

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,**  
**METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M**

FILIPPE ANTUNES

**ESTUDO DA PERFURAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS DE AÇO ASTM A-36**

Porto Alegre

2017

FILIPPE ANTUNES

**ESTUDO DA PERFURAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS DE AÇO ASTM A-36**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Lírio Schaeffer

Coorientador: Prof. Dr. Jovani Castelan

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador PPGE3M

Porto Alegre

2017

II

Ao Jair, a Isabel e ao Fablo (*in  
memorian*), por suas inesgotáveis fontes  
de amor.

## AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida.

Ao meu orientador, Prof Dr Ing Lírio Schaeffer, pelo estímulo, tempo, e por partilhar seu conhecimento durante toda realização do trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Jovani Castelan, pelo apoio, suporte para que este trabalho pudesse acontecer.

Ao amigo Tecg°. Jair Ubiali, e a toda equipe de manutenção da Brametal Sul Metalúrgica LTDA, pela colaboração e suporte.

À minha querida esposa Thaise Uggioni Brunel, pelo estímulo, suporte e toda compreensão ao longo desta jornada.

À empresa Brametal Sul Metalúrgica LTDA, pelo fornecimento de sua estrutura e maquinário.

À Faculdade SATC, pela disponibilidade de equipamentos e ferramentas essenciais para realização deste trabalho.

Aos professores do PPGE3M e LdTM que contribuíram com sua vasta experiência e conhecimento.

À todos que colaboraram diretamente ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	IV
SUMÁRIO.....	V
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE ABREVIACÕES .....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS .....	XIII
RESUMO .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos e Justificativa.....	17
1.2 Macro Etapas de Desenvolvimento do Estudo .....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1 Corte por Cisalhamento .....	19
2.1.1 Aspectos da furação .....	21
2.1.2 Limitação do punção em relação a espessura da chapa e flambagem .....	22
2.2 Força de Corte.....	23
2.3 Folga entre Punção e Matriz .....	26
2.4 Aços Ferramenta .....	28
2.4.1 Aço AISI S1 .....	29
2.4.2 Aço AISI D2 .....	30
2.5 Punções de corte .....	30
2.5.2 Matriz de Corte .....	32
2.6 Brochamento .....	33
2.6.1 Ferramentas de brochar.....	34
2.7 Punções de Corte com Brochamento.....	35
2.7.1 Bolsas de cavacos .....	37
2.7.2 Força de corte em punções de corte com brochamento .....	39
2.8 Chapa de Aço ASTM A-36 .....	39
2.8.1 Análise química .....	40
2.8.2 Características mecânicas. ....	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 Considerações Iniciais .....	41
3.1 Aços Selecionados para a Fabricação dos Punções .....	42
3.1.1 Análise da composição química dos punções de corte.....	43

3.2 Aço Selecionado para a Chapa de Teste .....	44
3.2.1 Composição química da chapa de furação.....	44
3.2.2 Ensaio de Tração da chapa de aço ASTM A-36.....	45
3.3 Ferramentas Propostas .....	47
3.4 Máquina Utilizada.....	51
3.5 Medição dos furos puncionados .....	53
4 ANÁLISE EXPERIMENTAL .....	54
4.1 Variação de Diâmetro ( $\Delta d$ ) - Folga de 3,1%.....	54
4.1.1 Aço AISI S1 .....	54
4.1.2 Aço AISI D2 .....	56
4.2 Variação de Diâmetro ( $\Delta d$ ) - Folga de 7,8%.....	58
4.2.1 Aço AISI S1 .....	58
4.2.2 Aço AISI D2 .....	60
4.3 Variação de Diâmetro ( $\Delta d$ ) - Folga de 15,7%.....	63
4.3.1 Aço AISI S1 .....	63
4.3.2 Aço AISI D2 .....	65
4.4 Aspectos da Região Puncionada .....	68
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	70
6 CONCLUSÕES .....	72
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
8 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....	74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conicidade gerada no processo de Puncionamento. (Esquemático).....	17
Figura 2 - Macro etapas do desenvolvimento do estudo. ....	18
Figura 3 - Elementos básicos de uma ferramenta de cisalhamento: 1 punção 2 prensa chapas, 3 chapa de trabalho, 4- matriz de corte (Lange, 1985). ....	19
Figura 4 - Partes principais de uma peça cisalhada a- Zona de arredondamento, b- Zona cisalhada, c – Zona fraturada, d – Rebarba, e – Empenamento. (Lange, 1985). ....	20
Figura 5 - Diâmetro do início e final do corte (Eto, 2005). ....	21
Figura 6 - Forma cônica dos retalhos no puncionamento de chapa de aço ASTM A-36 com espessura (s) 8 mm. ....	22
Figura 7 - Parâmetros diâmetro do punção (d), espessura da chapa (s), comprimento máximo ( $L_{pmax}$ ), diâmetro inicial do furo (dif) diâmetro final do furo (dff). ....	23
Figura 8 - Diagrama força X tempo (Totre, Nishad e Bodke 2013). ....	25
Figura 9 - Tipos de pontas de corte adaptado (Singh, Streppel e Kals, 1992). ....	26
Figura 10 - Folga (w) entre punção e matriz. ....	26
Figura 11 - Mecânica do corte de chapas por cisalhamento a) folga ótima, b) folga insuficiente e c) folga excessiva (Marcondes, 2009). ....	27
Figura 12 - Punção convencional de corte. ....	31
Figura 13 - Punção de corte convencional, a) vista lateral e b) vista superior. ....	31
Figura 14 - Matriz de corte. ....	32
Figura 15 - Matriz de corte, a) vista isométrica, b) vista inferior e c) vista superior. ....	32
Figura 16 - Elementos de uma brocha interna de tração. (Stemmer, 1995). ....	33
Figura 17 - Relação da peça de trabalho e ferramenta a – brochamento interno b – brochamento externo. (ASM 1989). ....	34
Figura 18 – penetração de avanço (asf) (Stemmer, 1995). ....	35
Figura 19 - Ferramenta operação puncionamento e brochamento adaptado (Marcondes et al., 2008). ....	36
Figura 20 Punção com ângulo adaptado (Marcondes et al., 2008). ....	36
Figura 21 - Punção com e sem ângulo x Diâmetro adaptado (Marcondes, 2008). ....	37
Figura 22 - Bolsa de cavacos (Mello e Marcondes 2006). ....	38
Figura 23 - Geometria de punções (dimensões em mm) a – Tipo I; b- Tipo II; c – Tipo III (Lajarin et al 2011). ....	38

Figura 24 - Forças de corte durante processo de puncionamento e brochamento (Lajarin, 2011).....	39
Figura 25 - Barra de aço AISI S1 e AISI D2.....	42
Figura 26 - Espectrômetro Metal Lab 70-80 J.....	43
Figura 27 - Amostras após ensaio de espectrometria .....	43
Figura 28 - Máquina EMIC utilizada no ensaio .....	46
Figura 29 - Dimensões do corpo de prova.....	46
Figura 30 - Ensaio de tração dos corpos de prova. ....	47
Figura 31 - Punção I .....	48
Figura 32 -Punção II.....	48
Figura 33 - Punção III.....	49
Figura 34 - Punções usinados A) punção III, B) punção II, C) punção I. ....	49
Figura 35 - Marcação com contra ponto.....	50
Figura 36 - Esquema de identificação .....	51
Figura 37 - Máquina A15.34 N utilizada no teste. ....	52
Figura 38 - Parte interna da máquina A 15.34N.....	53
Figura 39 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIS1-3,1%.....	54
Figura 40 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIIS1-3,1%. ....	55
Figura 41- Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIIS1-3,1%. ....	55
Figura 42 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PID2-3,1%. ....	56
Figura 433 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIID2-3,1%.....	56
Figura 44 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIID2-3,1%. ....	57
Figura 45 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PCD2-3,1%.....	57
Figura 46 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIS1-7,8%.....	59

Figura 47 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIIS1-7,8%.	59
Figura 48 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIIS1-7,8%.	60
Figura 49 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PID2-7,8%.	60
Figura 50 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIID2-7,8%.	61
Figura 51 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIID2-7,8%.	61
Figura 52 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIID2-7,8%.	62
Figura 53 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIS1-15,7%.	63
Figura 54 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIIS1-15,7%.	64
Figura 55 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIIS1-15,7%.	64
Figura 56 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PID2-15,7%.	65
Figura 57 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIID2-15,7%.	66
Figura 58 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIID2-15,7%.	66
Figura 59 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro $\Delta d$ x Furo - PIID2-15,7%.	67
Figura 60 - Variação do diâmetro ( $\Delta d_m$ ) máxima x tipo de punção	68
Figura 61 Zona cisalhada ( $Z_c$ ) e Zona de ruptura abrupta ( $Z_r$ ), A) Folga (w) 3,1%; B) Folga (w) 7,8%; C) Folga (w) 15,7%	68
Figura 62 - Zona cisalhada ( $Z_c$ ) e Zona de ruptura abrupta ( $Z_r$ ), A) Folga (w) 3,1%; B) Folga (w) 7,8%; C) Folga (w) 15,7%	69
Figura 63 Zona cisalhada ( $Z_c$ ) e Zona de ruptura abrupta ( $Z_r$ ), A) Folga (w) 3,1%; B) Folga (w) 7,8%; C) Folga (w) 15,7%	69

Figura 64 - Zona cisalhada (Zc) e Zona de ruptura Abrupta (Zr) A) Folga (w) 3,1%; B) Folga (w) 7,8%; C) Folga (w) 15,7% ..... 69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de chapas através da espessura (s) .....	21
Tabela 2 - Classificação dos aços segundo norma AISI.....	29
Tabela 3 - Valores máximo de composição química do aço AISI S1 .....	30
Tabela 4 - Valores máximos de composição química do aço AISI D2.....	30
Tabela 5 - Valores máximos para composição química do aço ASTM A-36 .....	40
Tabela 6 - Limite de propriedades mecânicas segundo norma técnica. (Astm, 2015).....	40
Tabela 7 - Resultado da análise química do corpo de prova do aço AISI S1 realizado em espectrômetro.....	44
Tabela 8 - Resultado da análise química do corpo de prova de aço AISI D2 realizado no espectrômetro.....	44
Tabela 9 - Resultado da análise química da chapa de aço ASTM A-36 Amostra 1 realizada com espectrômetro.....	45
Tabela 10 - Limite de escoamento, tensão de ruptura e Alongamento da chapa ASTM A-36	45
Tabela 11 - Código e descrição das ferramentas .....	51
Tabela 12 - Dados de capacidade da máquina A 15.34N.....	52
Tabela 13 Dados obtidos para folga (w) de 3,1%.....	58
Tabela 14 Dados obtidos para folga (w) de 7,8%.....	62
Tabela 15 Dados obtidos para folga (w) de 15,7%.....	67

## LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
HRC	Rockwell C
LACAMI	Laboratório de Caracterizao Microestrutural
LdTM	Laboratório de Transformao Mecânica
LTDA	Limitada
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
SATC	Associação Beneficente da Industria Carbonífera de Santa Catarina
SENAFOR	Seminário Nacional de Forjamento
PPGE3M	Programa de Pós-Graduao em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USIMINAS	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UEL	Universidade Estadual de Londrina

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_c$	Área cisalhada	$\text{mm}^2$
$as_f$	Penetração de avanço	mm
$d$	Diâmetro do punção	mm
$df_i$	Diâmetro inicial do furo	mm
$df_f$	Diâmetro final do furo	mm
$d_m$	Diâmetro da matriz	mm
$F$	Força	N
$F_c$	Força de Corte	N
$F_{m\acute{a}x}$	Força Máxima	N
$l_0$	Comprimento inicial	mm
$l_c$	Perímetro de corte	mm
$L_{p\acute{m}a}x$	Comprimento máximo do punção	mm
$s$	Espessura da chapa	mm
$t$	Tempo	s
$Z_c$	Zona de cisalhamento	[-]
$Z_r$	Zona de ruptura abrupta	[-]
$w$	Folga entre punção e matriz	mm

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha_p$	Ângulo da aresta de corte do punção	$^\circ$ (graus)
$\delta$	Alongamento	%
$\varepsilon$	Deformação relativa	%
$\Delta d$	Varição do diâmetro	mm
$\Delta d_m$	Varição do diâmetro máximo	mm
$\sigma$	Tensão de Engenharia	Mpa
$\sigma_e$	Limite de Escoamento	Mpa
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão Máxima	MPa
$\sigma_{rup}$	Tensão de ruptura	MPa
$\tau_c$	Tensão de Cisalhamento	MPa

## RESUMO

O presente trabalho estuda a variação do diâmetro inicial e diâmetro final de um furo puncionado feito em uma chapa de aço ASTM A-36 com 12,7 mm de espessura. São propostas três geometrias diferentes de punção fabricados em aço AISI D2 e AISI S1 com diâmetro inicial 20 mm e final 22 mm. Os punções foram fabricados para realizarem o processo de puncionamento e brochamento com penetrações de avanço (asf) de 0,2 mm, 0,5 mm e 1 mm. O objetivo principal é reduzir a conicidade dos furos puncionados atualmente através do método convencional. As folgas entre punção e matriz ( $w$ ) utilizadas foram de 3,1%, 7,8% e 15,7% da espessura da chapa de testes respectivamente. Para avaliação do desempenho de cada ferramenta, todos os furos puncionados foram medidos e tabelados. Entre os resultados encontrados, constatou-se que os punções com brochamento apresentam melhores valores que os convencionais em todos parâmetros analisados. As regiões de cisalhamento ( $Z_c$ ) e região de ruptura abrupta ( $Z_r$ ) também sofreram influência direta em função da geometria utilizada.

Palavras Chaves: Processo de Puncionamento, Punção de corte, AISI D2, AISI S1.

## ABSTRACT

The present work studies the variation of the initial diameter and final diameter of a punched hole made in an ASTM A-36 steel sheet with 12.7 mm of thickness. Three different punches geometries are proposed and manufactured from AISI D2 and AISI S1 steel with initial diameter 20 mm and final diameter 22 mm. The punches were manufactured to carry out the punching and broaching process with feed penetrations (asf) of 0.2 mm, 0.5 mm and 1 mm. The main objective is to reduce the conicity of the punched holes currently through the conventional method. The clearance between punch and die ( $w$ ) used were 3.1%, 7.8% and 15.7% of the thickness of the test plate respectively. To evaluate the performance of each tool, all punched holes were measured and tabulated. Among the results, it was observed that the punches with a broaching showed better values than the conventional ones in all analyzed parameters. The regions of shear ( $Z_c$ ) and region of abrupt rupture ( $Z_r$ ) also had a direct influence in function of the geometry used.

Keywords: Punching process, shear punch, AISI D2, AISI S1.

## 1. INTRODUÇÃO

O Processamento de chapas metálicas é um dos mais importantes processos de manufatura no setor metal-mecânico. As chapas metálicas passam pelos mais variados processos de conformação mecânica até sua forma final. Alguns desses processos são embutimento, furação, rebordeamento, corte, dobramento e puncionamento.

A conformação de chapas é um pilar de grande importância e tem a capacidade de fabricar peças com excelentes propriedades mecânicas com a mínima perda de material.

Segundo Schaeffer (2004) no cenário atual o desenvolvimento de novos métodos e técnicas voltadas a conformação de chapas torna-se cada vez mais necessário. A necessidade de aperfeiçoamento das técnicas já existentes com intuito de reduzir custos e aprimorar os conhecimentos existentes é de fundamental importância frente aos elevados custos de produção e as novas demandas de mercado.

O puncionamento de chapas grossas é um processo que consiste no corte de chapas metálicas através da aplicação de forças de corte ( $F_c$ ) realizadas por um punção contra uma matriz de corte. A propagação da penetração do punção causa o aparecimento de trincas na região de contato entre o punção e a matriz de corte. O desenvolvimento destas trincas causa a ruptura total do material (Lajarin, et al, 2011).

O processo de puncionamento é amplamente utilizado na indústria de transformação de chapas. Este processo é responsável por uma grande parte dos furos realizados em chapas metálicas (Ghiotti, Bruschi e Regazzo, 2014). Torres de transmissão de energia elétrica por exemplo, são compostas principalmente de estruturas metálicas. Estas torres de transmissão são compostas quase na sua totalidade por cantoneiras perfil L e chapas metálicas. A grande maioria destes perfis são processados pelo processo de puncionamento.

Um defeito diretamente ligado a furação de chapas com destaque para as chapas grossas é o dimensional do furo final. Geralmente os furos puncionados em chapas grossas apresentam um diâmetro inicial diferente do diâmetro final. Esta conicidade se dá devido a diferença de diâmetro entre punção de corte e a matriz, conhecido como folga ( $w$ ). A diferença de diâmetro entre punção e matriz é fundamental para a realização deste processo. Alguns fatores são diretamente influenciados por esta diferença de diâmetro entre punção e matriz como:

necessidades mecânicas, esforços necessários para o escoamento do material e a limitação de força da máquina.

O dimensionamento incorreto das folgas entre punção e a matriz ( $w$ ) pode gerar uma série de problemas no processo. Como exemplo destes problemas pode-se citar: desgaste excessivo das ferramentas, grande esforço dos equipamentos e conseqüentemente aumento no consumo de energia elétrica, micro trincas, etc... No caso de chapas grossas há ainda uma grande variação no diâmetro inicial e final do furo puncionado. Tal variação pode comprometer o produto final.

### 1.1 Objetivos e Justificativa

Este trabalho tem por objetivo propor uma geometria alternativa de um punção de corte com objetivo de reduzir a variação entre o diâmetros inicial e final de um furo obtido pelo processo de puncionamento. Os punções propostos, são ferramentas confeccionados com intuito de puncionar e brochar o furo, conferindo um acabamento superficial melhor que o método convencional. A variação do diâmetro apresentada nos furos realizados pelo processo convencional pode ser vista na figura 1.

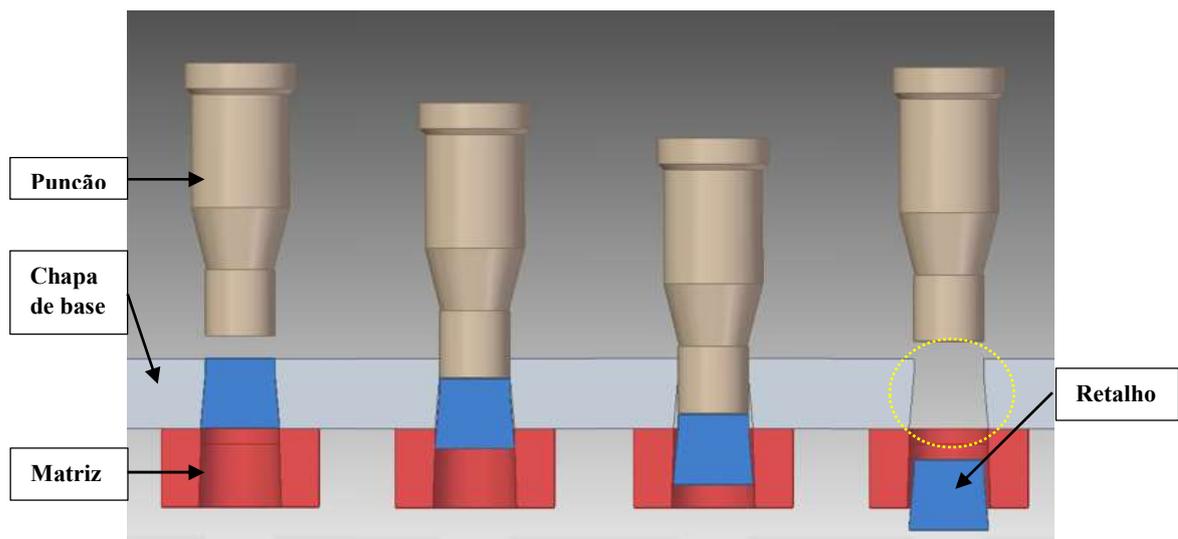


Figura 1 - Conicidade gerada no processo de Puncionamento. (Esquemático).

Após realizar a furação com o processo de puncionamento convencional em uma chapa de aço ASTM A-36 de 12,7mm de espessura (s), comparou-se o mesmo com novas ferramentas propostas neste trabalho. A validação da ferramenta proposta, teve como objetivo aumentar o percentual de peças puncionadas na fabricação de torres de estruturas metálicas para transmissão de energia. A furação de chapas grossas atualmente é feita através do processo de furação com brocas intercambiáveis de metal duro. A principal razão para utilização de brocas é o fato de que, a variação entre o diâmetro inicial e final de furos feitos com punções convencionais, geralmente se concentrem fora das faixas de tolerância de projeto. Neste trabalho são propostos dois tipos de materiais e três diferentes geometrias de punções.

