

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GIOVANI NICHETTI DE QUADROS

**ANÁLISE DOS FATORES INFLUENCIADORES NA NÃO
CONFORMIDADE DIMENSIONAL DO PROCESSO DE
DOBRAMENTO**

BENTO GONÇALVES

2020

GIOVANI NICHETTI DE QUADROS

**ANÁLISE DOS FATORES INFLUENCIADORES NA NÃO
CONFORMIDADE DIMENSIONAL DO PROCESSO DE
DOBRAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharia, da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

BENTO GONÇALVES

2020

Dedico este trabalho à memória de meu avô Oneron, meu fiel incentivador.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Carlos e Vera, pelo suporte e auxílio nos momentos de dúvida durante essa etapa tão importante em minha vida.

Aos meus amigos e colegas, pelo companheirismo e motivação para superar os desafios da vida acadêmica.

Ao professor Dr. Alexandre Fassini Michels pela orientação e parceria na realização deste trabalho.

À Metalgava Componentes, em especial ao Cristian e ao Everton, pela ajuda na realização dos ensaios que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho através da disponibilidade de recursos de material e equipamentos.

RESUMO

Chapas metálicas ocupam significativa parcela na construção mecânica, e sua transformação em grande parte passa pelo processo de conformação, mais especificamente o dobramento. Evitar os desperdícios e conseqüentemente reduzir os custos é uma necessidade nos dias atuais. A fim de reduzir as paradas de máquina e diminuir o número de refugos devido às não conformidades no processo, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo do processo de dobramento em chapas de aço SAE 1008 e ASTM A36, de modo a investigar a ocorrência de possíveis falhas prejudiciais às peças fabricadas com estes materiais e a relação com os parâmetros do processo de conformação. Foram realizados ensaios em corpos de prova isolando algumas variáveis do processo. O processo de dobramento utilizado foi o de dobra aérea, em máquina dobradeira hidráulica. Os dados analisados foram correlacionados e assim, geraram um conhecimento aprofundado do processo. Destacou-se a diferença do retorno elástico dos materiais quando alterado o sentido de dobra com relação à laminação da chapa, assim como a presença de trincas quando o dobramento é realizado paralelo à laminação.

Palavras-chave: Conformação Mecânica. Dobramento. Chapas metálicas.

ABSTRACT

Sheet metal occupies a significant portion in mechanical construction, and its transformation largely goes through the forming process, more specifically bending. Avoiding waste and consequently reducing costs is a necessity these days. In order to reduce machine downtime and reduce scrap due to non-conformities in the process, this paper aims to study the bending process on SAE 1008 and ASTM A36 steel sheets in order to investigate the occurrence of possible damaging failures to parts made of these materials and the relationship to the parameters of the forming process. Tests were performed on specimens isolating some process variables. The process used was the air bending in a press break. The analyzed data were correlated and thus generated an in-depth knowledge of the process. The difference in the elastic return of the materials was highlighted when the bending direction was changed in relation to the lamination of the plate as well as the presence of cracks when bending is performed parallel to lamination.

Keywords: Metal Forming. Bending. Sheet Metal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de perdas no setor de dobra	10
Figura 2 – Trincas após o dobramento.....	11
Figura 3 – Operações típicas de conformação	16
Figura 4 - Termos empregados no dobramento	17
Figura 5 - Principais variáveis do processo de dobra	19
Figura 6 - Esforços atuantes no dobramento	22
Figura 7 – Determinação da linha neutra de uma chapa submetida a um dobramento preliminar.....	22
Figura 8 - Rotação da seção em torno da linha neutra durante o retorno elástico	25
Figura 9 – Curva tensão-deformação de engenharia	26
Figura 10 - Representação esquemática do retorno elástico no dobramento	27
Figura 11 – Trincas quando a dobra é paralela à laminação da chapa	29
Figura 12 – Exemplos de preparação do planificado para evitar alguns defeitos.....	30
Figura 13 – (a) Dimensão mínima entre furos e linha de dobra para evitar defeitos de forma e (b) dimensão mínima para evitar defeitos de dobragem	31
Figura 14 – Desenho do corpo de prova	34
Figura 15 – Máquina de corte laser TruLaser 5030.....	34
Figura 16 – Corpos de prova.....	35
Figura 17 – Abertura de matriz indicada pelo fabricante	36
Figura 18 – Matriz V 40 mm	36
Figura 19 – Dobradeira CNC.....	37
Figura 20 – Medidor de ângulo digital	38
Figura 21 – Corpo de prova em ensaio	39
Figura 22 – Gráfico constante K_r (Paralelo)	42
Figura 23 - Gráfico constante K_r (Perpendicular)	42
Figura 24 – Trincas no corpo de prova número 20.....	44
Figura 25 – Exemplo de plano de corte da peça 0047980	46
Figura 26 – Desenho técnico da peça.....	47

Figura 27 – Novo plano de corte proposto	48
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação da composição química do aço SAE 1008	12
Tabela 2 – Especificação da composição química do aço ASTM A36.....	13
Tabela 3 – Valores de raio mínimo (r_{min}).....	18
Tabela 4 – Parâmetros dos ensaios	33
Tabela 5 – Retorno elástico para o aço SAE 1008 com espessura 3 mm.....	40
Tabela 6 – Retorno elástico para o aço ASTM A36 com espessura 6,35 mm	40
Tabela 7 – Retorno elástico para o aço ASTM A36 com espessura 9,52 mm	41
Tabela 8 – Presença de trincas nas amostras ensaiadas	44

LISTA DE SÍMBOLOS

r_{\min}	Raio mínimo de dobra [mm]
R_i	Raio interno [mm]
B	Tolerância de dobramento [mm]
b	Largura de dobramento [mm]
ε_{ext}	Deformação na fibra exterior da flexão [mm]
ε	Deformação verdadeira do ensaio de tração [mm]
C	Coefficiente de dobramento do material [-]
y	Posição da linha neutra [-]
s	Espessura do material [mm]
α	Ângulo de dobramento [°]
q	Coefficiente de estrição [-]
R_n	Raio de curvatura da linha neutra [mm]
R_i	Raio antes do retorno elástico [mm]
R_f	Raio após o retorno elástico [mm]
R_n	Raio de curvatura da linha neutra [mm]
α_i	Ângulo inicial de dobramento [°]
α_f	Ângulo final de dobramento [°]
K_r	Fator de recuperação elástica [-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	JUSTIFICATIVA.....	9
1.2	OBJETIVO GERAL.....	11
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	MATERIAIS	12
2.1.1	Classificação dos aços	12
2.2	CONFORMAÇÃO DE CHAPAS	13
2.3	DOBRAMENTO	15
2.3.1	Raio mínimo	17
2.3.2	Linha neutra	21
2.3.3	Fator K	23
2.3.4	Retorno elástico	24
2.3.5	Defeitos no dobramento	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1.1	Análises	37
3.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	38
3.3	DISCUSSÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	39
3.3.1	Retorno elástico	39
3.3.2	Presença de trincas	43
3.3.3	Proposta de solução	45
4	CONCLUSÕES	49
5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

APÊNDICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS CHAPA 3 MM	53
APÊNDICE B - RESULTADOS DOS ENSAIOS CHAPA 6,35 MM	54
APÊNDICE C - RESULTADOS DOS ENSAIOS CHAPA 9,52 MM	55

1 INTRODUÇÃO

A fabricação pode ser definida como a arte e a ciência de transformar os materiais em produtos finais utilizáveis e — num contexto de economia de mercado — vendáveis. Apesar da crescente presença de materiais cerâmicos e poliméricos nos artefatos utilizados na vida moderna, os metais, e em especial o aço, mantém grande importância nos processos de fabricação industrial.

A competição entre as indústrias para manter e conquistar novos clientes sempre conduziu as empresas à busca por melhoria contínua de seus produtos e serviços. Diante do panorama atual da economia brasileira, após anos consecutivos de recessão, os clientes têm se tornado cada vez mais exigentes para que o custo dos produtos adquiridos e o prazo de entrega sejam o menor possível. Atender a essas expectativas dos clientes se tornou — mais do que uma necessidade — uma questão de sobrevivência no mercado.

Na indústria que utiliza o aço como matéria-prima existe uma quantidade considerável de empresas especializadas apenas na transformação dos metais, onde através de processos como corte, dobramento, usinagem e soldagem, essas empresas entregam aos clientes subcomponentes de produtos finais. Os clientes desse mercado são dos mais diversos setores, porém destacam-se os setores automotivo, rodoviário e de implementos agrícolas.

A obtenção de componentes produzidos através do aço caracteriza-se pelo processo de conformação mecânica. Esse processo, no qual ocorre uma mudança específica na forma do material, é largamente utilizado para a produção e processamento de materiais metálicos e dentre esses processos de estampagem, os que mais se destacam são corte por cisalhamento, estiramento, embutimento e dobramento (DIETER, 1981).

As empresas de terceirização de serviços, as quais não possuem desenvolvimento de produto, tem a incumbência apenas de fabricar o produto conforme as especificações de projeto do cliente e com preços competitivos. Entretanto, é durante a fabricação que ocorrem desvios que podem conduzir ao não cumprimento das especificações de tolerâncias dimensionais, de rugosidade e acabamento superficial, folgas e demais interferências que podem prejudicar a aplicação final do produto. Como consequência destes desvios ocorre o aumento do

número de produtos refugados e, conseqüentemente, a elevação dos custos de produção.

No processo de dobramento existem diversas variáveis que podem influenciar no desvio das especificações do componente. Identificar quais são essas variáveis e minimizar as suas influências no processo é uma tarefa complexa, mas que pode trazer um retorno econômico expressivo com a diminuição dos custos relativos a desperdícios na produção.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diante da necessidade de reduzirem-se os custos com a produção e a obtenção da máxima eficiência nos processos produtivos, é fundamental que seja aplicado o conhecimento teórico à execução na prática do dia-a-dia industrial. Dessa forma, a proposta desse estudo é investigar possíveis fatores que interfiram nos desvios da conformidade de peças conformadas plasticamente através do processo de dobramento.

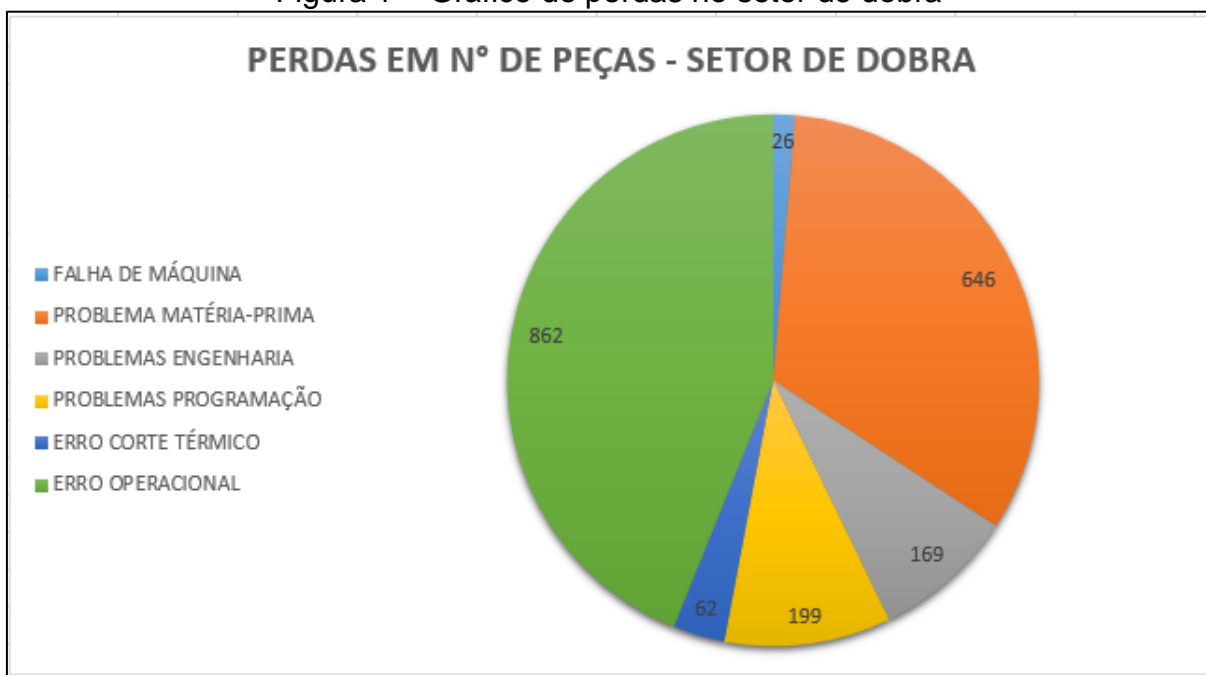
O estudo dos processos de conformação plástica dos metais é de suma importância porque quase todos os produtos metálicos produzidos são submetidos a tais processos (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

O interesse pelo tema proposto neste estudo parte da necessidade de se encontrar uma solução para a grande quantidade de refugos provenientes de não conformidades na dobra de chapas metálicas. Grande parte dessas perdas do processo são ocasionadas por divergências dimensionais, onde a peça física não corresponde ao solicitado em desenho técnico, por motivos diversos. Pelo fato de o processo ainda ser muito dependente do conhecimento prático do operador do maquinário, a relevância desse estudo torna-se ainda maior.

