

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROSALVO DA CUNHA BARRETO NETO

ESTUDO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE PROCESSO  
COMBINADO DE PUNÇONAMENTO E BROCHAMENTO COM  
DIFERENTES GEOMETRIAS DE PUNÇÃO

CURITIBA

2012

ROSALVO DA CUNHA BARRETO NETO

ESTUDO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE PROCESSO  
COMBINADO DE PUNÇIONAMENTO E BROCHAMENTO COM  
DIFERENTES GEOMETRIAS DE PUNÇÃO

Dissertação apresentada como requisito para obter o título de Mestre em Engenharia Mecânica do curso de mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná na área de concentração Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

CURITIBA

2012

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**ROSALVO DA CUNHA BARRETO NETO**

**ESTUDO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE PROCESSO  
COMBINADO DE PUNÇIONAMENTO E BROCHAMENTO COM  
DIFERENTES GEOMETRIAS DE PUNÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração Manufatura no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Fred Amorim  
PUCPR

Prof. Dr. Milton Luiz Polli  
UTFPR

Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes  
UFPR/ PG-MEC  
Presidente

Curitiba, 21 de Março de 2012

## **AGRADECIMENTOS**

À:

Ana Paula, pelos momentos que não pudemos ficar juntos.

Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes pela oportunidade e pela orientação deste trabalho.

Manolo Gipiela, pelo companheirismo no laboratório e imensa ajuda no decorrer deste trabalho.

Fernando Lajarin, pela imensa ajuda com relação à parte de simulação.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Durante o processo de conformação mecânica de chapa pelo processo de puncionamento, ocorre uma série de fatores que influenciam a geometria final do furo puncionado. As propriedades do material empregado e seu comportamento face às deformações impostas, bem como os parâmetros de processo também influenciam o resultado final. A aplicação do puncionamento de chapas grossas (acima de 6mm de espessura) encontra grande aplicação na indústria de veículos pesados, como caminhões e tratores. O presente trabalho tem por objetivo melhorar a precisão em furos estampados através da utilização de uma ferramenta combinada, de puncionamento e brochamento através de simulação por elementos finitos. Esta ferramenta possibilitaria a realização de um puncionamento seguido de um brochamento em uma só operação, aliando as vantagens dos processos de fabricação de conformação e usinagem em um só processo combinado para chapas grossas. A simulação numérica pode contribuir de maneira significativa para o projeto dessa ferramenta. O material da chapa a ser utilizada foi o LNE 38 com espessura de 8mm. Para isto foi desenvolvido um modelamento no software ABAQUS/EXPLICIT, versão 6.9. A simulação computacional do processo de puncionamento mostrou-se eficiente para ajudar na melhoria da geometria da ferramenta e otimização de parâmetros do processo e também mostrou como a geometria dos punções pode afetar a qualidade do furo e as forças empregadas durante o processo. Um punção distinto oriundo do resultado das características benéficas desses punções estudados foi adicionalmente proposto. A configuração paramétrica deste punção inovador facilita a definição das dimensões da ferramenta com base na espessura da chapa e permite o puncionamento de furos com menor força empregada e excelente cilindricidade.

Palavras-chave: Simulação. Conformação. Chapas Grossas. Puncionamento.

## **ABSTRACT**

The reduction of production times stimulates the improvement of current manufacturing techniques, through the development of new processes which reduce each part production time and enhance the available resources and equipments. In the punching of sheet metal process, different factors affect the punched geometry of the hole. The metallurgical and mechanical properties of the blank under the imposed deformation also affect the final results. The punching process of thick blanks has been considered as a promising solution by heavy industries such as manufacturers of trucks and tractors. The aim of this work is to improve the accuracy of stamped holes through the application of a tool which combines punching and broaching through Finite Elements Analysis (FEA). The aforementioned tool combines the advantages of both forming and machining processes of thick sheet metal in only one process. The Finite Element Analysis can contribute somewhat to develop this tool planning. To accomplish this, a model was developed in the ABAQUS/EXPLICIT 6.9, and this simulation proved successful to improve the geometry and process parameters. Thus, a new type of punch was proposed and the configuration of the new type of punch allows for punching holes with excellent cylindricity.

Keywords: Simulation. Forming. Thick metal sheet. Punching.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sequência para o presente trabalho.....	17
Figura 2: Etapas do puncionamento: a) impacto, b) penetração, c) e d) ruptura, e) estouro, f) retirada do punção - adaptado de TARKANY (2003).....	18
Figura 3: Tensões durante o puncionamento (MELLO, 2001).....	22
Figura 4: Brochas (LAUTEC, 2011) .....	26
Figura 5: Elementos de uma brocha interna (STEMMER, 2008) .....	27
Figura 6: Brocha de compressão (STEMMER, 2008).....	29
Figura 7: Ferramenta de puncionamento e brochamento simultâneos (MELLO, 2001) .....	31
Figura 8: Tipos de Geometria de Punção (adaptado de SINGH, 1992).....	34
Figura 9: Refinamentos de malha (SÖDERBERG, 2006).....	36
Figura 10: Tensões principais e tensões cisalhantes máximas – ensaio de tração uniaxial (ASM HANDBOOK, 1993a e 1993b). .....	39
Figura 11: Hexágono de falha para a teoria da tensão cisalhante máxima (em tensão plana) (ASM HANDBOOK, 1993a a 1993b). .....	40
Figura 12: Estado triaxial de tensões (a), variação de volume (b), distorção (c) (ASM HANDBOOK, 1993a e 1993b). .....	41
Figura 13: Elipse de falha para a teoria da energia de distorção máxima no plano (ASM HANDBOOK, 1993a a 1993b). .....	44
Figura 14: Tipos de elementos comumente utilizados, para análise de tensões (ABAQUS v.6.9). .....	50
Figura 15: Elementos brick, linear e quadrático (ABAQUS v.6.9). .....	51
Figura 16: Elementos mestres isoparamétricos (ABAQUS v.6.9). .....	52
Figura 17: Discretização do contato e interação (ABAQUS v.6.9). .....	53
Figura 18: Resumo do procedimento experimental - simulação.....	54
Figura 19: Resumo do procedimento experimental – extensão do estudo.....	55
Figura 20: Punções I a III - sentido de puncionamento para baixo (Marcondes et al., 2008).....	56
Figura 21: Qualidade dos furos obtidos com os punções tipo I (a), tipo II (b) e tipo III (c).....	59
Figura 22: Novas Geometrias de punções IV a VII propostas (adaptado de Lajarin et al. - 2012).....	60
Figura 23: Registros de tela do Abaqus 6.9 das simulações dos punções IV a VII...61	61
Figura 24: Punção de geometria inovadora proposto como consequência dos estudos anteriores.....	63
Figura 25: Cinco etapas do puncionamento com o punção proposto.....	64
Figura 26: Prensa excêntrica utilizada nos ensaios práticos de puncionamento.....	65
Figura 27: Diagrama de fixação do ferramental.....	66
Figura 28: Corpos de prova puncionados.....	67
Figura 29: Cavacos (em cima) e retalhos (embaixo) do processo de puncionamento .....	67
Figura 30: Diagrama da medição da altura da rebarba.....	68
Figura 31: Fixação de CP na máquina de medição por coordenadas.....	69
Figura 32: Diagrama da medição na máquina de medição por coordenadas.....	69

Figura 33: Formato relatório de cilindridade.....	70
Figura 34: Equipamento de medição de cilindridade e fixação da amostra (no detalhe).....	71
Figura 35: Formatos dos relatórios das medições.....	71
Figura 36: Região a ser visualizada dos corpos de prova 1 e 14.....	72
Figura 37: Região a ser visualizada do punção trincado.....	72
Figura 38: Sequência de ampliações da MEV de uma amostra, em ordem crescente, da esquerda para a direita e de cima para baixo.....	73
Figura 39: Perfil de forças dos punções I a III - etapa preliminar (adaptado de Marcondes et al. 2008).....	74
Figura 40: Perfis de força dos punções IV a VII.....	76
Figura 41: Sobreposição das curvas de força dos punções IV a VII.....	76
Figura 42: Cinco etapas do puncionamento com o punção proposto.....	78
Figura 43: Perfil de força do punção inovador.....	79
Figura 44: Amostras puncionadas: à esquerda, CP número 1, à direita CP número 14.....	80
Figura 45: Detalhe da adesão de material e da trinca no punção.....	81
Figura 46: Altura de rebarba das amostras.....	81
Figura 47: Cilindridade das amostras.....	82
Figura 48: Cilindridade e circularidade das amostras 2 e 9.....	83
Figura 49: MEV da seção da amostra 1 - ampliações de 20X, 50X, 100X, 200X, 400X, 800X, 1000X, 2000X,3000X e 4000X.....	84
Figura 50: MEV da seção da amostra 14 - ampliações de 20X, 50X, 100X, 200X, 400X, 800X, 1000X, 2000X,3000X e 4000X.....	85
Figura 51: MEV da seção do punção trincado - ampliações de 20X, 51X, 99X, 200X, 800X, 1000X, 2000X e 3000X.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química e propriedades mecânicas do NBR6656 (ETO, 2005).....	57
--	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
CP	Corpo de prova
FEM	Método de Elementos Finitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
UFPR	Universidade Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_o$	Área da seção transversal inicial
$A_d$	Área da seção transversal após deformação
$A$	Alongamento
$asf$	Profundidade de corte
$E$	Módulo de Young ou módulo de elasticidade
$f$	Folga em ambos os lados da chapa
$F$	Força no material
$G$	Módulo de elasticidade ao cisalhamento
$l$	Comprimento deformado
$l_o$	Comprimento original
$K$	Coefficiente de resistência
$LE$	Limite de Escoamento
$LR$	Limite de Resistência
$n$	Coefficiente de encruamento
$p$	Pressão hidrostática
$q$	Tensão de Von Mises
$Rc$	Unidade de Dureza Rockwell "C"
$T$	Fator de Tensão Triaxial
$t$	Espessura da chapa
$U_d$	Densidade de Energia de distorção
$U_o$	Densidade de Energia de deformação
$\epsilon$	Deformação verdadeira
$\epsilon_o$	Deformação nominal
$\sigma$	Tensão real
$\sigma_{nom}$	Tensão nominal
$\sigma_y$	Tensão de escoamento
$\sigma_u$	Limite de resistência à tração
$\sigma_1$	Tensão principal no eixo 1
$\sigma_2$	Tensão principal no eixo 2
$\sigma_3$	Tensão principal no eixo 3
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão principal máxima

$\sigma_{\min}$	Tensão principal mínima
$\sigma_{\text{média}}$	Tensão média
$\sigma_{\text{VM}}$	Tensão equivalente de Von Mises
$\omega$	Parâmetro de dano
$\nu$	Coefficiente de Poisson

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. JUSTIFICATIVA.....	16
1.2. OBJETIVO.....	17
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1. PUNCIONAMENTO.....	18
2.2. BROCHAMENTO.....	24
2.3. PROCESSO COMBINADO DE PUNCIONAMENTO E BROCHAMENTO.....	30
2.4. MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS .....	32
2.4.1. MALHA DE ELEMENTOS.....	35
2.5. PLASTICIDADE.....	36
2.6. TEORIA DA TENSÃO CISALHANTE MÁXIMA – TEORIA DE TRESCA .....	38
2.7. TEORIA DA ENERGIA DE DISTORÇÃO MÁXIMA – TEORIA DE VON MISES .....	41
2.8. CRITÉRIOS DE FALHA.....	47
2.9. CARACTERIZAÇÃO DE ELEMENTOS DE ACORDO COM O ABAQUS 6.9.....	49
2.9.1. Elementos triangulares tetraédricos e prismáticos .....	51
2.9.2. Contato entre superfícies.....	52
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	54
3.1. RESUMO.....	54
3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS PRELIMINARES – PUNÇÕES I A III.....	56
3.3. NOVAS GEOMETRIAS PROPOSTAS – PUNÇÕES IV A VII.....	59
3.4. SIMULAÇÃO DOS PUNÇÕES IV A VII.....	60
3.5. PUNÇÃO INOVADOR.....	62
3.6. SIMULAÇÃO DO PUNÇÃO INOVADOR.....	63
3.7. ENSAIOS PRÁTICOS – EXTENSÃO DO ESTUDO.....	64
3.7.1. Ensaio de puncionamento.....	65
3.7.2. Medição da altura da rebarba.....	68
3.7.3. Medição da cilindridade em máquina de medição por coordenadas.....	68
3.7.4. Medição da cilindridade em equipamento de medição de cilindridade e circularidade.....	70
3.7.5. Registro com microscopia eletrônica de varredura – MEV.....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4.1. SIMULAÇÕES PRELIMINARES.....	74
4.2. NOVAS GEOMETRIAS PROPOSTAS – PUNÇÕES IV A VII.....	75
4.3. SIMULAÇÃO DO PUNÇÃO INOVADOR.....	78
4.4. ENSAIO DE PUNCIONAMENTO – ASPECTOS VISUAIS.....	79
4.5. MEDIÇÃO DA ALTURA DA REBARBA.....	81
4.6. MEDIÇÃO DA CILINDRICIDADE EM MÁQUINA DE MEDIÇÃO DE COORDENADAS.....	82
4.7. MEDIÇÃO DA CILINDRICIDADE EM EQUIPAMENTO ESPECÍFICO.....	82
4.8. REGISTRO COM MEV.....	83
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
5.1. CONCLUSÕES.....	87
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	88
REFERÊNCIAS.....	89

## 1. INTRODUÇÃO

A busca pela diminuição no tempo de produção é um fator que estimula o aperfeiçoamento das técnicas de fabricação existentes, assim como o desenvolvimento de processos novos que permitam a obtenção de peças em um tempo menor, com melhor aproveitamento de recursos materiais e de equipamentos.

Nas ferramentas de corte de peças estampadas são determinadas as folgas em punções ou matrizes. Conforme Fang et al. (2002), Hambli e Potiron (2000), Rachik et al. (2002) e Hilditch e Rodgson (2005), esta folga é necessária para evitar que as peças tenham rebarbas, para aumentar a vida útil da ferramenta e reduzir a força de corte aplicada.

De acordo com Faura et al. (1998) e Schaeffer (1999), dependendo do tipo de material e da espessura da peça a ser estampada, esta folga pode variar muito. Quanto maior a folga, maior a possibilidade de ocorrer à ruptura (estouro) do material no final do corte. Beneli et al. (2003) diz que o efeito estouro se agrava com a elevação da dureza do material de trabalho e principalmente com o aumento da espessura da chapa. Quando isto ocorre a dimensão do diâmetro do furo no final do corte é diferente (maior) que a dimensão do diâmetro no início de corte. Portanto, quando se tem uma peça de chapa grossa, que tenha a necessidade de sair com a medida nominal por inteiro ao longo do furo (por exemplo: furo para fixação de um pino guia na peça), deve-se usinar a peça, utilizando alargadores, brochadeiras e brocas, adicionando assim, uma etapa ao processo de fabricação.

Uma outra solução seria furar por processo a laser, o qual permitiria se obter peças com o furo paralelo ao longo do furo. Conforme Steeg (2002), existem máquinas combinadas de laser e puncionamento, assim combinando a flexibilidade do laser e a produtividade do puncionamento; mas o processo de corte à laser é caro, se comparado com o processo de estampagem.

Desta forma, a busca de um processo mais econômico, que possa dar a qualidade do furo desejado, torna-se relevante.

Mello (2001) foi o primeiro a propor uma “Ferramenta Combinada de Puncionamento com Brochamento” ou seja, uma ferramenta que, em uma única peça, combina uma ferramenta de puncionar ou estampar furos e uma ferramenta de usinagem por brochamento, fazendo assim dois trabalhos distintos quase

simultaneamente, sendo utilizado em processos de estampagem. Esta ferramenta apresenta as vantagens do processo de estampagem (rapidez e estabilidade) com as vantagens do processo de brochamento (elevada qualidade dimensional). Esta ferramenta é adequada para processos de furação de chapas de aço grossas, cuja espessura é igual ou superior a 6 mm. Assim sendo, a melhoria desta ferramenta combinada de puncionamento e brochamento é um meio de se dar a qualidade de um furo puncionado em chapas grossas.

Mas o desenvolvimento de tal ferramenta envolve a construção de diferentes modelos de punção e matrizes com diferentes configurações geométricas e condições de lubrificação e folgas, conforme mostra Eto (2005), tornando tal desenvolvimento lento e oneroso.

Desta forma, a utilização de modelagem por elementos finitos mostra-se como uma alternativa para se diminuir tanto o tempo como os custos de desenvolvimento de tal ferramenta, já que as indústrias do segmento de estampagem e principalmente as automobilísticas têm se beneficiado com a simulação numérica do processo de estampagem, pois esta tem contribuído para a qualidade e confiabilidade dos resultados calculados e a descrição do comportamento da conformação dos materiais. Como por exemplo: a indicação de regiões da peça que poderão sofrer trincas, enrugamento, redução de espessura e retorno elástico durante o processo de estampagem, e também a diminuição de ciclos no desenvolvimento de ferramentas, ou mesmo a eliminação deles garantindo a eficiência do processo, de modo a obter produtos de qualidade com custos menores e prazos reduzidos.

O objetivo principal deste trabalho é, portanto, estudar, via simulação numérica, um modelo eficiente de ferramenta para operações de puncionamento e brochamento de chapas grossas por intermédio do software ABAQUS/EXPLICIT, versão 6.9.

Para o cumprimento do objetivo principal, o trabalho apresentará uma metodologia do tipo experimental, baseada no modelamento através de software e análise de dados realizada de forma quantitativa. Sendo utilizados o método indutivo, a observação e a lógica da pesquisa científica.

Quanto a sua estrutura, este trabalho foi dividido em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

No primeiro capítulo (presente), é feita uma introdução, mostrada uma estrutura geral do trabalho e apresentadas as justificativas para o mesmo.

No capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica sobre o material utilizado (LNE 38), sobre o processo de puncionamento (definição, ferramentas e equipamentos, matriz e processo de puncionamento e folga entre punção e matriz), sobre o processo de brochamento, sobre simulação numérica e sobre o processo combinado de puncionamento e brochamento.

No capítulo 3, é discutida brevemente a metodologia que se pretende utilizar.

No capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos.

No capítulo 5 são postas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

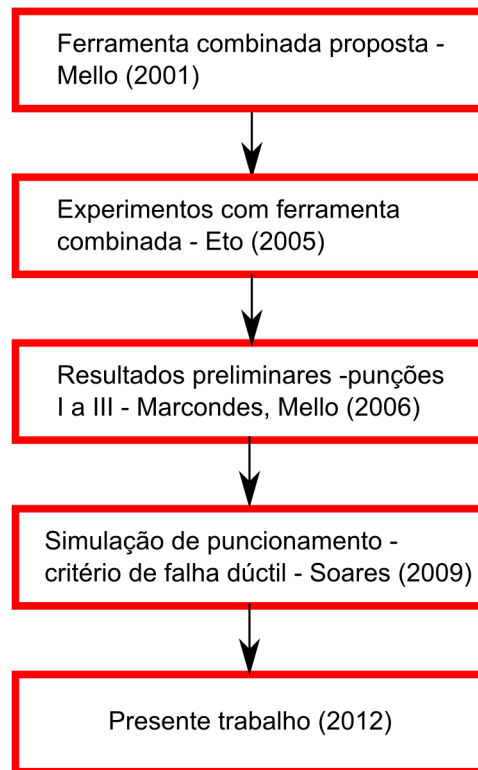
No último capítulo, o 6, é mostrada a bibliografia utilizada para embasar esta presente dissertação.

## **1.1. JUSTIFICATIVA**

A modelagem de ferramenta para o processo combinado de puncionamento e brochamento apresenta as vantagens do processo de estampagem (rapidez e estabilidade) com as vantagens do processo de brochamento (elevada qualidade dimensional), podendo vir a eliminar uma etapa em um processo de fabricação, podendo assim ser vantajoso economicamente.

A escolha da abordagem por elementos finitos se justifica pela redução de tempo e custos em protótipos para o desenvolvimento de tal ferramenta.

A sequência de trabalhos desenvolvidos é mostrada na figura 1.



*Figura 1: Sequência para o presente trabalho*

## 1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar, via simulação numérica, a influência das diferentes geometrias de punção nos esforços necessários para se fazer operações de puncionamento de chapas de aço grossas de alta resistência, tais como o material LNE 38, desenvolvendo um modelo numérico para simulação de operações com tais ferramentas combinadas nesse tipo de material.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. PUNCIONAMENTO

O puncionamento é um processo de corte por cisalhamento, utilizando uma ferramenta que se chama punção. A pressão aplicada pela ferramenta de corte contra a superfície que será cortada, ocasiona o processo. Quando a pressão ultrapassa a tensão máxima de cisalhamento do material cortado, a separação ocorre. As etapas do puncionamento são mostradas na figura 2.

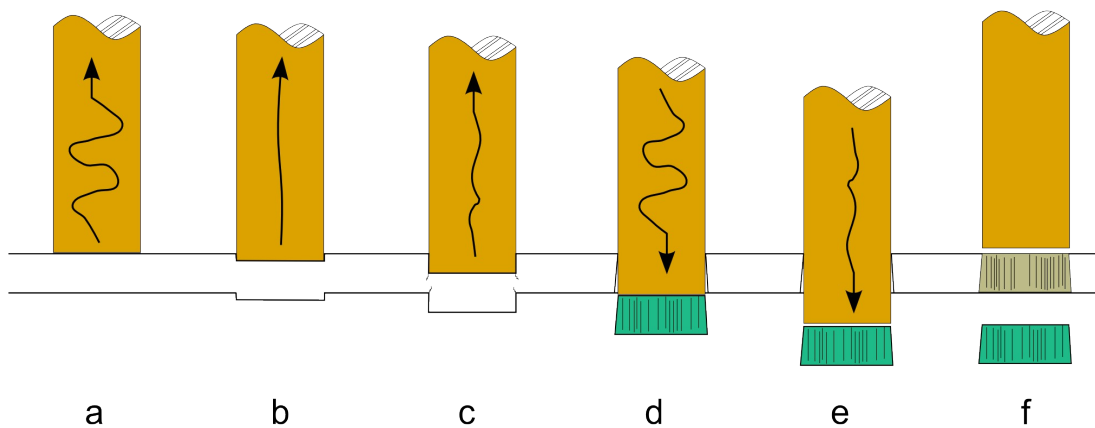


Figura 2: Etapas do puncionamento: a) impacto, b) penetração, c) e d) ruptura, e) estouro, f) retirada do punção - adaptado de TARKANY (2003)

Marcos (1975), diz que o processo de corte de chapa é uma operação mecânica, por meio da qual é possível conseguir desenhos de perfil previamente estabelecido, separando-os do resto do material por meio de ferramentas especiais.

O corte de uma chapa metálica é uma parte integral do processo de estampagem automotivo, por isso é um fator importante para manter a qualidade da peça (HILDITCH, e RODGSON, 2005).

De acordo com Polack (1974), o único tipo de corte que dá lugar a operações de estampagem é aquele que se verifica simultaneamente em toda a linha cortada, por intermédio de um punção. Costuma-se tomar como sinônimos os conceitos de corte e de puncionamento, mesmo não sendo o segundo, um caso particular do primeiro.

O processo de corte por cisalhamento é um processo de separação, o qual geralmente é tratado juntamente com os processos de estampagem por ser muito comum com estes. O corte é efetuado por dois cantos afiados que passam um em frente do outro com uma folga entre eles (SCHAEFFER, 1999) .

De acordo com Vaz e Bressan (2002), o corte consiste de uma operação de conformação de metal caracterizada pela separação completa do material. Marcondes (2000) expressa que o puncionamento gera uma série de produtos aplicáveis em diversas áreas da indústria, principalmente na área automobilística, onde dá como exemplos (fechadura de portas, engrenagens da caixa de câmbio, ajustadores do assento reclinável). Observa-se entretanto, que para a execução do processo de puncionamento, são necessárias ferramentas básicas como punções e matrizes.

Existem três diferentes tipos de ferramentas de corte conforme o número de peças produzidas e a precisão requerida. O tipo mais simples consiste de punção, extrator e matriz. Nesta ferramenta o punção é guiado somente pela guia da prensa, desta forma não é possível trabalhar com folga muito pequena, prejudicando assim a precisão das peças e introduzindo um alto desgaste nas ferramentas. Estas ferramentas são mais baratas, mas o seu ajuste na hora da troca é muito difícil e demorada. O segundo tipo é a ferramenta com punção guiado. Esta guia é efetuada pela placa que também funciona como extrator. Esta ferramenta é usada para peças mais precisas e para a fabricação de pequenas quantidades. As vantagens das ferramentas com punção guiado são a combinação de baixo custo e bom manuseio na hora da troca e da preparação da prensa. O tipo mais avançado é a ferramenta com guia por pinos e buchas. Geralmente é construída aproveitando uma base de estampo com pinos de guia. Esta ferramenta permite o trabalho com folgas mínimas para a fabricação em série de peças de alta precisão. (SCHAEFFER, 1999)

Yoshida (1979) denomina as ferramentas com punção guiado como sendo ferramentas com extrator guia, cuja finalidade é dupla, deve servir de guia do punção ou punções para fazê-los coincidir com a matriz e ao mesmo tempo servir de extrator da tira de material que se adere sobre os punções, uma vez efetuado o corte. Para Soler (1972) o extrator guia é chamado de placa extratora ou de guia, esta placa tem a função de guiar os punções na direção da placa matriz e exercer a função de extrair a tira de material que fica presa nos punções após o corte da peça.

