

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

GILBERTO SCHWENGBER BOTH

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RAIO DO PUNÇÃO E DO SENTIDO DE
LAMINAÇÃO NA DEFORMAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO NO PROCESSO DE
DOBRA

Jaraguá do Sul/SC

01/08/2017

GILBERTO SCHWENGBER BOTH

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RAIOS DO PUNÇÃO E DO SENTIDO DE
LAMINAÇÃO NA DEFORMAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO NO PROCESSO DE
DOBRA

Monografia apresentada ao
Curso Superior em
Tecnologia em Fabricação
Mecânica do Campus
Jaraguá do Sul-Rau do
Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção
do diploma de Tecnólogo
em Fabricação Mecânica.

Orientador: Cassiano
Rodrigues de Moura

Jaraguá do Sul/SC

01/08/2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Both, Gilberto Schwengber

**Análise da Influência do Raio de Dobra e do Sentido
de Laminação na Deformação de Chapas de Aço no Processo de
Dobra / Gilberto Schwengber Both ; orientação de
Cassiano Rodrigues de Moura. Jaraguá do Sul, SC, 2017.**
56 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.**

1. Raio Mínimo. 2. Paralelo. 3. Perpendicular. 4.
Sentido de Laminação. I. Moura, Cassiano Rodrigues de.
II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.

GILBERTO SCHWENGBER BOTH

ANALISE DA INFLUÊNCIA DO RAIOS DO PUNÇÃO E DO SENTIDO DE
LAMINAÇÃO NA DEFORMAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO NO PROCESSO DE
DOBRA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora
abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 01/08/2017.



Mestre Cassiano Rodrigues de Moura

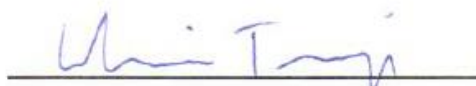
Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina Jaraguá do Sul–Rau



Mestre Vanderlei Junckes

Instituto Federal de Santa Catarina Jaraguá do Sul–Rau



Doutor Almir Turazi

Instituto Federal de Santa Catarina Jaraguá do Sul–Rau

É com muito orgulho que dedico este trabalho a meus pais Verno Both e Maria Silvia Schwengber Both e à minha esposa Denise Aparecida de Oliveira Both e a meu filho Miguel de Oliveira Both.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus pela capacidade espiritual para compreender e vencer os desafios que me trouxeram até aqui;

À minha esposa Denise e meu filho Miguel pelo amor, compreensão e suporte em todos os momentos;

Ao meu orientador Eng. Cassiano Rodrigues de Moura pela dedicação, prontidão e atenção em todos os momentos, em que foi solicitado durante todo o período acadêmico;

Aos professores, servidores e colegas do IFSC Câmpus Jaraguá do Sul–Rau que sempre auxiliaram nas dificuldades e foram fundamentais na formação do conhecimento;

A todos, muito obrigado.

RESUMO

O processo de dobra de chapas metálicas é relativamente simples e vem sendo muito utilizado na indústria para dar forma a às chapas. Durante esse processo a chapa é exposta a esforços de tração e compressão simultaneamente, o que pode gerar defeitos. O objetivo deste trabalho é analisar as deformações em chapas de aço carbono ASTM A-36 provenientes do processo de dobra. Esta pesquisa foi classificada como experimental, e para ser realizada foram utilizadas chapas de aço dobradas em paralelo e em perpendicular ao sentido de laminação, sendo dobradas através de raios mínimos de dobra normalizados pela Norma DIN 6935 e com raios mínimos não normalizados pela referida norma. Dessas chapas foram extraídas amostras que passaram por caracterização através de ensaio metalográfico e avaliação de micro-dureza, tanto no raio interno como externo da dobra.. Foram encontradas deformações em todas as amostras analisadas, sendo que, nas amostras fabricadas com raios não normalizados houve mais deformações. Foi possível perceber que essas deformações podem ser potencializadas de acordo com o raio do punção utilizado, o que acarreta no surgimento de trincas, o encruamento e o endurecimento na seção dobrada da chapa.

Palavras chave: Raio mínimo. Perpendicular. Paralelo. Sentido de Laminação

ABSTRACT

This process of bend sheet metal is relatively simple and has been used extensively in the industry to form sheets, during which the sheet is exposed to tensile and compressive stresses simultaneously, which can lead to defects in the parts. The objective of this work is to analyze the deformations in ASTM A-36 carbon steel plates from the bending process. This research was classified as experimental, and to be carried out, steel plates folded in parallel and perpendicular to the rolling direction were used, these were folded through minimum bending radii normalized by DIN 6935 and with minimum radii not normalized by said norm , From these plates were extracted samples that underwent characterization through metallographic assay and micro-hardness evaluation, both in the internal and external radius of the fold. Deformations were found in all samples analyzed, and in samples made with non-normalized rays There were severe deformations, it was possible to notice that these deformations can be potentialized according to the radius of the puncture used, which results in cracking, hardening and hardening in the folded section of the plate.

Keywords: Minimum Radius. Perpendicular. Parallel. Direction of Lamination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfis passíveis de serem fabricados por dobra	17
Figura 2 – Exemplos ferramentas aplicáveis em prensas dobradeira	18
Figura 3 – Fibras deformadas após dobra	21
Figura 4 – Microscopia do aço ASTM-A36	22
Figura 5 – Chapa de aço	23
Figura 6 – Trinca em peça dobrada	24
Figura 7 – Trinca (a) marcas de praia (b) marcas de estrias	25
Figura 8 – Ferrita e Perlita do aço	28
Figura 9 – Tesoura guilhotina	30
Figura 10 – Prensa dobradeira	30
Figura 11 – Punções utilizados: (a) Punção de raio 5mm; (b) Punção adaptado de raio 12mm; (c) Punção adaptado de raio 16mm.	31
Figura 12 – Matriz de dobramento utilizado nos ensaios.....	32
Figura 13 – Embutidora Fortel	33
Figura 14 – Lixadeira e politriz fortel.....	34
Figura 15 – Microscópios utilizados nos ensaios (a) Microscópio Diagtech (b) Estereoscópio Zeis–Stemi	34
Figura 16 – Medidor de dureza.....	35
Figura 17 – Fluxo metodológico	36
Figura 18 – Perfil dos corpos de prova	38
Figura 19 – Partes descartadas das chapas.....	40
Figura 20 – Amostra embutida em baquelite, após processo de polimento.....	41
Figura 21 – Ensaio metalográfico do aço antes de sofrer a deformação	43
Figura 22 – Micro–dureza do aço antes de sofrer a deformação	44
Figura 23 – Dureza no raio interno da dobra	44
Figura 24 – Dureza no raio externo da dobra	46
Figura 25 – Análise macroscópica: a) PA5 b) PE5 c) PA16 d) PE12.	48
Figura 26 – Raio interno das amostras: (a) PA 16; (b) PA 5.....	50
Figura 27 – Raio interno das amostras: (a) PE 12; (b) PE 5.....	51
Figura 28 – Raio externo das amostras: (a) PA 16; (b) PA 5.....	52
Figura 29 – Raio externo da amostra: (a) PE 12; (b) PE 5	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço ASTM - A36	29
Tabela 2 – Tabela de raios mínimos de dobra	37
Tabela 3 – Tabela de fabricação das peças	38
Tabela 4 – Tabela para seleção da matriz V	39
Tabela 5 – Amostras utilizadas nos ensaios	40
Tabela 6 – Composição química do nital 2%	41
Tabela 7 – Relação entre amostra e dureza	45
Tabela 8 – Relação entre amostra e dureza	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para testes e Materiais).

DIN – Deutches Institut für Normung E.V.(Instituto Alemão de Normalização).

HV – Rockwell Vickers

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

PA – Paralelo

PE – Perpendicular

SL – Sentido de Laminação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Estrutura do trabalho	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Fundamentos Teóricos Para o Processo de Dobra de Chapas	17
2.1.1 Dobramento de chapas metálicas	17
2.1.2 Processo de dobra no ar	18
2.1.3 Raio mínimo de dobra	19
2.2 Conceito de tensão x deformação	19
2.2.1 Tensão	20
2.2.2 Deformação	20
2.2.3 Tensão e deformação no processo de dobra	20
2.3 Metais	21
2.3.1 Aço carbono	21
2.3.2 Chapas de aço	22
2.4 Propriedades Mecânicas dos Materiais	23
2.4.1 Dureza do aço	23
2.5 Caracterização de Materiais	26
2.5.1 Conceitos básicos da microscopia	27
2.5.2 Ferrita e Perlita	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Classificação da pesquisa	28
3.2 Materiais	28
3.2.1 Chapa de aço ASTM A-36	28
3.2.2 Tesoura guilhotina	29
3.2.3 Prensa dobradeira	30
3.2.4 Punções de dobramento	31
3.2.5 Matriz de dobramento	32
3.2.6 Extração das amostras	32

3.2.8 Lixamento e polimento	33
3.2.9 Microscópios	34
3.2.10 Equipamento medidor de micro–dureza.....	35
3.3 Métodos.....	35
3.2.1 Planejamento do ensaio	37
3.3.2 Processo de dobra	39
3.3.4 Caracterização	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 Caracterização do material no estado inicial	43
4.2 Ensaio de microdureza.....	44
4.2.1 Microdureza na parte interna da dobra.....	44
4.2.2 Micro–dureza na parte externa da dobra.....	46
4.3 Propagação de trincas.....	47
4.3.1 Análise macroscópica.....	47
4.3.2 Análise microscópica.....	49
4.4 Deformação na estrutura cristalina.....	49
4.4.1 Deformação na parte interna da chapa	49
4.4.2 Deformação na parte externa da amostra	51
4.5 Estiramento	53
5 CONCLUSÕES	54

1 INTRODUÇÃO

O processo de dobra também conhecida como quinagem é um processo relativamente simples, muito utilizado na indústria metal mecânica para dar formas a chapas metálicas, podendo ser aplicado em peças com geometria simples como para peças com geometrias mais complexas.

Empresas que trabalham com o processo de dobra de chapas metálicas, frequentemente encontram problemas ao efetuar o seu trabalho. Quando uma chapa é dobrada, ela é submetida a esforços de tração e compressão, o que causa deformações em sua micro-estrutura, sendo que essas deformações podem proporcionar fenômenos indesejados.

Entre os defeitos que podem ocorrer estão o surgimento de trincas macroscópicas e microscópicas, alteração da dureza, alongamento e redução da espessura da chapa.

Um dos principais agravantes para o surgimento de defeitos é a escolha de raio de dobra, a composição química do aço escolhido e o sentido de laminação da chapa. A escolha incorreta de algum destes parâmetros pode ocasionar defeitos nas peças, que muitas vezes não visíveis a olho nu, podendo comprometer o bom funcionamento de componentes ou afetar a resistência mecânica de estruturas, o que pode gerar falhas e até mesmo culminar em graves acidentes, inclusive colocando a vida de pessoas em risco.

Na literatura existem poucos estudos sobre as deformações que o processo de dobra causam. Os que existem são recentes, esses autores apenas citam os procedimentos como raio mínimo para a quinagem; abertura de matriz; dimensão de aba mínima; recuperação elástica e defeitos existentes no processo de dobra.

Portanto, a questão a ser discutida é a seguinte: Como o sentido de laminação e o raio da ferramenta de dobra interferem na deformação de chapas de aço ASTM A-36 durante o processo de dobra?