A Metalgava Componentes LTDA é uma empresa com mais de 30 anos de atuação, reconhecida pela produção de componentes para a indústria moveleira. Está situada em Garibaldi e atualmente oferece serviços de corte laser, dobra e solda de peças e conjuntos para as mais diversas indústrias.

Durante o período de 31/10/2018 até 31/10/2019 a Metalgava Componentes teve 1964 peças refugadas no setor de dobra. De acordo com a classificação da empresa, os motivos dessas perdas são os que estão expostos na Figura 1:

Figura 1 – Gráfico de perdas no setor de dobra



Fonte: O Autor (2020)

No gráfico é possível observar que o maior motivo de refugos no setor é o erro operacional. Esse apontamento é feito quando a geometria da peça não fica conforme desenho técnico, ou seja, as dimensões não atingem os valores especificados. O segundo maior motivo de perdas são os problemas de matéria-prima. Esse motivo de refugo é utilizado quando, durante o monitoramento da produção, com a máquina regulada e o *setup* já realizado, o operador verifica que as medidas da peça tiveram variações. Essas discrepâncias não se explicam por erros de operação, nem por falhas de equipamento/maquinário, desta forma a empresa adotou como motivo um suposto defeito na matéria-prima. Esse defeito seria uma possível inclusão de outros elementos químicos na chapa metálica, ou alguma alteração de propriedades do material por falhas na usina, o que poderia ocasionar trincas conforme figura 2.

Devido ao fato de que quase todo o conhecimento sobre o processo existente na empresa atualmente provém da tentativa e erro e da experiência dos operadores - ou seja, é um conhecimento empírico - a intenção é que através da pesquisa científica a empresa adquira o *know how* necessário para a investigação dos defeitos e consequente produção das peças com qualidade.

Figura 2 – Trincas após o dobramento



Fonte: O Autor (2019)

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo investigar quais os principais fatores que influenciam na não conformidade dimensional do processo de dobramento de determinadas peças metálicas produzidas com aço SAE 1008 e ASTM A36 na empresa Metalgava Componentes LTDA.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos tem-se:

- a) Efetuar uma revisão bibliográfica do processo de dobramento;
- b) Avaliar a influência do sentido de laminação da chapa de aço no processo de dobramento posterior;
- c) Analisar o retorno elástico no dobramento de chapas de aço;
- d) Identificar possíveis trincas originadas pelo dobramento da chapa;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS

O aço é amplamente empregado no dia-a-dia da vida moderna, principalmente na indústria automotiva, pois é dentre as ligas metálicas a que apresenta uma ótima combinação de propriedades e custo para as aplicações de engenharia.

2.1.1 Classificação dos aços

A classificação mais comum dos aços é feita de acordo com a composição química (como aços carbono e aços liga), processos de acabamento (laminados a frio ou a quente), forma do produto acabado (barras, chapas grossas, chapas finas, tiras, tubos ou perfis estruturais), características predominantes (aços-ferramenta, inoxidáveis e para construção) e propriedades exigidas na utilização.

Segundo Chiaverini (2005), as classificações dos aços são designadas com um número de quatro dígitos (10XX), segundo critérios adotados pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), *American Iron and Steel Institute* (AISI), *American Society for Testing Materials* (ASTM) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os dois últimos números (representados por XX) indicam o teor médio de carbono, e os dois primeiros números indicam o tipo e o teor médio de elementos de liga, ou seja, os números 1 e 0 especificam que é um aço carbono. A mudança de algum desses algarismos ou de ambos indica um novo tipo de aço.

Assim, um aço carbono SAE 1008 é um aço com teor médio de carbono de 0,08%. A Tabela 1 apresenta a especificação da composição química do aço SAE 1008, um aço laminado de baixo carbono e de baixa liga.

Tabela 1 – Especificação da composição química do aço SAE 1008

C%	Mn %	P%	S%	Fe%
0,10 máx.	0,30 -0,50	0,04 máx.	0,05 máx.	Bal.

Fonte: Do autor, adaptado da norma J403.

O aço carbono é uma liga contendo ferro e carbono, sem a adição intencional de outros elementos de liga. No entanto, alguns elementos residuais são encontrados tais como manganês, fósforo, silício, enxofre, níquel, cobre, cromo, molibidênio, vanádio e alumínio. Logo, o carbono é o elemento de liga mais importante (SCHEER, 1952).

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa. A sua definição não é simples, visto que, a rigor os aços comerciais não são ligas binárias. Apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. Dessa forma, o aço carbono pode ser definido como uma liga ferro-carbono (Fe-C) constituída geralmente de 0,008% até 2,11% de carbono e outros elementos residuais. O limite inferior de 0,008% corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior de 2,11% à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro a 1130°C (CHIAVERINI, 2005).

A ASTM A36 é uma norma de propriedade mecânica, onde os seus produtos visam fins estruturais, ela define os limites de escoamento (fase elástica), limite de resistência (fase plástica) e alongamento percentual. A composição química do ASTM A36 (Tabela 2) visa atender essas propriedades e para tanto estipula um manganês de 0,60% a 0,90%. Já o aço SAE 1008 é regido pela norma SAE J403, estipula composição química, não prevê propriedade mecânica, amarra simplesmente valores de Carbono (C), Manganês (Mn), Enxofre (S) e Fósforo (P).

Tabela 2 – Especificação da composição química do aço ASTM A36

C%	Mn %	P%	S%	Fe%
0,28 máx.	0,80 - 1,20	0,04 máx.	0,05 máx.	Bal.

Fonte: Do autor, adaptado da norma ASTM A36 (2008)

2.2 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS

O processo de conformação de corpos metálicos pode ser entendido como o processo de modificação da forma desse corpo metálico para outra forma definida. (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Nos processos de conformação de chapas, uma chapa inicial (*blank*) é deformada plasticamente na matriz para obtenção da configuração final. Assim, podem-se obter formatos complexos, onde pela aplicação de pressões sobre o material através da interface material-ferramenta, o processo transforma o material bruto na geometria desejada.

Os processos de conformação de chapas metálicas dividem-se basicamente em (KOBAYASHI et al. 1989 apud SCHAEFFER, 2004):

- Embutimento (*deep drawing*), estampagem profunda;
- Dobramento de chapas e calandragem;
- Estiramento de chapas;
- Hidroconformação (*hydroforming*) em tubos;
- Conformação por elastômeros;
- Conformação a vácuo, eletromagnética, por explosão;
- Outros.

Também citado em (KOBAYASHI et al. 1989 apud SCHAEFFER, 2004) as características básicas são:

- A peça trabalhada é uma chapa ou uma peça fabricada a partir de uma chapa metálica;
- As deformações usualmente causam mudanças significativas no formato, mas não na espessura da chapa;
- Em alguns casos, as magnitudes das deformações plástica e elástica recuperável são comparáveis. Nestes casos o retorno elástico (*springback*) pode ser significativo;
- Suas diferenças baseiam-se no modo como as deformações se compõem, ou seja, pela predominância de deformações de tração ou de compressão ou suas combinações.

Apesar dos processos de conformação dos metais diferirem amplamente no que diz respeito à temperatura, velocidade e na maneira em que se aplicam as forças, há uma característica semelhante em todos os termos de suas partes físicas: zona plástica, interface entre o material plasticamente deformado e as ferramentas rígidas, ferramentas sob carregamento e regiões de transição elasto-plástica no material. Desse modo, é importante entender o comportamento mecânico do material, o efeito da taxa de deformação e da temperatura, e do escoamento em processo, assim como os problemas associados a essas áreas de interesse (BACKOFEN, 1972).

Algumas propriedades do material tais como o índice de sensibilidade à taxa de deformação, índice de encruamento, deformação inicial e anisotropia plástica influenciam a distribuição das deformações finais em uma chapa metálica. Além disso, têm influência sobre as deformações o atrito entre a chapa e as ferramentas e as variações na pressão de sujeição.

Em virtude da complexidade inerente aos processos de conformação mecânica, as medidas das propriedades mecânicas feitas simplesmente a partir de ensaios de tração são de valor limitado. Vários ensaios foram desenvolvidos com o intuito de avaliar a conformabilidade dos materiais. Tradicionalmente, a avaliação da conformabilidade de um determinado material tem se baseado nas propriedades mecânicas, ensaios fundamentais para determinação dos parâmetros, tais como, índice de encruamento e coeficiente de anisotropia.

Em todos esses métodos, os níveis de propriedades requeridos, em particular para o sucesso da conformação de chapas, são determinados de dados empíricos acumulados pela extensa experiência e do conhecimento do operador, baseado no projeto inicial e nas especificações de peças similares, ou de correlações estatísticas de desempenho da prensa com propriedades dos materiais (KEELER, 1965).

2.3 DOBRAMENTO

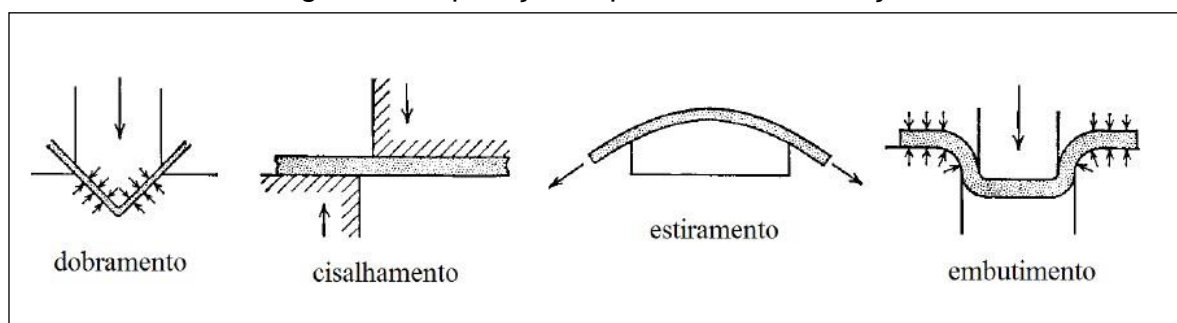
Dentre os diversos tipos de operações de conformação, destacam-se os processos de estampagem, caracterizados pela versatilidade das formas possíveis de serem obtidas, pela produtividade elevada, pelo tempo reduzido de processamento, pelo controle dimensional simplificado e pelo consumo relativamente baixo de energia

quando comparado a outras operações envolvendo deformação plástica (DIETER, 1981; BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Da laminação se obtém a matéria-prima de uma operação de estampagem, que é a chapa de aço. Esta chapa é inicialmente submetida à primeira etapa de processamento, o corte, com uso de máquinas de corte mecânico (guilhotinas, prensas, puncionadeiras) ou corte térmico (plasma, *laser*, dentre outros) que possibilitam a obtenção de um *blank*. Em seguida, o material cortado pode ser usado em diferentes tipos de operações de estampagem em função das características do produto (MARCINIAK et al., 2002).

Uma das formas mais usuais de classificar os processos de estampagem é considerando as operações exemplificadas na Figura 3: dobramento, cisalhamento, estiramento e embutimento (DIETER, 1981).

Figura 3 – Operações típicas de conformação



Fonte: Dieter (1981)

Dentre os processos citados, o dobramento é o tipo mais comum de operação de estampagem de chapas, sendo uma etapa independente de processamento do material ou uma das etapas de deformação plástica em outros processos de conformação mecânica. Nesta operação, segmentos retos do corpo plano (chapa) são transformados em curvos com o auxílio de ferramentas específicas (DIETER, 1981).

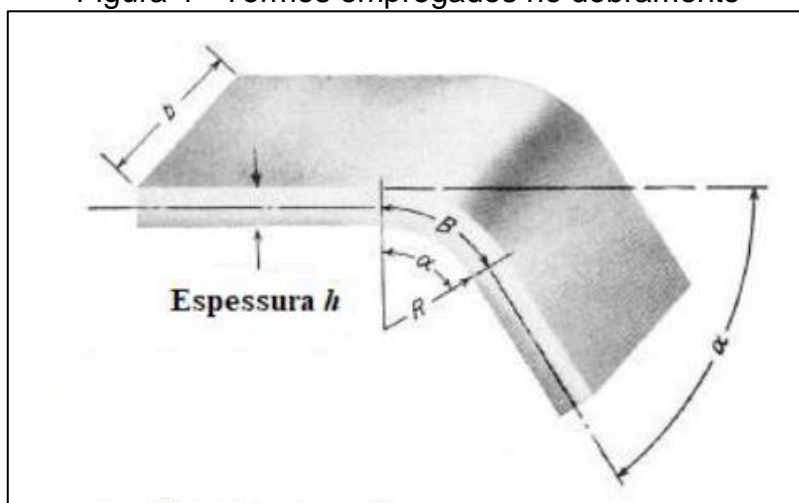
Para Benson (2002) o dobramento é o processo de estampagem mais versátil e econômico, graças à possibilidade de executar qualquer ângulo entre 180° até a medida do ângulo da matriz, com as mesmas ferramentas.

O processo de dobramento é relativamente simples e é aplicado na indústria há muitos anos. A importância desse processo pode ser visualizada em aplicações de componentes geometricamente simples (ex: suporte em “L” utilizado na montagem de móveis) até estruturas mais complexas, como por exemplo as peças empregadas na

indústria automotiva, área de transportes rodoviários, implementos agrícolas, entre outros.

