas P. Experimental procedure to determine the bend deduction formula used in flat patterning of sheet metal parts: a practical approach for industries. 2021. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

In a modern industrial context, the process of mechanical conformation of sheet metal takes a major role for industries, since it represents a great part of the conformation processes. The growing demand for products, coupled with the high competitiveness between companies makes it necessary to optimize processes. Industries that manufacture metal parts, especially metallurgical parts, are greatly benefited by increasingly rapid and assertive processes. Being driven by the need of new products, metallurgists should rely on well-established rules and guidelines. For industries that are in the field of folded metal parts, one of the most important project parameters is the length of the developed flat, also known as flat pattern. Properly calculated flats result in more assertive, and therefore more profitable, production processes. This study aims to experimentally determine an equation for calculating the bend deduction value in the flat pattern length. The final result is similar to the classic equation found in the literature, but it brings with it the particularities of the production processes of the company in which the experiments took place. The experimental procedure includes the manufacture and subsequent testing of special specimens made of steel. Based on the results obtained, a new method is proposed to determine the flat pattern length. This new equation has its constants adapted to the context of the material and machinery where the experiment took place, thus, it provides more reliable and specific results to the production process, and has a consequent decrease in errors if compared to the method known in the literature.

Keywords: Flat pattern. Project parameters. Sheet metal forming. Metallic profiles. Agile procedures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diferentes tipos de processos de conformação.	10
Figura 2 - Perfis de alumínio extrudados.....	11
Figura 3 - Trem contínuo de laminação.....	12
Figura 4 - Chapa em processo de laminação a quente.....	13
Figura 5 - Laminação de lingotes para trilhos ferroviários.....	13
Figura 6 - Peça dobrada.....	15
Figura 7 - Disposição das tensões ao longo da região dobrada	16
Figura 8 - Retorno elástico	17
Figura 9 - Dobramento em "L"	18
Figura 10 - Dobramento em "V"	18
Figura 11 - Tensão deformação para vários aços	20
Figura 12 - Comparação entre direções de laminação.....	21
Figura 13 - Raios de dobra recomendados para diferentes espessuras.	22
Figura 14 - Perfil dobrado em três partes.....	22
Figura 15 - Corpo de prova padrão para o experimento.	25
Figura 16 – Exemplo de configuração utilizada.....	26
Figura 17 - Abertura de canal recomendada.....	27
Figura 18 - Diferentes matrizes utilizadas.	27
Figura 19 - Faca de dobra.....	28
Figura 20 - Dobramento dos corpos de prova.....	29
Figura 21 - Corpos de prova ao final da etapa de dobramento.	29
Figura 22 - Corpos de prova cortados.....	34
Figura 23 - Medição dos corpos de prova cortados.	35
Figura 24 - Comprimento real X nominal.....	36
Figura 25 - Espessura real X nominal.	37
Figura 26 - Corpos de prova dobrados.....	38
Figura 27 - Limites do processo de dobramento.	38
Figura 28 - Utilização de CAD para aferir ângulo interno e raio de dobra.	39
Figura 29 - Raio de dobra ovalizado.	40
Figura 30 - Resumo dos dados experimentais.....	41
Figura 31 - Resultados de BD em função de α , para as diferentes espessuras.....	42
Figura 32 - Alteração da equação 3 b para cálculo de BD otimizado.....	45
Figura 33 - Resultados de BD em função de α , para as diferentes espessuras (otimizado).....	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. OBJETIVO GERAL.....	8
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1. INDÚSTRIA METALMECÂNICA	9
2.2. PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO	9
2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO.....	9
2.2.2. EXTRUSÃO.....	11
2.2.3. LAMINAÇÃO	12
2.2.4. ESTAMPAGEM	14
2.2.5. DOBRAMENTO	14
2.2.6. PRINCIPAIS METAIS UTILIZADOS NA CONFORMAÇÃO.....	19
2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	19
2.4. COMPRIMENTO DO PLANIFICADO	20
3. METODOLOGIA.....	24
3.1. CORTE DOS CORPOS DE PROVA	24
3.2. MEDIÇÃO DAS PEÇAS CORTADAS	25
3.3. PROCESSO DE DOBRAMENTO	26
3.4. MEDIÇÃO DAS PEÇAS DOBRADAS	30
3.5. APURAÇÃO DOS DADOS E COMPARAÇÃO COM A TEORIA	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	34
4.2. DOBRAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS	37
4.3. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS INICIAIS	42
4.4. APLICAÇÃO DO METODO PROPOSTO.....	44
5. CONCLUSÃO	48

1. INTRODUÇÃO

Devido a crescente concorrência econômica, empresas de todos os setores produtivos, em especial da indústria metalmeccânica, tem sentido a necessidade de desenvolver processos cada vez mais enxutos, previsíveis e assertivos.

A busca constante pela melhoria destes é a chave para o sucesso e longevidade das empresas. A evolução da técnica permite que processos, antes realizados de forma ineficiente, sejam aprimorados e apresentem resultados positivos.

Outro fator importante para o aumento da produtividade (e subsequente competitividade) é a adequação dos processos internos, de forma que estes estejam alinhados com a realidade da empresa.

Saber adequar os conhecimentos teóricos clássicos (muitas vezes criados em cenários idealizados e simplistas) a realidade do dia-a-dia pode representar uma grande oportunidade para as empresas.

A conformação de chapas metálicas é um processo amplamente utilizado na indústria metalmeccânica, isso porque este apresenta grande volume de produção com baixo custo relativo, caracterizando-se uma atividade de ótimo custo benefício.

Dentre as possibilidades de conformação de chapas metálicas destacam-se os processos de dobramento.

O dobramento pode ser realizado de inúmeras formas, através da variação de máquinas, ferramentas e métodos, o que lhe confere grande versatilidade na produção tanto de peças simples quanto daquelas com geometria mais complexa.

A produção objetiva de qualquer produto requer, de antemão, um projeto bem executado.

Este, por sua vez, permite grande previsibilidade das variáveis envolvidas no processo de fabricação, desde a determinação assertiva da quantidade de matéria prima necessária até a antecipação de não conformidades devido à má configuração das variáveis do processo.

A quantidade de matéria prima necessária para se fabricar uma peça metálica dobrada pode ser determinada a partir do comprimento do planificado, também conhecido como "blank".

Assim, torna-se cada vez mais atraente o desenvolvimento de novas técnicas para se calcular este comprimento da forma mais precisa possível.

Atualmente existem inúmeros métodos para se determinar o comprimento do planificado metálico, porém a grande maioria deles são formulados a partir de generalidades e simplificações teóricas.

Estas hipóteses simplificadoras, utilizadas na criação das teorias clássicas de determinação do comprimento do planificado, acabam por distanciar os resultados obtidos destas formulações das necessidades das empresas.

O motivo desta diferença entre resultados se origina na lacuna que existe entre teoria e prática.

Diferentes empresas engenam seus produtos com diferentes abordagens, compram matéria prima de diferentes fornecedores, e realizam a fabricação de seus produtos de diferentes maneiras.

Devido a isto convém que haja, também, diferentes maneiras para se determinar certas variáveis dos projetos, como, por exemplo, o comprimento do planificado metálico.

1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como principal objetivo encontrar, experimentalmente, uma variação da equação para o valor de desconto de dobra (*bend deduction*) encontrada na literatura, utilizada na determinação do comprimento do planificado metálico, para o processo de dobramento de uma determinada empresa do ramo metalúrgico.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Otimizar a equação para comprimento do planificado, para que apresente resultados mais realistas e alinhados ao contexto da indústria, de forma a levar em consideração suas particularidades produtivas.

Estabelecer uma metodologia de fácil entendimento e alta replicabilidade, de modo que possa ser personalizada a diferentes tipos de aço, diferentes maquinários e diferentes ambientes de trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. INDÚSTRIA METALMECÂNICA

A gigantesca oferta de metal disponível em 2015, cerca de 1600 milhões de toneladas de aço bruto. SCHULER (1998) mostra a necessidade do processamento rápido e eficiente de matéria prima que existe no atual sistema produtivo.

A busca pela eficiência máxima no processo industrial traz consigo uma demanda crescente por métodos produção que se encaixem cada vez mais com a necessidade de cada peça a ser produzida.

A melhoria dos métodos de projeto é atualmente uma parte importante deste processo constante de aumento de desempenho necessário para suprir as necessidades de redução de gastos e uso eficiente de matéria prima.

2.2. PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

Os processos de conformação são uma alternativa viável quando se necessita produzir em grande escala produtos cuja geometria atende aos critérios impostos pelo método.

Conformação Mecânica é o nome genérico dos processos em que se aplica uma força externa sobre a matéria-prima, obrigando-a a tomar a forma desejada por deformação plástica. O volume e a massa do metal se conservam nestes processos (COSTA, 1985).

O estudo dos processos de conformação faz-se muito importante devido ao grande volume de produção associado a estes. BRESCIANI (1997) afirma que quase todos os produtos metálicos produzidos atualmente são submetidos, em um ou mais estágios de seu processamento, a algum tipo de processo de conformação.

2.2.1. Classificação dos Processos de Conformação

Quanto à natureza dos esforços mecânicos predominantes, os processos de conformação podem ser divididos em cinco categorias: processos de compressão direta e indireta, de tração, de flexão (ou dobramento) e de cisalhamento (BRESCIANI, 1997, p. 213).

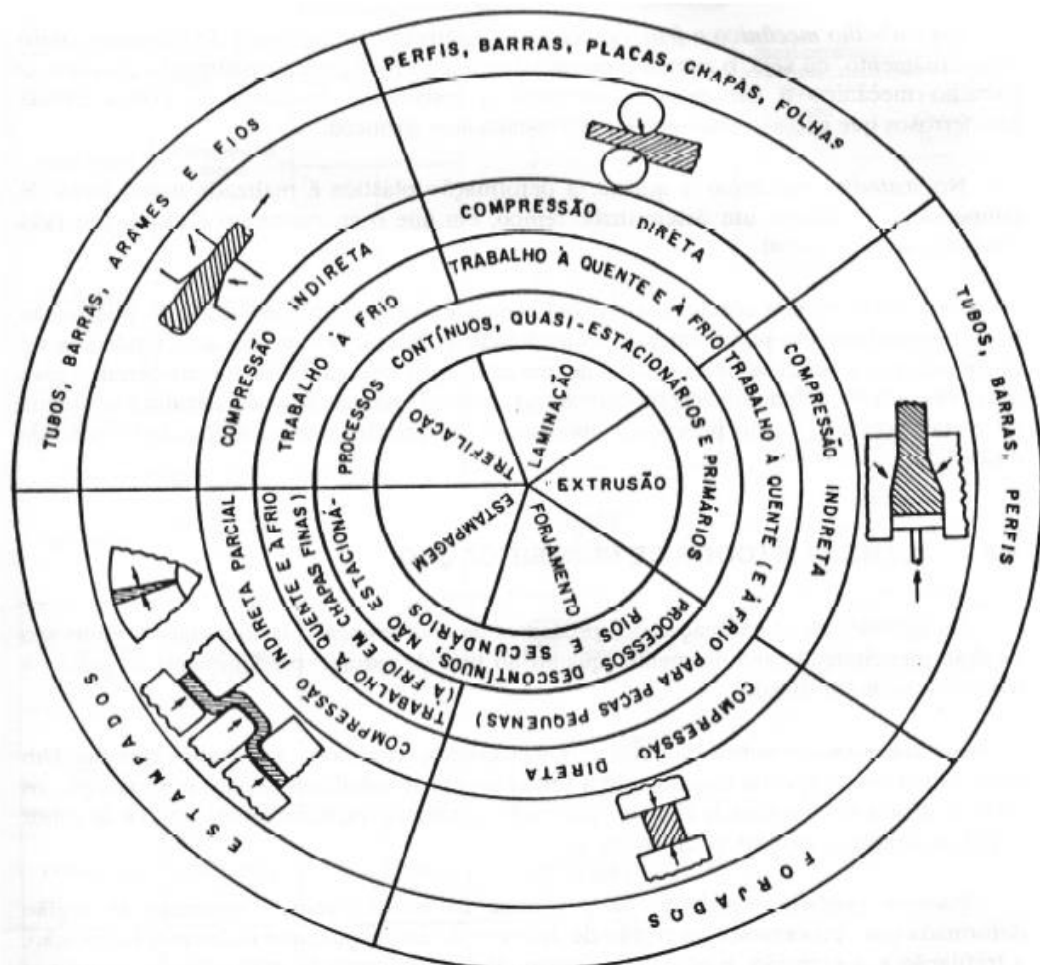
Temos os processos de compressão direta onde o esforço é aplicado em duas faces do material que se move perpendicularmente à direção de aplicação da força, como na laminação.

A compressão indireta acontece quando o esforço de tração ou compressão é aplicado sobre o material, que escoar por uma matriz e sofre deformação em consequência do esforço de compressão que é causado por esta. O escoamento não necessariamente tem a direção relacionada com a direção de aplicação da força.

O esforço de tração ocorre comumente quando a peça é “puxada” por ou sobre uma matriz como em alguns casos de trefilação. A flexão atua principalmente em peças que passam por processo de dobra enquanto o esforço de cisalhamento é o responsável pelo corte de material em ferramentas estilo “guilhotina”.

Observam-se na Figura 1 - Diferentes tipos de processos de conformação. OS diferentes tipos de processos de conformação.

Figura 1 - Diferentes tipos de processos de conformação.



2.2.2. Extrusão

A extrusão é o processo de conformação no qual a matéria prima é “empurrada” contra uma matriz conformadora, com redução da sua seção transversal. A parte ainda não extrudada fica contida num recipiente ou cilindro (container), segundo COSTA (1985).

“Geralmente a extrusão é empregada para obter barras ou tubos, mas também é utilizada na produção de seções de formas complexas, especialmente em materiais de fácil processamento, como o alumínio”. (HELMAN; CELTLIN, p. 144). Veem-se na Figura 2 exemplos de perfis extrudados.

