



Darlan Magnos Scheid

**INFLUÊNCIA DOS RAIOS DE ALÍVIO SOBRE A FORMAÇÃO DE TRINCAS NO
PROCESSO DE DOBRAMENTO DE CHAPAS EM AÇO ASTM A572 GRAU 50**

Horizontina - RS

2021

Darlan Magnos Scheid

**INFLUÊNCIA DOS RAIOS DE ALÍVIO SOBRE A FORMAÇÃO DE TRINCAS NO
PROCESSO DE DOBRAMENTO DE CHAPAS EM AÇO ASTM A572 GRAU 50**

Projeto do Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a o Trabalho Final de Curso na Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina, sob orientação do Prof. Me. Paulo Augusto Soliman.

Horizontina - RS

2021

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“Influência dos raios de alívio sobre a formação de trincas no processo de
dobramento de chapas em aço ASTM A572 grau 50”**

**Elaborada por:
Darlan Magnos Scheid**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 06/12/2021
Pela Comissão Examinadora

Prof. Me. Paulo Augusto Soliman
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Prof. Me. Luis Carlos Wachholz
FAHOR – Faculdade Horizontina

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS
2021**

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim. Aos meus pais os quais sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram durante todo o percurso. Aos meus amigos e ao meu orientador Prof. Me. Paulo Soliman que confiaram em mim durante todo este percurso e me suportaram para que fosse possível realizar este projeto.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida e por me tornar capaz de enfrentar todos os obstáculos ao longo desta jornada, aos meus pais e irmão que sempre estiveram ao meu lado e não mediram esforços para tornar este sonho realidade. Agradeço aos meus amigos e colegas os quais sempre estiveram do meu lado durante este percurso e ao meu orientador pela amizade, compreensão e transferência de conhecimento. Aos professores e a instituição de ensino FAHOR por todo o conhecimento e oportunidades que me foram dados. A todos um sincero muito obrigado.

“Uma das grandes descobertas que um homem pode fazer, uma de suas grandes surpresas, é descobrir que ele pode fazer o que temia que não pudesse fazer”.

Henry Ford

RESUMO

O processo de conformação de chapas metálicas apresenta ampla aplicação industrial devido as mais diversas formas geométricas que este processo é capaz de produzir. Neste tipo de processo uma chapa metálica é exposta simultaneamente a esforços de tração e compressão o que em algumas situações pode acabar por gerar defeitos. O projeto surgiu advinda a necessidade da obtenção de análise a fatores ainda pouco abordados no processo de conformação a frio usando o aço ASTM A572/A572M com 6 mm de espessura, tendo por objetivo analisar e expor os principais fatores responsáveis por desencadear trincas durante o processo de conformação a frio. O método contemplado neste estudo é a pesquisa experimental com uma abordagem combinada entre qualitativa e quantitativa possuindo como predominância um caráter explicativo de forma a explorar e expor os fenômenos de maior influência no surgimento de trincas. As análises presentes no projeto para obtenção dos resultados consistiram na alternância do sentido de laminação da fibra metálica em relação a linha neutra de dobra. Para o emprego de 5 raios de alívio de dobra distintos, obtido 10 amostras que foram avaliadas através de microscópio óptico, com póstuma seleção de duas amostras para realização de ensaio de microdureza. Os resultados obtidos através de análises práticas comprovaram um maior surgimento de trincas e considerável aumento do encruamento para raios de alívio de dobra inferiores a 12 mm quando seu sentido de laminação for longitudinal, em contrapartida os corpos de prova com sentido de laminação transversal apenas apresentaram trincas a um raio de alívio de dobra inferior a 6 mm. Desta maneira pode-se definir um fator de produto para raio de alívio de dobra igual a 2.5 vezes a espessura do componente, evitando assim o surgimento de trincas ou um alto nível de encruamento do componente.

Palavras-chave: Conformação mecânica. Dobramento. Raio de alívio de dobra. Direção de Laminação. Trincas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fibras deformadas após dobra	16
Figura 2 – Esquema do retorno elástico.....	17
Figura 3 – Dobra em V	18
Figura 4 – Ferramenta para dobra estampada.....	19
Figura 5 – Processo de dobra rotativa	19
Figura 6 – Características da superfície na utilização do microscópio	21
Figura 7 – Ilustração do ensaio de dureza Vickers.....	23
Figura 8 – Dispositivo de dobramento com dois suportes e um cutelo	26
Figura 9 – Medidas do corpo de prova plano	32
Figura 10 – Corpo de prova dobrado	33
Figura 11 – Amostra de tecnologia de corte de uma das amostras	34
Figura 12 – Ferramentas de dobra – pré dobra.....	35
Figura 13 – Ferramentas para Amassado	35
Figura 14 – Processo de conformação dos corpos de prova	36
Figura 15 – Sistema para obtenção de imagens dos corpos de prova.....	37
Figura 16 – Análise do corpo de prova.....	37
Figura 17 – Resultado do seccionamento da amostra	38
Figura 18 – Embutimento da amostra	39
Figura 19 – Equipamento para análise de microdureza	40
Figura 20 – Locais de análise de Microdureza na amostra	40
Figura 21 – Corpos de prova com sentido de dobra longitudinal	41
Figura 22 – Corpos de prova com sentido de dobra transversal	42
Figura 23 – Análise dos corpos de prova de sentido de laminação longitudinal.	43
Figura 24 – Análise dos corpos de prova com laminação transversal.....	44
Figura 25 – Pontos de medição da amostra.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tabela de Raios mínimos de dobra	28
Quadro 2 – Parâmetros de teste do corpo de prova	31
Quadro 3 – Resultados de microdureza para amostra de raio de alívio de dobra 3 mm	45
Quadro 4 - Resultados de microdureza para amostra de raio de alívio de dobra 15 mm	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espessura ou Tamanho máximo do produto	24
Tabela 2 – Requisitos químicos	25
Tabela 3 – Requisitos de Tensão	26

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASM – *American Society for Metals*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

HV – *Hardness Vickers*

NBR – Norma Brasileira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	TEMA	12
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	12
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.4	HIPÓTESES	13
1.5	JUSTIFICATIVA	13
1.6	OBJETIVOS	14
1.6.1	Objetivo geral	14
1.6.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	PROCESSO DE CONFORMAÇÃO POR DOBRA EM CHAPAS METÁLICAS	15
2.1.1	Linha neutra	15
2.1.2	Retorno elástico	16
2.2	MÁQUINA DE DOBRA	17
2.3	TIPOS DE PROCESSO DE DOBRA	17
2.4	METALOGRAFIA	20
2.4.1	Ensaio metalográfico	20
2.5	MICRODUREZA VICKERS	22
2.6	NORMATIVA ASTM	23
2.6.1	ASTM A572/A572M – Norma padrão para aços estruturais de baixa liga e alta resistência de Nióbio-Vanádio	24
2.7	NORMATIVAS ABNT NBR	25
2.7.1	NBR 7438 Materiais Metálicos – Ensaio de Dobramento	25
2.8	INFLUÊNCIA DO RAIO E PUNÇÃO E SENTIDO DE LAMINAÇÃO EM ITENS DOBRADOS	28
3	METODOLOGIA	29
3.1	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	29
3.1.1	Método de pesquisa adotado	29
3.1.2	Quanto à abordagem	30
3.1.3	Quanto aos objetivos	31
3.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	31
3.2.1	Definição dos parâmetros de teste	31
3.2.2	Corpos de prova	32
3.2.3	Corte e conformação das amostras	33
3.2.4	Análise dos corpos de prova	36
3.2.5	Preparação das amostras	38
3.2.6	Ensaio de Microdureza	39
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
4.1	EMPRESA DE ESTUDO	41
4.2	CORPOS DE PROVA DOBRADOS	41
4.3	RESULTADOS MICROSCÓPICOS	42
4.3.1	Análise dos corpos de prova longitudinais	43
4.3.2	Análise dos corpos de prova transversais	44
4.4	RESULTADOS DE ANÁLISE DE MICRODUREZA	45
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIAS	48
	ANEXO A – TABELA DE REATIVOS USADOS PARA ATAQUE QUÍMICO	51

1 INTRODUÇÃO

Muito se discute a expansão e atualização de tecnologias e processos que vem proporcionando melhorias em diversos setores metal mecânicos. Nos últimos anos o setor metal mecânico vem se deparando com vários desafios que tem por objetivo proporcionar uma melhoria na qualidade dos produtos ao mesmo tempo que se busca redução de custos o que leva produtos provindos de chapas metálicas a constante *redesigns*, tendo em algumas situações a não avaliação dos problemas que este produto pode vir a apresentar caso possua conformação.

A conformação mecânica propriamente dita é o processo de transformar uma chapa plana em um produto com o formato desejado sem que ocorra fratura ou redução excessiva de sua espessura. Dentro desta definição temos alguns processos de conformação de maior simplicidade, como o processo de dobra, ou até mesmo alguns processos mais complexos como o caso de estampagem de rodas automobilísticas (PALMEIRA, 2005).

Como o processo de dobra envolve aplicação de forças sobre uma chapa plana através do uso de um estampo de dobra, é corriqueiro nos depararmos com alguns problemas como o surgimento de trincas na região da dobra, podendo estas serem microscópicas ou não. Com base neste conhecimento, tem-se por objetivo analisar e expor os fatores de maior relevância no surgimento de trincas durante o processo de dobra a frio.

Na atual literatura existem poucos estudos sobre as deformações relacionadas ao processo de dobra. Os materiais que existem são recentes, onde os autores apenas citam os procedimentos como raio mínimo para a dobra, abertura de matriz, dimensão de aba mínima, recuperação elástica e defeitos existentes no processo de dobra, não mencionando assim a interferência de outros fatores ainda existentes (BOTH, MOURA, 2019).

A constante falta de informações sobre problemas ocasionados no processo de conformação a frio cria uma necessidade de investigação e análise prática com o propósito de conhecer e estabelecer os fatores que diretamente contribuem para o surgimento de trincas e como estas podem ser amenizadas ou até mesmo evitadas, fazendo-se necessário um estudo mais aprofundado que contemple análises microscópicas e avaliações de dureza de componentes dobrados.

Portanto as questões a serem discutidas se referem a contribuição do alívio de dobra e direção de laminação da chapa na formação de trincas durante o processo de conformação a frio.

1.1 TEMA

O tema deste projeto tem como base analisar e identificar fatores que influenciam na ocorrência de trincas durante o processo de dobramento.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

No presente trabalho foi analisado diferentes raios de alívio de dobra aplicados a corpos de prova com sentidos de laminação alternados entre longitudinal e transversal a linha de dobra sob o material ASTM A572 de grau 50, com o intuito de avaliar a possibilidade do surgimento de trincas ou alteração da microdureza na região do raio de alívio de dobra. O projeto de pesquisa está delimitado a análise experimental dos corpos de prova a fim de determinar uma dimensão de raio proporcional a espessura testada para o qual não haja nenhum indício do surgimento de trincas ou alteração significativa de dureza.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

No setor automotivo e de máquina e equipamentos agrícolas a conformação mecânica possui uma vasta aplicação, e um dos processos que mais se destaca é o dobramento. Através deste processo de conformação é possível obter peças de alta complexidade geométrica, as quais comumente necessitam suportar altos esforços mecânicos no equipamento em que estarão empregados.

Conhecendo-se que o item dobrado precisa suportar altos esforços mecânicos, não é admissível que nenhuma peça seja empregada em uma máquina ou equipamento caso possua algum risco de concentrador de tensões, onde o maior risco de falha pode estar atrelado a trincas e micro trincas.