A conicidade do furo puncionado pode ser vista no detalhe em amarelo da figura 1. Esta conicidade observada principalmente em chapas grossas, é um fator importante para escolha do processo de furação. Espera-se com este estudo reduzir a conicidade através da implementação de ferramentas com diferentes geometrias.

Com a redução da variação entre o diâmetro inicial ( $d_i$ ) e diâmetro final ( $d_f$ ) dos furos em chapas grossas puncionadas, a aplicação do processo de puncionamento proposto no lugar da furação com broca trará benefícios econômicos como: menor tempo de furação e menor valor de ferramentas.

## 1.2 Macro Etapas de Desenvolvimento do Estudo

A figura 2 apresenta as principais etapas empregadas para o desenvolvimento do presente estudo, as quais serão abordadas com maiores detalhes no decorrer dos próximos capítulos.

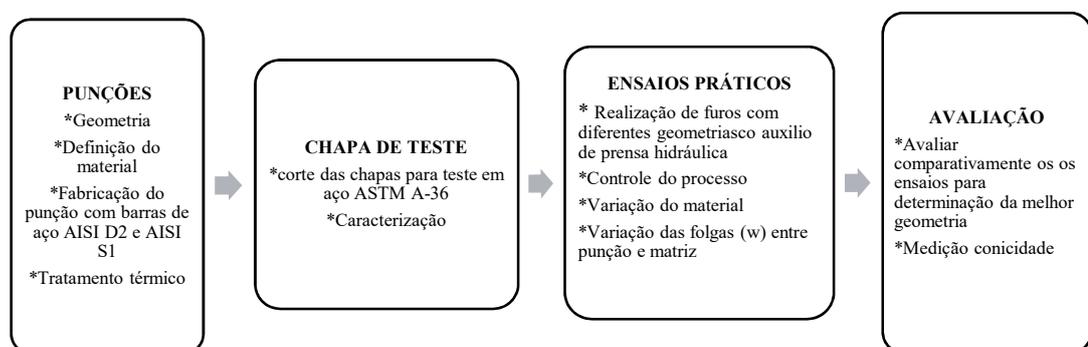


Figura 2 - Macro etapas do desenvolvimento do estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Corte por Cisalhamento

O processo de corte por cisalhamento é um processo de grande importância na área de conformação mecânica (Fang, Zeng e Lou, 2002). Por ser um processo de separação de um retalho da peça, geralmente, é tratado juntamente com os processos de estampagem. A ambos os processos comumente possuem ferramentas acionadas por prensas.

Segundo Boff et al (2012), o processo de corte por cisalhamento, se destina a obtenção de formas geométricas, a partir de chapas de aço, submetidas a pressões exercidas por um punção e uma matriz de corte.

O processo de corte por cisalhamento caracteriza-se principalmente pelo movimento de um punção de corte contra uma chapa matriz. A peça de interesse pode ser tanto o retalho removido da peça quanto a chapa com a furação. A figura 3 demonstra os elementos básicos de uma ferramenta de cisalhamento.

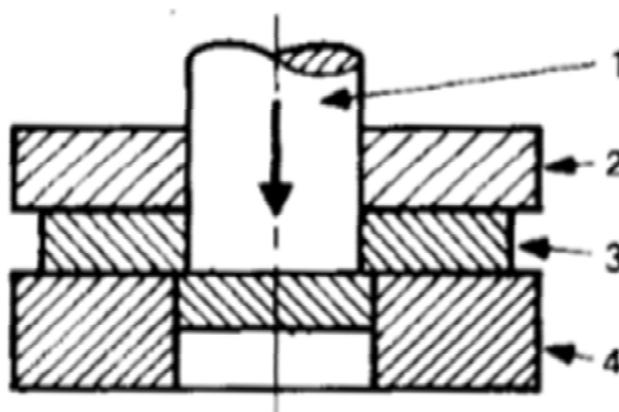


Figura 3 - Elementos básicos de uma ferramenta de cisalhamento: 1 punção 2 prensa chapas, 3 chapa de trabalho, 4- matriz de corte (Lange, 1985).

Outra característica do processo de cisalhamento é a região cortada. Uma peça sujeita ao processo de corte por cisalhamento, apresenta na região cortada algumas zonas típicas do processo. Estas zonas são usualmente denominadas de: zona de arredondamento, zona

cisalhada, zona fraturada e rebarba e empenamento. A figura 4 demonstra esquematicamente estas zonas características.

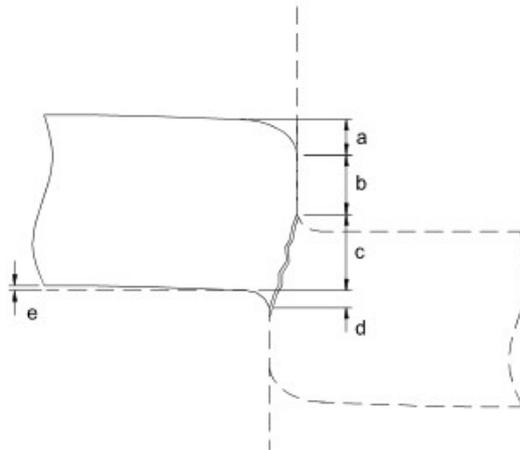


Figura 4 - Partes principais de uma peça cisalhada a- Zona de arredondamento, b- Zona cisalhada, c - Zona fraturada, d - Rebarba, e - Empenamento. (Lange, 1985).

A zona “a”, região da deformação elasto-plástica, conhecida como zona de arredondamento ou indentação se dá pelo escoamento do material ao ser pressionado pelo punção. Materiais com características dúcteis possuem essa região maior que materiais frágeis devido sua maior capacidade de deformação.

Já a zona de corte “b” é caracterizada por apresentar uma superfície vertical com aspecto brilhantado. A região “c” é onde acontece o desprendimento abrupto do retalho, esta região é iniciada a partir do momento que a o material atinge sua capacidade máxima de deformação. Esta região tem como característica apresentar uma alta rugosidade.

A região “d” conhecida por rebarba, está diretamente ligada a folga entre punção e matriz ( $w$ ). Quanto maior for a folga ( $w$ ) maior a rebarba resultante no final do processo.

As chapas metálicas podem receber denominações de chapa fina, chapa média e chapa grossa de acordo com sua espessura. A tabela 1, demonstra esta classificação segundo Liebig (1993)

Tabela 1 - Classificação de chapas através da espessura (s)

Espessura	Denominação
$s < 3\text{mm}$	Chapa fina
$3\text{mm} \leq s \leq 4,76\text{mm}$	Chapa média
$4,76\text{mm} \leq s$	Chapa grossa

Fonte: Liebig (1993)

### 2.1.1 Aspectos da furação

Os furos realizados por processo de puncionamento apresentam características diferentes de processos como por exemplo a furação com brocas intercambiáveis. Ao analisar a região cortada geralmente pode-se observar duas regiões bem distintas. Uma destas regiões tem aspecto brilhantado, correspondendo a região onde houve cisalhamento do material. A outra apresenta aspecto rugoso, esta região rugosa é caracterizada pela fratura abrupta do material (Luo, 1999).

Durante a realização do processo de puncionamento em chapas grossas, ou de elevada resistência, pode-se encontrar uma variação entre os diâmetros de entrada e diâmetro da saída do furo puncionado ( $\Delta d$ ). Quanto maior for a folga entre punção e matriz (w) maior será essa diferença (Eto, 2005). A figura 5 demonstra essa variação.

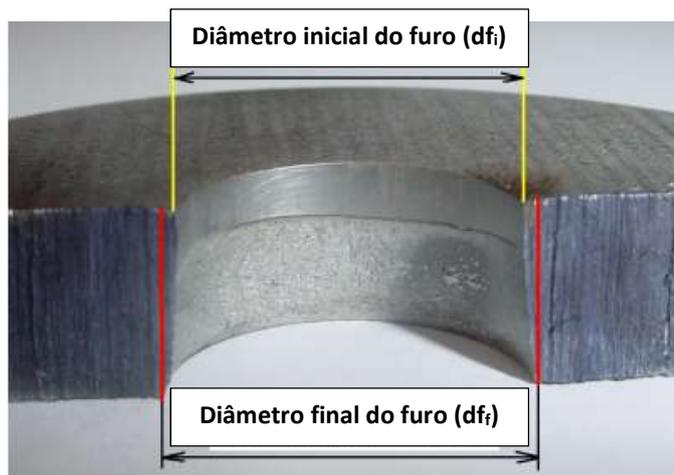


Figura 5 - Diâmetro do início e final do corte (Eto, 2005).

Segundo Marcondes (2009) durante o processo de punçionamento de chapas metálicas maiores que 6 mm, surge um efeito chamado de “estouro”. Este efeito “estouro” corresponde ao inchamento da parte superior do retalho. O efeito “estouro” é um dos principais responsáveis pela variação dos diâmetros dos furos, um exemplo do retalho pode ser visto na figura 6.



Figura 6 - Forma cônica dos retalhos no punçionamento de chapa de aço ASTM A-36 com espessura (s) 8 mm.

Para Hilditch e Hodson (2005) dois fatores de grande importância, que tem elevada relação com a qualidade do furo e o aspecto da região cortada são: o tipo de material punçionado e a folga entre punção e matriz (w).

### 2.1.2 Limitação do punção em relação a espessura da chapa e flambagem

Assim como outros processos de fabricação como dobramento, trefilação entre outros, o punçionamento apresenta algumas limitações para sua aplicação industrial. Duas dessas limitações são: o diâmetro do punção em relação a espessura do material a ser cisalhado e a flambagem. A figura 7 mostra os parâmetros de espessura da chapa (s) e diâmetro do punção (d) e comprimento máximo do punção ( $L_{pmax}$ ).

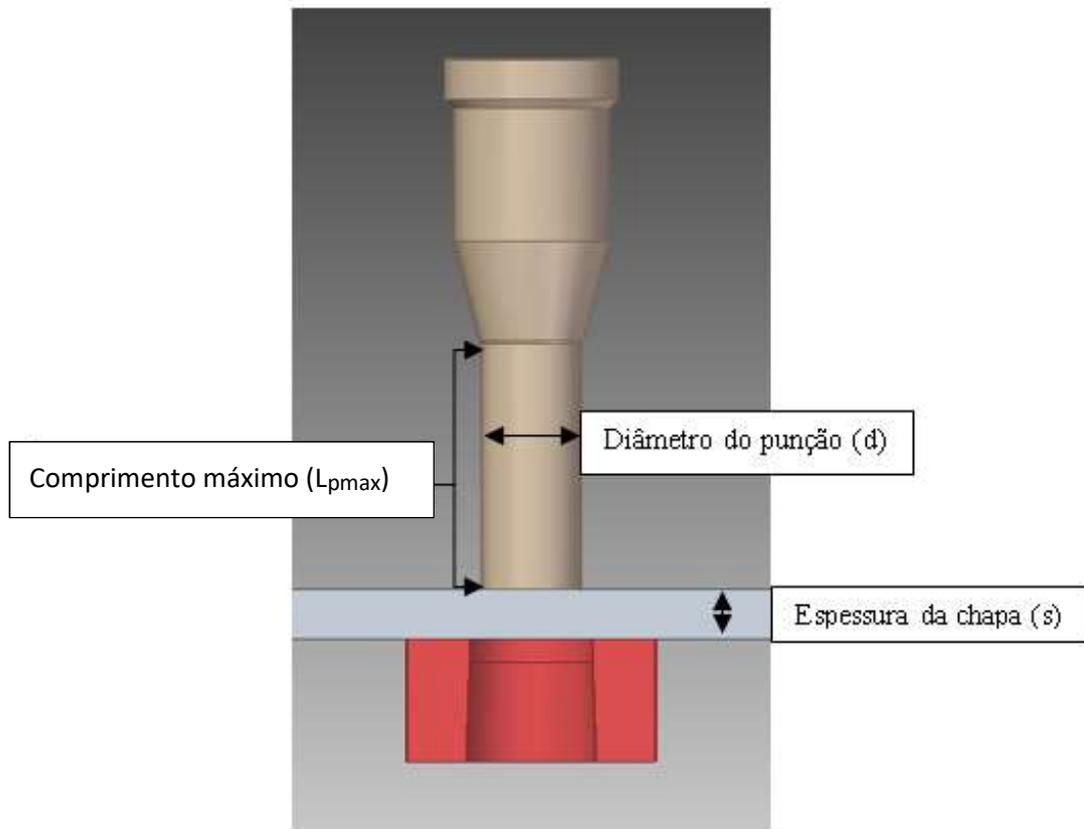


Figura 7 - Parâmetros diâmetro do punção ( $d$ ), espessura da chapa ( $s$ ), comprimento máximo ( $L_{pmax}$ ), diâmetro inicial do furo ( $d_{if}$ ) diâmetro final do furo ( $d_{ff}$ ).

De acordo com ASM International (1993) para chapas de aço acima de 3,18 mm de espessura ( $s$ ), o diâmetro do punção ( $d$ ) deve corresponder pelo menos a 70% da espessura ( $s$ ) da chapa a ser cortada.

Com relação a flambagem, o comprimento do punção ( $L_{pmax}$ ) deve ser projetado a fim de evitar tal fenômeno. Segundo Schaeffer (2004), para evitar a flambagem o comprimento máximo ( $L_{pmax}$ ) para um punção não guiado, deve ser no máximo de 8x seu diâmetro ( $d$ ), para punções guiados o comprimento máximo ( $L_{pmax}$ ) aumenta para 12x o seu diâmetro ( $d$ ).

## 2.2 Força de Corte

As forças envolvidas em um processo de puncionamento, mesmo que para chapas finas, são consideradas altas. O fato de o material realizar encruamento durante a deformação plástica, faz com que seja exigida uma maior força a cada instante para que a deformação possa continuar

acontecendo. A seguir é demonstrada na Eq (1). uma opção para realização dos cálculos de força de corte ( $F_c$ ).

$$F_c = \tau_c \cdot A_c \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

$\tau_c$  = Tensão de cisalhamento [MPa].

$A_c$  = é a área a ser cisalhada [mm<sup>2</sup>].

A área a ser cisalhada pode ser calculada através da Eq. (2):

$$A_c = l_c \cdot s \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

$l_c$  = perímetro ou comprimento da aresta de corte [mm].

$s$  = espessura da chapa [mm].

Segundo Lange (1990) a tensão de ruptura por cisalhamento se situa entre 50 a 80% da tensão máxima material, para casos onde a razão entre o diâmetro do punção ( $d$ ) e a espessura da chapa ( $s$ ) for maior que 2 pode-se utilizar a Eq (3) para cálculo aproximado.

$$\tau_c = 0,8\sigma_{\max} \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde:

$\sigma_{\max}$  = Tensão máxima do material [MPa]

Totre, Nishad e Bodke (2013) analisaram a influência do revestimento dos punções com filmes finos e a geometria da ponta do punção em relação a força de corte ( $F_c$ ). Os estudos foram realizados com chapas de espessura de 1 mm a 7 mm. A figura 8 demonstra os dados obtidos.

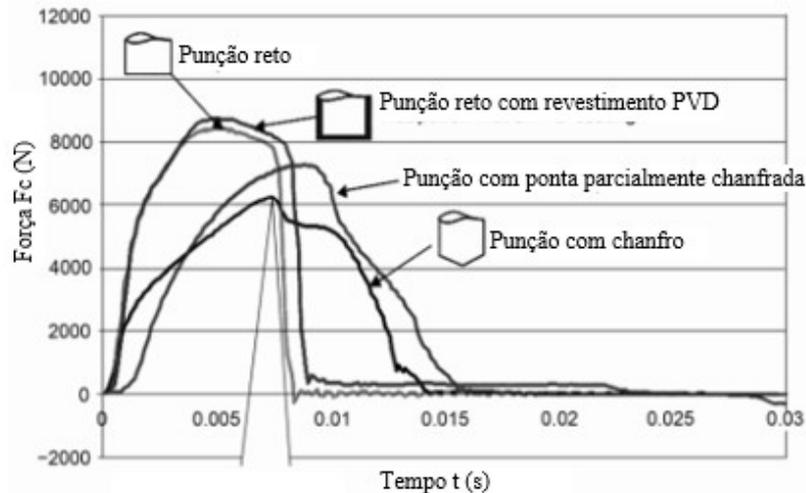


Figura 8 - Diagrama força X tempo (Totre, Nishad e Bodke 2013).

O estudo demonstra que a aplicação de revestimento PVD (*Physical Vapor Deposition*) não resulta em grandes alterações na força de corte. Em contrapartida a fabricação de punções com chanfros na aresta de corte, apresentaram uma redução na força de corte de até 25% (Totre, Nishad e Bodke, 2013).

Totre, Nishad e Bodke (2013), Singh, Streppel e Kals (1992), com objetivo de reduzir a força de corte ( $F_c$ ), sugeriram a implementação de ângulos de  $22,5^\circ$  nas pontas dos punções de corte. Em situações onde a capacidade do equipamento é excedida, esta solução pode ser aplicada a fim de tornar o processo viável.

Algumas das possibilidades de pontas de corte com ângulos e seus retalhos resultantes após a operação são demonstradas na figura 9 do estudo de Singh, Streppel e Kals (1992).

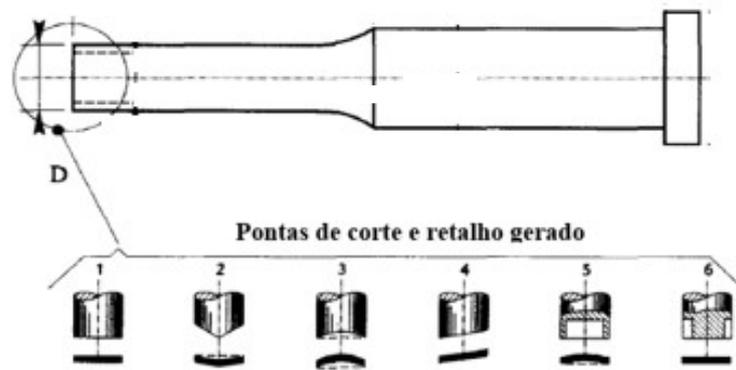


Figura 9 - Tipos de pontas de corte adaptado (Singh, Streppel e Kals, 1992).

### 2.3 Folga entre Punção e Matriz

A folga entre punção e matriz ( $w$ ) é de fundamental importância para vários processos no setor metal mecânico. Na estampagem a folga é um dos principais elementos que devem ser analisados antes da realização do processo (Faura, García e Estrems, 1998). A folga entre punção e matriz ( $w$ ) é a diferença entre o diâmetro da matriz ( $d_m$ ) e o diâmetro do punção ( $d$ ) conforme Eq. 4. A figura 10 demonstra esquematicamente a folga entre punção e matriz ( $w$ ).

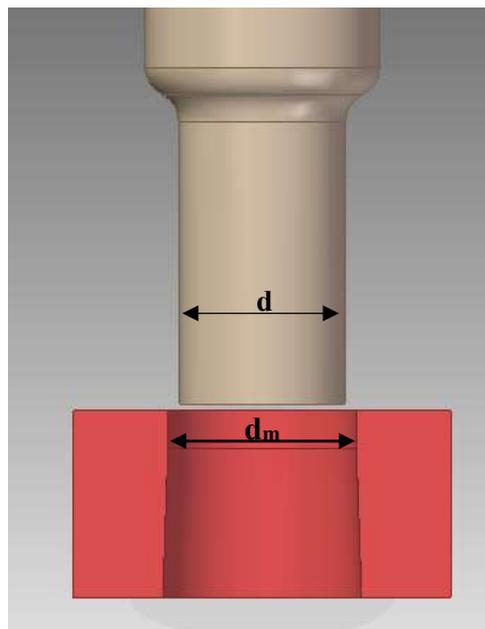


Figura 10 - Folga ( $w$ ) entre punção e matriz.

$$w = d_m - d \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

$w$  = folga entre punção e matriz [mm]

$d_m$  = diâmetro da matriz [mm]

$d$  = diâmetro do punção [mm]

A implementação de folgas ( $w$ ) incorretas, leva a redução da vida das ferramentas, elevadas conicidades nos furos das chapas, problemas com precisão e dimensão do produto final, além de, esforços superiores das máquinas operatrizes (Tekiner, Nalbant e Gürün, 2006; Fang, Zeng e Lou, 2002). Todos esses parâmetros implicam diretamente no processo de corte por cisalhamento, tendo impacto nos fatores econômicos.

A figura 11 ilustra as três possíveis combinações de folgas, a) folga ideal onde o corte acontece com menor esforço possível, b) onde a folga é reduzida, aumentando o esforço da máquina, c) folga demasiada, onde se observa a geração de grande rebarbas.

