

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HERMES HENRIQUE SCHNEIDER

RICARDO AUGUSTO TERUI HARTMANN

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DIDÁTICO DE

PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

HERMES HENRIQUE SCHNEIDER
RICARDO AUGUSTO TERUI HARTMANN

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DIDÁTICO DE
PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

Proposta de Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Celso Salamon.

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO DIDÁTICO DE PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO”, realizada pelo aluno(s) HERMES HENRIQUE SCHNEIDER e RICARDO AUGUSTO TERUI HARTMANN, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Celso Salamon
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Me. Paulo Humberto Ferrazza
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 11 de Julho de 2013.

DEDICATÓRIA

À minha fortaleza Vera.

À minha preciosa esposa Kelly.

À minha razão de viver, minha filha Maria Victória.

Hermes H. Schneider

Ao meu conforto Luiza.

Ao meu exemplo de superação Jair.

À minha sempre companheira Muriely.

À minha ausente, mas sempre presente avó Teresa.

Ricardo A. T. Hartmann

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradecemos à Deus pela oportunidade e o dom da vida.

Agradecemos às nossas famílias, amigos, e todos que colaboraram para que fosse possível a realização deste trabalho.

Aos parceiros Cassiano, Enzo e Toninho, da Modelo Metal Mecânica pela confecção das ferramentas de conformação, objetos deste trabalho e inestimável experiência compartilhada.

A todos os professores que trilharam nossa vida acadêmica até esta última fase.

Em especial, ao nosso professor orientador Celso Salamon, pela infinita paciência, dedicação e colaboração para o sucesso deste trabalho.

"A competitividade de um país não começa nas indústrias ou nos laboratórios de engenharia. Ela começa na sala de aula."

Lido Anthony "Lee" Iacocca

RESUMO

SCHNEIDER, Hermes H.; HARTMANN, Ricardo A. T.; Desenvolvimento um equipamento didático de processos de conformação. 2013. 106 f. Monografia (Engenharia Industrial Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

Aliar a prática com a teoria é imprescindível para a melhor assimilação da tecnologia empregada nos processos de fabricação de um produto. Porém, dentro do contexto acadêmico de engenharia, nem sempre isto é possível, devido à indisponibilidade de experimentos, custo elevado e geralmente grande porte dos equipamentos industriais disponíveis no mercado. A presente pesquisa teve por objetivo o desenvolvimento do projeto de um equipamento didático, modular, de pequeno porte, simplificado e de baixo custo para universidades, faculdades, escolas técnicas entre outras, para a demonstração e experimentação, em escala reduzida, dos princípios de processos industriais. Foi projetado um sistema composto por: bancada de perfil de alumínio, acionamento hidráulico, ferramentas para processos de corte por cisalhamento e embutimento profundo além de um sistema de medição. Devido a questões temporais e econômicas, foram fabricados somente as ferramentas dos processos e o conjunto de medição. Adaptadas em prensas didáticas já existentes, estas ferramentas possibilitaram a experimentação específica dos processos de corte e embutimento. Quando utilizadas em sequência e associadas ao dispositivo de medição, permitiram a simulação de parte de um ciclo produtivo de um produto com base na conformação mecânica. A avaliação dos produtos obtidos possibilitaram a observação prática dos fenômenos de corte e embutimento, bem como validação da teoria apresentada na literatura sobre o tema. A natureza multidisciplinar e modular do sistema permitirão, ainda, a inclusão de outros processos como extrusão, dobra e forjamento, atendendo necessidades específicas de formação, bem como servir de gerador de carga/ciclo quando o objetivo for o estudo de acionamentos e ou produção.

Palavras-chave: Dispositivo didático. Estudo de processos de conformação. Corte por cisalhamento. Embutimento.

ABSTRACT

SCHNEIDER, Hermes H.; HARTMANN, Ricardo A. T.; Desenvolvimento um equipamento didático de processos de conformação. 2013. 106 f. Monografia (Engenharia Industrial Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

Combining practice and theory is essential for better assimilation of the technology used in product manufacturing processes. However, within the academic context of engineering, this is not always reachable due to the unavailability of experiments, high cost and, generally, large industrial equipment available on the market. This research aimed at the development of the design of didactic, modular, small, simplified and low cost equipment to universities, colleges, technical schools, among others, to demonstrate and experiment, in reduced scale, the industrial processes principles. It was designed a system comprising of: aluminum profile bench, hydraulic actuation, shearing and deep drawing cutting tools and also a measurement system. Only the processes tools and the measurement set were manufactured due to time and economic issues. These limitations, however, did not influence the validation of the project because, when mounted on existing presses in the laboratory, the tools allowed the specific procedures trial. When used in sequence associated with the device measuring, enable the simulation of part of a cycle productive of a product the basis of conformation mechanics. The rating of products obtained allowed the observation practice of phenomena of cutting and mounting process, well as validation of theory presented in literature on the theme. The multidisciplinary nature and system's modular, will allow still, the inclusion of other processes as extrusion, bending and forging, attending specific training needs, well as serve as load generator / cycle when the objective is the study of actuators and or production.

Keywords: Didactic Equipment. Study forming processes. Shear cutting. Mounting process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Índice de importância para aulas práticas	20
Figura 2 - Índice de importância para aulas práticas nos processos de conformação na formação de um profissional de engenharia mecânica	21
Figura 3 - Situação dos laboratórios de processos de fabricação segundo entrevistados.	21
Figura 4 - Road Map	26
Figura 5 – Sequenciamento da operação de corte por cisalhamento em chapas.	29
Figura 6 - Partes principais de uma peça cisalhada	30
Figura 7 - Regiões do copo sob estampagem com diferentes estados de tensão	32
Figura 8 - Esforços atuantes nas diferentes regiões do copo	33
Figura 9 - Variação de espessuras em mm das paredes do copo	34
Figura 10 - Esquema de um copo parcialmente embutido	35
Figura 11 - Figura base para o cálculo do diâmetro do <i>blank</i>	37
Figura 12 - Esquemas dos tipos de ensaio de embutimento	38
Figura 13 - Figura referência para o posicionamento dos pinos de fixação	40
Figura 14 - Esquema representativo da folga entre matriz e punção	41
Figura 15 - Formas mais comum de punção em processos de embutimento.	43
Figura 16 - Representação de aprendizagem segundo Ausubel.	45
Figura 17 - Representação de fluxo de informação e aprendizagem nos processos de fabricação propostos.	47
Figura 18 - Fluxograma do Desenvolvimento do Projeto	49
Figura 19 - Equipamento didático da marca Amatrol para simulação de processos de fabricação.	50
Figura 20 - Função global da prensa didática.	54
Figura 21 - Análise funcional da prensa didática.	54

Figura 22 – Matriz de geração das concepções para o sistema.	56
Figura 23 - Matriz de Avaliação Relativa	57
Figura 24 - Elementos da concepção escolhida.	57
Figura 25 - Base para estampo - Centralização por pinos e buchas de baixo atrito	58
Figura 26 - Padronização da fixação e alinhamento das ferramentas	62
Figura 27 – Representação do dispositivo de processos idealizado	63
Figura 28 - Fluxograma dos Testes.	70
Figura 29 - Ferramenta de corte montada.	71
Figura 30 - Diferença de acabamento da borda devido à espessura do material cortado.	72
Figura 31 - Equipamento existente no laboratório de hidráulica	73
Figura 32 - Utilização de um simples anteparo feito com uma folha sulfite e destaque nos pequenos calços utilizados tanto para elevação da ferramenta quanto para fixação.	74
Figura 33 - Retirada dos <i>blanks</i> da ferramenta e separação de amostras para utilização no processo de embutimento. No canto superior direito, encontra-se a força máxima de corte. No detalhe do canto inferior esquerdo, encontram-se as amostras.	76
Figura 34 – Rebarba em amostra de aço com espessura de 0,9 mm.	80
Figura 35 - Detalhe de um corte por cisalhamento em amostra de alumínio.	80
Figura 36 - Detalhe de um corte a laser em amostra de alumínio.	81
Figura 37 - Utilização da ferramenta de embutimento. No canto superior direito, encontra-se a força máxima de embutimento. No detalhe do canto inferior esquerdo, encontra-se uma amostra completamente embutida.	84
Figura 38 - Perfil da amostra de alumínio embutida parcialmente. Variação da espessura em destaque.	86
Figura 39 - Produtos finais dos <i>blanks</i> de diversos tamanhos analisados. A – Amostra completamente embutida. B – Amostra completamente embutida com	

baixa carga no sujeitador. C – Amostra parcialmente embutida com <i>blank</i> maior.	
D – Amostra parcialmente embutida com <i>blank</i> quadrado.	87
Figura 40 - Perfil da amostra de alumínio embutida totalmente. Variação da espessura em destaque.	88
Figura 41 - Perfil da amostra de aço embutida parcialmente. Variação da espessura em destaque.	89
Figura 42 - Perfil da amostra de aço embutida totalmente. Variação da espessura em destaque.	89
Figura 43 - Amostra com linhas de marcação para verificação do escoamento.	90
Figura 44 - Experimento de detecção para variação da espessura do embutimento completo de uma amostra de alumínio. No detalhe (4), é possível verificar a dificuldade de posicionamento entre equipamento de medição e amostra.	91
Figura 45 - Experimento de detecção para variação da espessura do embutimento parcial de uma amostra de alumínio.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e a descrição dos produtos - Brasil – 2010	19
Tabela 2 - Tabela de classe de folgas para a montagem guia-bucha.	39
Tabela 3 - Tabela para posicionamento dos pinos de fixação.	40
Tabela 4 - Folga entre punção e matriz para o processo de corte	42
Tabela 5 - Tabela de equações para o cálculo do raio da matriz	44
Tabela 6 - Tabela de equações para o cálculo da folga entre punção e matriz	44
Tabela 7 - Levantamento das Necessidades do Cliente.	51
Tabela 8 - Tabela de Especificações do Produto.	53
Tabela 9 - Parâmetros de referência para dimensionamento.	61
Tabela 10 - Tabela de Variáveis Definidas.	64
Tabela 11 - Propriedades do material do <i>blank</i> .	65
Tabela 12 - Variáveis para o cálculo da força de corte.	66
Tabela 13 - Cálculo do diâmetro do punção.	66
Tabela 14 - Cálculo do comprimento do punção.	67
Tabela 15 - Dimensionamento das ferramentas de corte.	67
Tabela 16 - Cálculo do Diâmetro do <i>Blank</i>	68
Tabela 17 - Cálculo da folga entre matriz e punção	68
Tabela 18 - Dimensionamento das ferramentas de embutimento profundo.	69
Tabela 19 - Tabela de validação de valores de força e espessura.	69
Tabela 20 - Recalculo da força de corte.	77
Tabela 21 - Cálculo da força real de corte.	78
Tabela 22 - Comparação entre as visualizações das regiões.	81

Tabela 23 - Configuração das amostras utilizadas nos testes com a ferramenta de embutimento.	83
Tabela 24 - Cálculo da força real de embutimento.	85

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS.

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
NR12	Norma Regulamentadora N° 12
NT16	Norma Técnica N° 16
PIA	Pesquisa Industrial Anual
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
HRC	Dureza Rockwell C

LISTA DE SÍMBOLOS

F_c	Esforço de corte ou cisalhamento
p	Perímetro da chapa
e	Espessura da chapa
τ	Resistência ao cisalhamento do material
3D	Três dimensões
η	Fator de eficiência
ρ	Raio arbitrário
r_1	Raio do punção
h	Altura do copo
$d\epsilon_x$	Deslocamento incremental em x
$d\epsilon_y$	Deslocamento incremental em y
$d\rho$	Raio arbitrário incremental
dh	Altura incremental
dW	Trabalho incremental
σ_x	Tensão de resistência a tração em x
σ_y	Tensão de resistência a tração em y
d_0	Diâmetro inicial da chapa
d_1	Diâmetro do punção de embutimento
F_d	Força de embutimento
F_{max}	Força máxima de embutimento
D_{matriz}	Diâmetro da matriz de embutimento
D_{chapa}	Diâmetro da chapa de embutimento
\emptyset	Diâmetro dos pinos guia

x	Distância entre as bordas do corte e os pinos guia
D	Diâmetro da matriz de corte
D_1	Diâmetro da matriz de corte
f	Folga entre matriz e punção de corte
l_0	Comprimento de flambagem
E	Módulo de elasticidade normal
J_{\min}	Momento de inércia mínimo da secção do punção
F	Força axial do punção de corte
r	Raio da matriz de embutimento
E	Folga ente matriz e punção de embutimento
F_{rc}	Força real de corte
P	Pressão
A	Área
F_{re}	Força real de embutimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTO	19
1.2	JUSTIFICATIVA	22
1.3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	22
1.4	OBJETIVOS	23
1.5	REQUISITOS PRELIMINARES	23
1.6	ABORDAGEM METODOLÓGICA	24
1.7	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	27
1.8	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1	CONFORMAÇÃO MECÂNICA	28
2.1.1	ESTAMPAGEM	28
2.2	PROJETO DE PRENSAS PARA ESTAMPAGEM	38
2.2.1	PROJETO ESTRUTURAL	38
2.2.2	PROJETO FERRAMENTAL	41
2.3	APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E SUA RELAÇÃO COM A PRÁTICA	44
3	PESQUISA E PLANEJAMENTO	49
3.1	PROJETO INFORMACIONAL	49
3.1.1	BENCHMARKING	49
3.1.2	NECESSIDADES	50
3.1.3	CASA DA QUALIDADE	52
3.1.4	REQUISITOS	52
3.2	PROJETO CONCEITUAL	53
3.2.1	ANÁLISE FUNCIONAL	54
3.2.2	MATRIZ MORFOLÓGICA	55
3.3	DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DAS CONCEPÇÕES	55
3.4	PROJETO PRELIMINAR	61
3.4.1	LIMITAÇÕES DO PROJETO	61
3.4.2	DIMENSIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE PROCESSOS	62
3.4.3	FERRAMENTAS DE PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO	64
3.5	PROJETO DETALHADO	65
3.5.1	FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO	65
4	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA.	70
4.1	PROCESSO DE CORTE	71
4.1.1	CARACTERÍSTICAS DA FERRAMENTA	71
4.1.2	MONTAGEM	73
4.1.3	TESTES	75
4.1.4	RESULTADOS	77
4.2	PROCESSO DE EMBUTIMENTO	82
4.2.1	CARACTERÍSTICAS DA FERRAMENTA	82
4.2.2	MONTAGEM	82
4.2.3	TESTES	83
4.2.4	RESULTADOS	84
5	CONCLUSÕES	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A conformação mecânica é um processo que possibilita a obtenção de peças de alta qualidade em termos de tolerância dimensional e geométrica, elevadas propriedades mecânicas e bom acabamento, com altos níveis de produtividade a um baixo custo de fabricação. A indústria atenta a essas vantagens utiliza em grande escala os processos de conformação, sendo dificilmente encontradas peças que não foram submetidas à conformação em pelo menos uma etapa de sua fabricação. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através dos Resultados da Pesquisa Industrial Anual (PIA) de 2010, os processos de conformação representam quase 30% da produção e vendas de produtos e serviços industriais no Brasil. Estes dados são encontrados na Tabela 1 e demonstram a importância do processo de conformação na indústria.

Tabela 1 - Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e a descrição dos produtos - Brasil – 2010

Classe de Atividades e Descrição dos Produtos	Produção	Vendas	Percentual
	Valor (1000 R\$)	Valor (1000 R\$)	
Fundição de Ferro e Aço	4133515	3783065	33%
Serviços de usinagem, solda, tratamento e revestimento em metais	4045813	4045813	32%
Produção de artefatos estampados de metal; metalurgia do pó	3493941	3323847	28%
Produção de forjados de aço e de metais não ferrosos e suas ligas	814189	763997	7%
Principais Processo de Fabricação	12487458	11916722	100%

Fonte: Adaptado do IBGE (2010).

Estes indicadores sinalizam para a importância que as instituições de ensino tecnológico devem dar ao aprendizado destes processos de fabricação de modo a fornecer profissionais capacitados e hábeis para a indústria nacional.

No entanto, apesar da importância destes processos é possível observar uma lacuna no aprendizado prático durante a formação do engenheiro no Brasil, fato já apresentado por Salamon (2003).

Para corroborar os dados já consolidados no trabalho de mestrado citado, foi realizada pelos autores, uma pesquisa por meio de redes sociais utilizando o questionário contido no APÊNDICE A, onde foram registradas 85 respostas entre professores e alunos, de universidades públicas e privadas. Dentre os quais 81% dos entrevistados, entre alunos e professores, consideram alta a importância das aulas práticas durante o processo de aprendizado.



Figura 1 - Índice de importância para aulas práticas¹

O foco deste trabalho será processos de fabricação por conformação, visto que 64% dos entrevistados disseram ser muito importante o aprendizado prático de processos de conformação mecânica para o profissional de Engenharia Mecânica, consolidando o aprendizado teórico.

¹ As ilustrações e tabelas sem indicação de fonte foram elaboradas pela equipe elaboradora deste trabalho.

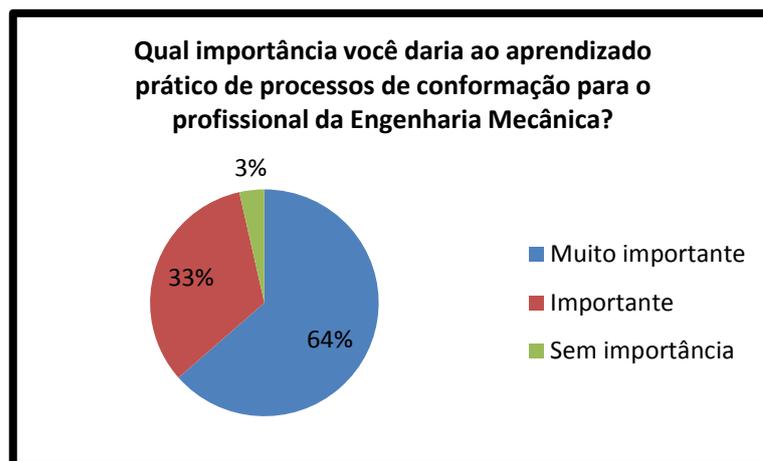


Figura 2 - Índice de importância para aulas práticas nos processos de conformação na formação de um profissional de engenharia mecânica

Analisando a primeira parte da pesquisa (a segunda parte da pesquisa será discutida no CAPÍTULO 3) fica evidenciada a necessidade de dispositivos práticos didáticos a custo acessível, pois 75% dos entrevistados afirmaram que os laboratórios de processos de fabricação de suas universidades estão em más condições.

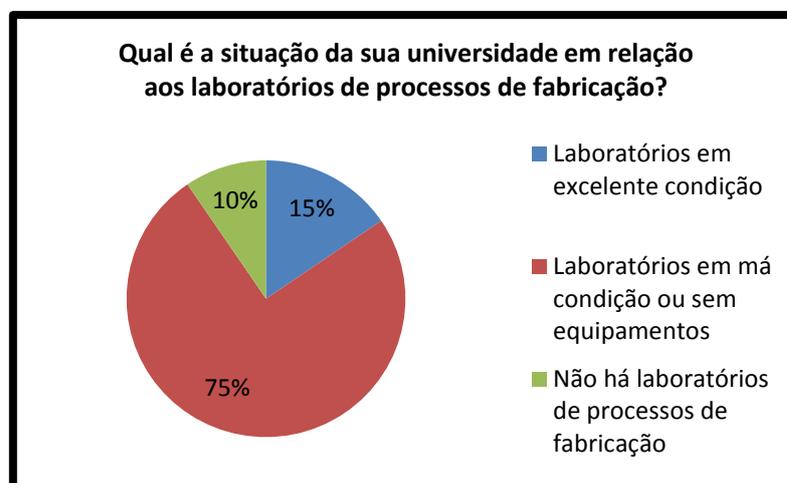


Figura 3 - Situação dos laboratórios de processos de fabricação segundo entrevistados.

A avaliação dos dados encontrados leva a constatação de que a teoria, base essencial do ensino, é conduzida de maneira satisfatória, porém a prática, que é fundamental para a formação de habilidades, se encontra escassa por motivos diversos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A base motivacional deste trabalho surgiu a partir da carência das aulas práticas não somente nos curso de engenharia, mas também nos cursos que envolvem tecnologia, no que diz respeito aos processos de fabricação, notadamente conformação.

Vislumbram-se ferramentas didáticas e mecanismos experimentais de baixo custo como forma de agregar conhecimento ao profissional da área de tecnologia, em especial no curso de Engenharia Mecânica.

Cita-se também a multidisciplinaridade do projeto que concatena as diversas áreas da mecânica como automação, acionamentos, fabricação, materiais, projetos entre outros.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A motivação deste trabalho surgiu a partir da carência de aulas práticas no curso de Engenharia Mecânica da UTFPR, não diferindo da maioria, no que diz respeito ao experimento didático de processos de fabricação/conformação.

Uma causa aparente para este problema é o elevado custo de laboratórios de processos de fabricação/conformação. São raras as soluções comerciais didáticas oferecidas pelo mercado internacional e inexistentes as oferecidas pelo mercado nacional. Na falta de opções didáticas as instituições de ensino tecnológico, interessadas em desenvolver um ensino prático, são inclinadas a adquirir produtos em escala industrial. Esses equipamentos, porém, geralmente apresentam grandes dimensões e alto custo de aquisição, exigindo ainda uma maior complexidade de ferramental, características que não se enquadram às necessidades didáticas.

A oportunidade do projeto está no desenvolvimento de um protótipo didático, de simples operação, nacionalizado, modular, flexível e de custo acessível às instituições educacionais para a melhoria do ensino no curso de Engenharia Mecânica e afins, através de atividades práticas de simulação de alguns processos de fabricação.