Segundo Provenza (1976) o equipamento que realiza o puncionamento é constituído basicamente de duas partes: o punção e a matriz. Os punções são chamados machos e as matrizes são as fêmeas.

Assim, entende-se por punção uma ferramenta que transmite esforços de compressão, gerando assim tensões de cisalhamento sobre a peça que se pretende cortar. Os parâmetros importantes na fabricação de um punção são: relação de dureza entre punção e material a ser puncionado, comprimento e geometria do punção.

O material a ser utilizado na fabricação de punções deve ser mais duro do que aquele que deverá ser cortado. Tal medida é indicada para que o desgaste por atrito não seja excessivo, bem como seja evitado seu esmagamento.

A respeito da adequada construção do punção, Marcos (1975) explica que é importante que para a análise do uso do punção e sua construção sejam levados em conta que a dureza do punção deverá ser bem maior do que a do material trabalhado. Caso contrário, o aumento de sua espessura dará lugar a novas tensões na superfície de corte e o punção se deteriorará de forma mais rápida.

Sobre a dureza dos punções, Marcos (1975) expõe que: para corte simples, os punções devem ser endurecidos por meio de têmpera, com a finalidade de minimizar seus desgastes. Convém escolher um aço que apresente grande resistência ao desgaste.

Nota-se, então a importância do endurecimento adequado dos punções. Conclui-se que seu endurecimento esta diretamente relacionado com sua resistência de ponta, lateral e o acabamento da seção final. Ressalva-se que a dureza evita o desgaste da ferramenta, logo evita a variação da área de corte final.

As geometrias dos punções são responsáveis pelo seu desempenho quando em trabalho. Aponta-se o ângulo de corte como um dos elementos fundamentais destas geometrias. Yoshida (1979) diz que os punções com a face frontal de corte inclinada reduzem entre 35 a 50% o esforço de corte.

Para que a transmissão da energia se realize, os punções de corte devem ser fabricados de acordo com o trabalho a ser feito (cisalhamento), e desta fabricação dependerá a qualidade dos mesmos. Ressalta-se que além do tratamento térmico da dureza ser adequado, o fio de corte deve ser homogêneo em toda a superfície de corte. Se este fio de corte for irregular, a resistência ao corte será menor nos pontos

em que este está mais afiado. (MARCOS, 1975).

A construção desta classe de ferramentas depende principalmente do número de peças a construir, o que acarretaria na escolha do tipo de aço. Quando se trata de fabricar um pequeno número de peças e a peça precisa ser de grande dimensão, alcança-se uma significativa economia construindo-se o punção com material de menor custo, dando-se ao mesmo um tratamento superficial de têmpera.

Segundo Brito (1981), os punções e as matrizes são as partes mais importantes do ferramenta de estampo. A matriz, que é o inverso do punção, traz talhada as dimensões o perfil do produto a ser produzido sendo um dos elementos do estampo que mais sofre o esforço de cisalhamento ao cortar a peça indicada

Na confecção da matriz tem-se necessidade de considerar o ângulo de escape, a espessura, o perfil a ser cortado e a folga entre punção e matriz (BRITO, 1981).

Provenza (1976) considera que as características principais das matrizes de corte são o ângulo de saída (facilitando a saída do material cortado) e a folga entre o punção e a matriz (que é responsável pelo perfeito corte da peça desejada).

Assim como o punção, a matriz também será construída com aços especiais. Estes aços exigem os maiores cuidados e atenção, tanto sob o ponto de vista da fabricação quanto de sua aplicação, ou seja, quanto à sua fundição, tratamento térmico e até mesmo montagem. (BRITO, 1981). A matriz segundo Provenza (1976) deverá ser confeccionada com material de ótima qualidade (alta dureza e alta resistência ao desgaste) e com acabamento retificado.

As características fundamentais desejáveis dos aços para punção e matriz são: Alta resistência mecânica, alta dureza à temperatura ambiente, alta resistência ao desgaste, temperabilidade satisfatória e tenacidade apreciável.

Estas características são muito importantes, sendo que há outros fatores que afetam os aços como, por exemplo, a sua composição, o tipo de operação em que ele está envolvido, o calor gerado durante a operação e até mesmo as características dos lubrificantes utilizados.

As matrizes são geralmente montadas sobre bases e fixas por intermédio de parafusos ou porta-matrizes, podendo ser fixadas por pinos, encaixes ou chavetas. Provenza (1976) diz que a matriz deve ser fixada rigidamente sobre a base inferior de modo a formar um conjunto sólido. A face de corte de uma matriz, por mais

simples que ela seja, deve estar isenta de rebarbas.

A força de corte, que deve ser superior à resistência do material, age sobre os fios de corte, que se desgastam após terem sido produzidas uma grande quantidade de peças. Muitas vezes aparecem marcas na face da matriz, provenientes de rebarbas, pequenos retalhos ou corpos estranhos.

Por economia, recondiciona-se a matriz, retificando-a, deixando sua superfície de corte em bom estado. Este recondicionamento deve ser estudado no ato de projetar, prevendo um acréscimo na sua espessura. (BRITO, 1981).

No processo de estampagem o metal que está sendo puncionado está sujeito a tensões de compressão e tração, segundo Society of Manufacturing Engineers (1990). Conforme apresentado na Figura 3, ocorre compressão nas fibras superiores da chapa e tração nas fibras inferiores. Tal processo se dá devido aos efeitos da flexão que agem sobre o metal puncionado. Observa-se que a parte que está sendo comprimida tem sua seção reduzida, enquanto que a que está sendo tracionada tem sua seção expandida.

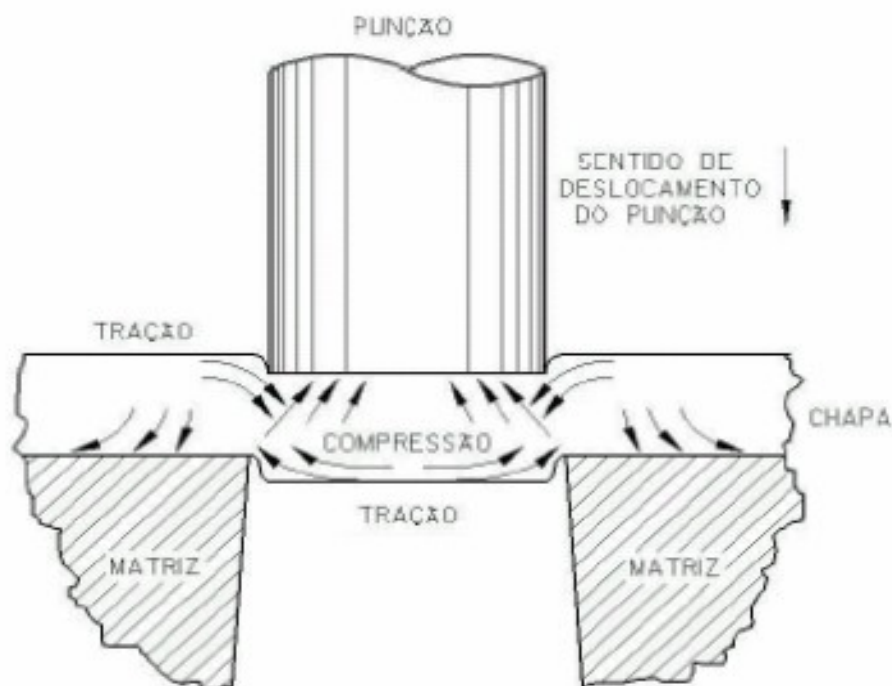


Figura 3: Tensões durante o puncionamento (MELLO, 2001)

O punção prossegue sua ação e o material, na região plástica, se expande. Quando o esforço exercido pelo punção se equiparar à resistência do material experimentado, ocorrerá a separação entre a peça cortada e o restante do material.

Durante o processo de puncionamento, devido à elasticidade do material, e o esforço que está sendo realizado sobre as mesmas, deformações ocorrem nas fibras da chapa ao redor da área de corte. Essa deformação promove atrito sobre as paredes da matriz, dificultando então a expulsão e extração do punção do furo da chapa. Para que se evite esse fato, é considerada uma folga entre o punção e a matriz.

Nas ferramentas de corte de peças estampadas, são determinadas as folgas entre punções e matrizes. Esta folga é necessária para evitar que as peças tenham rebarbas, para aumentar a vida útil da ferramenta e reduzir a força de corte (FANG et al., 2002; HAMBLI e POTIRON, 2000; HILDITCH e HODGSON, 2005).

Dependendo do tipo de material e da espessura da peça a ser estampada, esta folga pode variar muito (FAURA et al., 1998 e SCHAEFFER, 1999). Quanto maior a folga, maior a possibilidade de ocorrer à ruptura (estouro) do material no final do corte (SCHAEFFER, 1999).

Segundo Mello e Marcondes (2006), o efeito estouro se agrava com a elevação da dureza do material de trabalho e principalmente com o aumento da espessura da chapa. Quando isto ocorre, o diâmetro do furo no final do corte é maior do que o do diâmetro do furo no início de corte. Portanto, quando se tem uma peça de chapa grossa, e existe a necessidade de obter-se uma medida nominal por inteiro ao longo do furo (por exemplo, furo para fixação de um pino guia na peça), deve-se usinar a peça, utilizando alargadores, brochadeiras ou brocas, pois os furos obtidos pelo puncionamento apresentam conicidade e qualidade inferior.

De acordo com Brito (1981), a folga entre punção e matriz, é determinante para: Reduzir a força de corte; aumentar a durabilidade do estampo e produzir peças com tolerâncias. Complementa ainda que a folga tem sua condição ideal, a partir do momento que proporciona o máximo rendimento do estampo e reduz satisfatoriamente a força de corte. Para além desta condição ideal tem-se o aumento da força de corte e até a ruptura da matriz ou punção.

Nota-se que as folgas mal dimensionadas são as maiores causas de rupturas das matrizes, bem como da perda de qualidade do acabamento final da peça

produzida.

Brito (1981) também relata que a precisão do produto obtido no processo de corte em estampos simples, depende da precisão de construção do punção e da matriz (centralização entre si e folga bem dividida). Quando a folga é insuficiente tem-se uma maior força de corte, rebarbas no produto e desgaste intenso no conjunto de punção/matriz (reduzindo a durabilidade do estampo). Já se a folga for excessiva, ocorrerão rebarbas excessivas, deformação e conicidade na aresta recortada do produto.

A medida precisa da folga de corte depende da espessura da chapa, tensão e força de cisalhamento, como também da velocidade de corte, do tipo de corte da chapa puncionada (com ou sem ângulo de folga) e a qualidade exigida da superfície cortada. Uma maior folga de corte geralmente reduz a força necessária e o trabalho requerido, e também reduz o desgaste da ferramenta; e com uma pequena folga, em contrapartida, melhora a qualidade da superfície cortada e maior precisão da peça são frequentemente alcançadas (ALTAN, 1998).

## **2.2. BROCHAMENTO**

De acordo com Lautec (2011), a usinagem por brochamento é um processo que produz furos em todas as formas geométricas, rasgos de chaveta, estriados e perfis irregulares internos e externos.

Groover (1996) afirma que, ao longo do tempo, análises de custo provam que o brochamento é o processo mais eficiente e econômico para usinagem de furos de quaisquer formas geométricas.

Mo et al. (2005) afirmaram que o brochamento é um processo de usinagem distinto, devido às suas características, por executar uma sequência de desbastes simultâneos. Consequentemente vários dentes podem estar atuando no mesmo instante, sendo assim, um dos dentes está começando a operação de corte, outro pode estar finalizando-a.

Axinte e Gindy (2003), correlacionam as condições da ferramenta de brochamento aos sinais de saída: emissão acústica; vibração; força de corte e pressão hidráulica obtidos a partir de um sensor múltiplo, conectado a uma máquina que realiza uma operação de brochamento. Permitindo analisar se um ou mais

dentes de uma brocha estão desgastados, debilitados, quebrados ou lascados.

No brochamento a ferramenta multicortante executa movimento linear, enquanto a peça permanece estática. A rugosidade superficial do brochamento é fica entre 0,4 a 12,5  $\mu\text{m}$ . O processo é caro devido ao custo da ferramenta. O brochamento pode ser interno ou externo .

O brochamento pode ser definido como um processo de usinagem no qual o movimento de corte é linear e que tem por objetivo aplainar ou gerar superfícies internas ou externas de perfil regular ou irregular. A ferramenta possui múltiplos dentes com altura crescente, dispostos em série cada um cortando uma profundidade. A ferramenta tem um comprimento grande podendo ser forçada por tração ou compressão dentro ou fora da peça. A peça pode receber apenas um desbaste grosseiro até o fino acabamento (STEMMER, 2008) .

Para Sutherland et al. (1997), o brochamento é um processo que pode ser utilizado para gerar peças com características irregulares internas e externas, portanto tem grandes potenciais nas aplicações industriais. Enquanto Ferraresi (1970) diz que a operação de brochamento consiste na usinagem linear e progressiva da superfície de uma peça, mediante uma sucessão ordenada de arestas de corte.

Stemmer (2008) relata que o brochamento é um processo de usinagem em que o movimento de corte é linear, como no plainamento, caracterizando-se, porém, pelo emprego de uma ferramenta de múltiplos dentes, de alturas crescentes dispostos em série. Com ele as operações de desbaste, acabamento intermediário, e acabamento feitas num único passe da ferramenta.

Todas as definições anteriores se combinam e pode se dizer que: brochamento é um processo de usinagem linear, interno ou externo que possibilita a obtenção de superfícies regulares ou irregulares através de operações de desbaste, de acabamento e até mesmo de alisamento em um único passe.

A máquina que executa o trabalho de brochamento, segundo Ferraresi (1973) denomina-se “brochadeira”.

Conforme Stemmer (2008), a ferramenta utilizada na brochadeira, é denominada brocha (termo derivado do inglês “broach”, que por sua vez vem do latim “brocus” = objeto provido de uma saliência em forma de dente) e é relativamente longa, podendo ser forçada por tração ou compressão através de um

furo (brochamento interno) ou arrastada sobre a superfície de uma peça (brochamento externo ou de superfície). Os diversos dentes da brocha têm formas que se aproximam progressivamente da forma final desejada e têm alturas crescentes, que definem de antemão a penetração de avanço por dente (profundidade de corte).

Com relação ao custo da ferramenta, Stemmer (2008) expõe que a brocha é uma ferramenta complexa, normalmente bastante cara, projetada, construída e afiada para a usinagem de uma forma de perfil e tolerâncias definidas, de material específico, numa máquina de características de curso e potência dadas. Peças iguais, porém de materiais diferentes, exigem normalmente brochas com distinto espaçamento entre os dentes e gumes com ângulos também distintos. O custo elevado da ferramenta e sua utilização normalmente muito específica fazem com que o brochamento, salvo poucas exceções, só seja econômico na usinagem de grandes séries.

A figura 4 ilustra alguns tipos diferentes de brochas.



*Figura 4: Brochas (LAUTEC, 2011)*

Segundo Freire (1977), a ferramenta “Brocha” está dividida da seguinte forma:

a) cabeça de fixação (para o arrasto, com chaveta e pino);

- b) parte guia;
- c) parte cortante (desbaste);
- d) parte acabadora (acabamento);
- e) parte alisadora (eventualmente presente) .

O tipo de brocha mais utilizada é a brocha interna de compressão e seus elementos são mostrados na Figura 5, estes elementos segundo Stemmer (2008) são:

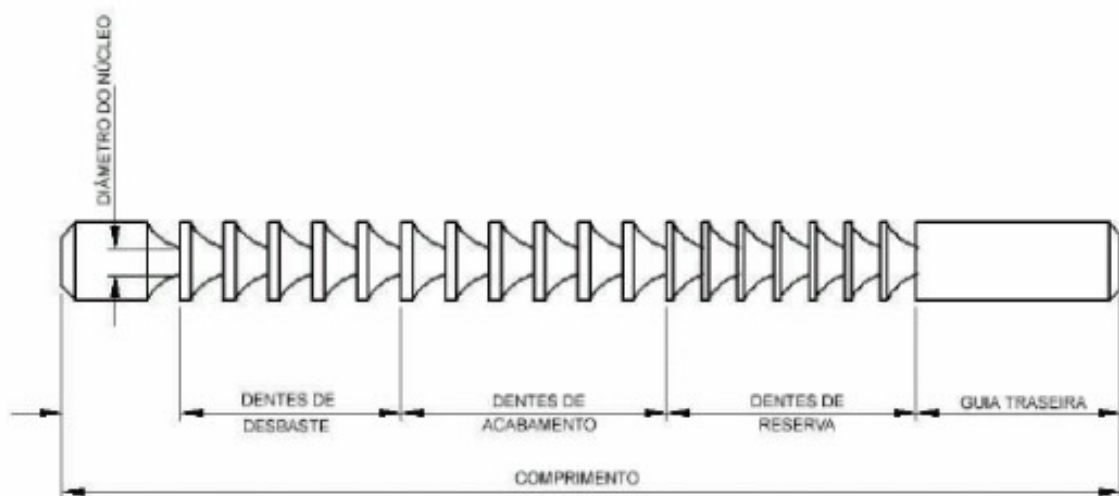


Figura 5: Elementos de uma brocha interna (STEMMER, 2008)

a) Guia dianteira – tem função de guiar a peça em relação ao primeiro dente da brocha. No caso de brochas sucessivas, o perfil da guia deve corresponder ao do último dente da brocha precedente. O comprimento da guia dianteira, calculado até o primeiro dente da brocha, deve ser no mínimo igual ao comprimento do furo a brochar;

b) Guia traseira – localizada na extremidade traseira de brochas internas, depois dos dentes de reserva, tem a função de orientar a brocha durante o corte dos últimos dentes e evitar a queda do extremo da brocha;

c) Dentes – são os que realizam a operação de corte do material. A forma de atuação de cada dente é semelhante a da ferramenta simples de corte por usinagem. Os dentes são colocados em sequência, alturas crescentes, determinando a penetração de avanço “*asf*” (profundidade de corte). No caso do

brochamento, o avanço é definido no próprio projeto da ferramenta.

Os dentes ao longo da brocha, mudam usualmente não só de dimensões, mas também de forma. Os primeiros dentes têm um perfil que se assemelha ao da peça a usinar, apenas com a sobremedida para assegurar o corte, enquanto que os dentes finais se aproximam progressivamente da forma final desejada.

Os dentes da brocha conforme Stemmer (2008) se dividem em três grupos:

a) Dentes de desbaste: São os que removem a maior parte do excesso de material.

b) Dentes de acabamento: Realizam o corte com pequena penetração de avanço por dente, para assegurar um bom acabamento superficial. A penetração do avanço por dente usada normalmente é da ordem de 0,01 mm em aços.

c) Dentes de reserva (ou calibragem): Caracterizam-se por terem todos a mesma forma e dimensões.

Ainda com relação aos principais elementos de uma brocha interna de compressão, tem-se:

a) Ressaltos abaulados de alisamento: Em brochas de acabamento de furos é previsto eventualmente, depois dos dentes de corte, um certo número de ressaltos abaulados com pequena sobremedida, da ordem de 0,002 mm por ressalto, os quais

produzem por esmagamento, uma superfície lisa e compacta. Para peças em aço, o ressalto tem seção longitudinal abaulada (sem friso plano central).

b) Quebra-cavacos: São retificados nos gumes dos dentes de desbaste, sob a forma de entalhes de cantos vivos ou arredondados e dispostos de forma desencontrada, de um dente para o outro. O material deixado por um entalhe é removido pelo dente seguinte. Os entalhes dos quebra-cavacos têm larguras de 0,5 a 1 mm e igual profundidade, com espaçamento de 10 a 15 mm. Os cavacos assim interrompidos são de mais fácil remoção e não entopem as bolsas da brocha. Os últimos 5 a 8 dentes de desbaste bem como os dentes de acabamento não devem ter entalhes quebra-cavacos para evitar a ocorrência de marcas na superfície usinada.

c) Dentes oblíquos: As brochas têm, em geral, os gumes dispostos ortogonalmente ao seu eixo, ou seja, à direção de corte. Em brochas de superfície usam-se as vezes dentes oblíquos, a fim de se obter um melhor acabamento e reduzir a ocorrência de vibrações (“chatter”). De acordo com Axinte et al. (2004) as

brochas com dentes de corte com ângulo inclinado em relação à direção do corte principal apresentam uma tendência de menor vibração no processo de usinagem. Quando duas superfícies adjacentes são brochadas simultaneamente, os ângulos dos gumes devem ser dispostos de modo a afastar os cavacos da aresta de interseção destas superfícies.

Quanto à definição da brocha de compressão, esta é empurrada através da peça, devendo, por essa razão, ser curta em relação à sua seção, a fim de evitar flambagem, quando sujeita à pressão exercida pelo cabeçote da brochadora. É muito empregada nos casos em que a quantidade de material a cortar é pequena. São usadas para dar o acabamento final em orifícios produzidos por furação ou alargamento. Como exemplo do emprego das brochas de compressão tem-se o caso do acabamento do furo do cubo de engrenagens tratadas termicamente, para corrigir qualquer distorção .

As brochas de compressão, como mostrado na Figura 6, foram as primeiras a serem utilizadas. São forçadas através do furo, quer manualmente ou por prensa. Devem ser curtas, com comprimento inferior a 25 diâmetros para evitar a flambagem. Por esta razão, também só são usadas para remover pequenas quantidades de material. Sendo relativamente baratas e não exigindo máquinas especiais, são usadas para usinagem e acabamento de formas internas de séries pequenas.

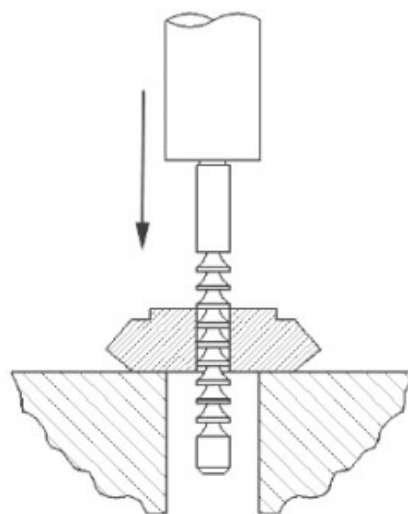


Figura 6: Brocha de compressão (STEMMER, 2008)

Com relação ao processo de brochamento propriamente dito, como a velocidade de corte é relativamente baixa e pela aplicação de fluido de corte apropriado, a peça quase não esquenta, reduzindo eventuais erros dimensionais devidos a dilatações térmicas.

Os melhores resultados para aços, são obtidos para os de corte fácil e aços na faixa de dureza entre 18 e 30 Rc. Aços mais macios tendem a rasgar, dando mau acabamento. Aços acima de 30 Rc são mais difíceis de brochar, embora se obtenha melhores acabamentos. Aços mesmo mais duros que 42 Rc tem sido brochados, porém usando velocidades de corte mais baixas, com elevado desgaste da ferramenta e necessidade de maiores potências de corte (STEMMER, 2008) .

### **2.3. PROCESSO COMBINADO DE PUNÇONAMENTO E BROCHAMENTO**

Durante o processo de conformação mecânica de chapas pelo processo de punçonnemento, ocorre uma série de fatores que influenciam a geometria e precisão final do furo punçonnado. As propriedades do material empregado e seu comportamento face às deformações impostas, bem como os parâmetros de processo.

Nas ferramentas de corte de peças estampadas são determinadas as folgas em punções ou matrizes. Esta folga é necessária para evitar que as peças tenham rebarbas, aumentar a vida útil da ferramenta e reduzir a força de corte, conforme Hilditch e Hodgson (2005). Dependendo do tipo de material e da espessura da peça a ser estampada, esta folga varia muito, expõe Schaefer (1999). Quanto maior a folga, maior a possibilidade de ocorrer à ruptura (estouro) do material ao final do corte.

Segundo Klein (2002) e Beneli et al. (2003) o efeito estouro se agrava com a elevação da dureza do material e com o aumento da espessura da chapa. Quando isto ocorre a dimensão do diâmetro do furo no final do corte é maior que a dimensão do diâmetro no início de corte. Portanto, quando se tem uma peça de chapa grossa, que tenha a necessidade de ter uma medida nominal constante ao longo do furo, deve-se usinar a peça, utilizando alargadores, brochadeiras ou brocas. Adicionando assim, mais uma etapa ao processo de fabricação.

Uma outra solução seria furar por processo a laser, o qual permitiria obter

peças com tal medida nominal ao longo do furo. Segundo Steeg (2002), existem máquinas combinadas de laser e puncionamento que combinam a flexibilidade do laser e a produtividade do puncionamento; mas este processo (laser) é caro, comparado com o puncionamento.

Surgiu assim a necessidade de um processo mais econômico e que possa dar a qualidade desejada ao furo.

Tal processo, foi abordado por Mello (2001), onde ele descreve uma ferramenta combinada de puncionamento com brochamento, ou mais particularmente a uma ferramenta que, em uma única peça, comporta uma ferramenta de estampar furos (ou puncionar) e uma ferramenta de usinagem por brochamento, proporcionando assim duas operações distintas quase simultaneamente.