1.1 Justificativa

Este trabalho propõe fundamentar a análise de investimentos da indústria metal-mecânica em ferramentas de dobra apropriadas para este processo, melhorando a qualidade das peças e diminuindo os custos de produção.

Em algumas empresas a engenharia de produto realizam os projetos

conforme as ferramentas existentes em seu parque fabril, isso devido a carência em investimentos, com isso muitas vezes é necessário super-dimensionar os projetos para compensar as deformações causadas pelo uso de ferramentas de dobra incorretas. Este processo acarreta no aumento dos custos das empresas limitando a qualidade das peças, gerando a empresa uma menor competitividade no mercado.

Em algumas empresas, existe grande resistência em investimento em equipamentos e ferramentas para o parque fabril, muitas vezes esta resistência é sustentada pelo argumento de que “sempre foi feito assim” e “nunca houve problemas”.

Para superar estes argumentos se faz necessário um estudo mais aprofundado para contribuir com esta decisão.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência do raio do punção e do sentido de laminação na deformações em chapas de aço carbono ASTM A-36 proveniente do processo de dobra.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar os corpos de prova verificando a existência de trincas;
- Avaliar o alongamento;
- Analisar a dureza na região da chapa onde houve a dobra;
- Verificar em qual sentido de laminação as chapas sofreram deformações menos severas.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está composto de 5 capítulos apresentados da seguinte forma.

No segundo capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica baseada em obras relevantes sobre fundamentos teóricos para o processo de dobra de chapas, conceitos de tensão e deformação, metais e propriedades mecânicas dos materiais, para fundamentar os experimentos e ensaios realizados neste trabalho.

No terceiro capítulo, são apresentados os materiais e os métodos utilizados no decorrer deste trabalho, explicando princípios de funcionamento e parâmetros utilizados, em conformidade com as normas específicas.

No quarto capítulo, é discutido os resultados alcançados nos estudos e ensaios, conforme especificado no primeiro capítulo no subtítulo objetivos específicos.

No quinto capítulo apresenta-se as conclusões mais importantes do trabalho, bem como sugestões para estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma fundamentação teórica para a realização do trabalho. Esta etapa do trabalho foi de vital importância para a realização do trabalho, agregando conhecimento para a realização dos ensaios e a análise de resultados.

2.1 Fundamentos Teóricos Para o Processo de Dobra de Chapas

2.1.1 Dobramento de chapas metálicas

As operações de dobramento ou quinagem são amplamente usados na indústria metal-mecânica, apresentando-se de fundamental importância para dar forma a chapas metálicas, seja para peças com geometrias simples ou peças com geometrias mais complexas, o processo de dobra pode ser definido como a deformação de uma chapa metálica ao longo de uma linha reta. A figura 1 apresenta algumas geometrias possíveis de serem fabricadas a partir de chapas metálicas.

Figura 1 – Perfis passíveis de serem fabricados por dobra



Fonte: www.perficon.com.br/index.php?link=chapas_dobradas

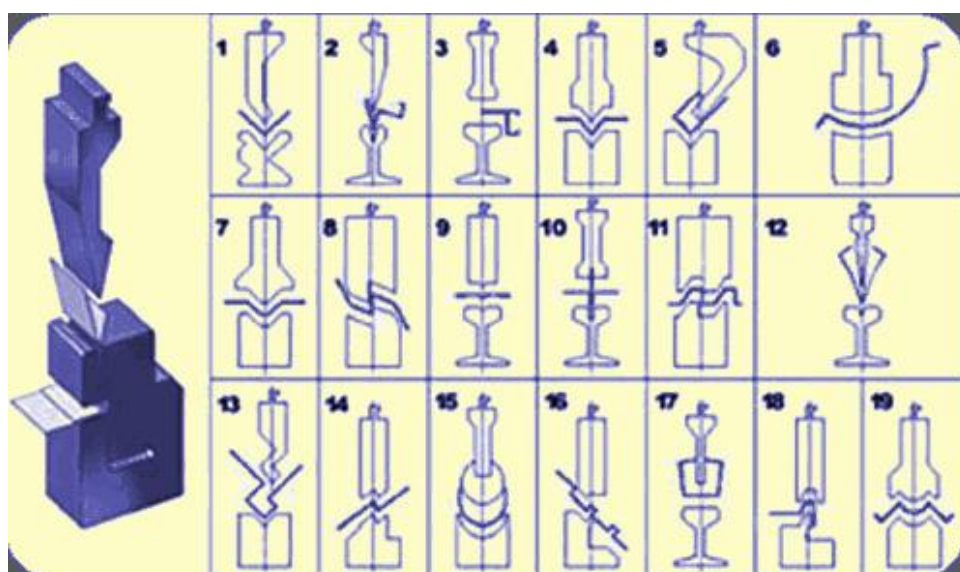
Segundo Rodrigues (2010, p. 265), “a quinagem é um processo de deformação plástica de chapa que permite o fabrico de superfícies planificáveis de geometria cilíndrica, cônica ou prismática.”

No processo de dobramento a chapa metálica é exposta a grande esforço, provenientes do punção de dobramento e da matriz de dobramento. Esses esforços fazem com que a chapa metálica sofra deformações plásticas, alterando a sua geometria inicial e assumindo a geometria desejada em projeto.

Neste processo de fabricação, a chapa de aço é submetida a esforços em duas direções opostas, fazendo com que a chapa deforme plasticamente fazendo com que a chapa deixe de ter apenas uma superfície plana e passe a ter duas superfícies planas concorrentes uma com a outra (KIMINAMI, 2013).

Na operação de dobramento, pode ser utilizada uma grande variedade de ferramentas de várias formas e modelos, permitindo a fabricação de peças em chapas de espessuras variadas e formas complexas. A figura 2 apresenta alguns exemplos de ferramentas aplicáveis em prensas dobradeiras.

Figura 2 – Exemplos ferramentas aplicáveis em prensas dobradeira



Fonte: www.bk27.com.br/dolbles/produtos.html

Ferramentas de dobradeiras podem ter geometrias diversas, possibilitando assim dar formas variadas em chapas, desde uma simples dobra a 90° até peças mais complexas como dobradiças.

2.1.2 Processo de dobra no ar

Os processos de dobra ou quinagem podem ser classificados em seis tipos, dobra no ar, dobra em V, dobra em U, dobra a fundo, dobra de flange com cunho de

arraste e dobra rotativa. Dentre estes os mais utilizados em prensas dobradeira é a dobra no ar.

O processo de dobra no ar é amplamente utilizado na indústria, por não exigir máquinas ferramentas com grandes capacidades, uma vez que a chapa não toca o fundo do canal da matriz durante o processo e o atrito entre a chapa e a matriz é mínimo, exigindo uma força menor para realizar o trabalho. Por exigir menor força de trabalho, o desgaste e o risco de inutilização das ferramentas é menor e permite a fabricação de peças com diferentes ângulos com o mesmo conjunto punção/matriz, reduzindo o custo com preparação de máquinas (RODRIGUES, 2010).

2.1.3 Raio mínimo de dobra

O raio mínimo de dobra é expresso geralmente em múltiplos da espessura da chapa, ou seja, um raio de dobramento de $3T$ 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 a 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. O raio de dobra é um ponto muito importante no processo de fabricação, uma vez que a chapa sofrerá vários esforços durante o processo, segundo Rodrigues (2010, p. 278).

(...), a influência do raio de curvatura na variação do comprimento das fibras e, conseqüentemente, na extensão tangencial que se desenvolve nas respectivas fibras segundo a espessura da chapa. A utilização de cunhos com raios de quinagem muito pequenos induz valores muito elevados das extensões tangenciais nas fibras exteriores, podendo originar o aparecimento de fissuras ou até mesmo fraturas.

2.2 Conceito de tensão x deformação

Segundo HIBBELER (2010 pg. 1), “ a resistência dos materiais é um ramo da mecânica que estuda as relações entre as cargas externas aplicadas a um corpo

deformável e a intensidade das forças internas que agem no interior do corpo.”

No projeto de qualquer estrutura ou máquina é necessário usar os princípios de estática para determinar as forças que estão agindo sobre os componentes, bem como em seu interior. O tamanho dos elementos, sua deflexão e estabilidade não dependem apenas das cargas internas, mas também do material que são feitos (HIBBELER, 2010).

Portanto é necessário compreender o comportamento do material, pois a escolha correta do material é de fundamental importância para o desenvolvimento das equações usadas na resistência dos materiais.

2.2.1 Tensão

Tensão é a intensidade da força, ou força por unidade de área que age sobre um material, se a força for perpendicular é chamada de tensão normal e se for tangente chamada de tensão de cisalhamento (HIBBELER, 2010).

2.2.2 Deformação

Deformação é quando uma força é aplicada a um corpo, ele tende a mudar sua forma e tamanho, essas mudanças são chamadas de deformações, podendo ser visível ou praticamente imperceptível. O alongamento ou contração de um determinado material é denominado deformação normal (HIBBELER, 2010).

2.2.3 Tensão e deformação no processo de dobra

Durante o processo de dobra a chapa esta exposta a vários esforços os quais podem causar diversos defeitos, ou tornar visível algum defeito já existente na chapa. O surgimento de defeitos, bem como o aumento de defeitos já existentes na chapa é potencializado devido a chapa sofrer 2 tipos de esforços ao mesmo tempo, a compressão na parte interna da dobra e tração na parte externa da dobra, segundo SCHAEFFER (2004, pg. 86),.

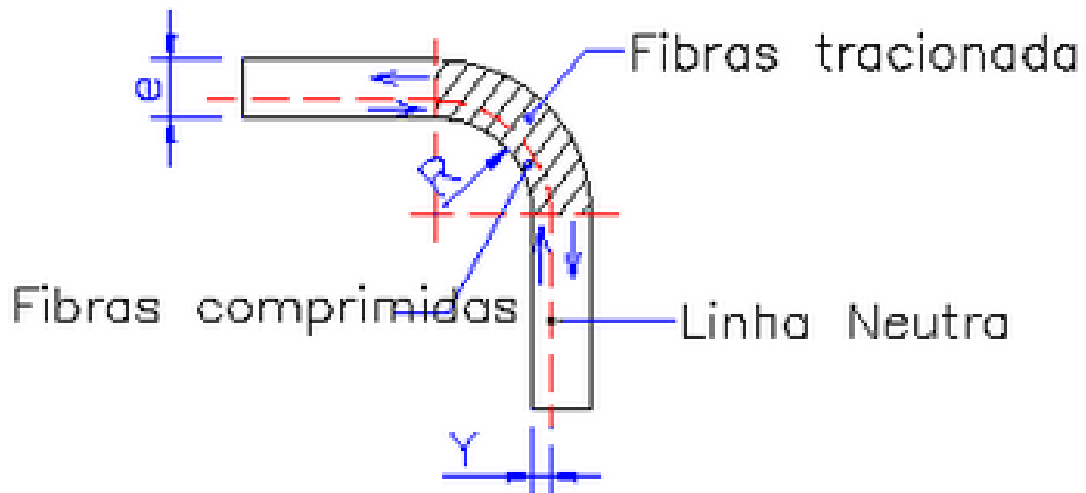
(...), num dobramento simples, na região onde ocorre a deformação plástica, uma zona onde atuam tensões de tração, uma linha de transição e outra zona onde as tensões são de compressão.