Um protótipo didático para simulação de processos de conformação foi proposta e implementada por Salamon (2003), anteriormente citada como referência

do presente trabalho. Entretanto, naquele projeto os processos de fabricação continham caráter secundário, pois objetivavam gerar carga para um ciclo de acionamento hidráulico. Este trabalho, diferentemente, focará nos processos de fabricação por conformação. A partir de valores e informações obtidas na literatura serão desenvolvidas ferramentas de conformação para simular e confrontar dados teóricos e experimentais.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é:

Desenvolver um equipamento didático funcional, modular, de fácil operação e expansível, composto de acionamento e ferramentas para a experimentação de processos de conformação, dentro de condições pré-determinadas.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Possibilitar a experimentação da didática utilizando ferramentas de corte e embutimento, permitindo a confrontação de teoria e prática;
- Avaliar parte de uma linha de produção criando um ciclo produtivo entre os processos de corte e embutimento;
- Possibilitar a avaliação da qualidade dos produtos obtidos através dos processos de corte e embutimento;
- Como caráter secundário demonstrando a interdisciplinaridade do projeto, este sistema pode gerar carga e ciclo de processo para o estudo de disciplinas nas áreas tecnológicas como acionamentos, produção, projetos e materiais.

1.5 REQUISITOS PRELIMINARES

Para delimitação do projeto, são apresentados os seguintes requisitos iniciais:

- H1 → Priorizar dois processos de conformação específicos: corte e embutimento;
- H2 → Ensaio com baixa velocidade facilitando a visualização dos efeitos da conformação mecânica, além de maximizar a segurança operacional;

- H3 → Curso de trabalho menor que 200 mm, objetivando a redução das dimensões do equipamento sem prejudicar a demonstração do processo envolvido;
- H4 → Força máxima de conformação de 3500 kgf. Para utilização de um sistema de acionamento já existente e adequado para extrusão de materiais dúcteis e estampagem de chapas com baixa espessura;
- H5 → Segurança: minimizar os riscos de operação (velocidade baixa, operador afastado das ferramentas, sistemas de bloqueio);
- H6 → Operacional: o sistema deve ser intuitivo e de fácil operação de modo que qualquer pessoa com conhecimento técnico possa realizar o experimento;
- H7 → Projeto modular: o sistema deve possibilitar a expansão para demais processos como o dobra, forjamento entre outros.
- H8 → Simplificação do projeto e baixo custo;
- H9 → Fazer o uso de tecnologias atuais (corte a laser, CNC, corte a jato d'água) para a fabricação dos componentes.

1.6 ABORDAGEM METODOLÓGICA

O desenvolvimento do presente trabalho se iniciou pela revisão bibliográfica dos processos de fabricação abordados (corte e embutimento) prosseguindo para o estudo do projeto estrutural e ferramental dos equipamentos destes processos, além de uma breve introdução à teoria de Ausubel aplicada ao ensino prático. Posteriormente foi realizado um *benchmarking* para avaliação do mercado e levantamento de tecnologias já existentes. Finalizando a fase da coleta de dados, foi realizada uma pesquisa de campo para levantar as necessidades dos clientes em questão: o meio acadêmico. A partir dessa base de dados, foram elaborados requisitos técnicos para a concepção do projeto seguindo a metodologia descrita à frente. Por conseguinte, foi elaborada a simulação do projeto em 3D do conjunto completo do equipamento didático composto por suas ferramentas de conformação e dispositivos de medição. Por fim, foram feitas experimentações dos processos de

fabricação propostos como consolidação do trabalho através da apresentação dos resultados das amostras.

Para tanto, este projeto é referenciado na literatura da Metodologia de Projetos de Pahl et al. (2005), tomando sua metodologia base para o desenvolvimento de projeto de produtos. Não obstante, toda literatura que se julgar necessária, diferente da literatura base, será utilizada e referenciada.

Foi elaborado um *roap map* do projeto conforme figura a seguir.

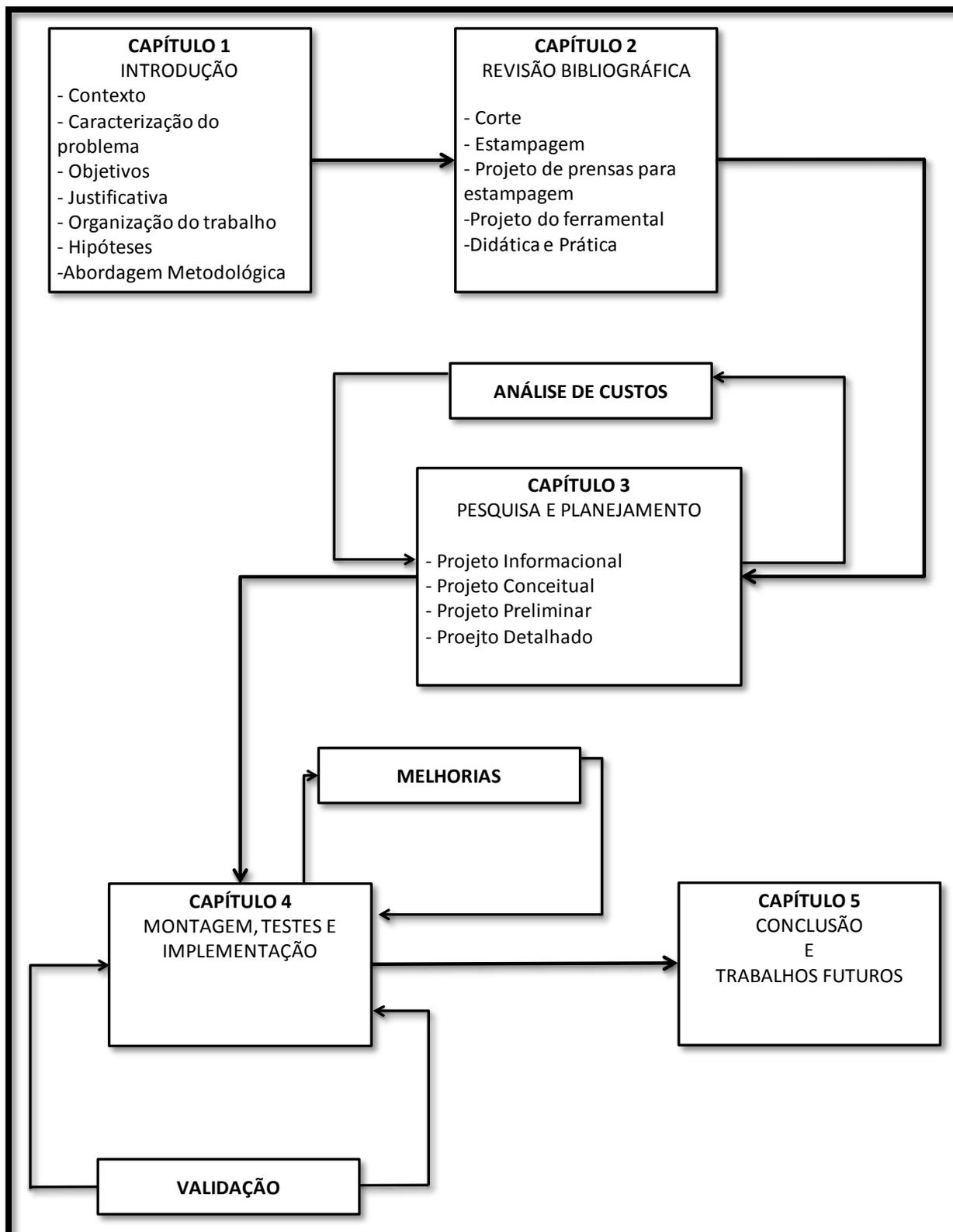


Figura 4 - Road Map

1.7 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Dentro desta proposta, é abordada somente a experimentação de dois processos de conformação. Devido à escassez de tempo e recursos financeiros, fica prejudicada a fabricação de um modelo completo do equipamento ideal com ampla gama de experimentos. Porém, para a compreensão de todas as variáveis envolvidas no desenvolvimento de um projeto, foi solicitado pelo professor orientador a análise e o modelamento de todo o sistema, incluindo uma prensa de acionamento das ferramentas. A validação do trabalho foi feita através das análises dos produtos obtidos com o auxílio das ferramentas elaboradas e adaptadas a uma prensa já existente. O projeto global e implementação parcial tornaram este viável em termos financeiros e técnicos.

1.8 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente projeto de pesquisa foi dividido conforme a seguir:

No primeiro capítulo é apresentado o tema do trabalho contextualizado e justificado em conjunto com a caracterização do problema a ser resolvido. São definidos os objetivos, requisitos preliminares e limitações que irão guiar o desenvolvimento do projeto.

O CAPÍTULO 2 aborda a fundamentação teórica necessária para a compreensão do problema, contemplando a revisão dos processos corte e embutimento; seguido dos conceitos principais de projetos de prensas para estampagem. É apresentada, também, a teoria de Ausubel como diferencial da prática no ensino.

No CAPÍTULO 3, é descrito todo o projeto de desenvolvimento do modelo e protótipo, passando pelas diversas fases de projeto.

As etapas de fabricação, testes e implementação do protótipo das ferramentas e resultados operacionais, além da montagem do dispositivo são mostrados no CAPÍTULO 4.

Por fim, no CAPÍTULO 5 é apresentada a conclusão do presente trabalho e também as recomendações para os futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo fornecer informações necessárias para a compreensão do projeto. Realizou-se a fundamentação teórica dos processos de conformação enfatizados anteriormente, seguido pela revisão dos conceitos envolvidos no projeto de uma prensa para estampagem. É apresentada também a teoria da aprendizagem significativa e sua relação com a prática.

2.1 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Para a obtenção de determinadas características, sejam inerentes a sua forma ou qualidade estrutural, a matéria prima sofre diversas transformações até a sua característica final. Dentre estas transformações, o que ocorre comumente na indústria metal mecânica, são processos de conformação modificando a condição inicial de uma peça tendo como base uma propriedade básica de alguns metais: a deformação plástica. Este estado de deformação é atingido quando se ultrapassa a tensão de escoamento do metal e se caracteriza por ser uma deformação permanente, ou seja, quando retirada a carga do material, este não retorna ao seu estado original.

A seguir, serão descritos alguns destes processos de transformação da matéria prima, que serão abordados no desenvolvimento do dispositivo didático.

2.1.1 ESTAMPAGEM

A estampagem é o processo de conformação mecânica na qual uma chapa plana é submetida a deformações plásticas de modo a obter uma forma desejada. Esta conformação plástica é geralmente realizada a frio através da utilização de prensas com o auxílio de ferramentas chamadas de matrizes (CHIAVERINI, 1986).

Este processo pode ser subdividido em dois grandes grupos (BRESCIANI et al., 2011):

- Estampagem profunda ou embutimento;
- Conformação em geral.

O processo de estampagem é função de diversas variáveis que podem ser divididas em mecânicas e metalúrgicas. Dentre as variáveis mecânicas estão: a forma e as dimensões das peças e das ferramentas, a máquina de conformação e as condições de lubrificação. Dentre as variáveis metalúrgicas estão: a composição química e a estrutura do material (BRESCIANI et al., 2011).

Os esforços resultantes da conformação criam diversos estados de tensão em diferentes regiões da peça, que em conjunto com o grande número de variáveis influentes neste processo, torna complexa e difícil a previsão exata do esforço resultante necessário a conformação ou qualquer outro parâmetro que se queira ter conhecimento durante o processo.

2.1.1.1 CORTE POR CISALHAMENTO

O corte por cisalhamento é um processo que converte esforço de compressão em esforço de cisalhamento para a obtenção de peças no formato desejado. Neste processo a ferramenta utilizada é constituída de punção e matriz apresentando secções transversais no formato da peça desejada. Neste processo o próprio perímetro externo do punção e perímetro interno da matriz forma o fio de corte necessário para cisalhar a chapa. A figura a seguir mostra uma representação das etapas do que ocorre no processo de corte.

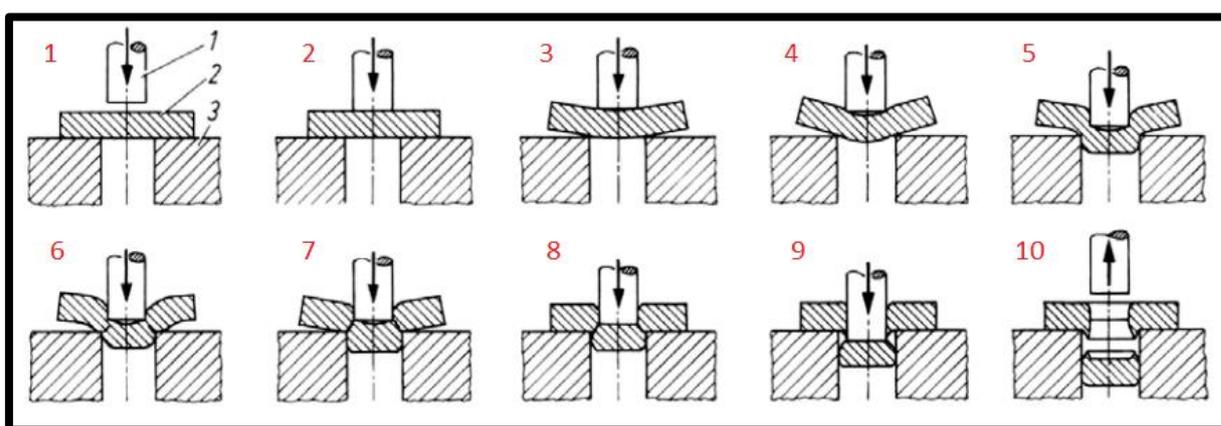


Figura 5 – Sequenciamento da operação de corte por cisalhamento em chapas.

1- Punção, 2- *Blank*, 3-Matriz

Fonte: Adaptado de Lange, 1990 (apud SOUZA, 2001, p. 55).

A força é exercida em uma chapa posicionada sobre a matriz através de um punção acionado por uma prensa. Ao se deslocar o punção, força-se a chapa contra

o orifício da matriz fazendo com que a chapa se arqueie e apareçam deformações elásticas como pode ser verificado na etapa três (3) da figura anterior. Posteriormente deformações plásticas em ambos os lados do *blank* (amostra) fazem com que o mesmo apresente um arredondamento permanente por todo o perímetro em contato com a matriz conforme observado na etapa cinco (5). Logo que o esforço de corte atinge o limite de resistência ao cisalhamento do material, este começa a escoar formando a zona de cisalhamento. Quando a capacidade de deformação da secção da chapa é atingida, trincas na direção da máxima tensão de cisalhamento começam a surgir, como demonstrado na etapa seis. No momento em que as trincas se unem a peça é destacada do resto do *blank*, tem-se então, finalizado o processo de corte (SOUZA, 2001).

Fazendo uma análise um pouco mais detalhada da etapa sete (7) da Figura 5, é possível verificar as principais características de peças cortadas por cisalhamento conforme figura a seguir.

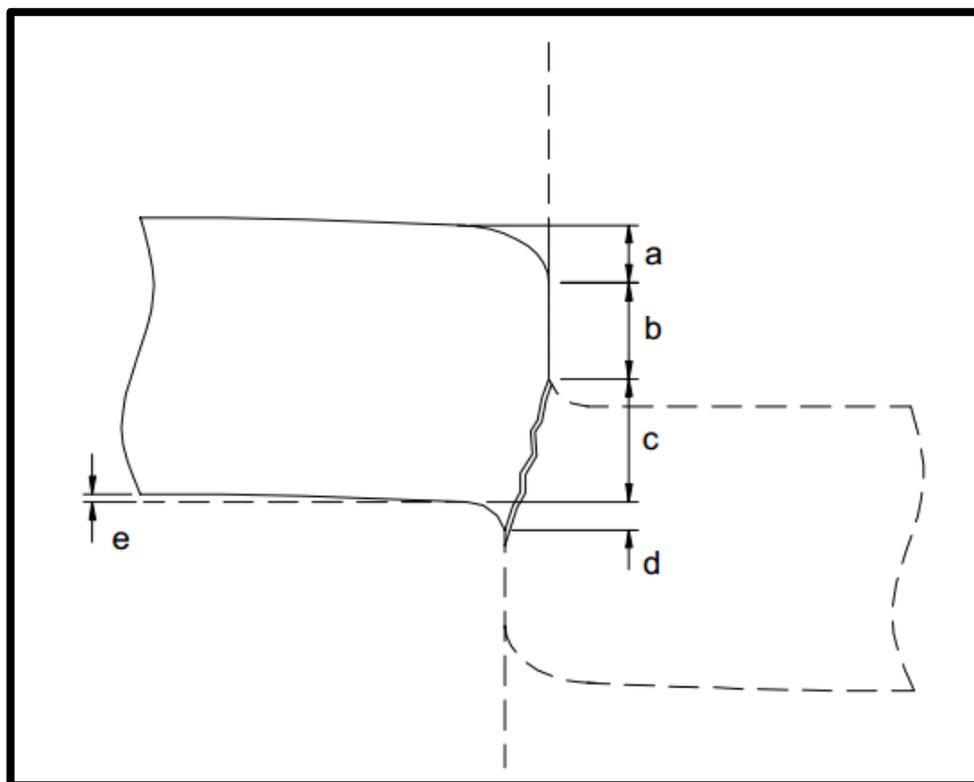


Figura 6 - Partes principais de uma peça cisalhada
Fonte: Souza (2001).

Na Figura 6 a parte indicada pela letra (a) representa a zona de arredondamento caracterizada pela deformação plástica e pelo encruamento. Na região indicada pela letra (b) pode ser encontrada a zona de cisalhamento formada pelo escoamento do material. A região (c) representa a zona fraturada pela propagação das trincas e a região (d) representa a rebarba. A parte da peça indicada pela letra (e) demonstra o arqueamento formado logo no início do corte.

Bresciani et al. (2011, p. 71) destaca a importância da folga entre punção e matriz para o projeto da ferramenta de corte. Segundo o autor este parâmetro pode ser determinado em função da espessura do material da chapa e será discutido na seção 2.2.2.1..

Chiaverini (1986, p. 106) lembra que as peças obtidas pelo corte de chapas podem, eventualmente, ser utilizadas para uma operação posterior de embutimento, o que sustenta a escolha dos processos de fabricação para o sequenciamento de processos do presente projeto.

O esforço necessário para o corte pode ser obtido através da seguinte equação:

$$F_c = p \cdot e \cdot \tau \quad (1)$$

Onde:

- F_c = esforço de corte ou cisalhamento, em kgf.
- p = perímetro, em milímetros.
- e = espessura da chapa, em milímetros.
- τ = resistência ao cisalhamento do material, kgf/mm².

2.1.1.2 ESTAMPAGEM PROFUNDA

A estampagem profunda ou embutimento transforma chapas em peças no formato de copo. A chapa metálica é fixada entre a matriz e o sujeitador ou sujeitador, em seguida o punção força a chapa para dentro da cavidade circular conformando o material nos moldes da matriz.

Durante o processo de embutimento, a chapa metálica é submetida a diferentes tipos de esforços dependendo da região conforme pode ser observado com o auxílio das figuras a seguir.

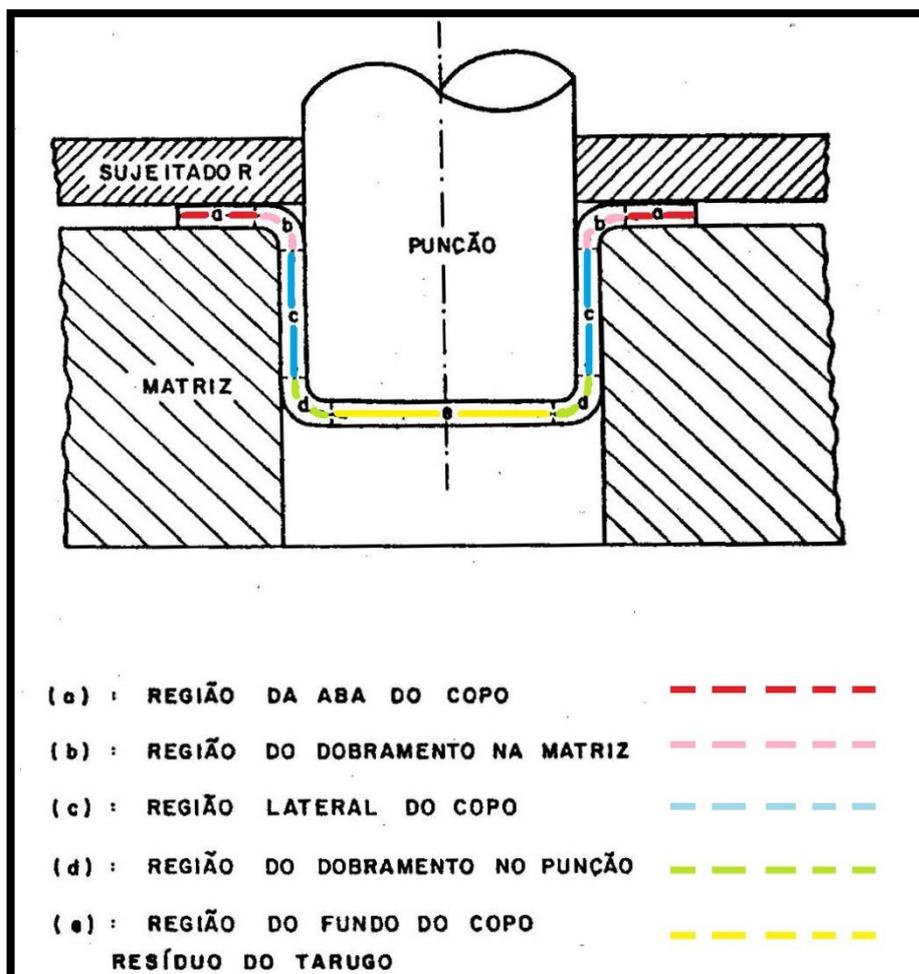


Figura 7 - Regiões do copo sob estampagem com diferentes estados de tensão
Fonte: Bresciani et al. (2011).

Na região da aba do copo (a) mostrado na Figura 7, a circunferência do disco reduz gradativamente, na medida em que o punção penetra na cavidade da matriz. Atuam nesta região, esforços na direção tangente aos círculos concêntricos à região central, o que é chamado de compressão circunferencial. Esta compressão tende a enrugar a chapa e para evitar este fenômeno, aplica-se uma tensão de compressão através do sujeitador. A esta compressão dá-se o nome de pressão de sujeição (BRESCIANI et al., 2011, p. 65).