Esta ferramenta, mostrada na figura 7, apresenta as vantagens do processo de estampagem (rapidez e estabilidade) com as vantagens do processo de brochamento (elevada qualidade dimensional), sendo também adequada para processos de furação de chapas de aço grossas, cuja espessura é igual ou superior a 6,0 mm.



*Figura 7: Ferramenta de puncionamento e brochamento simultâneos (MELLO, 2001)*

Mello e Marcondes (2006) mostraram uma inovação na geometria de punção através de uma ferramenta combinada punção-brocha, isto é, uma ferramenta com ponta de punção e dentes de brochamento. Para estudar a viabilidade dessa nova ferramenta combinada de puncionamento e brochamento, Marcondes et al. (2008), avaliaram como variáveis: a geometria da parte de brochamento, existência ou não de ângulo de ponta e lubrificação.

No entanto, o custo e o tempo envolvendo a construção de diferentes tipos de protótipos de ferramentas com diferentes configurações, a fim de se encontrar a melhor geometria para cada material, tornam-se muito grandes, se usada uma abordagem puramente experimental, mesmo sendo guiado pela literatura, desta forma, a modelagem por elementos finitos, torna-se uma alternativa para a diminuição da utilização de recursos e do tempo despendido no estudo de diferentes ferramentas.

## **2.4. MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS**

Para se entender melhor o que é simulação, precisa-se também conhecer as definições de sistemas e modelos. Um sistema pode ser definido como um conjunto de elementos distintos, que exercem entre si uma interação ou interdependência. Por natureza, os sistemas são limitados, ou seja, devem-se definir limites ou fronteiras. Portanto, pode-se definir sistemas dentro de outros sistemas.

Um modelo, segundo Hillier e Liebermann (1988), é uma representação de um sistema real, na qual somente os aspectos relevantes para uma determinada análise deste sistema são considerados. Sendo assim, a simulação é nada mais que a técnica de fazer experimentos amostrais no modelo de um sistema. Os experimentos são feitos no modelo, ao invés de no próprio sistema real, porque é mais conveniente e menos dispendioso.

Na simulação computacional, se está particularmente interessado nos modelos simbólicos, que são usados para representar um sistema real em um computador. O principal ponto que tem que considerar aqui, é que um modelo é criado para representar alguma coisa. (AHZI et al., 2008).

Os processos de simulação numérica procuram modelar o comportamento dos materiais e sua interação com o ferramental durante a sua estampagem.

Portanto, o conhecimento do comportamento do material é de fundamental importância para que, durante o processo de estampagem, as deformações não excedam um valor seguro e, assim, garantam a qualidade final da peça. É também possível identificar através do software de simulação, a adição de “draw-bead”, mudança de raios, mudança de pressão do prensa-chapa, mudança na lubrificação, entre outras condições (HONGZHI e ZHONGOI, 2000).

De acordo com Hedrick (2002), como qualquer software, o de simulação também tem suas limitações, portanto faz-se necessário ser feita uma análise entre custo e benefício, prevendo-se treinamento adequado e profissionais com conhecimento em conformação de chapas, assim como engenheiro de processo, projetista de ferramentas e produtos e profissionais que saibam usar este tipo de software.

O processo de corte não é totalmente compreendido devido a situações em que a resistência do material é constantemente alterada, assim sendo, o processo é muito complexo para uso de modelo analítico. Por essa razão, o método dos elementos finitos tem sido usado para simular o processo de corte com sucesso. Concluiu-se que a correlação da imagem digital está bem condizente à investigação experimental do processo de corte. O modelo numérico da superfície de tensão prediz o campo de força e a resistência adequadamente. Com este modelo de elementos finitos, as circunstâncias necessárias são apresentadas para fraturas dúcteis no processo de corte (GOIJAERTS et al., 2000).

Segundo Hatanaka et al. (2003), simulações numéricas do processo de corte de chapas metálicas têm sido feitas baseadas no método de elementos finitos para reduzir o tempo e os custos de produção. Para confirmação dos resultados dessas simulações, foram elaborados vários modelos com várias folgas entre punção e matriz. A propagação da ruptura com a penetração do punção e a forma da extremidade cortada foram observadas. Os resultados experimentais obtidos anteriormente, mostram boa correspondência com os resultados da simulação por elementos finitos.

Klingenberg e Singh (2003) investigaram as características do processo de corte no funcionamento para o desenvolvimento de um sistema para caracterização em tempo real das propriedades do material da chapa durante o processo de corte. Na investigação foi usada simulação por elementos finitos de um modelo analítico e

um programa para verificação experimental.

Singh et al. (1992), utilizaram técnicas de elementos finitos nos seus estudos. Modelos de elementos finitos 3D de vários tipos de punções foram desenvolvidos, estes modelos possibilitam a análise dos efeitos da variação da geometria do punção e sobre a deformação do punção quando aplicado uma força de corte. Foram utilizados 6 tipos de geometria de punção diferentes, conforme figura 8.

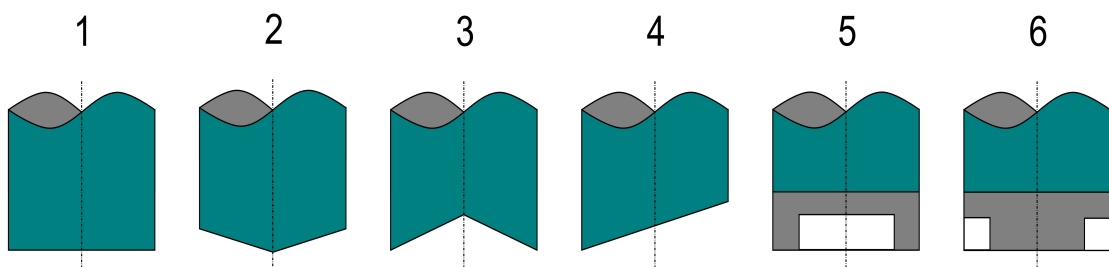


Figura 8: Tipos de Geometria de Punção (adaptado de SINGH, 1992)

Faura et al.(1998) propõem uma metodologia para se obter a melhor folga entre punção e matriz para um dado material de chapa e espessura para ser cortada, através da técnica de elementos finitos, utilizando o programa ANSYS v.5.1 (ANSYS Inc., Houston, PA, 1995).

Hambli et al. (2003) desenvolveram também uma metodologia usando FEM para obter uma ótima folga entre punção e matriz para um dado material através do processo de simulação de corte. Hambli (2005) também estudou a combinação de elementos finitos e modelo de rede neural. O estudo comparativo entre os resultados numéricos e experimentais nos estudos mostraram boa correspondência.

Goijaerts et al. (2001) fizeram simulações com elementos finitos e os experimentos são realizados com teste de tração e corte, para avaliar a eficácia do teste, no processo de corte são utilizados: cinco materiais distintos, folgas diferentes, assim como diferentes raios de corte das ferramentas. A principal dificuldade encontrada na análise numérica é a descrição exata da iniciação da fratura dúctil, que determina a forma do produto.

Komori (2001) coloca que o método de elementos finitos, tem propiciado um grande avanço na análise do processo de conformação de metal. Por esta razão, muitas pesquisas foram realizadas usando este método. No seu trabalho foi elucidado o fenômeno da formação da fratura dúctil de chapas metálicas experimentalmente e por meio de análise de elementos finitos. Com base neste trabalho desenvolveu-se um programa de computador, utilizando o método de elementos finitos, com o qual o comportamento do crescimento da ruptura após fratura dúctil pode ser analisado. O fenômeno em que um material é dividido em duas partes com corte foi simulado no programa.

Os resultados da simulação utilizando elementos finitos obtidos por Samuel (1998) sob o efeito das variáveis do processo (ex: folga do punção e matriz, geometria das ferramentas e as propriedades dos materiais) têm boa correspondência com os resultados experimentais.

Soares (2009) estudou via elementos finitos, utilizando o critério de falha dúctil a influência da folga ente punção e matriz em operações de puncionamento, sobre a qualidade da parede do furo puncionado, determinando uma folga ótima para tal operação.

#### **2.4.1. MALHA DE ELEMENTOS**

A malha, como é conhecida, é o conjunto de elementos e nós utilizados na discretização de um modelo geométrico, para o cálculo com o método de elementos finitos (SÖDERBERG, 2006).

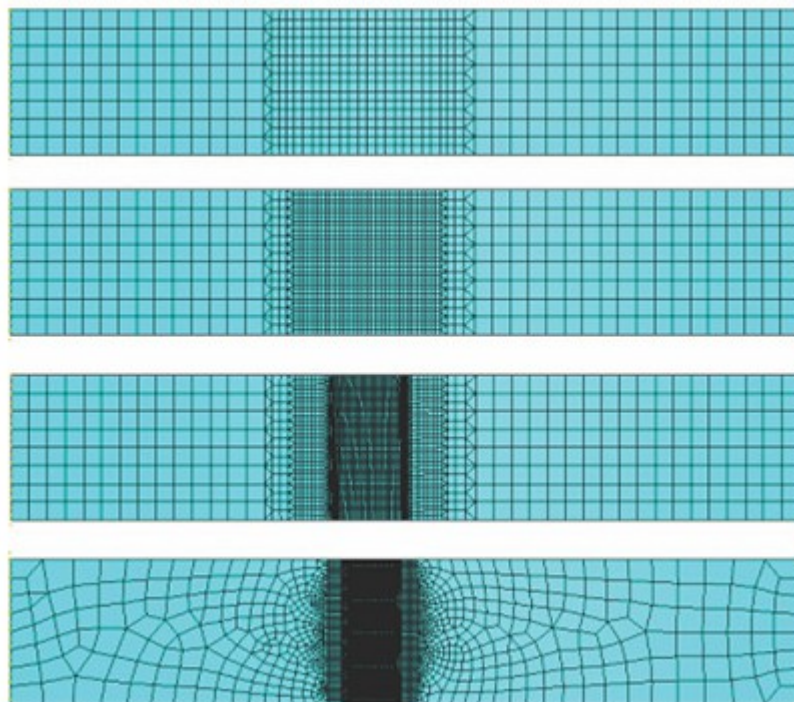
O processo de geração de malha em um modelo é algo de fundamental importância para se definir o nível de precisão dos resultados a serem obtidos. Quanto maior o número de elementos e nós, maior é a precisão do resultado. A malha deve se ajustar da melhor forma possível ao formato geométrico do modelo da peça estudada. Entretanto, a sua densidade pode variar localmente, conforme a necessidade geométrica. Isto significa que, em regiões com detalhes muito pequenos, é necessária uma densidade maior da malha para melhor representá-la.

Quando se trata de ruptura, a região mais provável a sofrê-la deve sempre ter um bom refinamento na malha, pois a precisão das tensões obtidas na região deve

ser a melhor possível. Ao mesmo tempo, estas regiões costumam ter geometrias mais complexas, o que reforça a necessidade de se ter uma malha refinada nesta região.

Segundo Marcondes et al. (2007), a densidade da malha afeta consideravelmente os resultados de deformação. Nesse estudo, devido ao gradiente de alta deformação plástica na região de corte, uma malha suficientemente densa deve ser aplicada nessa área.

Söderberg (2006) verificou a influência da densidade da malha na geometria de corte e nas forças de ruptura em uma simulação de puncionamento. Ele realizou um estudo com diferentes refinamentos de malha. A figura 9 mostra a malha utilizada por Söderberg (2006). Em seu trabalho concluiu-se que 64 a 128 elementos na espessura são suficientes para avaliar a influência dos parâmetros na força de ruptura.



*Figura 9: Refinamentos de malha (SÖDERBERG, 2006).*

## 2.5. PLASTICIDADE

O ABAQUS oferece diversos modelos constitutivos que consideram respostas

elásticas e inelásticas, sendo a resposta inelástica modelada pela teoria da plasticidade. Para metais, o modelo de plasticidade mais utilizado é o modelo com encruamento isotrópico e superfície de escoamento de Von Mises.

Quando se considera que a estrutura sofrerá deformações finitas, a curva tensão vs. deformação fornecida normalmente para os aços estruturais, calculada com base na geometria inicial (área e comprimento), ou seja, com valores nominais da tensão e da deformação, não representa adequadamente o seu comportamento. Portanto, devem ser consideradas as tensões e deformações calculadas com base na geometria real da estrutura deformada.

A deformação ( $\epsilon$ ) pode ser calculada pela equação 3.1:

$$\int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.1)$$

onde:

$l$  = comprimento deformado,;

$l_0$  = comprimento original,;

$\epsilon$  = “deformação verdadeira” ou deformação logarítmica.

A tensão correspondente a essa deformação verdadeira é chamada “tensão real”, sendo definida por  $\sigma = F/A$ , onde  $F$  é a força no material e  $A$  é a área instantânea. A relação entre a deformação real ( $\epsilon$ ) e a nominal ( $\epsilon_{nom}$ ) pode ser determinada considerando que a deformação nominal é dada por

$$\epsilon_{nom} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (2.2)$$

onde, rearranjando os termos e tomando o logaritmo natural de ambos os lados da equação, tem-se a deformação verdadeira dada por

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_{nom} + 1) \quad (2.3)$$

A relação entre a tensão nominal ( $\sigma_{nom}=F/A_0$ ) e a verdadeira ( $\sigma=F/A_d$ ) é determinada considerando que a área deformada está relacionada à área original por  $A_d=A_0(l_0/l)$  e observando que  $(l/l_0)=(1+\varepsilon_{nom})$ , portanto, tem-se:

$$\sigma = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2.4)$$

O ABAQUS considera o comportamento plástico do material definido por essas medidas, com a tensão verdadeira relacionada à parcela plástica da deformação verdadeira.

## 2.6. TEORIA DA TENSÃO CISALHANTE MÁXIMA – TEORIA DE TRESCA

Segundo o ASM Handbook (1993a e 1993b) quando uma chapa de um material dúctil, é tracionada, observa-se que o mecanismo que é responsável pelo escoamento é o deslizamento, ou seja, cisalhamento ao longo dos planos de tensão cisalhante máxima, a 45° em relação ao eixo do elemento. O escoamento inicial está associado ao aparecimento da primeira linha de deslizamento na superfície do corpo de prova e, conforme a deformação aumenta, mais linhas de deslizamento aparecem, até que todo o corpo de prova tenha escoado. Se este deslizamento for considerado o mecanismo real de falha, então a tensão que melhor, caracteriza esta falha é a tensão cisalhante nos planos de deslizamento. A figura 10 mostra o círculo de Mohr de tensão para este estado de tensão uniaxial, indicando que a tensão cisalhante nos planos de deslizamento tem um valor de  $\sigma_y/2$ . Deste modo, se for postulado que em um material dúctil, sob qualquer estado de tensão (uniaxial, biaxial ou triaxial), a falha ocorre quando a tensão cisalhante em qualquer plano atinge o valor de  $\sigma_y/2$ , então o critério de falha para a teoria da tensão cisalhante máxima pode ser enunciada como:

$$\tau_{ab \max} = \frac{\sigma_y}{2} \quad (2.5)$$

onde  $\sigma_y$  é o limite de escoamento.

Sabendo-se que a equação da tensão cisalhante é dada pela equação 3.6, obtém-se a equação 3.7 do limite de escoamento:

$$\tau_{ab \max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_y \quad (2.7)$$

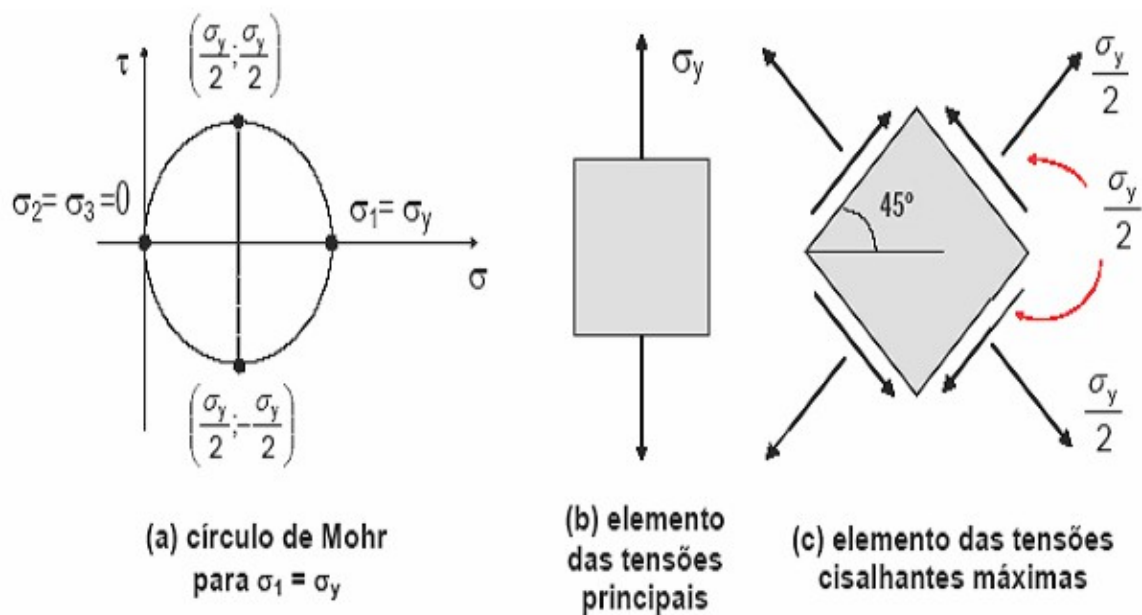


Figura 10: Tensões principais e tensões cisalhantes máximas – ensaio de tração uniaxial (ASM HANDBOOK, 1993a e 1993b).

onde:

$\sigma_{\max}$  = tensão principal máxima;

$\sigma_{\min}$  = tensão principal mínima.

Para o caso de tensão plana, o critério de falha da tensão cisalhante máxima pode ser enunciado em termos das tensões principais que atuam no plano,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , como se segue. Quando a tensão principal 1 e a tensão principal 2 têm o mesmo sinal, tem-se:

$$\begin{aligned} |\sigma_1| &= \sigma_y \text{ se } |\sigma_1| \geq |\sigma_2| \\ |\sigma_2| &= \sigma_y \text{ se } |\sigma_2| \geq |\sigma_1| \end{aligned} \quad (2.8)$$

Quando a tensão principal 1 e a tensão principal 2 têm sinais opostos tem-se:

$$|\sigma_1 - \sigma_2| = \sigma_y \quad (2.9)$$

As equações acima podem ser representadas graficamente como na figura 11:

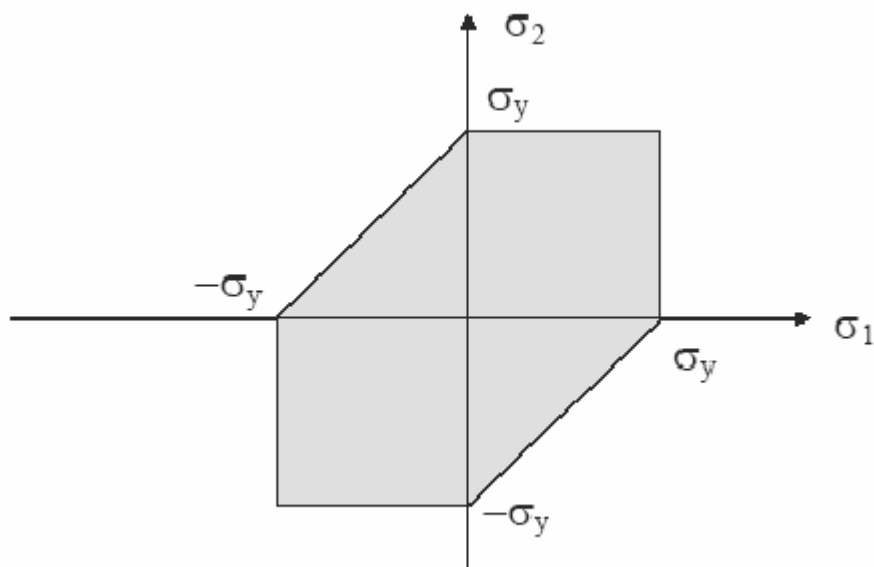


Figura 11: Hexágono de falha para a teoria da tensão cisalhante máxima (em tensão plana) (ASM HANDBOOK, 1993a a 1993b).

Para um elemento sob tensão em um plano, o estado de tensão em todos os pontos do corpo pode ser representado por um ponto de tensão ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ) no plano  $\sigma_1 - \sigma_2$ , como indicado na figura 11. Se o estado de tensão para qualquer ponto no corpo corresponde a um ponto de tensão que se situe fora do hexágono da figura, ou em sua fronteira, diz-se que ocorreu a falha, de acordo com a teoria da tensão cisalhante máxima (ASM HANDBOOK, 1993a e 1993b).

## 2.7. TEORIA DA ENERGIA DE DISTORÇÃO MÁXIMA – TEORIA DE VON MISES

Embora a teoria da tensão cisalhante máxima forneça uma hipótese razoável para o escoamento em materiais dúcteis, a teoria da energia de distorção máxima tem uma relação melhor com os dados experimentais e, assim, é geralmente preferida (ASM HANDBOOK – 1993a e 1993b). Nesta teoria, considera-se que o escoamento ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume de um corpo sob carregamento multiaxial for igual ou menor que a energia de distorção por unidade de volume em um corpo de prova de tração, quando submetido a escoamento ocorre na tensão de escoamento uniaxial  $\sigma_y$ , num teste de tração simples.

Considerando a energia de deformação armazenada em um elemento de volume, como mostrado na figura 12:

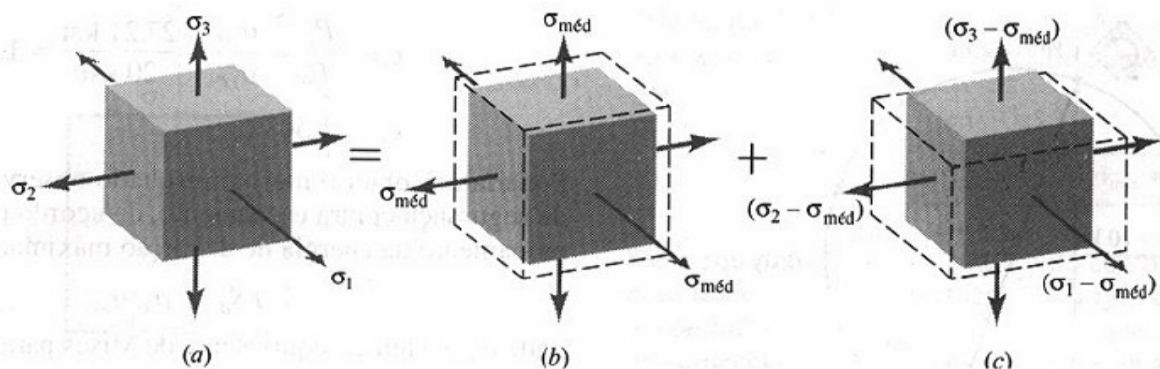


Figura 12: Estado triaxial de tensões (a), variação de volume (b), distorção (c) (ASM HANDBOOK, 1993a e 1993b).

A densidade de energia de deformação devida ao carregamento multiaxial é dada pela equação 3.10, que pode ser escrita, usando os três eixos principais, na forma:

$$U_0 = \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (2.10)$$

Aplicando-se essa equação à Lei de Hooke:

$$U_0 = \frac{1}{2E} [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3)] \quad (2.11)$$

A primeira parcela desta energia de deformação está associada à variação de volume do elemento, enquanto a segunda está associada à variação de forma, ou seja, à distorção. A variação de volume é produzida pela tensão média, como ilustrado na figura 12(b).

$$\sigma_{media} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.12)$$

As tensões resultantes mostradas na figura 12(c) produzem distorção sem qualquer variação no volume. Ensaios mostram que materiais não escoam quando estão submetidos a pressões hidrostáticas (tensões iguais em todas as direções – estado de tensão hidrostático - figura 12(b) de valores extremamente altos. Assim, postulou-se que as tensões que realmente causam escoamento são as tensões que produzem distorção. Esta hipótese constitui o critério de escoamento (de falha) da energia de distorção máxima, que enuncia:

“O escoamento de um material dúctil ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume iguala ou excede a energia de distorção por unidade de volume quando o mesmo material escoar em um ensaio de tração simples.”

(ASM HANDBOOK, 1993a e 1993b).

Quando as tensões da figura 12(c), que causam distorção, são substituídas na equação 3.11, obtém-se a seguinte expressão para a densidade de energia de distorção:

$$U_d = \frac{1}{12G} (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (2.13)$$

Na expressão acima, usou-se também a relação  $E = 2G(1 + \nu)$ .