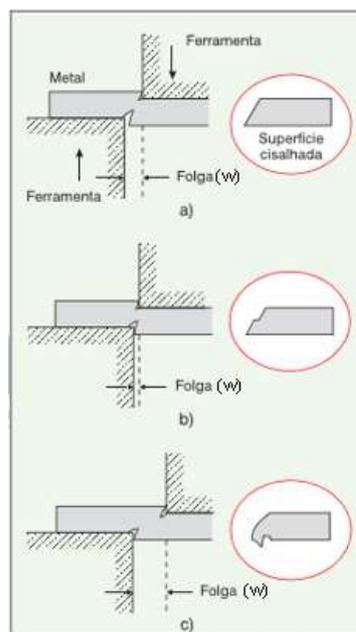


Figura 11 - Mecânica do corte de chapas por cisalhamento a) folga ótima, b) folga insuficiente e c) folga excessiva (Marcondes, 2009).

Para Schaeffer (2004) a folga ( $w$ ) é a variável mais importante na construção de ferramentas de corte. A determinação correta da folga ( $w$ ) impacta diretamente no desgaste das partes ativas da ferramenta. A aplicação de folgas ( $w$ ) menores entre punção e matriz resulta em um aumento na força requerida pelo equipamento para realização do processo (Breitling et al, 1997).

A folga ( $w$ ) tem influência direta na formação de rebarbas. A utilização de folgas ( $w$ ) maiores apresentam uma maior zona de arredondamento “a”, e por essa razão, ocasionam grandes deformações plásticas. Folgas menores apresentam uma zona de cisalhamento “b” maior e um desencontro de trincas causando rasgamentos secundários. Estes rasgamentos secundários acabam causando o retardo do aparecimento das trincas durante o processo (Boff e Schaeffer, 2011; Eto, 2005).

Ainda não é conhecida nenhuma regra geral para determinação da folga ideal. Segundo Boff e Schaeffer (2011) devido ao grande número de parâmetros que influenciam no processo como: aspecto superficial do corte, imprecisões, operações posteriores e aspectos funcionais.

Ainda segundo Boff e Schaeffer (2011) mesmo sem uma regra geral os valores de folga ( $w$ ), normalmente em processos de corte convencionais são utilizados valores que variam de 5 a 10% da espessura ( $s$ ) de chapa. Em processos de corte fino os valores aplicados para a folga ( $w$ ) são inferiores, podendo chegar a 1% da espessura ( $s$ ) da chapa.

Outros autores como Marcondes (2009) indicam a utilização de folgas ( $w$ ) de 5% até 12% para obtenção de rebarbas aceitáveis. Com a aplicação destes valores acredita-se obter um bom controle sobre o processo.

Alguns valores de folgas ( $w$ ) menores que 4% podem ser utilizadas para materiais mais dúcteis como o latão e o alumínio e 10% para aços com maior resistência como aço inoxidável (Schaeffer, 2004).

## 2.4 Aços Ferramenta

Os aços que são utilizados para fabricação de ferramentas para manufatura geralmente são chamados de aços ferramenta. Estes aços são caracterizados principalmente por possuírem

elementos de liga que fornecem elevada dureza, alta resistência ao desgaste e elevada tenacidade ao material. Os aços ferramenta são os mais indicados para a fabricação de ferramentas de corte (Scheid, 2010).

A fabricação de uma ferramenta de estampo, requer ao menos que a dureza do punção e da matriz sejam maiores que a dureza do material que será processado. Esta diferença de dureza é necessária para evitar que o punção e matriz deformem.

Após tratamento térmico estes aços podem adquirir dureza elevada. É possível obter valores de 63 a 65 HRC para o caso do aço AISI D2, já para o aço AISI S1 esta dureza é um pouco inferior 58 a 62 HRC.

Os aços ferramenta são identificados através de uma letra inicial maiúscula. Através desta letra é possível identificar para qual finalidade aquele tipo de aço é destinado (Scheid, 2010). A tabela 2 demonstra as descrições e as letras correspondentes.

Tabela 2 - Classificação dos aços segundo norma AISI

<b>Descrição</b>	<b>Letra Inicial</b>
Aços Ferramenta para Trabalho a Frio	A / D / O
Aços Ferramenta para Trabalho a Quente	H
Aços Ferramenta Resistentes ao Choque	S
Aços Ferramenta para Moldes Plásticos	P
Aços Rápidos	M / T
Aços Ferramenta Resfriados em Água	W

Os aços utilizados neste estudo são: aços do tipo D trabalho a frio, conhecidos por sua elevada temperabilidade, altos teores de cromo e carbono. Podem ser temperados em ar e apresentam baixa distorção dimensional. Os aços S são resistentes a impacto, estes aços apresentam uma menor concentração de carbono e portanto, adquirem uma alta tenacidade se forem corretamente tratados termicamente (Scheid, 2010).

#### 2.4.1 Aço AISI S1

O aço AISI S1 é um aço para trabalho a frio, ligado ao tungstênio-cromo-vanádio, que fornece uma boa resistência ao desgaste e uma elevada resistência mecânica. É um aço indicado

principalmente para fabricação de ferramentas de corte como punções e navalhas devido sua alta tenacidade. A composição química do aço pode ser vista na tabela 3.

Tabela 3 - Valores máximo de composição química do aço AISI S1

C%	Si%	Cr%	Mo%	W%	V%
0,45	1	1,4	0,2	2	0,2

#### 2.4.2 Aço AISI D2

O aço AISI D2 é um aço de trabalho a frio, tem como características elevados teores de carbono e cromo. Possui uma alta tenacidade e temperabilidade, é um aço destinado principalmente a fabricação de matrizes, estampos de grande porte, ferramentas de furação como corte e puncionamento, A composição química do aço AISI D2 pode ser visto na tabela 4.

Tabela 4 - Valores máximos de composição química do aço AISI D2

C%	Si%	Cr%	Mo%	V%
1,5	0,3	12	0,95	0,9

#### 2.5 Punções de corte

Durante o processo de furação de uma chapa de aço por processo de puncionamento, vários fatores podem influenciar na geometria, na precisão e na qualidade do furo final. A busca de um processo mais econômico, mais rápido e sem a perda de qualidade direcionou algumas pesquisas para o aprimoramento de ferramentas de corte (Neto, 2012). A figura 12 demonstra um punção de corte convencional.

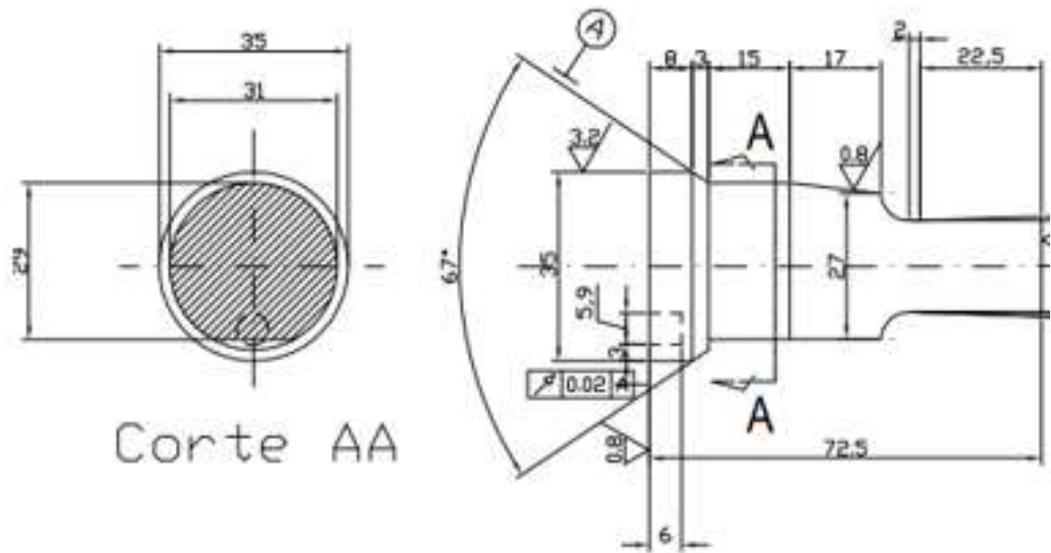


Figura 12 - Punção convencional de corte

O processo de puncionamento convencional consiste em realizar um furo em uma chapa através da aplicação de força em um punção de corte até a separação do material. O punção geralmente possui forma circular e o processo ocorre a frio, geralmente são encontrados em aços ferramenta AISI D2, AISI S1, AISI D6, AISI M2. A figura 13 demonstra um punção convencional fabricado em aço AISI D2 de diâmetro (d) 18mm.



Figura 13 - Punção de corte convencional, a) vista lateral e b) vista superior.

## 2.5.2 Matriz de Corte

A matriz de corte é a ferramenta utilizada para dar a forma do furo, esta ferramenta fica abaixo da chapa a ser cortada, a matriz de corte pode ser vista na figura 14.

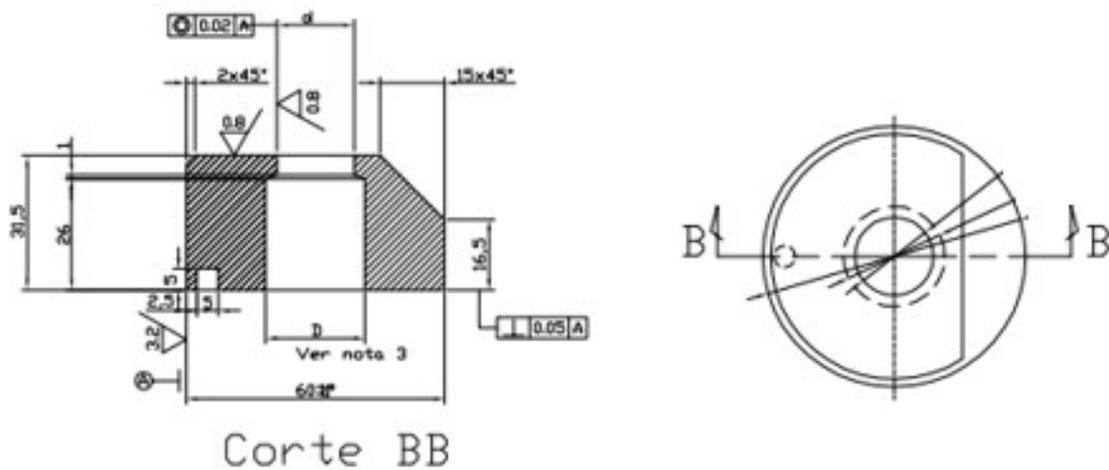


Figura 14 - Matriz de corte

As matrizes de corte geralmente são feitas com o mesmo material do punção. A matriz de corte possui seu diâmetro maior que o punção de corte, esta diferença de diâmetro é denominada folga entre punção e matriz ( $w$ ). A folga entre o punção e a matriz é um parâmetro necessários para realização do corte do material. A figura 15 demonstra uma matriz de corte.



Figura 15 - Matriz de corte, a) vista isométrica, b) vista inferior e c) vista superior

## 2.6 Brochamento

Tão importante como a operação de puncionamento, a operação de brochamento também possui grande aplicação industrial principalmente no que tange acabamentos internos de furos. Através da operação de brochar é possível realizar a redução da conicidade do furo puncionado. O processo de brochamento pode ser utilizado para realizar o ajuste final do dimensional do furo.

O processo de brochamento foi patenteado em 1873 nos Estados Unidos, teve sua primeira máquina construída em 1882, e foi no setor automobilístico que obteve grande desenvolvimento. Atualmente é considerado um processo caro, principalmente pelo elevado custo da ferramenta, seu uso é justificado em grandes lotes de produção. O brochamento é um processo que se corretamente aplicado pode eliminar operações posteriores como de acabamento (Stemmer, 1995; Lima; Miranda, 2007).

O Brochamento é um processo de usinagem, caracterizado por possuir uma ferramenta de múltiplos dentes de alturas crescentes dispostos em série, onde o processo de corte ocorre linearmente em um único passe (Stemmer, 1995). A figura 16 demonstra uma ferramenta de brochar.

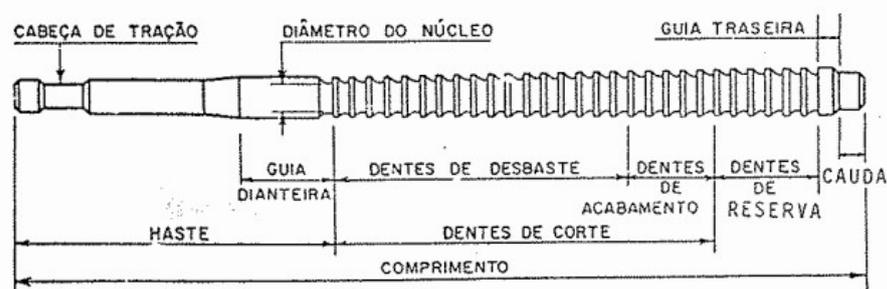


Figura 16 - Elementos de uma brocha interna de tração. (Stemmer, 1995)

Uma de suas principais características é a possibilidade da realização de várias operações em um único passe. Em um único ciclo de usinagem é possível obter operações de: desbaste, semi-acabamento e acabamento final. Os dentes de desbaste da ferramenta de brochar

são localizados na parte da frente da brocha. Estes dentes são responsáveis pela remoção da maior parcela do material, já os dentes de acabamento que ficam na parte traseira, fazem a remoção de uma pequena camada de material (Goncalvez, 2010; Stemmer, 1995).

Em casos de processos bem dimensionados, a operação de brochamento pode atingir altas qualidades superficiais, na faixa de 8 a 10 $\mu$ m.

### 2.6.1 Ferramentas de brochar

A brocha é a ferramenta utilizada para a realização do processo de brochamento. O processo pode ocorrer por tração ou compressão de uma ferramenta através de um furo, ou ainda a ferramenta pode ser pressionada sobre uma superfície. A sequência de dentes da brocha tem alturas progressivas que vão realizando a remoção de material até à forma desejada, estas alturas crescentes definem a altura de penetração (Stemmer, 1995).

O brochamento é dividido em dois principais modelos, o brochamento interno, e o brochamento externo. Ambos são utilizados para obtenção de qualidades variadas, desde desbastes simples de superfícies, até mesmo obtenção de furos com geometrias complexas a figura 17 demonstra os dois processos (Asm International, 1989).

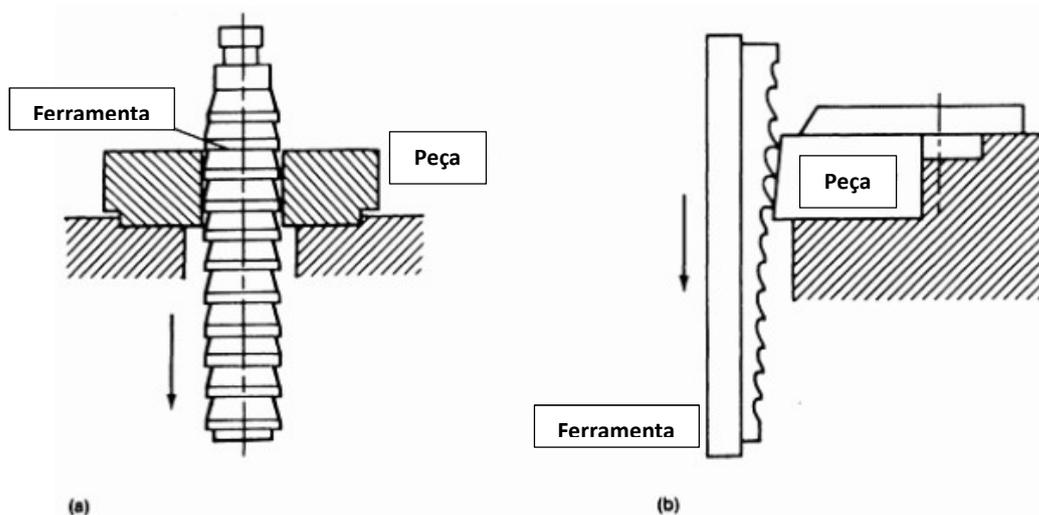


Figura 17 - Relação da peça de trabalho e ferramenta a – brochamento interno b – brochamento externo. (ASM 1989)

As brochas não são ferramentas adequadas para remoção de grande quantidade de material, (Lima; Miranda, 2007). Para Goncalves (2010) as penetrações de avanço ( $a_{sf}$ ) usualmente são 0,05 mm para aços com baixos e médios teor de carbono e 0,1 mm para aços recozidos. Segundo ASM Handbook (1989) alturas de penetração de avanço ( $a_{sf}$ ) de 0,15 mm são utilizadas para desbaste e 0,025 para acabamento fino. A figura 18 demonstra a penetração de avanço ( $a_{sf}$ ).

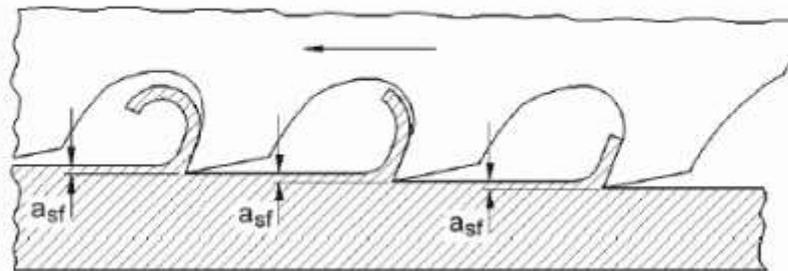


Figura 18 – penetração de avanço ( $a_{sf}$ ) (Stemmer, 1995)

De acordo com Goncalves (2010) e Eto (2009), a penetração de avanço ( $a_{sf}$ ) é um parâmetro de grande importância e deve ser escolhido de acordo com as seguintes variáveis:

- Dureza e tenacidade do material;
- Tipo de brochamento, interno ou externo;
- Nível de acabamento desejado;
- Tolerâncias específicas;
- Quantidade de material que se deseja remover;
- Comprimento total da superfície a brochar;
- Rigidez do conjunto peça – ferramenta;
- Dimensões da ferramenta.

## 2.7 Punções de Corte com Brochamento

As ferramentas de puncionamento com brochamento têm por objetivo a realização de mais de uma operação em um único ciclo do processo. Os punções de puncionamento com brochamento realizam o processo de corte através da ponta de puncionamento, em seguida uma

parte da ferramenta faz o brochamento, a área correspondente a cada operação é demonstrada na figura 19.



Figura 19 - Ferramenta operação puncionamento e brochamento adaptado (Marcondes et al., 2008).

Conforme Marcondes (2008) a aplicação de ângulos na aresta de corte em punções conforme figura 20 tem influência direta na conicidade dos furos, pois resulta em furos com menor variação ( $\Delta d$ ) entre o diâmetro final e inicial.

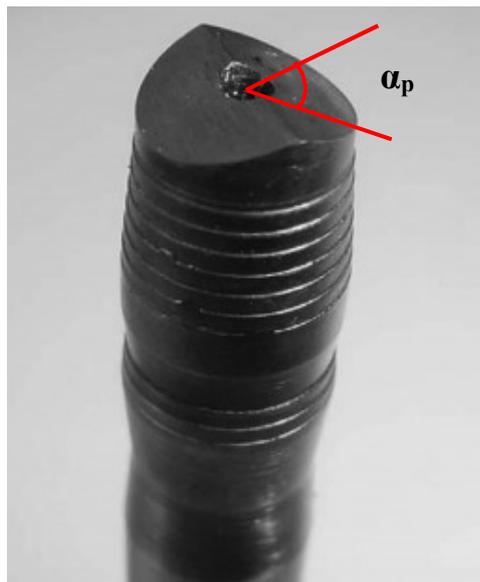


Figura 20 Punção com ângulo adaptado (Marcondes et al., 2008).

Os resultados de seu trabalho, demonstram que furos realizados em chapas de aço 6 mm, com punções com ângulo de  $22,5^\circ$ , apresentam uma variação de diâmetro máxima de 0,05 mm contra 0,12 mm para punções sem ângulo. A figura 21 demonstra os dados obtidos de máximo, mínimo e média.

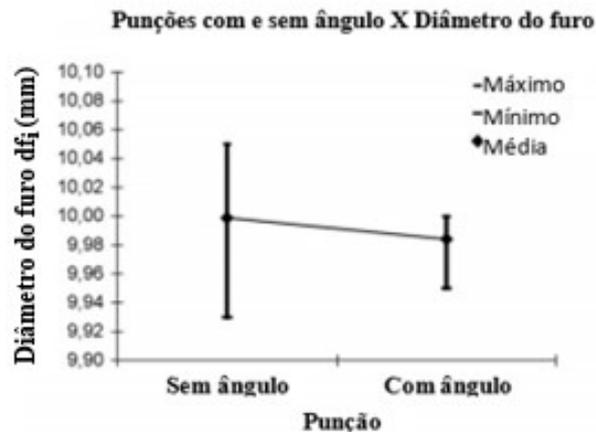


Figura 21 - Punção com e sem ângulo x Diâmetro adaptado (Marcondes, 2008).