É considerado um processo de compressão indireta, pois apesar de um pistão dar movimento ao sistema, são as paredes do molde que geram os esforços de deformação sobre o tarugo. Dependendo da ductilidade do metal, o que pode dificultar a extrusão, o processo pode ser feito a frio ou a quente.

Figura 2 - Perfis de alumínio extrudados.



Fonte: InfoEscola – A extrusão do alumínio. ¹

¹ Disponível em: < <https://www.infoescola.com/industria/extrusao-de-aluminio/> > Acesso em: 12 mar. 2021.

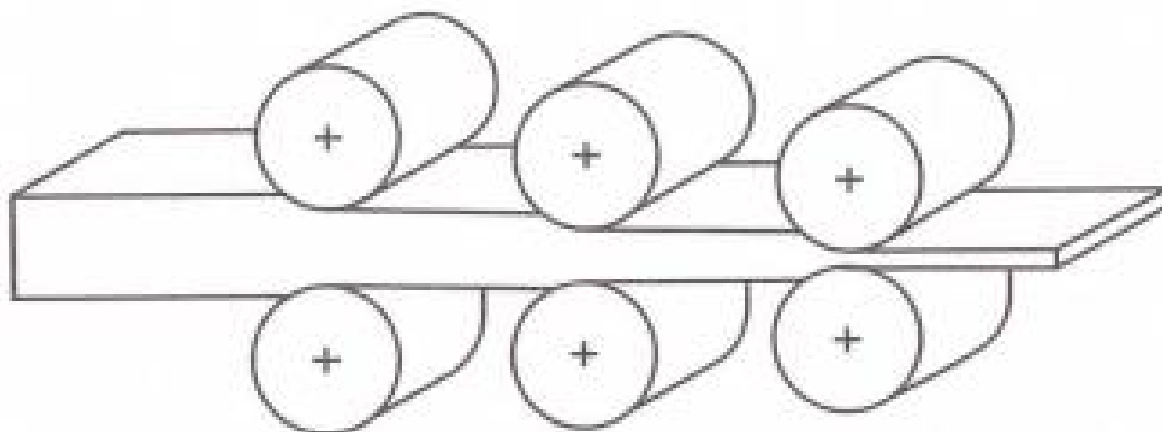
2.2.3. Laminação

A laminação é um processo de conformação, geralmente realizado a quente, que consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários (BRESCIANI, 1997, p. 17).

Esse processo causa a redução da espessura da peça e, conseqüentemente, da área de secção transversal do corpo. Na maioria dos casos o material passa por vários cilindros subsequentes para se conseguir a espessura desejada com a qualidade necessária.

Segundo HELMAN (2015) esses sistemas de cilindros são chamados de “trem contínuo de laminação”. A Figura 3 ilustra de forma simplificada o processo.

Figura 3 - Trem contínuo de laminação.



Fonte: HELMAN (2015) p. 194

Os principais produtos obtidos por laminação são chapas e tiras, classificados como produtos planos. Na Figura 4 se vê uma bobina de aço no início do processo.

Figura 4 - Chapa em processo de laminação a quente.



Fonte: Semimetais Ltda. ²

Além disso, existe também a produção de produtos chamados não planos, como trilhos e barras de maior espessura (Figura 5). No geral, grande parte dos produtos metálicos utilizados hoje é produzida por laminação ou teve passagem por processos de laminação em alguma fase da produção.

Figura 5 - Laminação de lingotes para trilhos ferroviários.



Fonte: Blog da ARCELORMITTAL. ³

² Disponível em: < <http://www.semimetais.com/porta/node/13> > Acesso em: 12 mar. 2021.

³ Disponível em: < <http://blog.arcelormittal.com.br/trilhos-para-trens-de-carga-pesada/> > Acesso em: 12 mar. 2021.

2.2.4. Estampagem

Os processos de estampagem, também conhecidos como processos de conformação de chapas, são, de forma geral, operações de conformação mecânica que conferem a uma chapa à forma de uma matriz, pela aplicação de esforços transmitidos através de um punção.

A conformação das chapas é sempre realizada após alguma operação de corte, visto que para que se realize o processo de estampo é necessário haver um pedaço de chapa já cortado.

Após a operação de estampo a chapa adquire uma nova geometria, e as diferentes regiões da peça ficam submetidas a diferentes tipos de esforços mecânicos. Estes esforços são dos mais variados tipos, podendo ser de tração, compressão, cisalhamento e torção.

Na maioria dos casos, ao final do processo, a peça resultante apresenta uma combinação complexa de tensões residuais internas, o que lhe confere grande aumento de resistência mecânica.

De forma geral os processos de conformação de chapas são realizados em temperatura ambiente, ou seja, a frio, e fazem uso de chapas finas de aço, ligas de alumínio e até ligas de cobre. Estas chapas metálicas geralmente passaram por um processo de laminação anterior.

Os principais métodos de estampagem podem ser vistos na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Eles são, da esquerda para a direita: corte, dobramento, e estampo profundo.

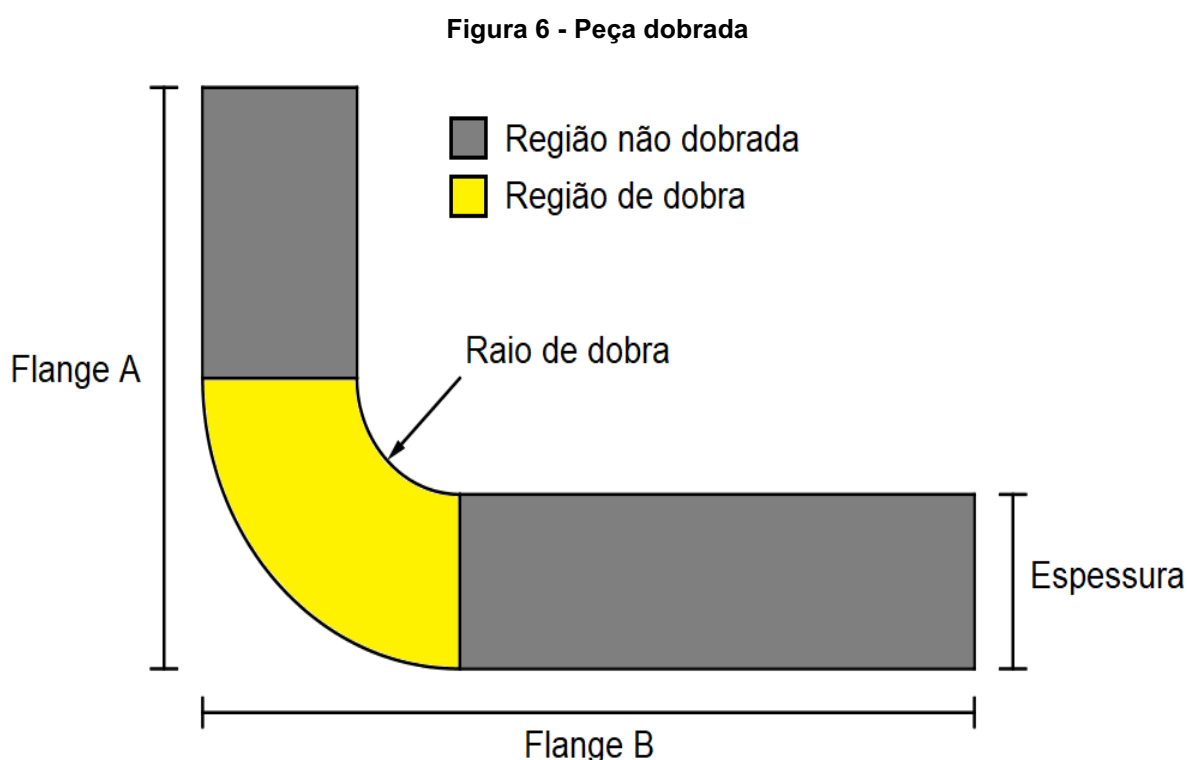
2.2.5. Dobramento

O dobramento, também conhecido como dobragem, é um processo de conformação mecânica no qual uma chapa metálica, que se iniciou no formato de uma tira plana, é submetida a esforços em duas direções opostas para provocar a flexão e a deformação plástica do material.

“A chapa, que inicialmente era formada por uma superfície plana, se transforma em uma peça com duas superfícies concorrentes, que formam entre si um ângulo, e são unidas por uma junção.” (BRESCIANI, 1997)

A chapa inicial, de formato pré-definido, é comumente denominada “esboço inicial” ou “blank”. Após o processo de dobra as superfícies resultantes formam abas, que são conhecidas como flanges. Os flanges são unidos pela junção, que recebe o nome de dobra ou quina e, sempre associados a esta, há um raio de concordância, chamado raio de dobra.

Na Figura 6, se pode notar o esquema de uma peça dobrada, com destaque para a região da dobra, o respectivo raio de dobra, e os flanges, além de estar indicada a espessura da chapa.

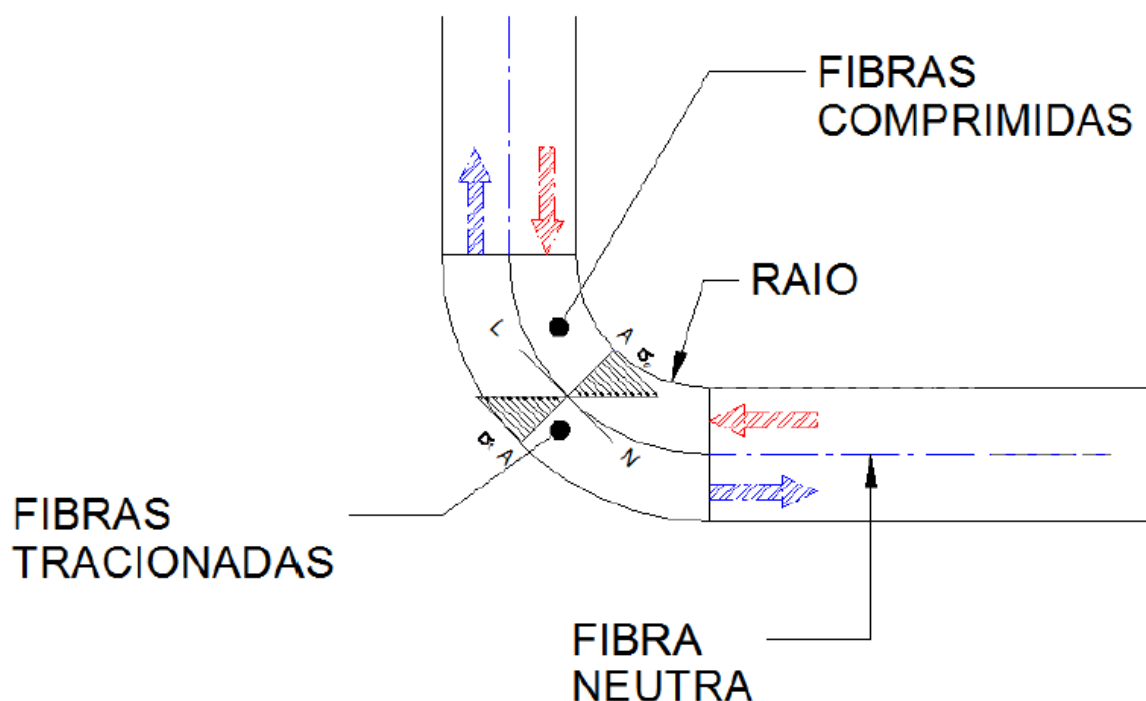


Fonte: Autoria própria.

A região que concentra mais tensões é a região dobrada, nela atuam tensões de compressão na parte interna e de tração na externa. A eventual fratura da peça ocorre na parte externa (devido ao alongamento do material) e o possível enrugamento na parte interna (devido a compressão).

A Figura 7 - Disposição das tensões ao longo da região dobrada. A Figura 7 ilustra a disposição das tensões trativas e compressivas atuantes. A deformação plástica presente na dobra causa redução da espessura da chapa, devido à ação das tensões de tração.

Figura 7 - Disposição das tensões ao longo da região dobrada



Fonte: adaptado de GAUSMANN (2017).

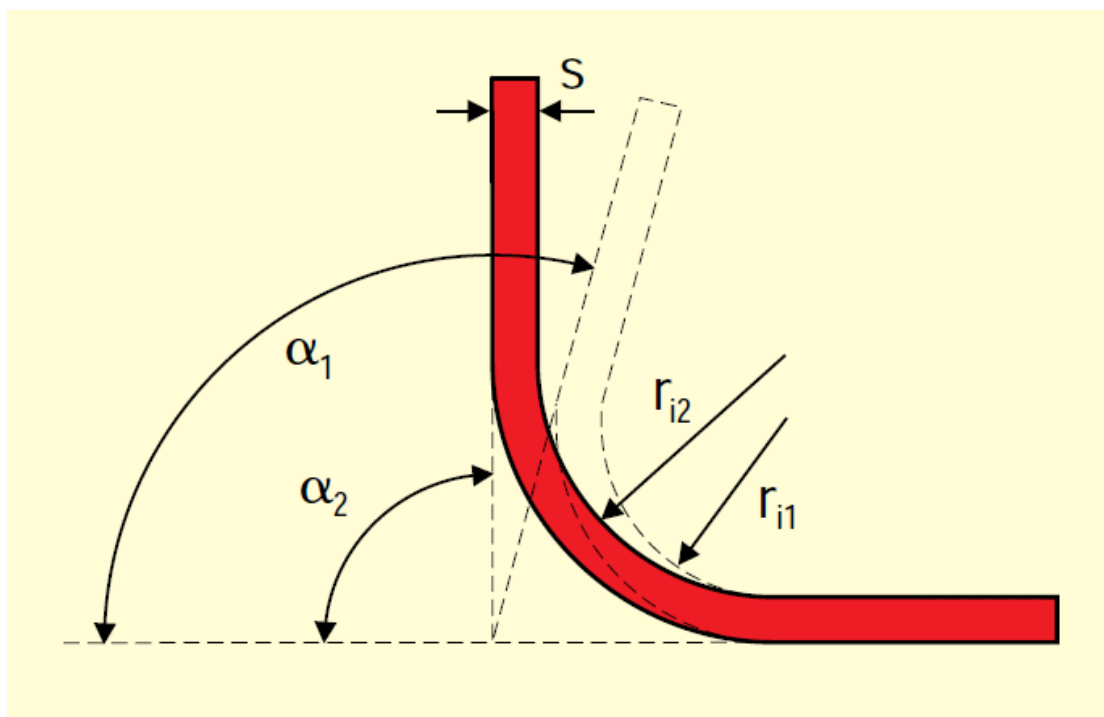
As tensões de compressão, por outro lado, tendem a aumentar a largura da chapa. Tal fenômeno é decorrente do princípio de constância de volume dos corpos conformados.