Este problema advém do processo primário do setor de dobramento de chapas metálicas, onde em algumas ocasiões acabamos por nos deparar com a ocorrência de trincas sem explicação justificada, o que acaba por levar ao sucateamento destes componentes caso se trate de uma trinca aparente.

Com base no exposto o problema de pesquisa apresenta como base o seguinte questionamento: O estudo e teste prático de corpos de prova com diferentes raios de alívio de dobra e alternância do sentido de laminação em relação a linha de dobra possibilitarão gerar melhorias no processo reduzindo a incidência de trincas?

1.4 HIPÓTESES

Segundo Lakatos e Marconi (2003), as hipóteses podem ser definidas como uma suposta, provável e provisória resposta a um problema, cuja adequação (comprovação=sustentabilidade ou validade) será verificada através da pesquisa, interessa-nos o que é e como se formula um problema. A partir desta definição são apresentadas duas hipóteses que possam ou não responder ao problema de pesquisa:

- A dimensão do alívio de dobra e o sentido de laminação influenciam no aparecimento de trincas em componentes fabricados com chapas metálicas dobradas;
- A dimensão do alívio de dobra tem impacto de dureza na região deformada plasticamente.

1.5 JUSTIFICATIVA

Diante de um mundo que estamos vivendo, presenciam-se constantes avanços tecnológicos e metal mecânicos, principalmente no setor de equipamentos agrícolas onde as empresas deste ramo possuem grandes desafios para tornar seus produtos cada dia mais produtivos e eficientes, podendo assim oferecer equipamentos que possam extrair o maior percentual de alimentos possíveis do campo, com o mínimo de perdas admissível durante esse processo.

Para poder oferecer equipamentos mais produtivos e eficientes as empresas necessitam um alto investimento na busca de novas tecnologias o que acaba encarecendo o produto final. Em contrapartida são realizados planos estratégicos na busca de redução de custos, onde vem se trabalhando forte na redução de perdas por retrabalho e sucata. Entretanto, tem-se um fator agravante que acaba por reduzir a margem de lucro das empresas e está relacionado com grande parcela do índice de sucatas e módulo de falha de componentes mecânicos. Este fator agravante são as trincas ocasionadas durante o processo de conformação a frio.

É de comum frequência nos depararmos com trincas durante o processo de conformação a frio, fator este que pode levar ao sucateamento imediato de peças se detectado durante o processo, ou na pior das hipóteses o mesmo pode por acabar não sendo detectado o que irá provocar a possível falha do componente mecânico.

Diante de todos os fatores, percebe-se que inúmeras vezes não se sabe o motivo que ocasionou a trinca destes componentes. Com base nisso se faz necessário um aprofundamento deste assunto, buscando como resultado final expor os agravantes deste processo e amenizar ou até se possível eliminar estes fatores do processo de conformação, evitando assim o sucateamento desnecessário de peças ou até mesmo evitar a falha de componentes mecânicos que apresentam trincas, o qual pode vir a ocasionar um problema tanto para o equipamento em que está empregado, bem como para a reputação da empresa que o fabricou.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar e expor os principais fatores responsáveis por desencadear trincas durante o processo de conformação a frio.

1.6.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral podemos definir a sequência de objetivos específicos necessários para alcançar o objetivo deste estudo:

- Definir os raios de alívio de dobra a serem usados para no corpo de prova;
- Projetar um modelo de corpo de prova para realização dos ensaios;
- Realizar análise microscópica sob corpos de prova;
- Realizar ensaios de microdureza na região do alívio de dobra;
- Apresentar os resultados obtidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DOBRA DE CHAPAS METÁLICAS

Segundo Rahulkumar (2015) a tecnologia é um dos processos mais significativos da vida moderna ou do estilo de vida moderno, onde o processo de conformação de metais desempenha um papel fundamental. Através deste processo é possível obter diversas formas geométricas pela deformação plástica de um material que se dá através da aplicação de uma força sob o mesmo durante o processo de conformação, força a qual é superior a força de resistência do material, porém inferior ao limite de ruptura do material.

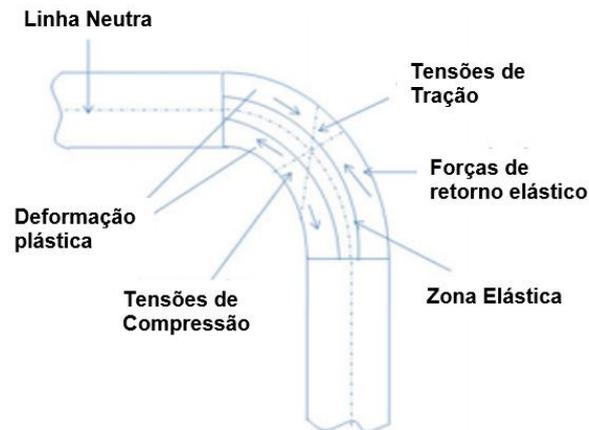
O processo de dobra é a deformação plástica de metais em torno de uma linha conhecida como linha de dobra a qual sofre pouca ou nenhuma alteração durante o processo. Processos de conformação por dobra tem sido amplamente utilizado nas indústrias de conformação de chapas para produzir peças como chaves, suportes, dobradiças, estruturas entre outras (RAHULKUMAR, 2015).

Segundo Decker (2019) *apud* Wilson Tool (2019) o processo de dobramento é normalmente realizado a frio, aplicando-se ferramentas adequadas e respeitando os limites de escoamento e demais características do material usado na conformação. Considera-se o processo de dobramento como uma operação de conformação de alta complexidade e com grandes variações de aplicações e utilizações, processo este que é possível devido a diversidade de ferramentas e suas formas construtivas.

2.1.1 Linha neutra

Uma das características mais importantes a ser observada durante o processo de conformação por dobra é que a tensão de tração reduz em direção ao centro da espessura da chapa e torna-se zero na linha neutra, enquanto a tensão de compressão aumenta a partir do eixo neutro em direção ao interior da dobra, conforme pode ser observado na Figura 1. Mesmo com um grande nível de deformação plástica na região central da chapa, a mesma permanece elástica e assim por consequente ocorre a recuperação ou retorno elástico do material, também conhecido como *springback* (RAHULKUMAR, 2015).

Figura 1 – Fibras deformadas após dobra



Fonte: Adaptado de Rahulkumar, 2015, p. 7

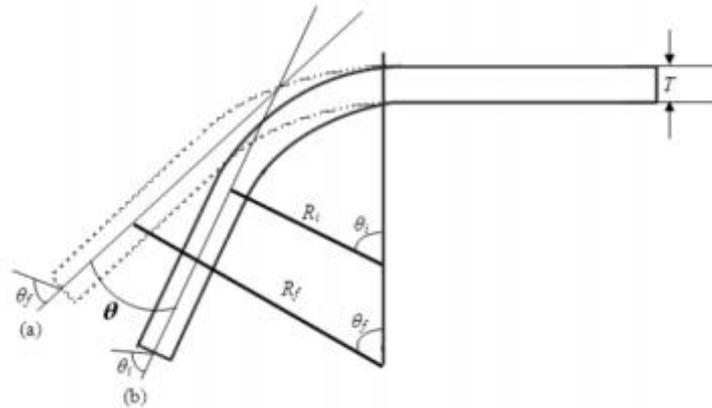
Dividindo-se a região de dobramento em camadas é possível observar-se que camadas externas afinam-se devido as tensões de tração. Na região central, as camadas são comprimidas e suas dimensões aumentam na largura (BOTH, 2017).

2.1.2 Retorno elástico

Os materiais possuem um modelo de elasticidade que lhes confere uma deformação elástica quando submetidos a um esforço suficiente para tal, tem se que se houver uma deformação plástica, sempre haverá um retorno elástico após a remoção da carga sobre o material. No processo de dobramento tal fenômeno de recuperação é conhecido como retorno elástico ou *springback*, o qual pode ser facilmente observado durante o processo de conformação de alguma chapa metálica (CHITÃO, 2017).

O retorno elástico se dá devido a presença da energia elástica acumulada na peça durante o processo de conformação, quando o carregamento é cessado e as vinculações são retiradas a energia é redistribuída na peça através do equilíbrio interno. Este fenômeno geralmente causa uma distorção em relação à geometria determinada em projeto e pode ser observado na Figura 2 (MALAVOLTA, *et. al.*, 2016).

Figura 2 – Esquema do retorno elástico



Fonte: Chitão *apud* Abdullah, 2017, p. 23

Com base na definição, o retorno elástico pode ser descrito como um desvio da chapa após o descarregamento das forças sob a mesma (CHITÃO, 2017).

2.2 EQUIPAMENTOS DE DOBRA

Segundo Decker (2019) *apud* Syamal (2011) máquinas de dobra são equipamentos que podem ter amplas variações de tamanho e poder de conformação, podendo chegar a comprimentos de até trinta metros e força de dobra de aproximadamente 19.600 kN. Este tipo de equipamento é composto basicamente por barras de pressão móveis superiores e inferiores as quais possuem um movimento vertical, possuindo como gerador de força um sistema eletro-hidráulico.

Para efetuar o processo de dobra se faz necessário que uma ferramenta inferior denominada matriz seja montada na barra de pressão inferior, necessitando ainda que na barra de pressão superior móvel seja montada um punção (SIMONS, 2006).

Both (2017) *apud* Kiminami (2017) Através do processo de conformação por dobramento uma chapa de aço é submetida a esforços em duas direções opostas, o que resulta na deformação plástica da chapa, fazendo com a mesma deixe de ter apenas uma superfície plana e passe a ter duas superfícies planas concorrentes uma com a outra.

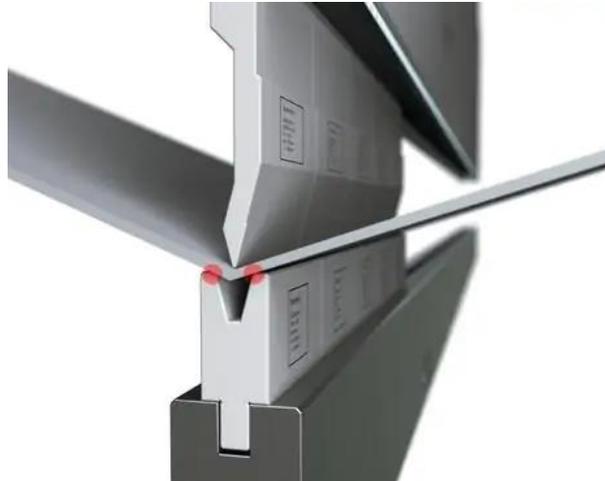
2.3 TIPOS DE PROCESSO DE DOBRA

Segundo Flynt (2020) uma peça produzida a partir de uma chapa metálica nem sempre apresenta um ângulo de dobra de 90 graus, variando assim de acordo com sua aplicação. Através disso pode-se escolher o melhor processo para fabricação de

uma peça dobrada, permitindo-se assim controlar o ângulo de dobra ou até mesmo fabricar peças de chapa metálica com uma série de dobras adjacentes ou dobras curvas.

- Dobra em “V” ou dobra no Ar: O método de dobra em V apresenta ampla aplicação industrial devido a sua simplicidade. Neste método de conformação a chapa de metal é suportada por duas superfícies que possuem uma determinada abertura entre si, por conseguinte um punção irá exercer uma força sobre o item que está posicionado entre a abertura da matriz conforme Figura 3 (Library of Manufacturing, 2021).