### 2.7.1 Bolsas de cavacos

Segundo o estudo de Mello e Marcondes (2006) uma importante característica observada é que, o uso de bolsas de cavacos encontradas em ferramentas de brochar. As bolsas de cavacos são locais onde o cavaco é armazenado durante a execução do processo. Estas bolsas não tiveram função significativa aplicadas em punções de corte. Tal fato se deve a limitação de suas dimensões máximas sendo construídos com profundidades inferiores as recomendadas, principalmente devido o enfraquecimento do punção de corte. Nos estudos de ferramentas de puncionamento com brochamento as bolsas de cavacos acabaram se tornando inoperantes. As bolsas de cavacos podem ser vistas na figura 22.

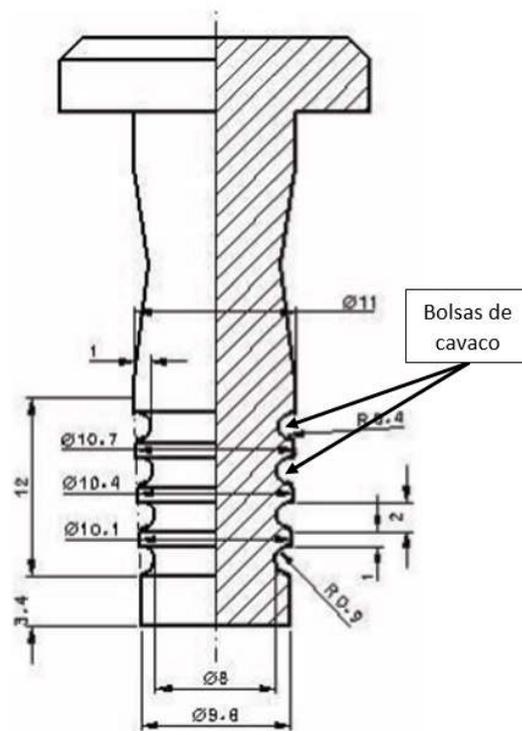


Figura 22 - Bolsa de cavacos (Mello e Marcondes 2006).

Algumas das geometrias sem as bolsas de cavacos vem sendo estudas para furação de chapas de espessura de até 7,9 mm. Estas geometrias apresentam boa aplicação e são demonstradas na figura 23.

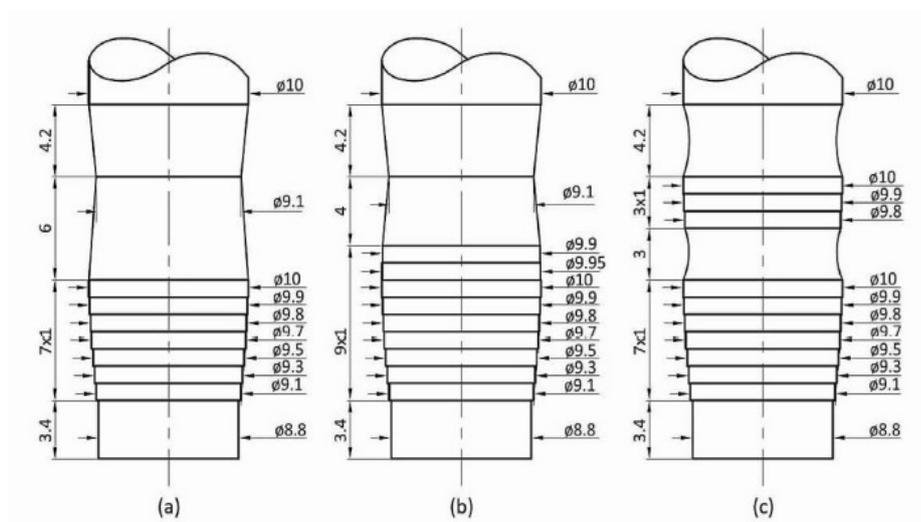


Figura 23 - Geometria de punções (dimensões em mm) a – Tipo I; b- Tipo II; c – Tipo III (Lajarin et al 2011).

## 2.7.2 Força de corte em punções de corte com brochamento

Ao analisar a força de corte ( $F_c$ ) na figura 23, durante o processo de puncionamento e brochamento Lajarin (2011) observa que os três punções, Tipo I, Tipo II e Tipo III apresentaram o pico de força logo após o início da trinca na região de contato com a matriz de corte. Ao realizar a comparação dos três punções testados com uma folga entre punção e matriz ( $w$ ) de 7%, o punção Tipo I demonstrado na figura 24 a) apresenta a menor força aplicada durante o processo.

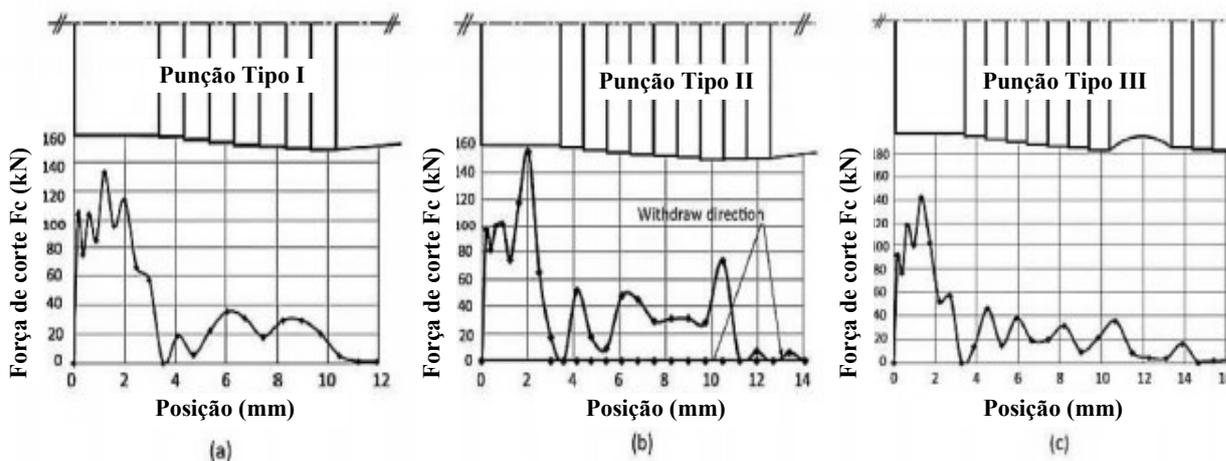


Figura 24 - Forças de corte durante processo de puncionamento e brochamento (Lajarin, 2011)

No estudo realizado por Neto (2012) a medição da conicidade e da cilindridade de furos realizados com ferramentas de puncionamento com brochamento, demonstra que há uma redução comparada com os furos por métodos convencionais, porém há uma tendência de piora nesta conicidade ao longo do tempo devido a adesão de material no punção.

## 2.8 Chapa de Aço ASTM A-36

As chapas metálicas de aço ASTM A-36 são amplamente utilizadas nos mais diversos seguimentos fabris, principalmente nas áreas estruturais, como torres treliçadas e estruturas metálicas em geral.

### 2.8.1 Análise química

A tabela 5 mostra os valores limites da composição química para uma chapa de aço fabricada conforme norma ASTM. Todos os valores expressos na tabela estão em percentuais (%).

Tabela 5 - Valores máximos para composição química do aço ASTM A-36

<b>C%</b>	<b>Mn%</b>	<b>Si%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Cu%</b>
≤ 0,25	0,8-1,2	≤ 0,40	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,2

### 2.8.2 Características mecânicas.

As propriedades dos materiais são obtidas através de ensaios mecânicos como o ensaio de tração ou de compressão por exemplo. Estes ensaios fornecem dados de grande importância para a utilização do material. A tabela 6 demonstra os valores recomendados pela norma ASTM para um aço A-36.

Tabela 6 - Limite de propriedades mecânicas segundo norma técnica. (Astm, 2015)

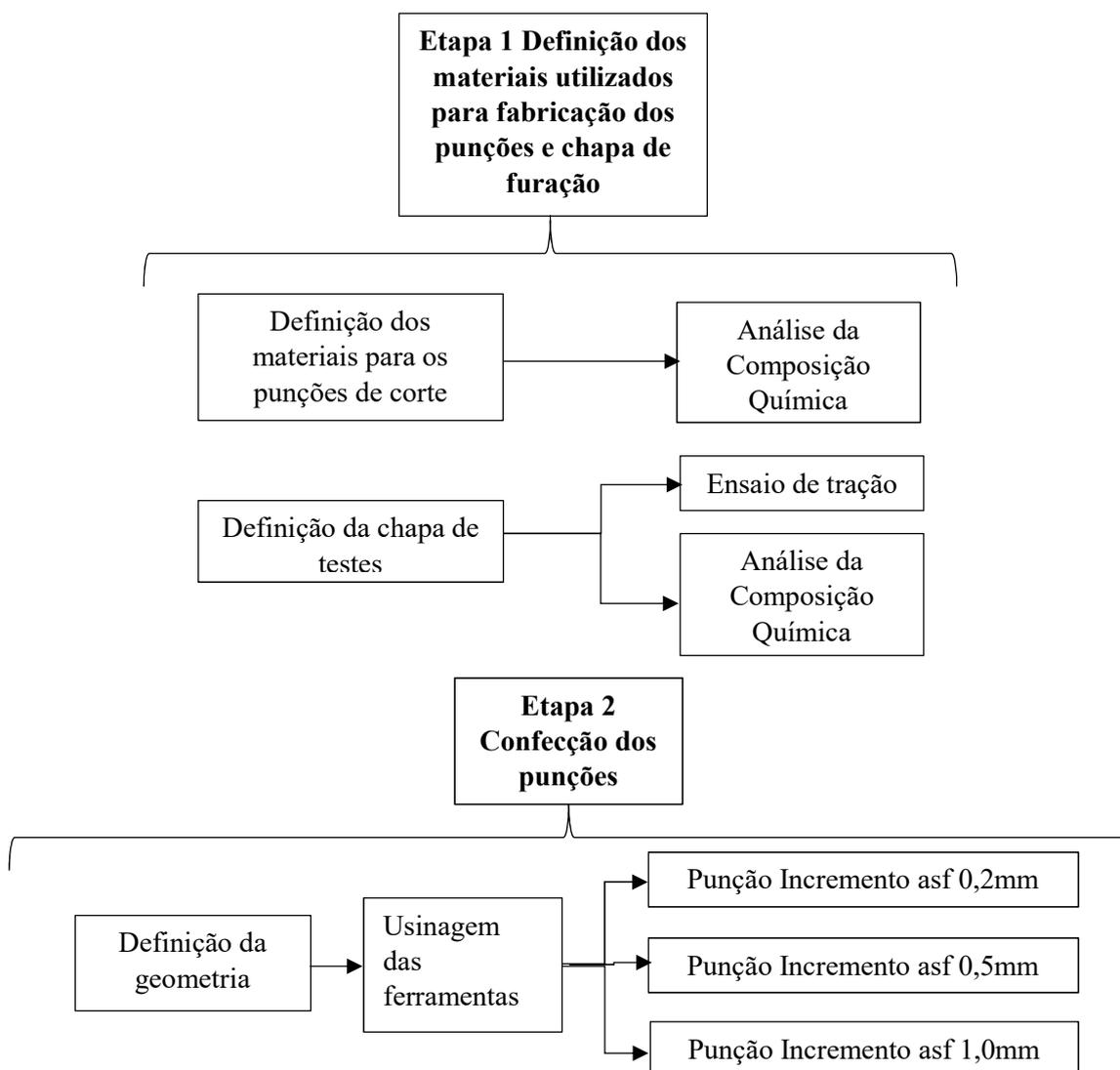
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Tensão Máxima (<math>\sigma_{max}</math>)</b>	400 MPa	550 MPa
<b>Tensão de Escoamento (<math>\sigma_e</math>)</b>	250 MPa	-
<b>Alongamento (<math>\delta</math>)</b>	20%	-

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Considerações Iniciais

Os materiais empregados para fabricação dos punções foram aço AISI S1 e o aço AISI D2. A chapa a ser utilizada para realização dos furos é de aço ASTM A-36 e foi utilizada chapa de propriedade da empresa BRAMETAL SUL METALURGIA LTDA.

Neste capítulo são descritos os métodos e equipamentos utilizados para realização dos ensaios a figura 3.1 demonstra um fluxograma das três etapas de desenvolvimento do trabalho.



### 3.1 Aços Selecionados para a Fabricação dos Punções

Os aços escolhidos para confecção dos punções de corte foram os aços AISI D2 e AISI S1 de diâmetro  $d_b$  38,1 mm, com grande utilização no setor metal mecânico. A figura 25 mostra os materiais utilizados para o ensaio.



Figura 25 - Barra de aço AISI S1 e AISI D2

Para análise da composição química foram realizados ensaios com auxílio de um espectrômetro MetalLab – 75 – 80J. O resultado apresentado no ensaio da espectrometria é uma tabela com a quantidade em percentual de cada elementos químico presente na amostra examinado. O equipamento utilizado pode ser visto na figura 26.

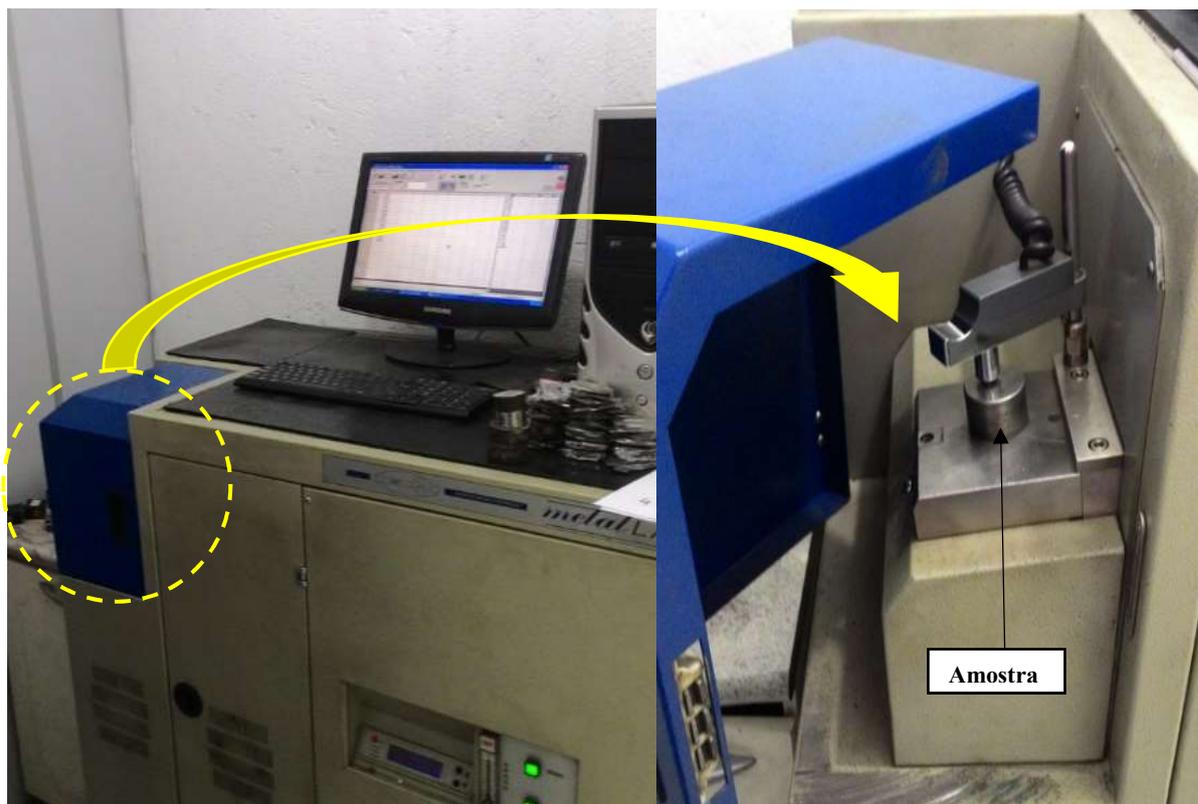


Figura 26 - Espectrômetro Metal Lab 70-80 J

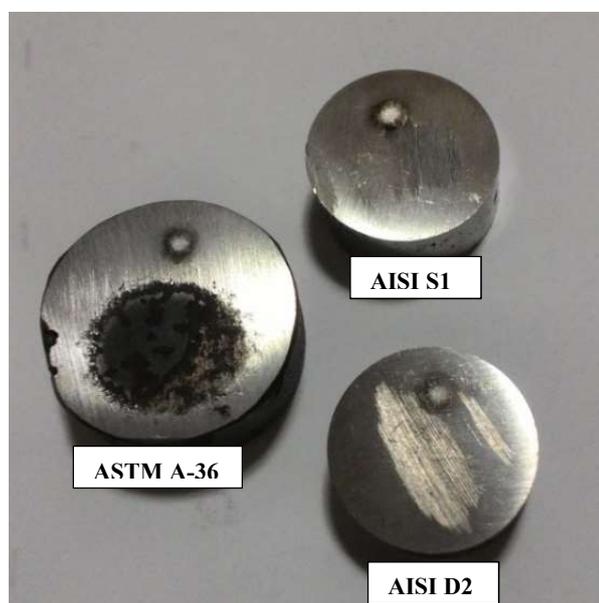


Figura 27 - Amostras após ensaio de espectrometria

### 3.1.1 Análise da composição química dos punções de corte

Os resultados dos ensaios no material selecionado para os punções são apresentados nas tabelas a seguir 7 e 8.

Tabela 7 - Resultado da análise química do corpo de prova do aço AISI S1 realizado em espectrômetro.

<b>C%</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Cr%</b>	<b>Mo%</b>	<b>V%</b>	<b>W%</b>
0,435	0,867	0,292	0,000	0,004	1,137	0,440	0,215	1,688

Ao analisar os valores fornecidos pelo fabricante, vistos na tabela 3, com os valores obtidos no ensaio demonstrados na tabela 7, observa-se que todos os valores se encontram dentro das faixas mínimas de tolerância.

Tabela 8 - Resultado da análise química do corpo de prova de aço AISI D2 realizado no espectrômetro

<b>C%</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Cr%</b>	<b>Mo%</b>	<b>V%</b>
1,416	0,388	0,392	0,010	0,001	11,962	0,831	0,842

Do mesmo modo ao comparar com a tabela 4 fornecida pelo fabricante com os resultados obtidos pelo ensaio demonstrado na tabela 8, observa-se que todos os valores dos elementos de ligas se encontram dentro da faixa de aceitação para o material AISI D2.

### 3.2 Aço Selecionado para a Chapa de Teste

O material a ser furado, a chapa de aço ASTM A-36, foi selecionado pois é responsável pela maioria das chapas em estruturas metálicas de geração e transmissão de energia. Alguns projetos podem ainda solicitar chapas de outros materiais como por exemplo o aço ASTM A-572 G50 porém estes casos são raros.

#### 3.2.1 Composição química da chapa de furação

A seguir na tabela 9 são mostrados os testes de espectrometria e tração realizados com a chapa metálica de aço ASTM A-36 de 12,7 mm de espessura (s) utilizada para este estudo.

Tabela 9 - Resultado da análise química da chapa de aço ASTM A-36 Amostra 1 realizada com espectrômetro.

<b>C%</b>	<b>Mn%</b>	<b>Si%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Cu%</b>
0,15	1,31	0,24	0,001	0,008	0,00

Comparando os resultados encontrados na amostra com o especificado pela fornecedora em acordo com a norma ASTM, a chapa se encontra dentro dos padrões mínimos de exigência.

### 3.2.2 Ensaio de Tração da chapa de aço ASTM A-36

A chapa a ser utilizada no presente estudo é uma chapa de aço ASTM A-36 de espessura 12,7 mm adquirida na empresa USIMINAS. As propriedades mecânicas fornecidas pelo fabricante foram retiradas do certificado de qualidade e podem ser vistas na tabela 10.

Tabela 10 - Limite de escoamento, tensão de ruptura e Alongamento da chapa ASTM A-36

<b>Limite de escoamento (<math>\sigma_e</math>)</b>	<b>Tensão máxima (<math>\sigma_{max}</math>)</b>	<b>Alongamento (<math>\delta</math>)</b>
279MPa	420MPa	36%

Os ensaios para obtenção da curva Tensão de engenharia ( $\sigma$ ) versus deformação relativa ( $\epsilon$ ) foram realizadas na máquina de ensaios universal EMIC DL10000 no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI – SATC). A figura 28 mostra a máquina.



Figura 28 - Máquina EMIC utilizada no ensaio

Foi confeccionado um corpo de prova conforme a norma técnica ABNT 6152 da chapa de aço utilizada para puncionamento. As dimensões podem ser vistas na figura 29.