A densidade de energia de distorção em um corpo de prova de tração na tensão limite de escoamento,  $\sigma_y$ , é dada por:

$$(U_d)_y = \frac{1}{6G} \sigma_y^2 \quad (2.14)$$

pois  $\sigma_1 = \sigma_y$  e  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ . Deste modo, o escoamento ocorre quando a energia de distorção para um carregamento geral, dado pela equação 3.13, iguala ou excede o valor de  $(U_d)_y$  na equação 3.14. Assim, o critério de falha da energia de distorção máxima pode ser expresso em termos das três tensões principais como:

$$\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] = \sigma_y^2 \quad (2.15)$$

Em termos das tensões normais e das tensões cisalhantes em três planos arbitrários mutuamente ortogonais, pode-se mostrar que o critério de falha da energia de distorção máxima tem a seguinte forma:

$$\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] = \sigma_y^2 \quad (2.16)$$

Para o caso de tensão plana, a expressão correspondente para o critério de falha da energia de distorção máxima pode ser facilmente obtida da equação 3.15, fazendo-se  $\sigma_3 = 0$ . Tem-se, então,

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = \sigma_y^2 \quad (2.17)$$

Esta é a equação de uma elipse no plano  $\sigma_1 - \sigma_2$ , como mostrado na figura 13. Com o propósito de comparação, o hexágono de falha para a teoria de escoamento da tensão cisalhante máxima também está mostrado, em linhas tracejadas. Nos seis vértices do hexágono, as duas teorias de falha coincidem, ou seja, ambas as teorias predizem que o escoamento ocorrerá se o estado de tensão (plano) em um ponto corresponde a qualquer um destes seis estados de tensão. Por outro lado, a teoria da tensão cisalhante máxima dá uma estimativa mais conservadora (ou seja, um valor menor) para as tensões necessárias para produzir escoamento, pois o hexágono se situa sobre ou dentro da elipse (ASM HANDBOOK, 1993a e 1993b).

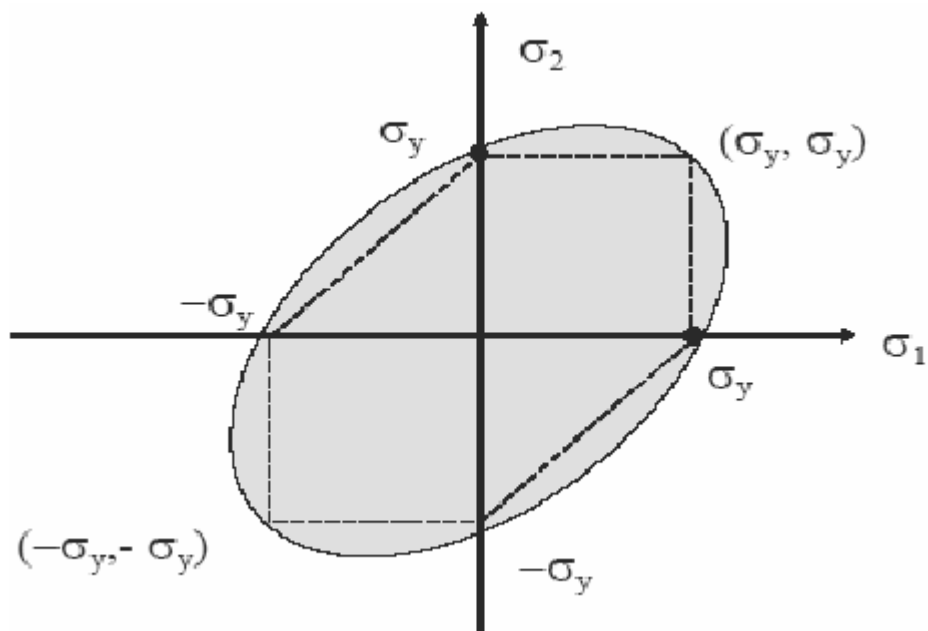


Figura 13: Elipse de falha para a teoria da energia de distorção máxima no plano (ASM HANDBOOK, 1993a a 1993b).

Segundo ASM Handbook (1993a e 1993b) um modo conveniente de aplicar a teoria da energia de distorção máxima é tirar a raiz quadrada dos termos do lado esquerdo da equação 3.15 ou da 3.16 se para obter uma quantidade equivalente de tensão, que é chamada de tensão equivalente de Von Mises. Qualquer uma das duas equações a seguir pode ser usada para calcular a tensão equivalente de Von Mises,  $\sigma_{VM}$ :

$$\sigma_{VM} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

ou:

$$\sigma_{VM} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

Para a tensão plana, as expressões correspondentes para a tensão equivalente de Von Mises podem ser obtidas das equações 3.18 e 3.19, fazendo-se ou  $\sigma_3 = 0$  ou  $\sigma_y = \tau_{zz} = \tau_{yz} = 0$ .

Comparando-se o valor da tensão de Von Mises, em qualquer ponto, com o valor da tensão de escoamento em tração,  $\sigma_y$ , pode-se determinar se o escoamento ocorre de acordo com a teoria de falha da energia de distorção máxima.

Segundo Wu (2008), em qualquer momento da análise, o vetor de tensão do material é dado por uma equação escalar, que assume que a deformação plástica equivalente no início do dano é uma função da relação entre a pressão hidrostática  $p$  e a tensão de Von Mises  $q$ , sendo este o critério de falha dúctil utilizado no ABAQUS. Essa equação sendo:

$$T = -\frac{p}{q} \quad (2.20)$$

na qual “T” é o fator de tensão triaxial, “p” é a pressão hidrostática e “q” é a tensão de Von Mises. Sendo “T” negativo, fator de tensão triaxial na compressão e “T” positivo, fator de tensão triaxial na tração.

Este modelo é baseado no valor da deformação plástica equivalente no ponto de integração do elemento e a falha é indicada quando o parâmetro de dano  $\omega$  excede o valor “1”. O parâmetro de dano  $\omega$  é definido por:

$$\omega = \varepsilon_0^{pl} + \frac{\sum \Delta \varepsilon^{pl}}{\varepsilon_f^{pl}} \quad (2.21)$$

sendo:

$\varepsilon_0^{pl}$                       deformação inicial no quando a falha inicia;

$\Delta \varepsilon^{pl}$                     incremento da deformação plástica;

$\varepsilon_f^{pl}$                       deformação final.

A tensão hidrostática p e a tensão equivalente q, em termos de suas componentes principais, são formuladas por:

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.22)$$

$$q = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

## 2.8. CRITÉRIOS DE FALHA

Para elementos estruturais simples, pode-se usar as equações básicas para calcular tensão e deformação. Para elementos estruturais mais complexos, costuma-se utilizar o Método dos Elementos Finitos para obtenção da distribuição de tensões e deformações. Em alguns casos particulares, as soluções podem ser obtidas pela teoria da elasticidade ou a teoria de placas e cascas. A segunda tarefa é determinar que valores de tensão e/ou deformação levarão à falha do objeto sendo projetado (LAI et al., 2007).

Segundo Klingenberg e Singh (2006), se um ensaio de tração é realizado em um corpo de prova de um material dúctil, pode-se dizer, para fins de projeto do objeto, que o corpo de prova falha quando a tensão axial atinge a tensão de escoamento  $\sigma_y$ , ou seja, o critério de falha é o escoamento. Se o corpo de prova for feito de um material frágil, o critério de falha comum é a fratura frágil no limite de resistência à tração,  $\sigma_u$ .

Mas um elemento estrutural está, invariavelmente, submetido a um estado de tensão multiaxial, para o qual é mais difícil se prever que valor de tensão causa a falha do mesmo (LAI et al., 2007).

Um ensaio de tração é feito usando os procedimentos descritos nas normas de ensaios de materiais e os resultados estão disponíveis para diversos materiais. Porém, para se aplicar os resultados de um ensaio de tração (ou de um ensaio de compressão, ou de um ensaio de torção) a um elemento que esteja submetido a um carregamento multiaxial, é necessário se considerar o mecanismo real de falha. Ou seja, a falha foi causada por que a tensão normal máxima atingiu um valor crítico ou a tensão cisalhante máxima atingiu o seu valor crítico ou a energia de deformação ou alguma outra variável atingiu seu valor crítico (HAMBLI et al., 2003).

De acordo com o ASM Handbook (1993a e 1993b), no ensaio de tração, o critério para falha pode ser facilmente enunciado em termos da tensão (trativa) principal  $\sigma_1$ , mas para a tensão multiaxial devemos considerar a causa real da falha e dizer que combinações de tensão irão acarretar falha do elemento em estudo.

O critério de início de dano deve ser escolhido de forma a prever o início de danos devido à nucleação, crescimento e coalescência de vazios em materiais

dúcteis. O modelo assume que a deformação plástica equivalente no início de falha  $\dot{\bar{\epsilon}}_D^{pl}$  é uma função da tensão triaxial e da taxa de deformação  $\dot{\bar{\epsilon}}_D^{pl}(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})$ . Neste caso,  $\eta = -p/q$  é a tensão triaxial. A variável  $p$  é a tensão de pressão,  $q$  é a tensão equivalente de Mises e  $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$  é a taxa de deformação plástica equivalente. A tensão “ $p$ ” e a tensão Mises equivalente “ $q$ ” são representadas pelas equações 3.22 e 3.23, da seção anterior respectivamente.

O critério para início de falha proposto por Wu (2008) é alcançado quando a condição da equação 3.24 é satisfeita, onde  $\omega_D$  é um estado variável que cresce monotonamente com a deformação plástica. A cada incremento, o crescimento em  $\omega_D$  é computado como na equação 3.25.

$$\omega_D = \int \frac{d\epsilon^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} = 1 \quad (2.24)$$

$$\Delta \omega_D = \frac{\Delta \epsilon^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} \geq 0 \quad (2.25)$$

Nas simulações, foi assumido que a degradação da rigidez é associada a cada mecanismo dúctil e pode ser modelado aplicando-se uma variável escalar de dano, “ $D$ ”. Em qualquer ciclo de carregamento dado durante a análise, o tensor de tensão no material é dada pelo dano escalar, dado pela equação 3.26.

$$\sigma = (1 - D) \bar{\sigma} \quad (3.26)$$

Na qual  $\bar{\sigma}$  é o tensor de tensão efetivo que existe no material na ausência de dano computado no incremento atual. O material perde completamente a capacidade de se sustentar quando  $D=1$ .

Os dados considerados para definir o mecanismo de dano dúctil podem ser

obtidos assim: para a tensão uniaxial,  $\sigma_2 \neq 0$ ,  $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$ , o valor do fator de tensão triaxial é obtido substituindo os valores  $\sigma_2 \neq 0$ ,  $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$  nas equações 3.22 e 3.23 e  $\eta = 0,272$  é obtido. Para tensão biaxial, é assumido que  $\sigma_1 = \sigma_2$  e  $\sigma_3 = 0$  e  $\eta = 0,667$  é calculado.

## 2.9. CARACTERIZAÇÃO DE ELEMENTOS DE ACORDO COM O ABAQUS 6.9

Para diversas formulações ou problemas diferentes, o Método dos Elementos Finitos utiliza vários tipos diferentes de elementos, cada um com suas aproximações e funções características, que possibilitam uma solução apropriada para cada situação a ser simulada (MARYA et al., 2005).

Uma formulação de elemento refere-se à teoria matemática usada para definir o comportamento do elemento. Todos os elementos do ABAQUS, que são do tipo tensão/deslocamento, estão baseados na descrição de comportamento Lagrangiana ou Euleriana. Na alternativa Euleriana, ou espacial, a descrição dos elementos é fixada no espaço, com o material fluindo através dele. O método Euleriano é utilizado comumente em simulações de mecânica dos fluidos (MARYA et al., 2005).

Para acomodar diferentes tipos de comportamento, alguns tipos de elementos incluem várias formulações diferentes. Por exemplo, os elementos de casca têm três classes: uma satisfatória para análises de casca com propósito geral, outra para cascas finas e ainda outra para cascas espessas. Na figura 14 pode se ver alguns dos tipos de elementos mais utilizados para análises de tensões.

Alguns elementos têm uma formulação padrão, assim como algumas formulações alternativas, como, por exemplo, a formulação híbrida (para lidar com comportamentos incompressíveis ou inextensíveis). O ABAQUS utiliza a formulação de massa agrupada para elementos de baixa ordem. Como consequência o segundo momento de inércia de massa pode divergir dos valores teóricos, especialmente para malhas pobres (ABAQUS v.6.9).

O ABAQUS utiliza uma técnica numérica para integrar várias quantidades sobre o volume de cada elemento, permitindo, desta forma, uma generalidade completa do comportamento do material. Utilizando a quadratura Gaussiana para os

elementos, a resposta do material é avaliada em cada ponto de integração em cada elemento. Quando se utiliza elemento contínuo, deve-se escolher entre integração total ou reduzida, escolha essa que pode ter um efeito significativo na precisão do elemento para um dado problema (ABAQUS v.6.9).

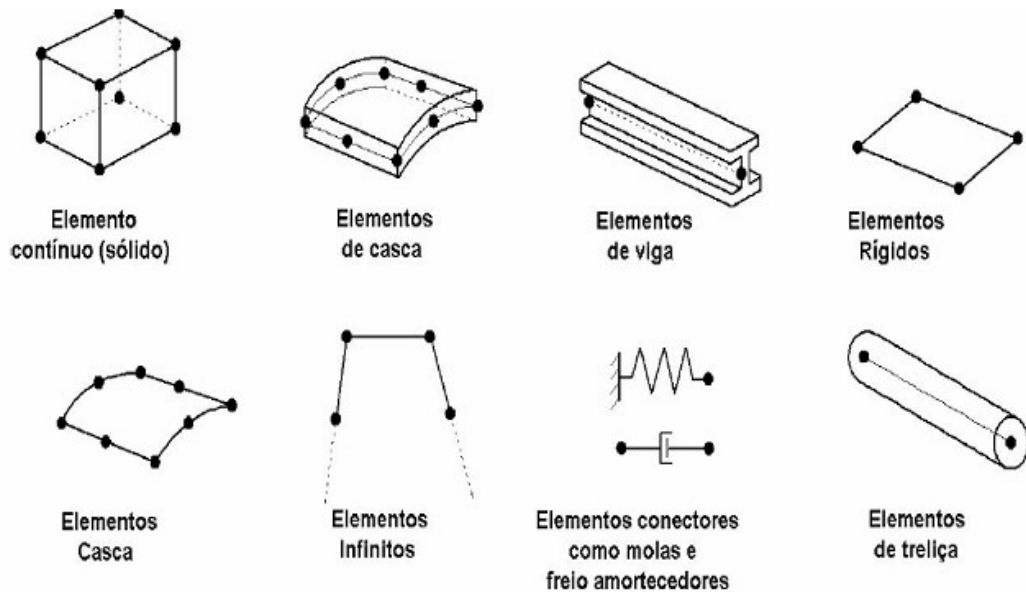
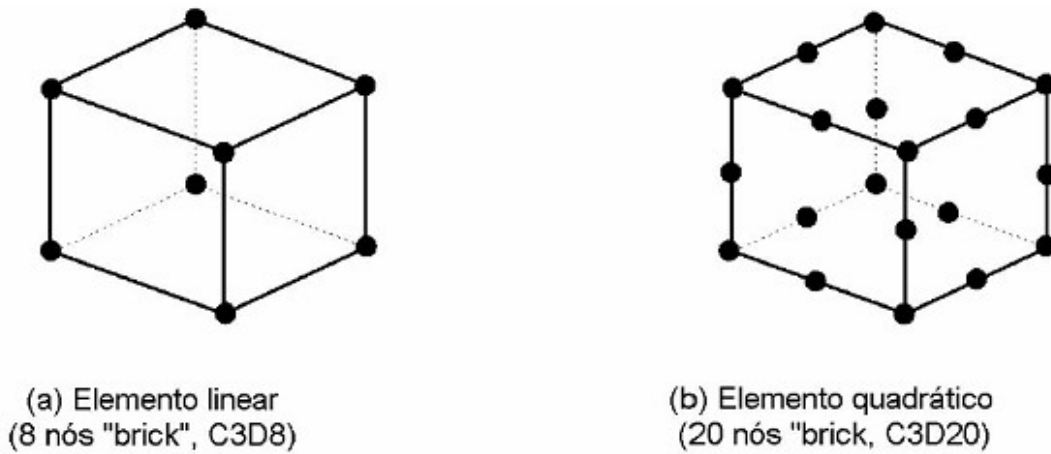


Figura 14: Tipos de elementos comumente utilizados, para análise de tensões (ABAQUS v.6.9).

Deslocamentos ou outros graus de liberdade são calculados em um nó do elemento. Em qualquer outro ponto no elemento, o deslocamento é obtido por interpolação dos deslocamentos nodais. Geralmente, a ordem de interpolação é determinada pelo número de nós utilizado no elemento. Os elementos que tem nós somente em seus vértices, tal como o “brick” de 8 nós mostrado na figura 15, usam interpolação linear em cada direção.



*Figura 15: Elementos brick, linear e quadrático (ABAQUS v.6.9).*

### 2.9.1. Elementos triangulares tetraédricos e prismáticos

Estes elementos são sempre utilizados nos casos de análises do tipo tensão/deslocamento, onde a geometria envolvida é complexa, permitindo com isto que a malha seja a mais próxima possível da geometria real (BARISIC et al, 2008). Na figura 16, pode-se ver esses elementos com a convenção de numeração de nós utilizada no ABAQUS. Os nós dos vértices são numerados primeiro, seguidos então pelos nós do meio, para elementos de segunda ordem.

No caso da simulação deste estudo, devido à geometria da chapa a ser puncionada, a malha foi composta por elementos estruturais axissimétricos quadriláteros com quatro nós e integração reduzida (CAX4R) e triangulares com três nós (CAX3).

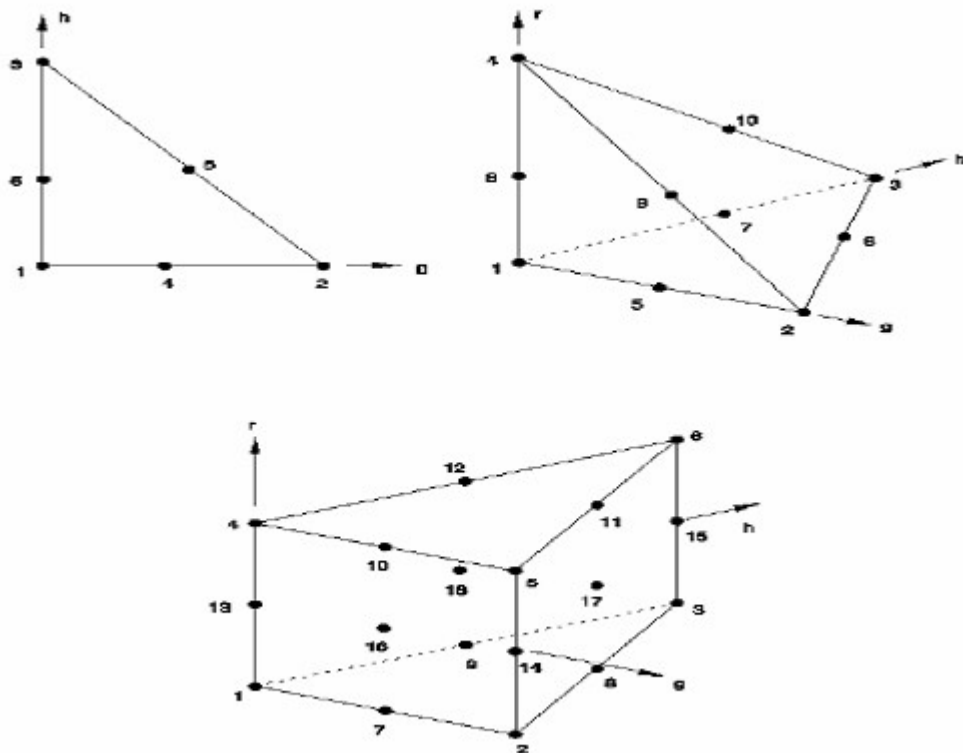


Figura 16: Elementos mestres isoparamétricos (ABAQUS v.6.9).

### 2.9.2. Contato entre superfícies

Existem algumas formulações especiais para elementos finitos que permitem que, em uma análise, seja considerada a possibilidade de contato entre superfícies. Isso implica em uma definição de superfícies de contatos, uma escrava e outra mestra, que, durante a simulação, interagem entre si criando novas condições de contorno para a análise. Durante uma análise envolvendo contato, o ABAQUS tenta, para cada nó da superfície escrava, encontrar o ponto mais perto da superfície mestra do par de contatos, onde a normal à superfície mestra passe através do nó na superfície escrava, conforme visto na figura 17. A interação é, então, discretizada entre o ponto na superfície mestra e o nó escravo (ABAQUS v.6.9).

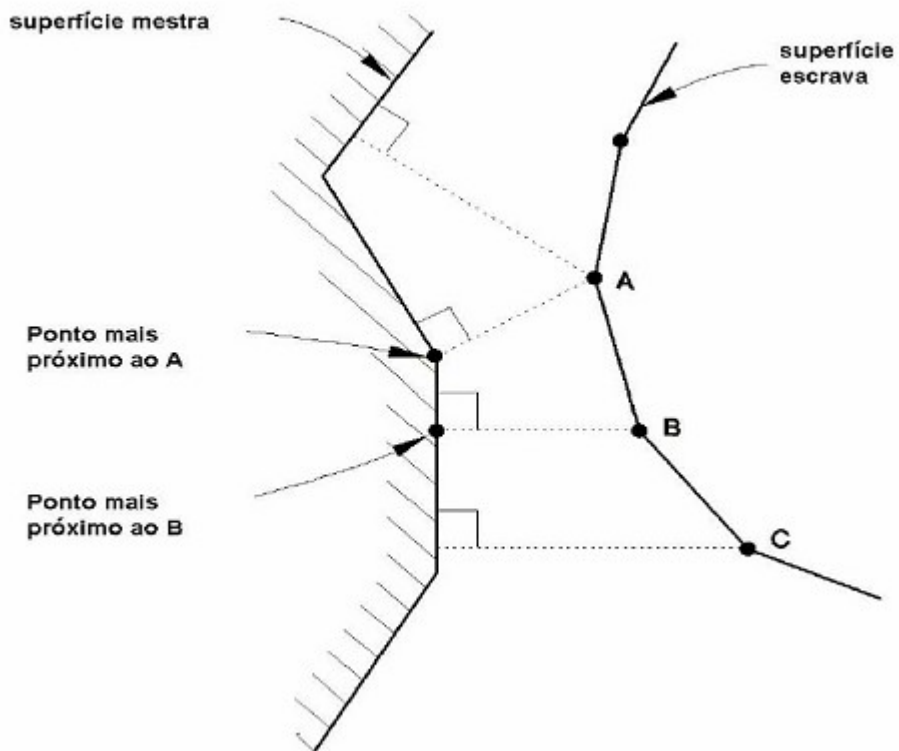


Figura 17: Discretização do contato e interação (ABAQUS v.6.9).