Os parâmetros envolvidos no processo de dobramento estão ilustrados na Figura 4. O raio R representa o raio interno de curvatura. A tolerância de dobramento é representada por B , o ângulo de dobramento representado por α e a largura de dobramento por b (DIETER, 1981).

Figura 4 - Termos empregados no dobramento



Fonte: Dieter (1981)

2.3.1 Raio mínimo

O raio de curvatura mínimo é geralmente determinado pela quantidade de fratura da superfície externa aceitável. No entanto, muitos outros fatores podem limitar o raio de curvatura. Por exemplo, o enrugamento da superfície interna da dobra pode ser preocupante se ocorrer antes do início da fratura na superfície externa.

Quanto menor o raio de dobramento, maior é a tensão desenvolvida na região tracionada. Um excessivo tracionamento provocado por um pequeno raio de dobramento pode vir a romper as fibras externas da chapa dobrada. Define-se o raio interno mínimo de dobra, como o menor valor admissível para o raio para se evitar grande variação na espessura da chapa na região dobrada.

Uma das características da operação de dobra reside no fato do raio das ferramentas, em particular o do cunho superior, serem pequenos, na ordem de grandeza da espessura da chapa. Este fato mostra que a curvatura da peça não pode

ser desprezada durante a análise do processo, como se induz (RODRIGUES e MARTINS, 2010).

O raio mínimo de dobra é expresso geralmente em múltiplos da espessura da chapa, ou seja, um raio de dobramento de $3s$ indica que o metal pode ser dobrado formando um raio de 3 vezes a sua espessura, sem que haja aparecimento de trincas. O raio mínimo, portanto é um limite de conformação, que indica o mínimo para o material não romper, no entanto, alguns metais muito dúcteis apresentam um raio mínimo igual à zero, ou seja, as peças podem ser achatadas sobre si mesmas sem romper, mas este processo não é muito utilizado por expor as ferramentas a grandes esforços. O raio do punção de dobra também pode ser definido levando em consideração o sentido de laminação e a espessura da chapa, conforme a norma DIN 6935 - Dobragem a Frio de Aços Planos Laminados. A tabela 3 estabelece parâmetros para a definição do raio mínimo de dobra (r_{min}) para diferentes materiais. Para o aço, de acordo com as diretrizes da norma DIN 9635, considera-se um valor de raio mínimo igual à espessura da chapa (s), podendo variar até três (3) vezes essa dimensão conforme especificações de cada aço.

Tabela 3 – Valores de raio mínimo (r_{min})

MATERIAL	RAIO MÍNIMO (r_{min})
Aço	(1 a 3) s
Cobre	(0,8 a 1,2) s
Latão	(1 a 1,8) s
Zinco	(1 a 2) s
Alumínio	(0,8 a 1) s
Ligas de Alumínio	(0,9 a 3) s

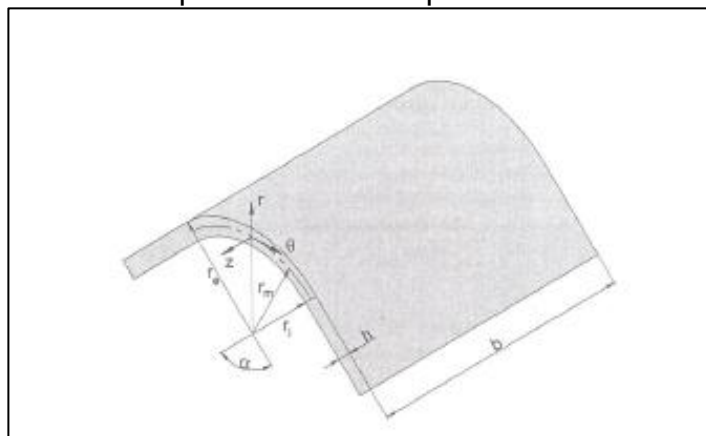
Fonte: DIN 9635

Segundo Rodrigues (2010) o raio de dobra é um ponto muito importante no processo de fabricação, uma vez que a chapa sofrerá vários esforços durante o processo.

A utilização de ferramentas com raios internos muito pequenos, induz valores muito elevados das deformações das fibras exteriores, podendo originar o aparecimento de fissuras ou mesmo fratura. Assim, o habitual é definir o raio mínimo de dobra, r_{min} , como sendo aquele para o qual surgem fissuras na superfície exterior

da chapa, expressando-se geralmente o seu valor em termos da espessura da chapa. Na figura 5 é possível observar algumas variáveis envolvidas no dobramento.

Figura 5 - Principais variáveis do processo de dobra



Fonte: Rodrigues e Martins (2010)

A deformação na fibra externa pode ser expressada com o raio interno, r_i , pela equação 1:

$$\varepsilon_0 = \frac{h}{2r} = \frac{h}{2r_i + h} \quad (1)$$

Considerando válidas as seguintes hipóteses:

- Na flexão em domínio plástico a extensão verdadeira da fibra exterior para a qual a fratura sobrevém é igual a deformação verdadeira da fratura no ensaio de tração uniaxial.
- O material é homogêneo e isotrópico
- O estado de tensão na flexão é plano, ou seja, a relação entre o comprimento de dobra e a espessura, b/h , é pequena.

Encontra-se, então, uma relação entre o raio mínimo de dobra e o coeficiente de estricção ou coeficiente de redução de área após fratura, q , sendo,

$$q = \frac{A_0 + A_1}{A_0} \quad (2)$$

e cuja deformação verdadeira é dada por,

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) = \ln\left(\frac{1}{1-q}\right) \quad (3)$$

Igualando a deformação na fibra exterior da flexão, ε_{ext} , à deformação verdadeira do ensaio de tração, ε , dada pela equação 3,

$$\varepsilon_{ext} = \ln(1 + \varepsilon_{ext}) = \ln\left(1 + \frac{h}{2r_{min} + h}\right) = \ln\left(\frac{1}{1-q}\right) = \varepsilon \quad (4)$$

obtém-se a seguinte relação entre o raio mínimo, r_{min} , e a espessura da chapa s ,

$$\frac{r_{min}}{s} = \frac{1}{2q} - 1 \quad (5)$$

A equação 5 foi verificada experimentalmente, tendo-se concluído que a sua aplicação era suficientemente precisa para valores do coeficiente de redução de área após fratura inferior a 0,2. Porém, quando a deformação na fratura ultrapassa este valor, não se pode continuar a admitir que na flexão, a fibra neutra e a fibra média coincidem, levando a que a relação entre o raio mínimo de dobra e o coeficiente de redução de área após fratura seja diferente. Então, é habitual determinar o raio mínimo em função do valor do coeficiente de redução de área após fratura do material, usando uma das seguintes relações (RODRIGUES e MARTINS, 2010),

$$\frac{r_{min}}{s} = \frac{1}{2q} - 1 \quad \text{se } q \leq 0,2 \quad (6)$$

$$\frac{r_{min}}{s} = \frac{(1-q)^2}{2q-q^2} \quad \text{se } q > 0,2 \quad (7)$$

Campos (1984) ensina que o raio mínimo e admissível de dobra pode ser calculado recorrendo-se aos dados construídos com base em ensaios experimentais, podendo ser determinado por:

$$r_{\min} = C \cdot s \quad (8)$$

Onde: s = espessura

C = coeficiente de dobramento do material, tabelado.

O coeficiente C para uma variedade de materiais foi determinado experimentalmente e alguns resultados típicos são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1– Valores do coeficiente C

MATERIAL	CONDIÇÃO	
	Normal	Endurecido
Aços baixo carbono	0,5	3,0
Aços baixa liga	0,5	4,0
Aço inox austenítico	0,5	4,0
Alumínio	0,0	1,2
Cobre	0,25	4,0
Bronze	0,6	2,5
Latão	0,4	2,0
Titânio	0,7	3,0
Liga de titânio	2,5	4,0

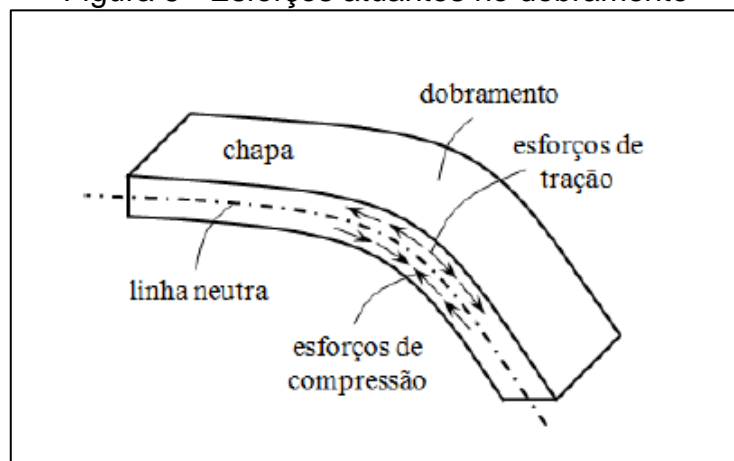
Fonte: Boljanovic (2004)

2.3.2 Linha neutra

A Figura 6 representa esquematicamente uma chapa dobrada com algumas das características mais importantes. É possível observar que na região interna da peça estão atuando esforços de compressão e na região externa esforços de tração. Ao longo de uma linha perpendicular à chapa há um ponto no qual as tensões são nulas, o chamado ponto neutro. A linha de união de todos os pontos neutros, considerando um corte feito pelo plano transversal da peça, é denominada linha neutra (BRESCIANI FILHO et al., 2011). Essa linha neutra se aproxima da superfície interna da chapa durante a execução do dobramento e observa-se que a deformação plástica das fibras da superfície externa é maior do que a ocorrida nas fibras internas. Se for desprezada a variação da espessura, a linha neutra permanecerá no centro da

dobra, e a deformação por tração na superfície externa será igual à deformação compressiva na superfície interna (DIETER, 1981).

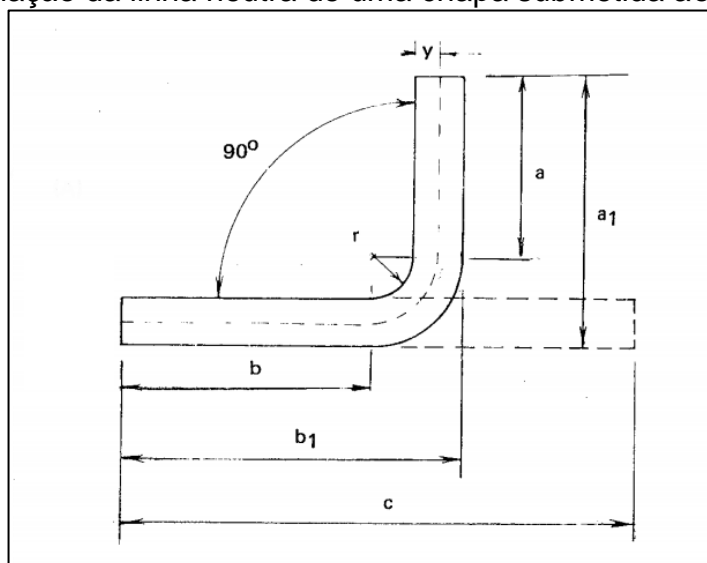
Figura 6 - Esforços atuantes no dobramento



Fonte: Sales (2013)

Sempre que se deseja obter uma chapa dobrada, deve-se conhecer seu desenvolvimento linear ou suas dimensões exatas, para que seja possível a determinação da linha neutra do elemento dobrado, sendo simples a realização de tal cálculo a partir de uma chapa do material pré-dobrada (CHIAVERINI, 2005). Na figura 7 observa-se um desenho esquemático simples de um processo de dobramento.

Figura 7 – Determinação da linha neutra de uma chapa submetida ao dobramento



Fonte: Chiaverini (2005)

Para determinação da linha neutra, uma tira de do material de interesse deve ser dobrada previamente, sendo que seu comprimento corresponde a c . Depois de

dobrada, os comprimentos a e b são mensurados, assim como o raio de concordância r . Assumindo que a cota y representa a posição da linha neutra, tem-se que o valor de c pode ser descrito como na equação 9:

$$c = a + b + \frac{\pi}{2}(r + y) \quad (9)$$

De onde se retira o valor de y na equação 7:

$$y = 2 \frac{c-a-b}{\pi} - r \quad (10)$$

2.3.3 Fator K

O eixo neutro citado anteriormente é uma posição teórica situada na metade da espessura da chapa, enquanto plana e não tensionada. Quando o metal é dobrado, a seção superior a essa área sofrerá compressão e a seção inferior será esticada, ou seja, sofrerá esforços de tração. O eixo neutro é a linha onde ocorre a transição da compressão para o alongamento na espessura da chapa.

Durante o dobramento, esse eixo se desloca em direção ao interior da dobra. O valor do fator K representa a distância que o eixo neutro varia durante o processo. O cálculo desse fator é realizado através da razão entre a posição do eixo neutro e a espessura do material. Especificamente, o valor do fator K se refere à nova posição do eixo neutro após o dobramento.

O valor do fator K é usado para o cálculo de chapas planificadas porque está diretamente relacionado à quantidade de material que deverá ser adicionada para produção da peça, considerando que, de um modo geral, é conhecida a geometria da peça dobrada.

O fator K é uma constante empírica, significando que seu valor é determinado por testes. Varia de acordo com o material, espessura, raio de curvatura e método de curvatura. Basicamente, o fator K compensa a linha neutra para fornecer um padrão plano que reflete a realidade.