Dividindo-se a região de dobramento em camadas pode-se observar que as camadas externas afinam-se devido as tensões de tração. Na região

central, as camadas são comprimidas e suas dimensões aumentam na largura.

A Figura 3 mostra as fibras tracionadas e comprimidas, divididas pela linha neutra.

Figura 3 – Fibras deformadas após dobra



Fonte: www.ebah.com.br/content/ABAAABA5IAK/apostila-projeto-ferramenta

2.3 Metais

Os metais são compostos por um ou mais elementos metálicos, como o ferro e o alumínio, e também por elementos não metálicos, como o carbono e o nitrogênio em quantidades pequenas. Os átomos dos metais estão arranjados de maneira muito ordenada e sua formação é chamada de ligação metálica (NEWELL, 2010).

2.3.1 Aço carbono

Provavelmente nenhum metal é usado atualmente com tanta força como o aço carbono, isso devido a ele ser muito versátil, dúctil e resistente, o que o torna amplamente utilizado na indústria atualmente.

Segundo NEWELL (2010, p. 100) “o aço carbono é uma liga comum formada por átomos intersticiais de carbono em uma matriz de ferro.”

O aço carbono é produzido a partir do ferro que deriva de três matérias-primas básicas, o minério de ferro, o carvão e calcário. O minério de ferro é sinterizado e fornece todo o ferro do sistema, o carvão sofre um processo chamado

de coqueificação e o material resultante é rico em carbono, eles são levados ao alto forno onde são fundidos, o calcário moído é adicionado ao fundido e forma uma camada de escória acima do metal, a escória ajuda a remover as impurezas do sistema, após é adicionado elementos de liga ao ferro, a adição destes elementos é feita em pequenas porcentagens, para que o aço produzido tenha as características desejadas, (NEWELL, 2010).

A Figura 4 mostra a microscopia do aço ASTM-A36, onde pode-se observar uma região escura que é formada por perlita e uma região clara que é formada por ferrita.

Figura 4 – Microscopia do aço ASTM-A36



Fonte: www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-4467200

2.3.2 Chapas de aço

Segundo o dicionário do Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM), chapa é um nome feminino que define peça chata, pouco espessa feita de material consistente como metal ou vidro. A Figura 5 representa um conjunto de chapas de aço.

Figura 5 – Chapa de aço



Fonte: www.braganfer.com.br/chapa-aco-carbono

2.4 Propriedades Mecânicas dos Materiais

2.4.1 Dureza do aço

Segundo o dicionário do Centro de Informação Metal Mecânica, CIMM, a dureza é a resistência que um material pode oferecer durante a penetração de um corpo duro.

A dureza é uma propriedade importante dos materiais, que nada mais é do que uma medida de resistência do material a uma deformação plástica localizada. Para determinar esta dureza de um material utiliza-se ensaios de dureza.

Os primeiros ensaios de dureza de que se tem registro utilizava minerais como base, onde media-se a dureza de um material analisando se ele era capaz de riscar o outro, com este tipo de ensaio era possível apenas dizer que um material era mais duro ou mais macio do que outro, ou seja para fins de comparação. Atualmente os ensaios de dureza são os Rockwell, Brinell e Vickers.

Os ensaios de dureza Brinell (HB), Vickers (HV) e Rockwell (HR), são realizados através de equipamentos que introduzem um objeto de aço temperado com geometria conhecida e sob uma carga controlada. A dureza do material é expressa pela relação entre a carga aplicada e sobre o objeto e a superfície de impressão do material (GONTTHIER et al, 2012).

2.4.1.1 Ensaio de dureza Vickers

Este ensaio consiste em um penetrador de diamante muito pequeno e com

geometria piramidal que é forçado contra o corpo de prova com cargas variando de 1 a 1000g, a visualização da marca resultante apenas é possível através do microscópio.

Segundo CALLISTER (2013 p. 152), “o ensaio vickers é conhecido como método de ensaio de micro–dureza com base no tamanho do penetrador.”

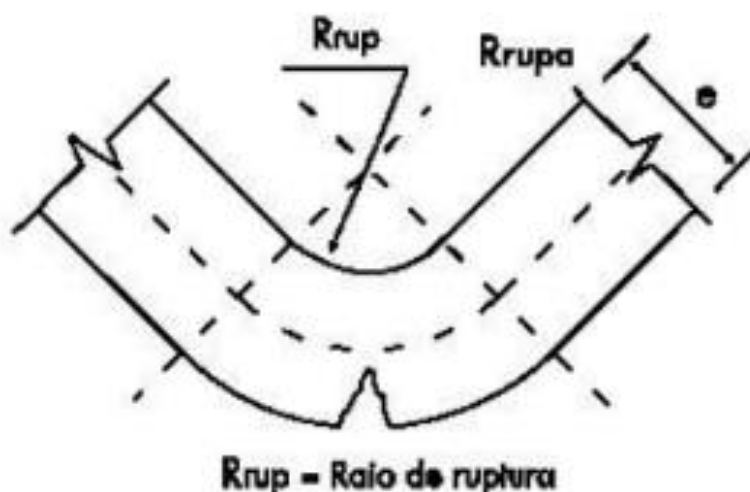
O método de micro–dureza Vickers é indicado para medir a dureza em regiões pequenas dos corpos de prova.

2.4.1.2 Trincas

Segundo o dicionário do Centro de Informação Metal Mecânica, CIMM, trinca é o rompimento da estrutura cristalina que aflora na superfície do material, também conhecida como trinca superficial. São descontinuidades que acontecem quando a tensão aplicada sobre o material excede o limite de ruptura do mesmo.

O processo de falha por trinca é formado por 3 etapas distintas, iniciação da trinca; propagação da trinca e falha final. A Figura 6 representa uma trinca em uma peça dobrada, onde pode–se observar o início da ruptura no raio externo da dobra.

Figura 6 – Trinca em peça dobrada



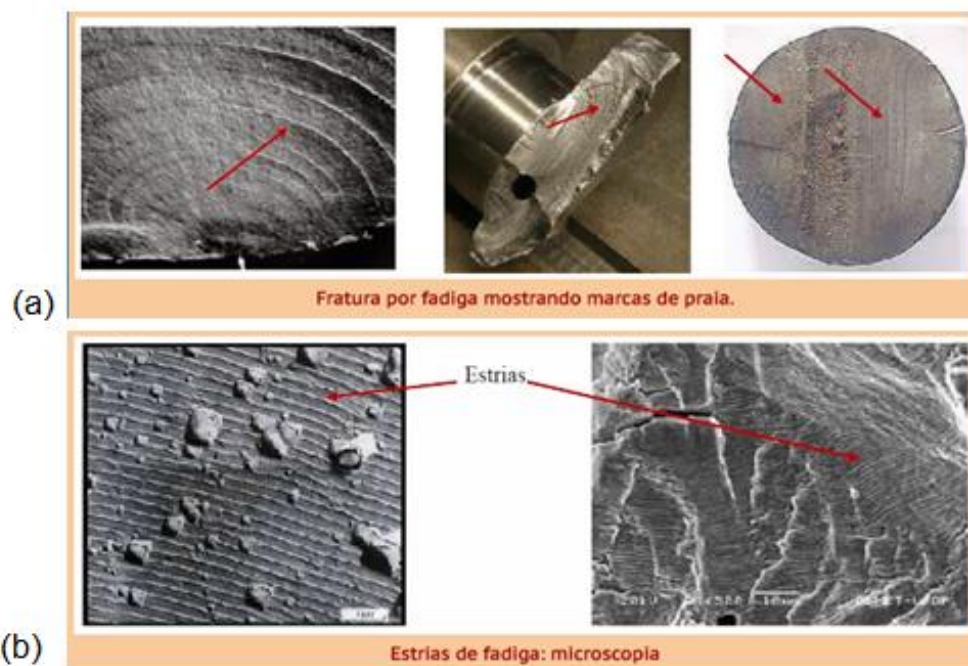
Fonte: caldnazza.com

Essas trincas geralmente se iniciam em riscos superficiais, ângulos vivos, rasgos de chaveta, fios de rosca e outras formas que podem concentrar tensões, ou seja, as trincas associadas a falhas por fadiga geralmente se iniciam na superfície de um componente, em algum ponto de concentração de tensão (CALLISTER,

2013).

A superfície de uma trinca pode ser caracterizada por dois tipos de marcas, denominadas marcas de praia e estrias, ambas indicam a extremidade da trinca e são caracterizada com nervuras concêntricas que partem do ponto de iniciação da trinca, mantendo um padrão circular ou semicircular, conforme representa a Figura 7, onde observa-se as marcas de praia (a) e as marcas de estrias (b).

Figura 7 – Trinca (a) marcas de praia (b) marcas de estrias



Fonte: inspecaoequipto.blogspot.com.br/2014/02/falha-por-fadiga.html8000200016

As marcas de praia apresentam dimensões macroscópicas e podem ser observadas a olho nu, por outro lado as marcas chamadas de estrias apresentam apenas dimensões microscópicas sendo possível a sua visualização através de microscópio eletrônico.

2.4.1.3 Estiramento

Segundo o dicionário CIMM estiramento é o processo pelo qual o material estica diminuindo a sua seção transversal sem romper. No caso do processo de dobramento de chapas de aço, o estiramento acontece na parte externa da chapa, no lado oposto onde o punção de dobra exerce força para efetuar a dobra.

O estiramento resultante do processo de dobra pode provocar defeitos nas peças, como o surgimento de trincas na parte externas da peça e o aumento dureza

do material através do encruamento dos grãos. Defeitos que podem ocasionar falhas quando a peça for exposta a esforços durante o funcionamento do equipamento a qual a peça se destina ou quando exposta aos intemperes do clima em caso de peças para estruturas metálicas.

2.4.1.5 Encruamento

Segundo CALLISTER (2013 p. 185), “o encruamento é um fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e resistente à medida que é deformado plasticamente”.

Esse fenômeno também é chamado de endurecimento, e ocorre quando um metal dúctil é tracionado ou comprimido, alterando a sua estrutura cristalina, este fenômeno geralmente ocorre em temperatura ambiente, e é conhecido como deformação plástica, este endurecimento do material ocorre devido ao aumento da tensão de escoamento durante a deformação plástica.

Como o encruamento ocorre em processos de conformação a frio, aumentando-se a temperatura, os efeitos do aumento da resistência resultante dos processos de conformação a frio podem ser diminuídos até o retorno as suas propriedades originais.

2.4.1.6 Deformação Plástica

Deformação plástica é uma deformação permanente ou que não pode ser recuperada após a liberação da carga aplicada, ela é acompanhada de deslocamentos atômicos permanente (CALLISTER,2013).

De acordo com CALLISTER (2013 p.139).

(...) de uma perspectiva atômica, a deformação plástica corresponde à quebra das ligações entre os átomos vizinhos originais, seguidas com novas ligações com novos átomos vizinhos, à medida que um grande número de átomos ou moléculas se movem uns em relação aos outros; com a remoção da tensão, eles não retornam as suas posições originais.

2.5 Caracterização de Materiais

2.5.1 Conceitos básicos da microscopia

Em alguns momentos é necessário visualizar a microestrutura dos materiais e analisar as suas propriedades. Alguns elementos possuem estruturas macroscópicas, passíveis de serem observadas a olho nu, outros são observados através de equipamentos por microscopia.