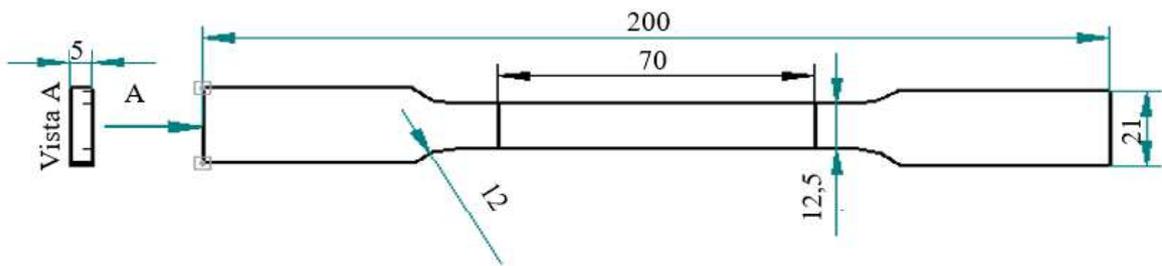


Figura 29 - Dimensões do corpo de prova.

Os dados obtidos dos ensaios e o gráfico foram então plotados e são na figura 30.

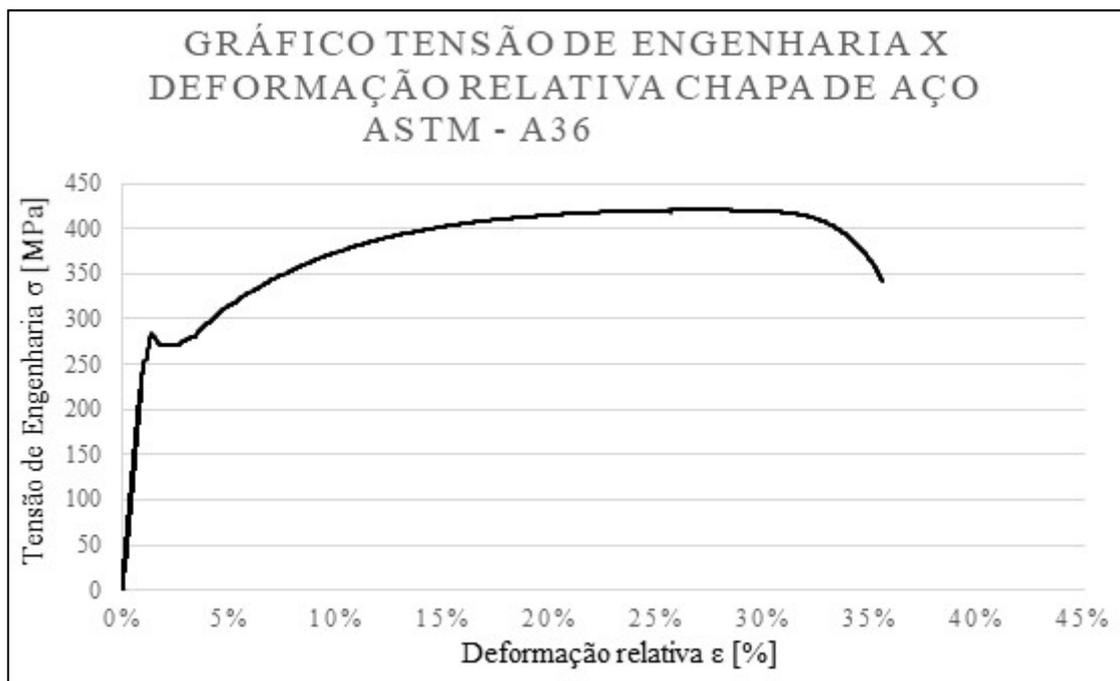


Figura 30 - Ensaio de tração dos corpos de prova.

### 3.3 Ferramentas Propostas

Os punções de corte propostos têm como objetivo principal a redução da conicidade entre o diâmetro inicial ( $df_i$ ) e o diâmetro final ( $df_f$ ) a do furo e o melhoramento do acabamento da região puncionada.

As ferramentas foram fabricadas com três diferentes geometrias. Todas as ferramentas tiveram o primeiro dente de corte posicionado a 5 mm no início do punção. Os punções das três geométricas foram fabricadas com dois materiais distintos, AISI S1 e AISI D2 e ambos sofreram tratamento térmico de tempera seguida por revenimento.

O punção I possui dois dentes para brochamento e possui penetração de avanço (asf) de 1 mm no diâmetro com curso de avanço 13 mm, este punção teve sua fabricação realizada de acordo com a figura 31.

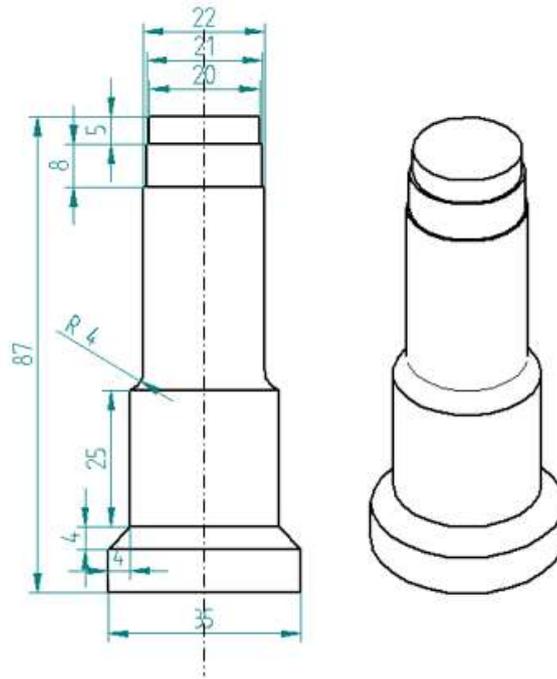


Figura 31 - Punção I

O punção II possui quatro dentes para brochamento e possui penetração de avanço (asf) de 0,5 mm no diâmetro e passo 4 mm e curso 17 mm, a figura 32 mostra os detalhes do punção II.

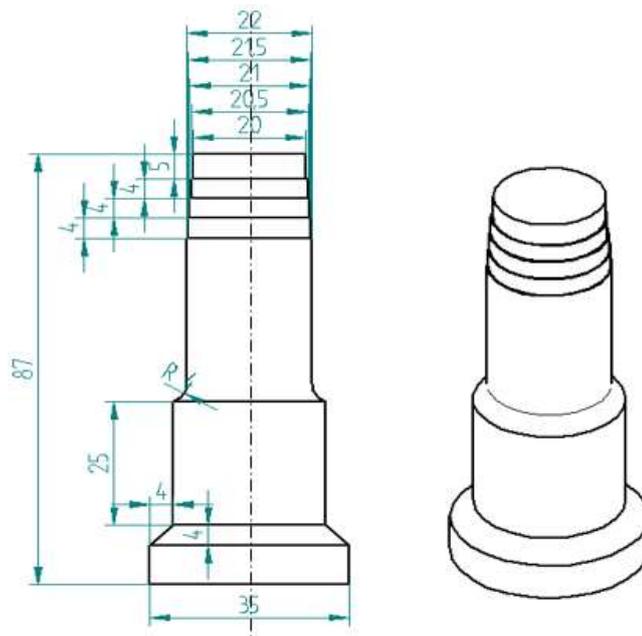


Figura 32 -Punção II

O punção III foi o punção com maior quantidade de dentes para brochamento, são dez ao todo, este punção possui penetração de avanço (asf) de 0,2 mm entre cada dente e curso 17 mm, seu desenho técnico pode ser visto na figura 33.

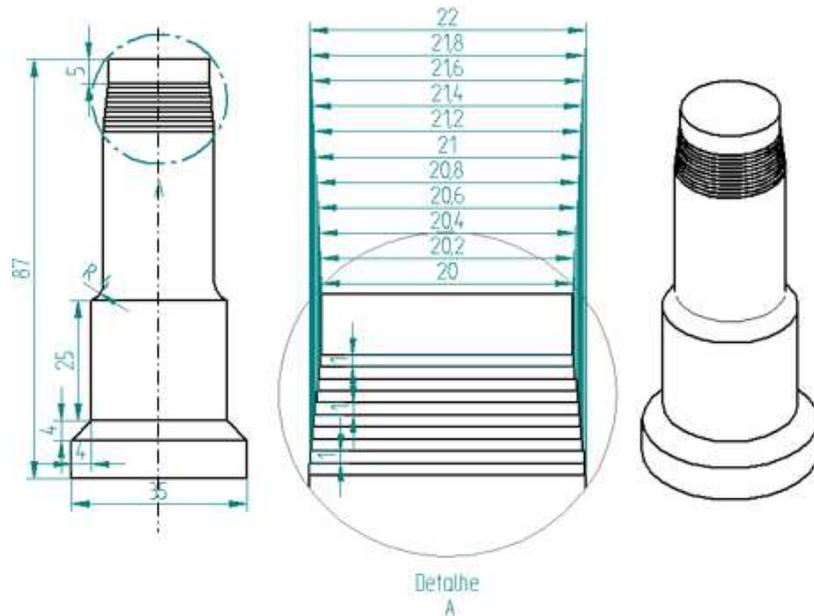


Figura 33 - Punção III

A figura 34 mostra as três geometrias de punções fabricados após processo de usinagem e tratamento térmico. O tratamento térmico aplicado foi de tempera, seguido por um processo de revenimento a fim de aliviar as tensões geradas no processo de tempera.



Figura 34 - Punções usinados A) punção III, B) punção II, C) punção I.

Os punções foram identificados pelo tipo de material através da marcação em cima da cabeça da ferramenta com um contraponto de um torno CNC conforme mostra a figura 35.



Figura 35 - Marcação com contra ponto.

As ferramentas que possuem a marcação com contra ponto foram fabricadas com aço AISI S1, as ferramentas sem a marcação foram fabricadas com aço AISI D2. Foram também utilizadas ferramentas convencionais (PCD) no estudo a fim de comparar com os resultados obtidos com as ferramentas de punção e brochamento.

Para identificação foram criados códigos conforme demonstra a figura 36. Todos os códigos podem ser vistos na tabela 11.

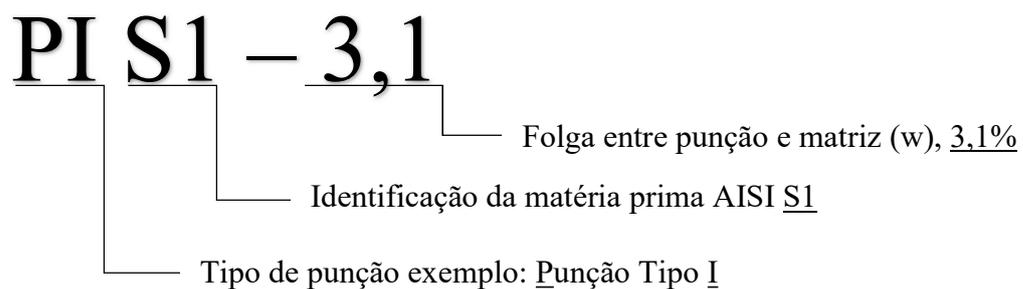


Figura 36 - Esquema de identificação

A Tabela 11 mostra o código utilizado e a descrição de cada ferramenta.

Tabela 11 - Código e descrição das ferramentas

Número	Código	Descrição
1	PIS1-3,1	Punção tipo I - Material AISI S1 – Folga (w) 3,1%
2	PIIS1-3,1	Punção tipo II - Material AISI S1 – Folga (w) 3,1%
3	PIIIS1-3,1	Punção tipo III - Material AISI S1 – Folga (w) 3,1%
4	PID2-3,1	Punção tipo I - Material AISI D2 – Folga (w) 3,1%
5	PIID2-3,1	Punção tipo II - Material AISI D2 – Folga (w) 3,1%
6	PIIID2-3,1	Punção tipo III - Material AISI D2 - Folga (w) 3,1%
7	PIS1-7,8	Punção tipo I - Material AISI S1 - Folga (w) 7,8%
8	PIIS1-7,8	Punção tipo II - Material AISI S1 – Folga (w) 7,8%
9	PIIIS1-7,8	Punção tipo III - Material AISI S1 – Folga (w) 7,8%
10	PID2-7,8	Punção tipo I - Material AISI D2 - Folga (w) 7,8%
11	PIID2-7,8	Punção tipo II - Material AISI D2 - Folga (w) 7,8%
12	PIIID2-7,8	Punção tipo III - Material AISI D2 - Folga (w) 7,8%
13	PIS1-15,7	Punção tipo I - Material AISI S1 - Folga (w) 15,7%
14	PIIS1-15,7	Punção tipo II - Material AISI S1 - Folga (w) 15,7%
15	PIIIS1-15,7	Punção tipo III - Material AISI S1 - Folga (w) 15,7%
16	PID2-15,8	Punção tipo I - Material AISI D2 - Folga (w) 15,7%
17	PIID2-15,7	Punção tipo II - Material AISI D2 - Folga (w) 15,7%
18	PIIID2-15,7	Punção tipo III - Material AISI D2 - Folga (w) 15,7%
19	PCD2-3,1	Punção tipo convencional - Material AISI D2 - Folga (w) 3,1%
20	PCD2-7,8	Punção tipo convencional - Material AISI D2 - Folga (w) 7,8%
21	PCD2-15,7	Punção tipo convencional - Material AISI D2 - Folga (w) 15,7%

### 3.4 Máquina Utilizada

A máquina utilizada para realização das furações foi uma prensa hidráulica A 15.34 N da fabricante italiana Ficep. A capacidade e alguns dados técnicos podem ser vistos na tabela 12. Máquina se encontra na empresa Brametal Sul Metalúrgica Ltda, onde foram realizados os ensaios de furação.

Tabela 12 - Dados de capacidade da máquina A 15.34N

<b>Modelo</b>	A 15.34N
<b>Força Máxima</b>	800 KN
<b>Diâmetro máximo de furação</b>	32mm
<b>Espessura máxima de furação</b>	20mm
<b>Altura máxima</b>	950mm
<b>Profundidade de garganta</b>	510mm

A máquina utilizada para Puncionamento pode ser vista na figura 37.



Figura 37 - Máquina A15.34 N utilizada no teste.

A figura 38 mostra com mais detalhes a parte interna da máquina onde são acoplados o punção e a matriz de corte.

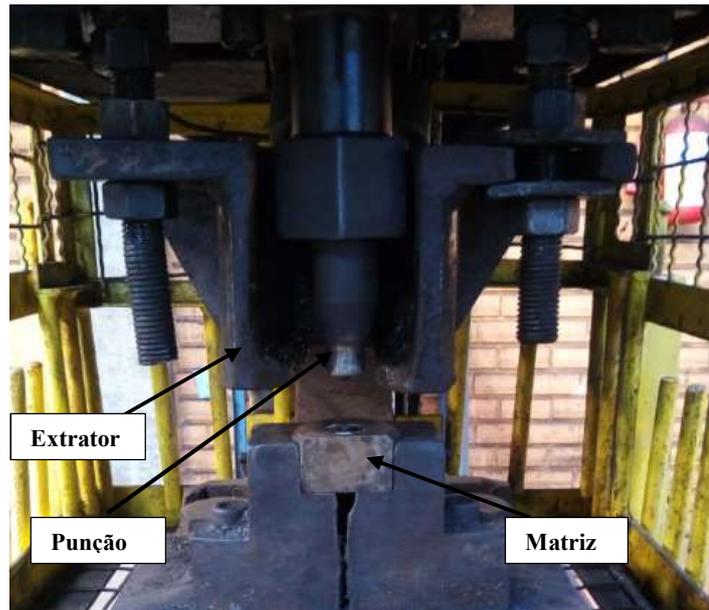


Figura 38 - Parte interna da máquina A 15.34N.

### 3.5 Medição dos furos puncionados

Para medição dos parâmetros diâmetros inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ), zona de cisalhamento ( $Z_c$ ) e zona de ruptura abrupta ( $Z_r$ ) foi utilizado um paquímetro de resolução 0,05 mm da marca Starret.

## 4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos para todos corpos de prova ensaiados neste trabalho. Foram executados três puncionamentos com cada punção em cada valor de folga ( $w$ ).

### 4.1 Variação de Diâmetro ( $\Delta d$ ) - Folga de 3,1%

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios feitos com os punções I, II e III fabricados em aço AISI S1 e AISI D2 e o punção convencional fabricado em aço AISI D2, utilizando uma folga entre punção de corte e matriz ( $w$ ) de 0,4 mm correspondente a 3,1% da espessura ( $s$ ) da chapa de aço ASTM-A36.

#### 4.1.1 Aço AISI S1

Na figura 39 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIS1 para uma folga ( $w$ ) de 3,1% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

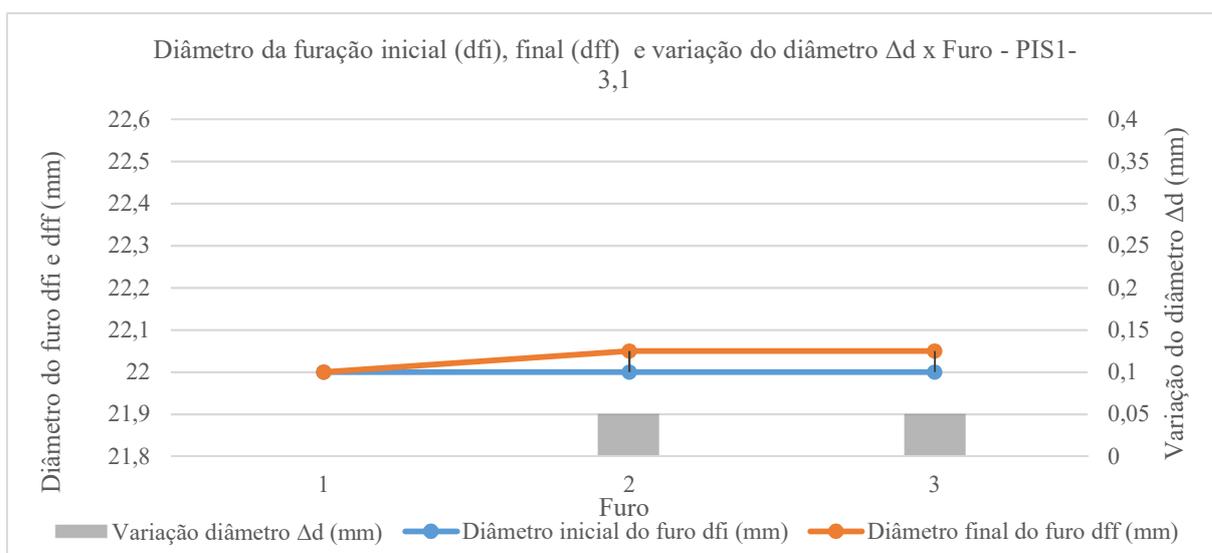


Figura 39 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIS1-3,1%.

Na figura 40 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIIS1 para uma folga ( $w$ ) de 3,1% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

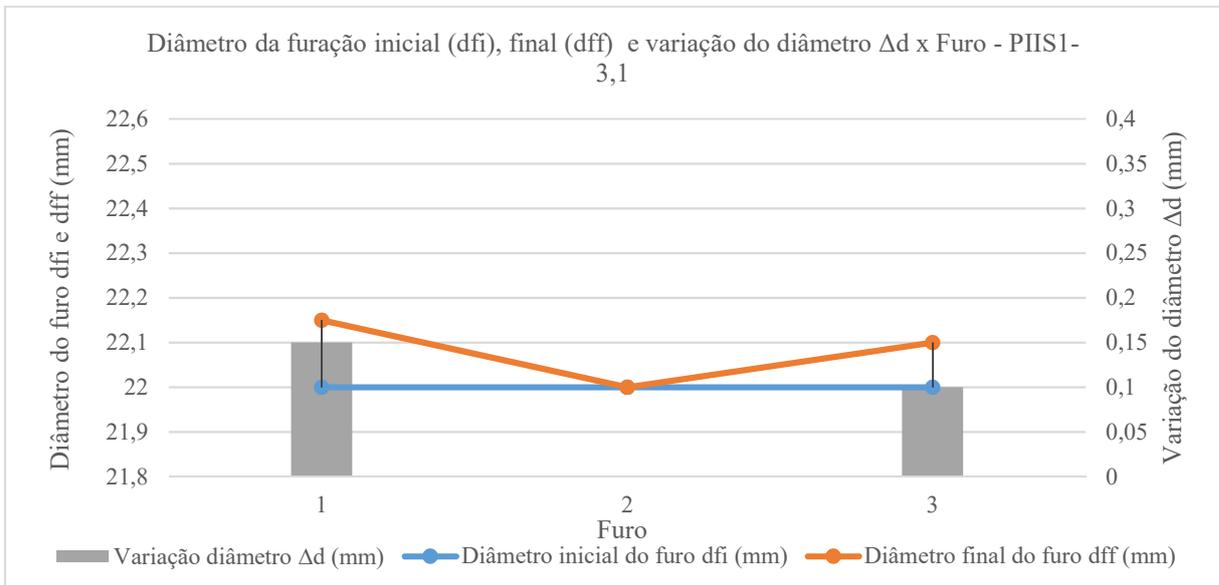


Figura 40 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIIS1-3,1%.