Como a largura é muito maior que a espessura, o efeito de deformação plástica é desprezível num sentido, concentrando-se quase que somente ao longo da espessura, e causando pequenas distorções na secção transversal da chapa. (BRESCIANI, 1997)

No dobramento sempre deve ser levado em conta o fato que, depois de cessado o esforço do punção sobre o material haverá certo retorno da peça dobrada, ficando a dobra com um ângulo maior que o obtido no momento da pressão da ferramenta. (Figura 8)

Esse retorno é devido à componente elástica do material, pois a deformação plástica permanente é conseguida apenas nas fibras mais externas do material, permanecendo às próximas à linha neutra no estado elástico. O ângulo de retorno depende principalmente do material, de sua espessura e do raio de curvatura.

Figura 8 - Retorno elástico



Fonte: adaptado de SCHULER (1998).

Obtêm-se menores níveis de deformação plástica no dobramento da chapa quando se tem: maior raio de curvatura de dobramento, menor espessura de chapa e menor ângulo de dobramento. (BRESCIANI, 1997)

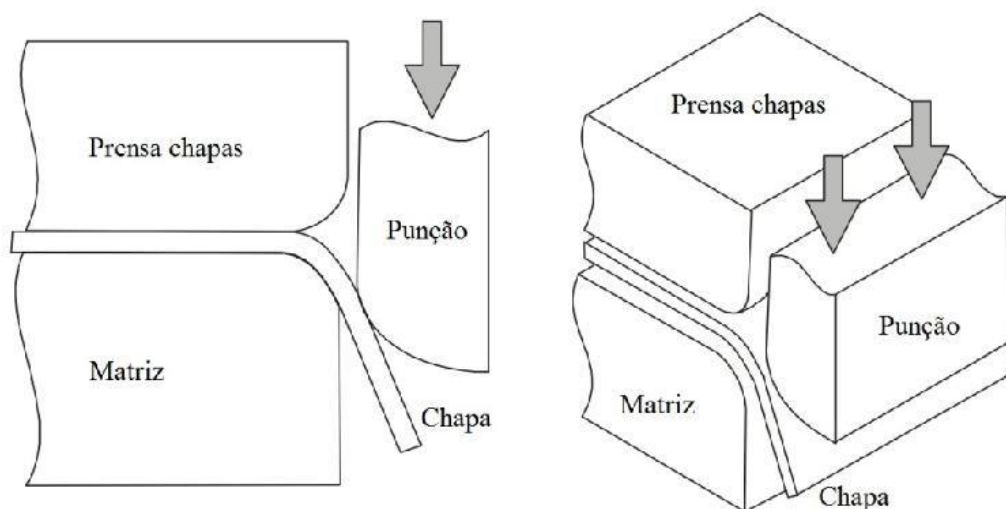
O ângulo de dobramento tem que ser maior na operação de conformação do que o determinado para a peça conformada, em virtude da recuperação da deformação elástica, que é tanto maior quanto maior for o limite de escoamento do material da chapa, quanto menor for o raio de dobramento, quanto maior for o ângulo de dobramento e quanto mais espessa for a chapa.

O método usual de compensar a recuperação elástica, durante as operações de conformação, é a aplicação de uma intensidade de dobramento maior, ou seja, a adoção de um ângulo de dobramento maior.

Uma das grandes vantagens das operações de dobramento diz respeito a grande quantidade de ferramentas e procedimentos disponíveis.

O dobramento em matriz de deslizamento (Figura 9) é conhecido também, como dobramento em “L”. Uma borda da chapa é dobrada a 90° enquanto a outra extremidade é contida pelo próprio material e pela força da prensa chapas. O comprimento do flange pode facilmente ser mudado e o ângulo da curvatura pode ser controlado pela posição do curso do punção. (DOS SANTOS, 2013)

Figura 9 - Dobramento em "L"

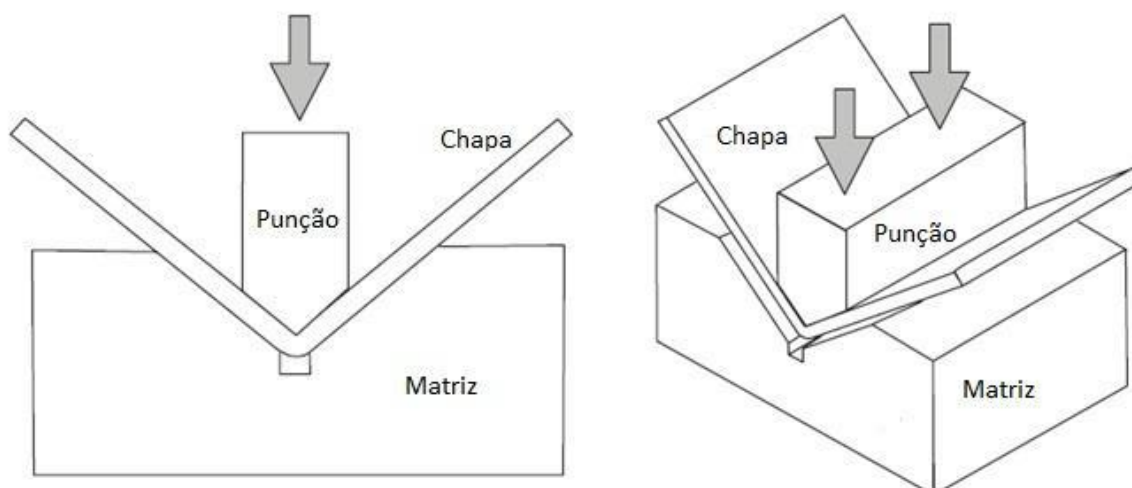


Fonte: DOS SANTOS (2013).

Outro processo de dobramento muito comum é o dobramento em "V", no qual a ferramenta (faca) pressiona a peça (blank) com certa velocidade, por meio do acionamento de uma prensa hidráulica. (Figura 10) A faca exerce sobre a chapa metálica esforços de flexão até que a mesma atinja a geometria da matriz a qual está apoiada (canal).

A operação de dobra em "V" pode ser dividida em dois estágios. O primeiro corresponde ao dobramento de uma viga sobre dois apoios devido à flexão e o segundo corresponde à força de compressão suportada pela matriz e que garante a eficiência da dobra. (DOS SANTOS, 2013)

Figura 10 - Dobramento em "V"



Fonte: DOS SANTOS (2013).

2.2.6. Principais Metais Utilizados na Conformação

Para que um material tenha boa produtividade em um processo de conformação é ideal que ele tenha alta ductilidade para que a deformação exija menos esforço e tenha um resultado com maior qualidade.

Os materiais recomendados também variam entre cada processo, dependendo do tipo de esforço, temperatura de trabalho e quantidade de deformação.

Os principais aços para conformação são os de baixo carbono que apresentam alta quantidade de estrutura ferrítica que apresenta ductilidade muito mais alta que estruturas frágeis como a cementita.

Casos com maior quantidade de elementos de liga podem ser inviáveis economicamente por necessitarem de altas temperaturas e grandes esforços para uma conformação de qualidade.

Ligas de materiais dúcteis como cobre e alumínio além de alguns materiais moles como estanho e chumbo são altamente conformáveis e viáveis na maioria dos processos.

2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

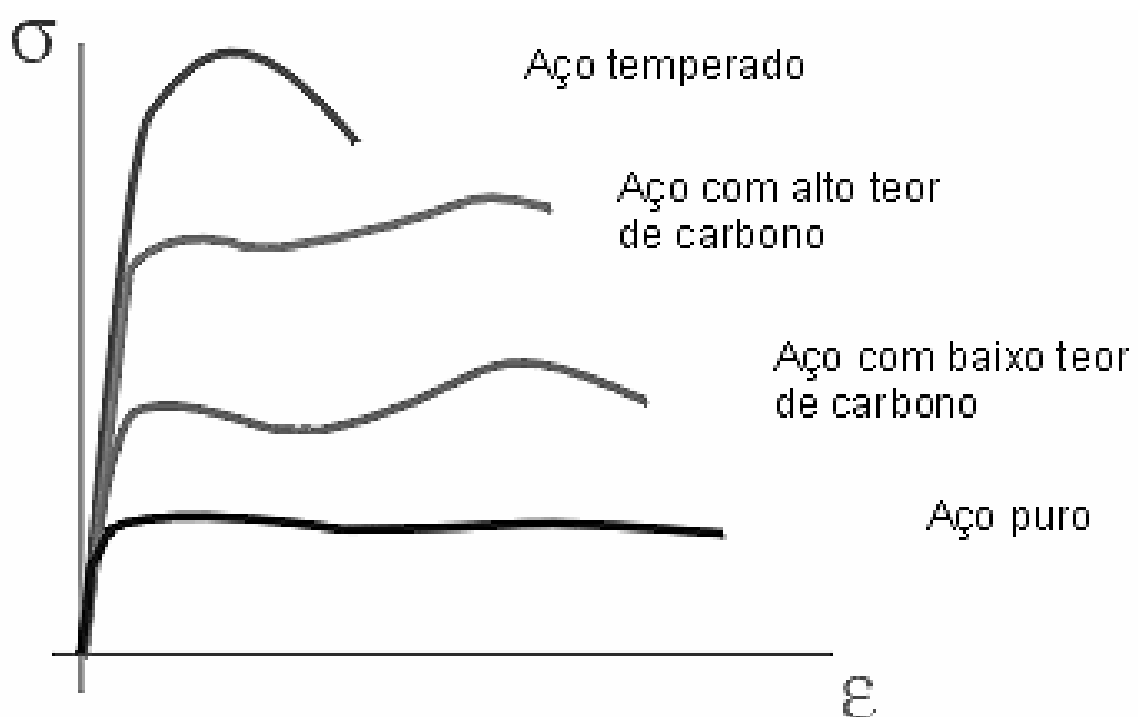
O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência, a dureza, a ductilidade e a rigidez. (CALLISTER, 2013)

Existem muitas propriedades com grande importância na maioria dos processos de fabricação, já que estas podem afetar diretamente as peças obtidas e os métodos de obtenção, além de que se não avaliadas corretamente podem acarretar em comportamentos inesperados e que podem inutilizar os componentes obtidos.

- Fadiga: a fadiga ocorre quando o material falha em esforços menores que os esperados para a sua ruptura, mas estes se caracterizam como cíclicos. É o esforço responsável pela maioria das falhas atuais.
- Ductilidade: a ductilidade representa a flexibilidade do material ou o quanto este pode se deformar antes de sua ruptura.

- Tenacidade: representa a energia necessária para causar a ruptura de um material.
- Elasticidade: representa um grau de deformação ao qual um material pode se submeter reversivelmente, ou seja, de forma não permanente.
- Limite de resistência à tração: resistência à tração é representada pela resistência de um material a uma força que tenta estica-la. O limite de resistência à tração é o ponto onde o material começa a formar um “pescoço” e pode ser visto como o ponto máximo de gráfico tensão deformação de engenharia (Figura 11).

Figura 11 - Tensão deformação para vários aços



Fonte: CALLISTER (2013).

2.4. COMPRIMENTO DO PLANIFICADO

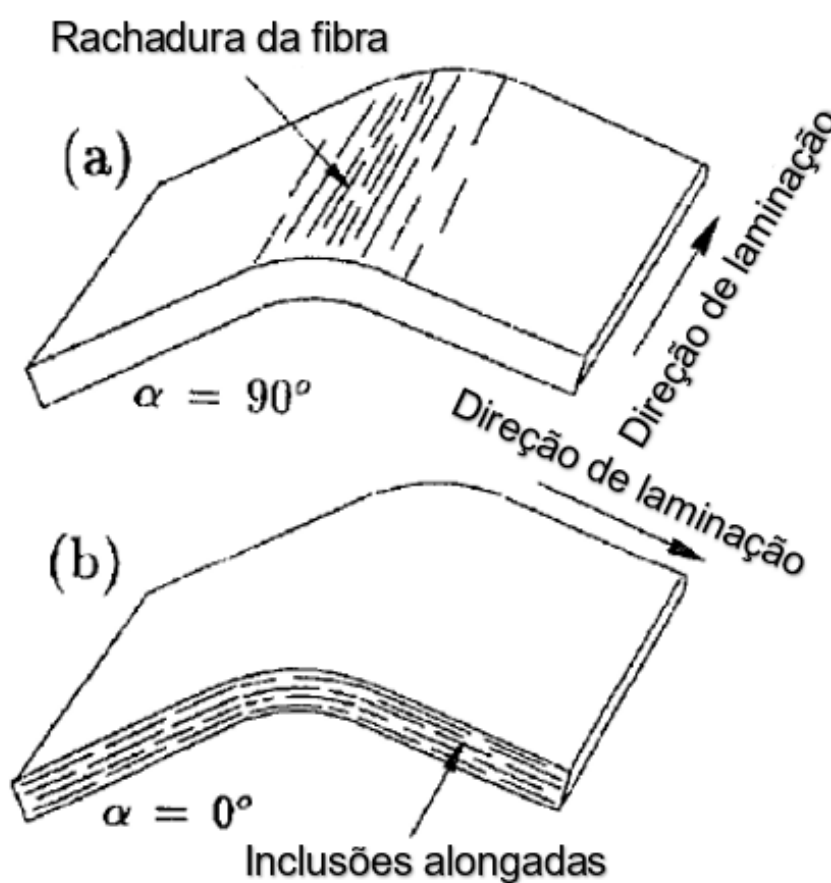
O comprimento do planificado faz menção as dimensões da peça antes do dobramento, já considerando perdas, para que ela atinja a dimensão esperada depois do processo.