O ABAQUS define as condições de contato entre dois corpos usando um algoritmo, mestre-escravo, rígido. Em problemas mecânicos, tem-se que:

- a) a direção do contato é sempre normal à da superfície mestra.
- b) cada condição de contato potencial é definida em termos de nó escravo e uma superfície mestra,;
- c) os nós escravos são restringidos a não penetrar na superfície mestra; entretanto, os nós da superfície mestra podem penetrar na superfície escrava.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. RESUMO

Um resumo do procedimento experimental pode ser visualizado nas figuras 18 e 19:

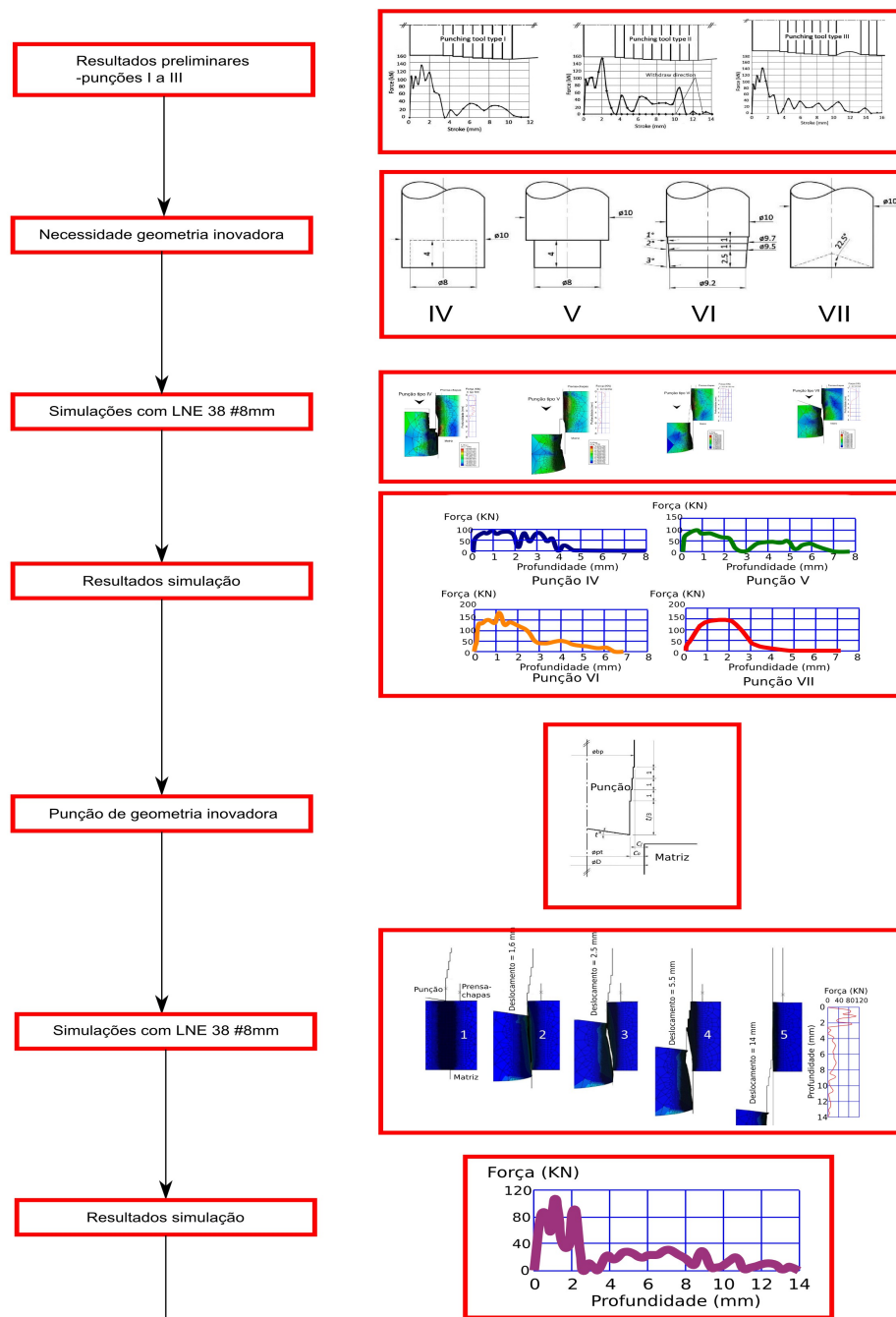


Figura 18: Resumo do procedimento experimental - simulação

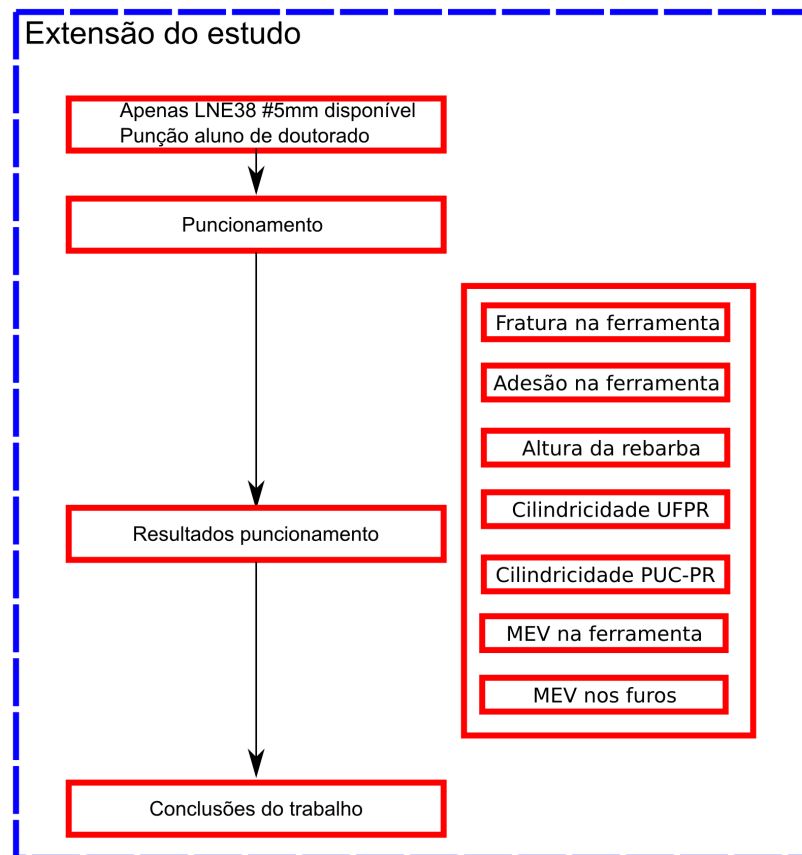


Figura 19: Resumo do procedimento experimental – extensão do estudo

A figura 18 mostra resumidamente o processo experimental. Partindo dos modelos de 3 punções propostos por Marcondes et al. (2008), foram propostas 4 novas geometrias de punção foram feitas as respectivas simulações. Baseado nos resultados dessas simulações foi proposta uma geometria inovadora de punção. Essa geometria inovadora de punção foi então simulada e obteve-se uma curva de força em relação ao deslocamento, bem como um aspecto de superfície da simulação.

A figura 19 mostra uma extensão do estudo no qual um punção foi utilizado para puncionar uma chapa de LNE38 e foram avaliados uma série de furos puncionados, quanto à cilindridade dos furos, altura da rebarba de saída dos furos aspecto interno dos furos, bem como a verificação de fratura, aspecto da fratura e adesão de material na ferramenta.

### 3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS PRELIMINARES – PUNÇÕES I A III

A configuração original experimental e avaliação quantitativa - através da análise da variância - da qualidade da superfície do furo e sua precisão dimensional, como: rugosidade, ângulo de fratura, as temperaturas de ferramenta e degradação da ferramenta, para o novo processo de perfuração através de processo combinado de puncionamento com brochamento foram mostradas por Marcondes et al. (2008). Os dados experimentais foram usados para a validação das simulações numéricas deste trabalho.

Para avaliar a influência efetiva da operação de brochamento da ferramenta desenvolvida por Marcondes et al. (2008) três punções com geometrias diferentes da área de brochamento - usando mesmas condições de plano de cisalhamento e atrito - foram avaliados neste trabalho via FEM. As geometrias das ferramentas I, II e III foram escolhidas por serem relevantes do ponto de vista das variáveis de controle daquele trabalho e suas dimensões são mostradas na figura 20.

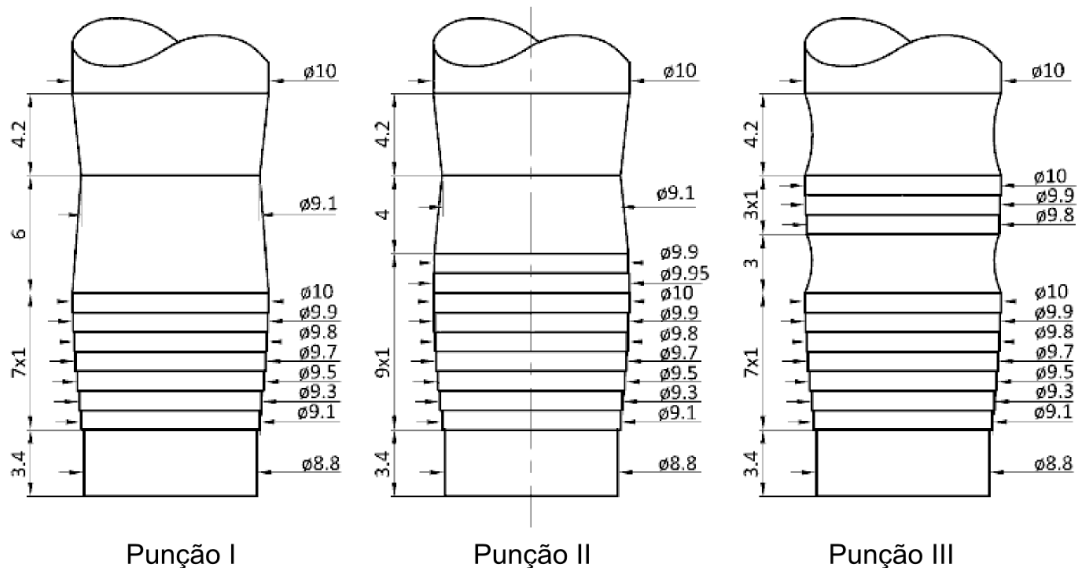


Figura 20: Punções I a III - sentido de puncionamento para baixo (Marcondes et al., 2008)

O punção tipo I tem dentes progressivos apenas na direção de corte, enquanto o punção tipo II tem dentes progressivos na direção de entrada e direção de retirada, e o punção do tipo tipo III tem dentes progressivos na direção de corte

em dois segmentos. Geometricamente, as ferramentas têm 100 mm de comprimento, com diâmetro inicial de 8,8 mm, com o objetivo de fazer furos com 10 mm de diâmetro final. O diâmetro da matriz é 10,02 milímetros, ou seja, a folga entre o diâmetro inicial do punção e da matriz é de cerca de 7,6% da espessura da chapa de cada lado.

A simulação do processo combinado de puncionamento e brochamento foi realizada através do software de FEM ABAQUS/Explicit, usando-se um modelo axi-simétrico. A malha da chapa foi feita com elementos quadrilaterais com quatro nós e integração reduzida (CAX4R) e elementos triangulares com três nós tipo CAX3 (ABAQUS/CAE - 2009). Söderberg (2006) relatou que 128 elementos de malha na espessura da chapa pode proporcionar bons resultados. Neste trabalho, nas áreas submetidas à grandes tensões, como na região de cisalhamento, foram aplicados 128 elementos de malha na espessura da chapa e uma malha menos refinada foi usada grossa para áreas que não estão sob altos níveis de tensão. O punção, matriz e prensa-chapas, foram considerados como superfícies analíticas rígidas. O contato entre a chapa e as ferramentas foi descrito pelo modelo de atrito de Coulomb com um coeficiente de atrito de 0,1 em todas as simulações. A carga no prensa-chapas foi de 10000 N e a velocidade de descida do punção foi de 1 m/s.

O material utilizado para a modelagem da chapa foi um aço de alta resistência (no caso o NBR 6656 - LNE 38) com 8mm de espessura, cujas características já foram mostradas por Eto (2005) e Soares (2009). Este aço foi adotado devido à sua aplicabilidade na indústria pesada de veículos e caminhões, onde a utilização de chapas grossas é preponderante (ETO, 2005) e suas propriedades químicas e mecânicas são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1: Composição química e propriedades mecânicas do NBR6656 (ETO, 2005)**

Material	Composição Química (% em peso)							Propriedades mecânicas			
	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Al máx.	El. de liga	Le min. (MPa)	LR (MPa)	Al mín. (%)	Dobra 180° Calço
<b>NBR6656 (LNE38)</b>	0,1	1,1	0,04	0,03	0,03	0,02	Ti ≥0,08	380/ 530	460/ 600	23	Zero

Os dados da curva limite de conformação (CLC) do material, usados por

Soares (2009) foram modelados no software de elementos finitos (FEM) com diferentes tipos de ferramentas combinadas punção-brocha com diferentes características geométricas

O material foi modelado com o modelo de endurecimento isotrópico de Von Mises, visto na seção 2.8, assumindo as que as propriedades do material são similares em todas as direções. O critério de início de dano foi escolhido de forma a prever o início de danos devido à nucleação, crescimento e coalescência de vazios em materiais dúcteis.

Quanto ao processo de puncionamento e brochamento propriamente dito, os dentes de brochamento do punção tipo I usinam a parede do furo deixando uma região rugosa cônica na extremidade inferior do furo, com cerca de 1 mm e uma pequena rebarba (figura 20-a). Os outros punções, devido à geometria de corte na direção oposta (tipo II) e em duas seções (tipo III) - puxam o material da rebarba dentro do furo durante a retirada do punção. Como pode ser observado (figura 20-a e 20-b), a parede do furo é dividida em duas regiões: a superior, usinada durante o movimento para baixo do punção e a inferior usinada durante a retirada do punção.

A figura 21 mostra que a variação do arranjo e da quantidade dos dentes de brochamento dos punções dos tipos II e III não causou diferença na qualidade da parede do furo e apenas uma pequena diferença na rugosidade foi observada para os furos obtidos com o punção tipo I. No entanto, as diferenças geométricas entre os punções produziram variações na força necessária durante a penetração na chapa. A qualidade da superfície do furo obtido experimentalmente e os dados numéricos mostraram correspondência.

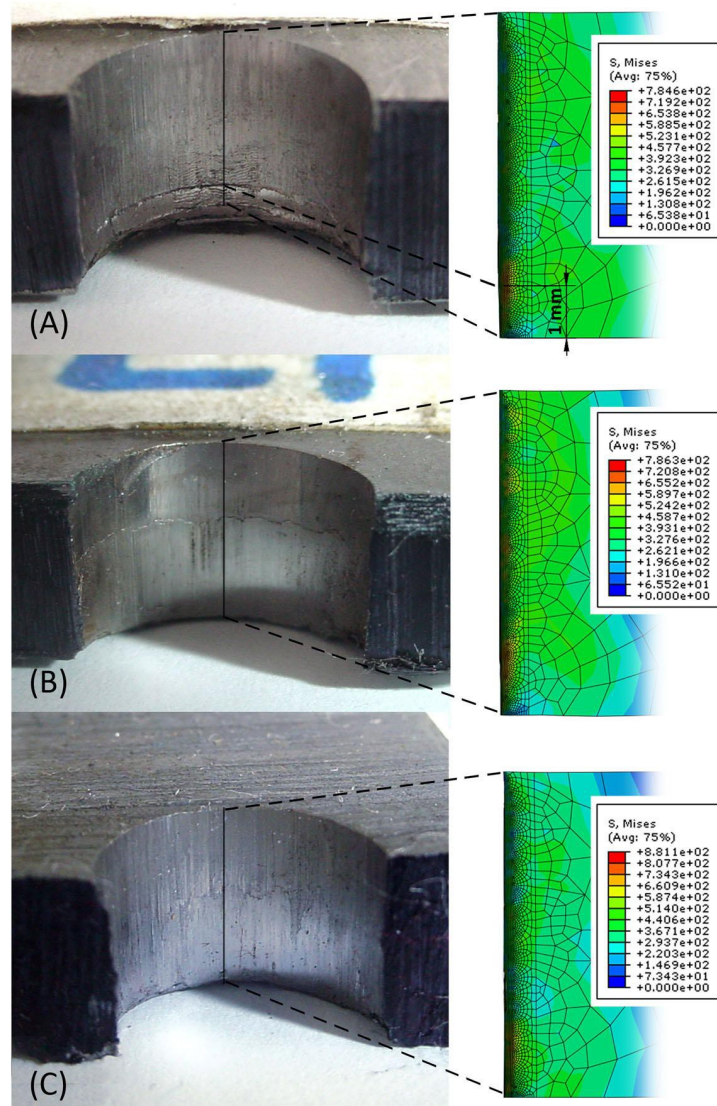


Figura 21: Qualidade dos furos obtidos com os punções tipo I (a), tipo II (b) e tipo III (c).

### 3.3. NOVAS GEOMETRIAS PROPOSTAS – PUNÇÕES IV A VII

Como as geometrias dos ferramentas combinadas de puncionamento e brochamento não mostraram diferenças significativas na qualidade da parede do furo, quatro novos tipos de punção foram propostas por Lajarin et al. (2012), como mostrado na figura 22.

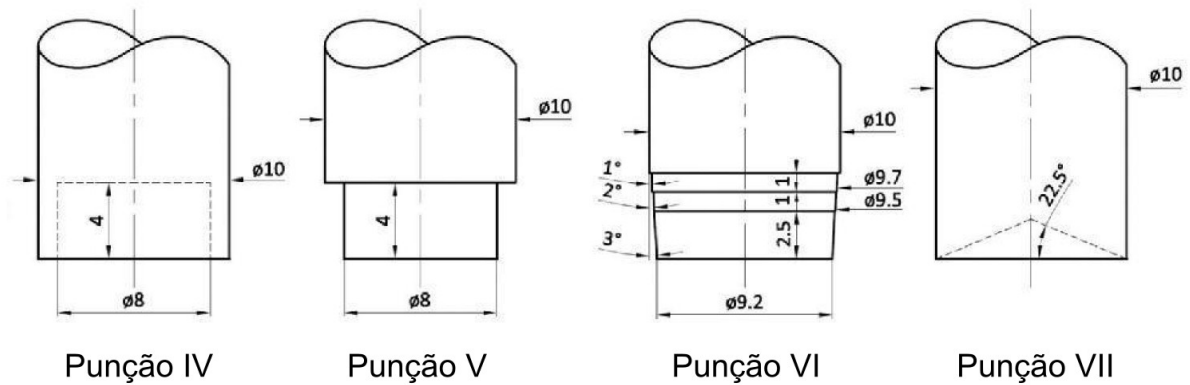


Figura 22: Novas Geometrias de punções IV a VII propostas (adaptado de Lajarin et al. - 2012)

Note-se que o punção tipo IV é um punção com reduzida área da ponta de contato o, tipo V é um punção com uma face plana reduzida (dois passos de corte), tipo VI tem dentes de brochamento cônicos e o tipo VII, tem um corte na ponta com ângulo de  $22,5^\circ$ .

O modelo de elementos finitos foi construído como descrito na seção anterior.

### 3.4. SIMULAÇÃO DOS PUNÇÕES IV A VII

A figura 23 mostra a influência das diferentes geometrias dos punções na parede do furo e do perfil da curva de força de força durante o processo.

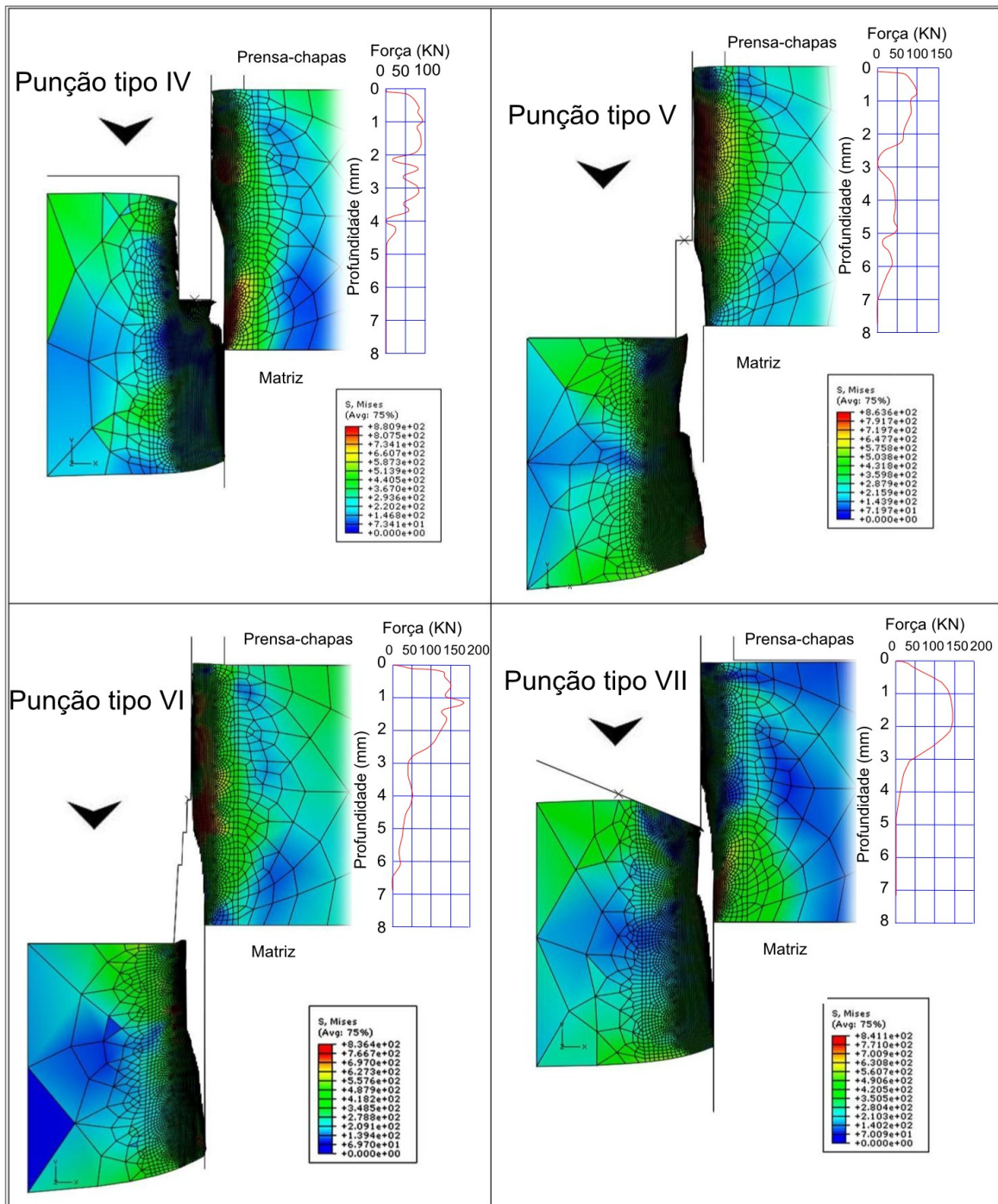


Figura 23: Registros de tela do Abaqus 6.9 das simulações dos punções IV a VII

Note-se que os punções IV e V apresentam pico de força de cerca de 100 kN e a curva Força X Profundidade com picos em alguns pontos. Já os punções VI e VII apresentam curva mais homogênea, porém com picos maiores (de 180 e 150 kN

respectivamente). Note-se também que o punção VII, devido à inclinação de sua ponta, apresenta uma rampa inicial de força relativamente suave até 0,8mm de penetração, se comparados à subida súbita de força dos punções IV, V e VI.

### 3.5. PUNÇÃO INOVADOR

Com base nos resultados da etapa anterior, uma geometria nova de punção que combina as principais vantagens dos punções previamente estudados foi proposta, conforme visto na figura 24. O formato na ponta do punção foi projetado para facilitar a penetração inicial, produzindo uma curva de força mais homogênea. O ângulo de corte é  $22,5^\circ$ , e  $t$  é a espessura da chapa (no caso 8mm para a simulação). Para esta nova ferramenta, quatro dentes foram colocados no seu corpo a fim de se usinar o material restante na parede do furo e gradualmente diminuir a conicidade resultante à medida que o punção avança. Além disso, na área perto da ponta do punção, foi projetado uma região reta com  $1/3$  de espessura da chapa. Note-se que com esse comprimento, o brochamento ocorre somente após a ocorrência do efeito de estouro (“blow-out”), geralmente após  $1/3$  de penetração do punção (nesse caso, cerca de 2,6 mm de curso). O diâmetro da matriz ( $\varnothing D$ ) foi definido pela eq. (3.1).

$$\varnothing D = \varnothing bp + Cf \quad (3.1)$$

Onde  $\varnothing bp$  é o diâmetro maior do punção e  $Cf$  é a folga da matriz de 0,2% para cada lado (0,016 mm) -  $\varnothing D$  de 10,032 milímetros. O  $\varnothing bp$  foi definido para perfurar furos de 10 mm de diâmetro em chapas de 8 mm de espessura. O diâmetro na ponta do punção foi definida de acordo com a eq. (3.2).

$$\varnothing pt = \varnothing D - (Co*2) \quad (3.2)$$

Quando a folga inicial de cada lado entre o punção e a região da ponta do punção ( $Co$ ) foi definida como 7%, resultando em 8,91 mm ( $\varnothing pt$ ). Na região entre  $\varnothing bp - \varnothing pt$ , quatro dentes de brochamento foram definidos com o objetivo de usinar o material restante, assegurando a cilindricidade do furo.

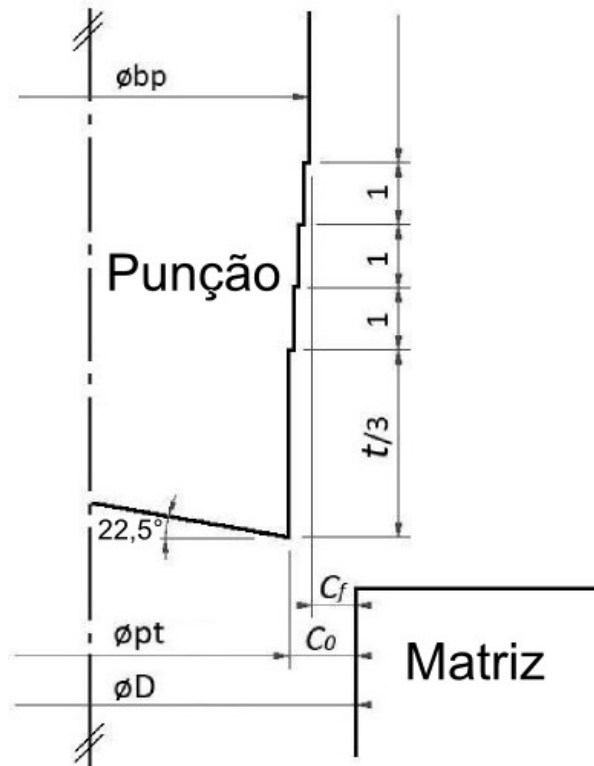


Figura 24: Punção de geometria inovadora proposto como consequência dos estudos anteriores.

### 3.6. SIMULAÇÃO DO PUNÇÃO INOVADOR

A figura 25 mostra a ação do formato proposto em cinco momentos distintos. Pode-se observar que aos 2,5 mm de curso do punção, cerca de 1/3 da espessura da chapa - as rachaduras superior e inferior encontram-se e o efeito “blow-out” (estouro) ocorre. Neste momento, a folga entre o punção e a matriz foi de 7%, causando um ângulo maior de fratura.