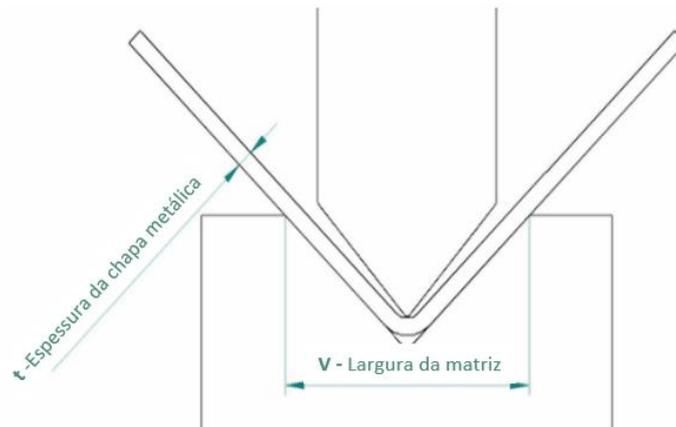
Figura 3 – Dobra em V



Fonte: Decker *apud* Bystronic, 2019, p. 19

- Dobra Estampada ou Rebaixada: Neste método de estampagem a punção pressiona a chapa metálica na superfície da matriz, de forma com que o ângulo da matriz determine o ângulo final da peça conforme Figura 4. Este método possibilita a aplicação de maiores forças reduzindo o *springback* e fornecendo assim uma melhor precisão dimensional (VELLING, 2019).

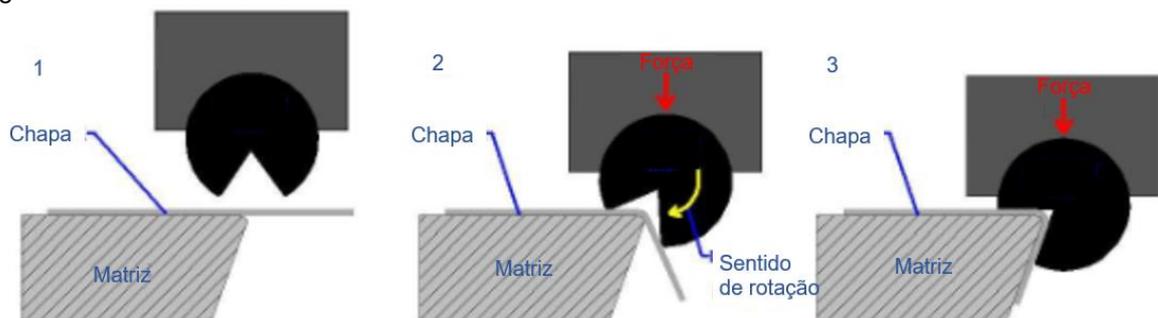
Figura 4 – Ferramenta para dobra estampada



Fonte: Adaptado de Velling, 2019

- Dobra rotativa: Este tipo de processo é utilizado para realizar dobras de alta precisão que não deixam marcas na chapa devido a um punção rotativo que pode rotacionar livremente, tendo o formato final desejado já usinado na ferramenta. À medida em que a punção é pressionada na chapa de metal, a punção rola para pressionar a chapa de metal contra uma matriz inferior correspondente, conforme Figura 5 (FLYNT, 2020).

Figura 5 – Processo de dobra rotativa



Fonte: Adaptado de Library of Manufacturing, 2021

Para que uma chapa de metal possua utilização ela deve ser conformada no formato exato necessário para suas aplicações, onde a maneira mais simples de se atingir este parâmetro é através do processo de dobra (FLYNT, 2020).

2.4 METALOGRAFIA

Segundo George (1984) *apud* Mendes, Moreira (2012) a metalografia consiste em técnicas de exames macroscópicos frequentemente empregados em controles de qualidade, análise de módulos de falhas de materiais e pesquisas científicas. A microestrutura tem uma forte influência sobre os metais e suas ligas, sendo a metalografia a responsável primária por revelar constituintes metálicos além de sua respectiva microestrutura.

2.4.1 Ensaio metalográfico

Ensaio metalográfico relacionam a estrutura de material com suas propriedades físicas, mecânicas, processos de fabricação, tratamento térmico entre outros fatores, podendo este ensaio ser macrográfico ou micrográfico (AVALLONE, 2013).

Segundo Braga *apud* Colpaert (2008), ensaios micro e macroscópicos proporcionam a avaliação de seções bidimensionais de estruturas que possuem características tridimensionais, possibilitando a análise criteriosa dos resultados obtidos. As análises dessas avaliações partem do estudo dos grãos formados nos materiais durante seu processo de solidificação, onde os grãos a serem analisados partem da definição de uma região contínua com a mesma orientação cristalográfica.

2.4.1.1 Ensaio macrográfico

Ensaio macrográfico são definidos pelo exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica consistindo na análise de uma seção plana devidamente polida e normalmente atacada por um reagente químico de modo a expor a macro estrutura da mesma. Análises macrográficas podem ser realizadas a olho nu ou através do auxílio de microscópios estéreos com possibilidade de ampliação máxima de dez vezes (BRAGA, 2015).

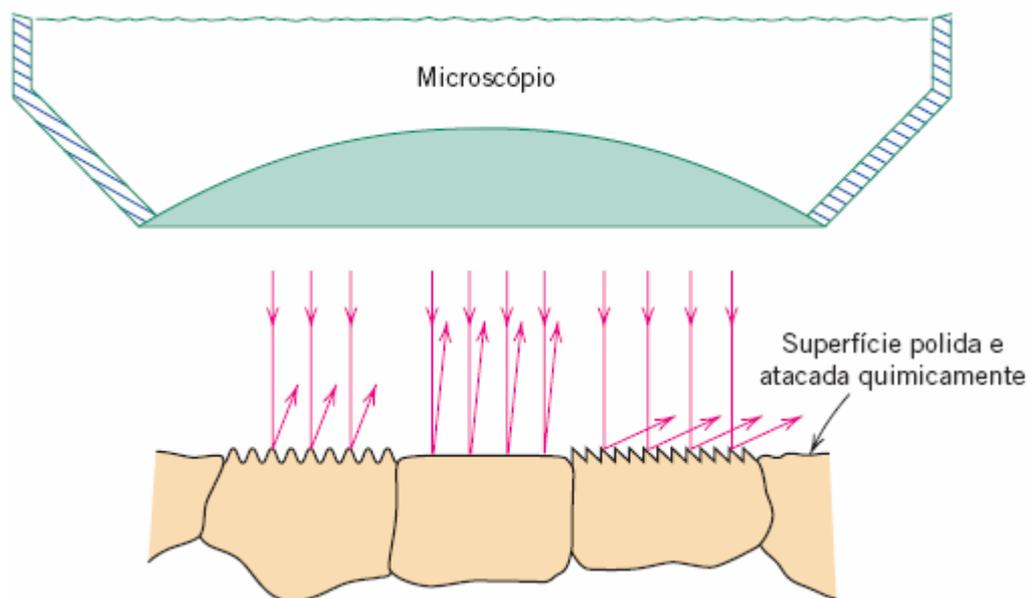
Segundo Braga (2015) *apud* Colpaert (2008) a preparação das amostras no caso da macrografia é preferível um corte longitudinal no material de amostra pois abrange toda a geometria regular analisável.

2.4.1.2 Ensaio Micrográfico

Ensaio de caráter micrográfico empregam uso de reagentes químicos para ataques sob a superfície do material para que a sua microestrutura seja exposta, podendo-se através deste método verificar o contorno de grão do material e a sua organização com auxílio de um microscópio (AVALLONE, 2013).

A preparação para uma análise micrográfica se inicia com a escolha da localização a ser estudada com posterior corte, lixamento e polimento desta região. Este formato de ensaio é realizado através de um microscópio com poder de resolução de 50 a 2500 vezes e devido a esse fato se faz necessário que a superfície a ser analisada esteja perfeitamente polida para que não haja divergência durante a análise dos resultados conforme a Figura 6 (BRAGA, 2015).

Figura 6 – Características da superfície na utilização do microscópio



FONTE: CALLISTER, 2020, p. 97;

A Figura 6 representa os problemas ocasionados durante a análise microscópica de um material que não sofreu o preparo correto de sua superfície, podendo assim apresentar discrepância entre a superfície analisada e a superfície real (BRAGA, 2015)

2.4.1.3 Ataque químico na metalografia

Para revelar determinadas características microestruturais existe uma gama de métodos de ataque, entre os quais o ataque químico é o de maior emprego devido a

sua baixa complexidade de aplicação. Este tipo de ataque faz uso de um processo de corrosão controlada conduzidas pelas diferentes áreas de superfícies presentes no material, induzindo assim a dissolução ou coloração preferencial das fases presentes (GIRAULT et al, 1998 *apud* FUKUGAUCHI, 2010).

Sempre que uma superfície sem revestimento está em contato com uma solução eletrolítica (Alguma forma de ácido) torna-se possível os íons metálicos passarem diretamente para a solução, denomina-se este processo como “ataque” do material. O Grau de ataque depende da composição química da microestrutura e a taxa de dissolução a qual o material é submetido (ANGELI *et al.*, 2006 *apud* FUKUGAUCHI, 2010).

Para o ataque químico os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes macroestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfica, sendo os mesmos apresentados conforme Anexo A.

2.5 MICRODUREZA VICKERS

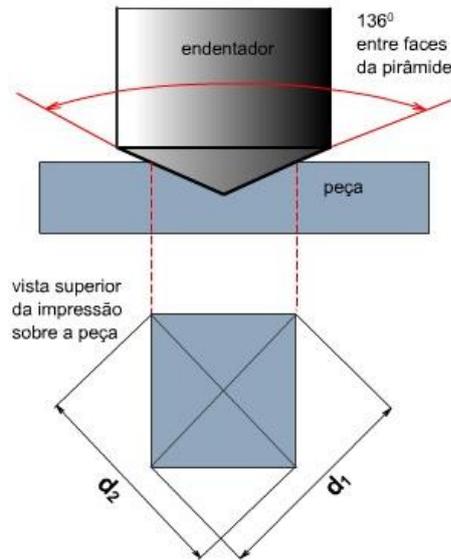
Ensaio de microdureza Vickers possuem como objetivo avaliar a resistência de matérias quanto à deformação plástica localizada consistindo na aplicação de uma carga sobre uma superfície de material (RIOS, *et al.*, 2016).

O método de análise de microdureza Vickers necessita ao atendimento de requisitos de qualidade superficial de um melhor acabamento comparado ao método Rockwell a fim de evitar impurezas que possam ser encontradas no material, necessitando desta forma com que a amostra seja previamente preparada por metalografia e posteriormente polida (EMCO TEST, 2021).

O teste de microdureza Vickers consiste em realizar pequenas endentações estáticas no corpo a ser analisado sob cargas inferiores a 1kgf, podendo-se fazer uso de indentador pirâmide de diamante Vickers ou pirâmide alongada (ALMEIDA, 2018).

O uso de um indentador de pirâmide Vickers apresenta forma de pirâmide quadrada a qual apresenta um ângulo de 136° entre as suas faces, conforme observado na Figura 7 (ALMEIDA, 2018).

Figura 7 – Ilustração do ensaio de dureza Vickers



Fonte: CIMM, 2021

Para o ensaio de dureza Vickers o indutor de forma quadrada-pirâmidal é pressionado contra o material durante cerca de 10 a 15 segundos até que a força seja retirada, o valor de escala Vickers é obtido através do recuo médio do comprimento das diagonais da base juntamente com a força aplicada (BAPTISTA, 2021).

2.6 NORMATIVA ASTM

ASTM é um órgão que tem como responsabilidade o desenvolvimento e publicação de normas técnicas aplicadas a produtos, materiais e serviços. Atualmente a ASTM conta com mais de 12000 normas, sendo assim, considerada uma das mais respeitadas incorporadas mundiais de normativas (TUBONASA, 2019).

As normas ASTM são essenciais para classificar e avaliar as propriedades químicas e mecânicas dos materiais, orientando os fabricantes em relação ao processamento adequado destes materiais, bem como sua correta aplicação (ANDERSON, 2019).