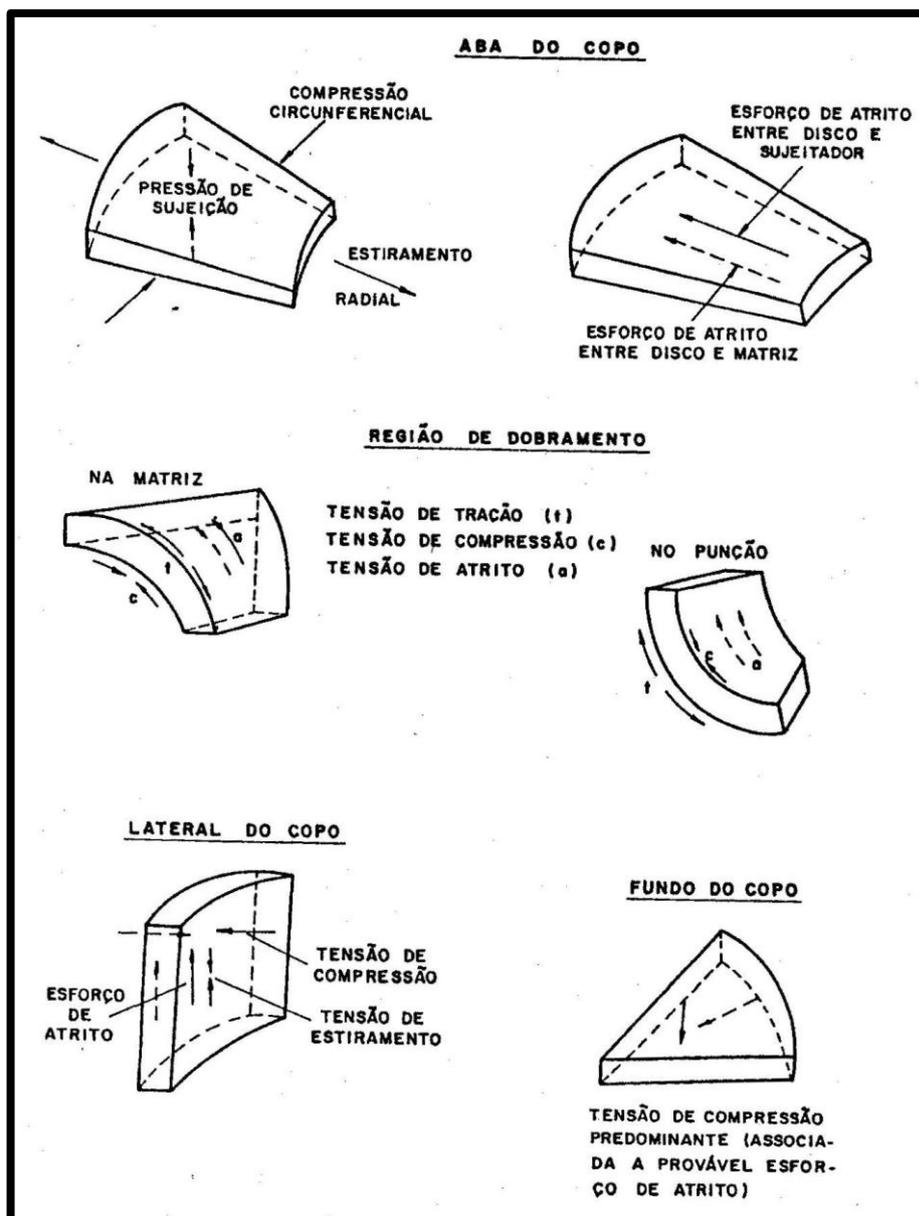


Figura 8 - Esforços atuantes nas diferentes regiões do copo
Fonte: Bresciani et al. (2011).

Nas regiões de dobramento na matriz e no punção, verifica-se a atuação de tensões de compressão na superfície interna e tensões de tração na superfície externa das regiões dobradas e ainda associada a essas tensões somam-se os esforços de atrito. Nas laterais do copo, verificam-se tensões de tração e compressão perpendiculares à superfície lateral, provocando o afinamento da espessura da parede. Somam-se a essas tensões os esforços de atrito entre matriz e a superfície externa do copo e os esforços de atrito entre punção e a superfície

interna do copo. Na região do fundo do copo, verifica-se a predominância da tensão de compressão exercida pela extremidade do punção e transmitida através de tensões de tração radial às demais partes do copo (BRESCIANI et al., 2011, p. 67).

Devido a esta alternância de estados de tensão entre compressão e tração, as partes do copo podem apresentar deformações diferentes e assim, espessuras diferentes, conforme apresentado na figura a seguir.

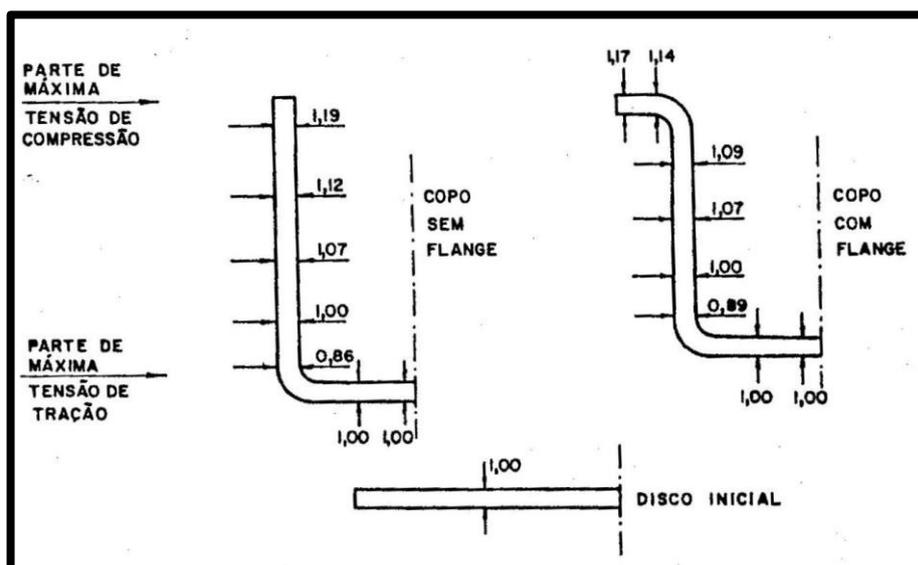


Figura 9 - Variação de espessuras em mm das paredes do copo
Fonte: Bresciani et al. (2011) apud Eary-Reed.

Analisando as forças em equilíbrio durante o processo de estampagem profunda de um copo metálico, algumas relações analíticas puderam ser obtidas para o levantamento da força máxima de estampagem.

Para simplificar a solução das equações algumas considerações devem ser tomadas. Tendo com base Hosford e Caddell (2007), abaixo são listadas as hipóteses adotadas:

- Toda a energia gasta no processo é usada para deformar o material na aba. O trabalho devido às forças de atrito e o trabalho para dobrar e desdobrar a chapa são inicialmente desconsiderados, e serão considerados na etapa final do processo com a introdução de um fator de eficiência η ;

- O material é considerado perfeitamente plástico ($n=0$);
- A espessura da chapa permanece constante durante o processamento;
- O material da chapa possui isotropia planar e anisotropia normal;
- Posteriormente será assumido que variações angulares podem ser manipuladas usando o coeficiente de anisotropia normal médio;
- O escoamento do material é descrito pelo Critério de Hill².

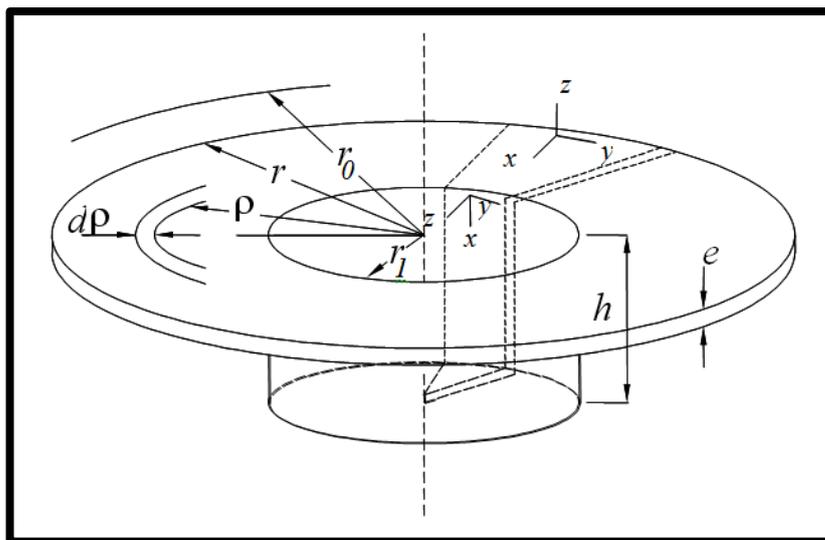


Figura 10 - Esquema de um copo parcialmente embutido
Fonte: Hosford e Caddell (2007).

A partir da representação esquemática mostrada na figura acima e da hipótese de volume constante, tem-se a seguinte relação:

$$\pi \rho^2 + 2\pi r_1 h = \pi \rho_0^2 = \text{constante} \quad (2)$$

Derivando-se a equação 2 e considerando $d\epsilon_y = d\rho/\rho$, obtém-se:

$$d\epsilon_x = -d\epsilon_y = -\frac{d\rho}{\rho} = r_1 \frac{dh}{\rho^2} \quad (3)$$

² Critério de Hill: Tratamento quantitativo de anisotropia plástica sem levar em consideração a base cristalográfica. Assume-se materiais com três eixos ortogonais de anisotropia, x, y, e z sobre o qual as propriedades têm dupla simetria. Os planos yz, zx, e xy são planos de simetria espelhada. Em um plano de rolamento é convencional considerar levar os eixos x, y e z, o sentido transversal e o plano normal como direções de rolamento. A teoria também assume campos de tensão e compressão iguais em todas as direções. (HOSFORD e CADDELL, 2007)

Onde r_1 é o raio do punção, e dh é a distância incremental movida pelo punção. O trabalho incremental, dW , feito em um elemento infinitesimal da chapa, será então:

$$dW = 2\pi e \rho d\rho (\sigma_x - \sigma_y) r_1 \frac{dh}{\rho^2} \quad (4)$$

A força de embutimento pode ser encontrada integrando-se a equação 4:

$$F_d = \frac{dW}{dh} = \int_{r_1}^r \frac{2\pi e \sigma_y d\rho}{\rho} = 2\pi r_1 e \sigma_y \ln \frac{r}{r_1} \quad (5)$$

Aplicando $r = r_0$, momento em que a força é máxima, tem-se:

$$F_{max} = 2\pi r_1 e \sigma_y \ln \frac{r_0}{r_1} = 2\pi r_1 e \sigma_y \ln \frac{d_0}{d_1} \quad (6)$$

Onde d_0 é o diâmetro inicial da chapa, d_1 é o diâmetro do punção e σ_y é a tensão de escoamento do material da chapa. A equação acima é válida para $\eta = 1$ e $\bar{R} = 1$, ou seja, o trabalho de atrito e a anisotropia são desconsiderados. No entanto, se forem consideradas essas variantes através de um fator de eficiência (η), essa equação pode ser escrita como:

$$F_{max} = \frac{2\pi r_1 e \sigma_y}{\eta} \ln \frac{d_0}{d_1} \quad (7)$$

Onde η , varia de 0,74 a 0,79.

Bresciani et al.(2011, p. 67) lembra que a força máxima exercida pelo punção ocorre no início da operação de estampagem e tende a cair de intensidade logo em que o punção começa a penetrar na matriz.

Uma especificação importante para se obter um produto conforme o desejado é a escolha do material adequado. Para isso uma prática comum é levantar o limite de embutimento do material. Batalha (2008) descreve este fator como o limite de redução de diâmetro da peça. Em geral o valor médio para o limite de embutimento é de 1,75. Tem-se então:

$$D_{matriz} = \frac{D_{chapa}}{1,75} \quad (8)$$

Para a determinação do diâmetro da chapa ou *blank*, pode-se basear na lei da conservação da massa. Essa hipótese implica em um volume de material constante durante o processamento (CHIAVERINI, 1986). Tem-se então para um punção em forma de cilindro a seguinte expressão e sua representação esquemática na figura a seguir:

$$D_{chapa} = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad (9)$$

Onde,

- D_{chapa} = diâmetro da chapa
- d = diâmetro do copo
- h = altura do copo

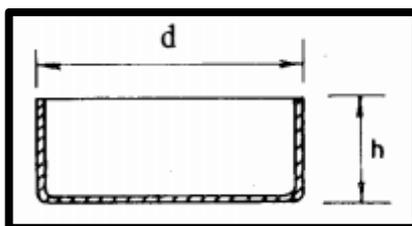


Figura 11 - Figura base para o cálculo do diâmetro do *blank*

Fonte: Chiaverini (1986).

É perceptível a grande quantidade de variáveis influentes neste processo como material, geometria do punção e da matriz e condições de lubrificação; o que torna o controle deste processo algo complexo. Para obter qualidade é preciso conhecer o comportamento de todos os parâmetros e para isso alguns ensaios foram elaborados como os ensaios: Erichsen, Olsen e Swift.

“Os ensaios de fabricação procuram avaliar as condições de conformação que evitem defeitos como rugas, trincas de bordas (no caso da estampagem de copos), entre outros. E também são úteis para determinar os esforços envolvidos entre a ferramenta de conformação e o material de trabalho nas diferentes situações existentes em um processo... Enfim, estes ensaios são amplamente aplicados na indústria de produtos que utilizam a conformação plástica como meio de processamento.” (BATALHA, 2008).

De acordo com Batalha (2008), os ensaios de embutimento podem ser descritos da seguinte maneira:

- Ensaio Erichsen: deformação de uma tira metálica com a utilização de um punção esférico e uma matriz. É realizada a medição da máxima penetração do punção até a ruptura do corpo de prova;

- Ensaio Olsen: semelhante ao ensaio Erichsen, porém com diferenças nas dimensões do equipamento;

- Ensaio Swift: deformação de um disco metálico com a utilização de um punção cilíndrico e uma matriz. São estampados corpos de prova com diferentes diâmetros até que se atinja a máxima força do punção antes que o copo seja todo estampado. É realizada a medição do maior diâmetro do disco que o material é capaz de resistir antes de ocorrer à ruptura do copo.

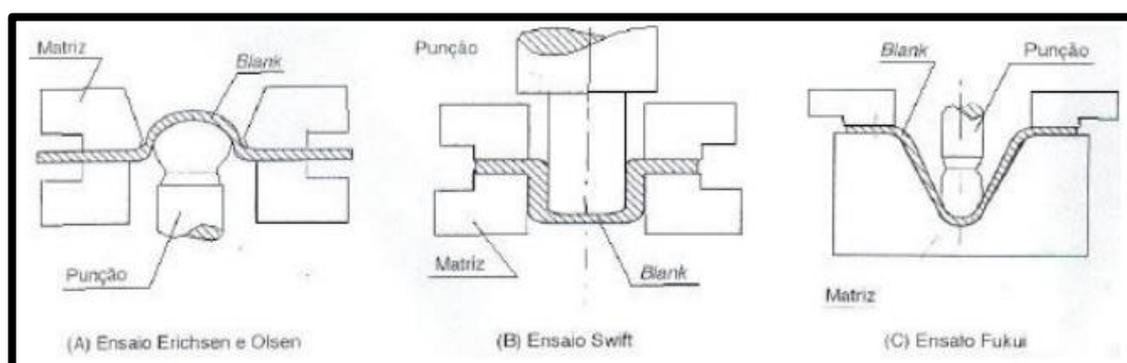


Figura 12 - Esquemas dos tipos de ensaio de embutimento

Fonte: Adaptado de Batalha (2008).

2.2 PROJETO DE PRENSAS PARA ESTAMPAGEM

2.2.1 PROJETO ESTRUTURAL

Os principais componentes estruturais de um equipamento para estampagem são as bases ou placas formadas pelo cabeçote e pela base inferior, os pinos guia, as buchas, os pinos de fixação, o extrator e os componentes já mencionados: as ferramentas e o sujeitador.

As placas servem de apoio para a de toda a estrutura da prensa e para a aplicação de força. Nelas são fixados o punção e a matriz. Em geral as placas são de aço SAE 1020 ou 1045, esquadrejadas e retificadas com tolerâncias paralela e

ortogonal de $\pm 0,04$ milímetros. Sua espessura deve ser maior que 20 mm (PROVENZA, 1982).

As guias, fabricadas em aço alto carbono ou aço cementado, temperado e retificadas, devem ser fixadas sob pressão e esquadrejadas para garantir o paralelismo e o fechamento perfeito do conjunto. Devem se apresentar no mínimo em duas e devem possuir comprimento suficiente para impedir a separação do cabeçote da base durante o processamento. As buchas, constituídas de um material mais mole que as colunas guias (Aço 1010 cementado, temperado e retificado, ou bronze), podem ser alojadas tanto na placa inferior como na superior através de grampos e parafusos que garantam o perfeito esquadro. (PROVENZA, 1982).

Segundo Provenza, são três as classes de folga adotadas na montagem guia/bucha:

Tabela 2 - Tabela de classe de folgas para a montagem guia-bucha.

1ª Classe de Folga	0,018 mm
2ª Classe de Folga	0,02÷0,06 mm
3ª Classe de Folga	0,08 mm

Fonte: Provenza (1982).

A montagem da primeira parte constituída de placas, pinos guia e buchas pode ser feita de diversas maneiras:

- Com 2 ou 4 pinos;
- Com pinos no centro, na diagonal ou na traseira;

Os pinos de fixação servem como elementos referenciais e devem resistir aos esforços decorrentes do processo. Eles devem ser superdimensionados, feitos de aço 1010/20, cementados e retificados. Para evitar que o posicionamento dos pinos gere trincas ou até mesmo o colapso da matriz pode-se obedecer a tabela e a figura a seguir:

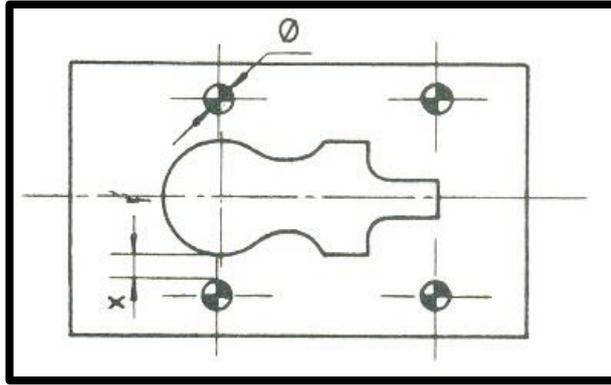


Figura 13 - Figura referência para o posicionamento dos pinos de fixação

Fonte: Provenza (1987).

Tabela 3 - Tabela para posicionamento dos pinos de fixação.

\varnothing mm	3-6	6-12	12-20
$x \geq$	6	10	13

Fonte: Provenza (1982).

O sujeitador é um dispositivo posicionado ao redor do punção sendo seu diâmetro geralmente igual ao da chapa a ser embutida. A função do sujeitador é controlar o fluxo de material durante o processamento. Sua presença é importante para evitar o enrugamento no flange da peça e se torna obrigatória para chapas finas com espessura menor que 1,2 milímetros. (BATALHA, 2008).

Comumente são encontrados 4 meios de montagens do sujeitador:

1. Colchão pneumático;
2. Arruelas de borracha empilhadas;
3. Prensas de dupla ação
4. Molas

Os extratores tem a função de evitar o arrasto da peça embutida pelo punção reduzindo o risco de ruptura da peça. Esses componentes podem aplicadas as matrizes e aos punções e podem ser acionadas por barras, alavancas, molas, sistemas pneumáticos ou hidráulicos. (PROVENZA, 1987).

2.2.2 PROJETO FERRAMENTAL

O punção e a matriz, também chamados de macho e fêmea, respectivamente; são elementos fundamentais de uma ferramenta de conformação mecânica. Suas geometrias são diversas dependendo do produto final, do material e outras variáveis como espessura da chapa. Em geral a fabricação desses componentes é feita em aço carbono ou aço liga. (PROVENZA, 1987).

2.2.2.1 FERRAMENTAS DE CORTE

Para o correto dimensionamento das ferramentas de corte, Provenza (1987) estabelece algumas considerações:

- As matrizes determinam as dimensões das peças;
- As dimensões das matrizes devem corresponder ao limite inferior da tolerância das peças;
- Para produtos sem tolerância estabelecida as matrizes de corte devem ser diminuídas em 0,1 milímetros.

Para que a peça produzida possua um aspecto bom e não contenha rebarbas é necessário que as trincas iniciadas nos fios de corte do punção e da matriz se encontrem. Isso irá ocorrer se uma determinada folga entre matriz e punção for obedecida. Conforme citado na seção 2.1.1.1 esta folga varia em função da espessura e do material da chapa.

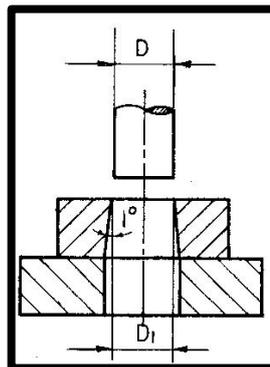


Figura 14 - Esquema representativo da folga entre matriz e punção
Fonte: Adaptado de Provenza (1987).

Com o auxílio da Figura 14 a folga pode ser obtida através da equação:

$$f = D_1 - D \quad (10)$$

Na tabela a seguir podem ser encontrados valores de referência para a folga entre matriz e punção como função da espessura e do material da chapa a ser cortada.