A maioria dos materiais possuem estrutura cristalina com dimensões microscópicas os quais somente podem ser analisadas através de um microscópio óptico, eletrônico ou de varredura por sonda, os quais são utilizados com mais frequência na microscopia. Estes instrumentos auxiliam nas investigações das características micro estruturais de todos os tipos de materiais. Algumas dessas técnicas empregam equipamentos fotográficos em conjunto com o microscópio (CALLISTER,2013).

Os ensaios microscópicos são extremamente úteis na indústria metal-mecânica, para avaliar se a estrutura de um metal possui defeitos, descontinuidades, ou até mesmo como se comportou após um determinado processo de fabricação.

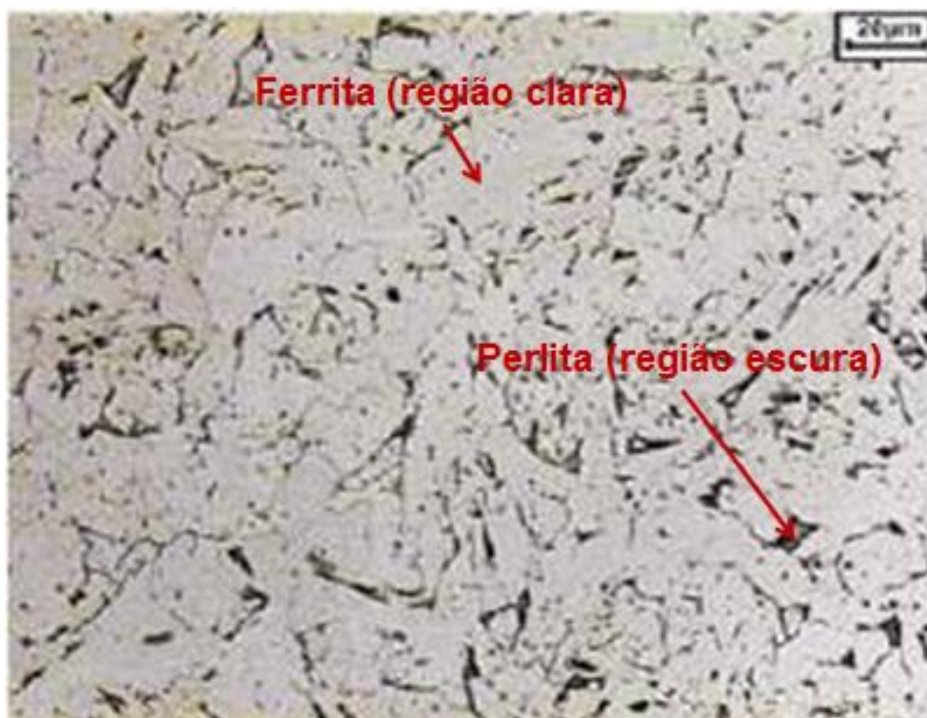
2.5.2 Microestrutura típica dos aços

Ferrita proeutetóide que coexiste com a perlita em aços hipoeutetóides, na microscopia é representada pela região clara (CALLISTER, 2013).

Perlita é uma microestrutura bifásica encontrada em alguns aços e ferros fundidos. Ela resulta da transformação da austenita com composição eutetóide e consiste em camadas alternadas de ferrita e cementita, na microscopia é representada pela região escura (CALLISTER,2013 pg. 800). A Figura 8 representa a ferrita e a perlita na microscopia do aço ASTM A-36

A ferrita e a perlita são fases observadas nos aços, e que se diferenciam pela quantidade de carbono, quanto mais perlita um metal tiver, maior a sua concentração de carbono e conseqüentemente mais duro.

Figura 8 – Ferrita e Perlita do aço



Fonte: www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-4467200

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Classificação da pesquisa

Esta pesquisa é classificada como experimental que, de acordo com CerVO, 2004 é baseada no conhecimento científico que diferentemente do conhecimento empírico procura compreender a sua estrutura, organização e funcionamento, sua composição e suas causas e leis.

Uma das principais características da pesquisa experimental é a manipulação direta das variáveis relacionadas com o objeto de estudo. A manipulação das variáveis possibilita o estudo da relação entre as causas e os efeitos de determinado fenômeno (CERVO, 2004).

Neste tipo de pesquisa, o pesquisador deve fazer uso de aparelho e instrumentos que a técnica moderna coloca a sua disposição tornando possível a percepção das relações existentes no objeto de estudo.

3.2 Materiais

3.2.1 Chapa de aço ASTM A-36

A chapa de aço objeto de estudo neste trabalho são do tipo ASTM – A36. Estas possuem resistência intermediária para utilização em componentes estruturais, tais como estruturas soldadas ou parafusadas, como pontes, edifícios, torres, bem como aplicações de uso estrutural em geral. Suas principais características são observadas na Tabela 1, onde são representadas sua composição química e propriedades mecânicas.

Tabela 1 – Composição química do aço ASTM - A36

ASTM A-36													
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								PROPRIEDADES MECÂNICAS					
								Alongamento (%)		Dobramento			
Especif.	Faixa de Espessura (mm)	C Max.	Mn Max.	Si Max.	P Max.	S Max.	Outros	Limite escoam. (MPa)	Limite Resist. (MPa)	Base 50mm	Base 200mm	Espessura (mm)	Diâm.
A-36	5.0 < e ≤ 19.1	0.25						≥ 250	400 a 550	21	18	5.0 < e ≤ 19.5	0.5 e
	19.1 < e ≤ 38.1	0.25	0.80				19.5 < e ≤ 25.4					1.0 e	
	38.1 < e ≤ 63.5	0.26	1.20	0.15 a	0.040	0.050	25.4 < e ≤ 38.1					1.5 e	
	63.5 < e ≤ 101.6	0.27	0.85	0.40			38.1 < e ≤ 50.8					2.5 e	
	101.6 < e ≤ 152.4	0.29	1.20				e > 50.8					3.0 e	

Fonte:

www.comercialgerdau.com.br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/catalogo-acos-planos-cg.pdf (Acesso em 12/04/2017)

3.2.2 Tesoura guilhotina

Tesoura guilhotina é um equipamento industrial amplamente utilizado na indústria metal-mecânica, tem como objetivo o corte de chapas de aço por cisalhamento. Este possui duas facas, uma superior e outra inferior, montadas em paralelo uma à outra, as quais realizam o corte de chapas.

Para o processo corte é necessário que exista uma folga entre as duas facas, a qual varia de acordo com a espessura do material a ser cortado. Está folga geralmente é equivalente a 1% da espessura da chapa para corte em guilhotinas.

As chapas utilizadas neste trabalho foram cortadas em uma tesoura guilhotina, marca Newton modelo DHN 3050, a qual é representada na Figura 9.

Figura 9 – Tesoura guilhotina



Fonte: O autor (2016)

3.2.3 Prensa dobradeira

Prensa dobradeira é um equipamento industrial amplamente usado na indústria, o qual é utilizado para dar formas variadas a chapas de aço. Para efetuar a dobra, a máquina utiliza duas ferramentas, o punção e a matriz (conhecido como V).

O raio do punção é definido de acordo com a espessura da chapa e o sentido de laminação. A matriz é definida de acordo com a espessura da chapa e a borda a ser dobrada.

Neste trabalho foi utilizada uma prensa dobradeira da marca Sorg modelo DHS 250/35, a qual é representada na Figura 10.

Figura 10 – Prensa dobradeira



Fonte: O autor (2016)

3.2.4 Punções de dobramento

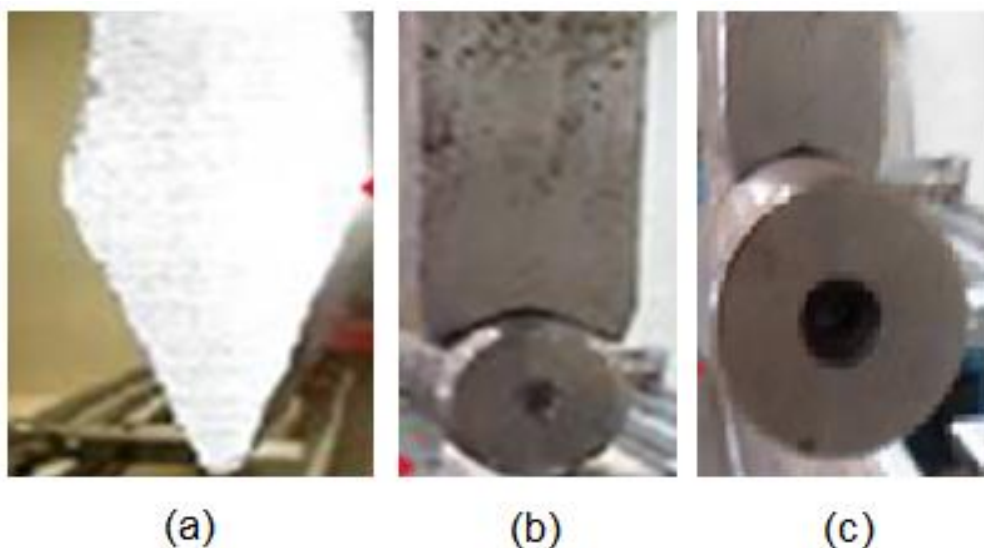
O punção de dobramento é a ferramenta que fica fixa na parte móvel da prensa dobradeira, também conhecida como avental superior, o punção se move verticalmente e ao mover-se para baixo empurra a chapa para dentro da matriz de dobramento, efetuando a dobra.

No punção encontra-se uma característica importante para a dobra que é o raio de dobramento este é determinado pela norma DIN 6935. Para a fabricação dos corpos de prova deste trabalho foram utilizados punções com raios de 5mm, 12mm e 16mm.

Como na empresa onde foram fabricados os corpos de prova não possui punções com raio de 12mm e 16mm, foi necessário improvisar ferramentas com estes raios, fixando à punções obsoletos barras de aço com $\varnothing 32\text{mm}$, como representado na figura 11(C) e $\varnothing 24\text{mm}$ como representado na figura 11(B), formando os raios desejado para os testes.

A Figura 11 representa todos os punções utilizados para dobrar os corpos de prova necessários para a execução deste trabalho.

Figura 11 – Punções utilizados: (a) Punção de raio 5mm; (b) Punção adaptado de raio 12mm; (c) Punção adaptado de raio 16mm.



Fonte: O autor (2016)

3.2.5 Matriz de dobramento

A matriz de dobramento é fixada na parte fixa da prensa dobradeira, também conhecida como avental inferior. A chapa fica apoiada sobre esta matriz para receber os esforços provenientes do punção. A matriz oferece esforço contrário ao do punção, apoiando a chapa em suas extremidades fazendo com que está dobre.

Para a fabricação dos corpos de prova foi utilizado uma matriz com abertura em V de 80mm, conforme mostra a Figura 12.

3.2.6 Extração das amostras

Para realizar os ensaios metalográficos, foi necessário extrair uma pequena amostra das peças na área qual desejava realizar a análise. Esta extração foi feita em uma bancada no laboratório de usinagem do IFSC, prendendo as peças em uma morça de bancada e cortando a peça com uma serra manual.

Figura 12 – Matriz de dobramento utilizado nos ensaios



Fonte: O autor (2016)

3.2.7 Embutidora Fortel

O objetivo do embutimento é proteger materiais frágeis ou revestidos, para facilitar o manuseio da amostra, bem como padronizá-las com tamanho uniforme. Atualmente existem 2 métodos para embutimento, o método a quente e o método a

frio.