Ao investir em seus materiais você precisa confiar que eles terão o desempenho esperado. Ao usar produtos que atendem aos padrões ASTM você pode garantir que está adquirindo materiais de alta qualidade que atendem as suas expectativas e protegem a segurança de seus funcionários e clientes (ANDERSON, 2019).

2.6.1 ASTM A572/A572M – Norma padrão para aços estruturais de baixa liga e alta resistência de Nióbio-Vanádio

A Norma ASTM A572 cobre cinco graus de aços de alta resistência para perfis, placas e barras de aço estruturais de baixa liga. As Classe 42, 50 e 55 são destinadas a estruturas rebitadas, parafusadas ou soldadas, enquanto os Graus 60 e 65 destinam se à construção de pontes com juntas rebitadas, soldadas ou parafusadas.

Produtos estruturais fornecidos sob a norma ASTM A572 devem estar em conformidade com os requisitos da especificação ASTM A6, exceto se fornecidos sob forma de bobinas, uma vez que estas serão cortadas em comprimentos individuais onde o processador é responsável pelo desbobinamento, endireitamento, conformação a quente ou a frio, corte no comprimento, teste e inspeção até o envio do produto acabado juntamente com sua devida certificação. A Tabela 1 representa as características mecânicas dos 5 graus de aços abordados nesta normativa.

Tabela 1 – Espessura ou Tamanho máximo do produto

Grade	Yield Point, min		Maximum Thickness or Size					
	ksi	[MPa]	Plates and Bars		Structural Shape Flange or Leg Thickness		Sheet Piling	Zees and Rolled Tees
			in.	[mm]	in.	[mm]		
42 [290] ^A	42	[290]	6	[150]	all	all	all	all
50 [345] ^A	50	[345]	4 ^B	[100] ^B	all	all	all	all
55 [380]	55	[380]	2½	[64]	all	all	all	all
60 [415] ^A	60	[415]	2½ ^C	[64] ^C	2	[50]	all	all
65 [450]	65	[450]	2	[50]	2	[50]	all	all

Fonte: ASTM A572/A572M, 2021

A normativa A572/A572M aborda, por conseguinte os requisitos químicos a serem atendidos pelos 5 graus de aços, sendo estes apresentados conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Requisitos químicos

Diameter, Thickness, or Distance Between Parallel Faces, in. [mm] Plates and Bars	Structural Shape Flange or Leg Thickness, in. [mm]	Grade	Carbon, max, %	Manganese, ^B max, %	Phosphorus, ^I max, %	Sulfur, ^I max, %	Silicon	
							Plates to 1½ in. [40 mm] Thick, Shapes with Flange or Leg Thickness to 3 in. [75 mm] inclusive, Sheet Piling, Bars, Zees, and Rolled Tees ^C	Plates Over 1½ in. [40 mm] Thick and Shapes with Flange Thickness Over 3 in. [75 mm]
							max, %	range, %
6 [150]	all	42 [290]	0.21	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
4 [100] ^E	all	50 [345]	0.23	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
2½ [64] ^F	all	55 [380]	0.25	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
2½ [64] ^F	≤2 [50]	60 [415]	0.26	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
>½ – 2 [13–50]	>1–2	65 [450]	0.23	1.65	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
≤½ [13] ^H	≤1	65 [450]	0.26	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	a

Fonte: ASTM A572/A572M, 2021

Os requisitos químicos apresentados na Tabela 2 devem estar em conformidade com análise de calor a ser realizada. Os requisitos de tensão mínimo para este material devem estar de acordo com o especificado em Tabela 3.

Tabela 3 – Requisitos de Tensão

Grade	Yield Point, min		Tensile Strength, min		Minimum Elongation, % ^{A, C, D}	
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	in 8 in. [200 mm]	in 2 in. [50 mm]
	42 [290]	42	[290]	60	[415]	20
50 [345]	50	[345]	65	[450]	18	21
55 [380]	55	[380]	70	[485]	17	20
60 [415]	60	[415]	75	[520]	16	18
65 [450]	65	[450]	80	[550]	15	17

Fonte: ASTM A572/A572M, 2021

O Grau de Aço 50 de espessura 20mm ou inferior, deve atender a uma Resistência a tração de no mínimo 485 MPa.

2.7 NORMATIVAS ABNT NBR

A instituição responsável pela revisão e aprovação de normas técnicas no Brasil é a ABNT fundada com o intuito de aumentar a rentabilidade, qualidade e competitividade do produto no mercado. Para isso as NBR's promovem regulamentos, diretrizes, características ou orientações sobre determinado material, produto, processo ou serviço.

2.7.1 NBR 7438 Materiais Metálicos – Ensaio de Dobramento

A Normativa NBR 7438 especifica o método para determinação da capacidade do material metálico suportar deformação plástica quando dobrado sendo aplicada a

corpos de prova obtidos de produtos metálicos, não sendo aplicável a tubos ou juntas soldadas.

2.7.1.1 Princípio do Ensaio de Dobramento segundo NBR 7438

O Ensaio de dobramento consiste na submissão de um corpo de prova de seção transversal a uma deformação plástica por dobramento sem alteração na direção da força até que seja atingido o ângulo de dobra especificado.

O ensaio deve ser realizado mantendo-se um plano transversal entre o eixo de dobramento e os eixos dos dois ramos do corpo de prova. Em casos de dobramento a 180° as duas superfícies internas podem ficar niveladas ou paralelas uma contra a outra, dependendo-se dos requisitos da norma do produto.

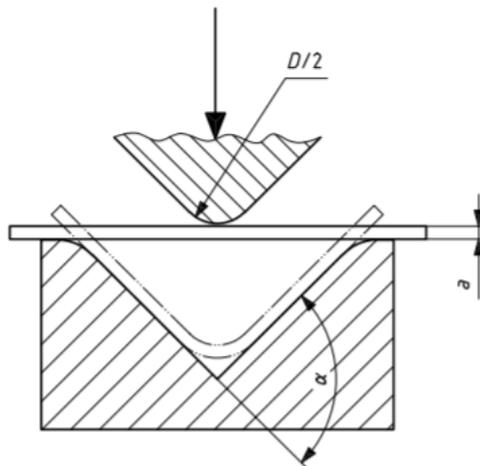
2.7.1.1.1 Equipamento de Ensaio

Todos os ensaios de dobramento devem ser realizados em máquina de ensaio ou em prensas equipadas com dispositivos específicos.

2.7.1.1.1.1 Dispositivo de dobramento com um bloco em V e um cutelo

A realização de ensaio segundo dispositivo de dobramento com auxílio de bloco em V deve-se constituir de um bloco formando entre as faces uma abertura de 180° conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Dispositivo de dobramento com dois suportes e um cutelo



Fonte: NBR 7438, 2016

Conforme especificado em norma NBR 7438 as bordas do bloco em V devem possuir um raio entre 1 a 10 vezes a espessura do corpo de prova que será submetido a análise.

2.7.1.1.2 Generalidades do corpo de prova

Deve se utilizar corpos de prova de seção transversal redonda, quadrada, retangular ou poligonal que não apresentem quaisquer áreas de material afetadas durante corte por cisalhamento, chama ou operação similar, podendo ser aceitos partes não removidas durante o ensaio caso o resultado se faça satisfatório.

2.7.1.1.3 Bordas para corpos de prova retangulares

Para corpos de prova de perfil retangular deve se arredondar as bordas com raios de acordo com o especificado para cada faixa de espessuras.

- 3 mm para espessuras de corpo de prova iguais ou superiores a 50 mm;
- 1,5 mm quando a espessura do corpo de prova for inferior a 50 mm ou maior (inclusive) 10 mm;
- 1 mm para corpos de prova com espessura inferior a 10 mm.

Os arredondamentos devem ser realizados de forma que não sejam produzidas rebarbas ou quaisquer outros fatores que possam vir a afetar o resultado do ensaio.

2.7.1.1.4 Largura do corpo de prova

Exceto que por especificação do produto de aplicação o corpo de prova deve seguir parâmetros de largura mínima especificados conforme a seguir:

- A mesma largura do produto se esta for igual ou inferior a 20 mm;
- Quando a largura do produto for superior a 20 mm:
 - Para produtos com espessura inferior a 3 mm utilizar largura equivalente a 20 ± 5 mm;
 - Entre 20 mm e 50 mm para produtos com espessura igual ou superior a 3 mm.

2.7.1.1.5 Espessura e comprimento do corpo de prova

A espessura do corpo de prova de chapas metálicas, tiras e perfis deve ser igual à espessura do produto a ser ensaiado, exceto se a espessura do produto ser

superior a 25mm onde deve-se reduzir a mesma através de usinagem em superfície. Durante o dobramento o lado não usinado deve ser o lado tracionado do corpo de prova.

Segundo a normativa NBR 7438 o comprimento a ser estabelecido para o corpo de prova é dependente da espessura do corpo de prova bem como o equipamento disponível para dobramento.

2.8 INFLUÊNCIA DO RAIOS E PUNÇÃO E SENTIDO DE LAMINAÇÃO EM ITENS DOBRADOS

Segundo Both (2017) a operação de dobra é responsável por realizar significativas alterações na estrutura de chapas metálicas as quais podem ser potencializadas de acordo com o raio do punção de dobra e o sentido de laminação da chapa, comprometendo a qualidade final do produto.

O raio mínimo do punção de dobra é comumente expresso em múltiplos da espessura, sentido de laminação e tensão de escoamento conforme norma DIN 6935 abordado no Quadro 1 (BOTH, 2017).

Quadro 1 – Tabela de Raios mínimos de dobra

Tensão de escoamento mínima N/mm ²	Relação entre as direções de dobra e laminação	Raio de curvatura mínimo para curvaturas													
		Até 1mm	Acima de 1mm a 1,5mm	Acima de 1,5mm a 2,5mm	Acima de 2,5mm a 3mm	Acima de 3mm a 4mm	Acima de 4mm a 5mm	Acima de 5mm a 6mm	Acima de 6mm a 7mm	Acima de 7mm a 8mm	Acima de 8mm a 10mm	Acima de 10mm a 12mm	Acima de 12mm a 14mm	Acima de 14mm a 16mm	Acima de 16mm a 18mm
até 390	Perpendicular	1	1,5	2,5	3	5	6	8	10	12	15	20	25	28	36
	Paralelo	1	1,5	2,5	3	6	8	10	12	16	20	25	28	32	40
de 390 a 490	Perpendicular	1,2	2	3	4	5	8	10	12	16	20	25	28	32	40
	Paralelo	1,2	2	3	4	6	10	12	16	20	25	32	36	40	45
de 490 a 640	Perpendicular	1,5	2,5	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	36	45
	Paralelo	1,5	2,5	4	5	8	10	12	16	20	25	32	36	40	50

Fonte: Adaptado de BOTH *apud* DIN 6935 – 2010

Produtos manufaturados provenientes de dobra requerem a aplicação da normativa DIN 6935, visto que a não utilização da mesma pode resultar no surgimento de trincas, encruamento de grãos os quais compõem a estrutura cristalina e o endurecimento do material na seção dobrada. Produtos fabricados em desacordo com esta normativa não são seguros em suas aplicações podendo provocar quebra de equipamentos ou estruturas das quais fazem parte vindo a pôr em risco a integridade física de pessoas que trabalham com estes equipamentos, bem como a reputação da empresa que as fabricou (BOTH, 2017).

3 METODOLOGIA

Segundo Arruda (2017), a metodologia é a explicação minuciosa, detalhada, rigorosa e exata de toda ação desenvolvida no método do trabalho de pesquisa. É a explicação do tipo de pesquisa, do instrumental utilizado, do tempo previsto e da divisão do trabalho.