Inicialmente, parte-se do pressuposto que as operações de dobramento são sempre realizadas na direção de laminação da chapa, uma vez que esta é a direção de maior resistência mecânica e a que confere maior conformabilidade.

Segundo LEU (1997), a operação de dobra, quando realizada paralelamente a direção de laminação, resulta em rachaduras e na fragilização da peça formada.

Pode-se ver na Figura 12 a comparação entre as direções de dobramento e laminação.

Figura 12 - Comparação entre direções de laminação.



Fonte: adaptado de LEU (1997).

Quanto às variáveis de dobramento, recomenda-se a utilização de raios de dobra que propiciem curvas suaves, de modo a se reduzir a concentração desnecessária de tensões nas quinas das peças dobradas.

Os valores mínimos para os raios de dobra são recomendados de acordo com as espessuras das chapas. Na Figura 13 podem-se notar as recomendações para chapas de até sete milímetros.

Figura 13 - Raios de dobra recomendados para diferentes espessuras.

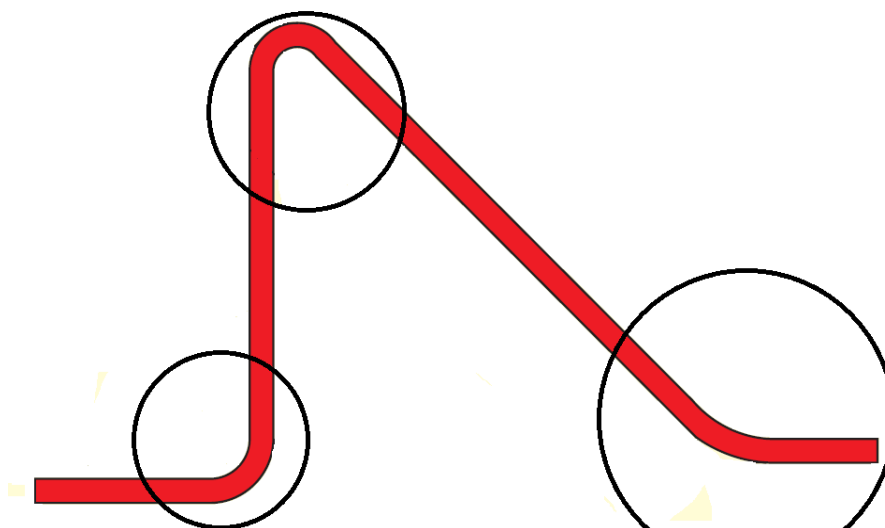
		Menor valor admissível para o raio de dobra, considerando chapas de espessura (em mm):							
Aços com limite de resistência (em MPa):	Sentido de dobra em relação ao sentido de laminação	Até 1,0	>1,0 até 1,5	>1,5 até 2,5	>2,5 até 3,0	>3,0 até 4,0	>4,0 até 5,0	>5,0 até 6,0	>6,0 até 7,0
até 390	transversal	1,0	1,6	2,5	3,0	5,0	6,0	8,0	10,0
	longitudinal	1,0	1,6	2,5	3,0	6,0	8,0	10,0	12,0
entre 390 e 490	transversal	1,2	2,0	3,0	4,0	5,0	8,0	10,0	12,0
	longitudinal	1,2	2,0	3,0	4,0	6,0	10,0	12,0	16,0
entre 490 até 640	transversal	1,6	2,5	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0
	longitudinal	1,6	2,5	4,0	5,0	8,0	10,0	12,0	16,0

Fonte: SCHULER, 1998.

Para determinar o comprimento do planificado, são usados cálculos simples e diretos. A análise é feita dividindo-se a peça em pequenas regiões.

Estas regiões são formadas por uma dobra e pelos dois comprimentos retos adjacentes a ela. Na Figura 14 se pode notar um perfil dobrado em três lugares, que apresenta três dobras e quatro segmentos retos.

Figura 14 - Perfil dobrado em três partes.



Fonte: adaptado de SCHULER (1998).

Para uma determinada região de dobra, cujos comprimentos retos podem ser expressos por valores arbitrários A e B, o comprimento do planificado (L) pode ser dado por:

$$L = A + B + BD \quad (1)$$

Onde o valor de BD é um valor de compensação. Este valor representa a redução de comprimento que deve existir para contabilizar o estiramento do material bem como representar a geometria da curva na região circular da dobra.

Este valor de compensação, também chamado de desconto de dobra, é calculado de acordo com a abertura angular da dobra. A norma alemã DIN 6935 traz três possibilidades para se calcular BD:

- Dobras com ângulos internos de até 90°;
- Dobras com ângulos internos entre 90° e 165°;
- Dobras com ângulos internos entre 165° e 180°.

Para os casos de dobras com ângulos muito abertos (entre 165° e 180°), o valor de BD se torna desprezível, pois a chapa quase não sofreu alteração em seu comprimento inicial.

Dobras cujos ângulos internos são agudos, ou seja, até 90° caracterizam um desconto de dobra que pode ser calculado da seguinte forma:

$$BD = \pi \cdot \left(\frac{180 - \beta}{180} \right) \cdot \left(R_i + \frac{e \cdot k}{2} \right) - 2 \cdot (R_i + e) \quad (2)$$

Onde β é o ângulo de dobra interno medido em graus, R_i é o raio interno, e e é a espessura da chapa, e K é um fator de ajuste referente ao tipo de material.

Para as dobras que apresentam um ângulo entre 90° e 165°, a equação para calcular BD toma a seguinte forma:

$$BD = \pi \cdot \left(\frac{180 - \beta}{180} \right) \cdot \left(R_i + \frac{e \cdot k}{2} \right) - 2 \cdot (R_i + e) \cdot \tan \frac{180 - \beta}{2} \quad (3)$$

O fator K mencionado anteriormente é tomado em função da geometria da peça e das características mecânicas do material. Ele representa a razão entre a distância da face interna da chapa até a linha neutra pela espessura da chapa, e, segundo a norma, pode ser determinado como:

$$K = 0,65 + \frac{1}{2} \text{LOG} \left(\frac{R_i}{e} \right) \quad (4)$$

3. METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida em uma indústria metalúrgica localizada na cidade de Ponta Grossa – PR, com temperatura ambiente. Para a realização do experimento, desde a confecção dos corpos de prova até os cálculos utilizados, encontra-se detalhada nos tópicos a seguir.

3.1. CORTE DOS CORPOS DE PROVA

Para a realização do experimento foram fabricados 72 corpos de prova. Os corpos foram enumerados individualmente e depois divididos igualmente em 8 grupos, sendo cada grupo com uma espessura nominal (“#x,xx”) diferente.

Para este experimento foram utilizadas apenas chapas de #1,20; #1,50; #2,00; #2,65; #3,00; #3,75; #4,75 e #6,35 milímetros de espessura. Vê-se no Quadro 1 a organização das chapas, já separadas por grupo.

Quadro 1 – Grupos de chapas utilizados no experimento.

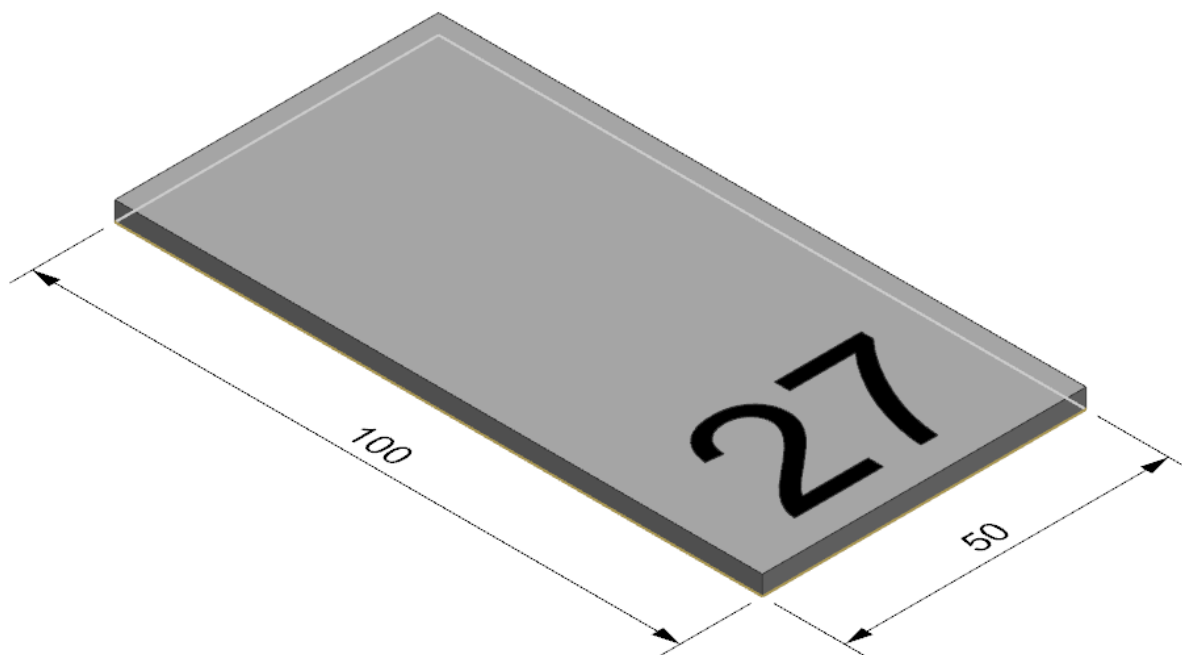
Grupo	Espessura Nominal	Número de Identificação	Quantidade de Exemplares
1	#1,20	1 ao 9	9
2	#1,50	10 ao 18	9
3	#2,00	19 ao 27	9
4	#2,65	28 ao 36	9
5	#3,00	37 ao 45	9
6	#3,75	46 ao 54	9
7	#4,75	55 ao 63	9
8	#6,35	64 ao 72	9

Fonte: autoria própria.

As chapas compostas aço tem formato retangular nas dimensões nominais de 100 por 50 milímetros, conforme ilustrado na Figura 15. Os corpos de prova foram obtidos a partir de chapas de aço maiores, originadas de bobinas laminadas a quente.

Para realizar a operação de corte foi adotado um equipamento de corte a laser.

Figura 15 - Corpo de prova padrão para o experimento.



Fonte: autoria própria.

3.2. MEDIÇÃO DAS PEÇAS CORTADAS

Após a operação de corte foi necessário realizar diversas medições a fim de registrar com exatidão as dimensões iniciais das peças.

Para ajudar na organização dos dados, todos os corpos de prova receberam um número de identificação único, conforme o Quadro 1, e ilustrado na Figura 15.

A etapa de medição foi realizada com auxílio de um paquímetro analógico da marca Mitutoyo com precisão de 0,02 milímetros.

Para registrar o comprimento inicial das chapas foram tomadas 5 medidas ao longo do comprimento, assim estabelecendo uma medida média. A medida da espessura foi realizada da mesma forma, tomando novamente 5 medidas distribuídas arbitrariamente ao longo da peça.

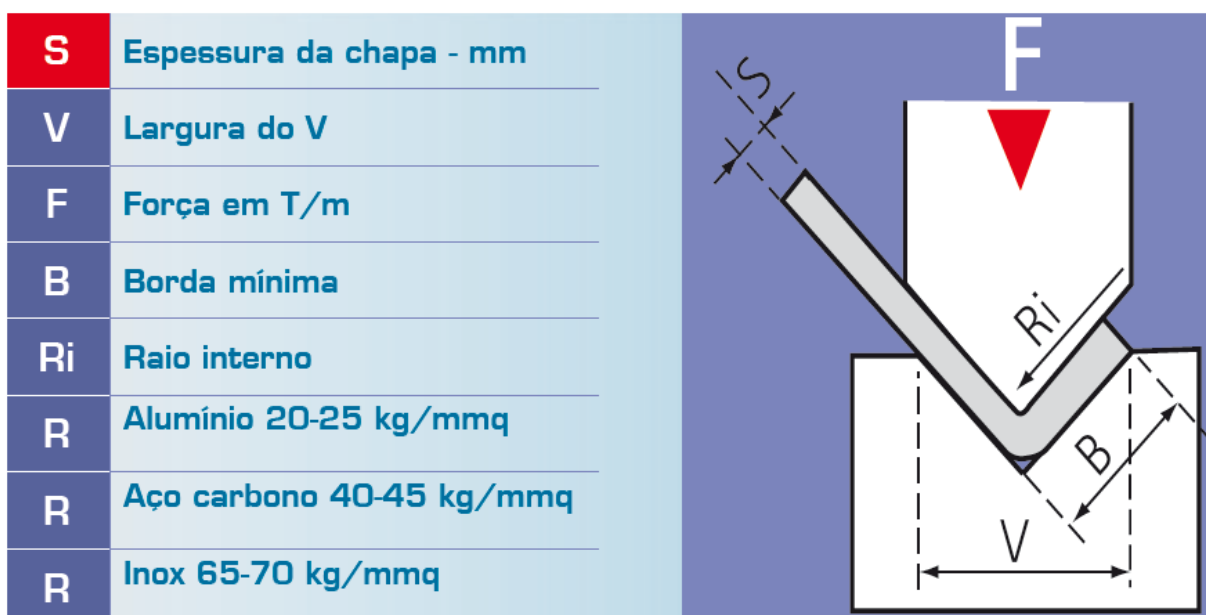
O instrumento foi propriamente calibrado antes de qualquer medição, visando minimizar o erro nos resultados.

Os valores médios do comprimento inicial e da espessura das peças foram tabulados e reservados para as próximas etapas do experimento.

3.3. PROCESSO DE DOBRAMENTO

Todas as peças foram dobradas em uma máquina dobradeira CNC. Além da dobradeira, foi necessário utilizar dois ferramentais característicos do processo: um punção e uma matriz, como exemplificado na Figura 16.

Figura 16 – Exemplo de configuração utilizada.



Fonte: Catálogo de ferramentas Gasparini.⁴

Durante o ensaio foi mantido o punção constante, enquanto a abertura do canal (“largura do V”) da matriz variava de acordo com a espessura dos corpos de prova de modo a evitar dobras muito severas (com raios internos muito pequenos).