Na figura 41 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIIS1 para uma folga ( $w$ ) de 3,1% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

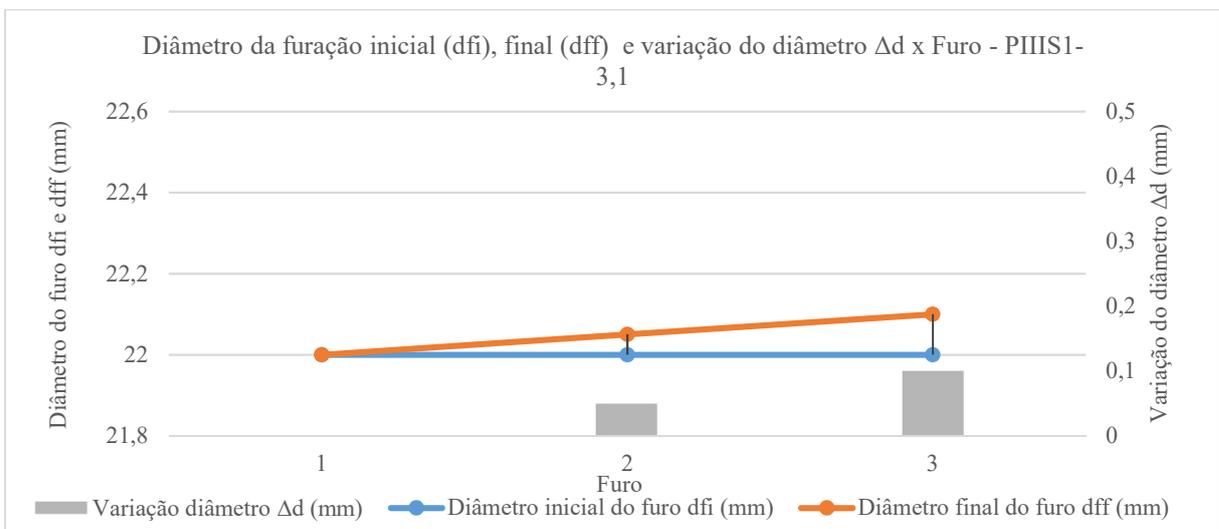


Figura 41 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIIS1-3,1%.

#### 4.1.2 Aço AISI D2

Na figura 42 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PID2 para uma folga ( $w$ ) de 3,1% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

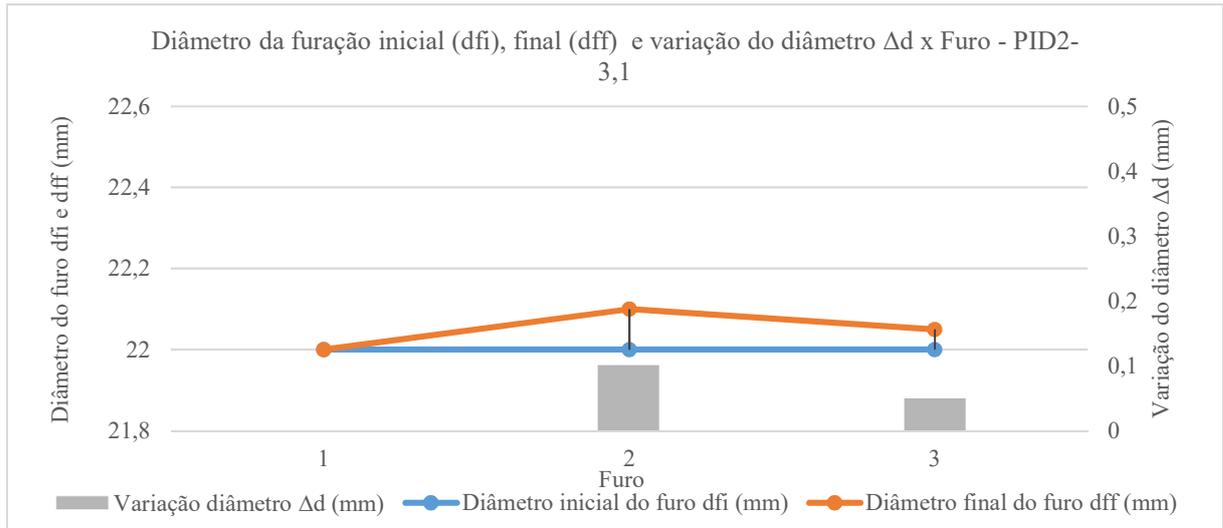


Figura 42 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PID2-3,1%.

Na figura 43 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIID2 para uma folga ( $w$ ) de 3,1% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

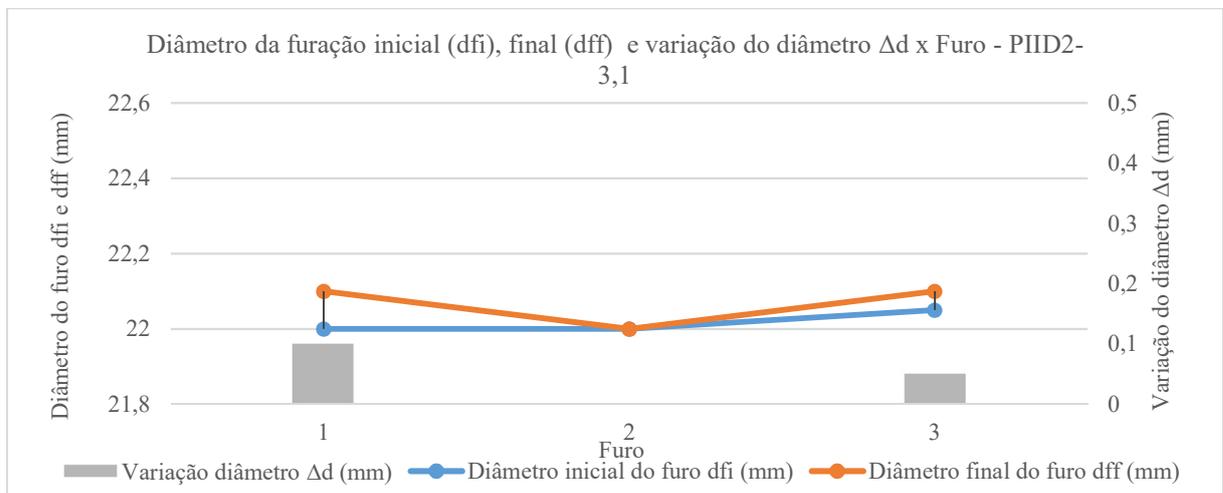


Figura 433 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIID2-3,1%.

Na figura 44 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIIID2 para uma folga ( $w$ ) de 3,1% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

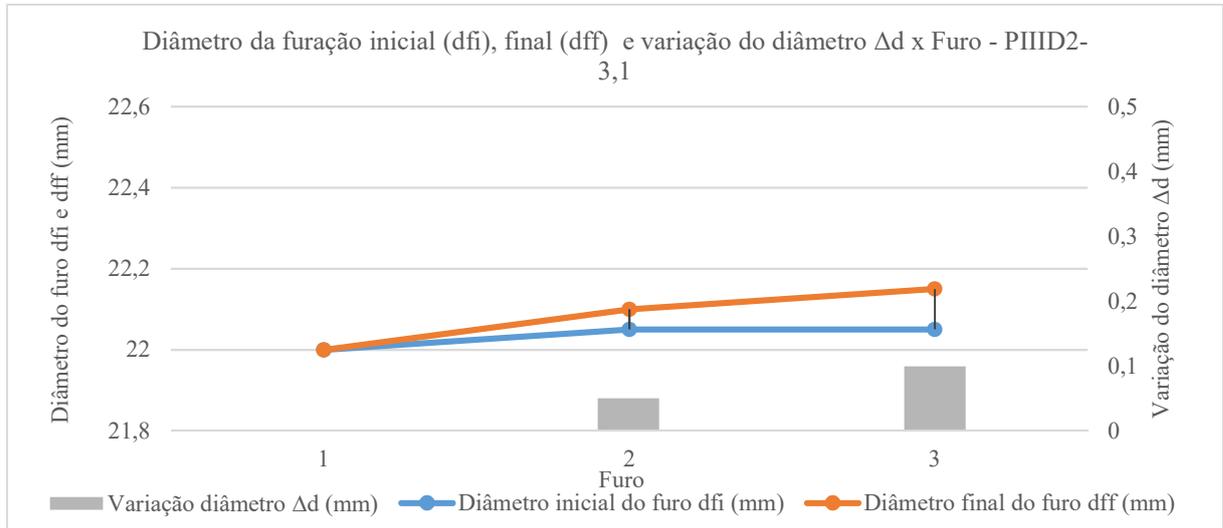


Figura 44 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIIID2-3,1%.

Na figura 45 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PCD2 para uma folga ( $w$ ) de 3,1% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

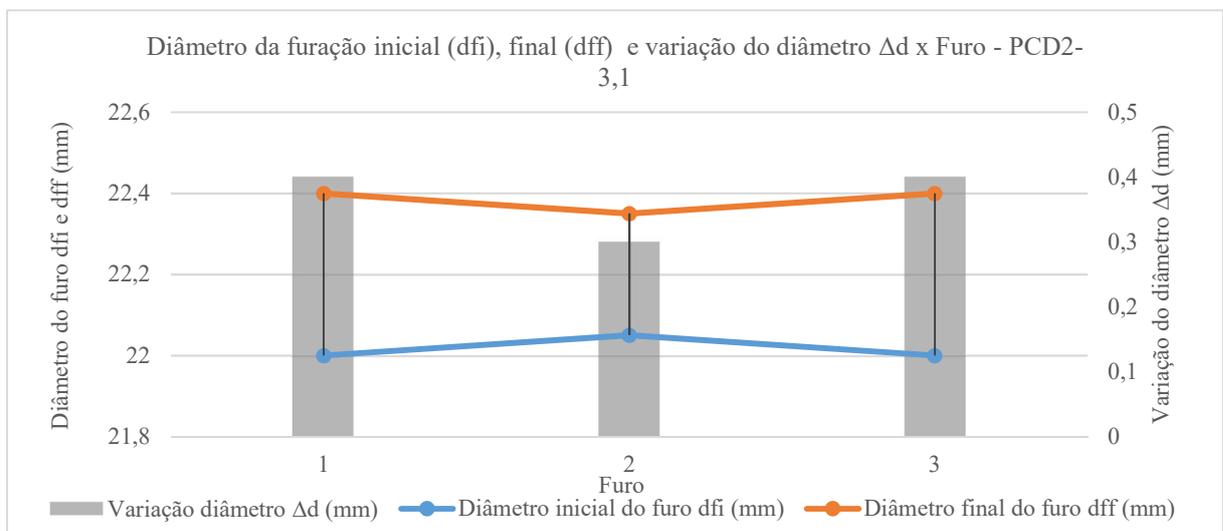


Figura 45 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PCD2-3,1%.

A tabela 13 mostra os dados obtidos nos três furos realizados, a média e a variação percentual com relação ao diâmetro de 22 mm para um folga (w) de 3,1%.

Tabela 13 Dados obtidos para folga (w) de 3,1%

Folga (w) 3,1%	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Média	Desvio Padrão	Variação percentual para 22 mm
PIS1	22,00	22,05	22,05	22,03	0,03	0,15%
PID2	22,00	22,10	22,05	22,05	0,05	0,23%
PIIS1	22,15	22,00	22,10	22,08	0,08	0,38%
PIID2	22,10	22,00	22,10	22,07	0,06	0,30%
PIIS1	22,00	22,05	22,10	22,05	0,05	0,23%
PIID2	22,00	22,10	22,15	22,08	0,08	0,38%
PCD2	22,40	22,35	22,40	22,38	0,03	1,74%

#### 4.2 Variação de Diâmetro ( $\Delta d$ ) - Folga de 7,8%

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios feitos com os punções I, II e III fabricados em aço AISI S1 e AISI D2 e o punção convencional fabricado em aço AISI D2, utilizando uma folga entre punção de corte e matriz (w) de 1 mm correspondente a 7,8% da espessura (s) da chapa de aço ASTM-A36.

##### 4.2.1 Aço AISI S1

Na figura 46 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIS1 para uma folga (w) de 7,8% da espessura (s) da chapa puncionada.

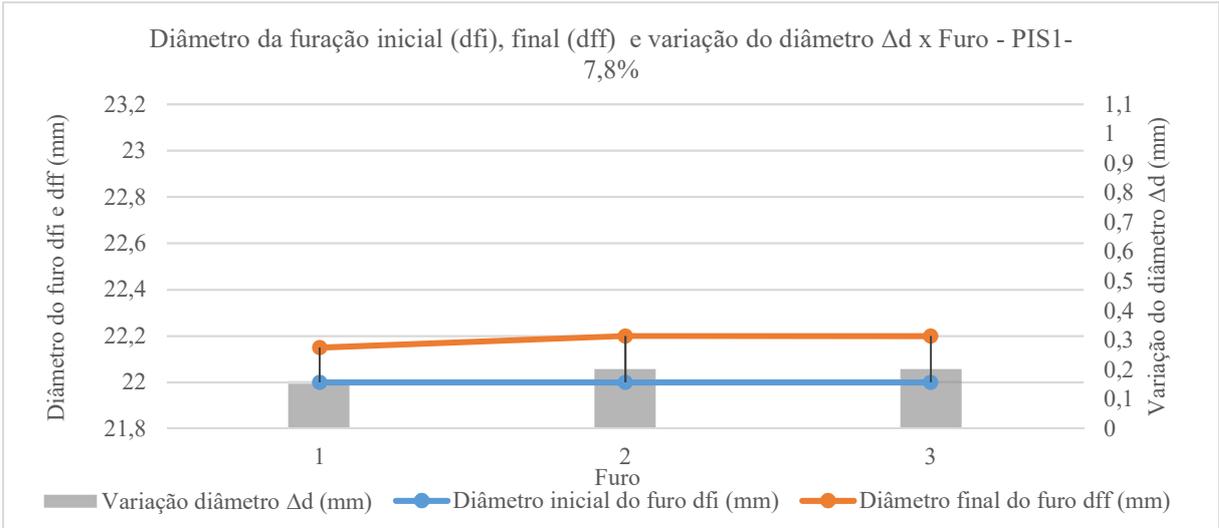


Figura 46 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIS1-7,8%.

Na figura 47 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIIS1 para uma folga ( $w$ ) de 7,8% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

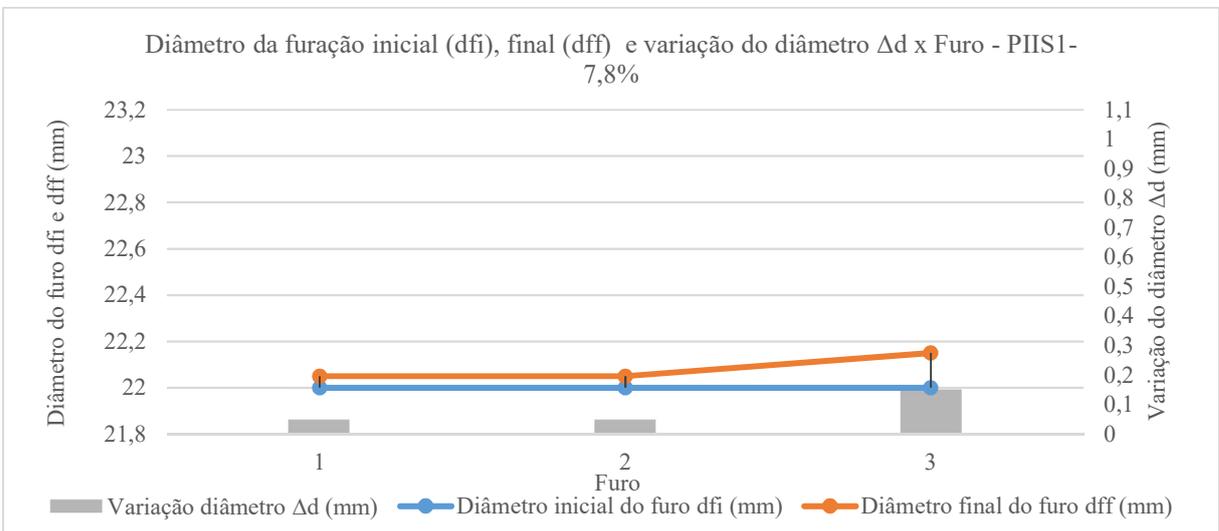


Figura 47 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIIS1-7,8%.

Na figura 48 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIIS1 para uma folga ( $w$ ) de 7,8% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

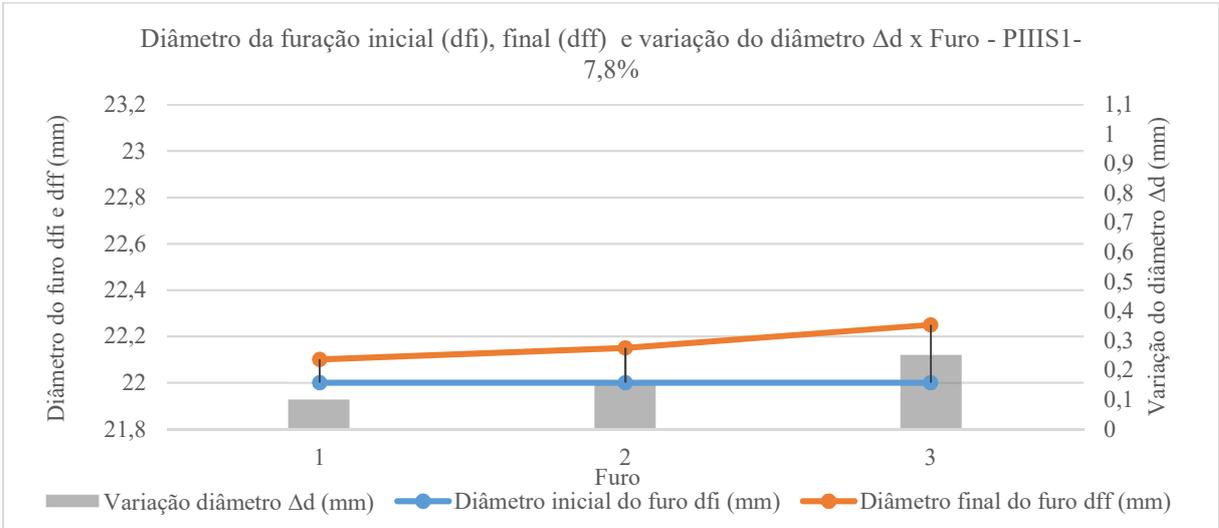


Figura 48 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIIS1-7,8%.

#### 4.2.2 Aço AISI D2

Na figura 49 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo (dfi), diâmetro final do furo (dff) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PID2 para uma folga (w) de 7,8% da espessura (s) da chapa puncionada.

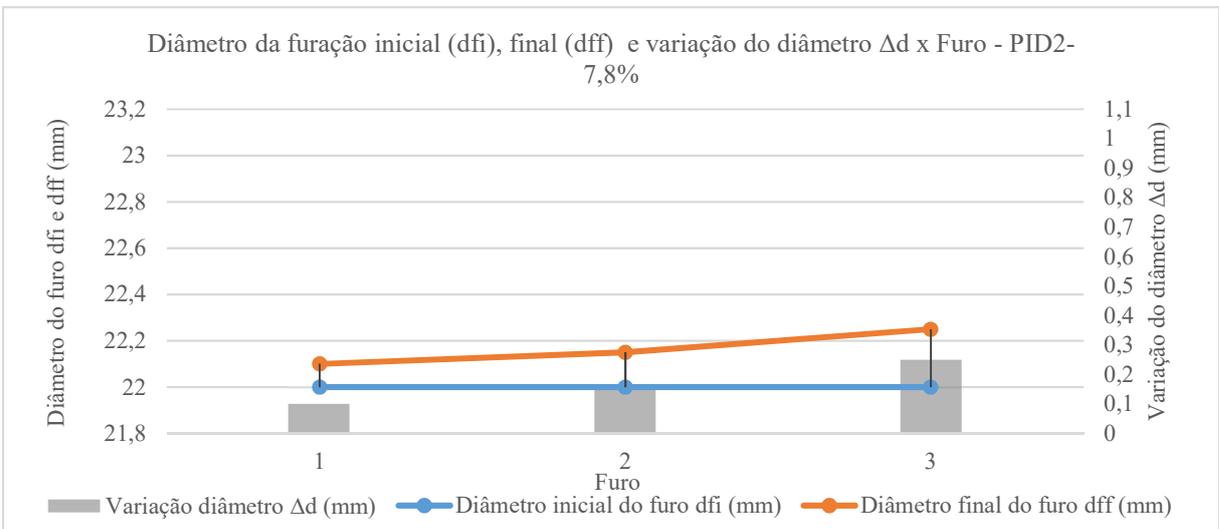


Figura 49 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PID2-7,8%.