Neste trabalho foi utilizado o método a quente. Os parâmetros utilizados para o embutimento foram de 100 a 150 kgf/cm² a 150°C de temperatura por 15 minutos. A Figura 13 representa a maquina embutidora marca Fortel modelo EF-30 utilizada na preparação das amostras.

O embutimento em baquelite serviu como base de apoio para os ensaios de micro dureza e análise microscópicas dos corpos de prova.

Figura 13 – Embutidora Fortel



Fonte: O autor (2016)

3.2.8 Lixamento e polimento

Para o processo de lixamento foram utilizadas lixas d'água, fixadas em discos rotativos com refrigeração à água constante. O processo de lixamento começou com lixas com granulometria 80 e seguida pelas lixas 320, 400, 600, 800 e 1200.

O polimento foi realizado através de panos especiais, presos a um disco giratório em uma lixadeira e politriz modelo PFL, conforme mostra a Figura 14, sobre estes panos foram acrescentados pequenas quantidades de abrasivos, os abrasivos mais utilizados são o óxido de alumínio (alumina) e a pasta de diamante. Durante o polimento as amostras foi utilizada a alumina.

Figura 14 – Lixadeira e poltriz forte!



Fonte: O autor (2016)

3.2.9 Microscópios

Os microscópios utilizados nos ensaios metalográficos foram:

- Microscópio da marca Diagtech modelo XYM 404 com software Toupwiew com lente de 40X. Ver Figura 15(a);
- Estereoscópio da marca Zeiss-Stemi modelo 2000-C com câmera Axio cam ERC 5s. Ver Figura 15(b).

Figura 15 – Microscópios utilizados nos ensaios (a) Microscópio Diagtech (b) Estereoscópio Zeis–Stemi



(a)

(b)

Fonte: O autor (2016)

3.2.10 Equipamento medidor de micro–dureza

Para analisar a micro–dureza das amostras, foi utilizado um medidor microhardness Tester TM – 80, conforme mostra a Figura 16, usando como parâmetros 200gf de força por 10 segundos obtendo a dureza na unidade Rockwell Vickers.

Foram realizadas duas medições de micro dureza em cada corpo de prova, sendo uma do lado interno, onde o raio do punção exerceu pressão causando o fenômeno de compressão da chapa, e outra na parte externa da dobra onde ocorreu o fenômeno de tração da chapa.

Posteriormente foi realizado ensaio de micro–dureza em uma amostra de chapa que não sofreu deformação por esforço de dobra, para fins comparativos.

Figura 16 – Medidor de dureza

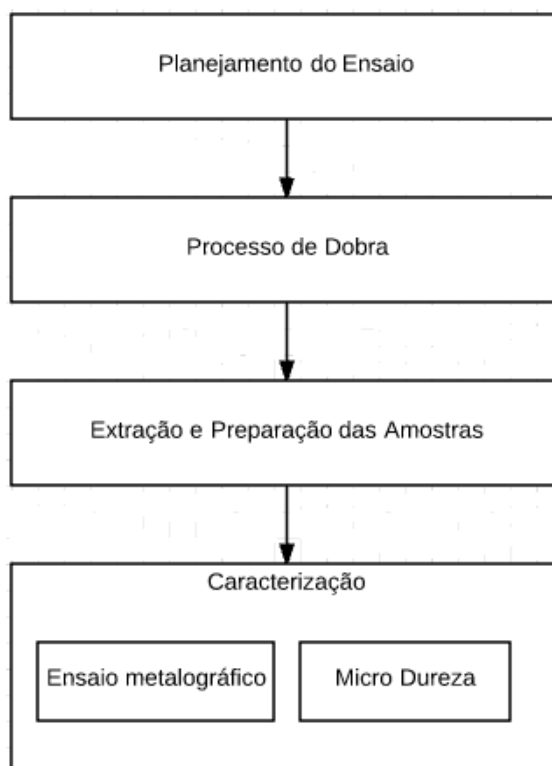


Fonte: O autor (2016)

3.3 Métodos

O fluxo metodológico aplicado neste trabalho é classificado como pesquisa experimental, e seu desenvolvimento é representada na Figura 17.

Figura 17 – Fluxo metodológico



Fonte: O autor (2017)

Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram fabricados através de chapas com espessura de 7,9mm de aço ASTM A-36, com dimensão de 100x300mm. Segundo a norma DIN-6935 para essas condições é recomendado um raio de 16mm para dobras paralelas ao sentido de laminação e 12mm para dobras perpendiculares ao sentido de laminação, estas situações foram aplicadas em 2 corpos de prova.

Posteriormente foram fabricados outros 2 corpos de prova com raio de 5mm para análise das deformações que ocorrem devido ao uso de ferramentas com raio não normalizado.

A geometria dos perfis para os corpos de prova, foi definida utilizando o raio mínimo recomendado pela norma DIN-6935 que especifica as características para o processo de dobra a frio de aços planos laminados.

As chapas foram cortadas em uma tesoura guilhotina hidráulica e dobradas em uma prensa dobradeira hidráulica, este trabalho foi realizado em uma empresa da região norte de Santa Catarina.

Para a análise comparativa dos efeitos sobre a estrutura da chapa, os corpos de prova foram dobradas em perfil L.

Após as chapas dobradas e devidamente identificadas, foi necessário extrair amostras em áreas específicas para se realizar as análises, esta extração de amostras é necessária pois as chapas dobradas são muito grandes para realizar os ensaios metalográficos.

Durante os ensaios metalográficos foram comparadas as deformações resultantes do processo de dobra entre os corpos de prova fabricados, analisando os seguintes pontos: propagação de trincas; estiramento na área dobrada da chapa e a dureza na área dobrada da chapa. Essas comparações permitiu avaliar as deformações que ocorreram nas amostras e em quais amostras as deformações foram maiores.

Essas análises comparativas foram realizadas no laboratório de ensaios de materiais do IFSC–Rau.

3.2.1 Planejamento do ensaio

Para esta pesquisa foi definido o raio de dobra de acordo com a norma DIN 6935, a qual leva em consideração a resistência à tração e espessura da chapa, conforme mostra a Tabela 2.

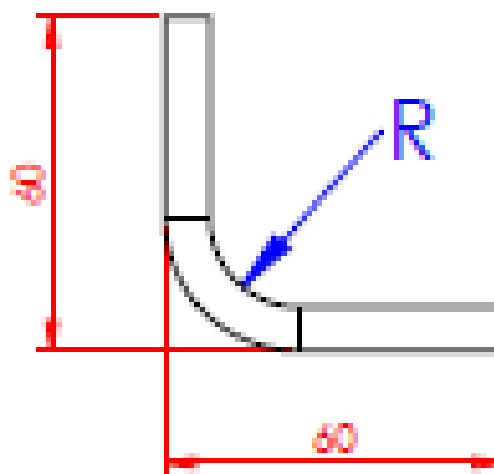
Tabela 2 – Tabela de raios mínimos de dobra

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	1,6	2,5	3	5	6	8	10	12	16	20	25	28	36
	Paralelo	1	1,6	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	1,6	2,5	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	36	45
	Paralelo	1,6	2,5	4	5	8	10	12	16	20	25	32	36	40	50

Fonte: Adaptado de DIN 6935 - 2010

Para o experimento comparativo foram dobradas 4 chapas aço ASTM A-36 que, após dobradas as peças formaram um perfil L, conforme representado na Figura 18.

Figura 18 – Perfil dos corpos de prova



Fonte: O autor (2016)

O corpo de prova 1 foi dobrado em paralelo ao sentido de laminação com o raio de 16mm, conforme recomendado pela norma DIN 6935. O corpo de prova 2 foi dobrado perpendicular ao sentido de laminação, com raio de 12mm conforme a recomendação da norma.

Os corpos de prova 3 e 4 foram dobrados com raio de 5mm, diferente do recomendado pela norma, sendo que um em paralelo ao sentido de laminação e o outro perpendicular ao sentido de laminação, conforme pode-se observar na Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela de fabricação das peças

Corpo de Prova	Chapa	Espessura	Sentido de Laminação	Raio de Dobra	Abertura da Matriz	Ângulo de Dobra	Raio Normalizado
PL 16	A S T M	7 , 9 m m	Paralelo	16mm	80mm	90°	Sim
PR 12			Perpendicular	12mm	80mm	90°	Sim
PL 5	A 3 6		Paralelo	5mm	80mm	90°	Não
PR 5			Perpendicular	5mm	80mm	90°	Não

Fonte: O autor (2017)

3.3.2 Processo de dobra

Os corpos de prova foram fabricados a partir de chapas de aço, cortadas em uma guilhotina hidráulica e dobradas em uma prensa dobradeira hidráulica com ferramenta de dobra no ar.

Todas as chapas foram dobradas em uma matriz com abertura em V de 80mm, a abertura da matriz é tabelada e leva em consideração a espessura da chapa e o tamanho da aba a ser dobrada.

A Tabela 4 representa uma tabela de capacidade necessária para um metro de dobra em toneladas, esta foi utilizada para a definição da matriz usada na dobra dos corpos de prova, nesta tabela pode-se observar que os parâmetros utilizados foram, uma matriz em V de 80mm e 48 Ton/M de força para dobrar uma chapa de 7,9mm de espessura.

Tabela 4 – Tabela para seleção da matriz V

V	BITOLA MSG											POLEGADAS							
	26	24	20	19	18	16	14	12	11	8	7	1/4"	5/16"	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	1"	1.14"
	2,6	0,6	4	1,06	1,2	1,5	2	2,65	3	4,25	4,5	6,35	7,93	9,52	12,7	15,87	19,05	25,4	31,5
4	3	7																	
5	2	5	13																
6	2	4	10	15															
8			7	10	13														
10				8	12	17													
12					10	13	25												
16						9	17	32											
20							12	26	33										
25								19	24	59									
32									17	42	40								
40										30	30	74							
50											22	60	93						
63												43	74	106					
48													48	76	149				
100														56	119	186			
125															87	149	214		
160																97	153	298	
200																	112	238	366
250																		174	293
300																			223

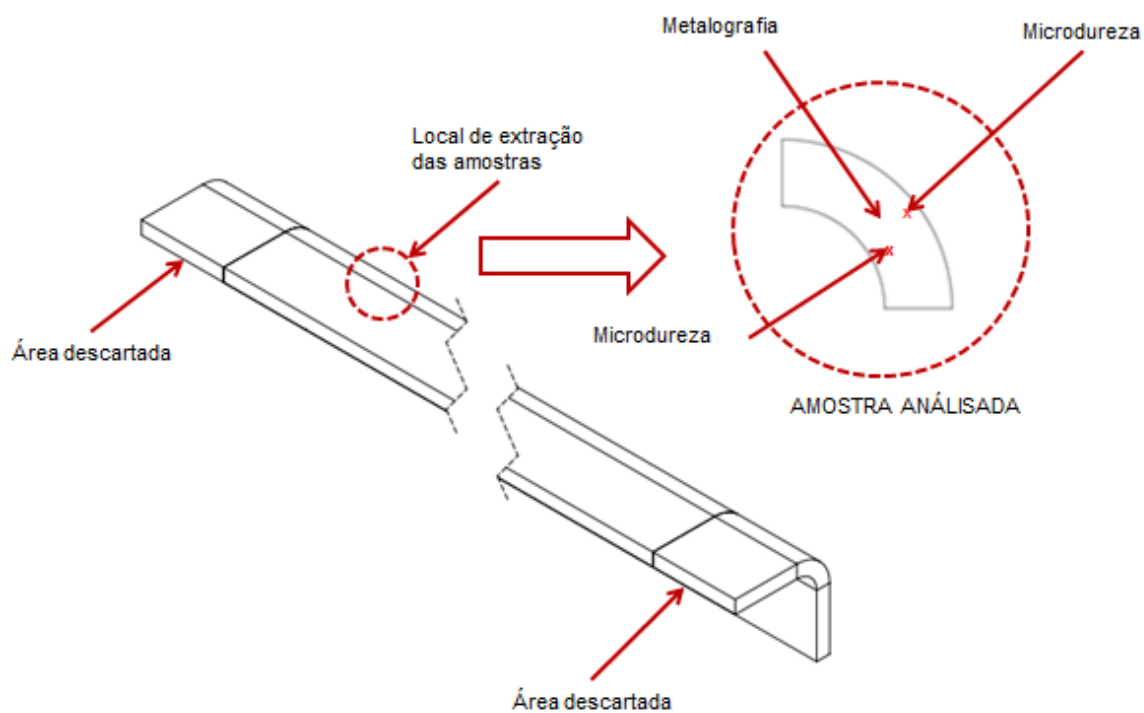
Obs.: Dobras de fundo de canal ou cunhadas necessitam entre 3 a 5 vezes a força requerida para a dobra no ar.