Tabela 4 - Folga entre punção e matriz para o processo de corte

FOLGA ENTRE PUNÇÃO E MATRIZ										
Espessura da chapa mm	Aço					Latão		Cobre		Alumínio
	doce	semi duro	duro	baixo teor Si	muito Si	doce	duro	doce	duro	
0,25	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
0,50	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	
0,75	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	
1,00	0,05	0,06	0,07	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,07	0,02
1,25	0,06	0,08	0,09	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,09	0,03
1,50	0,07	0,09	0,10	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	0,11	0,04
1,75	0,09	0,10	0,12	0,09	0,07	0,07	0,09	0,09	0,13	0,05
2,00	0,10	0,12	0,14	0,10	0,08	0,08	0,10	0,10	0,15	0,06
2,50	0,13	0,15	0,18	0,13	0,11	0,11	0,13	0,13	0,17	0,08
3,00	0,18	0,18	0,21	0,16	0,14	0,14	0,16	0,16	0,20	0,10

Fonte: Adaptado de Provenza (1986, p. 9.10).

A fim de facilitar a saída do material cortado, um ângulo de saída pode ser atribuído a matriz conforme pode ser observado na Figura 14. Este ângulo usualmente varia entre 0,5 a 3 graus.

Para evitar a flambagem do punção a equação abaixo pode ser utilizada a fim de determinar o comprimento máximo do mesmo:

$$l_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{F}} \text{ [mm]} \quad (11)$$

Onde:

- l_0 = comprimento de flambagem;
- E = módulo de elasticidade normal;
- J_{min} = momento de inércia mínimo da secção do punção;
- F = força axial do punção [Kg].

Por segurança l_0 se reduz de 5 a 30 vezes.

2.2.2.2 FERRAMENTAS DE EMBUTIMENTO

Segundo Provenza (1986, p. 17.03), para se obter um produto com qualidade o ferramental deve ser bem estudado e o material da chapa deve ser apropriado. Para tanto seguem-se as recomendações desta seção.

Uma característica importante a ser definida nos punções é seu raio indicado na figura abaixo, o seu valor nunca deve ser inferior ao raio de concordância da matriz. (BATALHA, 2008).

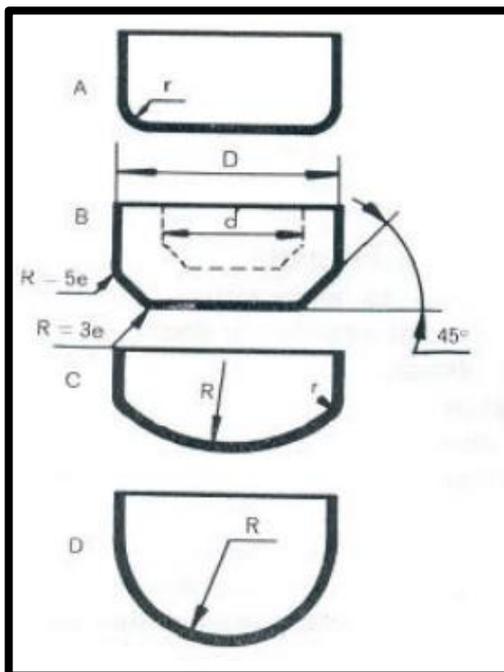


Figura 15 - Formas mais comum de punção em processos de embutimento.
Fonte: Batalha (2008).

A matriz é o componente mais importante do processo, pois é ele que carrega o formato mais próximo ao produto. É importante, então, que a mesma esteja rigidamente fixada sobre a base inferior com parafusos, porta-matriz ou qualquer outro meio que garanta a formação de um conjunto sólido (PROVENZA, 1987).

Para Batalha (2008), o raio da matriz é tão importante quanto o raio do punção, pois valores alterados desta variável podem resultar:

- Para o caso de raio elevado: efeito não muito significativo;
- Para o caso de raio pequeno: aumento significativo do esforço de embutimento e conseqüente tendência de engripamento do punção, e/ou destacamento do fundo do copo.

Batalha (2008) ainda sugere algumas formulas para o cálculo do valor do raio de matriz adequado:

Tabela 5 - Tabela de equações para o cálculo do raio da matriz

Aço	$r = 0,8\sqrt{(D - d) \cdot e}$
Alumínio e suas ligas	$r = 0,9\sqrt{D - d}$

Fonte: Batalha (2008).

Onde,

- D = diâmetro da chapa
- d = diâmetro externo do copo
- e = espessura da chapa

Outro parâmetro essencial que deve ser levado em conta é a folga entre o punção e a matriz. Folgas elevadas podem provocar enrugamento da peça, rebarbas e outros problemas; folgas reduzidas podem causar o travamento do sistema. Batalha (2008) cita algumas fórmulas que podem ser utilizadas para levantar este valor de acordo com o material e a espessura da chapa:

Tabela 6 - Tabela de equações para o cálculo da folga entre punção e matriz

Aço	$E = e + 0,07\sqrt{10 \cdot e}$
Materiais não ferrosos	$E = e + 0,04\sqrt{10 \cdot e}$
Alumínio	$E = e + 0,02\sqrt{10 \cdot e}$

Fonte: Batalha (2008).

Onde,

- E = folga entre matriz e punção;
- e = espessura da chapa.

2.3 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E SUA RELAÇÃO COM A PRÁTICA

O mais importante conceito na teoria de David Ausubel é o de aprendizagem significativa, a qual, segundo o autor, pode ser definida como um processo pelo qual uma nova informação interage com um aspecto relevante da estrutura de conhecimento pré-estabelecida do indivíduo. Ou seja, essa nova informação se relaciona com algo específico já conhecido pelo aluno, definido por ele como um *subsunçor*. (Moreira e Masini, 2011)

Em contraste com a ideia de aprendizagem significativa, Ausubel define a aprendizagem mecânica, a qual é caracterizada por ocorrer com poucas ou nenhuma interação com conceitos relevantes pré-existentes, levando a um armazenamento arbitrário da nova informação. A diferenciação não é, no entanto, uma dicotomia, mas sim deve ser vista como um *continuum* de acordo com Ausubel. (Moreira e Masini, 2011) a 27

Dever ser estabelecida também a diferenciação entre a aprendizagem por recepção e a aprendizagem por descoberta, do qual derivam as aprendizagens mecânica e significativa. A aprendizagem por recepção ocorre quando o conteúdo é apresentado ao aluno em sua forma final, enquanto que na aprendizagem por descoberta o conteúdo principal a ser aprendido é descoberto pelo aprendiz. De uma forma ou de outra, essa aprendizagem somente será significativa se o novo conhecimento interagir com conceitos subsunçores relevantes pré-existentes. (Moreira e Masini, 2011)

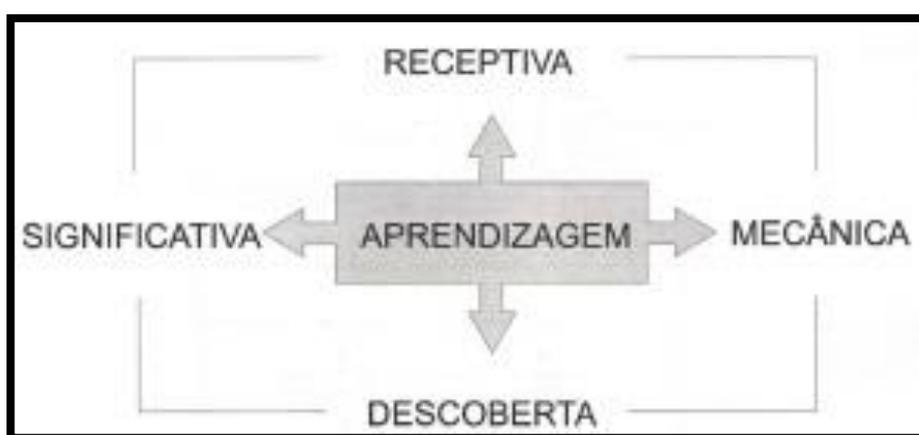


Figura 16 - Representação de aprendizagem segundo Ausubel.
Fonte: Ferrazza (2001).

A prática tem, como efeito mais imediato, o aumento da estabilidade e da clareza dos conteúdos recém-aprendidos. Além disso, ela aumenta a receptividade do aprendiz para apresentações posteriores do mesmo conteúdo, capacita-o a dar passos preventivos para evitar futuros esquecimentos e facilita a retenção de novas tarefas de aprendizagem relacionadas. (Ausubel;Novak;Hanesian, 1980)

Ainda segundo Ausubel, Novak e Hanesian (1980): “A importância da prática e do treino na aprendizagem significativa e na retenção tem sido, em nossa opinião,

injustamente rebaixada...” Além disso: “O treino... é mais eficaz na aprendizagem significativa: (1) quando ocorre de modo estruturado mais do que quando ocorre de modo acidental, casual ou natural, e (2) quando a tarefa de aprendizagem é inicialmente consolidada num contexto homogêneo antes de ser aplicada a contextos mais heterogêneos”.

Em resumo, o desenvolvimento de materiais estruturados para a demonstração prática de um conteúdo pode exercer considerável influência no resultado do aprendizado dos alunos envolvidos, especialmente no que tange à fixação dos conceitos ensinados. (Ausubel;Novak;Hanesian, 1980).

Segundo FERRAZZA (2001), Ausubel defende que, para cursos com duração mais demorada, como cursos de um semestre apenas, organizadores devem ser elaborados, passando de conceitos mais gerais, mais inclusivos a serem aprendidos, a conceitos mais específicos, referenciando, ocasionalmente, esse principais conceitos.

Aplica-se aqui este conceito, começando a abordagem de uma forma mais inclusiva no aprendizado dos processos de fabricação por conformação, com o objetivo de um maior detalhamento, conforme a figura seguir, adaptada de FERRAZZA (2001, p. 11) para a realidade deste trabalho.

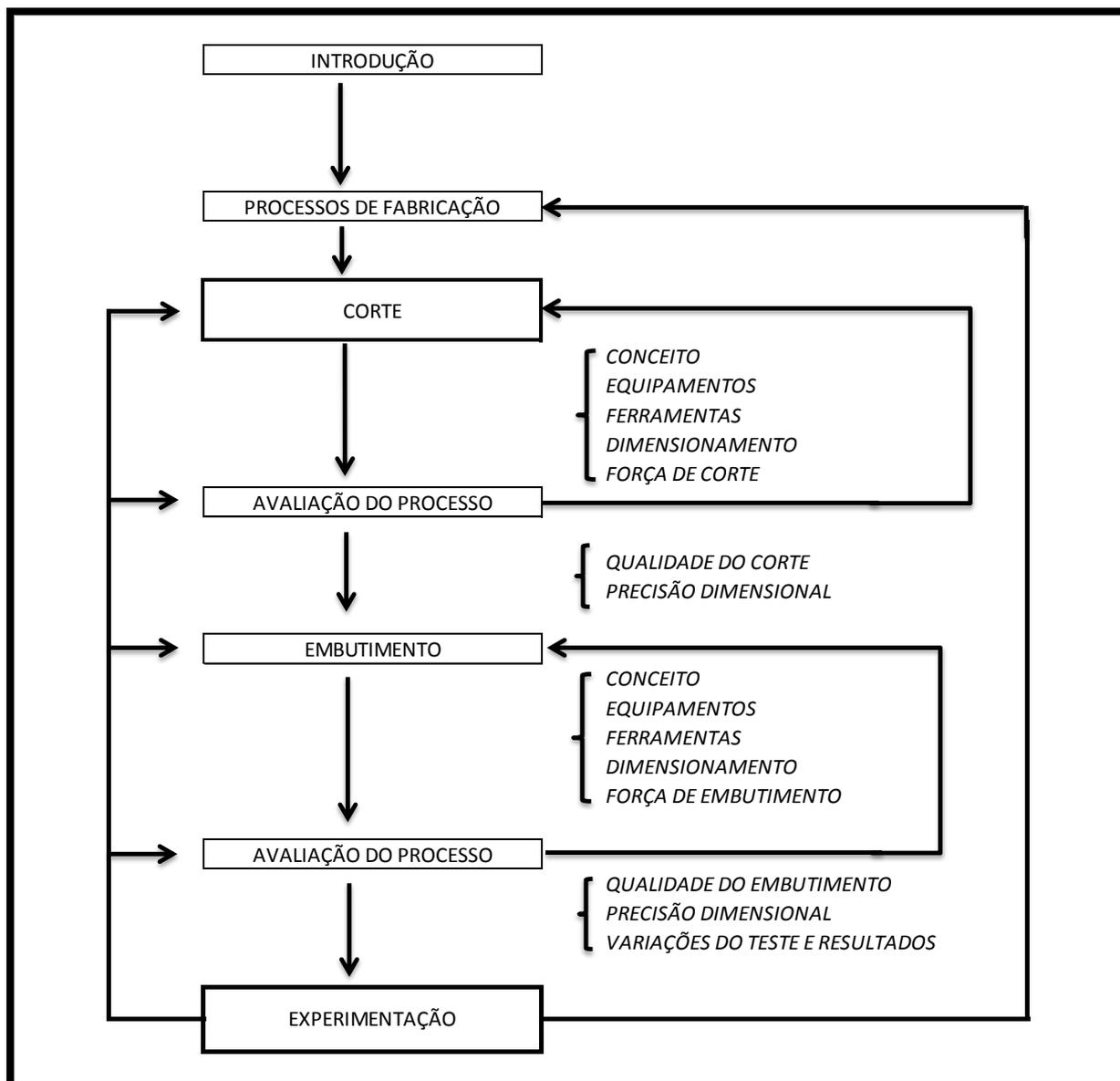


Figura 17 - Representação de fluxo de informação e aprendizagem nos processos de fabricação propostos.

Fonte: Adaptado de Ferrazza (2001).

Notoriamente, a visualização e experimentação de uma prática proposta na sala de aula, fomenta a capacidade crítica do indivíduo, não somente no individual, mas coletivamente.

“Neste contexto, os audiovisuais, apresentam-se não apenas como obras para o lazer, mas tornam-se poderosas ferramentas para fomentar um novo modelo de ensino, que a sociedade demanda. Ou seja, o mundo vislumbra a generalizada tendência do ensino através de audiovisuais, utilizando um equipamento que otimize esses recursos e que esteja acessível à escola, bem como à população” (FERRAZZA, 2001).

A criação de novos métodos de ensino, como a utilização de recursos audiovisuais, ameniza os problemas da rápida geração dos novos conhecimentos pelas tecnologias atuais, facilitando a comunicação e distribuição dos conhecimentos a serem ensinados.

3 PESQUISA E PLANEJAMENTO

A partir da definição da metodologia e tendo completa a revisão bibliográfica partiu-se para a pesquisa e planejamento do projeto. Este capítulo terá como guia o fluxograma do desenvolvimento do projeto que pode ser visualizado a seguir.

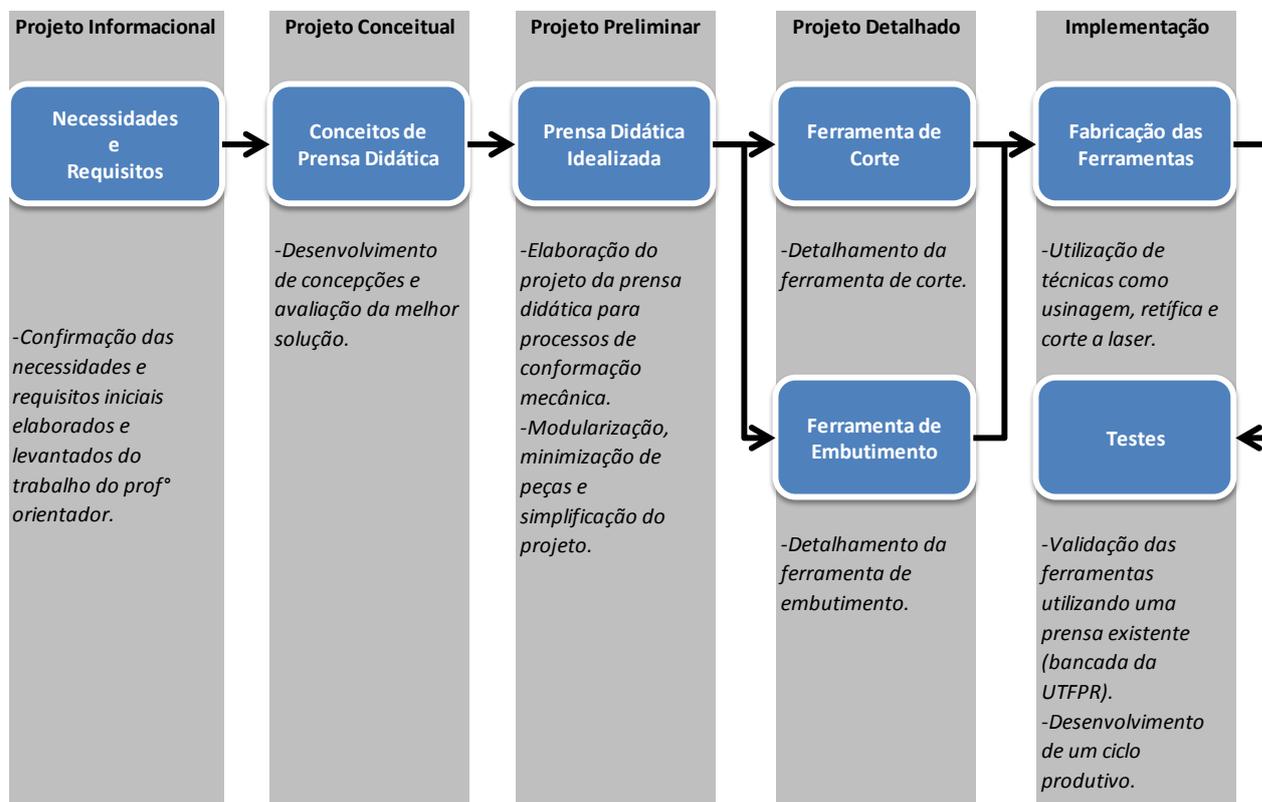


Figura 18 - Fluxograma do Desenvolvimento do Projeto

3.1 PROJETO INFORMACIONAL

A fim de parametrizar e orientar o projeto, serão utilizadas algumas técnicas propostas na literatura de Pahl e Beitz. Esta etapa do trabalho se baseia na identificação dos potenciais clientes e levantamento dos requisitos técnicos necessários, além da busca das melhores práticas e soluções para o problema proposto.

3.1.1 BENCHMARKING

O processo de *benchmarking* consiste na seleção e comparação das melhores práticas da indústria. Com o foco em equipamentos didáticos, foram pesquisadas

diversas empresas e fornecedores, porém como resultado este estudo revelou a escassez de produtos voltados à simulação de processos de fabricação.

O APÊNDICE B mostra os fabricantes disponíveis no mercado e as características dos produtos oferecidos. Porém somente a empresa *Amatrol Inc.* possuía em seu catálogo comercial um produto funcional para conformação, o modelo T9013-P e seus respectivos módulos. Entretanto em contato com a empresa, esta informou que já não fabricava mais o modelo há vários anos.

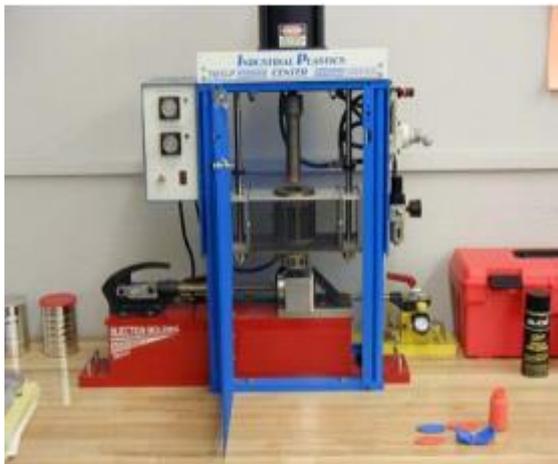
Fabricante		
Modelo	T9013-P	
Nacionalidade	Estados Unidos	
Preço	\$ 29.205,00	
Dispositivo de Acionamento	Hidráulico	
Força	9000 kgf	
Controle	Acionamento semi-automático	
Funções (Processos)	Estrusão, Injeção, Extrusão a quente	
Tamanho	Informação não disponível	
Acessórios	Acessórios para extrusão de plástico, sinterização entre outros.	

Figura 19 - Equipamento didático da marca Amatrol para simulação de processos de fabricação.

Nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, existe uma versão de uma prensa hidráulica em formato "C", não comercial, montada em uma bancada didática, porém esta foi desenvolvida para gerar carga e ciclo em demonstrações de hidráulica e seus componentes, conforme dissertação de mestrado brevemente explicitada no CAPÍTULO 1 deste trabalho.

3.1.2 NECESSIDADES

A fim de conhecer as necessidades do público alvo, utilizou-se a segunda parte do questionário relatado no CAPÍTULO 1. Abaixo se encontra a tabela contendo os resultados de forma resumida.

Tabela 7 - Levantamento das Necessidades do Cliente.

Levantamento das Necessidades dos Clientes		
Necessidade	Valor do Consumidor	Tendência
Facilidade na utilização	4	+
Visualização da operação	5	+
Segurança	5	+
Rapidez de ajuste	4	+
Interpretação dos dados	5	+
Tamanho da prensa	3	-
Força aplicada para conformação	4	+
Controle das variáveis	5	+
Preço	5	-
Flexibilidade para diversos processos	5	+
Vida útil	4	+

Todos os gráficos do levantamento das necessidades dos clientes estão contidos no APÊNDICE C para posterior consulta.

Refletindo em relação aos dados encontrados na pesquisa de campo, tanto questionário como *benchmarking*, chegaram-se as seguintes conclusões:

- Necessidades didáticas: a melhoria do ensino não se dá somente a partir de aulas teóricas, mas também de aulas práticas;
- Necessidades por aplicabilidade: a partir da etapa de *benchmarking*, verificou-se que não há empresa que fabrique algo similar ao proposto no âmbito do mercado nacional ou estrangeiro;
- Facilidade na operação: item fundamental para total compreensão dos processos de fabricação. Um equipamento de fácil aplicação possibilita o rápido treinamento de vários profissionais, tornando a demonstração intuitiva;
- Compacto e baixo peso: com dimensões reduzidas é possível deslocar o equipamento para qualquer lugar, podendo a demonstração ser feita em lugares definidos pelo usuário;

- Modularidade: a partir da padronização da base para ferramentas, a confecção de uma ferramenta para um processo de conformação que não está no escopo do projeto se torna viável;
- Baixo custo: o baixo custo do projeto culmina na disseminação do projeto para centros tecnológicos, universidades e empresas;
- Segurança: todo equipamento deve estar galgado de sistemas de segurança que garantam a integridade física tanto do operador quanto do expectador.