De forma geral, quanto mais espessa foi a chapa, maior foi a abertura do canal, para que desta forma diminuam-se as chances do surgimento de fraturas na parte externa da região de dobra.

O próprio fabricante recomenda em seu catálogo valores para V que resultem em dobras de qualidade, como indicado na Figura 17.

⁴ Disponível em:

< <http://site.gasparini.ind.br.plumeria.arvixe.com/Content/pdf/catalogos/ferramentas.pdf> > Acesso em: 12 mar. 2021.

Figura 17 - Abertura de canal recomendada.

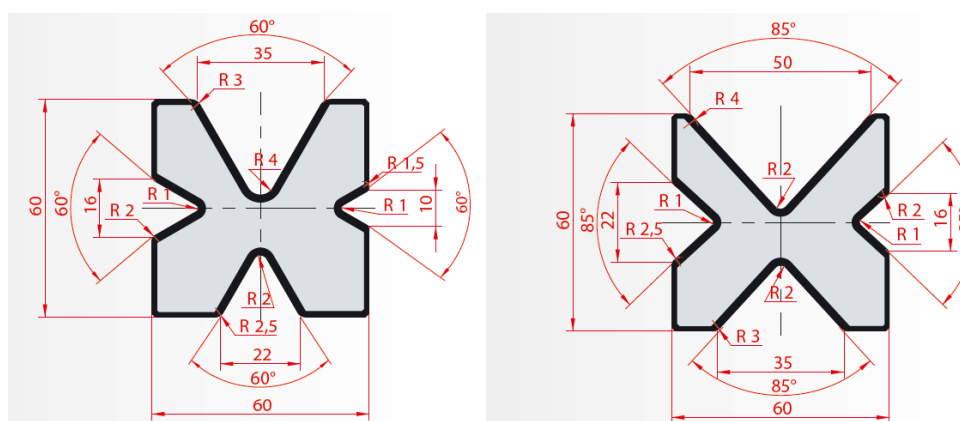
Relação entre espessura da chapa e largura do V					
S	Espessura da chapa em mm	0,5-2,5	3-8	9-10	12 ou mais
V	Largura do V	6 S	8 S	10 S	12 S

Fonte: Catálogo de ferramentas Gasparini.⁵

Além da alteração em “V” foi também alterado o ângulo do canal de dobra, sendo necessários canais mais profundos para se realizar dobras com ângulo interno mais agudo.

A Figura 18 mostra duas ferramentas do experimento. Ambas são chamadas de “matrizes 4V” por apresentarem quatro aberturas diferentes. É possível notar que abertura do canal e ângulo de dobra são variáveis independentes, sendo selecionadas de acordo com a necessidade.

Figura 18 - Diferentes matrizes utilizadas.



Fonte: Catálogo de ferramentas Gasparini.⁵

No experimento realizado foi necessário conciliar a disponibilidade de ferramentas presentes com as indicações dos fabricantes, de modo que os canais utilizados foram matrizes GASPARINI® fabricadas em aço C45 com as seguintes variações:

⁵ Disponível em:

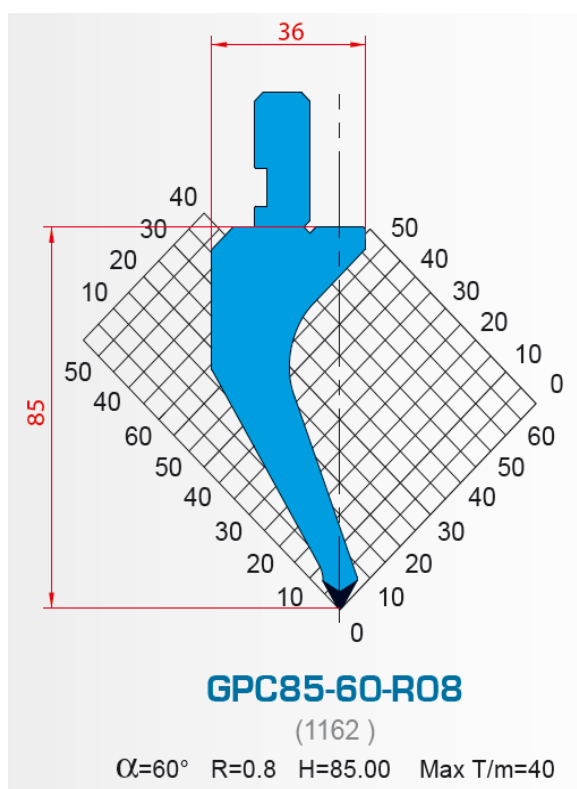
< <http://site.gasparini.ind.br/plumeria.arvixe.com/Content/pdf/catalogos/ferramentas.pdf> > Acesso em: 12 mar. 2021.

- Canais de 16 mm (variando o ângulo) para os grupos #1,20 e #1,50;
- Canais de 23 mm (variando o ângulo) para os grupos #2,00 e #3,00;
- Canais de 35 mm (variando o ângulo) para os grupos #3,75 e #4,75;
- Canais de 50 mm (variando o ângulo) para o grupo #6,35.

Conforme mencionado anteriormente, o punção foi mantido constante, e desta forma, o processo ficou restrito à influência da alteração da matriz. A ferramenta utilizada foi o punção GASPARINI® GPC85-60-R08 fabricado em aço 42CrMo4 com raio de 0,8 e ângulo de 60° como pode ser vista na Figura 19.

Optou-se por uma matriz com ângulo de quina agudo (60°) para não limitar o processo de fechamento progressivo dos ângulos de dobra dos diferentes corpos de prova.

Figura 19 - Faca de dobra.



Fonte: Catálogo de ferramentas Gasparini.⁶

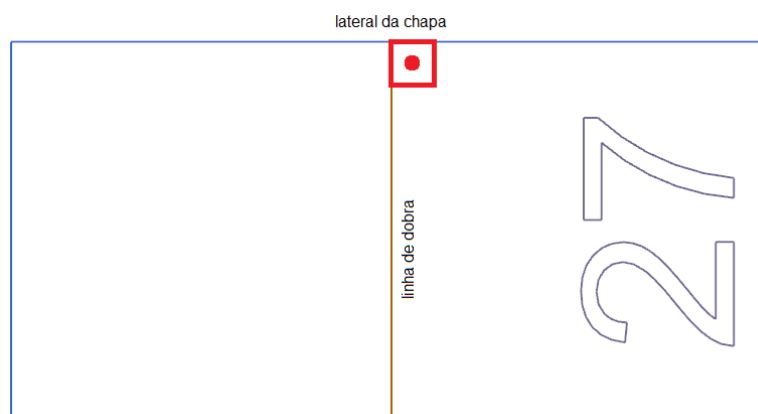
⁶ Disponível em: <

<http://site.gasparini.ind.br/plumeria.arvixe.com/Content/pdf/catalogos/ferramentas.pdf> > Acesso em: 12 mar. 2021.

As peças foram dobradas no sentido de seu comprimento menor (lado de 50 milímetros), de modo a criar perfis “L”. A dobradeira CNC foi programada para realizar dobras que resultem em uma das abas com dimensão de 50 milímetros. A dimensão da outra aba não pode ser definida agora, ela será utilizada posteriormente para determinar a dedução de dobra.

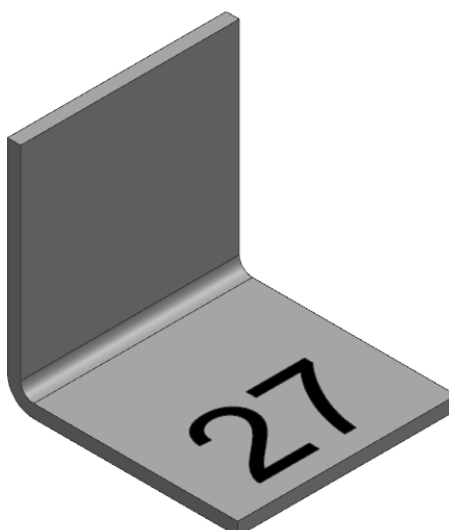
O processo de dobramento foi realizado de modo a garantir a perpendicularidade entre a linha de dobra e as laterais da chapa (como ilustrado na Figura 20). Pois, para a próxima etapa, foi vital que as peças dobradas estivessem propriamente esquadrejadas. Ao final desta etapa, as peças dobradas ficaram com a aparência da ilustração da Figura 21.

Figura 20 - Dobramento dos corpos de prova.



Fonte: autoria própria.

Figura 21 - Corpos de prova ao final da etapa de dobramento.



Fonte: autoria própria.

3.4. MEDIÇÃO DAS PEÇAS DOBRADAS

Terminado o processo de dobramento, as peças foram medidas novamente, desta vez busca-se aferir os comprimentos das abas, o raio de dobra e o ângulo (interno) de dobra.

Com o auxílio do mesmo paquímetro utilizado anteriormente, foram tomadas 5 medidas de comprimento em cada aba de cada peça.

Mais uma vez, para garantir a confiabilidade dos resultados, apenas as médias destas medidas foram tabuladas e levadas adiante no experimento.

Os outros valores que foram avaliados eram: o raio de dobra e o ângulo interno entre as abas.

Para aferir estas medidas de forma, foi necessário realizar um pequeno processo de 6 etapas para cada uma das peças dobradas, este processo consiste em:

- Fotografar a peça dobrada em vista de topo, com auxílio de um suporte para a câmera, a fim de garantir o paralelismo com a superfície da mesa;
- Carregar a foto tirada no software NX versão estudante, para a criação de desenhos sobrepostos à imagem;
- Desenhar linhas e arcos por cima da imagem carregada a fim de copiar o perfil da peça dobrada da melhor forma possível;
- Determinar o ângulo de dobra a partir das linhas desenhadas;
- Determinar a escala do desenho a partir das dimensões conhecidas da peça real, como por exemplo, a espessura da chapa ou o comprimento da aba;
- Determinar o raio de dobra a partir do desenho e da escala determinada.

Para a determinação do raio de dobra foi necessário desenhar círculos concêntricos, sobrepostos às arestas da peça na foto. Um círculo desenhado por dentro e outro por fora da espessura, isto para mitigar os erros de paralaxe.

Os raios das duas circunferências foram medidos com o próprio software e ajustados de acordo com o fator (escala) determinado anteriormente pela espessura.

O valor de raio interno utilizado nas contas foi uma média entre os raios medidos, calculado da seguinte forma:

$$r_{i,real} = \frac{[r_{i,desenho} + (r_{e,desenho} - \#_{desenho})] * escala}{2} \quad (5)$$

Onde os subscritos:

- “i” diz respeito ao raio interno;
- “e” ao raio externo;
- “real” à medida da peça física, e;
- “desenho” as medidas tomadas pelo software, antes de aplicada a escala da foto.

Ao final destas etapas foram tabulados os valores do raio de dobra e do ângulo interno entre as abas. O processo de medição das peças dobradas foi o último procedimento experimental.

3.5. APURAÇÃO DOS DADOS E COMPARAÇÃO COM A TEORIA

Uma vez que todas as medidas foram tomadas e devidamente tabuladas, foi preciso avaliar a qualidade dos dados, excluindo quaisquer anomalias estatísticas (“outliers”).

Ao final do procedimento foram obtidos, de todas as peças dobradas, os valores médios das variáveis de importância, sendo elas:

- Comprimento inicial;
- Espessura;
- Comprimento das abas;
- Raio de dobra;
- Ângulo de dobra.

Utilizando os resultados da que foram obtidos no experimento é possível determinar o valor de Dedução de Dobra (BD) de duas maneiras diferentes:

- I. Através das medidas das abas ($A_{méd}$ e $B_{méd}$) e da medida inicial do corpo de prova ($L_{méd}$), segundo a equação 1, reescrita abaixo:

$$BD = L_{méd} - (A_{méd} + B_{méd}) \quad (1 b)$$

- II. Através das medidas de ângulo interno de dobra (α), espessura da chapa ($\#_{méd}$) e raio interno (r_i), segundo a equação 3, também reescrita abaixo:

$$BD = \left[2 \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) (r_i + 2\#_{méd}) \right] - [\alpha(r_i + 0,44\#_{méd})] \quad (3 b)$$

Pode-se dizer que a primeira equação fornece o valor “real” para a dedução de dobra. Isso porque nela constam as medidas reais da peça, ou seja, aquelas medidas que só podem ser aferidas fisicamente, com a peça em mãos: o comprimento inicial do blank (pré dobramento) e os comprimentos finais das abas (pós dobramento).

Em outras palavras, a equação 1 b só pode ser utilizada para determinar BD depois que a peça tenha sido conformada, o que significa que ela não é útil para prever o comprimento do planejado.

Já a equação 3 b utiliza características “virtuais” da peça para calcular o valor de BD, ou seja, características que podem ser estimadas ou determinadas antes mesmo que haja o processo de dobramento. Isso significa que ela pode ser empregada na determinação do comprimento do planejado durante a etapa de projeto.

Desta maneira, com um simples desenho, ou ainda com uma descrição de como será a peça acabada, é possível calcular o valor de BD e determinar o comprimento do blank inicial de forma extremamente precisa e confiável.

Com os dados em mãos foi possível plotar os resultados e identificar a correlação entre a vida real e a teoria. A partir disso, foi proposto um modelo teórico para determinar o desconto de dobra (bend deduction) ajustado para a realidade da empresa. O Quadro 2 resume todas as etapas do experimento.

Quadro 2 - Organização das etapas de experimentação.

Etapa	Requisitos necessários
Corte dos corpos de prova	<ul style="list-style-type: none"> • Máquina de corte a laser; • Chapas de diferentes espessuras.
Medição das peças cortadas	<ul style="list-style-type: none"> • Paquímetro analógico; • Peças cortadas.
Processo de dobramento	<ul style="list-style-type: none"> • Dobradeira CNC; • Ferramental de dobra; • Peças cortadas.
Medição das peças dobradas	<ul style="list-style-type: none"> • Paquímetro analógico; • Computador; • Peças dobradas. • Máquina fotográfica
Apuração de dados e comparação com a teoria	<ul style="list-style-type: none"> • Computador.