Na figura 50 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIID2 para uma folga ( $w$ ) de 7,8% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

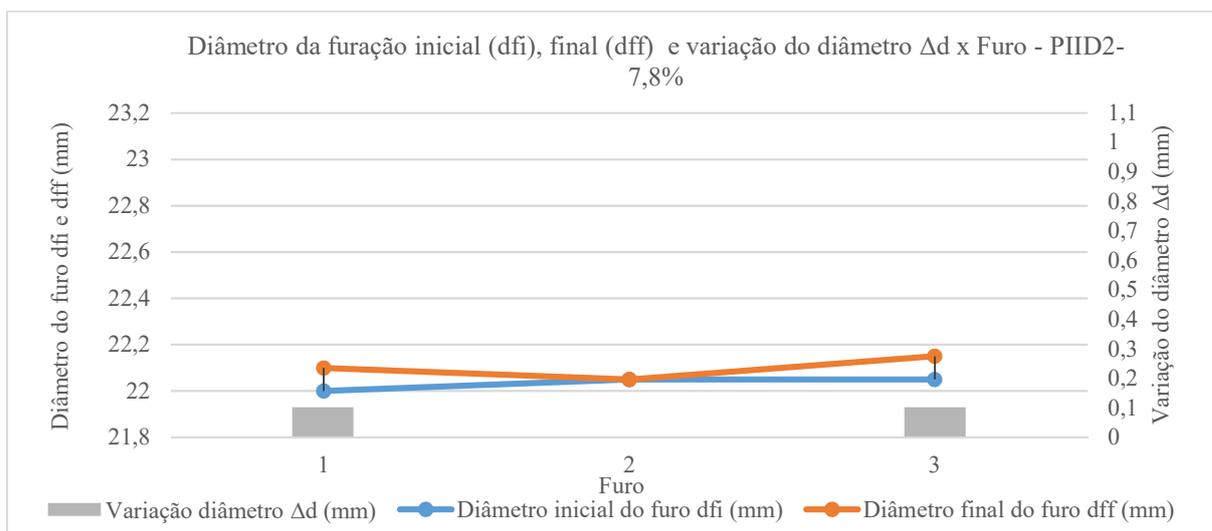


Figura 50 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIID2-7,8%.

Na figura 51 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIID2 para uma folga ( $w$ ) de 7,8% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

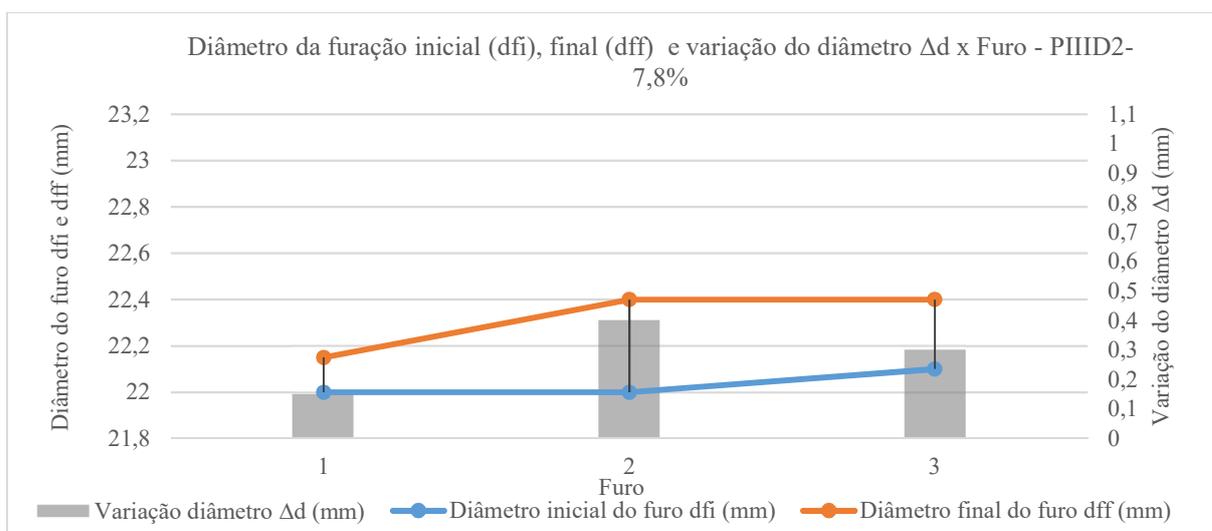


Figura 51 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIID2-7,8%.

Na figura 52 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PCD2 para uma folga ( $w$ ) de 7,8% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

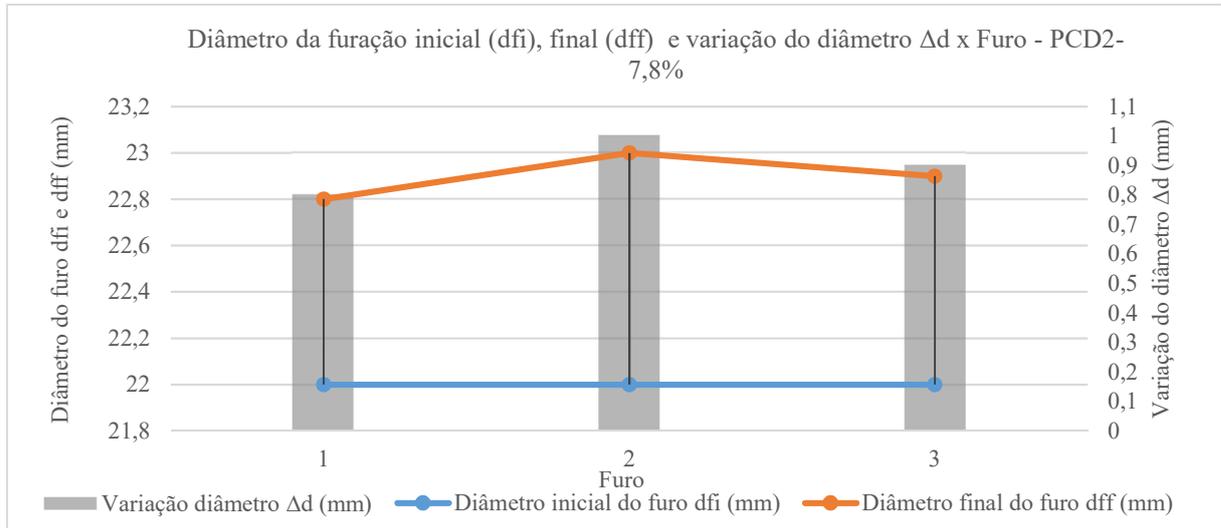


Figura 52 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIIID2-7,8%.

A tabela 14 mostra os dados obtidos nos três furos realizados, a média e a variação percentual com relação ao diâmetro de 22 mm para um folga ( $w$ ) de 7,8%.

Tabela 14 Dados obtidos para folga ( $w$ ) de 7,8%

Folga ( $w$ ) 7,8%	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Média	Desvio Padrão	Variação percentual para 22mm
PIS1	22,15	22,20	22,20	22,18	0,03	0,83%
PID2	22,20	22,35	22,20	22,25	0,09	1,14%
PIIS1	22,05	22,05	22,15	22,08	0,06	0,38%
PIID2	22,10	22,05	22,15	22,10	0,05	0,45%
PIIS1	22,10	22,15	22,25	22,17	0,08	0,76%
PIID2	22,15	22,40	22,40	22,32	0,14	1,44%
PCD2	22,80	23,00	22,90	22,90	0,10	4,09%

#### 4.3 Variação de Diâmetro ( $\Delta d$ ) - Folga de 15,7%

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios feitos com os punções I, II e III fabricados em aço AISI S1 e AISI D2 e o punção convencional fabricado em aço AISI D2, utilizando uma folga entre punção de corte e matriz ( $w$ ) de 2 mm correspondente a 15,7% da espessura ( $s$ ) da chapa de aço ASTM-A36.

##### 4.3.1 Aço AISI S1

Na figura 53 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIS1 para uma folga ( $w$ ) de 15,7% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

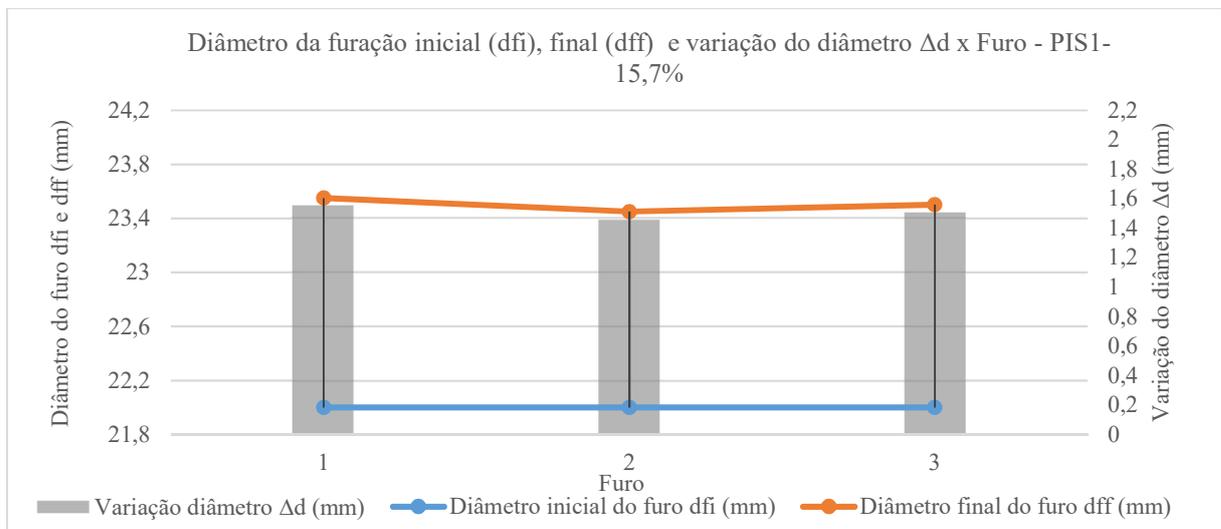


Figura 53 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIS1-15,7%.

Na figura 54 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIIS1 para uma folga ( $w$ ) de 15,7% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

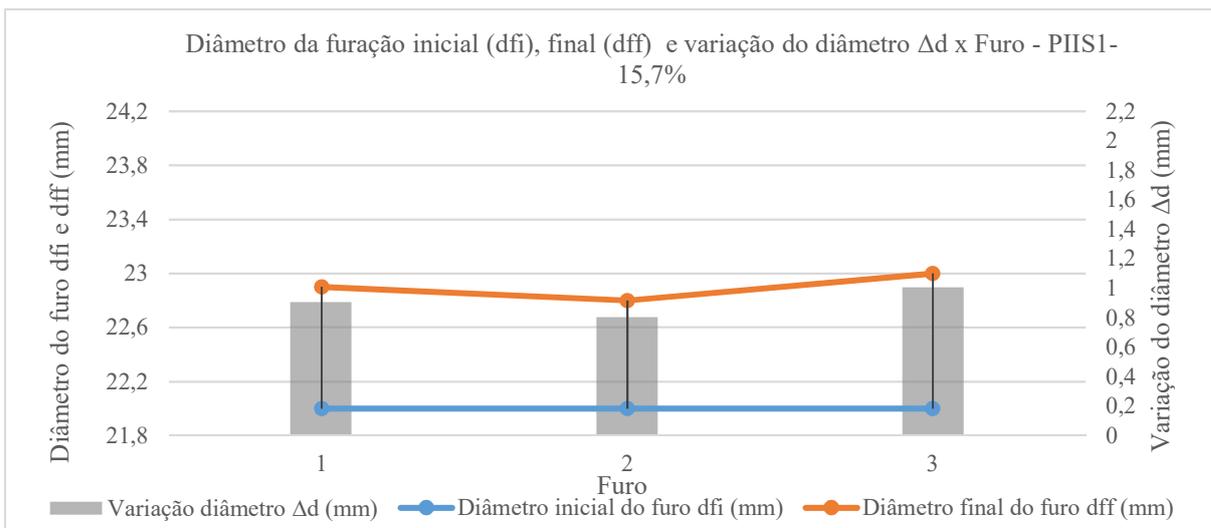


Figura 54 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIIS1-15,7%

Na figura 55 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIIS1 para uma folga ( $w$ ) de 15,7% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

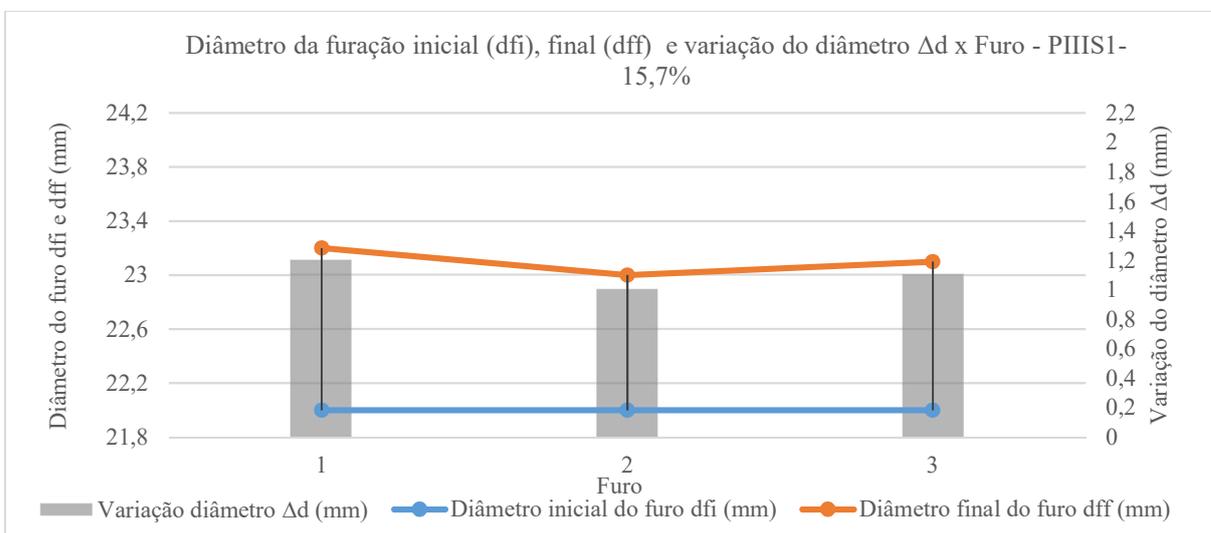


Figura 55 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIIS1-15,7%.

### 4.3.2 Aço AISI D2

Na figura 56 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PID2 para uma folga ( $w$ ) de 15,7% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

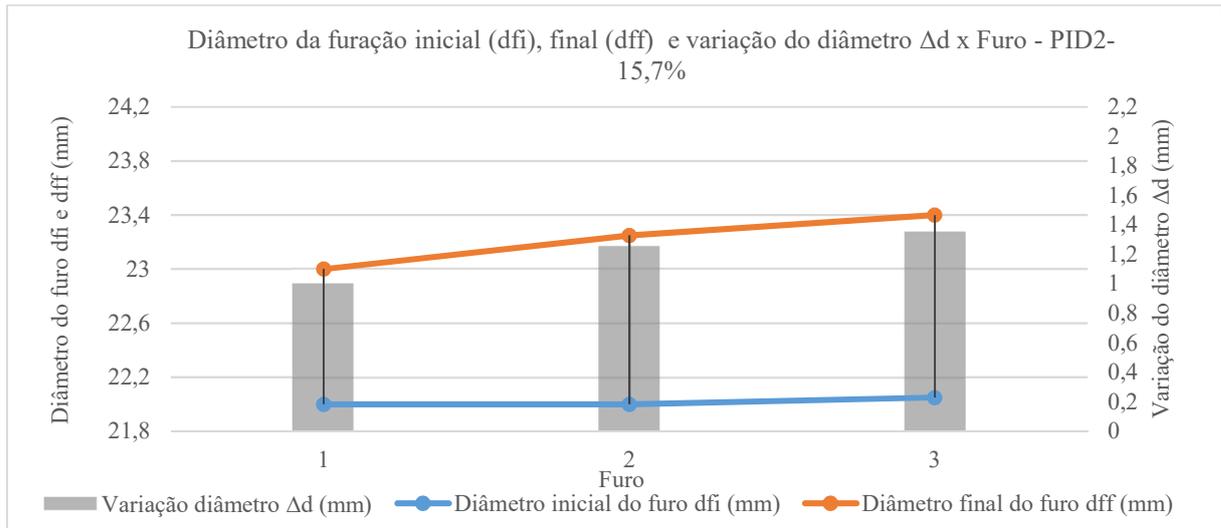


Figura 56 - Diâmetro da furação inicial ( $df_i$ ), final ( $df_f$ ) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PID2-15,7%.

Na figura 57 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ), diâmetro final do furo ( $df_f$ ) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIID2 para uma folga ( $w$ ) de 15,7% da espessura ( $s$ ) da chapa puncionada.

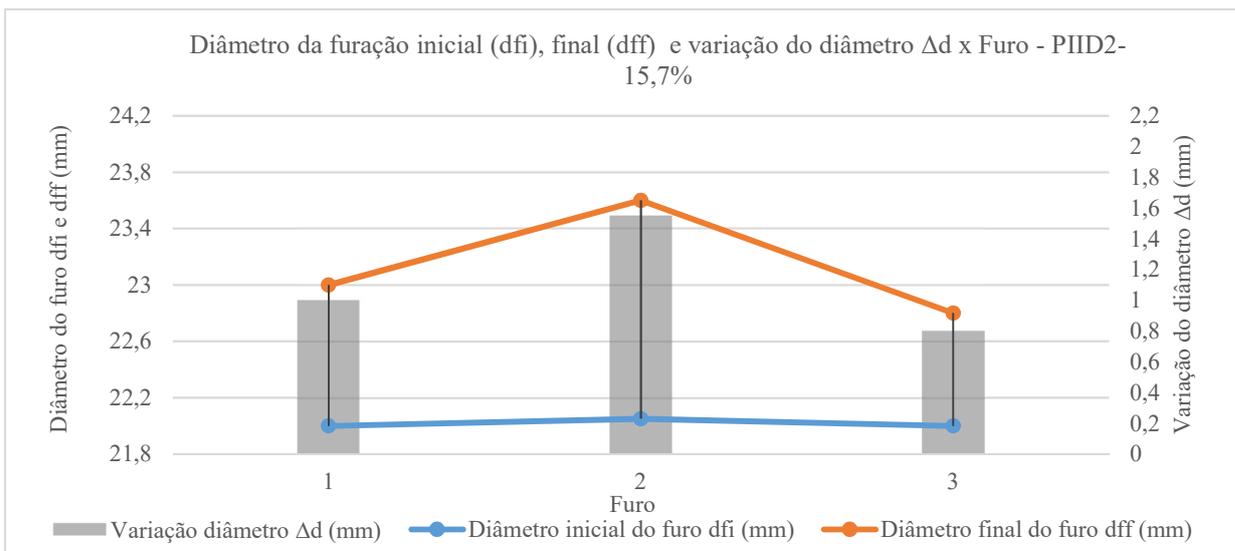


Figura 57 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIID2-15,7%.

Na figura 58 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo (dfi), diâmetro final do furo (dff) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PIID2 para uma folga (w) de 15,7% da espessura (s) da chapa puncionada.