3.1.3 CASA DA QUALIDADE

A partir das necessidades encontradas foram estabelecidos atributos quantitativos chamados de Requisitos da Qualidade de modo que as solicitações dos clientes se tornassem algo mensurável no produto.

Realizando, então, o cruzamento entre as necessidades do cliente e os requisitos da qualidade foi elaborada a Casa da Qualidade. Esta ferramenta possibilitou a classificação dos requisitos do produto em uma ordem de prioridades.

Como é possível perceber através da observação do APÊNDICE D, o principal atributo do produto é o custo. O que reforça ainda mais a necessidade de um produto economicamente viável.

3.1.4 REQUISITOS

Para delimitar os requisitos do produto, e assim, garantir um produto de qualidade e factível sem esquecer as limitações de custo foi elaborado o quadro abaixo contendo as especificações do produto.

Tabela 8 - Tabela de Especificações do Produto.

Especificações do Produto				
Requisito	Prioridade CQ	Objetivo	Sensor	Saídas Indesejáveis
Número de botões de acionamento	9	3 unidades	Contagem	Muitos botões de acionamento
Tempo de execução da tarefa	12	60 segundos	Cronômetro	Tarefa demorada
Número de dispositivos de segurança	2	1 unidade	Contagem	Baixa segurança, risco ao operador
Tempo de ajuste	9	120 segundos	Cronômetro	Setup muito alto
Compilação de dados	7	1 unidade	Contagem	Falta de manipulação de resultados
Dimensões	6	2 m ²	Trena	Dimensões elevadas, produto grande
Massa	11	200 kg	Balança	Peso excessivo
Força máxima aplicada	5	3,5 ton	Dinamômetro	Força insuficiente para conformação
Número de variáveis controladas	3	2 unidades	Contagem	Poucas variáveis controladas
Custo do produto	1	R\$ 18.000,00	Moeda	Custo elevado
Número de processos envolvidos	4	2 unidades	Contagem	Produto pouco flexível
Quantidade de tempo de vida	7	5 anos	Contagem	Baixa durabilidade

3.2 PROJETO CONCEITUAL

A etapa do projeto conceitual, parte da seguinte sistemática para se obter concepções preliminares:

1. Análise funcional do equipamento, tendo como resultado a partir de um método sistemático, a matriz morfológica com as possíveis soluções para as funções apresentadas;
2. Seleção da solução a partir de técnicas como a Matriz de Avaliação, tendo como base de comparação, parâmetros como necessidade dos clientes com o nível de importância representativo.

As etapas acima descritas são desenvolvidas nas seções a seguir.

3.2.1 ANÁLISE FUNCIONAL

Através de um processo de abstração dos requisitos abordados chega-se a função global do equipamento que se caracteriza por ser a principal função do produto, ou seja, sua utilidade.

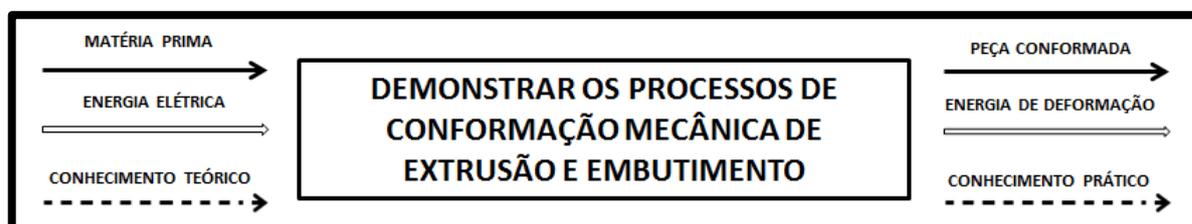


Figura 20 - Função global da prensa didática.

Como transformação de material tem-se o processamento da matéria prima e a consequente obtenção da peça conformada. Para que esse processo ocorra é necessário que se tenha a transformação de energia elétrica, fonte de energia escolhida, em energia de deformação suficiente para conformar a peça em sua forma desejada. Ao final, o produto tem como objetivo principal a transformação do conhecimento teórico em conhecimento prático.

Prosseguindo a análise funcional do dispositivo desenvolvido chegaram-se as funções secundárias da prensa contidas na seguinte tabela:

Funções Elementares	
A	Posicionar a matriz
B	Fixar a matriz
C	Evitar contato humano durante a conformação
D	Acionamento
E	Carga
F	Conformar o material
G	Extrair a peça

Figura 21 - Análise funcional da prensa didática.

Essas funções chamadas funções secundárias apesar do nome não podem ser desprezadas, pois as mesmas desempenham papel fundamental para o completo desempenho da função global. Portanto, seguindo as funções secundárias em etapas, por exemplo, posicionar a matriz, fixar a matriz e assim por diante até a

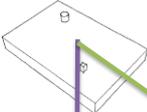
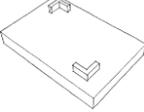
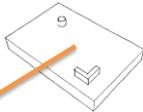
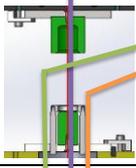
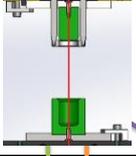
extração da peça, tem-se o desenvolvimento da demonstração dos processos de conformação mecânica de extrusão e estampagem.

3.2.2 MATRIZ MORFOLÓGICA

De posse da análise funcional, partiu-se para a procura de soluções para cada função secundária. Para isso utilizou-se a técnica de *brainstorms* e a ferramenta Matriz Morfológica para elaborar e organizar as possíveis soluções. Será apresentada no próximo tópico a lista contendo as soluções desenvolvidas e as suas combinações para formar as concepções.

3.3 DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DAS CONCEPÇÕES

Realizando algumas combinações das soluções levantadas na matriz morfológica se obtiveram três (3) concepções. Abaixo é mostrada a matriz morfológica acompanhada de cada solução:

Matriz Morfológica		Solução		
		S1	S2	S3
Posicionar a matriz	A	Poka Yoke com Pinos 	Guias Laterais 	Pino e Guia Lateral 
	B	Parafuso 	Grampo de Fixação Rápida 	Grampo Tipo Sargento 
Evitar contato humano durante a conformação	C	Portinhola 	Grade 	Barreira de Luz 
	D	Acionamento Mecânico por Alavancas 	Acionamento Elétrico por Botões 	
Deslocar Atuadores	E	Mecânica 	Pneumática 	Hidráulico 
	F1			
Conformar o material (Corte)	F2			
Extrair a peça	G	Cilindro com Pino Extrator 	Mola 	

Concepção	
1	
2	
3	

Figura 22 – Matriz de geração das concepções para o sistema.

De posse de todas as concepções elaboradas e da análise das soluções, parte-se para a avaliação e posterior seleção da melhor concepção para o desenvolvimento do projeto. Para esta etapa optou-se pela utilização da Matriz de Avaliação Relativa, segundo figura a seguir:

Critérios de avaliação	Tendência	Matriz de Avaliação Relativa	Concepção		
			1	2	3
	↑	Facilidade na utilização	Referência	-	-
	↑	Visualização da operação		=	=
	↑	Segurança		-	+
	↑	Rapidez de ajuste		-	=
	↑	Interpretação dos dados		=	=
	↓	Tamanho da prensa		-	=
	↑	Força aplicada para conformação		-	=
	↑	Controle das variáveis		-	-
	↓	Preço		+	+
	↑	Flexibilidade para diversos processos		=	=
	↑	Vida útil		+	+
	Número total de sinais "+"			0	2
Número total de sinais "-"			0	6	2
Número total de sinais "="			0	0	0
Soma líquida (sinal "+" - sinal "-")			0	-4	1
Classificação das concepções			2	3	1

Figura 23 - Matriz de Avaliação Relativa

Conforme pode ser observada na Figura 23 a concepção que obteve a melhor classificação foi a de número 3 constituída dos seguintes elementos:

Subfunção	Solução	Descrição
Posicionar a matriz	S1	<i>Poka Yoke</i> com pinos
Fixar a matriz	S2	Grampo de fixação
Evitar contato humano durante a conformação	S1	Portinhola
Acionar atuadores	S1	Acionamento mecânico por alavancas
Deslocar atuadores	S3	Sistema hidráulico
Conformar o material (Corte)	S1	Ferramentas de corte
Conformar o material (Embutimento)	S1	Ferramentas de embutimento
Extrair peça	S1	Cilindro com pino extrator

Figura 24 - Elementos da concepção escolhida.

Nas próximas seções, são apresentadas as análises de cada solução proposta da concepção selecionada.

3.3.1.1 FUNÇÃO A – POSICIONAR A MATRIZ

O posicionamento da matriz desempenha um papel fundamental para o correto funcionamento do dispositivo. É necessário que a matriz fique alinhada no centro da placa fixa inferior, de forma a garantir o funcionamento do processo além de proporcionar um equilíbrio na distribuição de forças durante a compressão.

Utilizaram-se para assegurar estas condições, pinos de posicionamento, dispostos conforme a solução S1 da Figura 22. Porém, os pinos serão dispostos de tal maneira que a ferramenta tanja os pinos em três pontos diferentes. A solução proposta é utilizada como forma de simplificação sem prejuízo no desempenho.

Vale ressaltar ainda, que a matriz de conformação, seja ela de corte ou estampagem, também tem pinos de centralização do tipo pino guia utilizados em moldes de injeção, como mostra a figura a seguir.



Figura 25 - Base para estampo - Centralização por pinos e buchas de baixo atrito
Fonte: POLIMOLD (2013).

O alinhamento na mesa fixa inferior é feita com as ferramentas fechadas, buscando garantir o alinhamento para a demonstração do processo de conformação pretendido.

3.3.1.2 FUNÇÃO B – FIXAR A MATRIZ

Foram levantadas três alternativas para fixação da matriz na base do dispositivo: fixação por parafusos, fixação por grampo de fixação rápida e fixação por grampos tipo sargento.

Buscando uma alternativa de fácil confecção, otimização do tempo de preparação do dispositivo e que apresentasse fixação confiável, optou-se por utilizar fixação por grampo em conjunto com parafusos. Esta modificação no projeto objetivou atender à especificidade das ferramentas.

3.3.1.3 FUNÇÃO C – EVITAR CONTATO HUMANO DURANTE A CONFORMAÇÃO

Como verificado durante o projeto informacional e também em consonância com a hipótese número 5 (H5) apresentado no CAPÍTULO 1, a segurança do dispositivo é uma das necessidades prioritárias do sistema. Para evitar qualquer tipo de acidentes foram pesquisados métodos e equipamentos de segurança para máquinas e equipamentos industriais. Durante a pesquisa os dispositivos que mais se destacaram foram portinholas, grades e barreiras de luz. As grades de proteção evitam o acesso à máquina, porém não eliminam o risco de acidentes por objetos eventualmente atirados contra o operador. Além de conter as mesmas características mencionadas anteriormente para a grade, o sistema de segurança com barreiras de luz tem um custo mais elevado. Optou-se, portanto, pela utilização da portinhola de acrílico garantindo o isolamento total do operador durante o processamento sem prejuízo na visualização do processo.

Todo sistema de segurança a ser desenvolvido deve estar em consonância com as normas de segurança vigentes (NR12 – ANEXO VII, NT16 e NBR14009).

3.3.1.4 FUNÇÃO D – ACIONAMENTO

Os atuadores serão acionados por comando mecânico manual, do tipo alavanca. Este sistema consiste em um mecanismo de simples e rápida operação em relação à botoeira que exigiria um sistema elétrico para o seu funcionamento, o que poderia também, elevar o custo do produto.

O sistema será munido de botão de emergência para interrupção do movimento de conformação do tipo cogumelo conforme normas de segurança vigentes, como discutido na Função C.

3.3.1.5 FUNÇÃO E – CARGA

Os processos de conformação necessitam de um mecanismo que forneça força, robustez e confiabilidade. Abaixo são descritos os principais tipos de acionamento para o mecanismo proposto, mostrando seus pontos positivos e negativos.

Os componentes pneumáticos se apresentam robustos e resistentes ao ambiente hostil (PARKER, 2000). Apresentam forças relativamente pequenas quando comparadas as forças hidráulicas, não sendo prudente a sua utilização na extrusão de metais. Contudo, devido à rapidez nos movimentos pneumáticos, apresentam vantagem nos processos industriais de estampagem.

Na maioria das vezes, por motivos econômicos, acionamentos hidráulicos são utilizados quando outras alternativas (mecânica, elétrica ou pneumática) não forem possíveis de serem utilizadas. Seu baixo rendimento provocado pelo atrito entre os componentes hidráulicos e vazamentos muitas vezes não compensam o investimento. Porém, a hidráulica se mostra superior por possibilitar, quando necessário, um controle mais rígido da força e velocidade aplicadas. É um sistema mais seguro, pois garantem parada instantânea. Além disso, acionamentos hidráulicos possibilitam pressões maiores e maior transmissão de potência (SENAI/SC, 2004).

Os dispositivos com acionamento mecânico apresentam o menor custo dentre as opções previamente citadas acima. A mais comum é o acionamento por uma alavanca. Como vantagem, se destacam por sua simplicidade construtiva. São robustas, porém quando é requerida uma força maior, necessitam um aumento no braço da alavanca de força, podendo esbarrar em problemas de espaço físico.

Analisando-se mais a fundo os acionamentos propostos, optou-se por utilizar o cilindro hidráulico. Neste tipo de sistema, obtém-se a quantidade necessária de força com uma pressão relativamente baixa e com simples controle.

3.3.1.6 FUNÇÃO F – CONFORMAR O MATERIAL

Para a conformação do material, propôs-se a confecção de uma ferramenta específica para cada processo, baseando seu dimensionamento nos dados bibliográficos pesquisados no início deste trabalho.

3.3.1.7 FUNÇÃO G – EXTRAIR A PEÇA

Durante o processo de estampagem é necessário que se tenha um dispositivo para a extração da peça que se encontrará retida na matriz ou no punção ao final do processo. Para realizar esta atividade foram discutidas duas soluções: a utilização de um cilindro com pino extrator ou a utilização de molas. Apesar do custo alto em comparação com a solução por molas, decidiu-se optar por utilizar um cilindro hidráulico, sendo mais adequado para a didática oferecida o que será mais bem explicado no próximo capítulo.

3.4 PROJETO PRELIMINAR

Após a definição do modelo a ser concebido, foram estabelecidos parâmetros de referência para o sistema proposto.

3.4.1 LIMITAÇÕES DO PROJETO

Com o intuito de melhorar os detalhes conceptivos, aumentar a confiabilidade, reduzir custo e detalhar o projeto, foram definidas algumas limitações do equipamento, conforme mostrados na tabela a seguir.

Tabela 9 - Parâmetros de referência para dimensionamento.

Parâmetro	Valor Admitido	Unidade	Observação
Potência instalada	2	CV	
Vazão máxima	5	lpm	
Força máxima	35000	N	3500 kgf
Pressão máxima no sistema	80×10^5	Pascal	80 bar
Curso máximo do atuador	200	mm	
Dimensões máximas da ferramenta	140x100	mm	Base padrão
Dimensões máximas da mesa	600x800x1200	mm	(LxPxA)
Peso total do conjunto	200	kg	Montagem completa

Estas limitações têm o intuito de oferecer todos os requisitos básicos do sistema hidráulico, á fim de se obter o processo pretendido. A variação destes parâmetros está intimamente ligada ao custo do projeto, uma vez que, quanto maior é a potência requerida, maior é o preço de mercado dos equipamentos a serem adquiridos.

3.4.2 DIMENSIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE PROCESSOS

Após a avaliação das opções existentes, optou-se pela concepção do dispositivo do tipo prensa com acionamento hidráulico e com duas colunas guias. Este dispositivo contém dois atuadores: o atuador principal que tem a função de deslocar o conjunto móvel além de simular o processo de conformação requerido e o segundo atuador para a extração de peças no processo de embutimento. Utilizou-se um cilindro hidráulico ao invés de uma mola para esta função, pois a força na mola varia com o deslocamento e na hidráulica ela é constante e/ou variável dependendo se há um controle programável neste cilindro.

O dispositivo contém uma mesa móvel guiada por buchas com rolamento para minimização do atrito, uma mesa fixa superior que comporta o cilindro de carga e o manômetro para registro da pressão e uma mesa fixa inferior que é fixada na bancada de perfil de alumínio.

Na parte fixa inferior, está comportado todo o restante do sistema: cilindro extrator, fixação da ferramenta de conformação, entre outros. A montagem das ferramentas é feita através de fixação mecânica com parafusos, através de furos roscados na mesa com espaçamento para permitir a troca de ferramenta. Além disso, são mostrados na figura abaixo, pinos fixados na base para garantir o alinhamento da ferramenta conforme já explicado no CAPÍTULO 3.

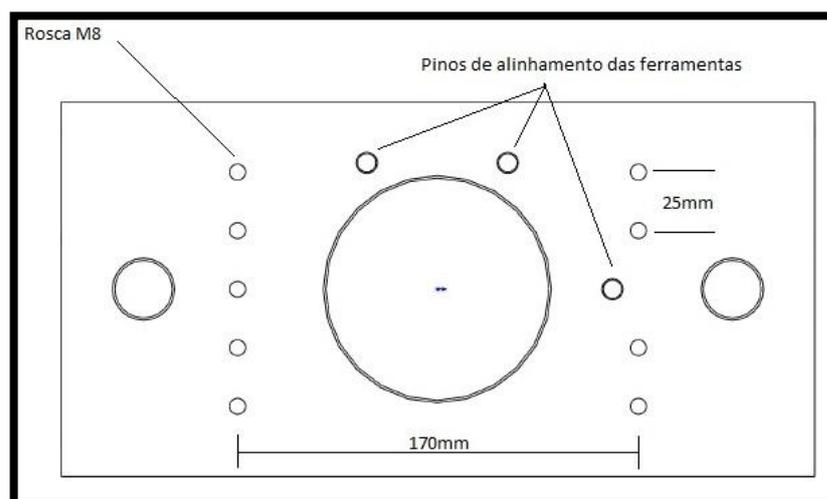


Figura 26 - Padronização da fixação e alinhamento das ferramentas

O sistema é acomodado em uma bancada de perfil de alumínio com dimensões de 40 mm x 40 mm, onde todos os outros componentes, como válvulas de bloqueio,

comandos e sistemas elétricos, são fixados com mecanismos apropriados. A bancada possui um painel para fixação de procedimentos e/ou anotações. Possui quatro rodízios para movimentação, sendo dois deles fixos com freio e os outros dois móveis.

Todas as conexões hidráulicas entre os atuadores e válvulas são do tipo engate rápido e as tubulações utilizadas são do tipo flexível e compatível com a pressão de trabalho dos experimentos.

Na figura a seguir é mostrada uma representação do dispositivo ideal composto da unidade principal, bancada e ferramentas. No entanto, este equipamento não será fabricado como citado anteriormente nas limitações do projeto.

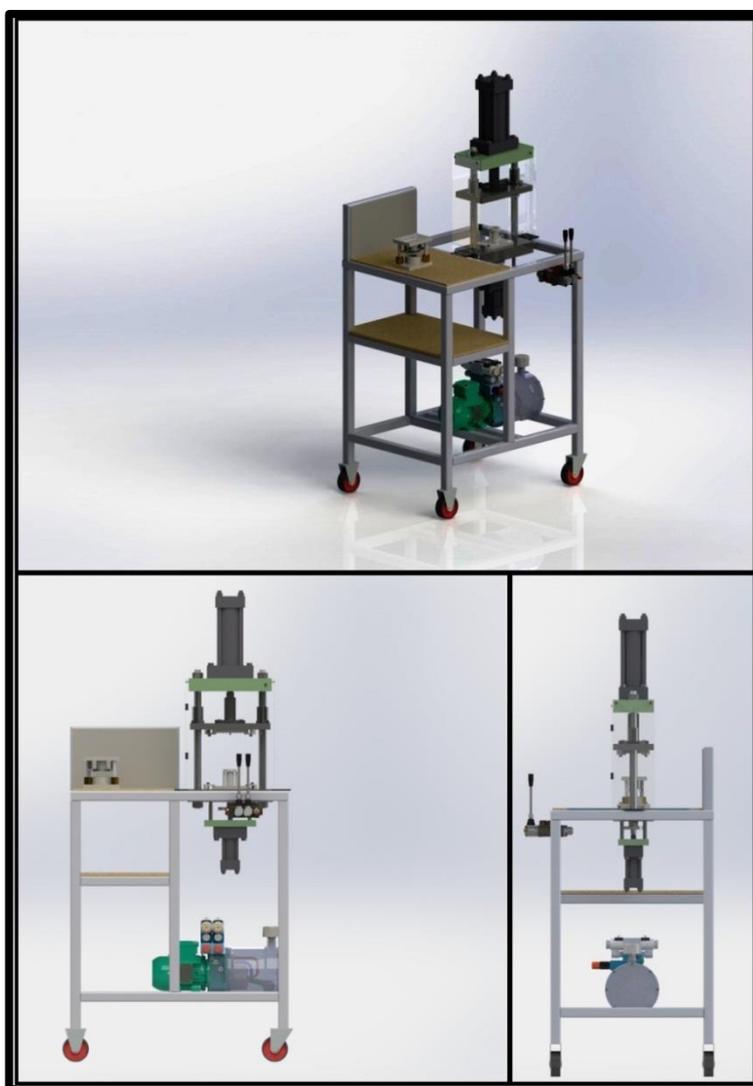


Figura 27 – Representação do dispositivo de processos idealizado

3.4.3 FERRAMENTAS DE PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

Como anteriormente exposto, as ferramentas de conformação têm como principal objetivo expor em pequena escala os processos de conformação.

Seguindo os requisitos do projeto, as ferramentas possuem as bases padronizadas visando a modularidade do sistema com a troca rápida das ferramentas, além de utilizar o sistema de alinhamento anteriormente exposto na Figura 26.