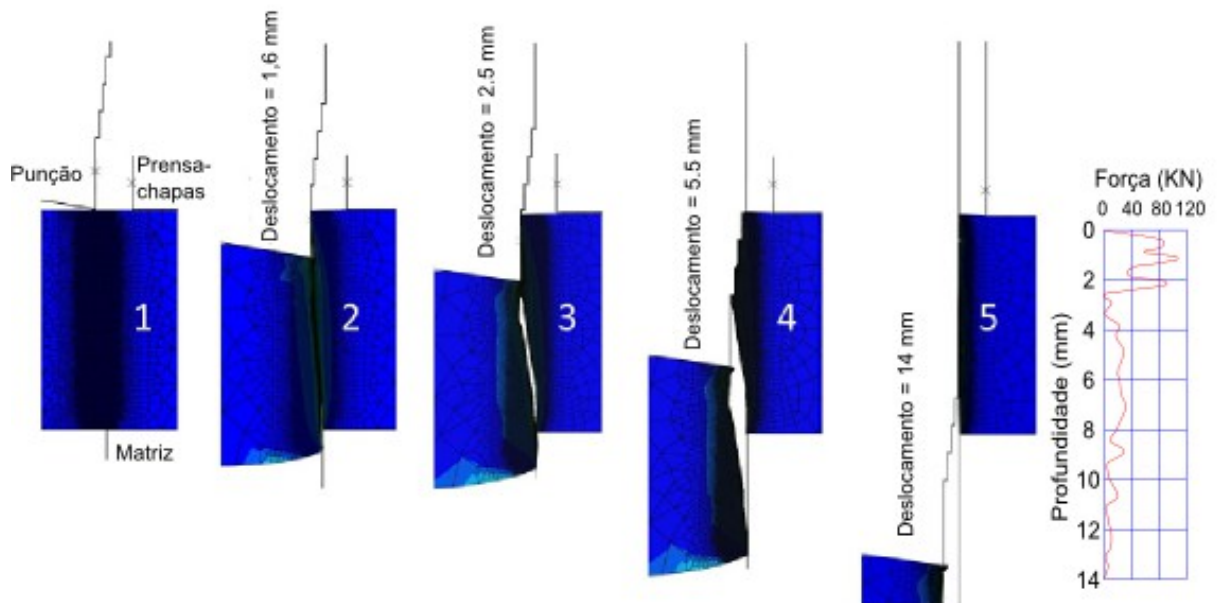


Figura 25: Cinco etapas do puncionamento com o punção proposto.

Logo após o “blow-out”, o primeiro dente inicia a usinagem da parede do furo. Após 5,5 mm de penetração do punção na chapa, o último dente de brochamento remove o material restante. Neste momento, a folga entre o punção e a matriz é de 0,2%, o que produz um furo com muito boa cilindricidade.

### 3.7. ENSAIOS PRÁTICOS – EXTENSÃO DO ESTUDO

Após a realização das simulações com elementos finitos, fez-se um levantamento do material que estava disponível no laboratório e foi constatado que um punção semelhante ao punção de geometria inovadora, que outro aluno de doutorado havia confeccionado para seus estudos, baseado em Lajarin et al. (2012), estava disponível e resolveu-se conduzir alguns ensaios práticos com esse punção.

O material disponível para para a perfuração das chapas era o LNE 38, porém ele estava disponível apenas na espessura de 5 mm.

Os ensaios práticos foram realizados em uma prensa excêntrica Mahnke de 65 T de capacidade e foram perfurados ao todo 14 corpos de prova, antes de se constatar que o punção havia trincado.

Primeiramente, foram medidas as alturas das rebarbas com relógio comparador. Em seguida, foram realizadas medições da cilindricidade na máquina de medição por coordenadas no laboratório de metrologia da UFPR. Após isso, foi medida a cilindricidade de peças no início e no final da série de CPs puncionados em um equipamento próprio para a medição de circularidade e cilindricidade, e ao final foram feitos registros por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de peças no início e no final da série de CPs, além da própria ferramenta.

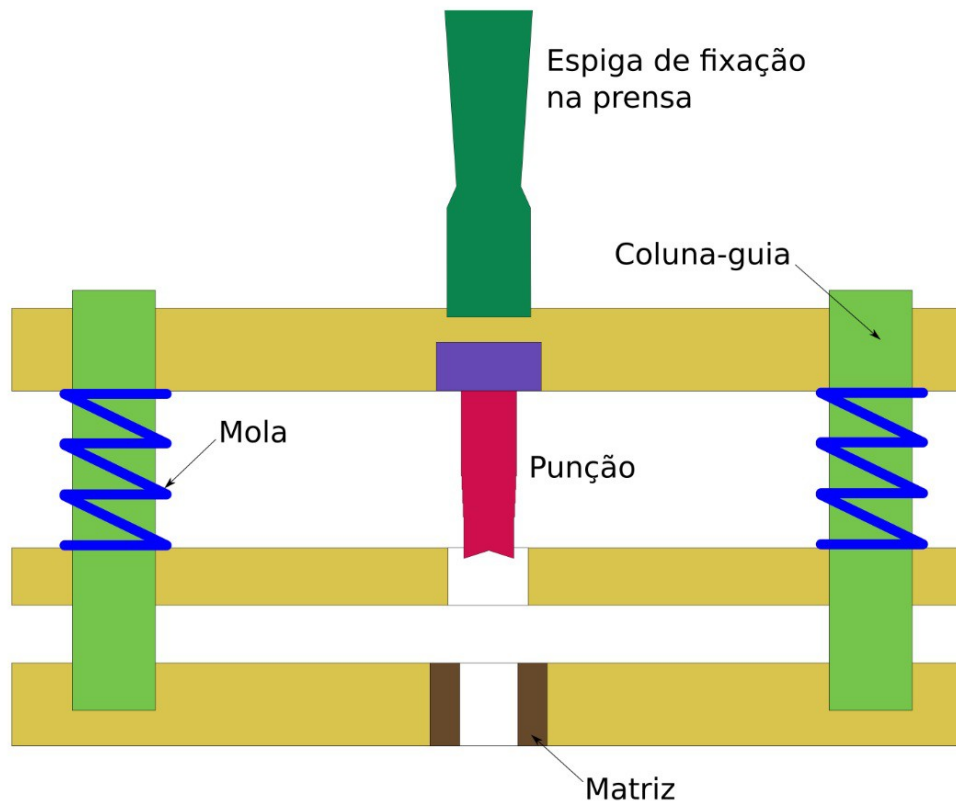
### 3.7.1. Ensaio de puncionamento

Os ensaios práticos de puncionamento foram realizados em uma prensa excêntrica Mahnke com capacidade para 65 toneladas, conforme visto na figura 26.



*Figura 26: Prensa excêntrica utilizada nos ensaios práticos de puncionamento.*

O punção foi montado e o ferramental foi instalado na prensa, conforme visto na figura 27:



*Figura 27: Diagrama de fixação do ferramental*

Os corpos de prova disponíveis com espessura de 5 mm foram posicionados para o puncionamento e em seguida a máquina foi acionada, tendo como produto os corpos de prova puncionados, cavacos e retalhos conforme visto nas duas figuras 28 e 29 a seguir:



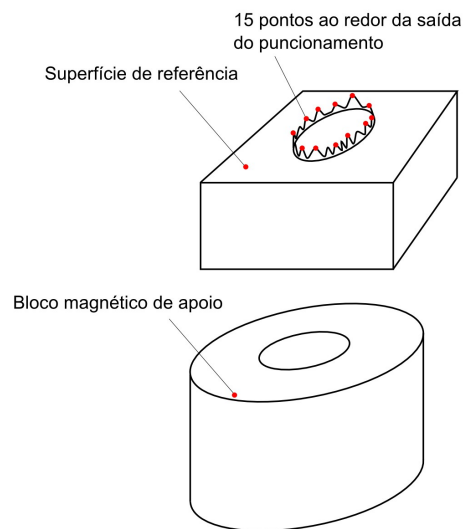
*Figura 28: Corpos de prova puncionados*



*Figura 29: Cavacos (em cima) e retalhos (embaixo) do processo de puncionamento*

### 3.7.2. Medição da altura da rebarba

Então, foi medida a altura da rebarba de saída dos corpos de prova com um relógio comparador Mitutoyo, conforme a figura 30:



*Figura 30: Diagrama da medição da altura da rebarba*

### 3.7.3. Medição da cilindricidade em máquina de medição por coordenadas

Em seguida os corpos de prova foram montados na máquina de medição por coordenadas localizada no laboratório de metrologia da UFPR da maneira mostrada na figura 31.

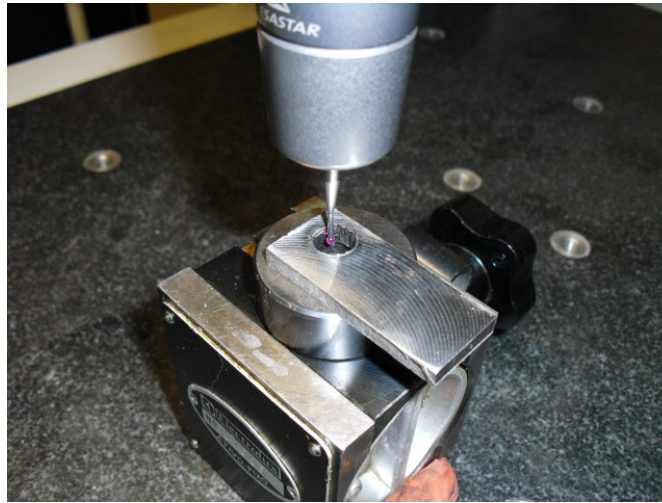


Figura 31: Fixação de CP na máquina de medição por coordenadas.

Em seguida, foi medida a cilíndricidade, utilizando-se 20 pontos em 3 planos de referência, conforme a figura 32:

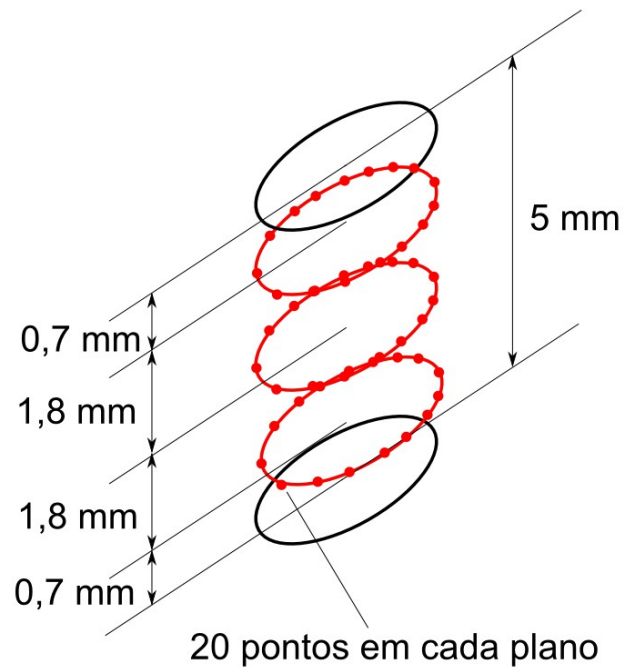


Figura 32: Diagrama da medição na máquina de medição por coordenadas.

Cada plano foi medido 3 vezes, totalizando 126 medidas nas 14 amostras (3

planos X 3 medidas por plano X 14 amostras).

O formato do relatório é como mostra a figura 33:

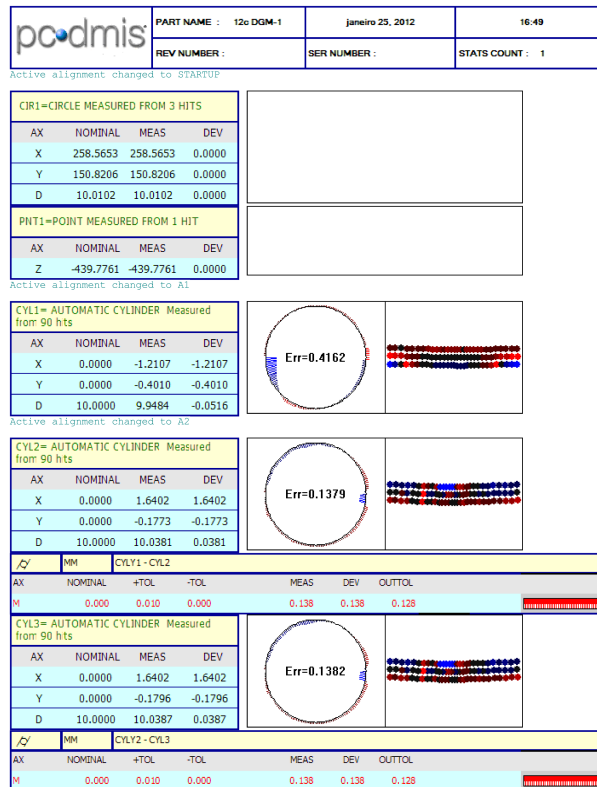


Figura 33: Formato relatório de cilindridade

### 3.7.4. Medição da cilindridade em equipamento de medição de cilindridade e circularidade

A seguir, foi medida a cilindridade de CPs puncionados no início e no final da série, utilizando-se como referência os 3 planos utilizados na seção anterior no equipamento de medição de cilindridade e circularidade, no laboratório de metrologia da PUCPR, conforme visto na figura 34 .

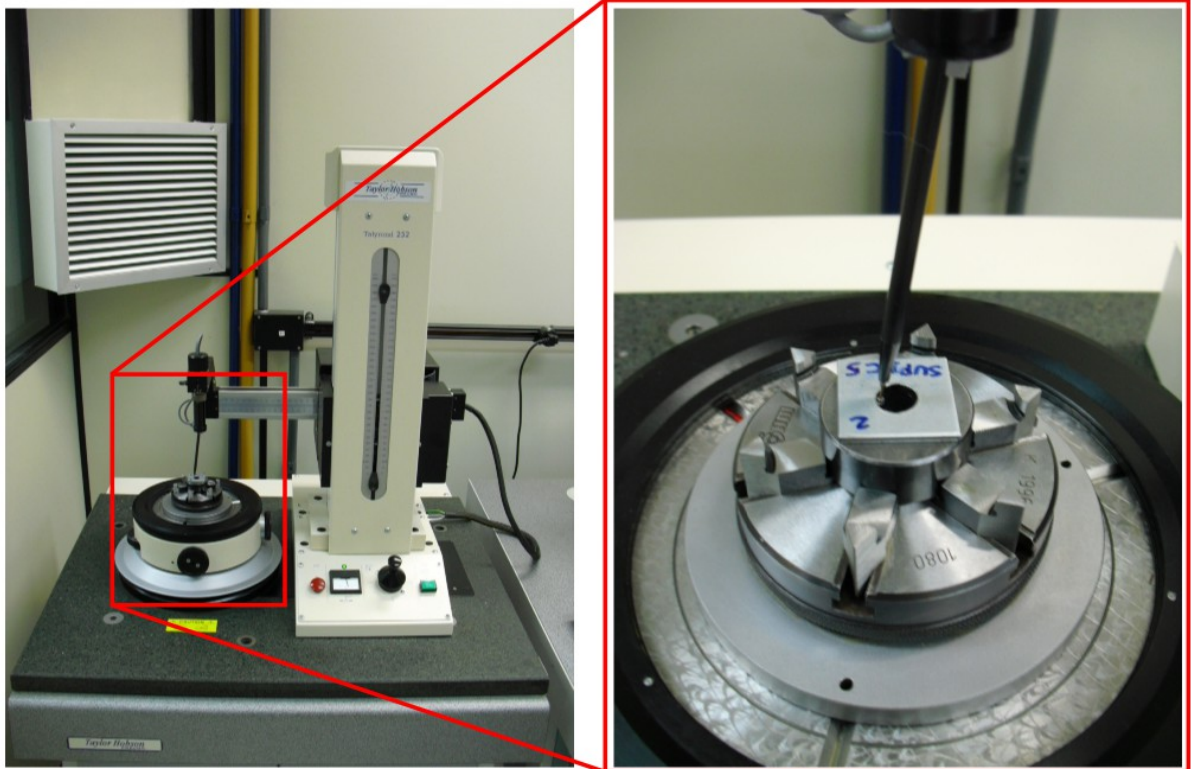
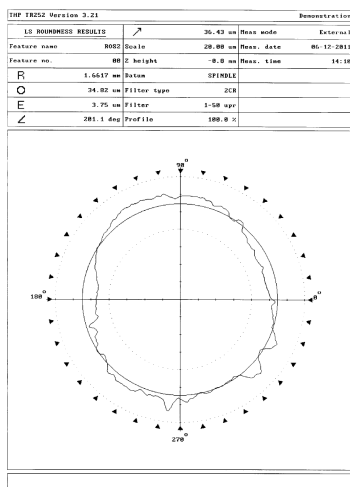
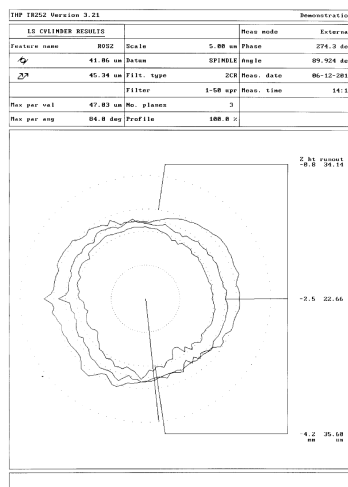


Figura 34: Equipamento de medição de cilindridade e fixação da amostra (no detalhe).

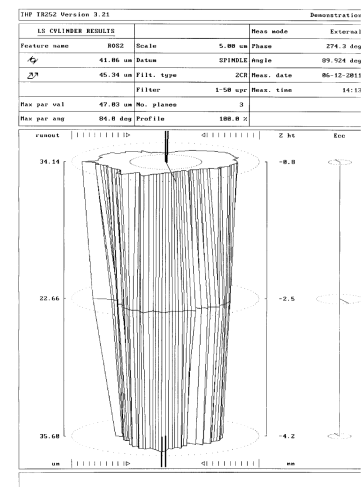
O formato do relatório pode ser em 3 formatos: circularidade (para cada plano), cilindridade planificada e cilindridade visualizada em 3D, como visto na figura 35:



Circularidade



Cilindridade planificada



Cilindridade (3D)

Figura 35: Formatos dos relatórios das medições

### 3.7.5. Registro com microscopia eletrônica de varredura – MEV

Em seguida os CPs números 1 e 14, além do punção utilizado foram cortados, conforme figura a seguir e foram registradas imagens das superfícies internas dos furos desses CPs puncionados no início e no final da série e da ferramenta de puncionamento, conforme mostrado nas figuras 36 e 37.

Região a ser visualizada

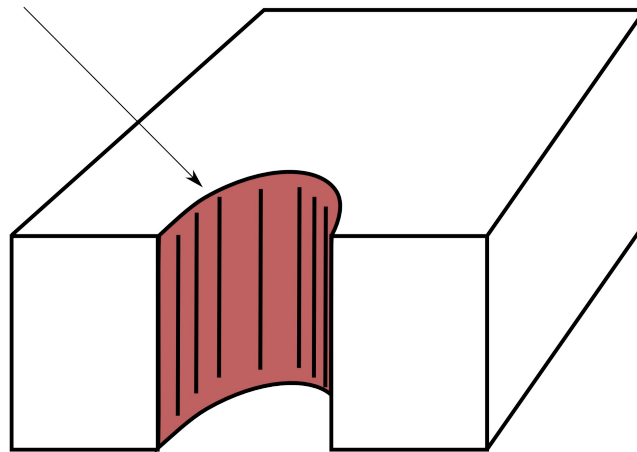


Figura 36: Região a ser visualizada dos corpos de prova 1 e 14

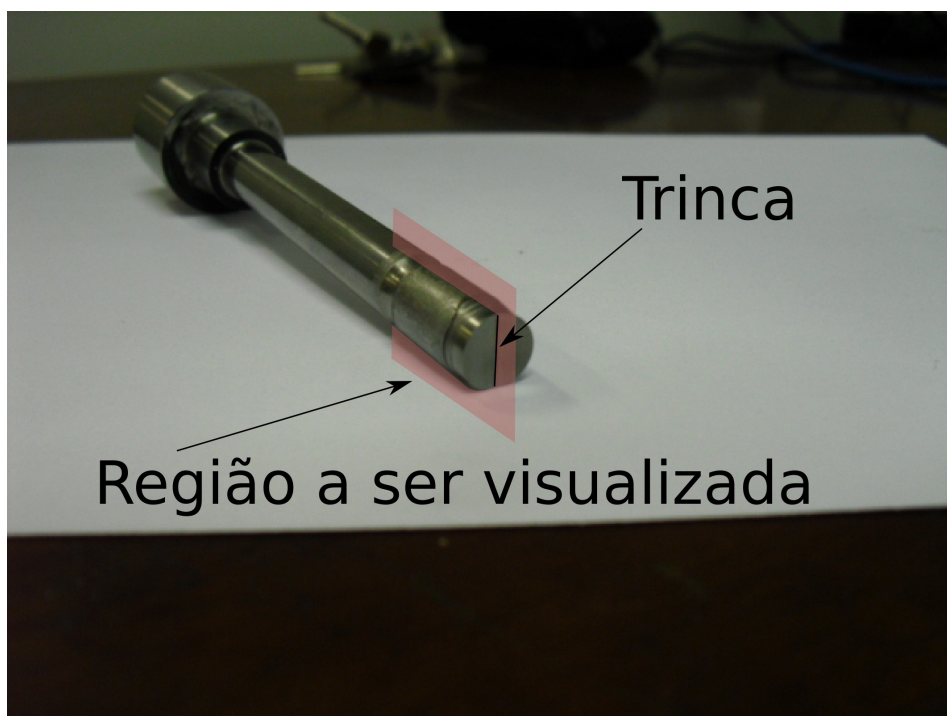
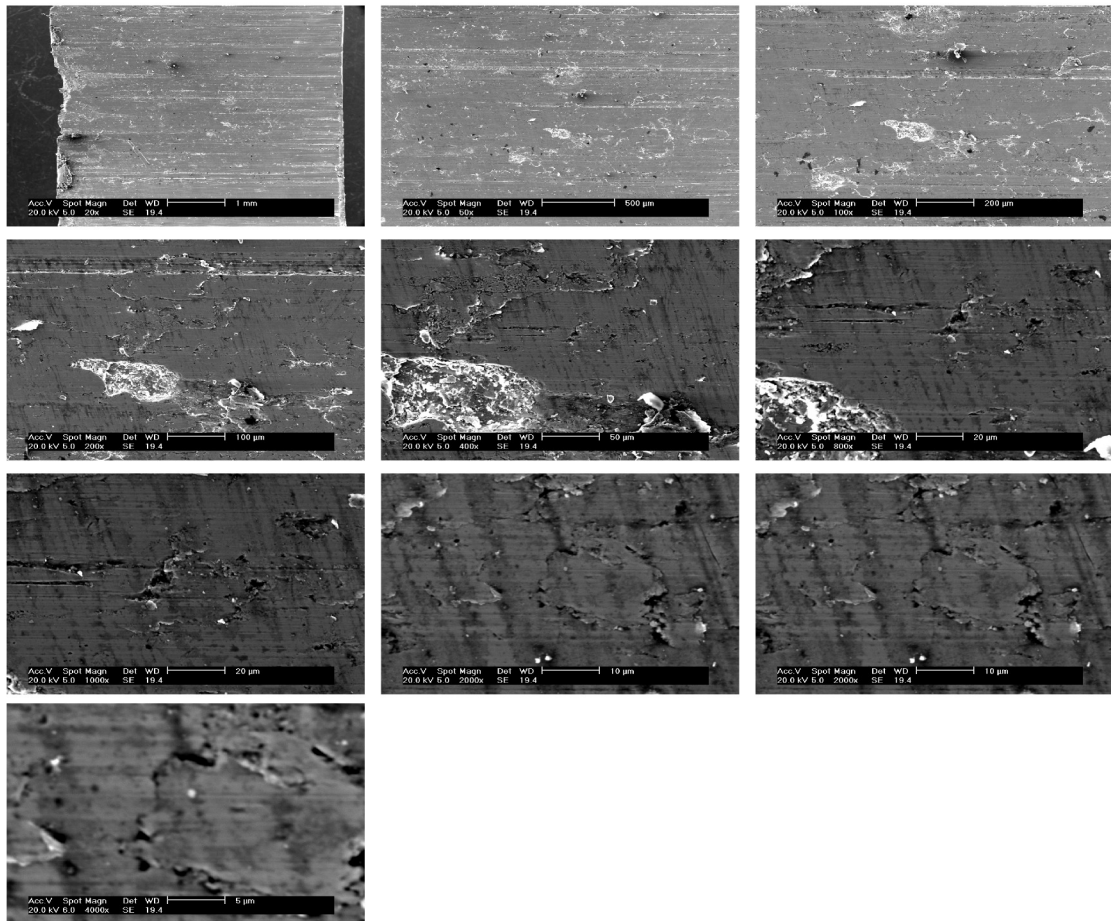


Figura 37: Região a ser visualizada do punção trincado

O equipamento de MEV utilizado foi o EDAX, juntamente com o software MICROSCOPE CONTROL e foram utilizadas ampliações de 20X, 50X, 100X, 200X, 400X, 800X, 1000X, 2000X, 3000X e 4000X, conforme mostrado na figura 38.