2.3.4 Retorno elástico

Um dos principais defeitos geométricos observados nos processos de conformação de chapas é a recuperação elástica do material, também conhecida como retorno elástico ou efeito mola (ABDULLAH et al., 2012). O fenômeno é caracterizado pela variação dimensional da peça deformada depois que os esforços aplicados à ferramenta de conformação são aliviados (DIETER, 1981). Essa variação dimensional observada após o processo está relacionada à energia elástica armazenada no material durante a operação de dobramento, sendo associada aos estados de tensão e de deformação desenvolvidos nesta operação de estampagem.

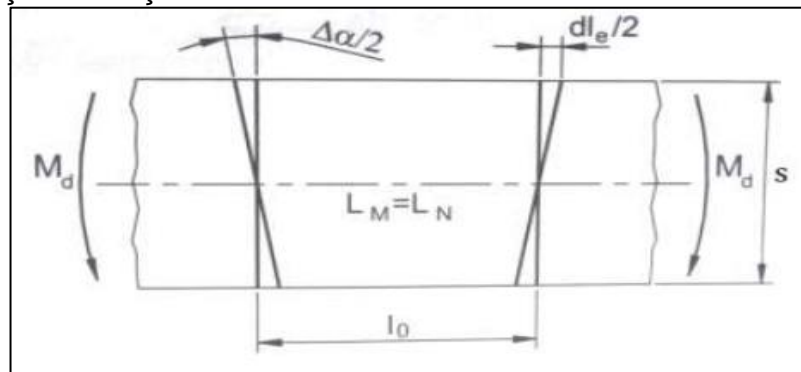
Os grandes deslocamentos inerentes ao retorno elástico levam a vários problemas na conformação de chapas, incluindo dificuldades nas operações de conformação subsequentes, montagens finais (principalmente soldagens), aparência e qualidade. Esses problemas tem um impacto econômico significativo. De acordo com Gan e Wagoner (2004), “Estima-se que seu impacto econômico em termos de atraso na produção, custos de revisão de ferramentas e rejeição de peças não qualificadas excede US\$ 50 milhões por ano somente na indústria automotiva dos EUA.”

Por muito tempo a eliminação de estricções e trincas durante os processos de conformação mecânica era a principal preocupação. Atualmente, a precisão e consistência dimensional dos produtos é o mais preocupante, já que um dos problemas mais enfrentados é o retorno elástico. Esse fenômeno provoca uma distorção geométrica que pode ser prejudicial esteticamente, além de impossibilitar a montagem de componentes conformados (LAJARIN et al, 2012).

Para Dieter (1981), o retorno elástico é a variação que a peça deformada sofre após serem retiradas as forças de dobramento, e prever essa variação é uma das dificuldades da conformação. Seu resultado depende das características do material e é proporcional ao limite de escoamento do material, e inversamente proporcional ao módulo de elasticidade.

Essa variação se dá em torno da linha neutra e pode ser representada analogamente por $\Delta\alpha/2$. A Figura 8 é uma representação esquemática dessa variação.

Figura 8 - Rotação da seção em torno da linha neutra durante o retorno elástico



Fonte: Adaptada pelo autor de Rodrigues e Martins (2010)

Considerando que essa rotação se dá em domínio elástico em torno da linha neutra, o valor da recuperação elástica pode ser previsto através da equação (11).

$$\tan \frac{\Delta\alpha}{2} = \frac{d_{le}}{s} \quad (11)$$

Onde:

d_{le} = comprimento recuperado da fibra externa;

s = espessura;

Levando em consideração que a variação angular ou retorno elástico se dá em domínio elástico e o ângulo de variação angular é relativamente pequeno, pode-se adotar a equação (12) para a definição teórica do valor do retorno elástico.

$$\frac{\Delta\alpha}{l_0} = \frac{\frac{2}{s} \cdot (\sigma_{xd})_{ext}}{E} \quad (12)$$

Onde:

l_0 = comprimento da linha neutra;

$(\sigma_{xd})_{ext}$ = tensão do retorno elástico na fibra externa;

E = módulo de elasticidade do material;

Através das equações (11) e (12) é possível quantificar os fatores que podem gerar um aumento no retorno elástico. Alteração de fatores, tais como a redução do

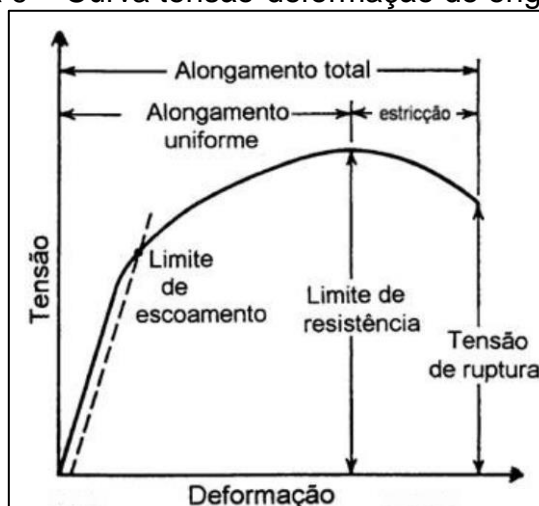
módulo de elasticidade ou da espessura do material, teoricamente, tem por consequência um retorno elástico maior. (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

A deformação plástica é outro fator responsável pelo aumento do retorno elástico. Assim, quanto maior a deformação plástica, maior a variação da peça. Esse fenômeno também é dependente da razão entre as dimensões laterais da chapa e sua espessura. Tekaslan et al. (2006) acrescenta que parâmetros do processo como temperatura, força aplicada e o tempo que ela permanece aplicada sobre o material também influenciam no retorno elástico. Esse fenômeno aumenta com o aumento do raio do cutelo utilizado, com a distância das faces opostas da matriz e com a relação R/s , onde R é o raio do cutelo e s é a espessura do material (TEKASLAN et al., 2006).

O alongamento longitudinal máximo é obtido a partir de diagramas tensão x deformação (Figura 9). Este valor de deformação será obtido na tensão limite de resistência. A partir desta tensão, o material sofre estricção.

Desta forma, uma parte das tensões atuantes na seção dobrada estará abaixo do limite de proporcionalidade (máxima tensão abaixo do qual o material segue a lei de Hooke - região de deformação elástica) e a outra parte supera a este limite, conferindo à peça uma deformação plástica permanente. Uma vez cessado o esforço de dobramento, a parte da seção que ficou submetida a tensões inferiores ao limite de proporcionalidade, por ter permanecido no domínio elástico, tende a retornar à posição inicial anterior ao dobramento. Como resultado, o corpo dobrado apresenta um pequeno retorno elástico ou efeito mola (*springback*) que deve ser compensado durante a operação de dobramento.

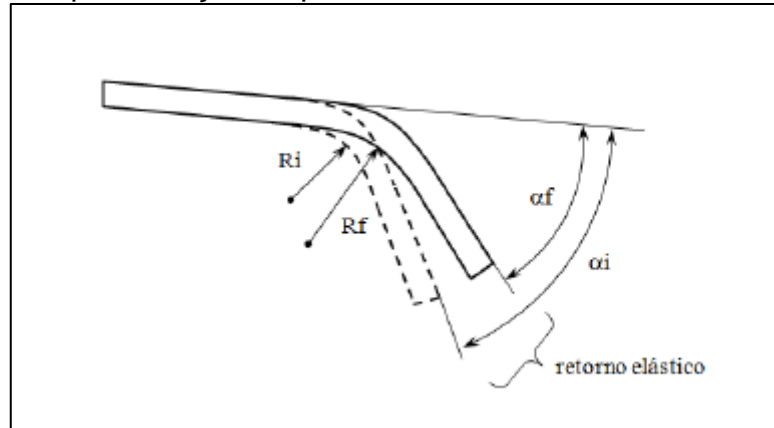
Figura 9 – Curva tensão-deformação de engenharia



Fonte: Dieter (1981)

O retorno elástico está presente em todos os processos de conformação, contudo no processo de dobramento é mais visível. Na Figura 10 é possível identificar de maneira análoga como ocorre o retorno elástico. Uma característica deste processo é que no dobramento (R_i) apresenta um valor menor que (R_f), após serem retiradas as forças de dobramento (DIETER, 1981).

Figura 10 - Representação esquemática do retorno elástico no dobramento



Fonte: Dieter (1981)

Onde:

α_f - é o ângulo após o retorno elástico;

α_i - é o ângulo antes do retorno elástico;

R_f - é o raio após o retorno elástico;

R_i - é o raio antes do retorno elástico;

Existem outros fatores que também contribuem para o aumento do retorno elástico, como por exemplo a largura da dobra a ser executada no componente. Segundo Krinninger et al. (2015), "As investigações para diferentes larguras de componentes mostram valores de retorno mais altos para componentes mais largos, se dobrados sob as mesmas condições."

Outro fator importante no aumento desse efeito é a geometria da ferramenta de dobra. De acordo com Garcia-Romeu, Ciurana e Ferrer (2007), "No que diz respeito à geometria da ferramenta de dobragem, quando o valor da largura da matriz aumenta, aumenta claramente o valor do ângulo de retorno."

Existem tabelas com dados empíricos que permitem quantificar a recuperação elástica da operação. Para isso, necessita-se admitir um cálculo que prevê uma

recuperação elástica em torno da linha média, obtendo-se pela constância do seu comprimento. Este cálculo é dado por Rodrigues e Martins (2010), pré-escrito também por Campos (1984) sendo,

$$K_r = \frac{\alpha_i}{\alpha_f} = \frac{\left(2 \frac{r_i}{s}\right)+1}{\left(2 \frac{r_f}{s}\right)+1} \quad (13)$$

em que r_i e r_f são, respectivamente, os raios interiores antes e após recuperação elástica, s a espessura da chapa e K_r é o fator de recuperação elástica que depende do material.

2.3.5 Defeitos no dobramento

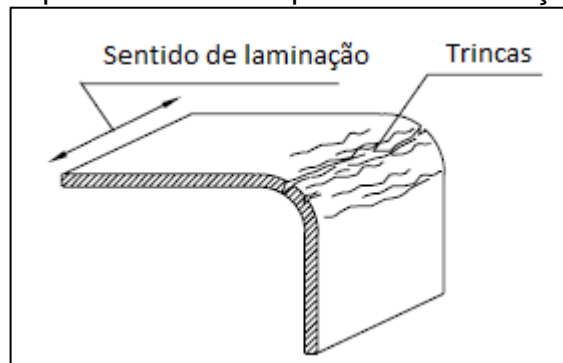
No processo de dobramento existe uma série de variáveis que devem ser observadas para evitar falhas nos perfis após a conformação. Essas falhas representam não conformidades na obtenção da peça desejada e podem causar o refugo das mesmas, pelo fato de torná-las inutilizáveis.

Segundo Rodrigues e Martins (2010), as falhas mais comuns são a deformação lateral, o aparecimento de fissuras (trincas) na superfície oposta ao punção e a perda de espessura na zona deformada plasticamente.

A dobrabilidade diminui se o corte da chapa não for realizado de maneira adequada, porque arestas irregulares formam pontos de concentração de tensão no momento da operação de dobra. A anisotropia da chapa também é um fator importante no dobramento. Se a operação de dobragem ocorrer paralelamente à direção da laminação da chapa, separações ocorrerão nos grãos e a trinca se desenvolverá conforme Figura 11 (BOLJANOVIC, 2004).

A probabilidade de surgimento de trincas nas arestas da chapa é significativamente maior na região onde ocorrem as tensões de tração, na parte externa da dobra. A frequência com que as trincas ocorrem é menor quando a linha de dobra é orientada perpendicularmente à direção de laminação (TSOUPIS et al, 2014).

Figura 11 – Trincas quando a dobra é paralela à laminação da chapa



Fonte: Adaptado de Boljanovic (2004)

Conforme descrito por Keeler, (1968), os valores das propriedades das chapas de aço variam com a direção de laminação. Valores das propriedades transversais à direção de laminação são diferentes daquelas paralelas à direção de laminação. Este fenômeno chamado anisotropia, é relacionado à estrutura cristalográfica básica do metal, que influencia fortemente a forma da curva tensão-deformação, e, portanto, o escoamento e propriedades de tensão da chapa.

Um segundo tipo de anisotropia – textura mecânica – é criado quando um material é laminado a partir de um lingote em chapa. Inclusões, segregações, porosidade e outras imperfeições são todas orientadas e alongadas paralelamente à direção de laminação.

Qualquer que seja a medida da ductilidade assume-se comumente que o material é isotrópico, ou, independente das direções de medida dentro da chapa. A transformação do metal de um lingote em uma chapa, e sua subsequente fabricação, com vários tipos de direcionalidade, originam a anisotropia de propriedades em quase todos os metais (KEELER, 1968).