Fonte: www.gasparini.ind.br/catalogos/ferramentas.pdf

3.3.3 Preparação dos corpos de prova

Para a extração das amostras foram descartados os primeiros 50mm da chapa, evitando assim que a análise metalográfica sofresse interferência das bordas, local onde os defeitos são potencializados, conforme mostra Figura 19.

Figura 19 – Partes descartadas das chapas



Fonte: O autor (2017)

As amostras foram extraídas das chapas com o auxílio de uma serra manual e embutidas em baquelite. No total foram utilizadas 4 amostras, sendo que primeiro passaram por análise microscópica e posteriormente ensaio de micro dureza, conforme mostra a Tabela 5.

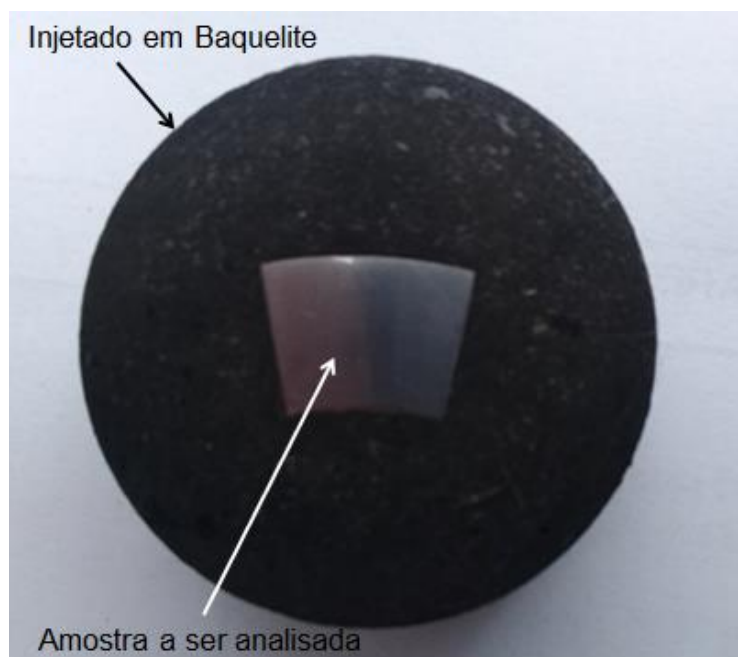
Tabela 5 – Amostras utilizadas nos ensaios

Amostra	Análises realizadas	
PA 16	Microscopia	Microdureza
PL 12		
PA 5		
PL 5		

Fonte: O autor (2017)

Após o embutimento em baquelite as amostras passaram pelo processo de polimento, conforme mostra a Figura 20 onde se apresenta o corpo de prova embutido em baquelite após o processo de polimento.

Figura 20 – Amostra embutida em baquelite, após processo de polimento



Fonte: O autor (2016)

Posteriormente o processo de polimento foi realizado o ataque químico para revelar a micro estrutura dos corpos de prova. Para o ataque químico foi utilizado nital 2% por 20 segundos, o Nital (ácido nítrico e álcool) é um dos reagentes mais utilizados, que é eficaz para a grande maioria dos materiais ferrosos. A Tabela 6 representa a composição química do nital 2% utilizado no processo de polimento.

Tabela 6 – Composição química do nital 2%

Reagente	Composição	Método de Aplicação	Materiais Indicados
Nital (2%)	2ml (HNO ₃) + 98ml (Álcool Etílico)	Imersão	Aços Carbono em Geral

Fonte: profpaulofj.webs.com/oqueeparaqueserve.htm

3.3.4 Caracterização

A caracterização foi realizada em termos de dureza, surgimento de trincas, e estiramento da chapa na área de atuação da dobra. Para a comparação foram realizados testes de microdureza e ensaios metalográficos para avaliar a existência de trincas, dureza, encruamento dos grãos e alongamento na área dobrada.

Com está comparação, foi possível avaliar os danos e desvios causados nas chapas dobradas com o raio não recomendado pela norma, bem como verificar qual dos materiais apresentou menor deformação após o processo de dobra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do material no estado inicial

Para efeito comparativo foram realizados ensaios de metalografia e micro-dureza em um corpo de prova de aço ASTM A-36 sem este ter sofrido algum tipo de deformação, para posterior comparação com o aço já deformado.

A Figura 21 representa a micrografia obtida através da microscopia óptica do material, onde pode-se observar a presença de ferrita (área clara) e perlita (parte escura). Estes grãos apresentam uma orientação bem definida, o que é característica de um material laminado. Não foi observado na análise desta micrografia nenhum defeito aparente.

Figura 21 – Ensaio metalográfico do aço antes de sofrer a deformação



Fonte: O autor (2016)

A Figura 22 é uma imagem retirada do medidor de micro-dureza após o ensaio realizado na amostra de chapa de aço sem sofrer a deformação de dobra, pode-se observar que foi obtido um valor de dureza de 149 HV para este material.

Figura 22 – Micro-dureza do aço antes de sofrer a deformação



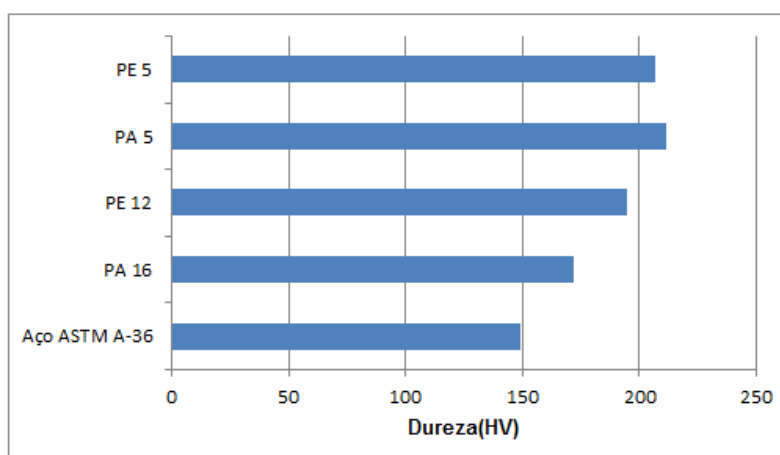
Fonte: O autor (2016)

4.2 Ensaio de microdureza

4.2.1 Microdureza na parte interna da dobra

Na parte interna da dobra a chapa de aço foi submetida a esforços de compressão, conforme mostra a Figura 2, pode-se perceber o aumento na dureza em todos os corpos de prova que sofreram deformação, sendo que, os corpos de prova que foram fabricados em desacordo com a norma tiveram um maior aumento da dureza.

Figura 23 – Dureza no raio interno da dobra



Fonte: O autor (2017)

A chapa PE 5 e PA 5 alcançaram uma dureza de 207,2HV e 211,5 HV

respectivamente, isto pode ser explicado devido as amostras terem sido fabricadas com raio não normalizados o que aumento a deformação plástica do material, ou seja, houve endurecimento por encruamento.

Conforme o esperado a amostra aço ASTM A-36 que corresponde a chapa sem sofrer deformação, obteve a menor micro-dureza, chegando a 149,2HV, uma vez que está chapa não foi deformada plasticamente e portanto não foi endurecida por encruamento.

Percebe-se que as amostras PE 12 e PA 16 dobradas conforme recomenda a norma obtiveram valores de dureza menores que as amostras dobradas com raios não normalizados, chegando a 194,6HV e 172,2HV respectivamente.

Outro ponto que pode-se observar é um aumento maior da dureza nas amostras fabricadas em perpendicular ao sentido de laminação em todas as amostras.

A amostra de chapa de aço ASTM A-36 que não sofreu deformação apresentou uma dureza de 149,2HV, todas as outras amostras que sofreram deformações pelo processo de dobra apresentaram uma maior dureza. Este endurecimento já era esperado, o aço tende a endurecer por encruamento quando sofre deformação plástica, no entanto é importante ressaltar o grande aumento de dureza nas amostras fabricadas com raio de 5mm, onde a dureza em ambas as amostras ultrapassaram os 205HV, conforme mostra a Tabela 7.

Com esses resultados é possível observar uma tendência de que quanto menor o raio de dobra, maior será o aumento na dureza por encruamento, este aumento na dureza torna as amostras mais frágeis e mais suscetíveis a quebras, o que pode ser um ponto negativo nos processos de dobramento.

Tabela 7 – Relação entre amostra e dureza

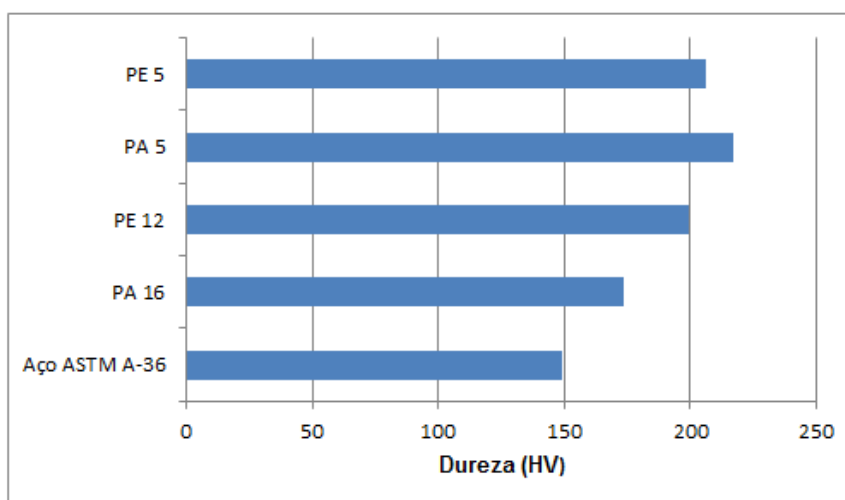
Medições parte interna da dobra		
Amostra	Valor	Unidade
Aço ASTM A-36	149,2	HV
PA 16	172,2	HV
PE 12	194,6	HV
PA 5	211,5	HV
PE 5	207,2	HV

Fonte: O autor (2017)

4.2.2 Micro–dureza na parte externa da dobra

Na parte externa da dobra a chapa de aço foi submetida a esforços de tração. A figura 24 apresenta um comparativo dos resultados obtidos através do ensaio de micro–dureza.