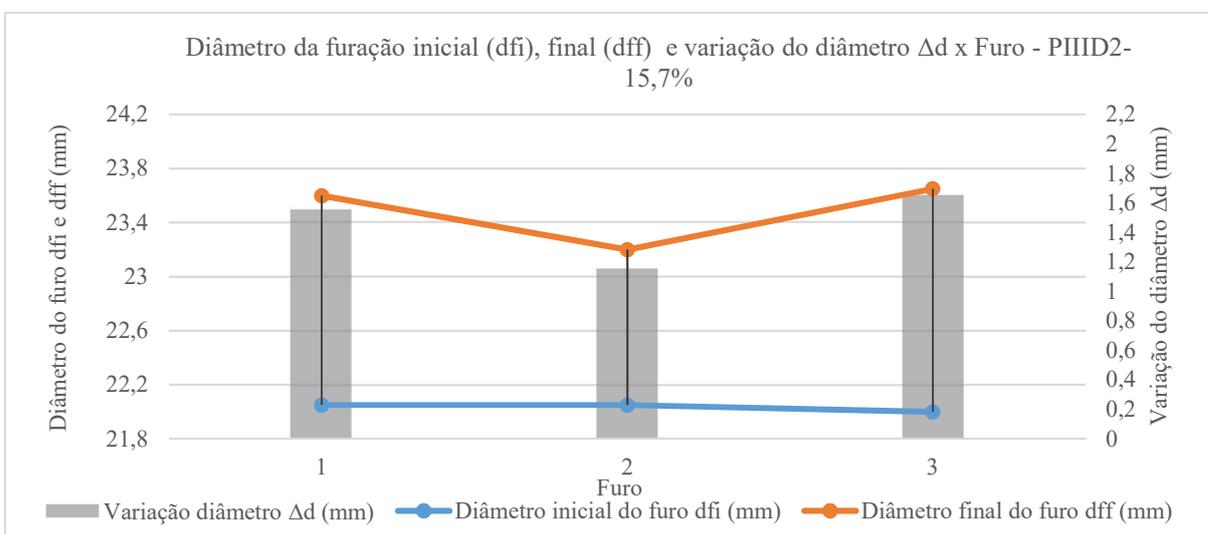


Figura 58 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIID2-15,7%.

Na figura 59 é apresentado o gráfico com os valores do diâmetro inicial do furo (dfi), diâmetro final do furo (dff) e variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) em cada um dos furos realizados com o punção PCD2 para uma folga (w) de 15,7% da espessura (s) da chapa puncionada.

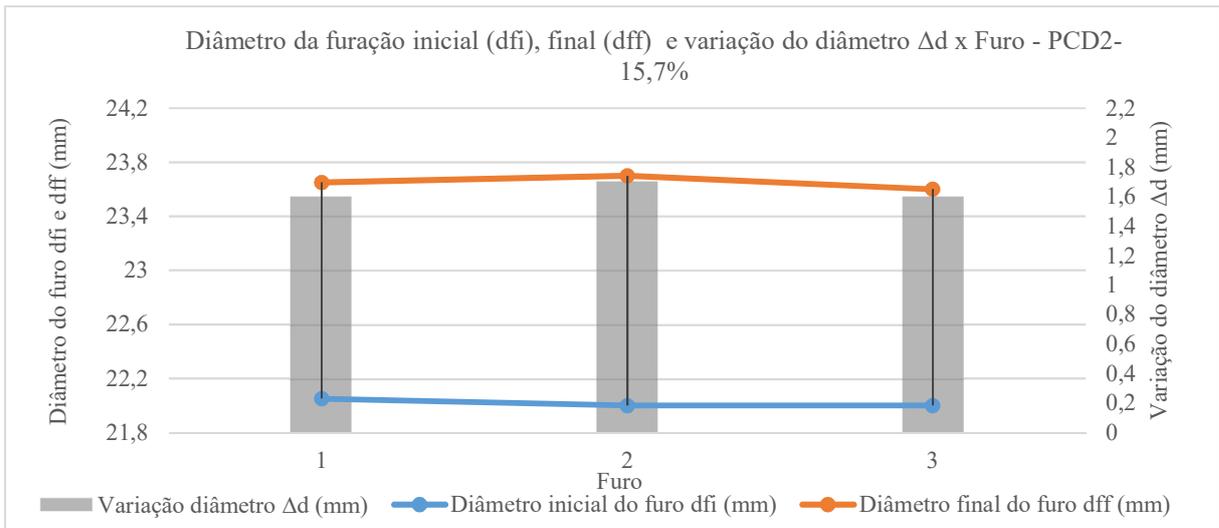


Figura 59 - Diâmetro da furação inicial (dfi), final (dff) e variação do diâmetro  $\Delta d$  x Furo - PIID2-15,7%.

A tabela 15 mostra os dados obtidos nos três furos realizados, a média e a variação percentual com relação ao diâmetro de 22 mm para um folga (w) de 15,7%.

Tabela 15 Dados obtidos para folga (w) de 15,7%

Folga (w) 15,7%	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Média	Desvio Padrão	Variação percentual para 22mm
PIS1	23,55	23,45	23,50	23,50	0,05	6,82%
PID2	23,00	23,25	23,40	23,22	0,20	5,53%
PIIS1	22,90	22,80	23,00	22,90	0,10	4,09%
PIID2	23,00	23,60	22,80	23,13	0,42	5,15%
PIIS1	23,20	23,00	23,10	23,10	0,10	5,00%
PIID2	23,60	23,20	23,65	23,48	0,25	6,74%
PCD2	23,65	23,70	23,60	23,65	0,05	7,50%

A figura 60 mostra graficamente os maiores valores de variação do diâmetro máximo ( $\Delta d_m$ ) percentual de cada um dos punções ensaiados para as três variações de folga entre punção e matriz (w). Os valores de  $\Delta d$  foram obtidos através da equação 5:

$$\Delta d = \frac{df_f - df_i}{df_i} * 100 \quad \text{Eq.(5)}$$

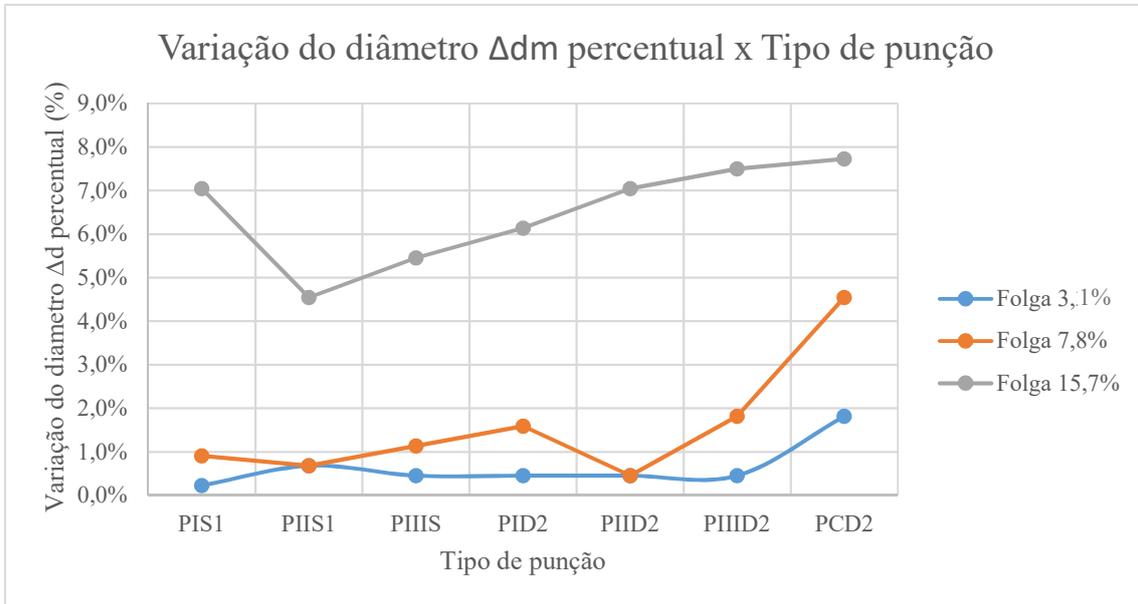


Figura 60 - Variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) máxima x tipo de punção

#### 4.4 Aspectos da Região Puncionada

A seguir nas figuras 61, 62, 63 e 64 são mostradas imagens das regiões puncionadas os três tipos de folga 3,1% 7,8% e 15,8%, demonstrando as regiões de cisalhamento ( $Z_c$ ) e zona de ruptura abrupta ( $Z_r$ ).

##### Punção I

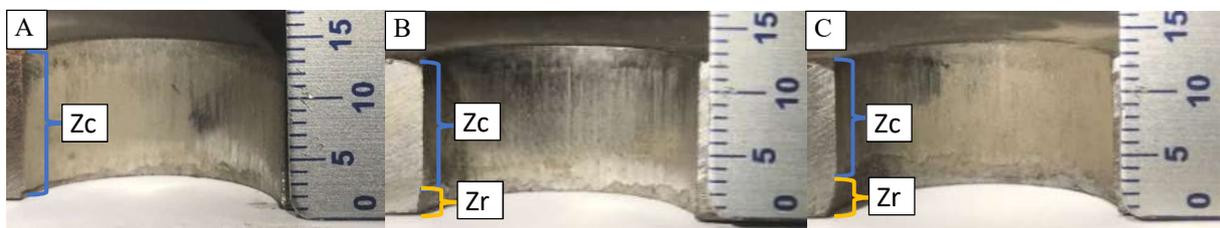


Figura 61 Zona cisalhada ( $Z_c$ ) e Zona de ruptura abrupta ( $Z_r$ ), A) Folga ( $w$ ) 3,1%; B) Folga ( $w$ ) 7,8%; C) Folga ( $w$ ) 15,7%

### Punção II



Figura 62 - Zona cisalhada (Zc) e Zona de ruptura abrupta (Zr), A) Folga (w) 3,1%; B) Folga (w) 7,8%; C) Folga (w) 15,7%

### Punção III



Figura 63 Zona cisalhada (Zc) e Zona de ruptura abrupta (Zr), A) Folga (w) 3,1%; B) Folga (w) 7,8%; C) Folga (w) 15,7%

### Punção convencional (PCD)



Figura 64 - Zona cisalhada (Zc) e Zona de ruptura Abrupta (Zr) A) Folga (w) 3,1%; B) Folga (w) 7,8%; C) Folga (w) 15,7%

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A variação do diâmetro ( $\Delta d$ ) para a folga ( $w$ ) de 3,1% apresentou variações percentuais entre a medição do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ) e diâmetro final do furo ( $df_f$ ) de 0,2% até 1,8%. Para a folga ( $w$ ) de 7,8% a variação percentual entre o diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ) e diâmetro final do furo ( $df_f$ ) foi de 0,5% até 4,5%. Já para a folga de ( $w$ ) 15,7% a variação do diâmetro inicial do furo ( $df_i$ ) e diâmetro final do furo ( $df_f$ ) foi de 4,5% até 7,7%.

Ao verificar o trabalho de Marcondes (2008) que ao puncionar chapas de 6 mm obteve variações de 0,12 mm em punções com brochamento sem ângulo, apenas os punções PIS1-3,1%, PIIS1-3,1%, PID2-3,1%, PIID2-3,1%, PIID2-3,1% e PIID2-7,8% obtiveram valores abaixo do valor de 0,12 mm.

Analisando a figura 60, em todos os três casos de folgas propostas os punções convencionais PCD tiveram resultados inferiores aos demais punções como pode ser visto na tabela 13, 14 e 15. Para a folga de 3,1% o punção convencional PCD apresentou variação máxima de 1,8% enquanto o máximo encontrado nos demais punções foi de 0,7% no punção PIIS1. Esse melhor desempenho dos punções proposto pode portanto, ser vinculado a utilização do processo de brochamento.

Ao analisar a variação máxima de diâmetro para a folga de 7,8% o punção convencional PCD apresentou variação máxima de 4,5% frente a 1,6% do punção PID2, que foi a maior encontrada dos punções propostos fabricados com brochamento.

Já para a maior folga de 15,7% o punção convencional PCD também obteve o pior resultado, apresentando uma variação máxima de diâmetro de 7,8% contra um máximo de 7,0% obtido no punção PIS1.

Os furos puncionados com as ferramentas de puncionamento e brochamento apresentaram um aspecto da região puncionada diferente dos furos convencionais. Os furos puncionados pelos punções com brochamento apresentam uma pequena área de zona de ruptura abrupta ( $Z_r$ ) mesmo na maior folga de 15,7%, diferentemente do que se observa nos furos puncionados com punção convencional, este já apresenta zonas de ruptura abrupta ( $Z_r$ ) maiores que a zona de cisalhamento ( $Z_c$ ) em folgas de 15,7%.

Ao analisar a figura 61, 62, 63 e 64 observa-se que o punção que apresentou o melhor aspecto da região puncionada foi o punção PII apresentando um aparência quase total de região

cisalhada. Todos os punções apresentaram somente região cisalhada para a folga de 3,1%, não demonstrando indícios da falha abrupta durante o processo.

Ao comparar os valores obtidos entre os punções fabricados em aço AISI D2 e AISI S1 através das tabelas 13, 14 e 15 observa-se que para a folga ( $w$ ) de 3,1% o punção com melhor desempenho foi o fabricado em aço AISI S1, para o punção PII o punção fabricado em aço AISI D2, e para o punção PIII o punção fabricado em aço AISI S1. Já para a folga de 7,8% os punções fabricados em AISI S1 obtiveram melhores resultados frente aos fabricado em AISI D2. Por fim a folga de 15,7% apresentou melhor resultados para o punção PI fabricado em AISI D2, para o punção PII fabricado em AISI S1 e para o punção PIII fabricado em AISI S1.

Devido a quantidade pequena de furos realizados, não se pode afirmar com certeza qual dos aços é melhor para fabricação dos punções com brochamento para situações em geral, uma melhor análise com uma maior quantidade de furos se faz necessária para tal conclusão.

## 6 CONCLUSÕES

Após todos testes e avaliações realizados no trabalho, pode-se concluir que o principal objetivo de reduzir a conicidade de furos puncionados através da sugestão de novas geometrias de punções foi alcançado.

O processo de puncionamento utilizado com ferramenta adaptada para o brochamento apresenta boa aplicabilidade para a indústria no setor metal mecânico. As ferramentas são de fácil fabricação não apresentando tantas variações geométricas com relação as convencionais.

Os punções com brochamento apresentaram valores de diâmetro final (dff) bem inferiores ao processo convencional devido a região de brochamento inserida na ferramenta. Para a folga de 3,1%, o pior dos punções propostos por exemplo teve um desempenho 4,5x melhor que o punção convencional. Conclui-se que qualquer uma das geometrias sugeridas confere um melhor resultado dimensional e uma menor conicidade dos furos puncionados que furos feitos com o punção PCD.

De todos as ferramentas utilizadas no estudo o punção PI foi o que apresentou o melhor resultado e o punção PCD o pior. Conclui-se, portanto, que para um processo onde se pretende um melhor acabamento visual do furo e um maior controle de tolerância o punção PI seria indicado.

Os três punções propostos apresentaram melhores aspectos da região cortada que os furos feitos com punções convencionais PCD2. Os punções PI, PII e PIII apresentaram a região de cisalhamento ( $Z_c$ ) maior que o punção PCD, conferindo melhor controle dimensional para o furo.

Durante a furação do punção PCD2 para a folga de 3,1% observa-se na figura 64 uma região ao centro onde ocorreu uma falha podendo ser adesão de material, provavelmente devido à pouca folga existente para o escoamento correto do material durante o processo.

Por fim, pode-se concluir que a geometria do punção interfere diretamente nos parâmetros como acabamento do furo e diâmetro final do furo.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Medição da força de corte em ferramentas de puncionamento com brochamento através da utilização de extensômetros de resistência elétrica. A identificação do punção com menor força de corte, possibilitaria a mensuração da potência do equipamento e consumo de energia elétrica.

Aplicação de simulação numérica em ferramentas puncionamento com brochamento para chapas grossas com espessura de 12,7 mm, a fim de comparar com os resultados obtido neste trabalho.

Realizar análise da vida útil de um punção com brochamento de diferentes tipos de material, a fim de identificar qual material tem maior resistência neste tipo de ferramenta.

Identificar e quantificar os principais desgastes visualizados neste tipo de ferramenta, com objetivo de propor soluções para os problemas e aumentar a vida útil.

Aplicar revestimentos duros como nitretação para análise da aplicabilidade e da vida da ferramenta de puncionamento e brochamento comparada com processo de puncionamento convencional.

## 8 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ASM INTERNATIONAL, METALS HANDBOOK. **Forming And Forging**. Asm International Handbook, vol. 14, 1993.

ASM INTERNATIONAL, METALS HANDBOOK. **Machining**. Asm International Handbook, vol. 16, 1989

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800/86 – Projeto E Execução De Estruturas De Aço De Edifícios**. Rio de Janeiro, RJ, 1986.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Specification for Carbon Structural Steel<sup>1</sup>. Astm International, Vol 14, 2015.

BOFF, U. et al. **Uma Revisão Dos Processos De Corte Convencional E *Fineblanking***. Corte e Conformação, n. 84, p. 23 – 33, 2012.

BOFF, U.; SCHAEFFER, L. **Fundamentos Do Projeto De Ferramentas Para O Processo De Corte**. Corte e Conformação, n. 78, p. 39 - 44, 2011.

BRALLA, J. D. **Handbook Of Manufacturing Processes: How Products, Components and Material Are Made**. 1ª Edição. Ed: Industrial Press, New York, Estados Unidos da América, 2006.

BREITLING, J. et al. **Process Control In Blanking**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 71, p. 187 – 192, 1997.

ETO, A. M. **Otimização Da Precisão Em Furos Estampados Por Ferramenta Combinada De Puncionamento E Brochamento**. Dissertação de Mestrado – UTFPR, 2005.

FANG, G.; ZENG, P.; LOU, L. **Finite Element Simulation Of The Effect Of Clearance On The Forming Quality In The Blanking Process**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 122, p. 249-254, 2002.

FAURA, F.; GARCÍA, A.; ESTREMS, M. **Finite Element Analysis Of Optimum Clearance In The Blanking Process**. Journal Of Materials Processing Technology, vol. 80, p. 121-125, 1998.

GHIOTTI, A.; BRUSCHI, S.; REGAZZO, P. **Shear Surface Control In Blanking By Adaptronic Systems**. Procedia Engineering, vol. 81, p. 2512-2517, 2014.

- GONVALCES, D. A. (2010). **Modelagem e simulação das forças no brochamento**. Dissertação de Mestrado – UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.
- HILDITCH, T. B.; HODGSON, P. D. **Development Of The Sheared Edge In The Trimming Of Steel And Light Metal Sheet Part 1 – Experimental Observations**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 169, p. 184-191, 2005.
- LANGE, K. **Handbook Of Metal Forming, Piercing And Blanking**. Ed. McGraw-Hill, Nova York, 1985.
- LANGE, K. **Umformtechnik. Band3: Blechbearbeitung**. Berlim, Colônia: Springer Verlag, 1990.
- LAJARIN, S. F. et al. **A Novel Punch Design Approach With Progressive Clearance Variation For The Punching-Broaching Process**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 225, p. 1 – 9, 2011.
- LIEBIG, H. P. **Fertigungstechnik: Umformen**. Universidade Técnica de Hamburg-Harburg 1987 (Apostila) 1993.
- LIMA, C. C.; MIRANDA, G. W. A., (2007). **Brochamento interno de braço de articulação em aço ABNT 1045 Forjado**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4, 2007, Estancia de São Pedro, Anais, São Paulo, ABCM.
- LUO, S. Y. **Effect Of The Geometry And The Surface Treatment Of Punching Tools On The Tool Life And Wear Conditions In The Piercing Of Thick Steel Plate**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 88, p. 122 – 133, 1999.
- MARCONDES, P. V. P. et al. **A Smart Stamping Tool For Punching and Broaching Combination**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 206, p. 184 - 193, 2008.
- MARCONDES, P. V. P. **Manufatura De Chapas Metálicas – Puncionamento**. Ferramental, n. 22, p. 25 - 28, 2009.
- MELLO, L. B.; MARCONDES, P. V. P. **Punching And Broaching Combos – a Newstamping Tool**. Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 28, n. 1 , p. 94 – 98, 2006.

NETO, R. C. B. **Estudo Da Simulação Computacional De Processo Combinado De Puncionamento e Brochamento Com Diferentes Geometrias de Punção.** Dissertação de Mestrado – UTFPR, 2012.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas.** Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre, 2004.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre, 2009.

SCHEID, A. **Aços- Fabricação, Transformação e Usos – Curso básico de Aços.** Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SHAIK, R. S.; QUAZI, T. Z. **An Overview Of Clearence Optimization In Sheet Metal Blanking Process.** International Journal of Engineering Research, vol. 2, p. 4547 - 4558, 2012.

SINGH U. P.; STREPPPEL, A. H.; KALS, H. J. J. **Design Study Of The Geometry Of A Punching/Blanking Tool.** Journal of Materials Processing Techonology, vol. 33, p 331 – 345, 1992.

STEMMER C. E (1995). **Ferramentas de corte II:** Brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos. 2ed. Florianópolis, SC. UFSC.

TEKINER, Z.; NALBANT, M.; GÜRÜN, H. **An Experimental Study For The Effect Of Different Clearances On Burr, Smooth-Sheared And Blanking Force On Aluminium Sheet Metal.** Materials and Design, vol. 27, p. 1134 - 1138, 2006.

TOTRE, A.; NISHAD, R.; BODKE, S. **An Overview Of Factor Affecting In Blanking Processes.** International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 3, p. 392 - 395, 2013.