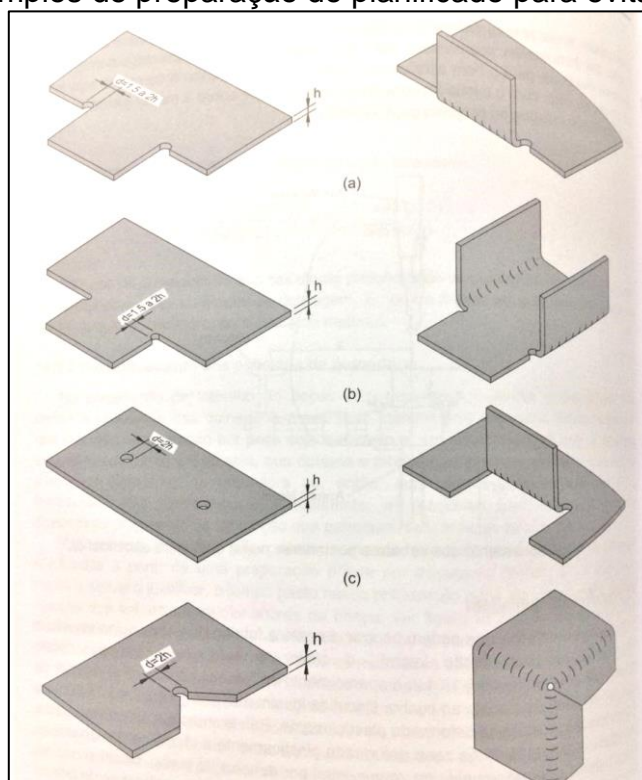
Em um material completamente isotrópico, todas as orientações estão presentes em uma base igual. O material é isotrópico com respeito às propriedades mecânicas associadas. Na maioria dos casos, no entanto, existe uma tendência de os grãos terem certos planos cristalográficos ou direções, claramente alinhadas com a direção da primeira conformação. Como resultado, alguns sistemas são orientados, o que permite uma deformação mais fácil em algumas direções do que em outras. Esta condição cria anisotropia plástica, em que as propriedades na direção de laminação são diferentes das direções transversais.

O grau de anisotropia é estreitamente relacionado a estrutura cristalina do metal ou liga. Em geral, a anisotropia desenvolve-se mais fortemente em metais com estrutura hexagonal (berílio, titânio, zircônio) do que em metais com estrutura cúbica de corpo centrado ou face centrada (aço, cobre, alumínio, bronze). O tipo e quantidade de elementos de liga também influenciam a natureza da anisotropia. Um excelente exemplo é o efeito do alumínio no aumento da anisotropia. Para um dado metal e composição, a anisotropia plástica é uma consequência de toda sua história de processamento (KEELER, 1968).

As características da deformação plástica no dobramento dependem dos parâmetros de fabricação selecionados (raio interno de dobra, abertura da matriz, etc.). Além disso, para produção de peças através do dobramento, algumas regras de projeto devem ser observadas para evitar alguns desses fenômenos a fim de obter produtos de melhor qualidade.

Para que não apareçam fendas ou o embeijamento nas zonas de transição entre as partes retas e dobradas deve-se suavizar esses efeitos no momento da preparação da chapa planificada, conforme indicado na figura 12.

Figura 12 – Exemplos de preparação do planificado para evitar alguns defeitos

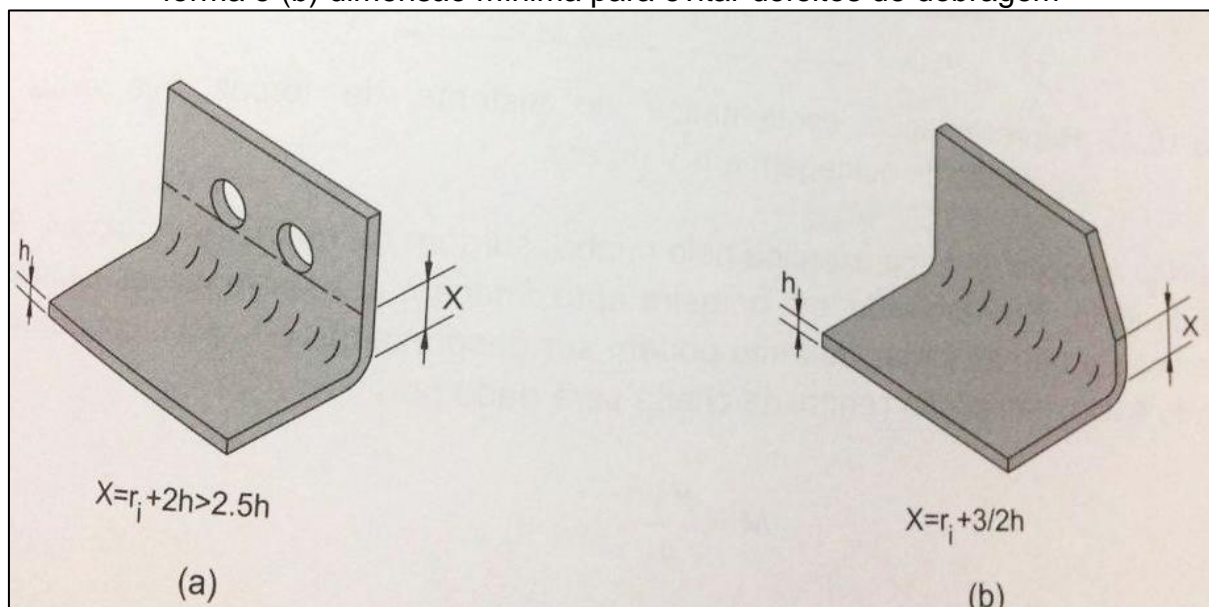


Fonte: Rodrigues e Martins (2010)

No caso de existirem furações próximas à linha de dobra, deve-se respeitar uma distância mínima para evitar deformações nesses furos após a dobragem (Figura 13(a)). Também deve ser respeitada uma dimensão mínima para quando forem projetadas peças com abas pequenas, para que assim se evitem defeitos no dobramento (Figura 13(b)) (RODRIGUES E MARTINS, 2010).

Outros pequenos defeitos que podem surgir após o dobramento são nas zonas de concordância, ou seja, no final das linhas de dobra ou no encontro entre duas abas dobradas.

Figura 13 – (a) Dimensão mínima entre furos e linha de dobra para evitar defeitos de forma e (b) dimensão mínima para evitar defeitos de dobragem



Fonte: Rodrigues e Martins (2010)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo descreve-se a metodologia de execução dos ensaios e a realização dos mesmos. Para mensurar as diferenças, variáveis do processo foram alternadas, juntamente com o material dos corpos de prova a serem trabalhados. Após, foram analisadas a presença de falhas e o retorno elástico obtido. Pretendeu-se encontrar uma relação entre os defeitos ocorridos diariamente no chão de fábrica e as variáveis que foram colocadas à prova nos ensaios.

Realizou-se uma análise dos fatores que influenciam nos desvios dimensionais das peças metálicas, estabelecendo algumas variáveis de interesse como:

- a) Material
- b) Sentido de dobra (paralelo e perpendicular)
- c) Raio de dobramento

Os materiais escolhidos para realização dos ensaios foram o SAE 1008 na espessura de 3 mm, comercializado pela PANASER S.A, e o ASTM A36 na espessura de 6,35 mm e 9,52 mm, fornecido pela usina ARCELOR MITTAL BRASIL S.A. Os certificados de matéria prima das chapas estão dispostos no Anexo A. Esses materiais foram escolhidos pelo fato de serem os dois tipos mais utilizados na fabricação pela empresa Metalgava Componentes LTDA. A diferença entre os dois tipos de material se dá, basicamente, pelas propriedades mecânicas entre eles.

O planejamento dos experimentos está disposto na Tabela 4, onde estão todos os parâmetros escolhidos para realização dos mesmos. Foram definidos os raios internos de dobra de acordo com o ferramental disponível na empresa, buscando utilizar os valores mais próximos aos indicados na literatura, porém respeitando as configurações de montagem do conjunto punção e matriz mais utilizadas no processo de produção diário da empresa. Foi realizado o ensaio completo para todos os aços, gerando um total de 18 corpos de prova para cada espessura.

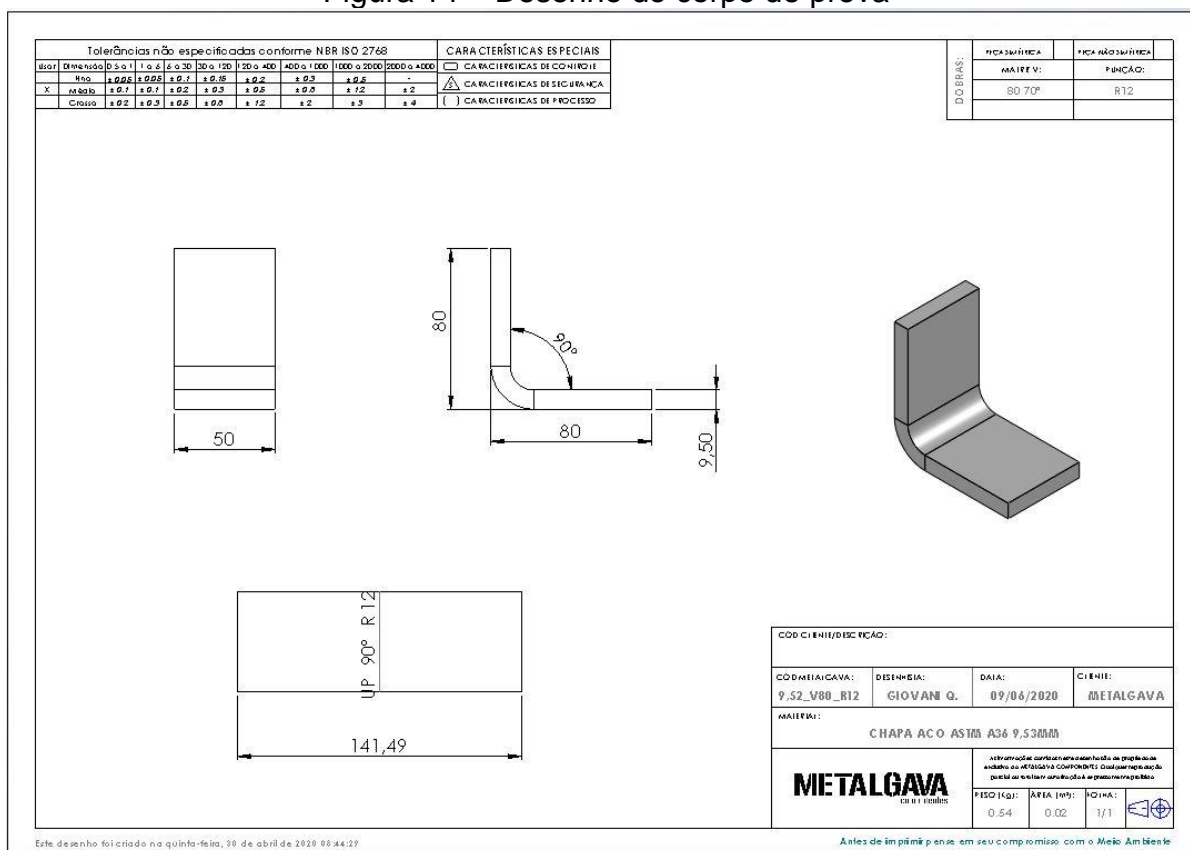
Tabela 4 - Parâmetros dos ensaios

PARÂMETROS DOS ENSAIOS					
MATERIAL	ESPESSURA DA CHAPA (mm)	SENTIDO DE LAMINAÇÃO	ABERTURA DA MATRIZ (mm)	RAIO INTERNO (mm)	CORPO DE PROVA
SAE 1008	e = 3 mm	PERPENDICULAR	V = 24 mm	R = 1	1
		PARALELO			2
	e = 3 mm	PERPENDICULAR	V = 24 mm	R = 3	3
		PARALELO			4
	e = 3 mm	PERPENDICULAR	V = 24 mm	R = 5	5
		PARALELO			6
ASTM A36	e = 6,35 mm	PERPENDICULAR	V = 46 mm	R = 3	7
		PARALELO			8
	e = 6,35 mm	PERPENDICULAR	V = 46 mm	R = 5	9
		PARALELO			10
	e = 6,35 mm	PERPENDICULAR	V = 46 mm	R = 8	11
		PARALELO			12
ASTM A36	e = 9,52 mm	PERPENDICULAR	V = 80 mm	R = 8	13
		PARALELO			14
	e = 9,52 mm	PERPENDICULAR	V = 80 mm	R = 10	15
		PARALELO			16
	e = 9,52 mm	PERPENDICULAR	V = 80 mm	R = 12	17
		PARALELO			18

Fonte: O Autor (2020)

Os corpos de prova foram produzidos conforme o desenho indicado na Figura 14. As amostras foram dimensionadas de acordo com as ferramentas utilizadas, pois foi necessário adequar o comprimento dos corpos de prova para obtenção do desenvolvimento das peças.

Figura 14 – Desenho do corpo de prova



Fonte: Metalgava Componentes (2020)

A produção das amostras foi realizada através do processo de corte laser, utilizando a máquina TruLaser 5030, da fabricante alemã Trumpf, mostrada na figura 15.

Figura 15 – Máquina de corte laser TruLaser 5030



Fonte: O Autor (2020)

Esse equipamento foi escolhido por ser o mais potente disponível na empresa (5000 W) e como consequência o que deixa o melhor acabamento nas arestas das peças – ranhuras pequenas e sem rebarbas. A Figura 16 apresenta dois corpos de prova cortados.