*Figura 38: Sequência de ampliações da MEV de uma amostra, em ordem crescente, da esquerda para a direita e de cima para baixo.*

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. SIMULAÇÕES PRELIMINARES

A figura a seguir mostra o diagrama força-curso para os três tipos de punções. Para todos os casos estudados, o pico de força ocorreu pouco antes do início da rachadura na borda da matriz. Em todos os casos, o pico de força estava em cerca de 140 kN. Após o pico de força máxima, as rachaduras se propagam e se encontram, produzindo o efeito “blow-out”. Em todos os casos, a falha estava em torno de 2,6 mm de curso (1/3 da espessura da chapa). A folga entre punção e matriz acima de 7% levou a um maior ângulo de fratura. Após o efeito “blow-out”, os dentes de brochamento começam a usinar a parede do furo e melhorar a sua circularidade. A atuação dos dentes de brochamento também mostrou variação sobre a força necessária. Os dados do punção tipo II ilustram um segundo pico de força que ocorre quando ocorre a usinagem do último dente na parede do furo. É digno de nota que punção tipo II tem dois dentes, a fim de usinar a parede do furo durante a retirada do punção.

As simulações numéricas com punções I, II e III mostraram que a configuração de dentes de brochamento não causou diferença significativa na qualidade da parede do furo e no perfil de forças, mostrado na figura 39.

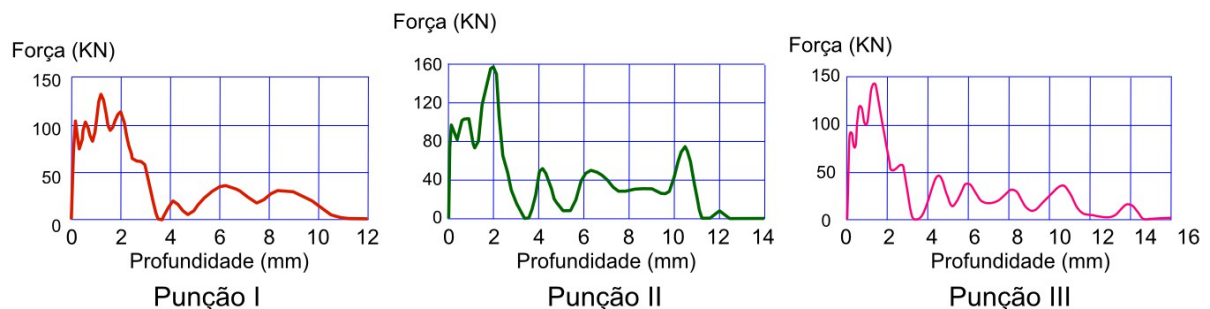


Figura 39: Perfil de forças dos punções I a III - etapa preliminar (adaptado de Marcondes et al. 2008)

A curva de força X profundidade mostrou apenas uma ligeira variação da

força no início da retirada do punção, possivelmente devido ao fato de os dentes projetados para usinar durante retirada não estarem agindo como o esperado, mas puxando material da rebarba para dentro do furo.

De acordo com os resultados da simulação, furos com bom acabamento foram observados, mas com poucas diferenças entre eles e com pequenas diferenças na distribuição de força. Aparentemente, a configuração de dentes em um ou dois estágios não foi eficaz, ou seja, na usinagem inicial ou durante a retirada do punção. Isso indica que as diferenças mais significativas nos resultados obtidos por Marcondes et al. (2008) foram devido à combinação com outras variáveis, tais como lubrificação.

#### **4.2. NOVAS GEOMETRIAS PROPOSTAS – PUNÇÕES IV A VII**

No entanto, com os punções IV a VII, foi possível observar a real influência da geometria dos punções na aresta cisalhada, tais como: (i) a suavidade da curva da força e distribuição de energia mais uniforme causada pelo punção tipo VII, (ii) os mais baixos níveis de força que foi alcançado com os punções IV e V, devido à menor área em contato com a chapa até a ocorrência da fratura e (iii) a grande área de polimento produzida pelo punção VI evidenciada pelo perfil da curva após 3 mm de profundidade, a qual foi alcançada devido à uma maior folga na ponta do punção, ou seja, foi produzido um ângulo maior de fratura que mantém mais material que é gradualmente removido pela penetração dos três dentes de brochamento. Os perfis de força X profundidade de cada um dos punções está na figura 40, mostrada a seguir.

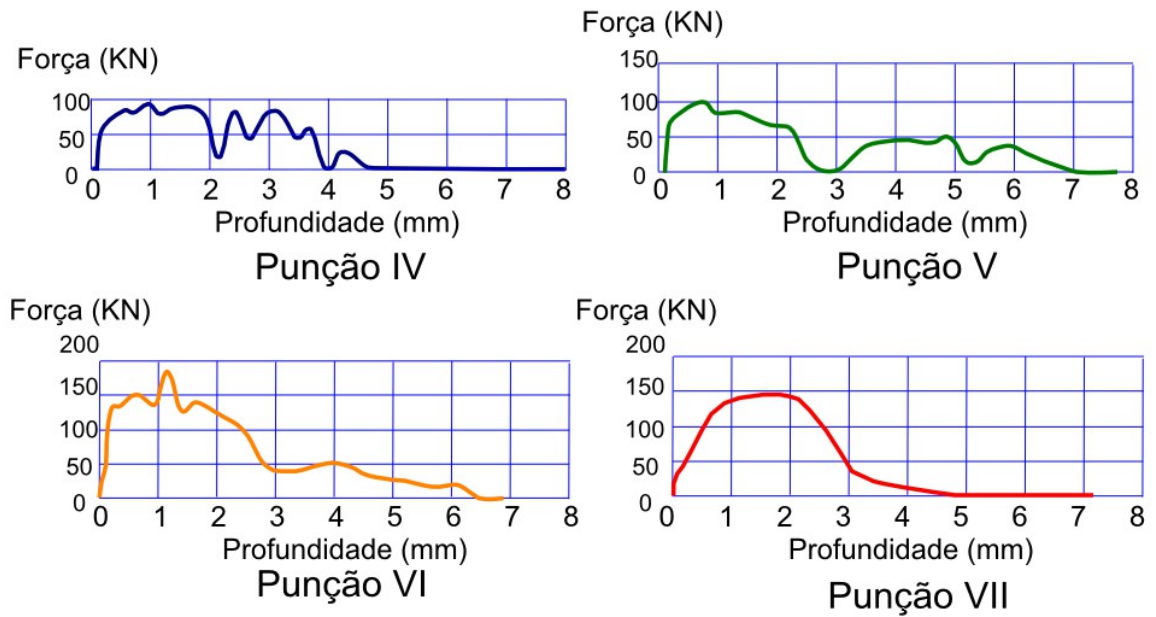


Figura 40: Perfis de força dos punções IV a VII

E a comparação entre eles está na figura 41.

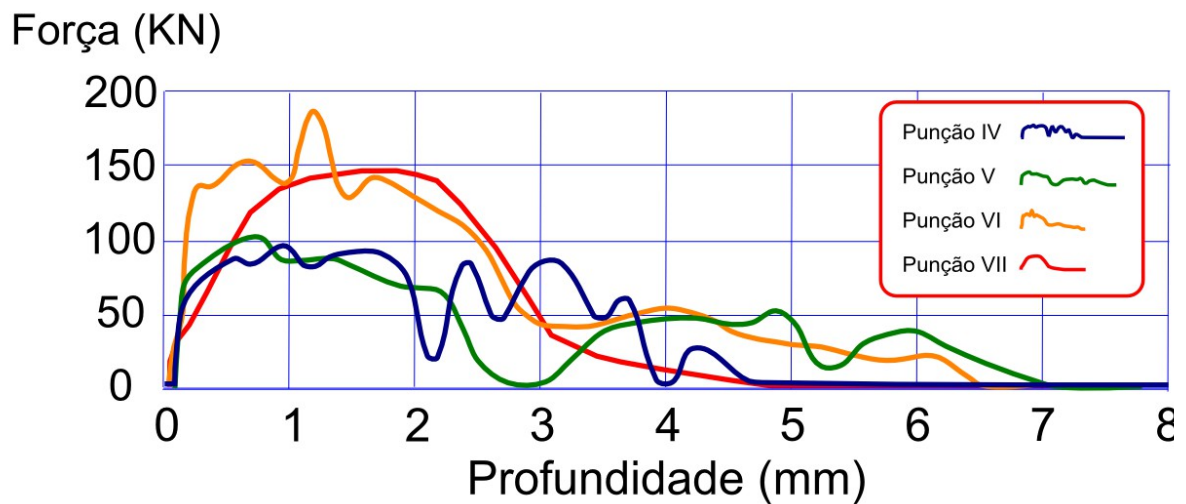


Figura 41: Sobreposição das curvas de força dos punções IV a VII

As 2 figuras anteriores mostram a influência das geometrias diferentes dos punções na parede do furo e do perfil da curva de força de força durante o processo. Os punções dos tipos IV, V e VI mostraram a força máxima a cerca de 1 mm de penetração na chapa, ou seja, o instante antes da propagação das trincas superiores e inferiores.

O punção tipo VII produziu um perfil de força mais homogêneo e com rampa inicial mais suave, com o pico de força situado aos 2 mm de curso - sem mudanças bruscas no perfil da curva de força. Essa característica sugere uma operação de corte suave propiciada pelo ângulo na ponta. Além disso, a geometria mostrou uma distribuição de energia mais uniforme. Para os punções do tipo IV, V e VI, o efeito “blow-out” era esperado em cerca de 1/3 de espessura (2,6 mm). No entanto, provavelmente devido à sua área de ponta reduzida, um efeito súbito de “blow-out” foi produzido após 2 mm de penetração da ferramenta na chapa.

Os dados de força para a penetração para os punções do tipo IV e V, mostraram forças menores, com picos de valor máximo de 90 e 100 kN, respectivamente, o que é provavelmente devido à menor área em contato com a chapa até a ocorrência da fratura.

Os punções dos tipos IV, V e VI, apresentaram perfis da curva de força bastante diferentes do que mostrou o punção VII, o que é justificado pela maior complexidade de suas geometrias. O punção VI, por exemplo, aos poucos penetra a chapa com três dentes de brochamento agindo na parede do furo. O início da rachadura inferior foi precedido por um pico de força de 180 kN (aos 1,2 mm de curso). A conicidade da ponta do punção faz a ponta principal ter um diâmetro menor ( $\varnothing 9.2$  mm na ponta do perfurador) e, conseqüentemente, uma maior folga entre punção e a matriz, com 5% (0,4 mm). Esta folga maior atrasa o início da formação da trinca inferior e também produz um ângulo de fratura maior. No entanto, após a fratura total - 1/3 de espessura - os dentes de brochamento restantes usinam a parede do furo, produzindo uma região cilíndrica maior. Note-se que o bom desempenho dos dentes de brochamento foi mostrado no perfil da curva de força do punção tipo VI.

### 4.3. SIMULAÇÃO DO PUNÇÃO INOVADOR

A figura 42 mostra a ação do formato proposto em cinco momentos distintos. Pode-se observar que aos 2,5 mm de curso do punção, cerca de 1/3 da espessura da chapa - as rachaduras superior e inferior encontram-se e o efeito “blow-out” (estouro) ocorre. Neste momento, a folga entre o punção e a matriz foi de 7%, causando um ângulo maior de fratura.

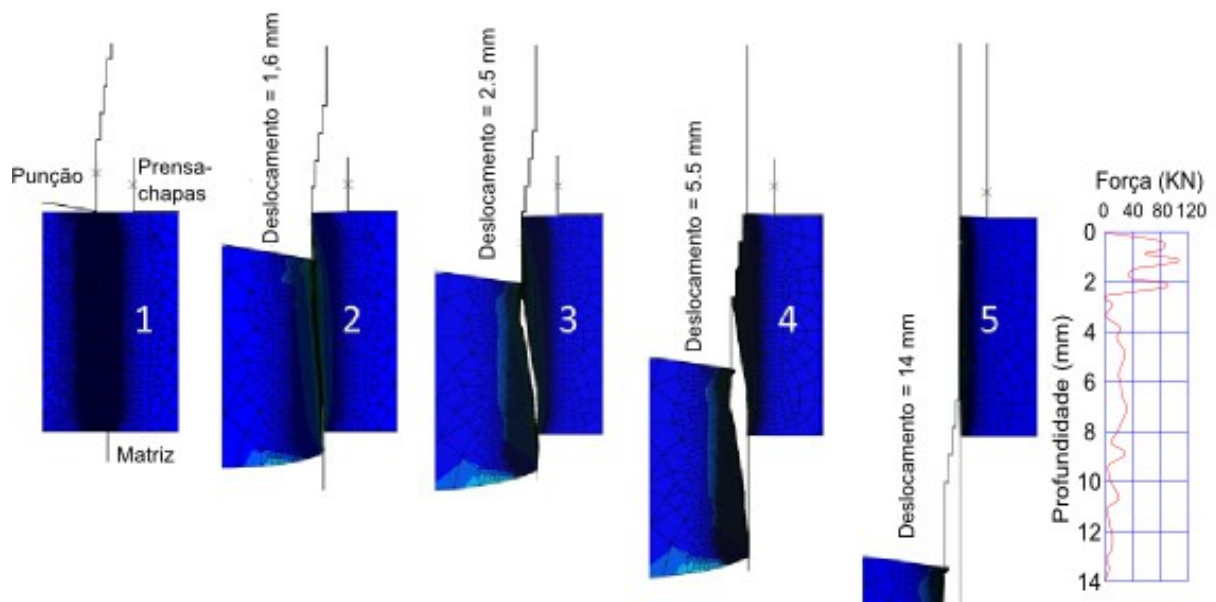


Figura 42: Cinco etapas do puncionamento com o punção proposto.

Logo após o “blow-out”, o primeiro dente inicia a usinagem da parede do furo. Após 5,5 mm de penetração do punção na chapa, o último dente de brochamento remove o material restante. Neste momento, a folga entre o punção e a matriz é de 0,2%, o que produz um furo com muito boa cilindricidade.

A variação progressiva da folga proposto para este punção, iniciando em 7% em seu início até 0,2% ao seu final é crucial, porque a maior folga (7%) proposta inicialmente produz um ângulo maior de fratura e deixa uma grande quantidade de material a ser removida pelos dentes de brochamento. A redução progressiva da folga durante o processo propicia uma usinagem com o último dente da brocha, com

uma folga de apenas 0,2% garantindo a remoção da zona cônica e a cilindridade do furo, conforme visto na 5ª etapa da figura anterior.

Além de reduzir a força do puncionamento para um máximo de 100 kN, a ação progressiva dos dentes de brochamento remove o material com menor força, conforme visto na figura 43.

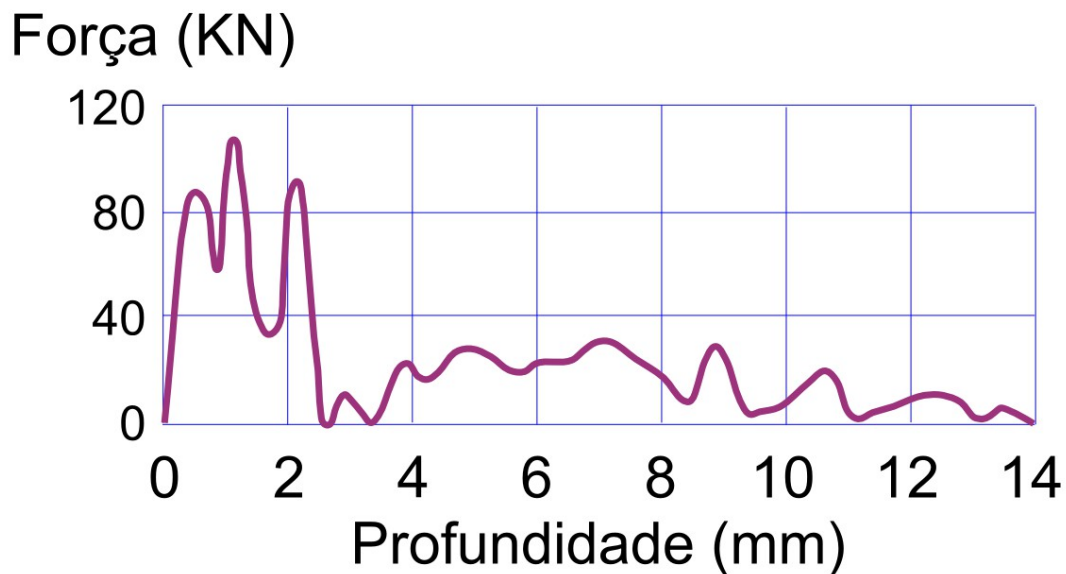


Figura 43: Perfil de força do punção inovador

#### 4.4. ENSAIO DE PUNCIONAMENTO – ASPECTOS VISUAIS

Após a simulação procedeu-se ao puncionamento do material existente com um punção de outro aluno de doutorado, confeccionado com a mesma geometria do punção inovador que foi utilizado em outro estudo e com o material LNE 38 disponível (na espessura de 5 mm).

Visualmente, se comparando a superfície interna dos furos, houve uma degradação da qualidade interna de sua superfície da 1ª amostra puncionada até a última, a 14ª, conforme visto na figura 44.



*Figura 44: Amostras puncionadas: à esquerda, CP número 1, à direita CP número 14*

Na fotografia anterior, note-se que a superfície interna do furo da 1ª amostra puncionada tem um aspecto muito mais liso e brilhante do que a superfície interna do furo da 14ª amostra puncionada.

Provavelmente isso se deu devido à adesão de material junto ao punção, mudando a geometria do mesmo, impedindo a ação dos dentes de brochamento à medida que mais material foi ficando aderido à superfície do punção.

Com relação ao punção, após o puncionamento da 14ª amostra, notou-se que o mesmo encontrava-se trincado e com adesão, motivo pelo qual encerrou-se a série de experimentos práticos, conforme visto na figura 45.

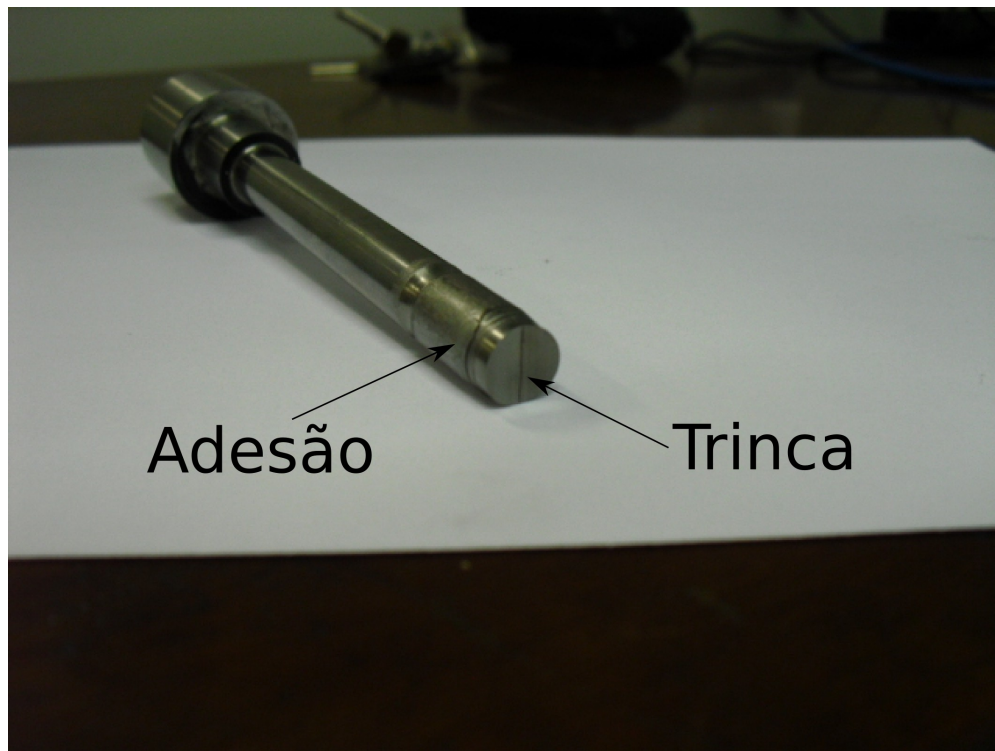


Figura 45: Detalhe da adesão de material e da trinca no punção

#### 4.5. MEDIÇÃO DA ALTURA DA REBARBA

Com relação à altura da rebarba, a degradação do aspecto visual foi acompanhada pelo aumento da altura da rebarba de saída. Conforme mostrado na figura 46.

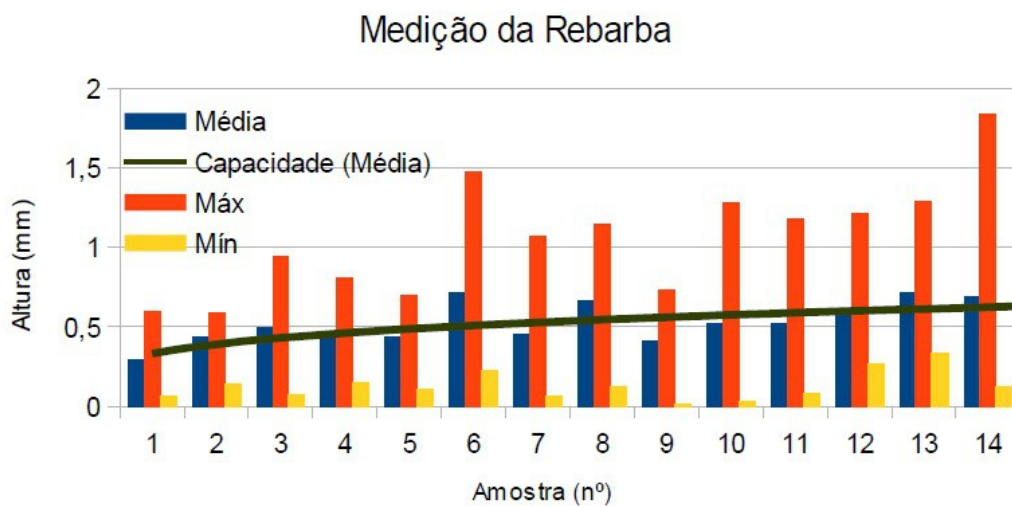


Figura 46: Altura de rebarba das amostras

Há clara tendência de aumento das médias na altura das rebarbas, assim como aumento da dispersão entre altura máxima e mínima da rebarba, provavelmente devido à adesão de material e alteração dos gumes de corte dos dentes de brochamento.

#### 4.6. MEDIÇÃO DA CILINDRICIDADE EM MÁQUINA DE MEDIÇÃO DE COORDENADAS

Os resultados da medição da cilindridade na máquina de medição por coordenadas são mostrados na figura 47:

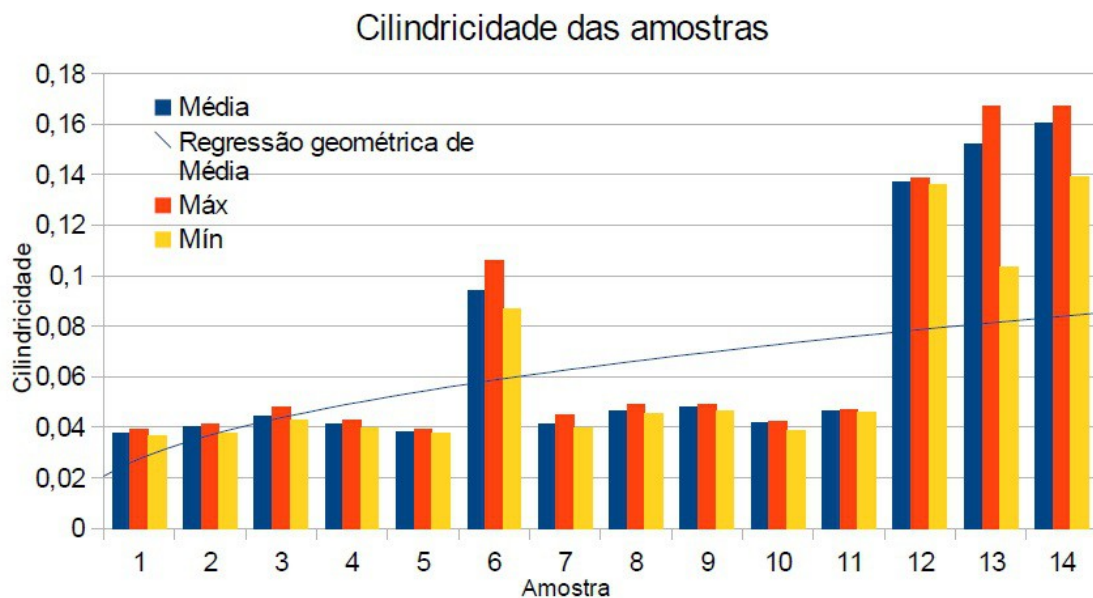


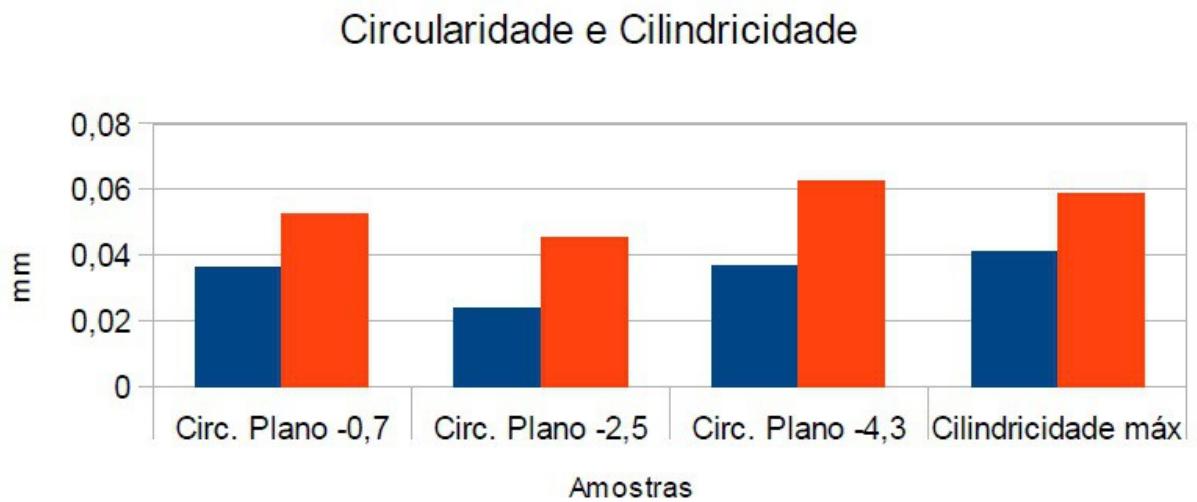
Figura 47: Cilindridade das amostras

Há tendência de aumento das médias na cilindridade, sugerindo a piora das condições devido à adesão de material no punção. O aumento marcante a partir da amostra 12, sugere que a trinca do punção pode ter ocorrido no funcionamento dessa amostra.