Para a simulação do processo de embutimento foi definido como produto um copo de alumínio de 30 mm de diâmetro, 10 mm de altura e espessura de 1,5 mm. Tendo essas dimensões como objetivos da estampagem, pôde-se dimensionar a matriz e o punção.

Tabela 10 - Tabela de Variáveis Definidas.

Parâmetros	Valores [mm]
Diâmetro do copo	30,0
Altura do copo	10,0
Espessura da chapa	1,5

A ferramenta de corte foi norteada nas informações constantes na Tabela 15. Utilizou-se aqui, a experiência do ferramenteiro que confeccionou os protótipos: primeiramente deve ser feita a ferramenta de embutimento e posteriormente a ferramenta de corte. A justificativa estava no tamanho do *blank* final proveniente do processo de corte, pois poderíamos experimentar os diversos tamanhos com amostras provenientes do corte a laser, evitando assim, a confecção de uma matriz dimensionada incorretamente.

No CAPÍTULO 4 é explanada a eficiência das ferramentas quanto ao requisito de qualidade de corte e embutimento. Também é mostrado o método para medição da variação da espessura da chapa através de três métodos distintos: resultados através de medição macroscópica, um dispositivo com um relógio comparador e método visual de deslocamento de linhas traçadas antes do processo.

3.5 PROJETO DETALHADO

O desenvolvimento do projeto implicou em alterações em relação ao projeto preliminar, com o intuito de melhor acomodar os componentes e melhorar o aspecto geral do projeto.

Dentro deste contexto, produziu-se o projeto em 3D do equipamento idealizado, como anteriormente citado, uma das premissas de validação deste projeto. A utilização do software *SolidWorks*® permitiu manipular os detalhes construtivos, análises de possíveis interferências e folgas no projeto, além da flexibilização do projeto, ou seja, não foi necessário desenvolver modelos físicos até a sua configuração final.

Antes de continuar com o detalhamento do projeto é necessário especificar o material do *blank* utilizado, para isto segue a tabela contendo as propriedades de interesse do material que será utilizado.

Tabela 11 - Propriedades do material do *blank*.

Tabela de Materiais					
Material	Características				
	Espessura [mm]	Limite de Resistência a Tração [N/mm ²]	Limite de Resistência ao Cisalhamento [N/mm ²]	Tensão de Escoamento [N/mm ²]	Módulo de Elasticidade [kg/mm ²]
Alumínio 3105	1,5	145	116	35	7030
Comentários	Valor atribuído	Valor tabelado	Valor tabelado	Valor tabelado	Valor tabelado

3.5.1 FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO

3.5.1.1 FERRAMENTA DE CORTE

Para iniciar o dimensionamento da ferramenta de corte é necessário o levantamento da força máxima para a realização do processo. Para isto será utilizada a equação 1 do CAPÍTULO 2.

Tabela 12 - Variáveis para o cálculo da força de corte.

Força de Corte					
Equação	$F_c = p \cdot e \cdot \tau$				
Material	Variáveis				
	perímetro (p) [mm]	espessura(e) [mm]	[N/mm ²]	Fc [N]	Fc [kgf]
Alumínio	143,9658614	1,5	116	25050,06	2553,52
Comentários	Valor calculado utilizando $p = 2 \cdot \pi \cdot r$	Valor atribuido	Valor tabelado	Valor calculado.	

Observa-se então, que para o corte de um *blank* circunferencial com raio de 23 milímetros e 1,5 milímetros de espessura é necessária a aplicação de uma força de aproximadamente 2554 kgf. O que se enquadra dentro das limitação apresentadas neste projeto.

Com o auxílio da Tabela 5 encontrada no CAPÍTULO 2 e realizando o cruzamento entre a espessura da chapa (1,5 mm) e o material utilizado (Alumínio), verifica-se que o valor encontrado para a folga entre matriz e punção é de 0,04 milímetros. Aplicando, então, a equação 10 e considerando o diâmetro do *blank* igual ao diâmetro da matriz conforme consideração da seção 2.2.2.1, pôde-se obter o valor do diâmetro do punção.

Tabela 13 - Cálculo do diâmetro do punção.

Diâmetro do Punção de Corte		
Equação	$f = D_1 - D$	
Material do Blanck	Alumínio	
Variáveis	Valores	Comentários
Espessura da Chapa [mm]	1,5	Atribuido
Diâmetro do Blanck [mm]	46	Cáculado
Diâmetro da Matriz (D1) [mm]	46	Cáculado
Folga (f) [mm]	0,04	Tabelado
Diâmetro do Punção (D) [mm]	45,96	Tabelado

Para o cálculo do comprimento do punção levou-se em consideração o fenômeno de flambagem utilizando a equação 11.

Tabela 14 - Cálculo do comprimento do punção.

Comprimento do Punção de Corte		
Equação	$l_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{F}}$	
Material do Blanck	Alumínio	
Variáveis	Valores	Comentários
Módulo de Elasticidade (E) [kg/mm ²]	7030	Valor tabelado
Momento de Inércia (Jmin) [mm ⁴]	219023,1	Valor calculado utilizando $J = \frac{\pi \cdot r^4}{4}$.
Força de Corte (Fc) [kgf]	2553,523	Valor calculado anteriormente.
Comprimento de Flambagem	2439,51	Valor calculado anteriormente.
Fator de segurança	3%	Valor recomendado.
Comprimento do Punção [mm]	81,31701	Valor calculado.

Considerando-se por questões de segurança a redução de 30 vezes o comprimento de flambagem como comentado no CAPÍTULO 2, o valor do comprimento do punção passa para no máximo 81 milímetros. A seguir é demonstrada uma tabela contendo todos os parâmetros do conjunto de ferramentas de corte:

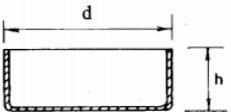
Tabela 15 - Dimensionamento das ferramentas de corte.

Parâmetros	Valores [mm]
Diâmetro da matriz	46,0
Profundidade da matriz	≥16,0
Folga	0,04
Diâmetro do punção	45,96
Comprimento do punção	≤86
Ângulo de saída	1°

3.5.1.2 FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO

Como discutido no CAPÍTULO 2, a matriz do processo de embutimento deve conter o “negativo” da peça, portanto, suas dimensões devem ser as mais próximas possíveis do produto desejado. Seguindo esta lógica o diâmetro da matriz deve ser igual ao diâmetro do copo. Definidas as dimensões do copo, o diâmetro do *blank* foi calculado de acordo com a equação (9) que resultou em uma chapa de 46 milímetros.

Tabela 16 - Cálculo do Diâmetro do *Blank*

Cálculo do Blank			
Equação	$D = \sqrt{d^2 + 4dh}$		
Blank	d [mm]	h [mm]	D [mm]
	30	10	45,82575695
Comentários	Valor atribuído.	Valor atribuído.	Valor calculado.

Com o valor do diâmetro do *blank*, pôde-se calcular através da segunda equação da Tabela 5 o raio da matriz para peças em alumínio. Prosseguindo os cálculos com a terceira equação da Tabela 6 e a espessura da chapa, obteve-se a folga entre a matriz e o punção de 1,6 milímetros.

Tabela 17 - Cálculo da folga entre matriz e punção

Cálculo da Folga entre Matriz e Punção		
Equação	$E = e + 0,02\sqrt{10 \cdot e}$	
Material do Blank	Alumínio	
Variáveis	Valores	Comentários
Espessura da Chapa (e) [mm]	1,5	Valor atribuído.
Folga entre Punção e Matriz (E) [mm]	1,57745967	Valor calculado.

O comprimento do punção foi obtido através da subtração da altura do copo com a folga calculada. Segue abaixo uma tabela contendo todas as dimensões das ferramentas de embutimento.

Tabela 18 - Dimensionamento das ferramentas de embutimento profundo.

Parâmetros	Valores
Diâmetro da matriz	30,0 mm
Profundidade da matriz	10 mm
Diâmetro do <i>blank</i>	46,0 mm
Raio da matriz	3,6 mm
Folga	1,6 mm
Diâmetro do punção	26,8 mm
Comprimento do punção	8,5 mm

Para validar o dimensionamento das ferramentas foi avaliada a força máxima necessária e a espessura máxima que poderia ser estampada. Para esta etapa foi utilizada a equação 4 com rendimento de 0,74. Os valores encontrados podem ser visualizados na tabela a seguir:

Tabela 19 - Tabela de validação de valores de força e espessura.

ALUMÍNIO	Força máx.	2392,1612 N
	Espessura	0,0137951 m

O próximo passo é a implementação que será abordada no CAPÍTULO 4, bem como a validação através da experimentação dos processos de conformação de corte e embutimento, e posterior apresentação dos resultados.

4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA.

Neste Capítulo é apresentada a implementação das ferramentas abordadas no trabalho (corte e embutimento) utilizando como acionamento equipamentos já existentes no laboratório de hidráulica da UTFPR, uma vez que, como explicado na Seção 1.7, o acionamento idealizado foi projetado, mas não foi confeccionado.

Os testes realizados seguiram um sequenciamento produtivo conforme são verificados os ciclos produtivos na indústria. O fluxograma da Figura 28 demonstra melhor quais serão as etapas abordadas.

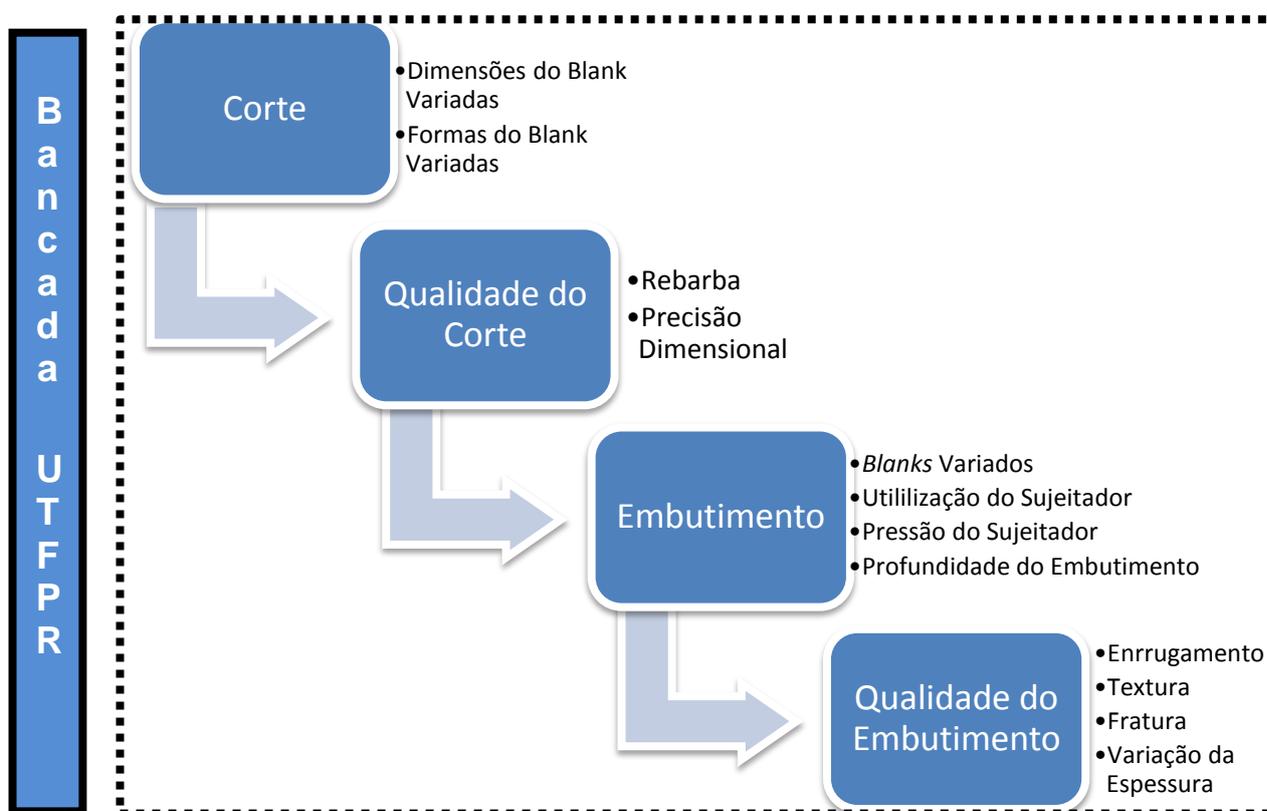


Figura 28 - Fluxograma dos Testes.

Apresentam-se inicialmente as soluções adotadas nas ferramentas propostas e a flexibilidade de utilização destas ferramentas.

4.1 PROCESSO DE CORTE

4.1.1 CARACTERÍSTICAS DA FERRAMENTA

O protótipo da ferramenta de corte é composto por duas bases padronizadas com medidas de 140 mm x 100 mm, um conjunto punção-matriz conforme detalhado na seção 3.5.1, duas molas de retorno do conjunto superior e um sistema de sujeitador com retorno por molas, conforme é mostrado na figura a seguir.

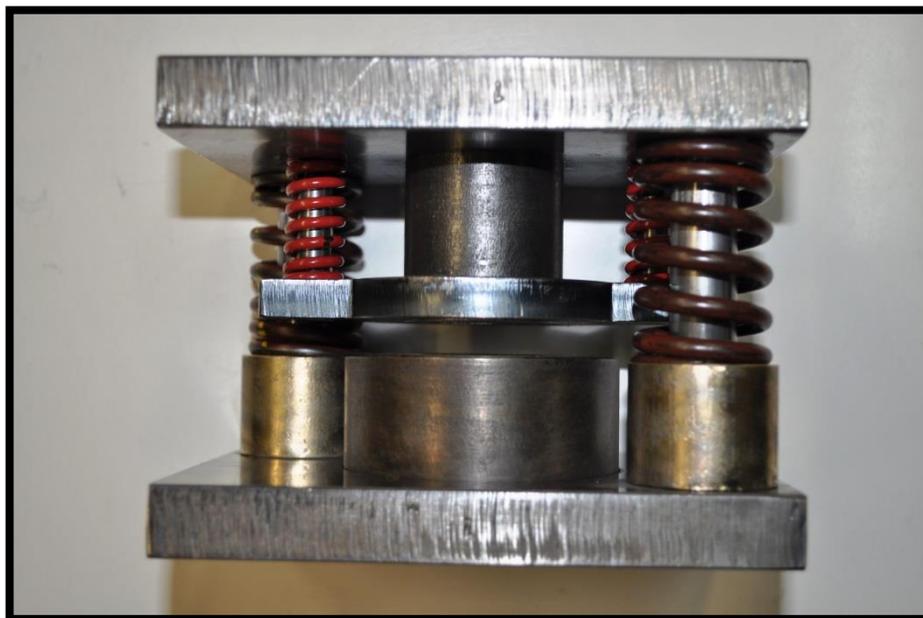


Figura 29 - Ferramenta de corte montada.

Na fabricação do protótipo, optou-se pela tecnologia de corte a laser para as bases e sujeitador. Porém, verificou-se que após o corte destes componentes, o acabamento não ficou conforme o desejado, especificamente nas bases componentes da ferramenta.

No corte a laser, pôde-se observar a influência da espessura do material a ser cortados neste processo: devido a espessura da base da ferramenta (1) ser relativamente alta ($e = 16$ mm / material = SAE 1020), esta apresentou uma qualidade de borda menos aprimorado do que a do sujeitador (2) ($e = 9,5$ mm / material = SAE 1020) conforme mostrado na figura a seguir.

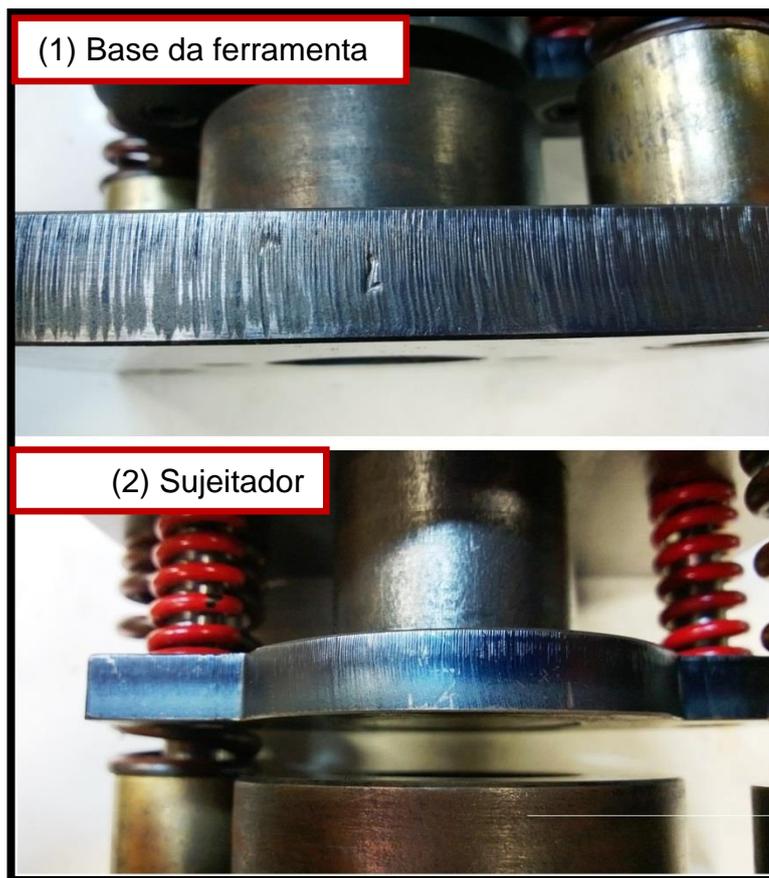


Figura 30 - Diferença de acabamento da borda devido à espessura do material cortado.

Uma solução para melhorar o acabamento da ferramenta seria a adição de mais um processo de fabricação (fresamento ou retificação), mas com o intuito da simplificação, desoneração do custo do projeto e pelo fato de que não há prejuízos na demonstração do processo de conformação, esta opção não foi utilizada. Outra alternativa para a fabricação das bases e do sujeitador, seria a utilização do corte a jato d'água, porém verificou-se que este não é economicamente viável na escala deste protótipo.

O diâmetro do *blank* calculado no projeto detalhado (46 mm) apresentou inconsistências em relação ao encontrado empiricamente. Verificou-se que para o embutimento do copo proposto cujas dimensões são apresentadas na Tabela 15, utilizando uma chapa de alumínio de 1,5 milímetros de espessura era necessário um *blank* de 40 milímetros de diâmetro, ou seja, 6 milímetros a menos do valor calculado na Tabela 21. Uma hipótese desenvolvida para justificar esta diferença é

desprezar a espessura da chapa para o dimensionamento do *blank*, chegando assim a um diâmetro próximo ao encontrado pela aplicação da equação 9.

Devido às características do processo de corte, o material utilizado na fabricação da punção e matriz, foi o aço VF800AT para trabalho a frio. Este aço tem como aplicações matrizes e ferramentas para estampagem, prensagem, corte, extrusão entre outros processos de conformação à frio e processamento de materiais em temperatura ambiente. Outras características podem ser vistas no ANEXO A.

Os componentes foram usinados até sua medida final e sofreram um processo de têmpera e revenimento, alcançando durezas entre 48~52 HRC, condizentes com o processo de corte. Por questões de qualidade do corte e aspectos finais das peças produzidas, o conjunto punção-matriz foi retificado.

Para obtenção de custos mais atrativos optou-se pela utilização de componentes comerciais como molas e parafusos. Além disso, outros componentes, como buchas e pinos guias, foram fabricados devido a sua simplicidade e por terem custos mais atrativos do que soluções já existentes.

4.1.2 MONTAGEM

Para acionar as ferramentas de corte e embutimento foi utilizada uma bancada hidráulica citada anteriormente e apresentada na Figura 31.



Figura 31 - Equipamento existente no laboratório de hidráulica

O equipamento em questão já possui todas as características necessárias para a realização dos experimentos, como base fixa com furação, comando para acionamento, cilindro hidráulico para geração de força, entre outros componentes, sendo somente necessárias pequenas adaptações que serão exploradas e elucidadas a seguir.

Para a fixação da ferramenta de corte, utilizaram-se dois grampos em posições antepostas e calços simples de perfil de aço, para que ocorresse o aperto dos parafusos na base fixa do equipamento.

Como proposta do projeto, a saída do *blank* é no sentido da movimentação do punção, ou seja, para baixo da ferramenta. Porém por incompatibilidade do equipamento utilizado, também se fez necessária, uma pequena adaptação: a ferramenta foi elevada em alguns milímetros para a colocação de um simples anteparo para retirada do *blank* possibilitando o ciclo do processo, conforme é mostrado na figura a seguir,

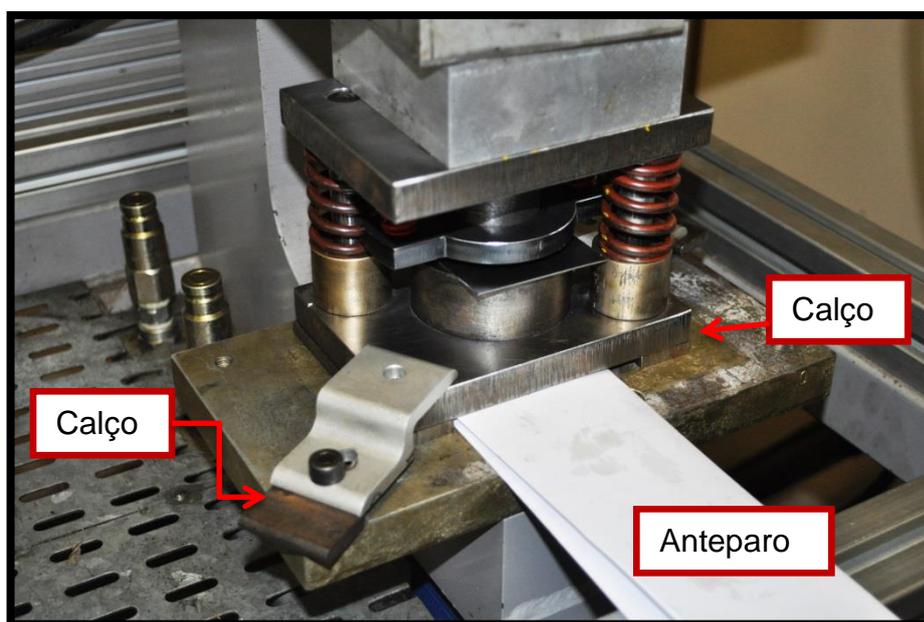


Figura 32 - Utilização de um simples anteparo feito com uma folha sulfite e destaque nos pequenos calços utilizados tanto para elevação da ferramenta quanto para fixação.