Figura 16 – Corpos de prova



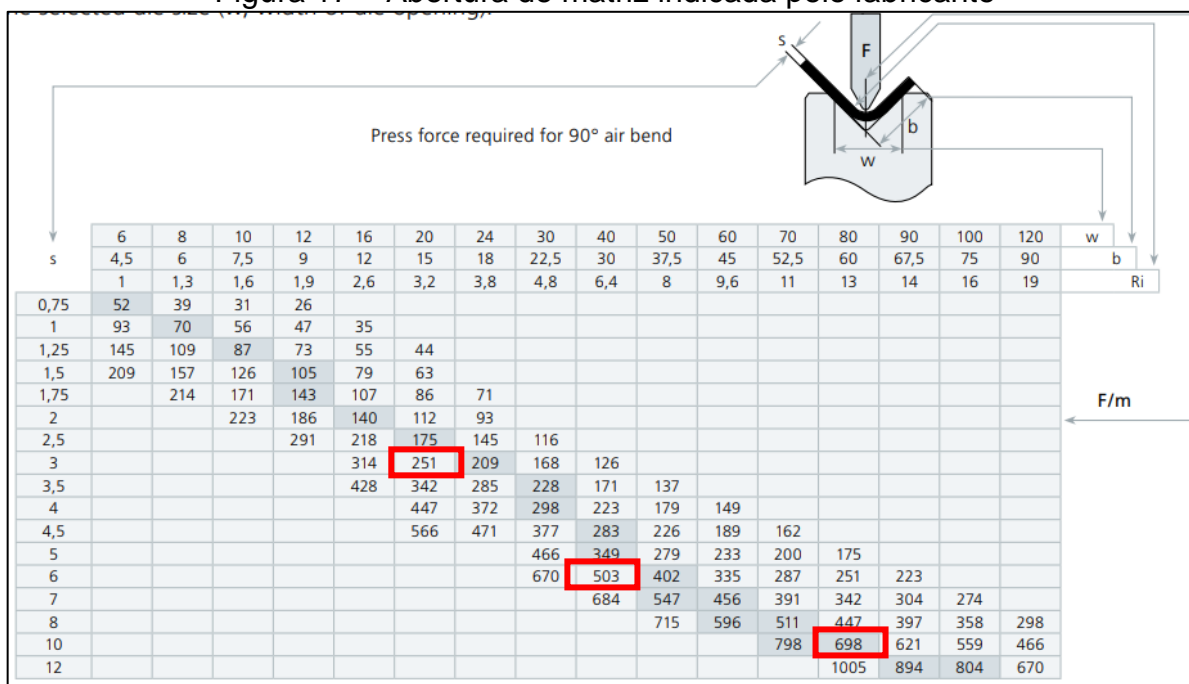
Fonte: O Autor (2020)

Os ensaios práticos foram realizados através do processo de dobramento aéreo, onde sempre há três pontos de apoio, dois na matriz inferior e um no centro do corpo de prova através do raio do punção. As ferramentas escolhidas foram as indicadas pelo fabricante. A alemã Trumpf sugere uma abertura de matriz ideal para cada espessura de material, conforme Figura 17.

Observando a figura, para as chapas de 3 mm de espessura, a abertura w indicada é 24 mm. Para as chapas de 6,35 mm, a abertura mais indicada fica entre 50 e 60 mm. Para tentar forçar possíveis falhas durante o processo, foram escolhidas matrizes menores que as indicadas. Dessa forma, para 3 mm de espessura foi

utilizada a matriz com abertura $w = 20$ mm, e para 6,35 mm de espessura foi utilizada uma matriz com abertura de 40 mm (Figura 18). Para as chapas de 9,52 mm, a abertura mais indicada fica entre 70 e 80 mm. A empresa possui matriz com 80 mm de abertura, então essa foi utilizada para a espessura mencionada.

Figura 17 – Abertura de matriz indicada pelo fabricante



Fonte: Trumpf

Figura 18 – Matriz V 40 mm



Fonte: O Autor (2019)

As ferramentas foram montadas e os testes foram realizados na máquina que está ilustrada na Figura 19, uma prensa dobradeira de acionamento servo-hidráulico. Devido à força de dobramento exigida para os testes nas espessuras escolhidas, foi escolhida a máquina modelo HG2204, do fabricante AMADA de origem japonesa. Possui capacidade de fornecer 220 kN de força durante o dobramento, dispõe de uma mesa de 4300 mm de comprimento e controle por comando numérico (CN). A velocidade de conformação pode chegar a 20 mm/s.

Figura 19 – Dobradeira CNC



Fonte: Amada América

A força de dobramento exercida durante o processo foi coletada no próprio controlador da máquina. O painel mostra a força total utilizada no momento da dobra, com isso foram coletados os dados no ponto em que o avental da máquina está no ponto morto inferior (posição mais baixa durante o dobramento).

3.1.1 Análises

Após efetuados os ensaios de dobramento, os corpos de prova foram submetidos a diferentes tipos de análises conforme indicado na sequência.

- Análise do retorno elástico;
- Análise visual da presença de trincas;

Na determinação do retorno elástico, foi realizada uma referência medindo-se um corpo de prova descartável durante a conformação. Devido ao acionamento ser servo-hidráulico, foi interrompido o processo, ainda com a máquina em final de curso inferior e medido o ângulo do corpo de prova. Todo corpo de prova de referência foi descartado, pois o tempo de parada para a medição influenciaria os resultados. Os corpos de prova foram inspecionados em busca do ângulo resultante do processo de dobramento, comparando o planejado com o realizado. Para essa inspeção foi utilizado um medidor de ângulo digital do próprio fabricante da dobradeira, que está apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Medidor de ângulo digital



Fonte: Amada America

Também foi realizada uma análise visual da presença de trincas nos corpos de prova. Essa análise não contou com nenhum instrumento de medição, pois é um defeito de fácil visualização e não requer comparativo dimensional, apenas um resultado binário.

3.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados obtidos nos ensaios estão dispostos nos Apêndices A, B e C. Nestas tabelas, encontram-se os valores de força máxima, o ângulo de referência, ângulo medido de cada corpo após os ensaios, bem como as espessuras da chapa e

do centro da dobra. A figura 21 mostra um corpo de prova, em ensaio, cujos resultados serão discutidos nas subseções a seguir.

Figura 21 – Corpo de prova em ensaio



Fonte: O Autor (2020)

3.3 DISCUSSÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos na forma de gráficos, tabelas e imagens, e realizada a discussão e comparação dos dados práticos e simulados com as referências bibliográficas.

3.3.1 Retorno elástico

Segundo SCHAEFFER (2004), para o dobramento, na passagem do limite de escoamento de compressão para o limite de escoamento de tração ocorrem tensões correspondentes ao estado elástico do material, nesta zona o material é deformado apenas elasticamente. Assim que forças internas não mais atuam sobre a peça as partes sob deformação elástica tendem a retornar a sua posição inicial. Isso ocorreu tanto no aço SAE 1008 quanto no aço ASTM A36.

Os resultados no processo de dobra foram satisfatórios considerando os valores obtidos, pois foi possível observar uma variação no retorno elástico quando

testadas as peças cortadas com sentido de laminação diferentes entre si. Como mencionado no capítulo anterior, foi realizada uma medição do ângulo de referência na primeira peça de cada subgrupo e após foi comparado com o ângulo obtido após a retirada da peça da máquina.

Na Tabela 5 é possível observar os resultados para o aço SAE 1008 na espessura de 3 mm.

Tabela 5 – Retorno elástico para o aço SAE 1008 com espessura 3 mm

SENTIDO DOBRA	ABERTURA DA MATRIZ [mm]	RAIO INTERNO [mm]	RETORNO ELÁSTICO [°] (MÉDIA DAS 3 AMOSTRAS)
PARALELO	20	1	2,10
PERPENDICULAR	20	1	1,60
PARALELO	20	3	2,20
PERPENDICULAR	20	3	1,77
PARALELO	20	5	2,67
PERPENDICULAR	20	5	2,33

Fonte: O Autor (2020)

Para a espessura de 6,35 mm, os resultados estão dispostos da Tabela 6. Os ensaios apresentaram resultados semelhantes ao aço SAE 1008, porém é possível notar uma leve redução no retorno elástico.

Tabela 6 – Retorno elástico para o aço ASTM A36 com espessura 6,35 mm

SENTIDO DOBRA	ABERTURA DA MATRIZ [mm]	RAIO INTERNO [mm]	RETORNO ELÁSTICO [°] (MÉDIA DAS 3 AMOSTRAS)
PARALELO	40	3	1,60
PERPENDICULAR	40	3	1,30
PARALELO	40	5	2,00
PERPENDICULAR	40	5	1,80
PARALELO	40	8	2,37
PERPENDICULAR	40	8	2,23

Fonte: O Autor (2020)

Na Tabela 7 estão dispostos os resultados para o aço ASTM A36 na espessura de 9,52 mm.

Tabela 7 – Retorno elástico para o aço ASTM A36 com espessura 9,52 mm

SENTIDO DOBRA	ABERTURA DA MATRIZ [mm]	RAIO INTERNO [mm]	RETORNO ELÁSTICO [°] (MÉDIA DAS 3 AMOSTRAS)
PARALELO	80	8	0,90
PERPENDICULAR	80	8	0,83
PARALELO	80	10	2,17
PERPENDICULAR	80	10	1,80
PARALELO	80	12	2,23
PERPENDICULAR	80	12	1,97

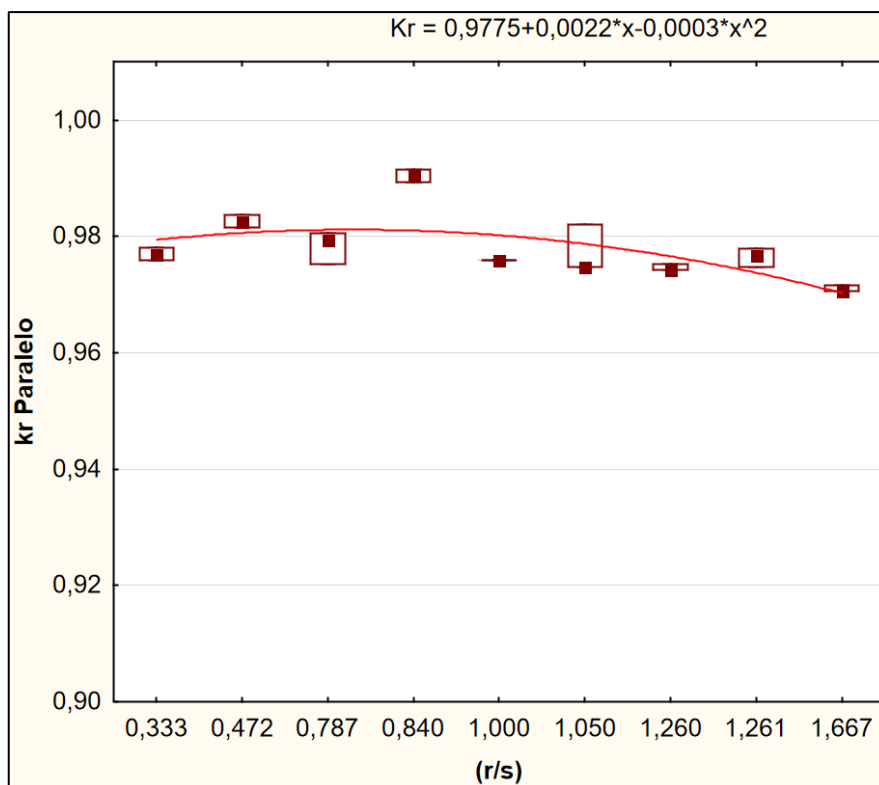
Fonte: O Autor (2020)

Os valores do retorno elástico seguem uma tendência: com o aumento da espessura, o retorno elástico foi menor. Esse resultado é coerente com a bibliografia pesquisada, tendo como base que vários autores indicam a espessura como uma das variáveis responsáveis pelo retorno elástico. Isso pode ser confirmado através da equação (11) proposta por Rodrigues e Martins (2010), em que a espessura é o denominador, ou seja, com o aumento da espessura, conseqüentemente, o retorno elástico é menor. Isso se deve ao fato de que quanto fisicamente mais espesso o material, maior é a região plastificada em relação à região elástica.

Para a análise de variação do retorno elástico também foi calculada a constante K_r . Esse cálculo está disposto na Equação 13, e conforme Rodrigues e Martins (2010), o mesmo demonstra a recuperação elástica em torno da linha média, obtendo-se pela constância do seu comprimento. Os gráficos referentes ao cálculo da constante K_r estão dispostos nas Figuras 22 e 23.