Figura 24 – Dureza no raio externo da dobra



Fonte: O autor (2017)

As amostras PE 5 e PA 5 alcançaram uma dureza de 206,3HV e 217,4HV, respectivamente, isso pode ser explicado pelo fato das amostras terem sido dobradas com raios não normalizados, o que gera aumento na deformação plástica e o posterior endurecimento por encruamento.

Conforme o esperado a amostra aço ASTM A–36 que corresponde a chapa sem sofrer deformação, obteve a menor micro–dureza, chegando a 149,2HV, uma vez que está chapa não foi deformada plasticamente e portanto não foi endurecida por encruamento.

Percebe–se que as amostras PE 12 e PA 16 dobradas conforme recomenda a norma obtiveram os menores valores de dureza, menores que as amostras dobradas com raios não normalizados, chegando a 199,3HV e 173,6HV, respectivamente.

As amostras obtiveram um aumento de dureza na parte externa da dobra

muito semelhante ao que foi encontrado no raio interno. Foi utilizado a mesma amostra de aço ASTM A-36 para comparação com 149,2HV de dureza e como no ensaio anterior todas as amostras sofreram endurecimento por encruamento, no entanto as amostras apresentaram um aumento um pouco maior de dureza. Com destaque para as amostras fabricadas com raio de 5mm que obtiveram dureza acima dos 200HV como demonstrado na tabela 8 . Com os índices de dureza obtidos, é possível observar um aumento na dureza de acordo com a diminuição do raio de dobra, ou seja, quanto menor o raio de dobra, maior a dureza por encruamento.

Tabela 8 – Relação entre amostra e dureza

Medições parte Externa da dobra		
Amostra	Valor	Unidade
Aço ASTM A-36	149,2	HV
PA 16	173,6	HV
PE 12	199,3	HV
PA 5	217,4	HV
PE 5	206,3	HV

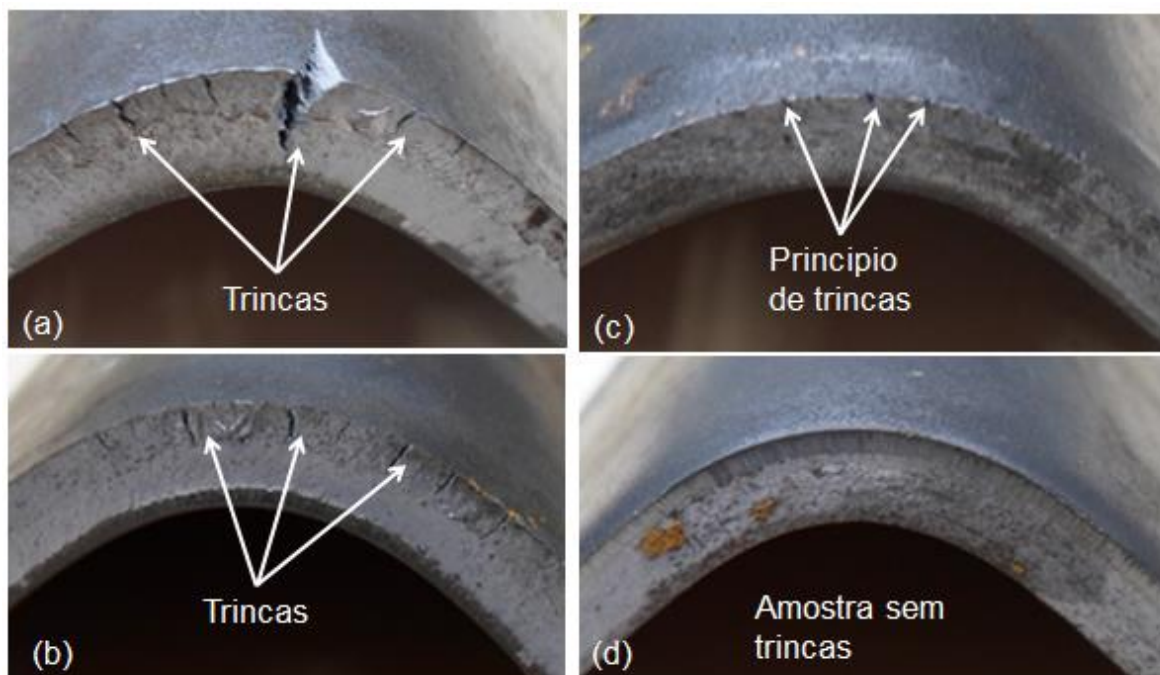
Fonte: O autor (2017)

4.3 Propagação de trincas

4.3.1 Análise macroscópica

Ao dobrar as chapas, notou-se o surgimento de trincas em alguns corpos de prova, provenientes dos esforços de tração e compressão ao qual as chapas foram submetidas. Estas trincas surgiram nas extremidades das chapas, onde a concentração de tensões é maior, estas trincas são macroscópicas e podem ser vistas na Figura 25.

Figura 25 – Análise macroscópica: a) PA5 b) PE5 c) PA16 d) PE12.



Fonte: O autor (2016)

A Figura 25(a) apresenta a amostra dobrada com raio de 5mm em paralelo ao sentido de laminação, esta apresentou grande trinca macroscópica, sendo que uma delas ocupa quase toda a espessura da chapa, estas trincas são resultado das tensões que a chapa sofreu durante o processo de dobra.

Esta amostra foi dobrada em paralelo ao sentido de laminação com raio de dobra de 5mm, quando a norma DIN 6935 indica para este material, considerando a espessura e sentido de laminação um raio de 16mm. Esta diferença no raio aumentou as tensões de tração e compressão gerando as trincas na amostra.

A Figura 25(b) apresenta a amostra dobrada com raio de 5mm em perpendicular ao sentido de laminação, está apresenta trincas macroscópicas as quais são resultado do uso de ferramentas incorretas no processo de dobra.

Para o processo de dobra deste tipo de material, considerando a espessura e sentido de laminação, a norma DIN 6935 indica um raio de dobramento de 12mm, essa diferença de raio de dobra aumento as tensões de tensão e compressão durante o processo de dobra, aumentando a deformação e causando as trincas.

A Figura 23(c) apresenta a amostra com raio de 16mm em paralelo ao sentido de laminação, esta amostra não apresenta nenhuma trinca consideravel, apenas principios de trinca.

A Figura 23(d) apresenta a amostra dobrada em perpendicular ao sentido de laminação, está não apresentou trincas em sua superfície, enquanto a amostra representada na figura 23(b) também dobrada em perpendicular ao sentido de laminação apresentou varias trincas em sua superfície, o que indica que as tensões durante o processo de dobra foram maiores na amostra dobrada com raio de 5mm.

Outra observação importante é que mesmo nas peças fabricadas conforme norma, a peça fabricada em paralelo ao SL, apresentou principio de trincas. Isso ocorre pois como a dobra foi realizada em paralelo ao SL os grãos tem uma tendencia maior de se afastar do que as peças dobradas em perpendicular ao SL.

4.3.2 Análise microscópica

Foi realizado uma análise microscópica nas 4 amostras para verificar a existência de trincas. No entanto, não foi encontrada nenhuma trinca durante esse ensaio conforme será evidenciado no capítulo 4.4, o que indica uma grande probabilidade das trincas surgirem apenas nas extremidades das peças.

4.4 Deformação na estrutura cristalina

Durante a operação de dobra a chapa de aço foi submetida a esforços de tração e compressão simultaneamente e em áreas distintas da chapa, o que pode causar grandes danos à estrutura cristalina do material.

Para analisar as consequências desses esforços na chapa de aço, foram realizados ensaios microscópicos em cada uma das 4 amostras para análise comparativa das deformações existentes na estrutura cristalina do material.

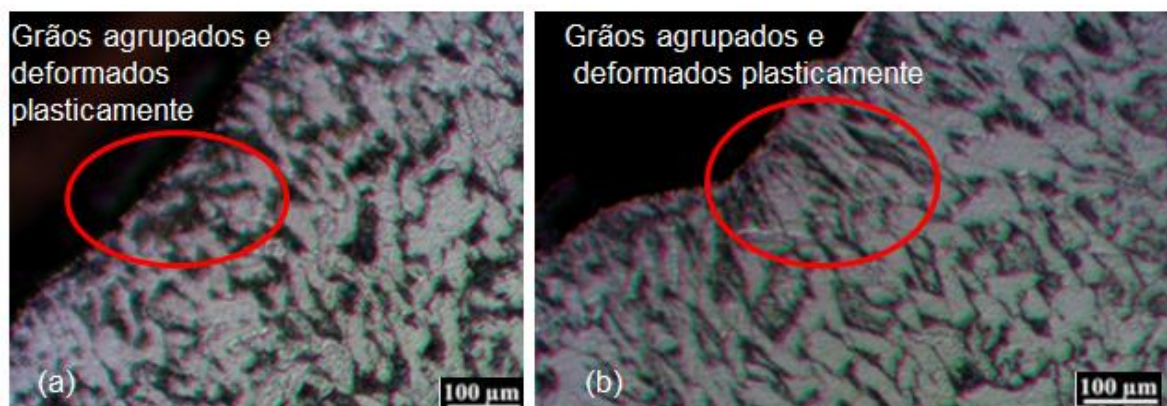
4.4.1 Deformação na parte interna da chapa

4.4.1.1 Amostras em paralelo ao sentido de laminação

A Figura 26(a) representa a microscopia da amostra fabricada com raio 16mm e a figura 26(b) representa a microscopia da amostra fabricada com raio de 5mm em paralelo ao sentido de laminação. É possível perceber que os grãos que compõem a estrutura do material sofreram uma pequena deformação plástica durante o processo de dobra, esta comparação é visível se comparada com a microscopia da amostra sem ter sofrido deformação plástica, representada pela Figura 21, no

capítulo 4.1.

Figura 26 – Raio interno das amostras: (a) PA 16; (b) PA 5



Fonte: O autor (2016)

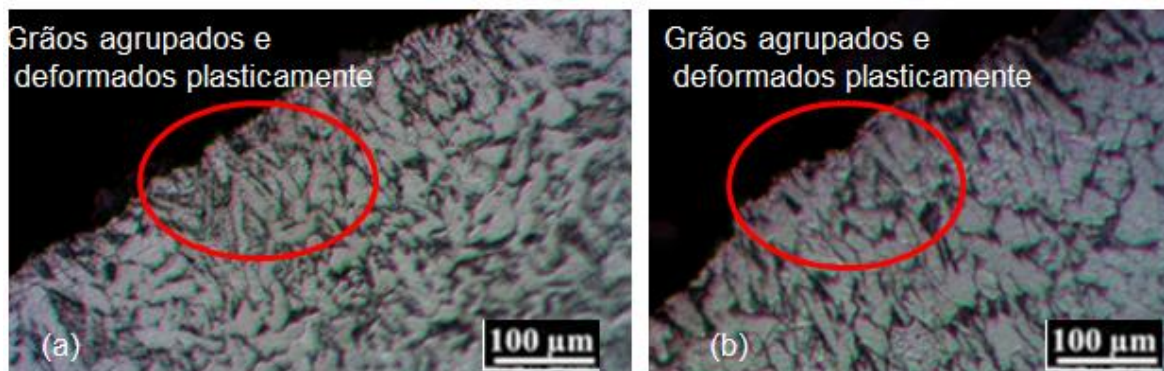
Esta deformação provoca alguns fenômenos indesejados como o endurecimento por encruamento e o aumento das tensões internas da amostra. Este fenômeno deixa o material mais frágil e suscetível a falhas.