Fonte: Autoria própria.

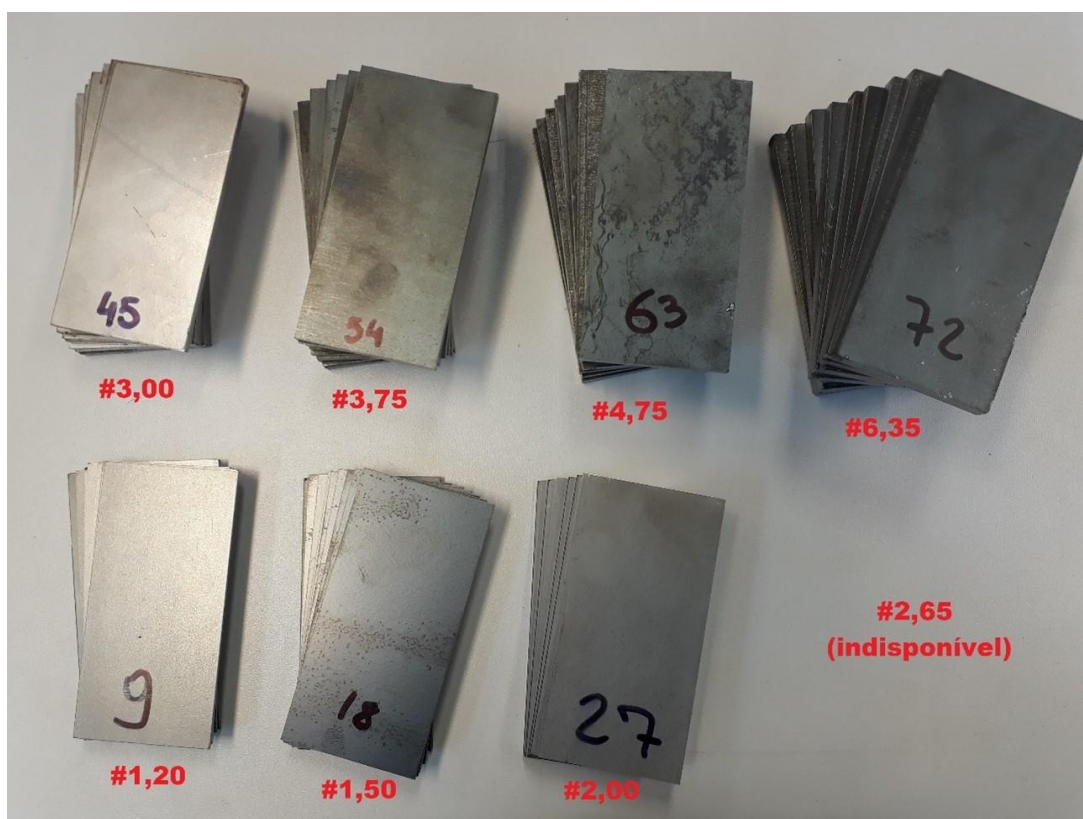
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram fabricados conforme previsto no Quadro 1, com exceção do grupo 4, correspondente a espessura nominal #2,65, devido a indisponibilidade de matéria prima no momento em que se passou a operação de corte.

A Figura 22 mostra os corpos de prova após o corte a laser, sendo que agora eram apenas 63 unidades ao invés dos 72 originais, já identificados e separados por grupo.

Figura 22 - Corpos de prova cortados.



Fonte: autoria própria.

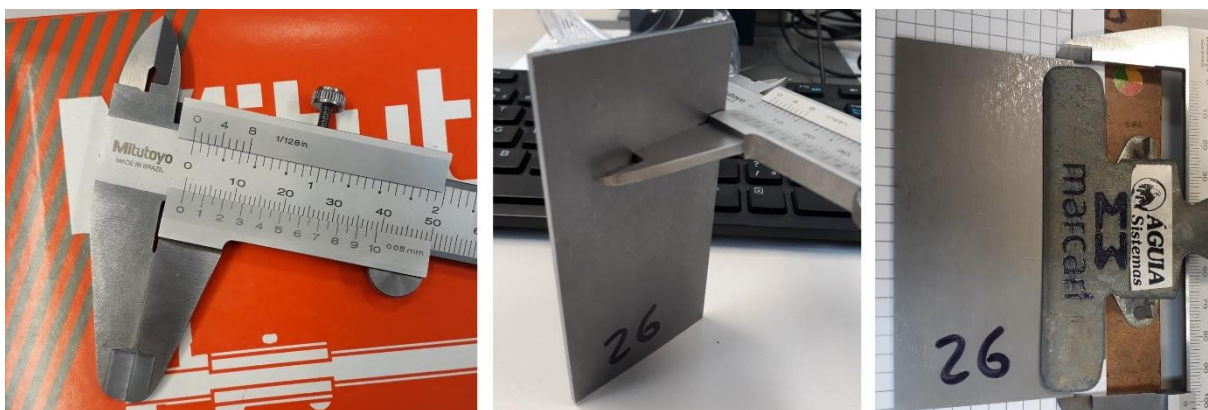
Com todas as peças cortadas foi possível aferir as dimensões iniciais (5 medidas de comprimento e outras 5 medidas de espessura, ambas distribuídas arbitrariamente) dos corpos de prova.

Vale ressaltar que, mesmo a operação de corte a laser sendo extremamente precisa, achou-se prudente, para garantir a confiabilidade dos resultados, realizar as aferições no comprimento.

Já as aferições da espessura foram feitas para descobrir a discrepância entre espessura nominal e espessura real, fator que pode chegar até 20% dependendo do processo de laminação.

A Figura 23 mostra o posicionamento do instrumento ao realizar as aferições, tanto no comprimento quanto na espessura dos corpos de prova.

Figura 23 - Medição dos corpos de prova cortados.

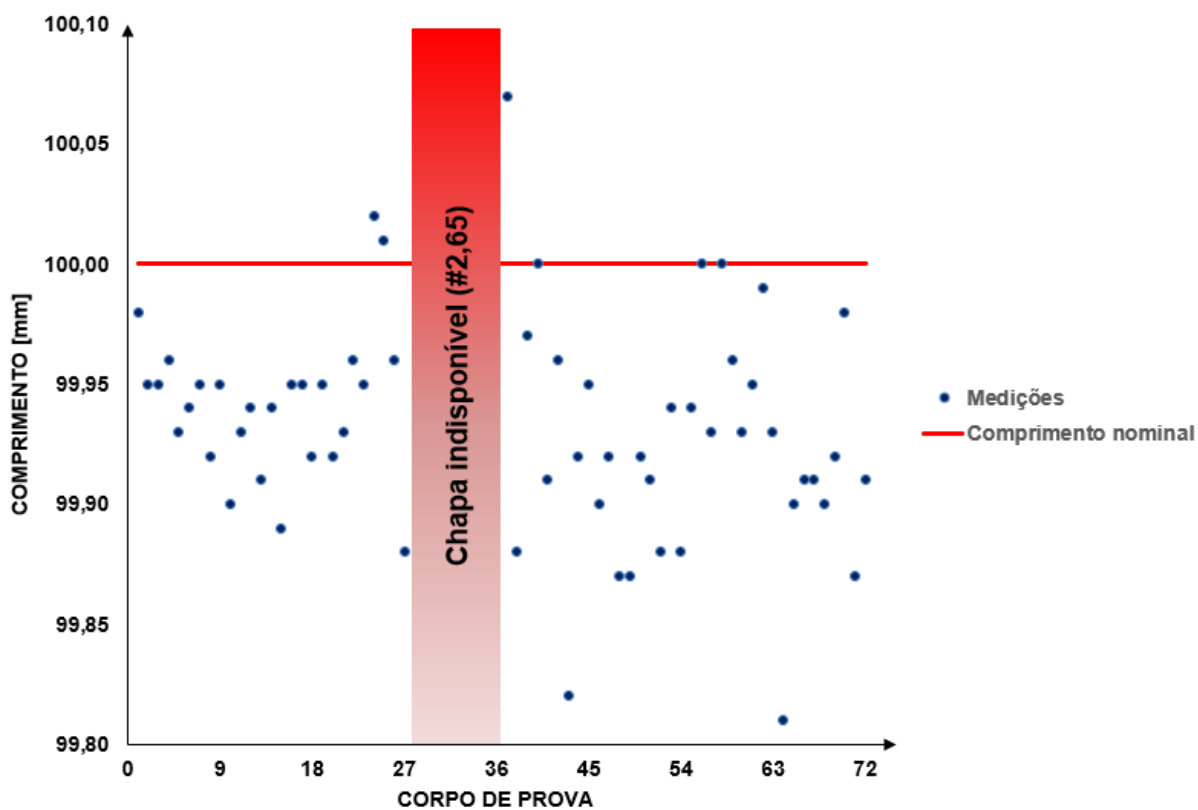


Fonte: autoria própria.

Na Figura 24 encontram-se os resultados das aferições de comprimento de todas as peças cortadas. Nela, é possível observar uma linha, que indica a medida nominal de 100 mm e outros 63 pontos, cada um representando a média das 5 aferições feitas para cada um dos corpos de prova cortados.

Pode-se notar que as peças ficaram, em sua grande maioria, com comprimento menor do que o planejado (100 mm). Isso se deve, provavelmente, a alguma desregulagem da máquina de corte CNC ou ainda a um posicionamento levemente defasado da chapa que entrou na máquina.

Figura 24 - Comprimento real X nominal.

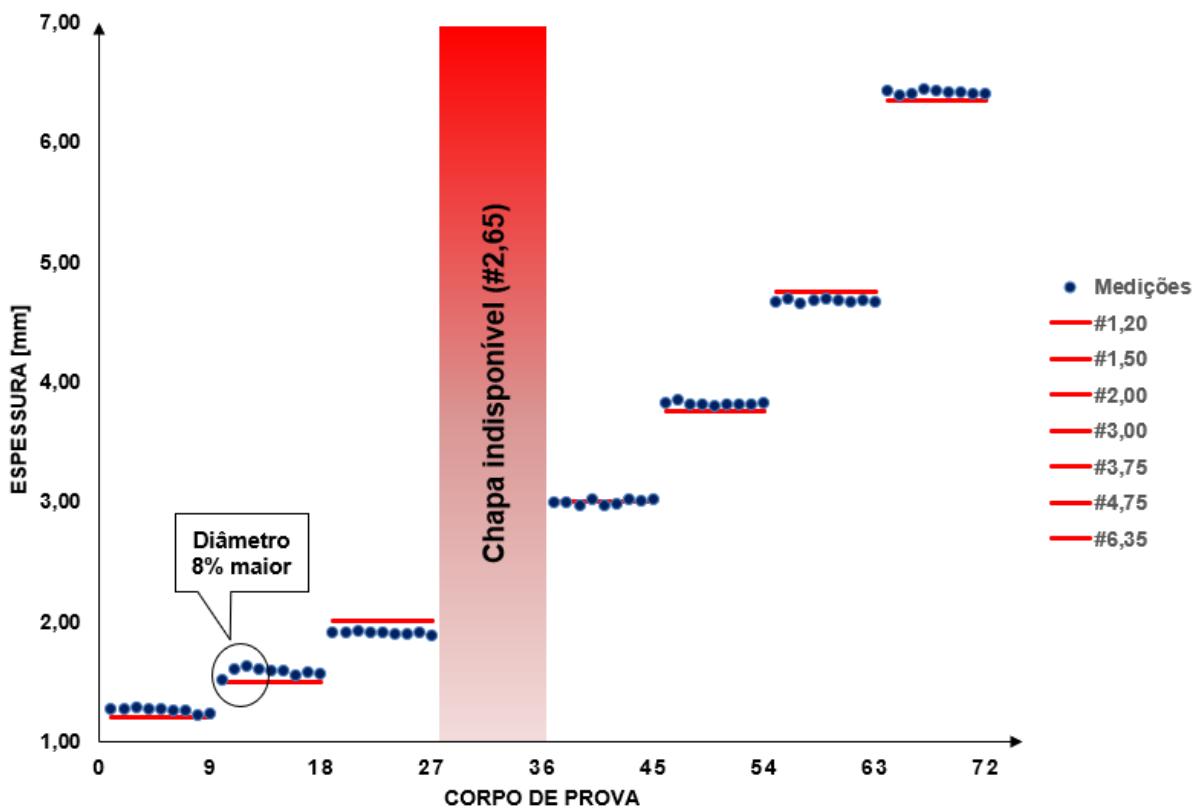


Fonte: autoria própria.

Na Figura 25 veem-se os resultados para as aferições de espessura. De forma análoga a análise feita para o comprimento, pode-se observar no gráfico a discrepância entre as dimensões nominais (linhas) e reais (pontos).

A diferença máxima encontrada: as amostras do grupo #1,50 apresentaram aproximadamente 8% de diferença entre valores nominal e real, como observado.

Figura 25 - Espessura real X nominal.



Fonte: autoria própria.

4.2. DOBRAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Terminadas todas as aferições quanto as dimensões dos corpos de prova, pode-se iniciar as operações de dobramento.

Todos os grupos foram submetidos ao mesmo processo de dobramento, uma espécie de redução progressiva do ângulo interno.

Cada peça do grupo foi dobrada com um ângulo interno diferente, sempre começando em 90° e diminuindo de 5° em 5° a cada nova peça do grupo, até que se atingisse o limite da máquina. As peças dobradas podem ser vistas na Figura 26.

Figura 26 - Corpos de prova dobrados.



Fonte: autoria própria.

Como os corpos de prova tinham diferentes espessuras, apresentaram diferentes resistências ao esforço de dobramento da máquina. Devido a isto, nem todas as peças que foram cortadas puderam ser dobradas.

Ao final desta etapa foram dobradas apenas 7 peças dos grupos #1,20 e #1,50; 6 peças do grupo #2,00; 5 peças dos grupos #3,00, #3,75 e #4,75; e 3 peças do grupo #6,35. Ao todo, das 63 peças disponíveis para dobra, apenas 38 puderam ser dobradas, reduzindo em 40% o grupo amostral do estudo.