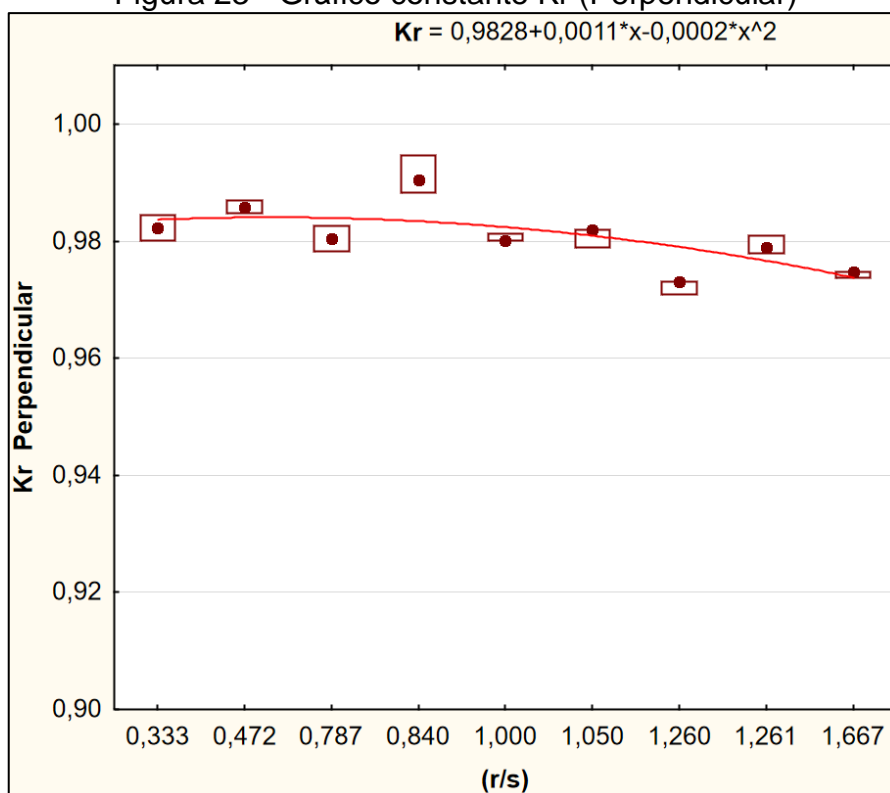
Analisando os gráficos é possível verificar que as amostras ensaiadas possuem um comportamento similar ao que indica a literatura, pois à medida que a relação r/s aumenta, o valor de K_r diminui. Isso se explica pelo fato de que para uma mesma espessura, por exemplo, conforme o raio do punção aumenta, também cresce a região do material que sofre deformações elásticas, o que confirma o citado por Tekaslan (2006), que o retorno elástico aumenta com o aumento do raio do cutelo utilizado.

Figura 22 – Gráfico constante Kr (Paralelo)



Fonte: O Autor (2020)

Figura 23 - Gráfico constante Kr (Perpendicular)



Fonte: O Autor (2020)

Observa-se que nas equações de ajuste o maior K_r é obtido para a condição da linha de dobra estar posicionada no sentido perpendicular ao sentido de laminação. Este fato é consistente com a literatura (TSOUPIS et al 2014) considerando a anisotropia gerada durante a laminação devido à deformação dos grãos da estrutura do metal. Um valor mais elevado de K_r indica que o retorno elástico foi menor, pois o mesmo varia de 0 a 1, onde 1 é o valor para um retorno elástico igual a zero.

O que fica claro em todas as análises do retorno elástico é que os valores sofrem alterações quando comparados sentidos de laminação diferentes. Todas as amostras produzidas no sentido perpendicular à laminação da chapa (longitudinal às ferramentas de dobra) apresentaram valores maiores no retorno elástico. Isso se explica pelo fato de as forças de tração atuarem transversalmente à laminação, onde a tensão de escoamento e a limite são maiores.

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. A própria dobradeira já realiza essa compensação de acordo com os parâmetros inseridos na programação do processo, porém, devido às chapas de aço não possuírem propriedades mecânicas uniformes, ajustes são necessários para corrigir o ângulo após o dobramento entre uma peça e outra.

3.3.2 Presença de trincas

Em todos os corpos de prova ensaiados foi realizada uma análise visual para verificação da presença de trincas. Ao dobrar as chapas, notou-se o surgimento de trincas em alguns corpos de prova, provenientes dos esforços de tração ao quais as chapas foram submetidas conforme apresentado por SCHAEFFER (2004). Estas trincas surgiram nas extremidades das chapas, onde a concentração de tensões é maior. A Figura 24 mostra o corpo de prova número 20 com a presença de trincas.

Nos anexos B, C e D podem-se verificar quais corpos de prova apresentaram trincas. Para resumir os dados, na Tabela 8 é possível verificar que as amostras que apresentaram trincas na superfície oposta foram as produzidas em aço ASTM A36, e cujo sentido do corte foi perpendicular ao sentido de laminação da chapa.

Figura 24 – Trincas no corpo de prova número 20



Fonte: O Autor (2020)

Tabela 8 – Presença de trincas nas amostras ensaiadas

CORPO DE PROVA	MATERIAL	ESPESSURA [mm]	SENTIDO DOBRA	ABERTURA DA MATRIZ [mm]	RAIO INTERNO [mm]	PRESENÇA DE TRINCAS
19	ASTM A36	6,35	PARALELO	40	3	S
20	ASTM A36	6,35	PARALELO	40	3	S
21	ASTM A36	6,35	PARALELO	40	3	S
25	ASTM A36	6,35	PARALELO	40	5	S
26	ASTM A36	6,35	PARALELO	40	5	S
27	ASTM A36	6,35	PARALELO	40	5	S
31	ASTM A36	6,35	PARALELO	40	8	S
32	ASTM A36	6,35	PARALELO	40	8	S
33	ASTM A36	6,35	PARALELO	40	8	S

Fonte: Autor (2020)

Analisando os dados da tabela, é possível observar que as trincas ocorreram apenas nos corpos de prova em que a dobra foi realizada no sentido paralelo à laminação da chapa. Isso corrobora o que foi citado por Boljanovic (2004), que se o dobramento for executado paralelamente ao sentido de laminação, podem ocorrer separações nos grãos e acarretar no surgimento de trincas do lado externo da dobra.

3.3.3 Proposta de solução

Através dos dados apresentados nas seções anteriores, foi possível observar que o sentido de corte impacta diretamente o retorno elástico e também na presença de trincas em determinadas espessuras de chapa metálica.

Dessa forma, analisando o processo atual de produção de peças na empresa Metalgava Componentes, algumas medidas podem ser tomadas com o intuito de diminuir o tempo de processo no setor de dobra e também o refugo de peças devido à não conformidades, sejam elas dimensionais ou por fissuras após aplicação da força de dobramento na peça.

Atualmente as peças são produzidas de acordo com as quantidades presentes nos pedidos enviados pelos clientes. Esses pedidos são agrupados por data de entrega, e a programação do corte laser é realizada pensando no maior aproveitamento de material possível. Ou seja, as peças são agrupadas por espessura, e após é feito um aninhamento tentando colocar sempre o maior número de peças possível na chapa de aço.



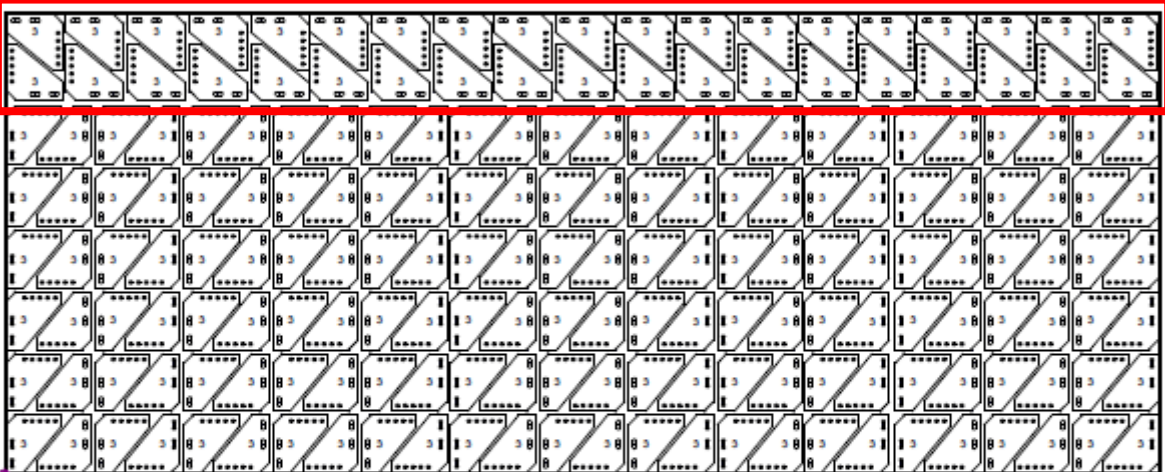
Devido a essa necessidade de se ocupar sempre o maior espaço possível encaixando peças na chapa, quando as peças são enviadas ao setor de dobra o lote está todo misturado, com peças cortadas em todos os sentidos. Assim, o operador da dobradeira faz o *setup* do equipamento e começa a produção com base em uma peça aleatória dentro do lote. Porém, devido ao fato de não haver uma separação ou um bloqueio do sentido de corte das peças, em um mesmo lote sendo dobrado várias regulagens precisam ser feitas no equipamento para compensar as variações nas medidas externas e no ângulo de dobra devido ao retorno elástico.

A otimização da utilização do material nos distintos aninhamentos é vital quando as peças permanecem planas. Porém, conforme visto nos resultados das seções anteriores, se lotes de peças estiverem sendo dobrados com algumas peças contra, outras a favor e outros na diagonal à direção da granulação do aço, cada ângulo e dimensão podem variar dentro de todo o lote.

Um exemplo disso é apresentado na Figura 25, que mostra o plano de corte de uma peça (Figura 26) que possui dobra. Na maior parte do aninhamento as peças estão dispostas de modo com que a linha de dobra fique no sentido perpendicular ao sentido de laminação da chapa, porém, no mesmo plano existem fileiras de peças -

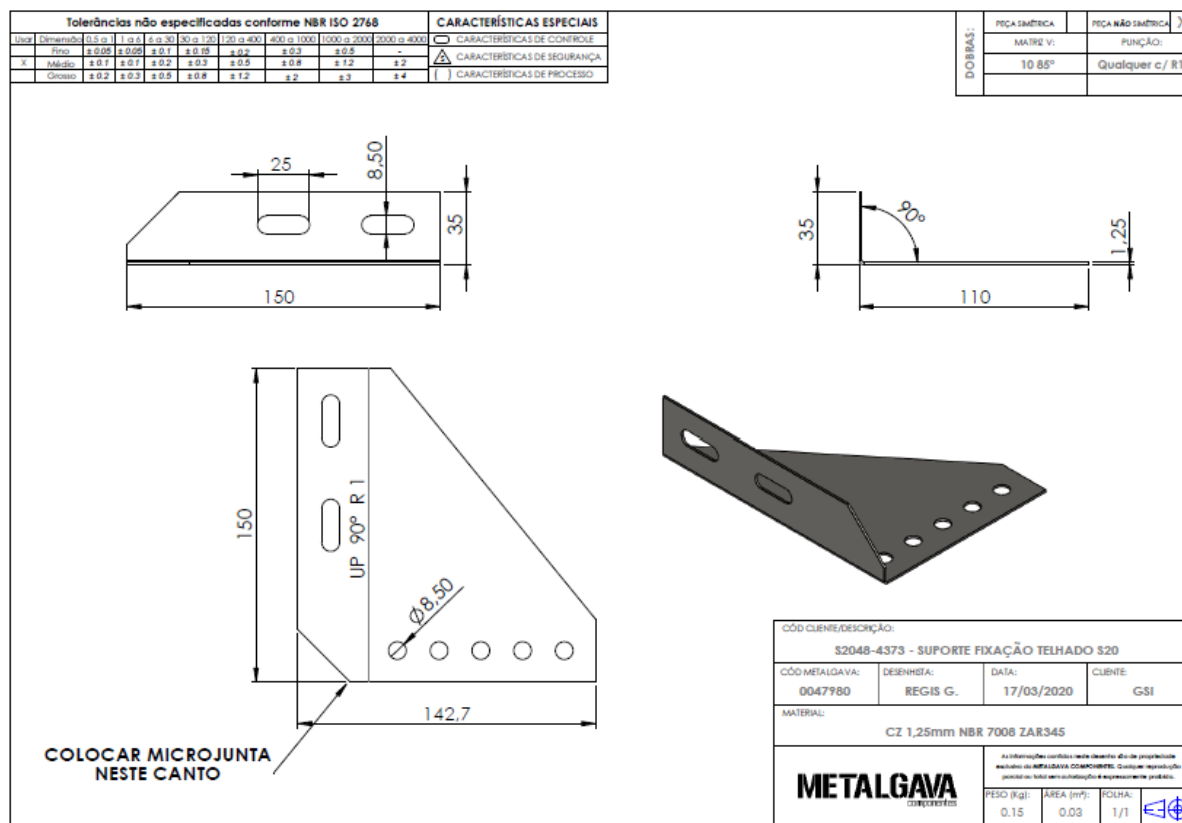
destacadas em vermelho - em que a linha de dobra ficará no sentido contrário, paralelo à laminação da chapa.

Figura 25 – Exemplo de plano de corte da peça 0047980

		Referência	58125			Quantidade 10			
		Chapa	10813						
		Trabalho	JOB017644		3000	x 1200	x 1.25		
		CNC	389122						
		LEANDRO							
									
Máquina	3-TRULASER 3030 TRUMPF TRUFLOW 2000			Peso	35.55 kg				
Material	Galvanizado			X	2996.681				
Parâmetro	T2D-5888			Y	1197.581				
Cabeçote de Corte	5			Aproveitamento	27.842 kg				
Gás de Corte	Ar comprimido			Retalho	1.977 kg				
Tempo total	01:04:52.81			Sucata (%)	16.122				
Dado de utilizador 1									
#	Referência	Conjunto	Pedido	Tempo Unitário	Program.	Quantid.	Peso	Dimensões	
3	0047980	1586252	72661	00:00:20.07	1995	1940	0.144	142.681 x 150	

Fonte: Metalgava Componentes (2020)

Figura 26 – Desenho técnico da peça



Fonte: Metalgava Componentes (2020)

Para corrigir isso, deve-se cortar as peças de maneira uniforme, com a direção do grão marcada nas peças. Como resultado, a qualidade e a consistência da dobra serão aumentadas, produzindo melhores resultados e peças mais precisas.