Nesta seção são abordados os métodos e técnicas utilizadas para o desenvolvimento deste presente trabalho acadêmico, a natureza de pesquisa e ferramentas utilizadas para obter-se os fatores mais impactantes no processo de conformação por dobra que levam a ocorrência de trincas.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

3.1.1 Método de pesquisa adotado

Para Bernardes, Junior Nanako (2019) *apud* Lakatos (2003), o método é um conjunto de atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo, conhecimentos válidos e verdadeiros, traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do cientista. A Aplicação de um método específico permite ao pesquisados percorrer o caminho mais seguro realizando o aproveitamento de experiências e conhecimentos acumulados para aumentar e eficiência de investigação científica.

Segundo Gil (2002) a pesquisa experimental é realizada através da determinação de um objeto de estudo, seleção de variáveis capazes de influenciá-lo e definição das formas de controle e observação dos efeitos que as variáveis serão capazes de produzir sob o objeto. Neste tipo de pesquisa o pesquisador faz parte de todo o processo de investigação, sendo um agente ativo da mesma.

Segundo Fonseca (2002) *apud* Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa experimental seleciona grupos de assuntos a fim de verificar se variáveis desconhecidas são significantes para o objeto de estudo. Os resultados encontrados para este tipo de pesquisa vão de encontro a possibilidade de aprender a relação causa e efeito das descobertas sob o objeto.

O método de pesquisa adotado para o presente trabalho é a análise experimental. Este foi escolhido pois sua linha de pesquisa se baseia em testes práticos sob uma classe específica de aços, a qual foi constatado, na aplicação, alto

índice de sucateamentos devido apresentar trincas durante o processo de conformação a frio.

O processo de obtenção de informações consiste inicialmente na obtenção das propriedades do material que será trabalhado bem como definição das características as quais serão fator decisivo na obtenção dos resultados. Através da definição das características de estudo o pesquisador virá a desenvolver a geometria do corpo de prova segundo normativas ABNT com posterior definição das etapas de conformação e análise.

Com base nas informações obtidas e execução de análise microscópica e de microdureza dos corpos de prova, busca-se então estabelecer um padrão entre as variáveis estabelecidas e o surgimento de trincas.

3.1.2 Quanto à abordagem

Segundo Bernardes *et al.* (2019) a pesquisa qualitativa é aplicada quando temos uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, podendo ser traduzido ainda como um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser expressa em números. Neste tipo de pesquisa a interpretação dos fenômenos e fatos são básicos para os processos, já que este tipo de abordagem expressa opiniões e sensações de forma escrita.

Entretanto a pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser transformado em números, opiniões e informações através do uso de técnicas e métodos estatísticos, podendo ainda ser combinada com a pesquisa qualitativa a qual pode expressar os fatos e resultados através de uma combinação entre números e interpretação de fenômenos, sendo assim caracterizada como uma pesquisa combinada (JÚNIOR, NAKANO, 2019)

Com base no presente projeto a pesquisa se caracteriza como combinada de forma com que haverá uma interação entre o campo qualitativo o qual buscará estabelecer através de análise de fatos o motivo do surgimento de trincas e através do campo quantitativo o qual irá estabelecer e avaliar valores para a variação de microdureza que o material irá apresentar na zona do raio de alívio de dobra.

3.1.3 Quanto aos objetivos

Segundo Gil (2002) toda e qualquer classificação de pesquisa se faz mediante a algum critério, sendo o tipo de pesquisa classificado com base em seus objetivos. Mediante esta descrição as pesquisas podem ser classificadas em três grandes grupos, sendo pesquisas exploratórias, descritivas ou explicativas.

Segundo Bernardes *et al* (2019). *apud* Gil (2019) a pesquisa explicativa tem como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Este tipo de pesquisa é a que mais aprofunda o conhecimento da realidade pois tem o propósito de explicar e justificar o porquê das coisas.

O presente projeto de pesquisa tem caráter explicativo pois o pesquisador realiza análises e testes experimentais com o objetivo de explorar o fenômeno da ocorrência de trincas durante o processo de conformação a frio. Podendo posteriormente expor os fatores de maior influência deste processo.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.2.1 Definição dos parâmetros de teste

O objetivo abordado no projeto consiste na experimentação de diferentes corpos de prova alternando-se diferentes raios de alívio de dobra juntamente ao sentido de laminação do componente. Para a fase experimental decidiu-se trabalhar com 5 diferentes raios de corpo de prova para 2 sentidos de laminação os quais podemos observar no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros de teste do corpo de prova

Raio de Alívio de Dobra (mm)					
Longitudinal	3	6	9	12	15
Transversal	3	6	9	12	15

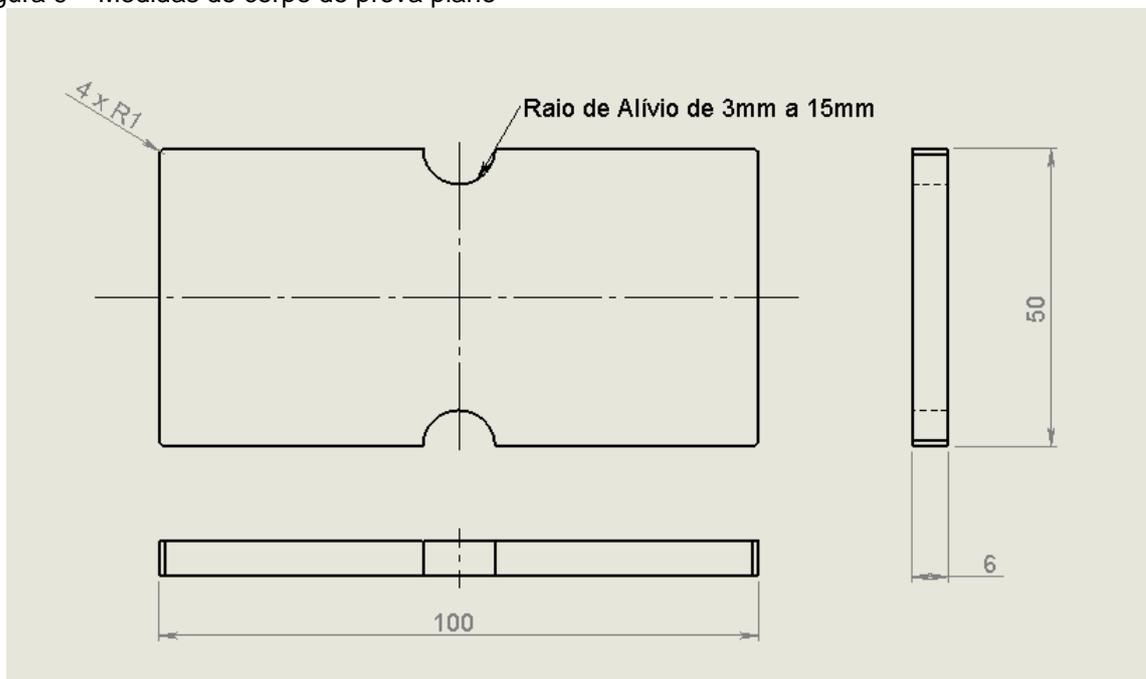
Fonte: Autor, 2021

Conforme abordado no Quadro 2 serão realizados 5 corpos de prova com medidas de raio de alívio de 3 a 15 mm com sentido de laminação longitudinal, bem como 5 corpos de prova com as mesmas medidas de raio de alívio de dobra, entretanto alternando-se o seu sentido de laminação para transversal.

3.2.2 Corpos de prova

Os corpos de prova devem ser trabalhados conforme solicitado na normativa NBR 7438 – Ensaio de dobramento, para o material a ser testado de espessura 6 mm deve se atender uma largura mínima de 20 a 50 mm com arredondamento de arestas de 1 mm, não sendo definido pela normativa o tamanho máximo ou mínimo do corpo de prova. As medidas do corpo de prova antes de serem dobradas podem ser observadas na Figura 9.

Figura 9 – Medidas do corpo de prova plano

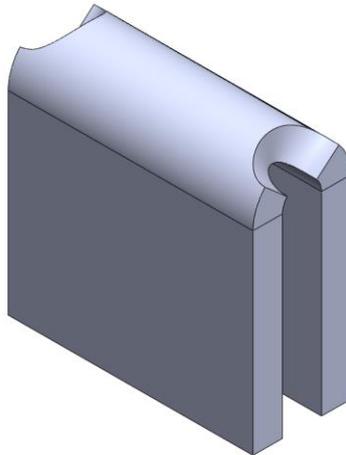


Fonte: Autor, 2021

Conforme observado na Figura 9 definiu se como 100 mm o comprimento do corpo de prova plano uma vez que a normativa não estabelece um tamanho padrão, além desta ser uma medida a qual consegue se melhor atender para realizar o processo de conformação por dobra.

A geometria estabelecida para o corpo de prova pós processo de dobra foi similar a um perfil “U”, sendo este o perfil determinado com base na normativa NBR 7438 e adaptado conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Corpo de prova dobrado



Fonte: Autor, 2021

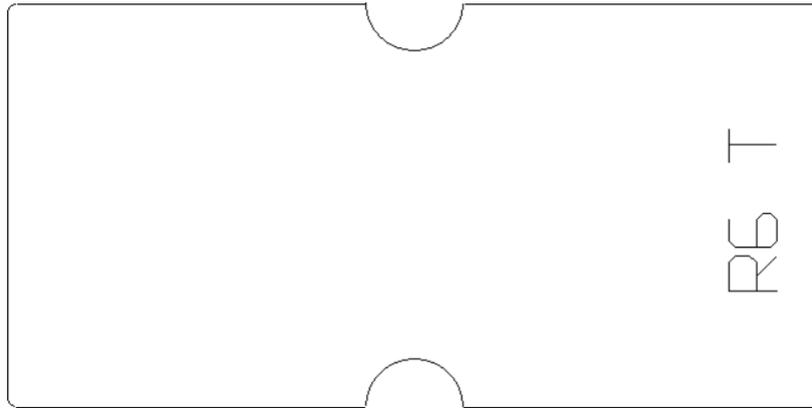
A geometria do corpo de prova pós processo de conformação teve de ser adaptado devido a não disponibilidade de ferramentas que permitissem realizar uma dobra sem a existência da distância presente entre as duas faces. Entretanto essa modificação não compromete a relevância dos resultados uma vez que a Empresa onde o projeto está sendo realizado emprega peças com ângulo de dobra interno de no máximo 70°.

3.2.3 Corte e conformação das amostras

3.2.3.1 Corte laser

O processo de corte das amostras se deu através da preparação das tecnologias de corte onde se desenvolveu uma tecnologia para cada um dos corpos de prova. Foi realizada uma marcação do seu respectivo raio e sentido de laminação para que assim pudesse se fazer a diferenciação das mesmas conforme Figura 11.

Figura 11 – Amostra de tecnologia de corte de uma das amostras



Fonte: Autor, 2021

A Figura 11 ilustra como exemplo o corpo de prova de raio 6 mm com a marcação de um “T” representando que este corpo de prova está com as fibras de forma transversal em relação a linha de dobra.