A Figura 27 mostra de forma esquemática até qual ângulo mínimo os diferentes grupos puderam ser dobrados.

Figura 27 - Limites do processo de dobramento.

	#1,20	#1,50	#2,00	#3,00	#3,75	#4,75	#6,35
90°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
85°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
80°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
75°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
70°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
65°	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
60°	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
55°	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
50°	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Fonte: autoria própria.

Após as peças terem sido dobradas, as mesmas retornaram ao laboratório para a realização de novas aferições. Desta vez o interesse voltou-se para as medidas de ângulo interno, comprimento das abas (flanges) e raio interno de dobra.

Para a realização das medições utilizou-se mais uma vez o paquímetro analógico, além de um programa de desenho em computador (CAD).

A aferição das medidas dos flanges ocorreu de forma similar à do comprimento das peças, no começo do experimento. Mas desta vez apenas 3 medidas foram tomadas, diferentemente das 5, adotadas antes.

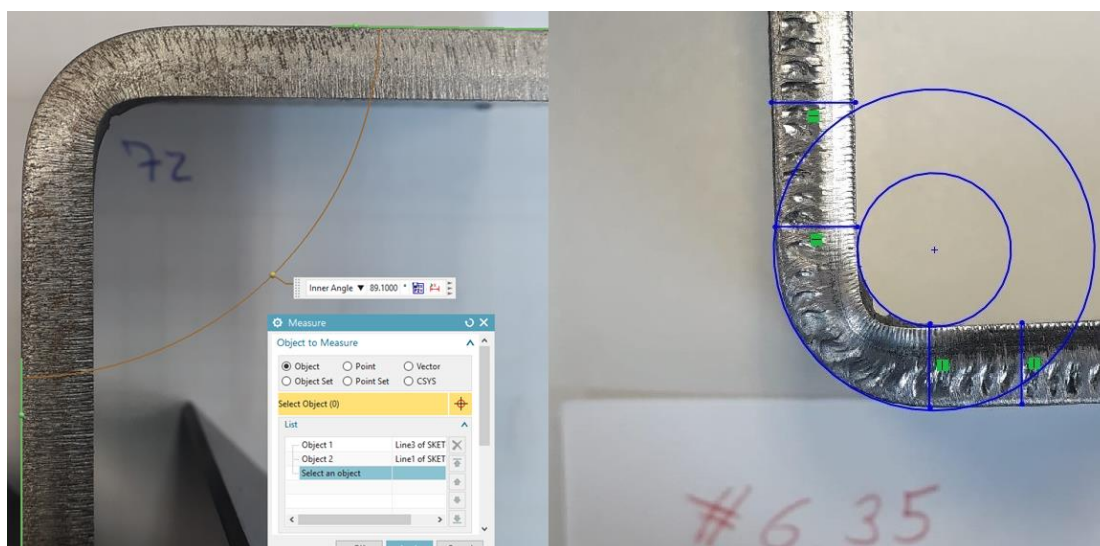
Apenas as médias foram separadas e utilizadas no decorrer do estudo.

Para aferir as outras dimensões de interesse (ângulo interno e raio de dobra) se fez necessária a criação de uma rotina, já mencionada no capítulo 3 deste trabalho.

Dentro desta rotina, fez-se conveniente utilizar um programa de desenho em computador, devido à alta capacidade de medição geométrica que este tipo de software permite.

As fotos das peças dobradas foram imputadas no programa, possibilitando realizar as medições de ângulo interno e raio de dobra, como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Utilização de CAD para aferir ângulo interno e raio de dobra.



Fonte: autoria própria.

As linhas auxiliares foram desenhadas perpendicularmente às arestas, de forma a terem seu comprimento limitado pela espessura da peça na foto.

Com estas linhas foi possível determinar a escala da foto no software, pois já se conhecia a espessura real da peça física, e o comprimento da linha desenhada poderia ser facilmente medido pelo próprio programa.

Ou seja, através de uma divisão entre a medida de espessura real e comprimento da linha recém desenhada foi possível determinar a escala que a foto tinha dentro do ambiente de desenho digital. Este valor foi utilizado posteriormente para determinar o valor do raio interno.

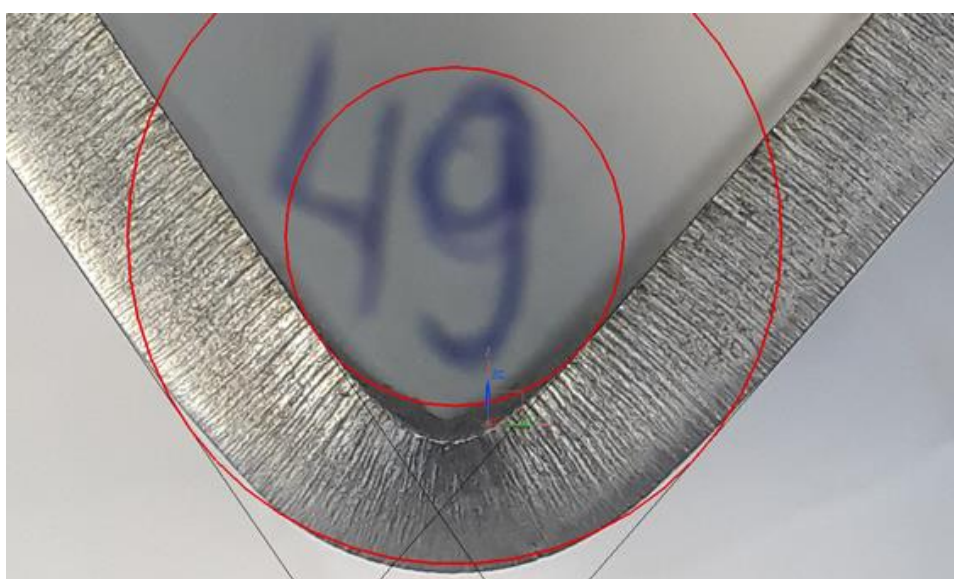
Com todos os dados necessários foi então encontrado o raio de dobra utilizando-se da equação 5.

Vale ressaltar que durante este processo de aferição notou-se uma discrepância entre o que preconiza a teoria e a prática: em peças cujo ângulo interno era muito agudo, os raios de dobra apresentavam perfil elíptico, e não circular.

Isto se deve, provavelmente, ao modo como as dobras foram feitas, em canais de contato ao fundo.

A Figura 29 ilustra o fato observado. Esta “ovalização” dos raios de dobra faz com que as equações clássicas de determinação do comprimento do planificado fujam à realidade, uma vez que não podem ser modeladas universalmente para todos os tipos de processos de conformação.

Figura 29 - Raio de dobra ovalizado.



Fonte: autoria própria.

Isso torna estudos como este, feitos de forma experimental, cada vez mais pertinentes de um ponto de vista prático e visando a otimização de processos fabris. Os resultados de todas as aferições podem ser vistos na Figura 30, na qual α está em graus e as outras medidas em milímetros.

Figura 30 - Resumo dos dados experimentais.

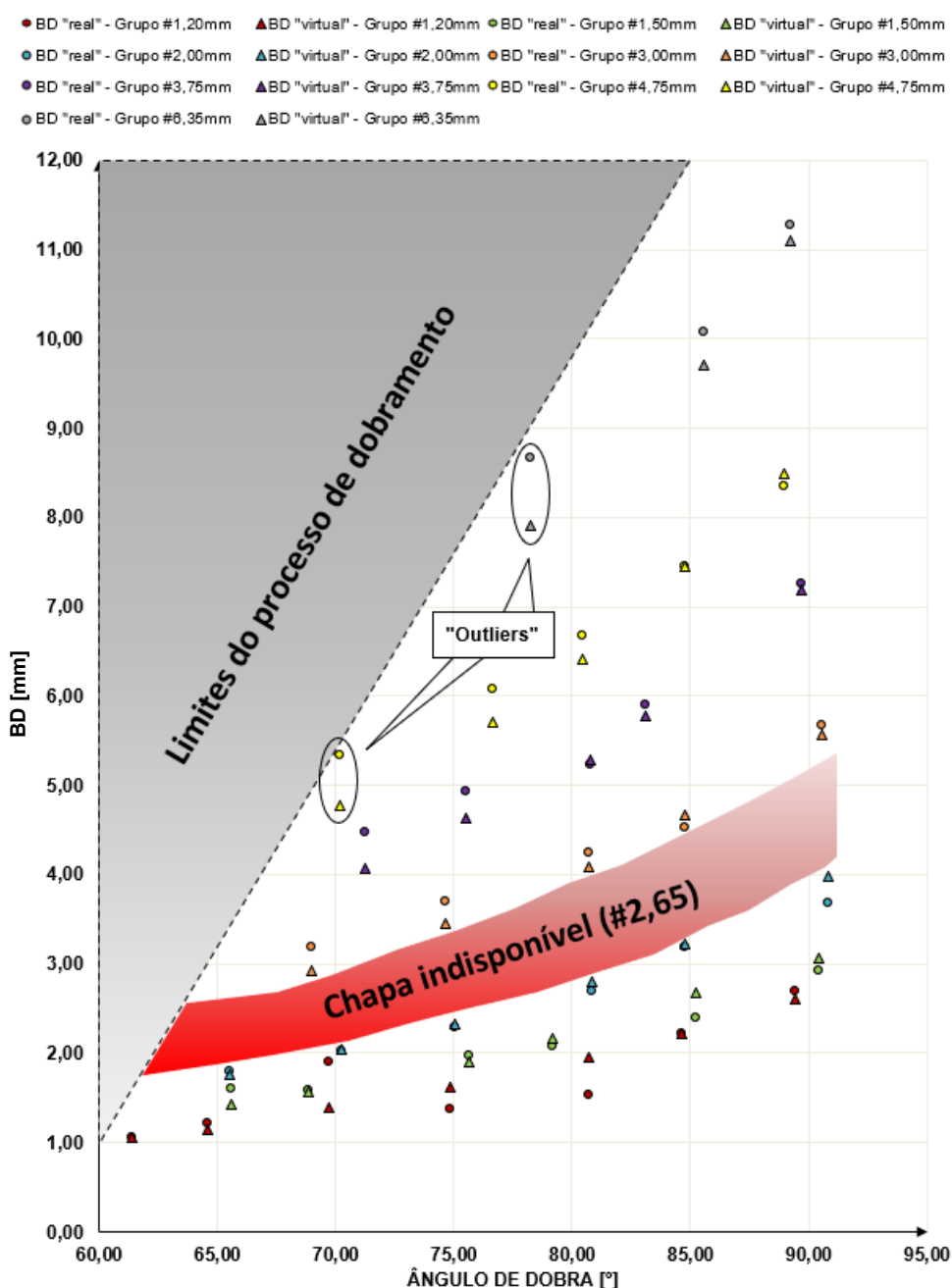
	<i>Chapa</i>	Aferições físicas				Aferições digitais	
		<i>L_{méd}</i>	<i>#_{méd}</i>	<i>A_{méd}</i>	<i>B_{méd}</i>	α	r_l
Grupo #1,20mm	1	99,98	1,27	49,88	52,80	89,40	2,30
	2	99,95	1,27	49,68	52,50	84,61	2,12
	3	99,95	1,28	49,55	52,30	69,75	1,63
	4	99,96	1,26	49,35	52,15	80,74	2,05
	5	99,93	1,26	49,30	52,00	74,84	1,84
	6	99,94	1,25	49,13	52,03	64,59	1,33
	7	99,95	1,25	49,10	51,90	61,38	1,36
Grupo #1,50mm	10	99,90	1,51	50,08	52,75	90,46	2,43
	11	99,93	1,60	49,78	52,55	85,25	2,21
	12	99,94	1,62	49,73	52,30	79,19	1,75
	13	99,91	1,60	49,68	52,20	75,67	1,48
	14	99,94	1,58	49,40	52,13	68,87	1,39
	15	99,89	1,58	49,48	52,03	65,57	1,31
Grupo #2,00mm	18	99,92	1,56	49,38	51,95	59,52	1,33
	20	99,92	1,90	49,90	53,70	90,83	3,25
	21	99,93	1,91	49,38	53,75	84,78	2,82
	22	99,96	1,90	48,93	53,33	75,02	2,20
	23	99,95	1,90	49,23	53,43	80,81	2,56
Grupo #3,00mm	24	100,02	1,89	49,33	52,73	70,23	2,25
	25	100,01	1,89	49,05	52,75	65,52	1,96
	40	100,00	3,02	49,70	54,83	84,74	3,26
	41	99,91	2,96	49,53	54,63	80,74	3,05
Grupo #3,75mm	43	99,82	3,01	49,00	54,53	74,64	2,62
	44	99,92	3,00	49,08	54,03	68,97	2,34
	45	99,95	3,01	50,20	55,43	90,56	3,58
	47	99,92	3,84	49,95	57,23	89,69	5,19
Grupo #4,75mm	48	99,87	3,80	48,60	55,75	71,27	3,67
	49	99,87	3,80	48,68	56,13	75,55	4,07
	52	99,88	3,81	49,30	56,48	83,09	4,54
	53	99,94	3,81	49,03	56,15	80,77	4,01
Grupo #6,35mm	59	99,96	4,69	49,35	55,95	70,18	3,98
	60	99,93	4,67	49,50	56,50	76,65	4,41
	61	99,95	4,66	50,73	57,58	88,99	6,12
	62	99,99	4,67	49,85	56,83	80,46	4,87
Grupo #6,35mm	63	99,93	4,66	50,18	57,20	84,74	5,72
	70	99,98	6,41	48,50	60,15	78,22	5,14
Grupo #6,35mm	71	99,87	6,40	49,13	60,83	85,56	5,78
	72	99,91	6,40	49,70	61,48	89,22	6,88

Fonte: autoria própria.

4.3. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS INICIAIS

Utilizando os valores da Figura 30, foi possível plotar o gráfico na Figura 31, que mostra os valores de BD em função do ângulo interno de dobra, calculados tanto pela equação 1 b (discriminados como “real”) quanto pela equação 3 b (“virtual”), para todos os grupos de chapas ensaiados.