Como mostrado na figura anterior, as soluções adotadas para adaptação da ferramenta foram simples e sem custos, pois os materiais foram encontrados nas próprias dependências da UTFPR. Isso demonstra que é possível a demonstração

do processo de corte utilizando a ferramenta proposta em equipamentos variados, não sendo limitando a um projeto específico de equipamento.

4.1.3 TESTES

Conforme descrito anteriormente, foi utilizado como matéria prima o alumínio na espessura de 1,5 mm. Os *blanks* no formato quadrado foram cortados através de uma guilhotina e apresentaram um tamanho médio de 65 mm x 65 mm. Esta medida pode ter uma variação relativamente grande, limitada ao espaço do projeto da ferramenta e medida mínima de 45 mm (considerando uma folga mínima nas laterais de 2,5 mm), pois o *blank* ou produto final deste processo deve ter aproximadamente 40 mm de diâmetro, conforme o estudo do conjunto punção-matriz.

O pré-set do equipamento foi conduzido pelo Prof. Dr. Celso Salamon, sendo feitos ajustes da pressão da linha hidráulica, verificação do circuito hidráulico para retirada das primeiras amostras e recomendações práticas e de segurança para correta utilização.

Seguiu-se fazendo o alinhamento da matriz e iniciou-se o primeiro ciclo de trabalho da ferramenta, porém em primeiro momento, foi visto que o curso do equipamento não foi suficiente para a realização do processo. Para sanar este problema, recorreu-se a uma simples adaptação: foram colocados blocos de aço já existentes no laboratório de hidráulica em cima da ferramenta, compensando assim a folga existente.

Vale ressaltar que os blocos utilizados para compensação do curso, foram alinhados para melhor distribuição da força, e que ao decorrer do processo não representou em problema algum de segurança ou danificou o conjunto ferramenta-equipamento.

Em continuidade ao processo, foi colocado um *blank* de alumínio e feito o ajuste dinâmico da pressão de corte: foi feito o aumento pressão do sistema até o corte do *blank*. Neste ajuste, chegaram-se 62 kgf/cm², mostrado no canto superior direito da figura a seguir.

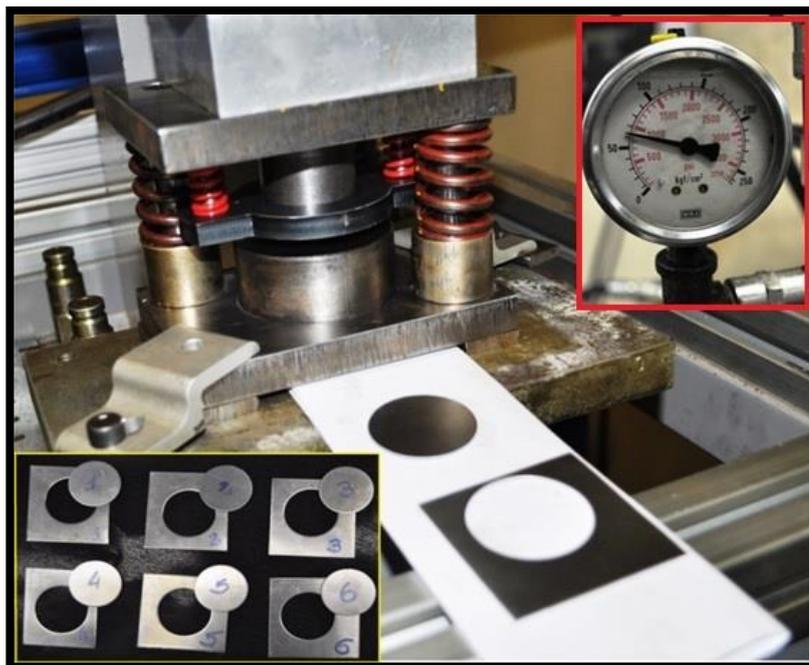


Figura 33 - Retirada dos *blanks* da ferramenta e separação de amostras para utilização no processo de embutimento. No canto superior direito, encontra-se a força máxima de corte. No detalhe do canto inferior esquerdo, encontram-se as amostras.

Depois de feitos os pré-sets necessários e ajuste de pressão, com o simples movimento do controlador foi possível retirar inúmeras amostras em um tempo de ciclo de aproximadamente 30s, contemplando alinhamento do *blank*, processo efetivo de corte, retirada do produto e recolocação de novo *blank*.

Em adição ao trabalho, foi questionado se era possível à experimentação do processo com outro tipo de material, sem prejuízos significativos para a vida útil da ferramenta. Buscou-se, então, *blanks* com as mesmas características dimensionais. Sendo conservadores em relação à espessura da amostra, utilizou-se chapas de espessura 0,9 mm de aço SAE 1020.

Seguiu-se o mesmo procedimento adotado para as amostras de alumínio e verificou-se que foi possível realizar o processo com o novo material. As características do produto final dos dois materiais serão discutidas nos resultados.

Devido à baixa quantidade de ciclos que a ferramenta irá sofrer ao longo da sua vida, além da inspeção visual positiva das ferramentas sem alterações visíveis, conclui-se como validada a utilização de mais de um material para o corte, incrementando didaticamente a experimentação deste processo.

4.1.4 RESULTADOS

A repetibilidade do processo mostrou que a configuração do conjunto punção-matriz realizou o processo de corte como esperado. Serão mostrados como resultados a análise da força de corte e as características do *blank* ao sofrer o processo de corte.

4.1.4.1 ANÁLISE DA FORÇA NECESSÁRIA

A primeira análise a ser feita é da força necessária para o corte. Conforme calculado no CAPÍTULO 3 através da Equação 1, chegou-se ao valor de 2553,5 kgf, para o corte de um *blank* de alumínio com a espessura de 1,5 mm, porém como o valor do diâmetro do *blank* foi alterado para 40 mm este valor teve de ser recalculado resultando em 2229 kgf.

Tabela 20 - Recalculo da força de corte.

Força de Corte					
Equação	$F_c = p \cdot e \cdot \tau$				
Material	Variáveis				
	perímetro (p) [mm]	espessura(e) [mm]	[N/mm ²]	Fc [N]	Fc [kgf]
Alumínio	125,6637061	1,5	116	21865,48	2228,90
Comentários	Valor calculado utilizando $p = 2 \cdot \pi \cdot r$	Valor atribuído	Valor tabelado	Valor calculado.	

Na Figura 33, obtivemos a pressão de aproximadamente 62 kgf/cm² e sabendo-se que o cilindro de acionamento do equipamento tem diâmetro de 80 mm, aplica-se a equação da tabela a seguir.

Tabela 21 - Cálculo da força real de corte.

Cálculo da Força Real de Corte		
Equação	$F_{rc} = P \cdot A$	
Variáveis	Valores	Comentários
Pressão (P) [kgf/cm ²]	62	Valor aferido.
Diâmetro do Cilindro (D) [mm]	80	Valor medido.
Área (A) [cm ²]	50,2655	Valor calculado utilizando: $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$
Força Real de Corte (Frc) [kgf]	3116,46	Valor calculado.

Observando o resultado para a força real de corte de 3116,5 kgf encontrado na Tabela 21, verifica-se que a diferença entre a força calculada e a força teórica ficou em torno de 28%. Como possíveis causas dessa diferença pode-se citar:

- Desalinhamento da ferramenta com a prensa tendo como consequência o aumento da força necessária para o processo;
- As forças exercidas pelas molas não foram consideradas no cálculo teórico;
- Material ensaiado com diferentes características daquelas encontradas na literatura e utilizado no cálculo;
- Verificação da pressão real imprecisa devido à falta de calibração do manômetro existente no equipamento.

Apesar da diferença da força necessária para o processo, o equipamento dimensionado obteve um coeficiente de segurança igual a 1,12, sendo, portanto, compatível com os requisitos do processo de corte.

4.1.4.2 ANÁLISE DAS AMOSTRAS

O processo de corte por cisalhamento resulta em uma rebarba no entorno do *blank* no lado que esteve em contato direto com o punção. O resultado da análise das amostras deverá possibilitar a identificação das três zonas características do cisalhamento: arredondamento, parte cisalhada e parte fraturada; além da influência do material, folga entre o conjunto matriz-punção e qualidade do corte.

4.1.4.2.1 MÉTODO DE ANÁLISE

As amostras retiradas do processo de corte foram analisadas da seguinte forma: foram retiradas duas (2) amostras aleatórias de cada um dos materiais já

mencionados para a realização da análise; cortadas na porção mediana; posteriormente embutidas em massa de modelar e observadas em um microscópio da marca *Stereo Olympus* localizado no Laboratório de Ciências dos Materiais da UTFPR.

Pela dificuldade encontrada em se encontrar um ângulo adequado para a observação desta rebarba, optou pela utilização de uma base não rígida (massa de modelar). Desta forma, foi possível movimentar a porção do *blank* cortado em diversos sentidos a fim de se obter a melhor imagem.

O intuito da análise em microscópio é mostrar as diversas características do corte em um nível mais aprofundado do conhecimento. Porém no âmbito da didática, devido ao tempo despendido para preparação das amostras e ao custo dos equipamentos descritos, esta análise se torna inviável. Em uma visualização didática e macro, é possível utilizar o tato ao se passar o dedo no entorno da amostra e verificar a presença da deformação ocorrida.

4.1.4.2.2 RESULTADOS

Devido ao fato da ferramenta ser dimensionada prioritariamente para as amostras de alumínio, estas mostraram uma qualidade de corte superior em relação às amostras de aço.

As amostras de aço SAE 1020 apresentaram rebarbas mais salientes, pois as folgas não são próprias para este material e espessura. Esta diferença fica ainda mais evidente utilizando-se o tato, na qual as amostras de aço apresentam em sua periferia uma borda mais pontiaguda.

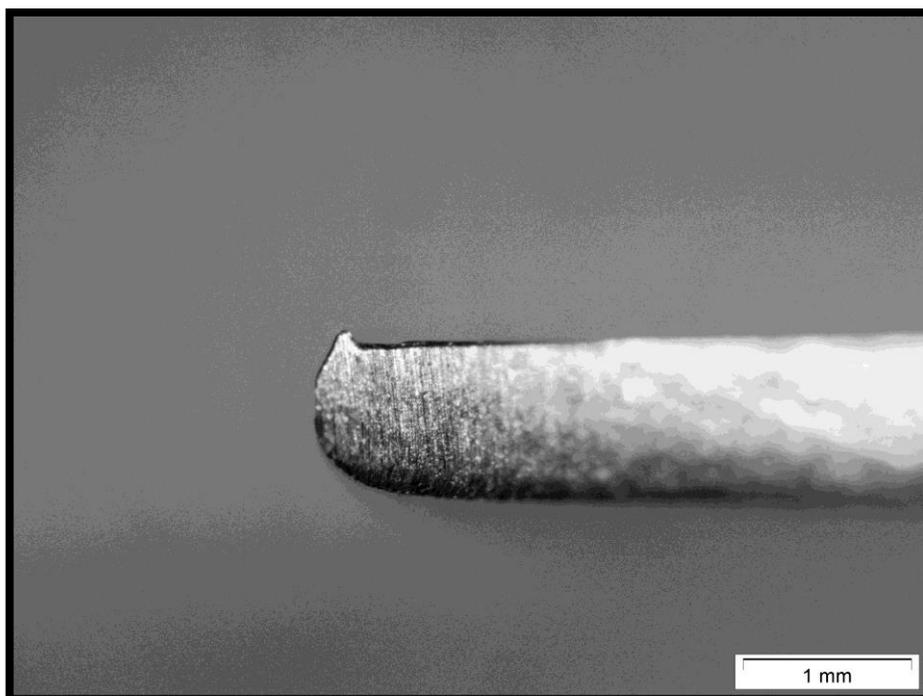


Figura 34 – Rebarba em amostra de aço com espessura de 0,9 mm.

A figura acima apresenta apenas uma porção da região de análise que se caracteriza pela presença da rebarba em todo o perímetro do *blank*. Com o auxílio da micrografia também foi possível observar as principais regiões do processo de corte por cisalhamento, conforme mostra a figura a seguir.

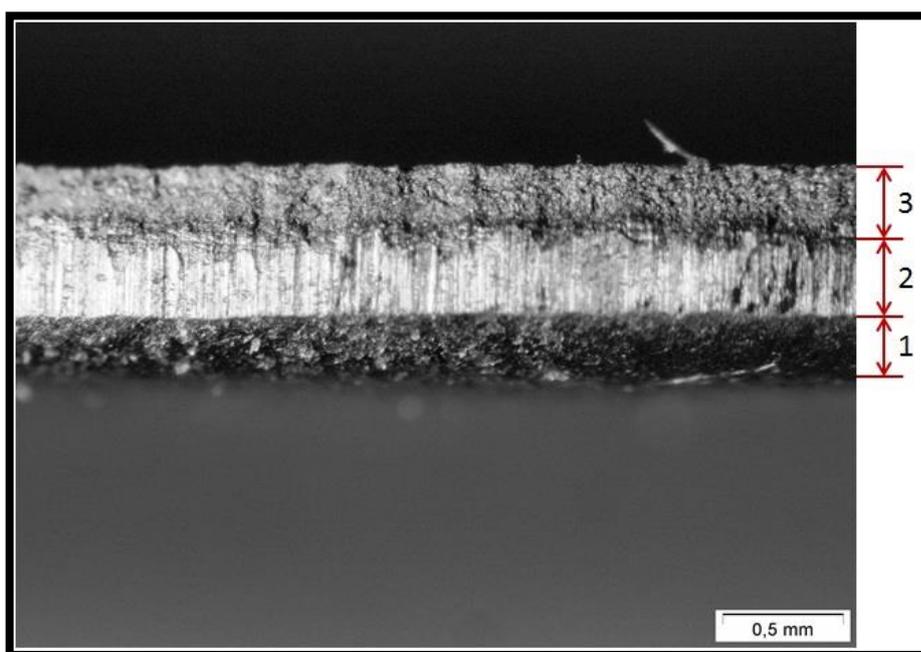


Figura 35 - Detalhe de um corte por cisalhamento em amostra de alumínio.

Fazendo uma comparação com a teoria apresentada anteriormente, verifica-se a presença das regiões mais representativas do processo de corte conforme verificado na tabela abaixo.

Tabela 22 - Comparação entre as visualizações das regiões.

Região na Figura 35	x	Região na Figura 6	Nome Característico da Zona Representada
A	=	1	Zona Arredondada
B	=	2	Zona Cisalhada
C+D	=	3	Zona Fraturada + Rebarba

Para efeitos de comparação, também foi feita a micrografia em uma amostra de alumínio cortada a laser, mostrada na figura a seguir.

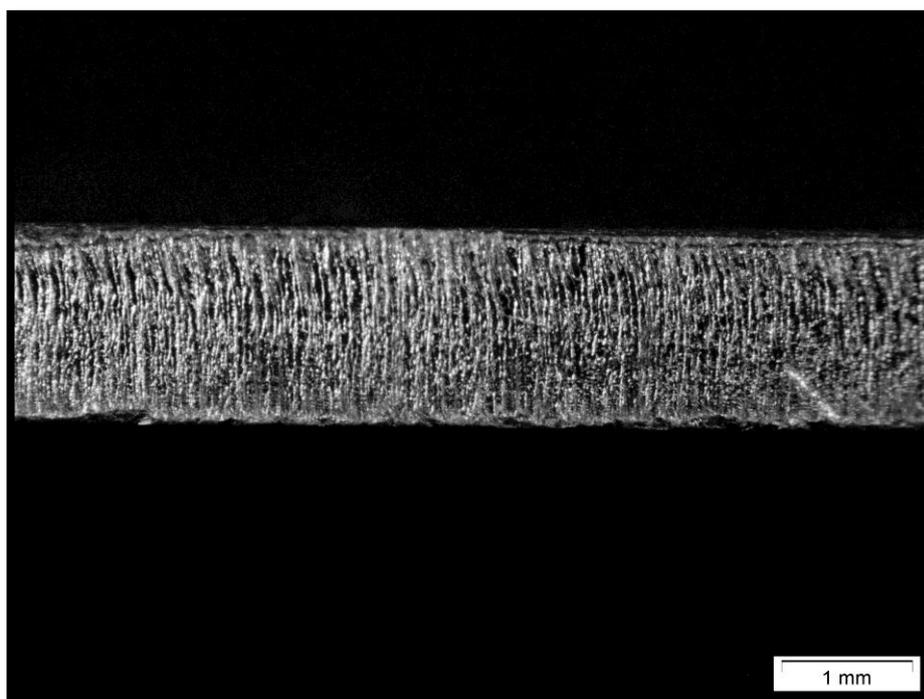


Figura 36 - Detalhe de um corte a laser em amostra de alumínio.

Quando observada a amostra cortada a laser da figura anterior e comparada a Figura 35, é possível perceber que não há distinção na região de corte. No entanto, é possível mostrar que a qualidade de borda se apresentou muito superior ao dos

componentes de maior espessura como mostrado na Figura 30, reafirmando a influência da espessura no processo de corte à laser.

4.2 PROCESSO DE EMBUTIMENTO

4.2.1 CARACTERÍSTICAS DA FERRAMENTA

Devido ao caráter modular do projeto, o protótipo da ferramenta de embutimento é semelhante ao de corte: é composto por duas bases padronizadas com medidas de 140 mm x 100 mm, um conjunto punção-matriz conforme projeto específico, duas molas de retorno do conjunto superior além do sujeitador desenvolvido especialmente para este processo.

Foram respeitadas na fabricação do protótipo da ferramenta de embutimento as características já apresentadas na ferramenta de corte, no que diz respeito à espessura, material e processo de fabricação. Foram feitas algumas pequenas alterações nas molas de retorno, aumentando-as, para que fosse possível uma abertura razoável para colocação do *blank* proveniente do processo anterior.

Para confecção do conjunto punção-matriz foi utilizado como matéria prima aço 1045 temperado e revenido. Este aço difere do utilizado no processo de corte devido a menor solicitação requerida durante o embutimento, o que possibilita a redução de custo na confecção.

O diferencial nesta ferramenta é o sistema do sujeitador que foi projetado para que um cilindro hidráulico atue como mola, possibilitando o controle da força necessária. Este controle da força é utilizado para o estudo do efeito do sujeitador na peça acabada, porém será mostrado mais a frente que o controle suficiente para este estudo não foi obtido nos testes devido a razões específicas.

No sujeitador foi feito um rebaixo com altura de 0,5mm à fim de se ter dois eventos desejados: a centralização do material proveniente do processo de corte e o efeito do sujeitador, uma vez que o rebaixo é menor que a espessura dos *blanks*.

4.2.2 MONTAGEM

A fim de mostra a facilidade de adaptação das ferramentas, foi utilizado outro equipamento já existente na UTFPR, contendo as mesmas funções do primeiro utilizado, porém com uma construção diferenciada.

Similar ao equipamento utilizado no processo de corte, este equipamento tem como diferencial, as furações passantes na base fixa para as hastes do sujeitador, facilitando assim, a montagem da ferramenta. Porém, vale ressaltar, que poderia ser utilizado o mesmo equipamento utilizado para o processo de corte com mínimas adaptações, sem prejuízo na execução do experimento.

4.2.3 TESTES

Com o intuito de mostrar os diferentes comportamentos do processo de embutimento em relação à geometria e tamanho dos *blanks*, foram utilizados para os testes, os corpos de prova conforme tabela abaixo.

Tabela 23 - Configuração das amostras utilizadas nos testes com a ferramenta de embutimento.

Material	Espessura [mm]	Tipo	Geometria	Medidas	Método de Obtenção
Alumínio	1,5	A	Circular	Diâmetro de 40 mm	Ferramenta de corte
		B	Circular	Diâmetro de 46 mm	Corte a laser
		C	Circular	Diâmetro de 70 mm	Corte a laser
		D	Quadrada	65 mm x 65 mm	Guilhotina
Aço SAE 1020	0,9	A	Circular	Diâmetro de 40 mm	Ferramenta de corte
		B	Quadrada	65 mm x 65 mm	Guilhotina

Foram adotados os mesmo procedimentos em relação ao pré-set do equipamento e recomendações, conduzidos pelo Prof. Dr. Celso Salamon, como no experimento do processo de corte. Assim como na prensa utilizada para o corte foi colocado um bloco de aço para compensar a folga existente entre a placa da prensa e as bases da ferramenta.

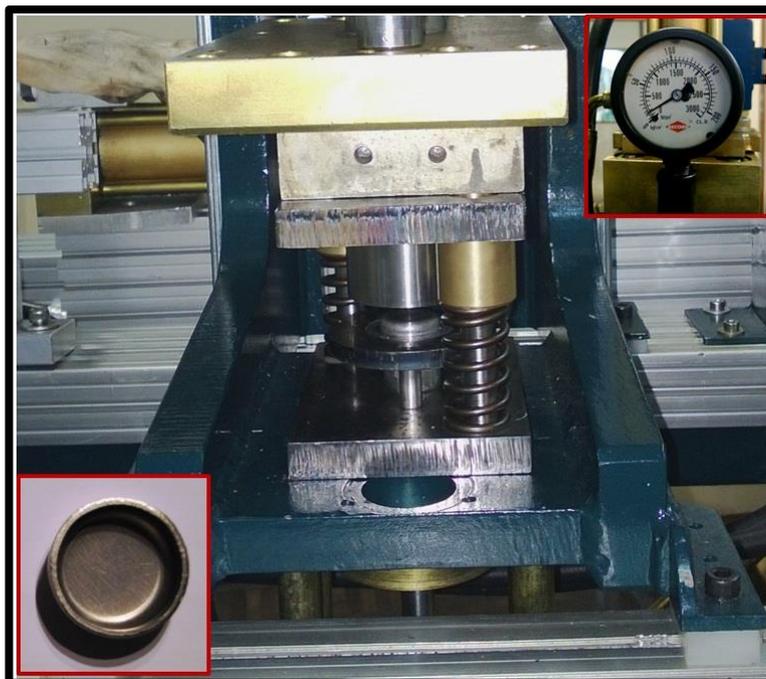


Figura 37 - Utilização da ferramenta de embutimento. No canto superior direito, encontra-se a força máxima de embutimento. No detalhe do canto inferior esquerdo, encontra-se uma amostra completamente embutida.