Em comparação entre as amostras representadas pelas figuras 26(a) e 26(b), que representam amostras do mesmo material dobrado com em paralelo ao sentido de laminação no entanto a figura 26(a) com o raio recomendado pela norma. É possível observar que os grãos se encontram mais agrupados na figura 26(b). Este agrupamento dos grãos foi causado pela tensão de compressão ao qual a amostra foi exposta durante o processo de dobra.

4.1.1.2 Amostras em perpendicular ao sentido de laminação

A Figura 27(a) apresenta a microscopia do raio interno da amostra fabricado com raio de 12mm e perpendicular ao sentido de laminação e a figura 27(b) representa uma amostra dobrada em perpendicular ao sentido de laminação com raio de 5mm. Nesta microscopia é possível observar os grãos deformados plasticamente, sendo que durante o processo de dobra as tensões resultantes desse processo forçaram os grãos da estrutura do material, fazendo com que esses ficassem agrupados.

Figura 27 – Raio interno das amostras: (a) PE 12; (b) PE 5



Fonte: O autor (2016)

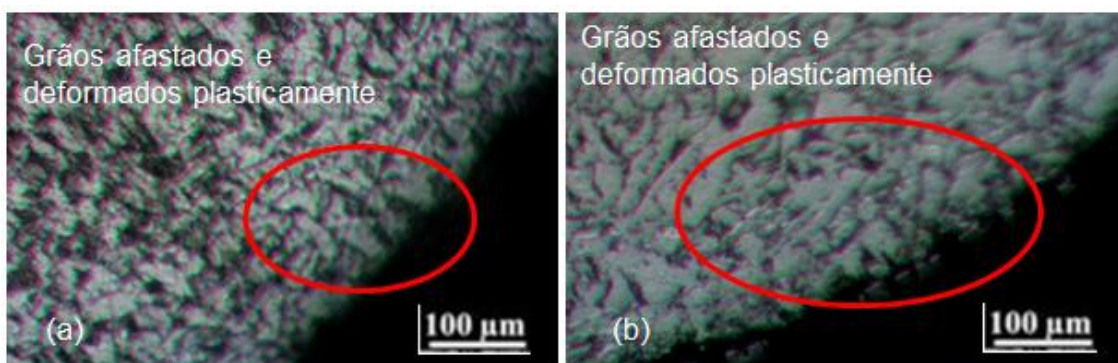
Comparando a microscopia das amostras representadas pelas figuras 27 que são amostras fabricadas com o mesmo material e sentido de laminação. No entanto, a figura 27(b) foi fabricada com raio de dobra não recomendado pela norma DIN 6935, é possível observar que a deformação plástica, nesse caso, deixou os grãos mais agrupados, o que faz com que esta amostra se apresente mais dura e concentre mais tensão interna.

4.4.2 Deformação na parte externa da amostra

4.4.2.1 Amostra em paralelo ao sentido de laminação

A Figura 28(a) apresenta o raio externo de uma amostra dobrada com raio de 16mm em paralelo ao sentido de laminação, e a figura 28(b) representa uma amostra dobrada em paralelo ao sentido de laminação com raio de 5mm. Nestas amostras é possível visualizar os grãos deformados plasticamente, tendendo a se afastarem.

Figura 28 – Raio externo das amostras: (a) PA 16; (b) PA 5



Fonte: O autor (2016)

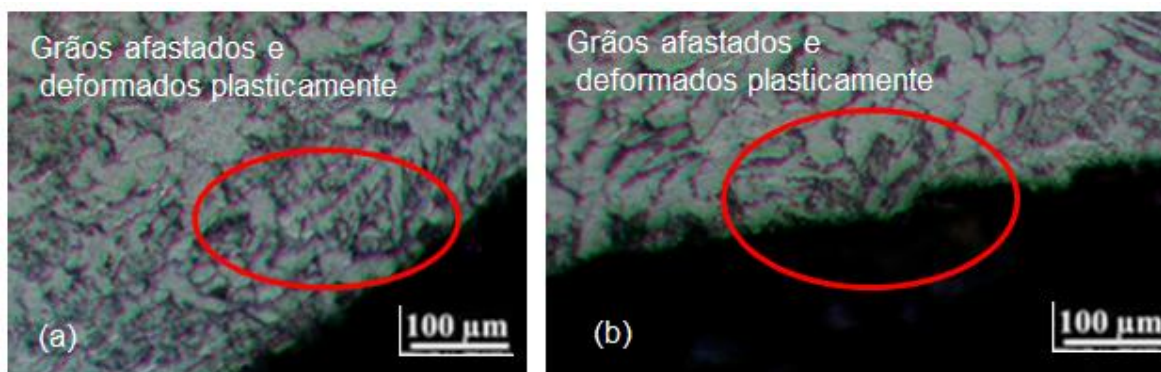
Esse afastamento dos grãos devido à deformação plástica faz com que a dureza do aço aumente devido ao encruamento e aumentem as tensões internas do material.

Ao comparar estas amostras representadas pela Figura 28, é possível observar um maior afastamento dos grãos na figura 28(b) a qual foi fabricada com raio de dobra não normalizado, este afastamento foi causado pelo esforço de tração ao qual a amostra foi exposta durante o processo de dobra.

4.4.2.2 Amostras em perpendicular ao sentido de laminação

A Figura 29(a) apresenta uma amostra dobrada com raio de 12mm em perpendicular ao sentido de laminação e a figura 29(b) representa uma amostra dobrada com raio de 5mm em perpendicular ao sentido de laminação. Nessas amostras é possível observar que os grãos da microestrutura sofreram deformação plástica, fazendo com que estes se apresentassem mais afastados.

Figura 29 – Raio externo da amostra: (a) PE 12; (b) PE 5



Fonte: O autor (2016)

Ao comparar estas amostras, é possível observar um afastamento dos grãos da micro-estrutura o que aumenta o endurecimento por encruamento e aumenta as tensões internas da amostra, tornando-a mais frágil e suscetível a falhas, as quais com mais intensidade na amostra representada pela figura 29(b) a qual apresenta os seus grãos mais alongados, demonstrando que as mesmas sofreram um esforço maior.

4.5 Estiramento

As chapas ao sofrerem os esforços de tração e compressão durante a operação de dobra podem sofrer alteração em sua espessura. Durante a metalografia foi analisada a variação da espessura da chapa, no entanto em nenhuma das amostras foram observadas alterações na espessura.

Em todas as amostras as espessuras encontradas estavam dentro da tolerância especificada pelos fabricantes de chapas.

5 CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios de metalografia e micro-dureza, realizado em amostras de chapas de aço ASTM A-36 realizado com raios de dobra e sentido de laminação variados, pode-se concluir que a operação de dobra causa deformações consideráveis na estrutura das chapas e estas deformações podem ser potencializadas de acordo com o raio do punção de dobra, bem como o sentido de laminação da chapa, o que compromete a qualidade das peças fabricadas.

Nos ensaios metalográficos foram identificadas deformações em todas as amostras analisadas, sendo que as amostras fabricadas em desacordo com a norma DIN 6935 e em paralelo ao sentido de laminação sofreram deformações mais severas. Essas amostras apresentaram trincas visíveis a olho nu, apesar de não apresentarem trincas durante a análise microscópica.

As amostras analisadas também apresentaram deformação plástica em seus grãos, fazendo com que esses se agrupassem no raio interno da dobra e se afastassem no raio externo.

Durante o ensaio de micro-dureza foi possível perceber o aumento da dureza em todas as amostras, sendo que as amostras fabricadas em desacordo com a norma DIN 6935 tiveram um aumento considerável de sua dureza, o que o torna material mais frágil.

Através da metodologia aplicada neste trabalho e baseado nos resultados obtidos através dos ensaios e caracterizações aplicadas, pode-se afirmar que durante o processo de fabricação de chapas dobradas é imprescindível a aplicação da norma DIN 6935, uma vez que a não utilização da mesma pode resultar no surgimento de trincas nas extremidades das peças, encruamento dos grãos que formam a estrutura cristalina e endurecimento do material na seção dobrada da chapa.

Peças fabricadas sob estas condições não são seguras em suas aplicações podendo provocar quebra dos equipamentos ou estruturas das quais fazem parte, podendo causar danos materiais e colocando em risco a integridade física das pessoas que trabalham ou estão próximas dos equipamentos ou estruturas das quais essas peças fazem parte.

Outro ponto relevante é o custo de produção que pode ficar elevado, como por exemplo na empresa onde foram fabricados os corpos de prova para os ensaios.

A engenharia de produto ao desenvolver um novo equipamento tem que adequar o projeto as ferramentas existentes no parque fabril, sendo que em alguns casos é necessário super-dimensionar os projetos, aumentando a espessura das chapas ou acrescentando reforços que não seriam necessários caso utilizassem ferramentas adequadas para a fabricação das peças, o que diminuiria as deformações nas chapas acarretando em um custo de produção mais baixo tornando a empresa mais competitiva no mercado.

Como sugestão para trabalhos futuros podem ser consideradas análises semelhantes modificando a matriz “V” e o sentido de laminação, analisando suas deformações. Outro ponto que poderia ser analisado em trabalhos futuros é a variação dimensional que ocorre variando-se o sentido de laminação das chapas, o raio do punção de dobra e a abertura em “V” da matriz.

REFERÊNCIAS

A. Remy. M Gay. R Gonthier. **Materiais 2º edição**. Hemus, 2002.

Callister, William D. Rethwisch, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares, Revisão Técnica José Roberto Moraes d' Almeida. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Kaltbiegen von Flacherzeugnissen aus Stahl. DIN 6935 Berlin Janeiro 2010

Kiminami, Claudio Shyinti. Castro, Walman Benício de. Oliveira, Marcelo Falcão de. **Introdução aos processos de fabricação de Produtos Metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

Newell, James. **Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. Tradução e revisão técnica José roberto Moraes d' Almeida. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

ENSAIOS METALOGRAFICOS – **PROF. PAULO FERNANDES JR.** Disponível em: profpaulofj.webs.com/oqueeparaqueserve.htm. Acesso em 18/03/2017

R.C. Hibbeler. **Resistencia dos materiais**. Tradução Joaquim Pereira Nunes; revisão técnica Wilson Carlos da Silva. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

Rodrigues, Jorge. Martins, Paulo. **Tecnologia da Deformação Plástica Vol.II**. Lisboa: Escolar Editora, 2010.

Schaeffer, Lirio. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

DEFINIÇÃO DE DUREZA – **DICIONÁRIO CIMM**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/510-dureza>. Acesso em 16/03/2017

DEFINIÇÃO DE TRINCA – **DICIONÁRIO CIMM**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/553-trinca>. Acesso em 16/03/2017

DEFINIÇÃO DE CHAPA – **DICIONÁRIO INFOPÉDIA**. Disponível em: <http://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/chapa>. Acesso em 26/03/2017

DEFINIÇÃO DE ESTIRAMENTO – **DICIONÁRIO CIMM**. Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6485-estiramento#.WR-fIPnyvIU. Acesso em 16/03/2017