Figura 31 - Resultados de BD em função de α , para as diferentes espessuras.



Fonte: autoria própria.

Em um primeiro momento nota-se a área vazia na parte superior esquerda do gráfico, no formato de um triângulo retângulo. Esta região diz respeito ao fenômeno observado durante a etapa de dobramento dos corpos de prova, mencionados na Figura 27.

Observou-se, durante o ensaio, que as chapas de espessura maior não puderam ser dobradas até ângulos internos muito agudos, devido ao atingimento do limite da máquina de dobra. Essas limitações do processo de dobramento ficam evidentes da região cinza delimitada por linhas pontilhadas.

Além disso, fica evidente na região sombreada de vermelho a lacuna que existe entre os resultados de BD para os grupos #2,00 e #3,00. Essa região vazia diz respeito ao grupo de chapas #2,65, que não foi ensaiado devido a indisponibilidade de material, antes mencionada.

Da Figura 31 é possível observar ainda a existência de duas tendências nos resultados obtidos. Ambas se referem ao valor de BD.

A primeira está relacionada com a espessura das peças dobradas: quanto mais espesso é o corpo de prova, maior é o valor de BD. Observa-se claramente no gráfico que os valores de BD vão desde $\approx 1\text{mm}$ a 3mm para os grupos #1,20 e #1,50 até $\approx 9\text{mm}$ a 11mm para o grupo #6,35.

A segunda mostra que quanto mais agudo é o ângulo interno de dobra, menor é o valor de BD. Pode-se ver, especificamente para o grupo #6,35, que o valor de BD diminui na casa de 3mm para uma variação angular de apenas $\approx 12^\circ$.

Ambas as observações estão de acordo com a equação 3 b, o que comprova a pertinência do método proposto na previsão do comprimento do planificado.

Por fim, pode-se notar que há grande correlação entre os dados obtidos pelos métodos “real” (equação 1 b) e “virtual” (equação 3 b), confirmando novamente, de maneira positiva, a eficácia do método proposto.

É possível observar a correlação que existe entre os valores de BD “real” e “virtual”. Apenas em alguns casos é possível observar grande discrepância entre os resultados, como por exemplo no grupo #4,75 para $\alpha \approx 70^\circ$, ou ainda no grupo #6,35 para $\alpha \approx 78^\circ$. Tais pontos são chamados “outliers”, ou seja, aqueles que fogem à regra.

Por outro lado, não são frequentes os casos em que os resultados de BD “real” e BD “virtual” convergem precisamente para o mesmo valor. De todos os resultados obtidos pode-se destacar apenas aqueles referentes aos grupos #2,00 e #3,00, por terem apresentado correlação bastante próxima.

Isto leva a crer que há possibilidade de melhoria na determinação de BD.

Como discutido anteriormente, a equação 3 *b* na sua forma vista na literatura pressupõe que a região de dobra assume perfil circular, além disso, que o material em questão encrua de maneira predeterminada. Tais suposições são representadas matematicamente na equação pelos valores “2” e “0,44”, respectivamente.

Entretanto, como visto anteriormente, sabe-se que a região de dobra pode assumir perfis elípticos quando se diminui muito o ângulo interno de dobra (Figura 29).

Ainda, sabe-se que a maneira com a qual o material se encrua, aqui representada pelo Fator K, é regida por diferentes aspectos, como por exemplo a direção de laminação da bobina que deu origem ao “blank”, o tamanho granulométrico do material, o coeficiente de fricção entre a peça e o ferramental de dobra, o método adotado para a operação de dobra, entre outros.

Desta maneira, convém dizer que a utilização da equação 3 *b* (pelo menos em sua forma “original”) para prever o valor de BD deve ser cautelosa, uma vez que nela constam pressupostos acerca do processo de dobramento que, na grande maioria dos casos, foge à realidade do dia a dia.

Uma maneira prática de melhorar os resultados de BD, sem que seja preciso descartar a equação 3 *b*, é propor novos valores numéricos para a fórmula, de modo que se reduzam as diferenças entre BD “real” e “virtual”. Tal otimização pode ser realizada rapidamente através de ferramentas computacionais.

4.4. APLICAÇÃO DO METODO PROPOSTO

Neste trabalho, mantendo o viés da praticidade e agilidade voltada para ambientes empresariais, utilizou-se a ferramenta “Solver”, do Excel, para determinar novos valores numéricos que substituíssem aqueles antes mencionados (“2” e “0,44”).

A resolução baseou-se em três critérios, buscando a redução simultânea deles:

- Soma das diferenças entre BD “real” e BD “virtual”;
- Média das diferenças entre BD “real” e BD “virtual”;
- Erro quadrático médio (MSE) entre BD “real” e BD “virtual”.

A Figura 32 mostra a comparação entre os valores encontrados para as diferentes constantes da equação 3 b, antes e depois da aplicação do Solver.

Com a simples alteração dos valores “C₁” de 2 para 1,77 e “C₂” de 0,44 para 0,12, respectivamente, foi possível reduzir as diferenças entre os resultados de BD na casa dos 48% para as diferenças simples, e 64% para as diferenças quadráticas.

Figura 32 - Alteração da equação 3 b para cálculo de BD otimizado.

$BD_{genérico} = \left[C_1 \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) (r_i + \#_{méd}) \right] - [\alpha(r_i + C_2 \#_{méd})]$				
Forma	Constantes	Soma das Diferenças	Média das Diferenças	Erro Quadrático Médio
“Clássica”	$C_1 = 2$ $C_2 = 0,44$	5,852	0,172	0,067
“Otimizada”	$C_1 = 1,77$ $C_2 = 0,12$	3,029	0,089	0,024
Variação	$C_1 = -11,5\%$ $C_2 = -72,7\%$	-48,2%	-48,3%	-64,2%

Fonte: autoria própria.

Um ponto que vale a pena ser destacado da Figura 32 é o novo valor obtido para a média das diferenças entre os valores de BD (0,089 mm).

Ele indica que, em média, para qualquer operação de dobramento que seja realizada na empresa, que tenha ângulo interno dentro dos limites do ensaio, e que

seja feita em chapa com bitola abrangida pelo experimento, há de se esperar desvio dimensional de apenas $\pm 89 \mu\text{m}$ por dobra.

Este desvio médio pode ser considerado desprezível, se comparado com os valores típicos das tolerâncias dimensionais encontradas na grande maioria das empresas do ramo metalúrgico, o que valida a abordagem de otimização aqui proposta. Assim, a equação 3 b pode ser reescrita da seguinte forma:

$$BD = \left[1,77 \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) (r_i + \#_{méd}) \right] - [\alpha(r_i + 0,12\#_{méd})] \quad (3 c)$$

Vale ressaltar, neste momento, o que essa simples alteração na fórmula acima significa, de um ponto de vista prático.

A alteração dos valores mencionados representa a aproximação de uma equação teórica (e genérica), à realidade de um determinado local de trabalho, que tem, certamente, suas próprias particularidades. Desta forma, o uso dela fica restrito ao local de onde foram realizados os experimentos.

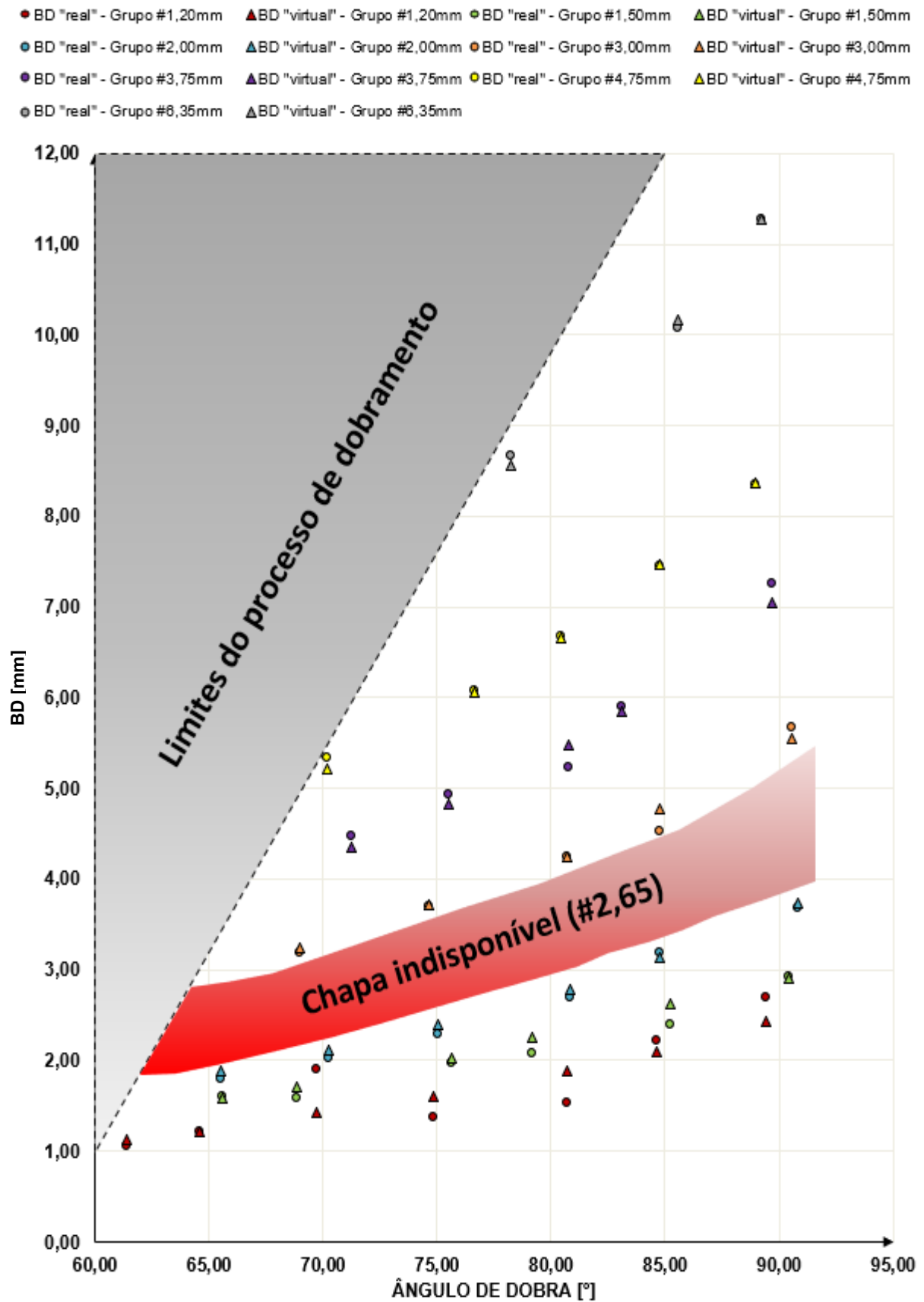
Observa-se, por fim, que, caso venham a ocorrer mudanças substanciais nas condições de contorno originais do experimento, como, por exemplo, mudança das propriedades mecânicas das chapas conformadas, ou ainda, alteração do processo de conformação, a equação 3 c não terá mais grande valia.

Neste caso, seria necessário realizar novamente o experimento aqui apresentado para obter novos valores e conseqüentemente uma nova variante da fórmula original.

A Figura 33 mostra os resultados para BD utilizando a equação 3 c. Nota-se claramente a aproximação entre os resultados “real” e “virtual otimizado”, quando comparados com os resultados anteriores.

Destaque especial pode ser dado aos novos resultados dos grupos #2,00, #4,75 e #6,35, onde os valores de BD “virtual otimizado” ficaram praticamente idênticos aos de BD “real”.

Figura 33 - Resultados de BD em função de α , para as diferentes espessuras (otimizado).



Fonte: autoria própria.

5. CONCLUSÃO

O estudo realizado atingiu os resultados inicialmente propostos e desta forma, foi possível otimizar e aplicar de forma prática, uma variação da equação encontrada na literatura, que calcula com maior exatidão o valor de dedução de dobra para peças metálicas, dobradas de diferentes espessuras e ângulos internos.

Torna-se importante destacar que os resultados obtidos estão intrinsecamente ligados ao processo fabril e às condições ambientais em que o estudo foi realizado. Desta forma, novos estudos devem ser executados para adequar a equação otimizada às diferentes situações e variações dos processos produtivos.

O resultado final (equação 3b) apresenta precisão superior daquela comumente encontrada em aplicações do dia a dia, constituindo uma abordagem mais confiável e assertiva para o meio que foi criada.

REFERÊNCIAS

COSTA, H. DE BRITO; MIRA, FAUSTO M. DE: **Processos de fabricação: conformação mecânica dos metais volume 1**. 1985. p. 68. Disciplina: conformação mecânica dos metais. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1985.

GAUSMANN, FRANCIS: **A influência da fibra neutra no desenvolvimento do planificado**. 2017. 60 f. Monografia (Especialização) – Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia Industrial, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi, 2017.

DOS SANTOS, RICARDO ADRIANO: **Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processo de dobramento de aços de alta resistência**. 2013. 115 f. Tese (Doutorado) – Curso de doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

SCHULER: **Metal forming handbook, Springer-Verlag**. Berlim, 1998. p. 563.

CALLISTER, W.; RETHWISCH, DAVID G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares, Revisão Técnica José Roberto Moraes d' Almeida. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

HELMAN, HORÁCIO; CETLIN, PAULO ROBERTO. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2 ed. reimpr. São Paulo: Artliber, 2013. 263 p.

DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.). **DIN 6935: Cold Bending of Flat Rolled Steel Products**. Berlim, 1975.

BRESCIANI FILHO, ETTORE; ZAVAGLIA, CECÍLIA AMÉLIA CARVALHO; BUTTON, SÉRGIO TONINI; GOMES, EDSON; NERY FERNANDO ANTONIO DA COSTA. **Conformação Plástica dos Metais**. 5. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 1997. 383p.

GASPARINI BRASIL. **Ferramentas para Prensas e Dobradeiras**. São Jose dos Pinhais. 105 p. disponível em: <<http://site.gasparini.ind.br.plumeria.arvixe.com/Content/pdf/catalogos/ferramentas.pdf>> Acesso em: 12 mai. 2021.