Isso pode ser realizado no setor de engenharia, pois o software utilizado para envio do arquivo de corte para a programação permite o bloqueio da rotação e do espelhamento da peça no momento da realização do aninhamento.

O empecilho para realização dessa alteração seria um menor aproveitamento de material, dependendo da geometria das peças. No caso do item citado anteriormente — refazendo o aninhamento com todas as peças no mesmo sentido — o novo plano de corte teria 182 peças colocadas na chapa (Figura 27), enquanto no anterior (Figura 25) cabiam 194 peças. Isso representa uma redução de 6,5% no aproveitamento de material em uma chapa de 1200x3000 mm, pois haveria uma sobra de 100x3000 mm.

Havendo mais de uma repetição do plano de corte, essa redução se torna ainda maior pois a perda será multiplicada pelo número de vezes em que o programa

será executado. Dessa forma, a empresa deve realizar uma análise da viabilidade comparando a perda do material com o ganho de tempo em setup durante a produção.

Figura 27 – Novo plano de corte proposto

METALGAVA componentes	Referência	58131			Quantidade	10				
	Chapa	0U4								
	Trabalho	JOB017643		3000	x 1200	x 0.9				
	CNC	390041								
	Henrique									
										
Máquina	3-TRULASER 3030 TRUMPF TRUFLOW 2000				Peso	25.596 kg				
Material	Galvanizado				X	2984.781				
Parâmetro	T2D-5561				Y	1087.5				
Cabeçote de Corte	7.5				Aproveitamento	18.806 kg				
Gás de Corte	Oxigênio				Retalho	3.613 kg				
Tempo total	00:00:00.00				Sucata (%)	12.411				
Dado de utilizador 1										
#		Referência	Conjunto	Pedido	Tempo Unitário	Program.	Quantid.	Peso	Dimensões	
3		0047980	1586258	72668	00:00:00.00	1875	1820	0.103	142.681 x 150	

Fonte: Metalgava Componentes (2020)

4 CONCLUSÕES

A partir dos objetivos específicos, da revisão bibliográfica e dados dos fabricantes, foi possível avaliar as matérias primas aço SAE 1008 e ASTM A36, obtendo as variáveis significativas relatadas referente ao procedimento de dobra proposto neste trabalho. Neste sentido, com as informações pesquisadas foi possível ter embasamento técnico para avaliar o processo e compará-lo com a literatura.

O sentido de laminação influencia no retorno elástico do material, o que causa um aumento no tempo de regulagem do equipamento de dobra e consequente diminuição da produtividade. Dessa forma, concluiu-se que, para diminuir o tempo gasto com setup de equipamento, em um mesmo lote todas as peças devem ser cortadas no mesmo sentido.

A constante K_r calculada foi menor para as amostras dobradas no sentido perpendicular à laminação da chapa de aço, o que é um resultado satisfatório pois comprovou o que está indicado na literatura.

As amostras de espessura 6,35 mm em ASTM A36 cujo sentido de dobra foi paralelo ao sentido de laminação da chapa apresentaram trincas nas bordas do corpo de prova. Já as amostras produzidas com espessura 9,52 mm não apresentaram resultados significantes quanto à presença de trincas. A largura do corpo de prova para essa espessura pode ter sido insuficiente para poder avaliar os resultados.

Todas as situações de ensaio tiveram uma repetibilidade de, no mínimo, três vezes. As médias dos dados obtidos através dos ensaios de dobramento, foram calculadas considerando os valores de três ensaios para cada conjunto punção e matriz, realizados nas mesmas condições.

Com base nos resultados obtidos através dos ensaios de dobra e análises de retorno elástico e presença de trincas realizados nas amostras dos dois tipos de materiais, pode-se concluir que parâmetros como sentido de laminação e raio do punção de dobra influenciam diretamente na conformidade do material conformado.

Os dados obtidos foram claros e através deles é possível desenvolver um procedimento de fabricação seguro e confiável, podendo posteriormente quantificar os ganhos com relação ao tempo dispendido em regulagens de equipamento e peças fora dos padrões de conformidade.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparar a composição química da chapa de aço em vários pontos diferentes (início, final, próximo às bordas), para verificar se há diferença no processo de dobramento realizado com amostras nesses pontos;
- Realizar os testes de dobramento com materiais diferentes, porém de mesma espessura, a fim de fixar essa variável;
- Testar aços com limite de resistência mais elevado, por exemplo USI SAC ou HARDOX, a fim de verificar o comportamento do material quanto à presença de trincas e retorno elástico;
- Analisar o comportamento do retorno elástico em chapas de alumínio;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, A. B.; SAPUAN, S. M.; SAMAD, Z.; AZIZ, N. A. A comprehensive review of experimental approaches used in the measurement of springback. **Advances in Natural and Applied Sciences**, v. 2, n. 2, 2012.
- ASTM A36 / 36M. **Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards**. USA: [s.n.]. 2008. 4p.
- BACKOFEN, W.A. **Deformation processing**. Massachusetts: Addison Wesley Reading, 1972. 326p.
- BOLJANOVIC, V., **Sheet Metal Forming Processes and Die Design**, Industrial Press, New York, 2004. 230p.
- BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica dos metais**. 6 ed (1 digital). Campinas: EPUSP, 2011. 258p.
- CAMPOS, Polleri P. de, **Manual de Corte e Quinagem de Chapa Metálica**, Lisboa: CETOP, 1984.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. 599p.
- DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.
- GAN, W; WAGONER, R.H. **Die design method for sheet springback**, Artigo, Ohio State University, Columbus, 2004.
- GARCIA-ROMEU, M.L; CIURANA, J; FERRER, I. **Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work**, Artigo, Universidade de Girona, Girona, 2007.
- KEELER, Stuart P. **Determination of Forming Limits in Automotive Stamping**, Sheet Metal Industries, 1965.
- KEELER, Stuart P. **Proprieties related to forming**. Understanding sheet metal formability. Machinery; v. 74 n. 8, 1968.
- LAJARIN, S.F.; HAUS, S.A.; SANTOS, R.A.; MARCONDES, P.V.P. **Estudo do Retorno Elástico em Dobramento de Chapas Metálicas**. Artigo, CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7., 2012 São Luís. Anais VII CONEM.
- KRINNINGER, Michael; OPRITESCU, Daniel; GOLLE, Roland; VOLK, Wolfram. **Experimental investigation of the influence of punch velocity on the springback behavior and the flat length in free bending**, Artigo, Universidade Técnica de Munique, Munique, 2015.
- MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S. J. **Mechanics of sheet metal forming**. 2 ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2002. 211p.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica Volume II Tec. da Def. Plástica – Aplicações Industriais**, Portugal: Escolar Editora, 2010.

SALES, V. **Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. 3. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009. 167 p.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 193 p.

SCHEER, L. **Aço: Introdução a sua metalurgia, ao alcance de todos**. São Paulo: Villares, 1952. 99 p.

TEKASLAN, O.; SEKER, U.; OZDEMIR, A. Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5mm thickness in bending dies. **Materials and Design**, v. 27, 2006

TSOUPIS, I; HILDERING, S; MERKLEIN, M. Bending oh high-strength low-alloyed steel with respect to edge crack sensitivity caused by shearing operantios. **Procedia Engineering**, v. 81, 2014.

APÊNDICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS CHAPA 3 MM

ENSAIOS DE DOBRAMENTO								
CORPO DE PROVA	MATERIAL	SENTIDO DOBRA	MATRIZ	RAIO INTERNO	FORÇA	ÂNGULO DE REFERÊNCIA	ÂNGULO APÓS DOBRAMENTO	PRESENÇA DE TRINCAS
Nº	-	-	-	-	(kN)	Graus (°)	Graus (°)	-
1	SAE 1008	PARALELO	20	1	19,5	87,4	89,5	N
2	SAE 1008	PARALELO	20	1	19,5		89,4	N
3	SAE 1008	PARALELO	20	1	19,5		89,6	N
4	SAE 1008	PERPENDICULAR	20	1	19,5	87,3	88,9	N
5	SAE 1008	PERPENDICULAR	20	1	19,5		88,7	N
6	SAE 1008	PERPENDICULAR	20	1	19,5		89,1	N
7	SAE 1008	PARALELO	20	3	20,5	87,7	89,9	N
8	SAE 1008	PARALELO	20	3	20,5		89,9	N
9	SAE 1008	PARALELO	20	3	20,5		89,9	N
10	SAE 1008	PERPENDICULAR	20	3	20,5	87,4	89,2	N
11	SAE 1008	PERPENDICULAR	20	3	20,5		89,1	N
12	SAE 1008	PERPENDICULAR	20	3	20,5		89,2	N
13	SAE 1008	PARALELO	20	5	23,2	87,5	90,2	N
14	SAE 1008	PARALELO	20	5	23,2		90,2	N
15	SAE 1008	PARALELO	20	5	23,2		90,1	N
16	SAE 1008	PERPENDICULAR	20	5	23,2	87,3	89,7	N
17	SAE 1008	PERPENDICULAR	20	5	23,2		89,6	N
18	SAE 1008	PERPENDICULAR	20	5	23,2		89,6	N

APÊNDICE B - RESULTADOS DOS ENSAIOS CHAPA 6,35 MM

ENSAIOS DE DOBRAMENTO								
CORPO DE PROVA	MATERIAL	SENTIDO DOBRA	MATRIZ	RAIO INTERNO	FORÇA	ÂNGULO DE REFERÊNCIA	ÂNGULO APÓS DOBRAMENTO	PRESENÇA DE TRINCAS
N°	-	-	-	-	(kN)	Graus (°)	Graus (°)	-
19	ASTM A36	PARALELO	40	3	51,3	87,4	89,0	S
20	ASTM A36	PARALELO	40	3	51,3		88,9	S
21	ASTM A36	PARALELO	40	3	51,3		89,1	S
22	ASTM A36	PERPENDICULAR	40	3	51,3	87,2	88,5	N
23	ASTM A36	PERPENDICULAR	40	3	51,3		88,4	N
24	ASTM A36	PERPENDICULAR	40	3	51,3		88,6	N
25	ASTM A36	PARALELO	40	5	51,3	87,3	89,6	S
26	ASTM A36	PARALELO	40	5	51,3		89,1	S
27	ASTM A36	PARALELO	40	5	51,3		89,2	S
28	ASTM A36	PERPENDICULAR	40	5	51,3	87,0	89	N
29	ASTM A36	PERPENDICULAR	40	5	51,3		88,6	N
30	ASTM A36	PERPENDICULAR	40	5	51,3		88,8	N
31	ASTM A36	PARALELO	40	8	56,5	87,4	89,7	S
32	ASTM A36	PARALELO	40	8	56,5		89,8	S
33	ASTM A36	PARALELO	40	8	56,5		89,8	S
34	ASTM A36	PERPENDICULAR	40	8	56,5	87,2	89,5	N
35	ASTM A36	PERPENDICULAR	40	8	56,5		89,5	N
36	ASTM A36	PERPENDICULAR	40	8	56,5		89,3	N

APÊNDICE C - RESULTADOS DOS ENSAIOS CHAPA 9,52 MM

ENSAIOS DE DOBRAMENTO								
CORPO DE PROVA	MATERIAL	SENTIDO DOBRA	MATRIZ	RAIO INTERNO	FORÇA	ÂNGULO DE REFERÊNCIA	ÂNGULO APÓS DOBRAMENTO	PRESENÇA DE TRINCAS
N°	-	-	-	-	(kN)	Graus (°)	Graus (°)	-
37	ASTM A36	PARALELO	80	8	64,7	88,2	89,2	N
38	ASTM A36	PARALELO	80	8	64,7		89,1	N
39	ASTM A36	PARALELO	80	8	64,7		89,0	N
40	ASTM A36	PERPENDICULAR	80	8	64,7	88,2	89,1	N
41	ASTM A36	PERPENDICULAR	80	8	64,7		89,3	N
42	ASTM A36	PERPENDICULAR	80	8	64,7		88,7	N
43	ASTM A36	PARALELO	80	10	67,8	88,1	89,8	N
44	ASTM A36	PARALELO	80	10	67,8		90,5	N
45	ASTM A36	PARALELO	80	10	67,8		90,5	N
46	ASTM A36	PERPENDICULAR	80	10	64,7	88,0	89,7	N
47	ASTM A36	PERPENDICULAR	80	10	64,7		90,0	N
48	ASTM A36	PERPENDICULAR	80	10	64,7		89,7	N
49	ASTM A36	PARALELO	80	12	65,7	88,0	90,1	N
50	ASTM A36	PARALELO	80	12	67,8		90,2	N
51	ASTM A36	PARALELO	80	12	67,8		90,4	N
52	ASTM A36	PERPENDICULAR	80	12	67,8	88,0	90	N
53	ASTM A36	PERPENDICULAR	80	12	67,8		89,8	N
54	ASTM A36	PERPENDICULAR	80	12	67,8		90,1	N