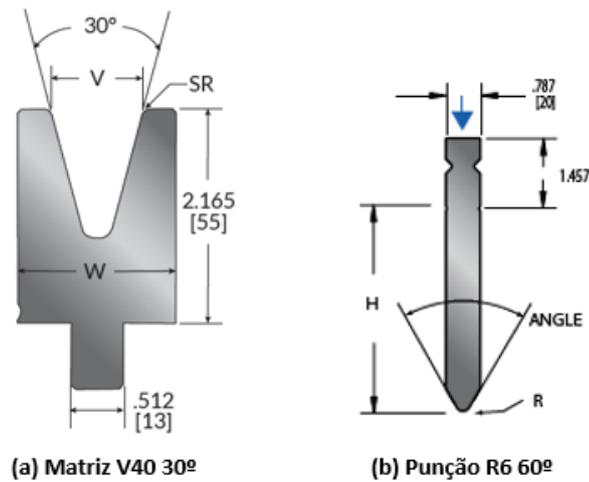
Durante o processo de programação e corte foi atentado ao correto posicionamento das amostras. Além de cortar todas na porção central da chapa para evitar o encruamento que existe próximo as bordas o que poderia vir a afetar o resultado final, além de se garantir uma microestrutura mais homogênea na região central da chapa.

3.2.3.2 Processo de conformação

O processo de conformação será adaptado do método de dobramento com um bloco em V dado pela normativa NBR 7438 devido à ausência destas ferramentas na empresa de estudo. O dobramento dos corpos de prova será dividido em duas partes, sendo a primeira destas compreendida por um processo de pré dobra. A segunda etapa consistirá no uso de uma ferramenta especial para assim finalizar o processo de conformação mantendo o corpo de prova com duas faces paralelas entre si.

A primeira parte do dobramento dos corpos de prova será realizada em ferramentas Padrão optando-se em utilizar uma matriz com abertura de 40mm e ângulo máximo de dobra de 30° juntamente com um punção de raio 6 mm 60°. Pode-se observar as ferramentas na Figura 12(a, b) respectivamente, ambas ferramentas produzidas pela fabricante Wilson Tool.

Figura 12 – Ferramentas de dobra – pré dobra

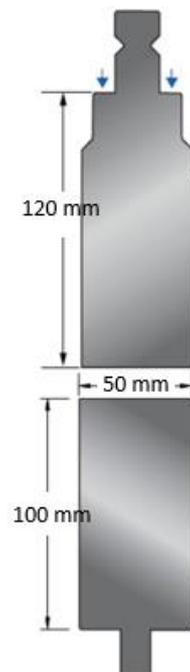


Fonte: Autor, 2021

A opção de escolha do raio 6 mm deu-se devido a ser aplicado para itens da mesma espessura e matéria prima na Empresa onde este ensaio será concebido.

A segunda etapa para a conformação dos corpos de prova se deu através do uso de duas ferramentas planas mais conhecidas como ferramentas para amassado dispostas na Figura 13, ambas ferramentas também são da fabricante Wilson Tool.

Figura 13 – Ferramentas para Amassado.



Fonte: Adaptado de Wilson Tool, 2021

As ferramentas de amassado foram utilizadas com o propósito de finalizar o processo de conformação deixando as duas faces do corpo de prova paralelas entre si. O processo de conformação completo pode ser observado diante da Figura 14.

Figura 14 – Processo de conformação dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2021

Conforme apresentado na Figura 14 o processo de confecção dos corpos de prova se deu em três diferentes fases, iniciando com a fabricação do corpo de prova plano através do processo de corte laser, partindo-se assim para uma pré dobra onde manteve-se o corpo de prova com um ângulo de abertura interno médio de 30°, sendo finalizado com o processo de amassamento onde se obteve a geometria final do corpo de prova.

3.2.4 Análise dos corpos de prova

A análise dos corpos de prova consistiu em submeter os mesmos sob a ampliação de um microscópio óptico da fabricante OPTON sob a ampliação de 15 vezes o tamanho real conforme demonstrado através da Figura 15. O microscópio foi conectado a um notebook através do qual foi possível fazer o acompanhamento das imagens em tempo real além de capturas de tela o que possibilitou imagens confiáveis dos corpos de prova.

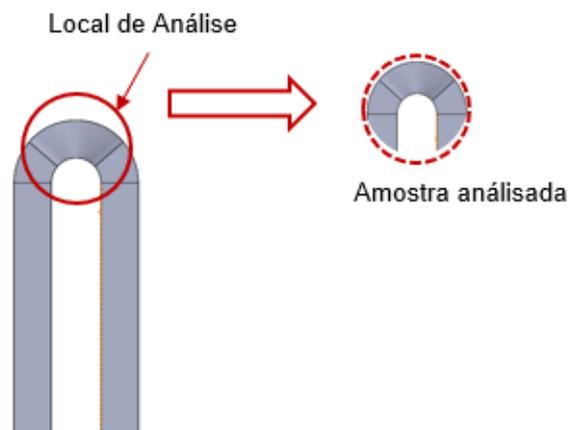
Figura 15 – Sistema para obtenção de imagens dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2021

Durante a fase experimental a lente do microscópio foi posicionada sob o raio de alívio do corpo de prova conforme imagem de simulação apresentada pela Figura 16.

Figura 16 – Análise do corpo de prova



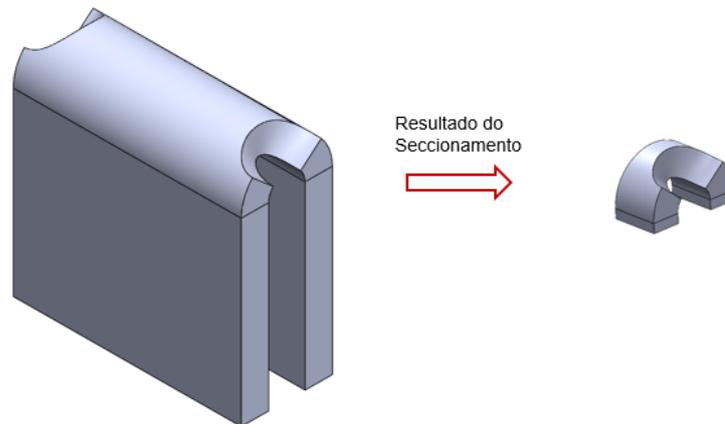
Fonte: Autor, 2021

O corpo de prova foi posicionado de maneira que se pudesse obter imagens de forma clara das trincas, tendo como principal foco o círculo tracejado em vermelho da Figura 16, local onde se espera o surgimento de trincas devido a maior concentração de tensões.

3.2.5 Preparação das amostras

O processo de preparação das amostras é necessário para as análises de microdureza do material, portanto se utilizou duas das 10 amostras obtidas, especificamente as amostras de raio 3 mm longitudinal e 15 mm longitudinal as quais foram seccionadas em máquina de corte sob constante aplicação de fluído de arrefecimento, o ponto de corte pode ser observado através da Figura 17.

Figura 17 – Resultado do seccionamento da amostra



Fonte: Autor, 2021

Finalizado o processo de corte das amostras as mesmas foram inseridas individualmente dentro de uma prensa embutidora da fabricante Arotec juntamente com uma quantidade de baquelite suficiente para cobrir o topo da amostra. Finalizado a colocação da baquelite o equipamento foi ligado a uma pressão constante de 150 kgf/cm² durante 15 minutos, após passados os 15 minutos de aquecimento deixou-se a amostra em processo de resfriamento durante 7 minutos, a Figura 18 mostra o equipamento utilizado para embutimento.

Figura 18 – Embutimento da amostra



Fonte: Autor, 2021

Finalizado o processo de embutimento as amostras foram lixadas sob água corrente utilizando-se lixas de gramatura 100 a 1200 tomando-se cuidado para que sempre que houvesse substituição da lixa e as amostras fossem rotacionadas 90°. Encerrada a etapa de lixamento das amostras, estas foram encaminhadas a uma politriz onde foram devidamente polidas sob auxílio com alumina sobre o pano de polimento.

A etapa final de preparação das amostras consistiu em submeter as mesmas sob ataque químico a fim de revelar sua microestrutura, nessa etapa as amostras foram inseridas em um recipiente que continha Nital durante 10 segundos.

3.2.6 Ensaio de Microdureza Vickers

Este ensaio consistiu em submeter duas amostras de raios de alívio de dobra distintos e com sentido de laminação longitudinal a um equipamento de análise de microdureza.

Para o estudo de microdureza optou-se pela escolha de duas amostras com sentido de laminação paralelo a linha de dobra, sendo assim escolhido o raio de alívio de dobra de 3 mm e 15 mm devido a serem os extremos da faixa de tamanhos a ser analisada. Ambas as amostras foram previamente preparadas e embutidas, em seguida foram submetidas ao equipamento de análise de microdureza da fabricante *Shimadzu* com um penetrador piramidal do tipo Vickers com carga de 0,5 kg e com aplicação de carga durante 10 segundos, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Equipamento para análise de microdureza Vickers



Fonte: Autor, 2021

Perante as amostras obtidas, optou se por determinar a microdureza de 6 pontos específicos a fim de comprovar a teoria de que além do surgimento de trincas no material, o incorreto raio de alívio de dobra ocasiona um aumento na dureza do material. Foram assim analisados 3 pontos específicos próximos ao núcleo da amostra e 3 pontos próximos ao raio de dobra externa conforme exemplo ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Regiões da amostra para medição de microdureza Vickers



Fonte: Autor, 2021

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 EMPRESA DE ESTUDO

A empresa onde se deu o desenrolar da maior parte deste projeto trata-se de uma grande multinacional localizada no estado do Rio Grande do Sul que atua no setor agrícola com a fabricação de equipamentos de elevada qualidade vindo a atender todas as necessidades da agricultura desde o plantio até a colheita.

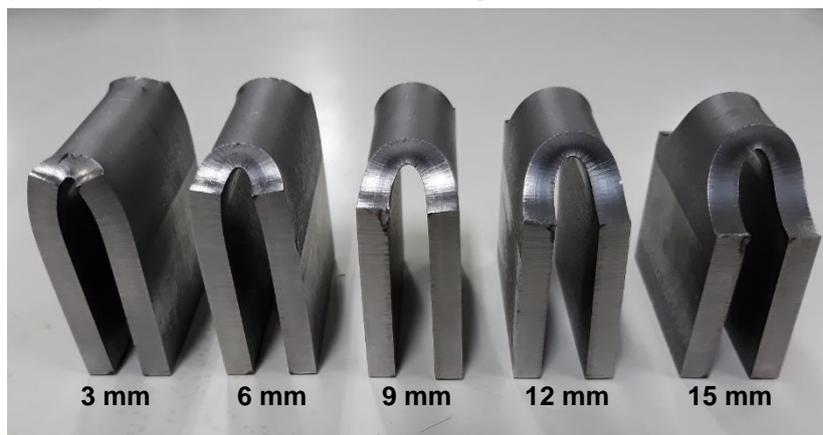
Esta empresa está a mais de duzentos anos no mercado oferecendo soluções de alta capacidade tecnológica em seus equipamentos com a aplicação de processos de fabricação muito bem definidos e rigorosos, se fazendo a qualidade um dos pontos mais fortes desta marca.

Se faz necessário aqui esclarecer que por motivos de não expor a empresa de estudo optou-se por não revelar o nome da mesma, preservando assim a sua integridade. A não menção da empresa não afeta o decorrer do projeto bem como os resultados obtidos através deste estudo.

4.2 CORPOS DE PROVA DOBRADOS

Através da Figura 21 pode se observar os corpos de prova com sentido de laminação transversal finalizado o processo de conformação, os mesmos estão dispostos do menor para o maior raio de alívio.