#### 4.7. MEDIÇÃO DA CILINDRICIDADE EM EQUIPAMENTO ESPECÍFICO

Foram medidas as amostras nº 2 e 9, a fim de se determinar se a tendência

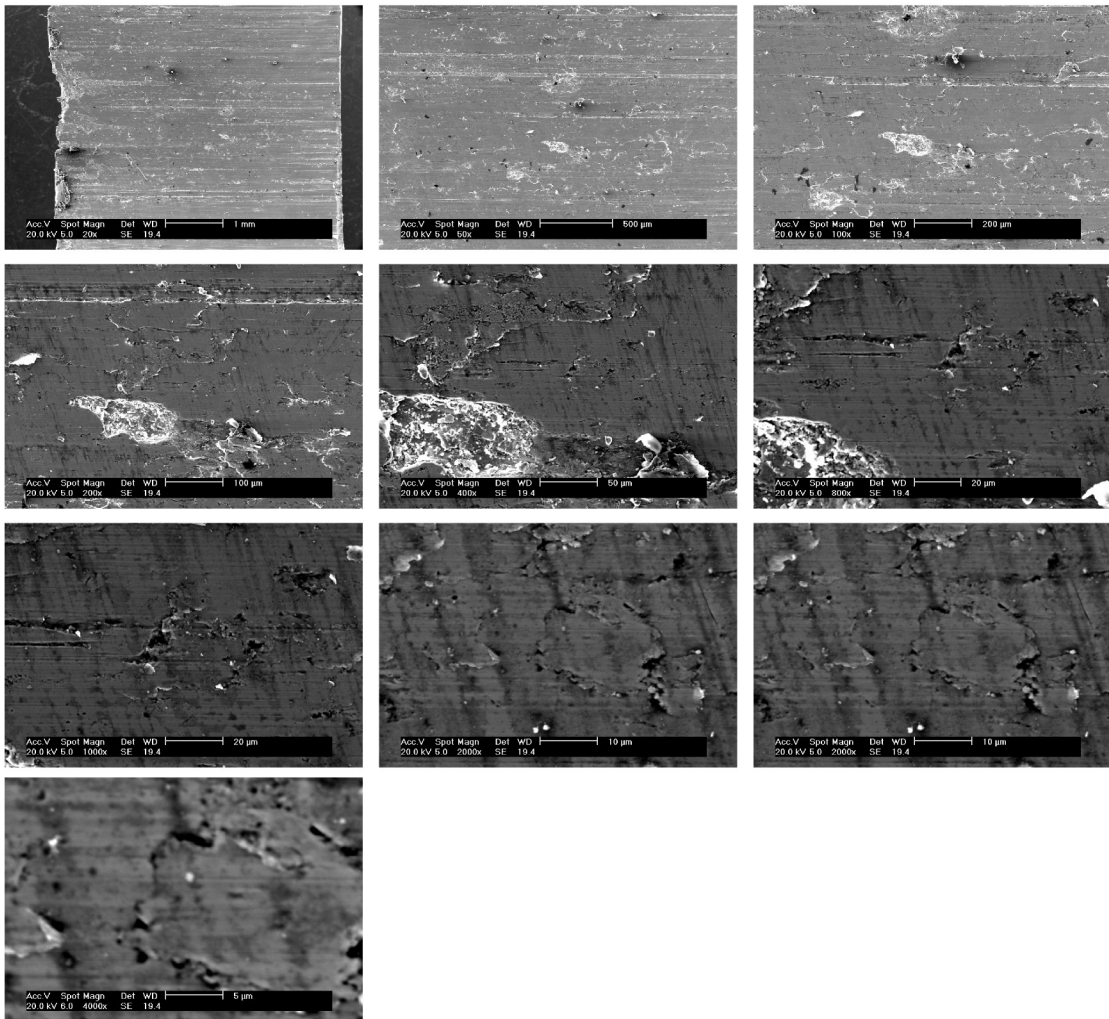
de aumento nas medidas obtidas na máquina de medição por coordenadas se corrobora. Os valores de cilindridade obtidos, mostrados na figura 48, demonstram correspondência.



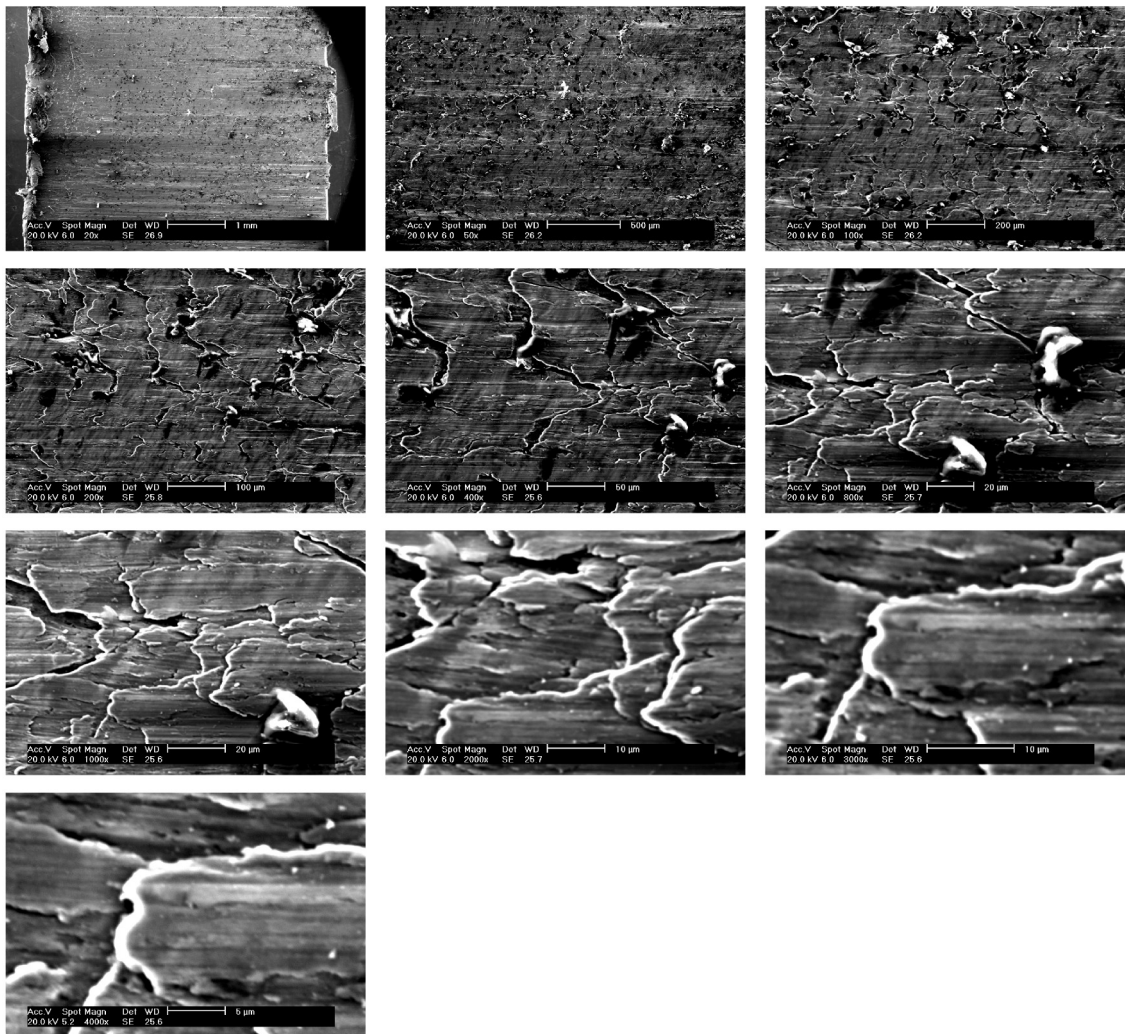
*Figura 48: Cilindridade e circularidade das amostras 2 e 9*

#### **4.8. REGISTRO COM MEV**

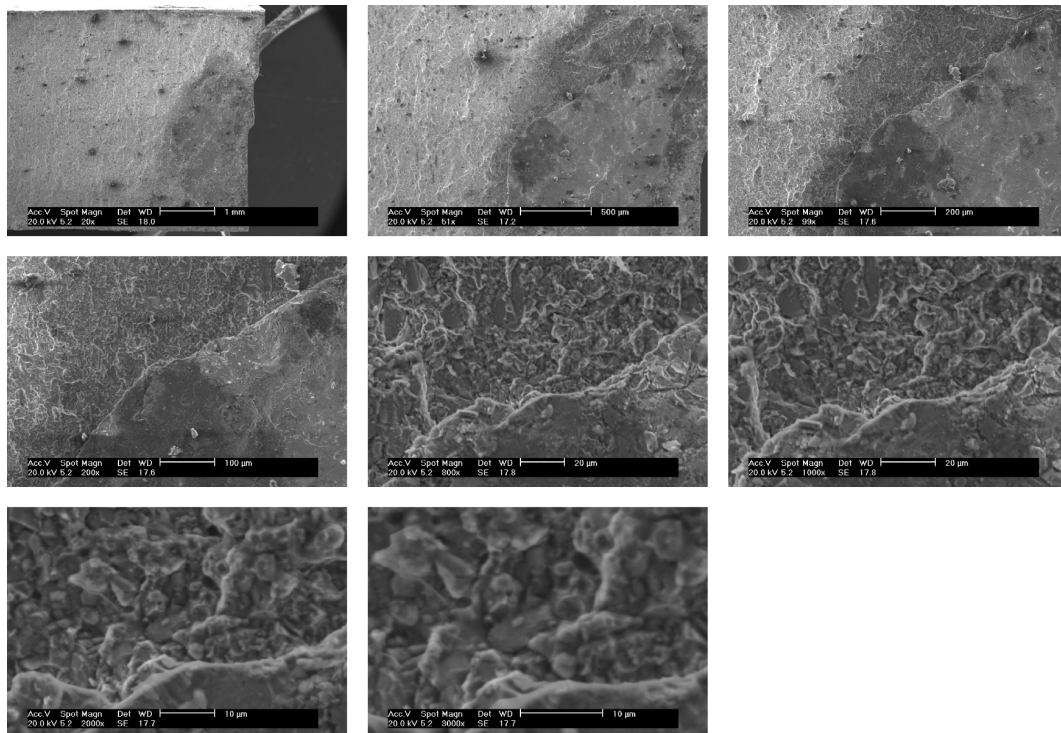
Em seguida foi feito o registro com microscopia eletrônica de varredura das seções transversais da amostra 1, da amostra 14 e da seção transversal do punção trincado, conforme as figuras 49, 50 e 51:



*Figura 49: MEV da seção da amostra 1 - ampliações de 20X, 50X, 100X, 200X, 400X, 800X, 1000X, 2000X, 3000X e 4000X*



*Figura 50: MEV da seção da amostra 14 - ampliações de 20X, 50X, 100X, 200X, 400X, 800X, 1000X, 2000X, 3000X e 4000X*



*Figura 51: MEV da seção do punção trincado - ampliações de 20X, 51X, 99X, 200X, 800X, 1000X, 2000X e 3000X*

Nas figuras 49 e 50, tem-se as imagens da microscopia eletrônica de varredura da superfície interna das paredes dos furos dos corpos de prova 1 e 14 respectivamente. Note-se a diferença marcante entre os dois à medida que a ampliação aumenta. A superfície interna do furo do corpo de prova 1 é muito mais regular do que o formato dos grãos do CP 14. Essa irregularidade provavelmente é devida à presença de material aderido junto aos dentes de brochamento na ferramenta à medida que mais puncionamentos vão sendo realizados e o material remanescente não é removido como se deveria.

Na figura 51, tem-se as imagens da microscopia eletrônica de varredura da seção transversal da ferramenta de puncionamento trincada. Nota-se já na primeira imagem uma clara divisão entre duas zonas, clara, à esquerda (parte interna) e escura à direita (parte externa). A parte escura corresponde provavelmente à propagação da trinca e tem um aspecto mais regular, enquanto o material na parte interna tem um aspecto mais áspero.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. CONCLUSÕES

Com base nos resultados e discussões anteriores, as seguintes conclusões podem ser apresentadas.

A simulação computacional do processo de puncionamento mostrou-se eficiente para ajudar na melhoria da geometria da ferramenta e otimização de parâmetros do processo. O processo de puncionamento combinado com brochamento foi simulado com sucesso e permitiu discernir apenas pequenas diferenças entre as três geometrias iniciais propostas (tipo I, II e III).

Por outro lado, as simulações com punções IV, V, VI e VII mostrou como a geometria dos punções pode afetar significativamente a qualidade do furo e as forças empregadas durante o processo. Um novo tipo de punção oriundo do resultado das características benéficas desses punções estudados foi adicionalmente proposto. A configuração paramétrica deste punção inovador facilita a definição das dimensões da ferramenta com base na espessura da chapa e pode permitir o puncionamento de furos com excelente cilindridade. No entanto, deve ser ressaltado que os resultados do presente trabalho são válidos para perfuração de chapas grossas de NBR 6656 (LNE 38).

Baseado nos resultados das simulações e da literatura, relatados no capítulo de resultados e discussões, conclui-se que a modelagem realizada pela simulação numérica, utilizando o software ABAQUS/Explicit v 6.9, foi validada.

Quanto à parte dos ensaios práticos, ressalte-se que o raio da curvatura do punção era muito pequeno e foi insuficiente para evitar a concentração de tensões e o trincamento da ferramenta, mesmo com a redução de força constatada na simulação. Também nos ensaios práticos foi verificado adesão na ferramenta, o que pode ter contribuído para o aumento de esforços na série de puncionamentos e contribuído para a formação da trinca.

Ainda quanto à adesão de material da ferramenta, à medida que mais puncionamentos foram feitos, constatou-se uma piora do aspecto visual da superfície interna dos furos puncionados, além do aumento da altura da rebarba e piora da cilindridade, o que sugere que o material aderido, contribuiu para a piora

das condições de puncionamento.

## **5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Tendo-se em vista os resultados obtidos, sugerem-se os seguintes pontos para trabalhos futuros:

- estudar o retorno elástico que ocorre após o furo ser puncionado;
- realizar ensaios práticos com monitoramento de força e velocidade;
- estudar fenômeno da adesão nesses ensaios práticos e a sua contribuição para o aspecto das paredes do furo submetido ao processo simultâneo de puncionamento e brochamento.

## REFERÊNCIAS

ABAQUS/CAE, **User's Manual**, Version 6.9, Dassault Systèmes S.A, Vélizy-Villacoublay, France, 2009.

AHZI, S., DARIDON, L., CORREIA, J. P. M.; HUSSON, C., Finite Elements Simulations of Thin Copper Sheets Blanking: Study of Blanking Parameters on Sheared Edge Quality, **Journal of Materials Processing Technology**, p.254, 74-83, 2008.

ALTAN, T., **Metal Forming Handbook**, Schuler, Springer-Verlag - Berlin Heidelberg - New York (1998) 281-282.

ANSYS, **User's Guide**, ANSYS Inc., Houston, PA, 1995.

ASM INTERNATIONAL, **Metals Handbook**, vol. 12, 9th ed., 1993.

ASM INTERNATIONAL, **Metals Handbook**, vol. 14, 9th ed., 1993.

AXINTE, D.A.; GINDY, N., Tool condition monitoring in broaching, **Wear**, p. 370-382, 2003.

AXINTE, D.A.; GINDY, N.; FOX, K.; UNANUE, I., Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 44, p. 1091-1108, 2004.

BARISIC, B., CAR, Z., IKONIC, M., Analysis of Different Modeling Approach at Determining of Backward Extrusion Force on AlCu5PbBi Material. **Metalurgia** 47, p. 313-316, 2008.

BRITO, O., **Estampos de Corte**. São Paulo: Hemus Editora Limitada, 1981.

BENELI, R.C.S.; CAMARGO, E.J.; MELLO, L.B.; MARCONDES, P.V.P., Operação combinada de puncionamento com brochamento. **Anais da VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas**, p. 47-54. Editor Lírio Schaeffer, 2003.

ETO, M. A., **Otimização da precisão em furos estampados por ferramenta combinada de puncionamento e brochamento**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (PPGEM - UTFPR), Curitiba, 2005.

FANG, G., ZENG, P., LOU, L., Finite element simulation of the effect of clearance on the forming quality in blanking process, **Journal of Materials Processing Technology** 122, p. 249-254, 2002.

FAURA, F., GARCIA, A., ESTREMS M., Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process, **Journal of Materials Processing Technology** 80-81, p. 121- 125, 1998.

FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais**. Edgard Blücher, 1 v, São Paulo,1970.

FERRARESI, D. **Operação de brochamento: Curso de usinagem de metais**. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 1973.

FREIRE, J. M. **Tecnologia do corte**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 1977.

GOIJAERTS, A. M., STEGEMAN, Y. W., GOVAERT, L. E., BROKKEN,D., BREKELMANS, W. A. M., BAAIJENS, F. P. T., Can a new experimental and numerical study improve metal blanking?. **Journal of Materials Processing Technology** 100, p. 44-50, 2000.

GOIJAERTS, A. M., GOVAERT, L. E., BAAIJENS, F. P. T., Evaluation of ductile fracture models for different metals in blanking. **Journal of Materials Processing Technology** 110, p. 312-323, 2001.

GROOVER, M., **Fundamentals of Modern Manufacturing**. Prentice Hall, New Jersey. 1996.

HAMBLI, R., POTIRON, A., Finite element modeling of sheet-metal blanking operations with experimental verification, **Journal of Materials Processing Technology** 102, p. 257-265, 2000.

HAMBLI, R., RICHIR S., CRUBLEAU, P., TARAVEL, B., Prediction of Optimum Clearance in Sheet Metal Blanking Processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 22, p.20-25. 2003.

HAMBLI, R., Optimization of blanking process using neural network simulation, **The Arabian Journal for Science and Engineering**, 30, 2005.

HATANAKA, N.; YAMAGUCHI, K.; TAKAKURA, N., Finite element simulation of the shearing mechanism in the blanking of sheet metal. **Journal of Materials Processing Technology** 139, p.64-70, 2003.

HEDRICK, A. Taking Advantage of Simulation Technology. **Stamping Journal**. September/October, 2002.

HILDITCH, T. B., HODGSON, P. D., Development of the sheared edge in the trimming of steel and light metal sheet, **Journal of Materials Processing Technology** 169, p.192-198, 2005.

HILLIER, F. & LIEBERMANN. **Introduction to operations research**. McGraw Hill. 1988.

HONGZHI, D., ZHONGOI, L., Investigation of Sheet Metal Forming By Numerical Simulation and Experiment. **Journal Of Material Processing Technology** 103, p. 404-410, 2000.

KLEIN, A., Do more during Punching, Forming and Fabricating. **Forming & Fabricating**, September, p. 53–55, 2002.

KLINGENBERG, W.; SINGH, U.P., Finite element simulation of the punching/blanking process using in-process characterization of mild steel, **Journal of Materials Processing Technology** 134, p. 296-302, 2003.

KOMORI, K., Simulation of shearing by node separation method, **Computers and Structures** 76, p. 197-207, 2001

LAI, X., NI, J., LIU, F., PENG, L., Size Effects in Thin Sheet Metal Forming and its Elastic-Plastic Constitutive Model. **Materials and Design** 28, p. 1731-1736, 2007.

LAJARIN, S.F., BARRETO NETO, R.C., ETO, A.M., MARCONDES, P.V.P., A novel punch design approach with progressive clearance variation on the punching-broaching process. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture** 226, 2012

LAUTEC. Disponível em: <<http://www.lautec.com.br/>>, Acesso em: 12/09/2011.

MARCONDES, P.V.P., Apostila - **Conformação Plástica dos Metais**. Curitiba: UFPR, 2000.

MARCONDES, P.V.P., LAJARIN, S.F., MAGALHÃES, J.F.S., **Influence of the Mesh Format, Refinement and Way of Application on Sheet Forming Simulation**. Trabalho Apresentado no 19<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering - (COBEM), Brasília, DF, 2007.

MARCONDES P.V.P., ETO A.M., BELTRÃO P.A.C., BORGES P.C., A Smart Stamping Tool for Punching and Broaching Combination. **Journal of Materials Processing Technology** 206, p. 188-193, 2008

MARCOS, F., **Corte e dobragem de chapas**. São Paulo: Hemus, 1975.

MARYA, S., VILLAR, A., MONTOYA, J., UGART, D., ARRAZOLA, P. J., Finite Element Modeling of Chip Formation Process with ABAQUS/EXPLICIT. **Proceedings of VIII International Conference on Computational Plasticity – COMPLAS VIII**, Barcelona, 2005.

MELLO, L.B., **Ferramenta Combinada de Puncionamento com Brochamento**. Monografia (Especialização em Engenharia de Materiais Metálicos), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

MELLO, L.B., MARCONDES P.V.P., Punching and Broaching Combos – a New Stamping Tool. **Journal of the Braz, Soc of Mech. Sci & Eng** 28, p. 94-98, 2006.

MO, S.P.; AXINTE, D.A.; HYDE, T.H.; GINDY, N.N.Z., An example of selection of the cutting conditions in broaching of heat-resistant alloys based on cutting forces, surface roughness and tool wear. **Journal of Materials Processing Technology** 160, p. 382-389, 2005.

POLACK, A. V., **Manual prático de estampagem**. São Paulo: Hemus, 1974.

PROVENZA, F., **Estampos II**. São Paulo: F. Provenza, 1976.

RACHIK, M., ROELANDT, J. M., MAILLARD, A., Some phenomenological and computational aspects of sheet metal blanking simulation. **Journal of Materials Processing Technology** 128, p. 256-265, 2002

SAMUEL, M., FEM imulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process. **Journal of Materials Processing Technology** 84, p. 97-106, 1998

SCHAEFFER, L., **Conformação Mecânica**. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 1999.

SINGH, U.P.; STREPPPEL, A.H.; KALS, H.J.J. Design study of the geometry of a punching/blanking tool. **Journal of Materials Processing Technology**, 33, p. 331-345 Elsevier, 1992.

SOARES, J.A., **Modelamento da Operação de Puncionamento Utilizando o Critério de Falha Dúctil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná (PGMEC - UFPR), Curitiba, 2009.

SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS (SME), **Die Design Handbook**. Editor: David Alkire Smith, 3a edição, Michigan(USA), 1990.

SÖDERBERG M., **Finite Element Simulation of Punching**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica de Luleå, ISSN 1402-1617, Luleå , 2006.

SOLER, A., **Estampos**. São Paulo: Mestre Jou, 1972.

STEEG, M.B.V., Laser/punch combos provide job shop versatility. **Forming & Fabricating**. Vol.9 N° 11, 2002

STEMMER, Caspar E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. Florianópolis: UFSC, 2008.

SUTHERLAND, J.W.; SALISBURY, E.J.; HOGE, F.W., A model for the cutting force system in the gear broaching process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 37, p. 1409-1421. 1997.

TARKANY, N.; Improving perforating die performance - The effects of stress, clearance, material, Stamping Journal, vol. 15, nº 2. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 206, p. 184- 193, Março/Abril, 2003.

VAZ, M. J., BRESSAN, J. D., A Computational Approach to Blanking Processes. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 126 206-212, 2002.

WU, Tsu-te (2008), A Proposed Methodology for Strain-Based Failure Criteria. **Proceedings of PVP 2008-61572**. ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. July 27-31, Chicago, Illinois, USA, 2008.

YOSHIDA, A., **Ferramenteiro (Corte-Dobra-Repuxo)**. São Paulo: L. Oren Editora e Distribuidora de Livros Ltda, 1979.