Figura 21 – Corpos de prova com sentido de dobra longitudinal

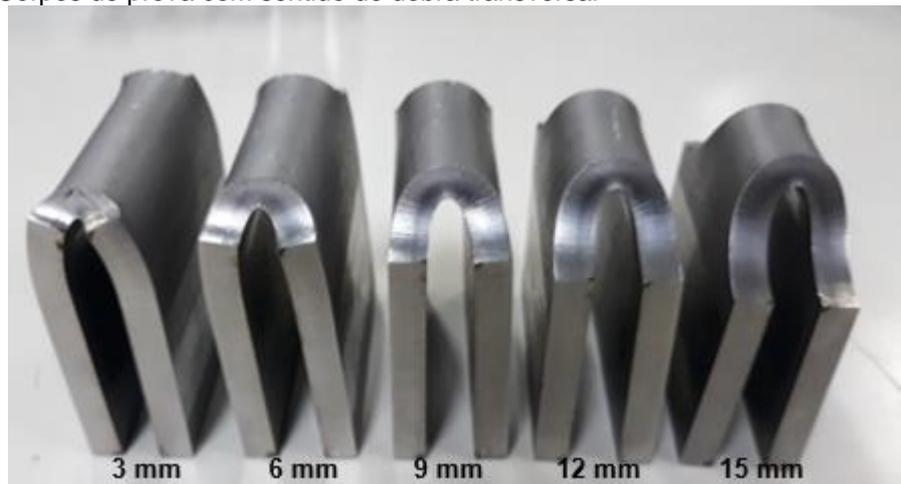


Fonte: Autor, 2021

Através da Figura 21 é notório que o raio de 3 mm apresentou uma considerável trinca superficial em seu exterior, enquanto os outros corpos de prova não apresentaram nenhuma trinca que pudesse ser percebida de forma macroscópica.

Os corpos de prova dobrados com o sentido de laminação transversal a linha de dobra apresentaram resultados muito similares, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Corpos de prova com sentido de dobra transversal



Fonte: Autor, 2021

Entre os corpos de prova que apresentaram trincas visuais macroscópicas para o raio 3 mm, pode se observar que o corpo de prova com sentido de laminação transversal apresentou as menores trincas aparentes.

4.3 RESULTADOS MICROSCÓPICOS

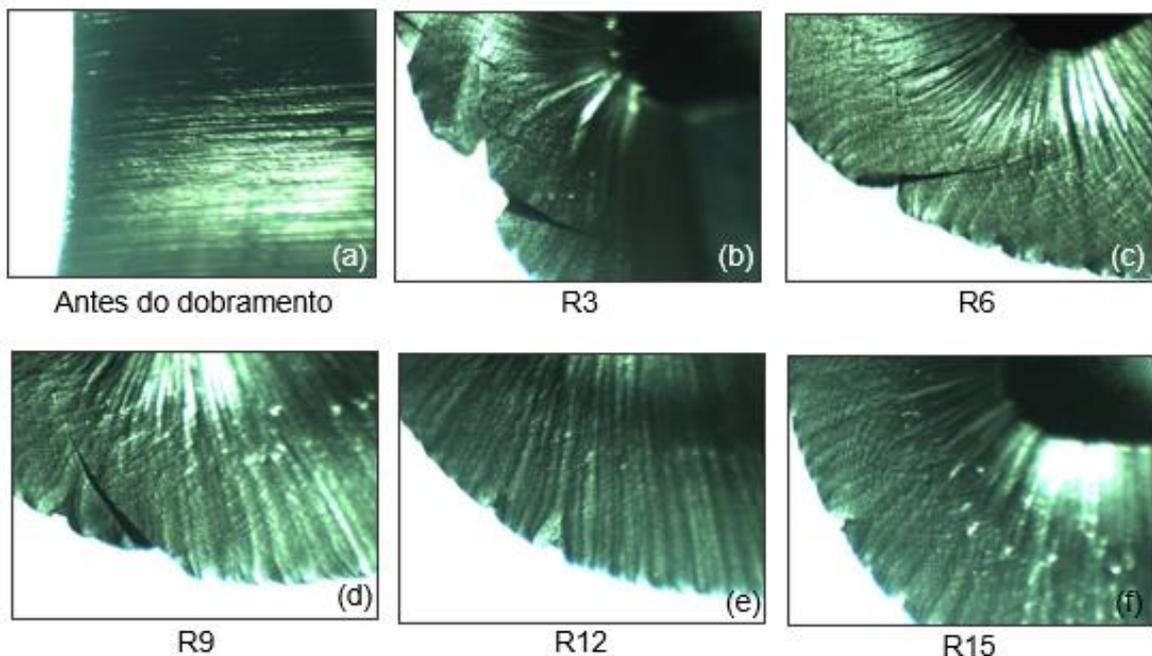
A abordagem para análise dos resultados microscópicos da secção dobrada das amostras será contemplada em duas partes. A primeira parte abordada consiste na análise microscópica dos 5 corpos de prova que possuem sentido de laminação paralelo a linha de dobra, onde poderá ser observado a influência de cada raio de alívio de dobra no surgimento de trincas.

A segunda fase da análise microscópica consiste em submeter os 5 corpos de prova de sentido de laminação perpendicular à linha de dobra podendo-se desta forma analisar individualmente cada amostra, bem como posterior comparativo entre as mesmas.

4.3.1 Análise dos corpos de prova longitudinais

A análise dos corpos de prova longitudinal consistiu em submeter os mesmos sob análise de microscópio tomando se nota de cada um dos experimentos. Na Figura 23 pode se observar as imagens microscópicas obtidas para cada corpo de prova, bem como uma imagem do corpo de prova antes de ser submetido aos esforços de dobra, comprovando assim que o material não possuía nenhuma falha em sua condição inicial.

Figura 23 – Análise dos corpos de prova de sentido de laminação longitudinal.



Fonte: Autor, 2021

Conforme exibido na Figura 23(b) e 23(c) os corpos de prova de raios 3 mm e 6 mm são os que apresentaram o maior nível de trincas, sendo ainda mais perceptível para o raio três, que possuía metade da espessura do corpo de prova, apresentando trincas ao longo de toda sua extensão. Para a Figura 23(d) o corpo de prova também apresentou uma trinca, entretanto a mesma se fazia de menor extensão se comparada com o da Figura 23(c) para o raio de 6 mm.

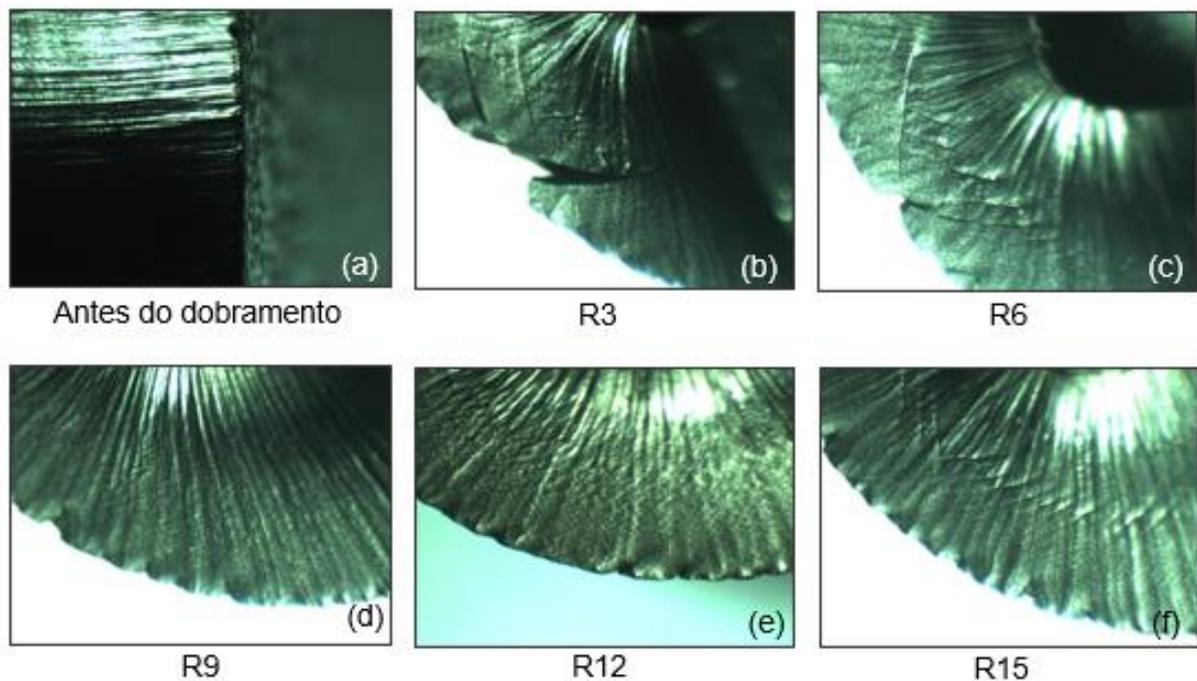
O corpo de prova de raio 12 mm diferente dos demais não apresentou trincas severas, entretanto o mesmo apresentou uma pequena trinca em sua extremidade o qual dependendo da aplicação pode vir a se tornar um concentrador de tensões que em prática poderia levar o material para ruptura. O último corpo de prova de raio 15 mm não apresentou trincas em sua extensão.

Para todos os corpos de provas analisados, o de raio 15 mm foi o que em si apresentou os resultados mais satisfatórios devido a não existência de trincas que pudessem vir a levar a ruptura direta do material.

4.3.2 Análise dos corpos de prova transversais

A análise dos corpos de prova com sentido de laminação transversal a linha de dobra fora submetida ao mesmo tipo de análise e detalhamento dos corpos de prova longitudinais. Os resultados analisados em microscópio podem ser observados na Figura 24.

Figura 24 – Análise dos corpos de prova com laminação transversal



Fonte: Autor, 2021

A Figura 24(a) ilustra o corpo de prova antes de ser submetido aos esforços provenientes da conformação o qual não possuía nenhum indício de falha que pudesse ser percebido através do uso do microscópio.

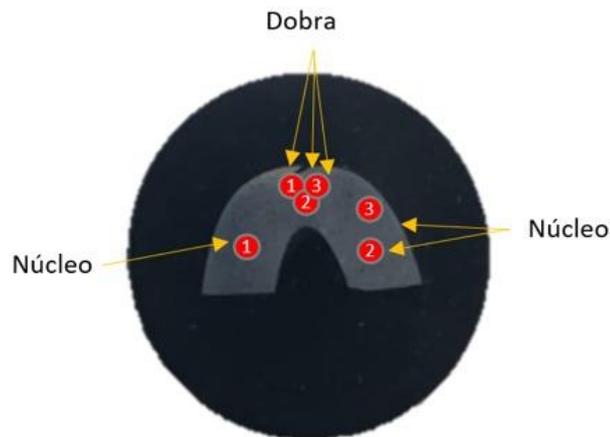
Para os resultados obtidos o raio de alívio do corpo de prova de 3 mm apresentou uma única trinca ao longo de sua extensão, porém existem indícios do surgimento de outras trincas, em contrapartida o raio de alívio de 6 mm apresentou apenas pequenas trincas em sua vista lateral, podendo apenas serem visualizadas sob uso de microscópio.

As amostras de raio 9 mm, 12 mm e 15 mm não apresentaram nenhum indício que pudesse comprovar o início de alguma trinca superficial ao longo de todo o raio de alívio de dobra.

4.4 RESULTADOS DE ANÁLISE DE MICRODUREZA

O ensaio de microdureza foi realizado exclusivamente para as amostras de raio 3 mm e 15 mm, ambas com sentido de laminação longitudinal sendo possível observar na Figura 25 os locais de cada ponto de medição. Com este ensaio, buscou-se avaliar a hipótese do encruamento do material na região de dobra, o qual aumenta sua dureza na região plasticamente deformada. E, se esse aumento de dureza está relacionado ao surgimento de trincas.

Figura 25 – Pontos de medição da amostra



Fonte: Autor, 2021

Os resultados obtidos para os seis pontos analisados e abordados na Figura 25 através do uso de microdurômetro para a amostra de raio 3 mm longitudinal podem ser observados no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados de microdureza para amostra de raio de alívio de dobra 3 mm

HV	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Núcleo	212,9	200,5	257,9
Dobra	295,7	285,7	295,7

Fonte: Autor, 2021

Através do Quadro 3 se torna possível observar que entre as durezas medidas do núcleo e o local do raio de alívio de dobra tivemos um aumento médio de 92 HV o que em termos de alteração de dureza representa um valor consideravelmente alto,

comprovando que o material teve um alto nível de encruamento próximo ao raio de alívio de dobra da amostra de 3 mm. O valor obtido para o ponto 3 do núcleo não foi levado em consideração, devido a estar muito distante dos demais pontos que foram medidos próximos do núcleo, fato o qual se deve devido ao mesmo ter sido medido muito próximo ao raio de alívio de dobra.

Para a amostra de raio de alívio de dobra 15 mm foram realizados os mesmos ensaios em pontos muito próximos aos realizados para o corpo de prova de 3 mm. Os valores obtidos para a amostra de 15 mm estão disponíveis no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados de microdureza para amostra de raio de alívio de dobra 15 mm

HV	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Núcleo	200,5	216,5	219,5
Dobra	257,6	266,4	249,2

Fonte: Autor, 2021

Analisando os valores obtidos da amostra com raio de alívio de dobra de 15 mm presentes no Quadro 4 percebe-se que os valores de núcleo estão muito próximos aos apresentados no Quadro 2, entretanto percebe-se que nesta amostra não houve um nível de aumento de dureza na região da dobra tão significativo quanto a amostra de 3 mm, obtendo-se um aumento médio de 45,5 HV. O que leva a concluir que quanto menor o raio de alívio de dobra em relação a espessura maior será a dureza obtida na região do alívio de dobra.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Perante os resultados apresentados ao decorrer do projeto é possível destacar que dentre todas as amostras analisadas para ambos os sentidos de laminação, as que apresentaram o maior número de trincas foram as amostras de sentido de laminação longitudinal, uma vez que se teve a presença de trincas até o raio de alívio de dobra de 12 mm, além do considerável aumento de dureza que estas amostras apresentaram entre a região do núcleo e o local do raio de alívio de dobra propriamente dito.

As amostras de sentido de laminação transversal apresentaram resultados satisfatórios quanto ao desenvolvimento de trincas e dureza, visto que as amostras apenas apresentaram trincas até o raio 6 mm, a partir desta não foi detectada mais nenhum outro tipo de não conformidade que pudesse levar o material a ruptura. A análise de microdureza pôs a prova a teoria de que o raio de alívio de dobra e o sentido de laminação em relação a linha neutra influencia diretamente no encruamento do material que se está analisando.

Mediante o desenvolver dos corpos de prova e todas as análises assim empregadas como método de verificação do surgimento de trincas pode se definir parâmetros que venham a eliminar ou reduzir o eventual surgimento deste tipo de problema, ficando evidenciado que dentre todos os testes a pior das situações se deu para as amostras com linha de dobra paralela ao sentido de laminação.

Com a finalidade de evitar o surgimento de trincas, é recomendado utilizar raios de alívio de dobra de no mínimo 2,5 vezes a espessura quando este tiver linha de dobra paralela a laminação do material e no mínimo 1 vez a espessura quando o componente possuir sua linha de dobra perpendicular ao sentido de laminação do material.

Como definição de regra geral sabe-se que em muitos casos não existe um controle do sentido de rotação da peça no momento do corte, não se dando assim muita atenção ao sentido de laminação principalmente pois este tipo de cuidado acaba acarretando no aumento de sucata. Através deste argumento entende-se que pode se fazer uso de uma regra geral para o tamanho do raio de alívio de dobra de no mínimo 2.5 vezes a espessura do material para ambos os sentidos de laminação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A572/A572M**: norma padrão para aços estruturais de baixa liga e alta resistência de Nióbio-Vanádio. Estados Unidos: ASTM, 2021.

ANDERSON, Mark. **What Are ASTM Standards?** 2019. Disponível em: <https://www.meadmetals.com/blog/what-are-astm-standards>. Acesso em: 30 ago. 2021.

ALMEIDA, Monica S. 2018. **Análise comparativa da microestrutura e da dureza do aço ASTM A182 F22**. Paraíba. Universidade Federal do Paraíba. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13718?locale=pt_BR Acesso em 04 nov. 2021.

ARRUDA, Elton. **Como fazer a metodologia em um projeto?** Maranhão: Universidade Federal do Maranhão, 2017. Disponível em: <http://www.deinf.ufma.br/~portela/metodologia.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7438**: materiais metálicos – ensaio de dobramento: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016

AVALLONE, Pedro L. 2013. **Análise das empregabilidades metalográficas de fixadores empregados em veículos da década de 40 e 60**. São Paulo. Faculdade de Tecnologia de Sorocaba. Acesso em 12 Ago. 2021.

BAPTÍSTA, André L. **Microindentation Hardness Testing**. Niterói: UFF - Universidade Federal Fluminense, 2021. Acesso em 04 nov. 2021.

BERNARDES, E.; JUNIOR, J. M.; NAKANO, D. N. **Pesquisa qualitativa em engenharia de produção e gestão de operações**. São Paulo: Atlas, 2019.

BOTH, Gilberto; MOURA, Cassiano R. Análise da influência do raio de punção e do sentido de laminação na deformação de chapas de aço no processo de dobra. **Engevista**. Santa Catarina, v. 21, n. 1, p. 93-103, fev. 2019. Acesso em: 07 mar. 2021.

BOTH, S.G. **Análise da influência do raio do punção e do sentido de Laminação na deformação de chapas de aço no processo de dobra**. Monografia (Graduação em Tecnologia em fabricação Mecânica). Instituto Federal de Santa Catarina, 2017. Acesso em: 07 mar. 2021.

BRAGA, Rafael M. L. **Análise metalográfica do alumínio sob diferentes formas de solidificação pelo processo de fundição**. Monografia. (Graduação em Engenharia de Materiais). Belo Horizonte: Centro Federal de Educação e Tecnologia de Minas Gerais, 2015. Acesso em: 14 ago. 2021.

CALLISTER, William D. RETHWISCH, David G, 2020. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. Ed. 10, pg. 97. Acesso em 28 Out. 2021.

CHITÃO, Carlos V. C. G. **Efeito das características geométricas do processo e do material no dobramento de chapas de latão**. Monografia. (Graduação em

Engenharia de Materiais). Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2017. Acesso em 16 abr. 2021.

CIMM, 2021. **Teste da microdureza.** Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6560-teste-da-microdureza. Acesso em 4 nov. 2021.

DECKER, Fabio A. **Implementação de uma ferramenta de dobra para processo de conformação sem marcas em peças de alta visibilidade.** Trabalho de Final de curso Monografia. (Graduação em Engenharia de Produção). Horizontina: Faculdade Horizontina, 2019. Acesso em 16 abr. 2021.

EMCO TEST. **Theory of hardness testing.** 2021. Disponível em: <https://www.emcotest.com/en/the-world-of-hardness-testing/hardness-know-how/theory-of-hardness-testing/vickers-52/specimen-requirements-for-the-vickers-method-239/>. Acesso em: 9 nov. 2021.

FARIA G. A.; FARIA G. L.; RIOS M. C. Estudo da influência de parâmetros de medição sobre a representatividade e dispersão dos resultados do ensaio de microdureza Vickers. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22. Natal, 2016.

FLYNT, Joseph. **The different processes of sheet metal bending.** 3D Insider, 2020. Disponível em: <https://3dinsider.com/processes-sheet-metal-bending/>. Acesso em: 9 jun. 2021.

FUKUGAUCHI, Cristina S. **Metodologia para caracterização metalográfica de um aço trip por microscopia óptica.** São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2010. Acesso em 23 ago. 2021.

GERDARDT T.; SILVEIRA D. **Métodos de pesquisa.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

GIL, Antonio, C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, 2002. São Paulo.

LIBRARY OF MANUFACTURING. **Sheet metal bending – methods, design tips & K factor.** 2021. Disponível em: <https://fractory.com/sheet-metal-bending/>. Acesso em: 23 out. 2021.

MALAVOLTA A.; MORENO M.; EVANGELISTA S.; *et. al.* **Análise do retorno elástico em dobramento de chapas via método dos elementos finitos.** São Paulo, 2016. Acesso em: 17 abr. 2021.

MARCONI, Marina A; LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de metodologia científica.** 5º Edição. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2003.

MENDES, Marcelo B. M.; MOREIRA, R. W. **Metalografia, análise de oxigênio e nitrogênio e teste de dureza Vickers dos materiais de fixação interna usados no esqueleto craniofacial.** São Paulo: Universidade Estadual de Campinas. 2012.

PALMEIRA, A. A. **Capítulo 7: processos de dobramento & calandragem**. Rio de Janeiro: Universidade do Estado de Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/20280174/cap-7-dobramento>. Acesso em: 6 mar. 2021.

RAHULKUMAR, S. H. **Advances in metal forming**. Berlin: Springer-Verlag, 2015.

ROHDE, Regis A. **Metalografia preparação de amostras: uma abordagem prática**. Santo Ângelo: URI, 2010. Acesso em: 6 mar. 2021.

SIMONS, Jasper. **Redesign of a press brake**. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2006. Acesso em 01 Mai. 2021.

TUBONASA. **Você sabe o que é ASTM?** 2019. Disponível em: <https://tubonasa.com.br/noticias/o-que-e-astm>. Acesso em: 30 ago. 2021.

VELLING, Andreas. **Sheet metal bending – methods, design tips & K factor**. 2019. Disponível em: <https://fractory.com/sheet-metal-bending/>. Acesso em 17 maio. 2021.

WILSON TOOL. **Wt-style tooling solutions**. p. 15-19, 2021. Disponível em: <https://www.wilsontool.com/pt-br/procurar?searchtext=Wt-style+tooling+solutions&searchmode=allwords> .Acesso em: 20 out. 2021.

ANEXO A – TABELA DE REATIVOS USADOS PARA ATAQUE QUÍMICO

Designação metalográfica	Composição	Aplicação
Cloreto de cobre-amônio em meio amoniacal	10g cloreto de cobre-amônio 120 ml água destilada Amoníaco até dissolver o precipitado	Reativo p/ micrografia de múltipla aplicação para ligas de cobre
Cloreto de ferro III	5g cloreto de ferro III 30 ml ácido clorídrico concentrado 100 ml de água destilada	Reativo para micrografia de superfícies de grãos em liga de cobre, contrastes especialmente acentuados em cristais α .
Água oxigenada + Amoníaco	1 parte de água oxigenada a 3% 1 parte de amoníaco	Reativos para micrografia de contornos dos grãos de cobre.
Lixívia de solda	10g hidróxido de sódio 90 ml água destilada	Reativo universal para micrografia de ligas de alumínio
Ácido fluorídrico	0.5 ml ácido fluorídrico 99.5 água ml destilada	
Nital a 3%	97 ml álcool etílico 3 ml ácido nítrico concentrado	Reativo p/ micrografia de aço e ferro não ligado e de baixa liga, metal branco, ligas de magnésio. Também para aços de alta liga com estrutura martensítica.
Nital a 10%	90 ml de álcool etílico 10 ml de ácido nítrico concentrado	Em ataques microscópicos de ação profunda para tornar visível constituintes especiais da estrutura em aços e ferros (carbonetos, eutético fosforoso) não ligados e de baixa liga. Em casos isolados também como reativo p/ microscopia de alta liga. Em macroscopia p/ camadas cementadas respectivamente de profundidade de endurecimento.

Fonte: Adaptado de Rohde, 2010