Utilizando as amostras da Tabela 28 foram realizados ensaios para avaliar diferentes condições de embutimento sob os seguintes aspectos:

- Geometria do *blank*
- Dimensionamento do *blank*;
- Efeito do sujeitador;
- Embutimento incompleto.

4.2.4 RESULTADOS

As peças obtidas através do embutimento possibilitaram com êxito a observação dos fenômenos esperados para este processo de acordo com a teoria. Assim como no processo de corte serão mostrados como resultados a análise da força de embutimento e as características do *blank* ao sofrer o processamento.

4.2.4.1 ANÁLISE DA FORÇA NECESSÁRIA

Seguindo o mesmo critério adotado na seção 4.1, a primeira análise a ser feita é da força necessária para o corte. Como calculado no CAPÍTULO 3 através da Equação 1, chegou-se ao valor de 324,5 kgf, para embutimento de um *blank* de alumínio com a espessura de 1,5 mm.

Na Figura 37, verifica-se a pressão de aproximadamente 7,5 kgf/cm² e sabendo-se que o cilindro de acionamento do equipamento tem diâmetro de 80 mm, aplica-se a equação da tabela a seguir.

Tabela 24 - Cálculo da força real de embutimento.

Cálculo da Força Real de Embutimento		
Equação	$F_{re} = P \cdot A$	
Variáveis	Valores	Comentários
Pressão (P) [kgf/cm ²]	7,5	Valor aferido.
Diâmetro do Cilindro (D) [mm]	80	Valor medido.
Área (A) [cm ²]	50,2655	Valor calculado utilizando: $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$
Força Real de Embutimento (Fre) [kgf]	376,991	Valor calculado.

Observando o resultado para a força real de embutimento de 377 kgf encontrado na Tabela 29 e relacionando com o valor teórico calculado, encontra-se uma diferença em torno de 14%.

Esta diferença pode ser considerada aceitável devido as diferentes condições do equipamento ideal e da utilização do equipamento existente. As mesmas causas citadas no resultado da seção 4.1.4.1 podem ser citadas na experimentação do processo de embutimento.

4.2.4.2 ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Como pode ser verificada no CAPÍTULO 2, uma das características mais relevantes do processo de embutimento é a variação da espessura durante a secção do copo embutido. Tanto para a amostra de alumínio, como para a amostra de aço esse comportamento pode ser observado conforme as figuras a seguir.

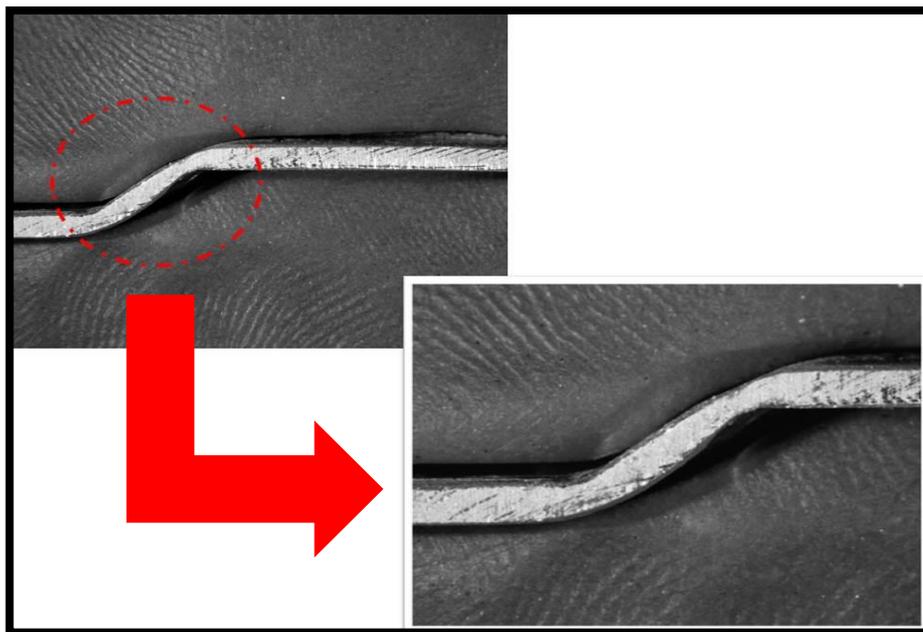


Figura 38 - Perfil da amostra de alumínio embutida parcialmente. Variação da espessura em destaque.

Foram realizados experimentos de embutimento não completo em amostras do tipo C e D listadas na Tabela 28. Ambos os tipos de *blank* já conformados foram cortados em duas porções e posteriormente macrografados como é possível observar na figura acima. As amostras apresentaram uma deformação acentuada no raio de contato do punção com a amostra, porém a geometria do *blank* para este tipo de embutimento não influenciou na forma final.

Quando realizado o teste de embutimento total nas amostras de mesmo tipo, ocorreu a ruptura primitiva da amostra. Isto se deve a alguns fatores: o *blank* dimensionado é incorreto para um embutimento profundo, alta velocidade de conformação e pouca pressão no sujeitador. Também se analisou a possibilidade de que o material não fosse dúctil o suficiente, o que caracterizou a necessidade de realização de um ensaio de embutimento Erichsen para determinação do grau de embutibilidade.

Fez-se o ensaio Erichsen conforme procedimentos da UTFPR disponíveis na própria máquina. O intuito do ensaio era validar a hipótese de que a matéria prima tinha um baixo índice de embutimento. Utilizou-se 3 amostras e foram feitas as medidas necessárias para avaliação, porém não foi encontrado um norma específica

para o alumínio contendo uma metodologia para o cálculo do índice de embutibilidade.

Como resultados foi obtido uma média de 8,77 mm de altura de embutimento até a ruptura da amostra e uma pressão média de 62,5 kg/mm². Fazendo uma analogia entre a altura máxima de embutimento no ensaio Erichsen e o embutimento das amostras práticas, validou-se como não possível o embutimento de um *blank* de dimensões maiores, para a altura proposta de 10 mm. Sendo assim, as amostras iram se romper antes do seu completo embutimento ou apresentarão enrugamento, que será elucidada a seguir.

Na figura a seguir é possível verificar a influência do tamanho e formato do *blank* no processo de embutimento:

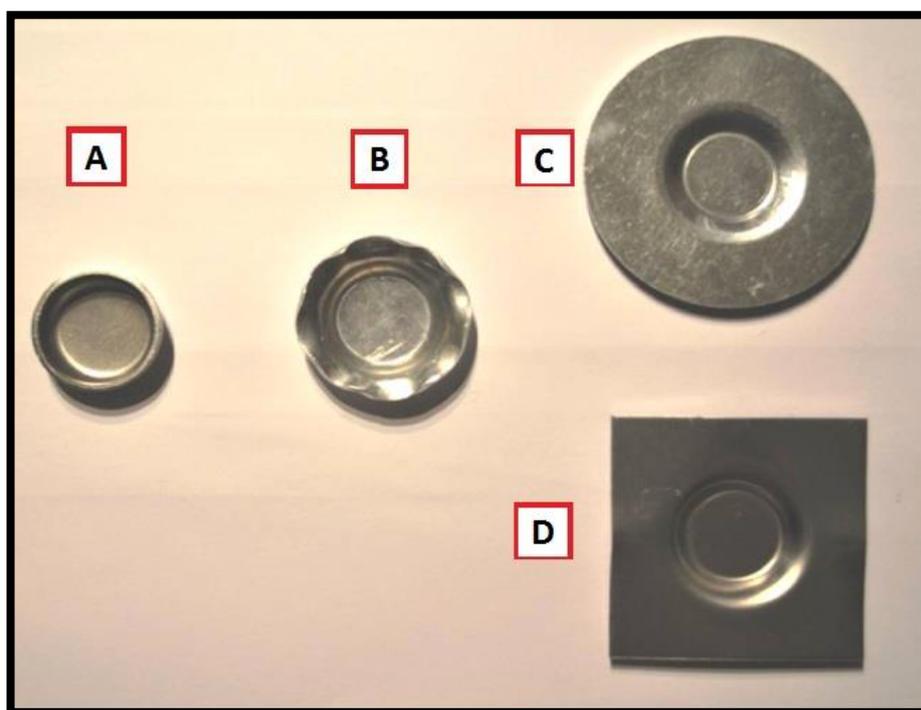


Figura 39 - Produtos finais dos *blanks* de diversos tamanhos analisados. A – Amostra completamente embutida. B – Amostra completamente embutida com baixa carga no sujeitador. C – Amostra parcialmente embutida com *blank* maior. D – Amostra parcialmente embutida com *blank* quadrado.

É possível também observar no embutimento completo do tipo B observado na figura anterior que as bordas apresentaram enrugamento. Isto se deveu ao fato da pressão do sujeitador não ser alta o suficiente para conter a deformação na base do *blank* e acompanhar o escoamento do *blank* ao longo do processo.

Tentou-se fazer um ajuste mais aprimorado do cilindro secundário de atuação do sujeitador, porém limitações das válvulas instaladas, impossibilitaram grandes variações de força limitando a verificação do efeito deste nas amostras.

Por fim, como resultado principal, avaliou-se a amostra A que consiste de um copo com 30 mm de diâmetro e 10mm de altura.

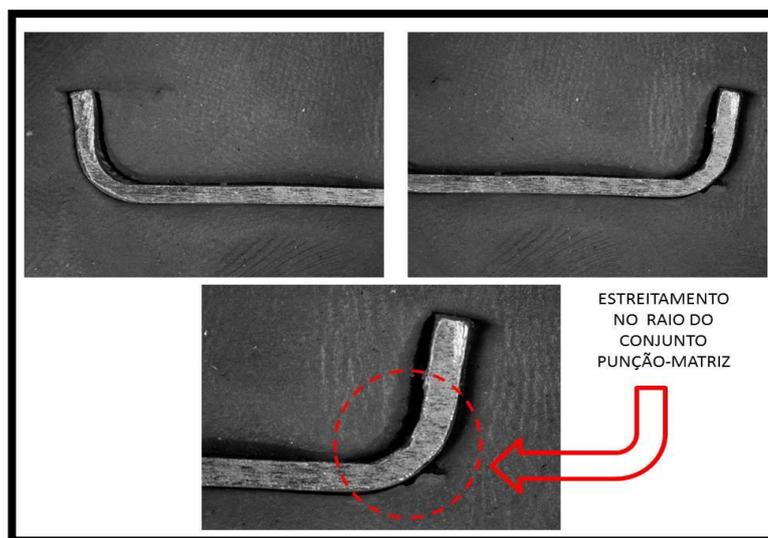


Figura 40 - Perfil da amostra de alumínio embutida totalmente. Variação da espessura em destaque.

A principal influência analisada nesta amostra é estreitamento no raio como indicado na figura acima. A porção mediana da amostra se mostrou com espessura constante, enquanto que as bordas se espessaram. Isto corrobora com a Figura 9 constante no CAPÍTULO 2.

Como feito anteriormente no processo de corte, também fez-se o estudo das amostras de aço SAE 1020 para verificar se era confirmados os mesmos resultados das amostras de alumínio.

O embutimento parcial das amostras de aço apresentaram um perfil uniforme nas abas, sendo o estreitamento muito menor do que nas amostras de alumínio, como mostrado na figura a seguir.

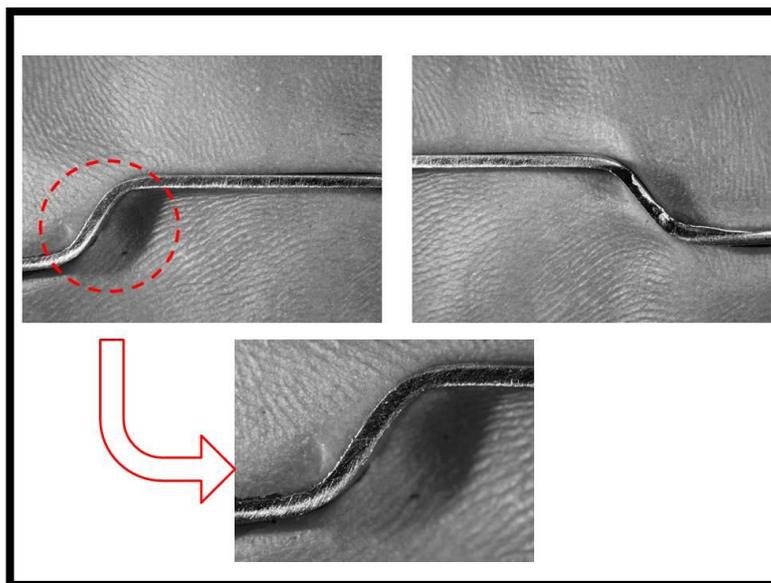


Figura 41 - Perfil da amostra de aço embutida parcialmente. Variação da espessura em destaque.

Em investigações preliminares, acredita-se que esta uniformidade é devida à geometria da ferramenta e a espessura da amostra. A folga punção-matriz se elevou e o material possui maior "espaço" para a conformação plástica. É possível verificar na amostra completamente embutida o inverso da amostra de alumínio: o espessamento da porção média da amostra.

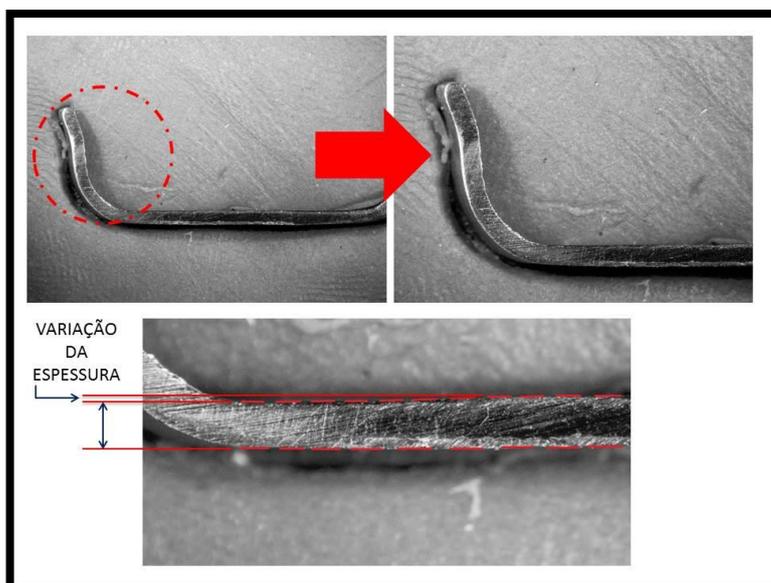


Figura 42 - Perfil da amostra de aço embutida totalmente. Variação da espessura em destaque.

Todas as fotos das macrografias são provenientes de equipamentos de alto custo caracterizando-se como inviável na escala pretendida. Buscaram-se então formas mais simples de se verificar o escoamento nas amostras.

A primeira experiência consistiu em pintar as amostras com líquido próprio para marcação de peças e tracejá-las com espaçamento de aproximadamente 2 mm em ambos os sentidos, para tornar possível a visualização do descolamento das linhas.

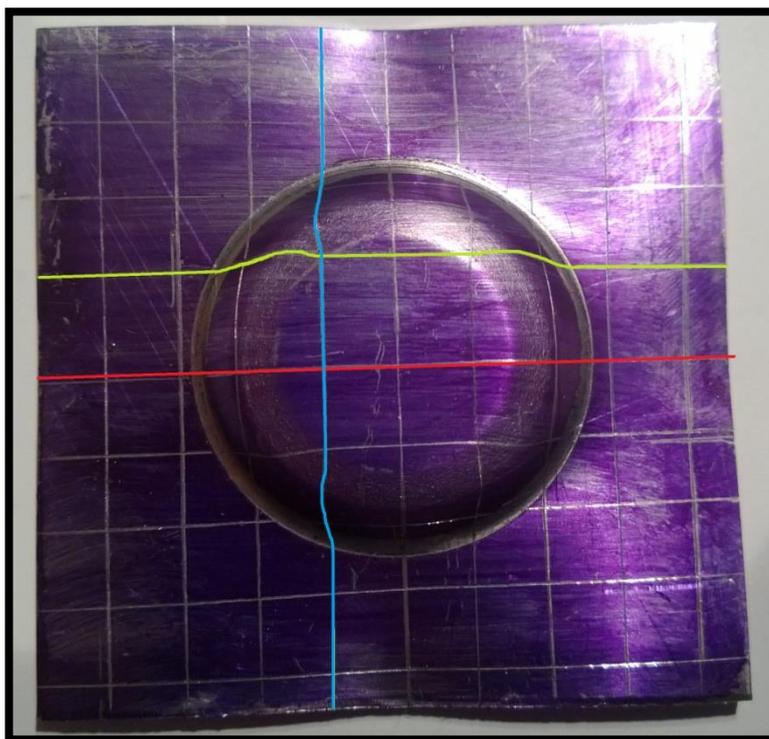


Figura 43 - Amostra com linhas de marcação para verificação do escoamento.

Através de software gráfico, traçou-se o caminho final das linhas como mostrada na figura anterior. A linha vermelha na porção mediana apresentou pouca deformidade, ao passo que na linha azul e verde, esta deformidade foi mais aparente, mostrando, a deformação plástica ocorrida na peça. Novamente, a utilização de um dos cinco sentidos foi utilizada, onde é perceptível o deslocamento das linhas, mesmo sem a utilização de um software de simples edição, para validação dos resultados.

Outro método experimentado para avaliação das deformações ocorridas foi a utilização de um relógio comparador munido de base magnética em conjunto com um apalpador fixo.

Foram ensaiados dois tipos de amostras: embutidas completamente e embutidas parcialmente. O experimento consistiu em deixar fixo o apalpador em uma base, zerar o relógio comparador e deslocar as amostras a fim de verificar a variação no relógio.

Para o primeiro caso, houve dificuldades no manuseio, pois a peça final é relativamente pequena e nem sempre foi possível manter o alinhamento de 90 graus entre relógio comparador e peça, para medição precisa.

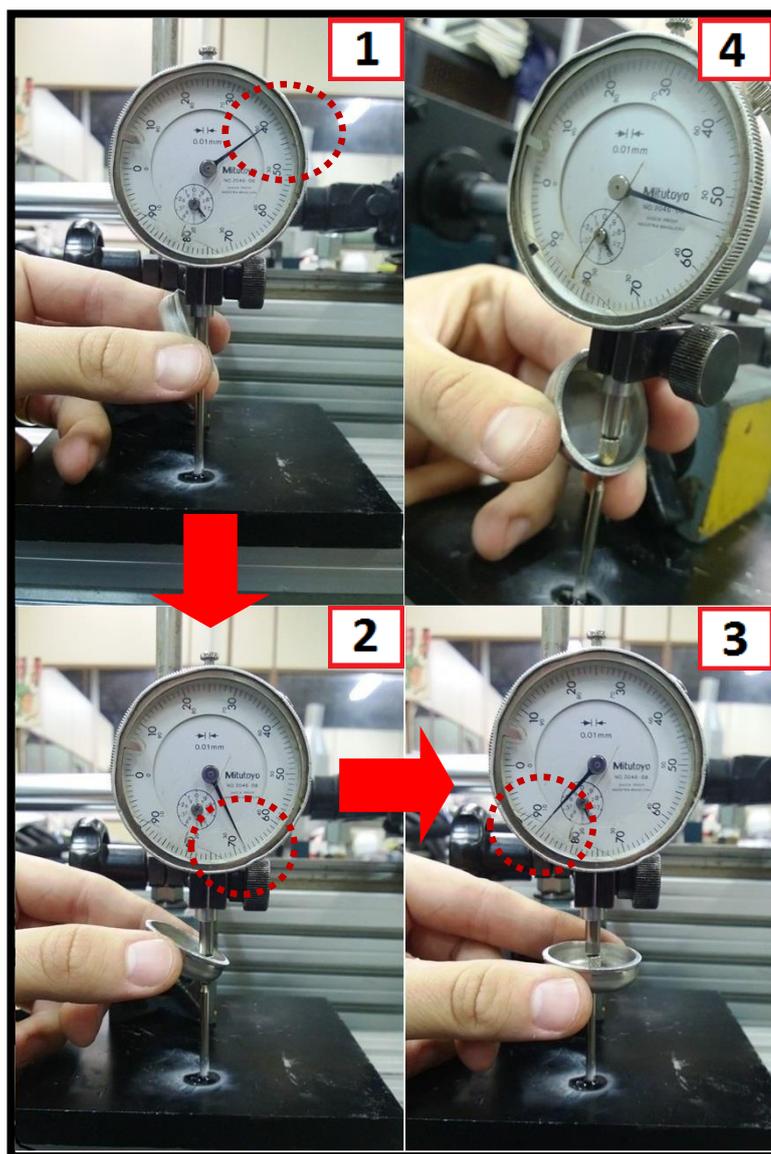


Figura 44 - Experimento de detecção para variação da espessura do embutimento completo de uma amostra de alumínio. No detalhe (4), é possível verificar a dificuldade de posicionamento entre equipamento de medição e amostra.

Na Figura 44, as setas indicam a sequência do experimento. É possível evidenciar na figura anterior, destacado nos círculos, a diminuição da espessura na amostra, com o movimento do ponteiro do relógio comparador, no sentido horário do deslocamento do ponteiro. Isto confirma o que foi anteriormente mostrado na Figura 10: a espessura diminuiu conforme a medição se aproximou do centro da amostra.

Em relação à segunda amostra analisada (peças parcialmente embutidas), os resultados se apresentaram mais precisos, devido à peça ter maior área de contato e também apresentar maior facilidade para manuseio conforme figura abaixo.

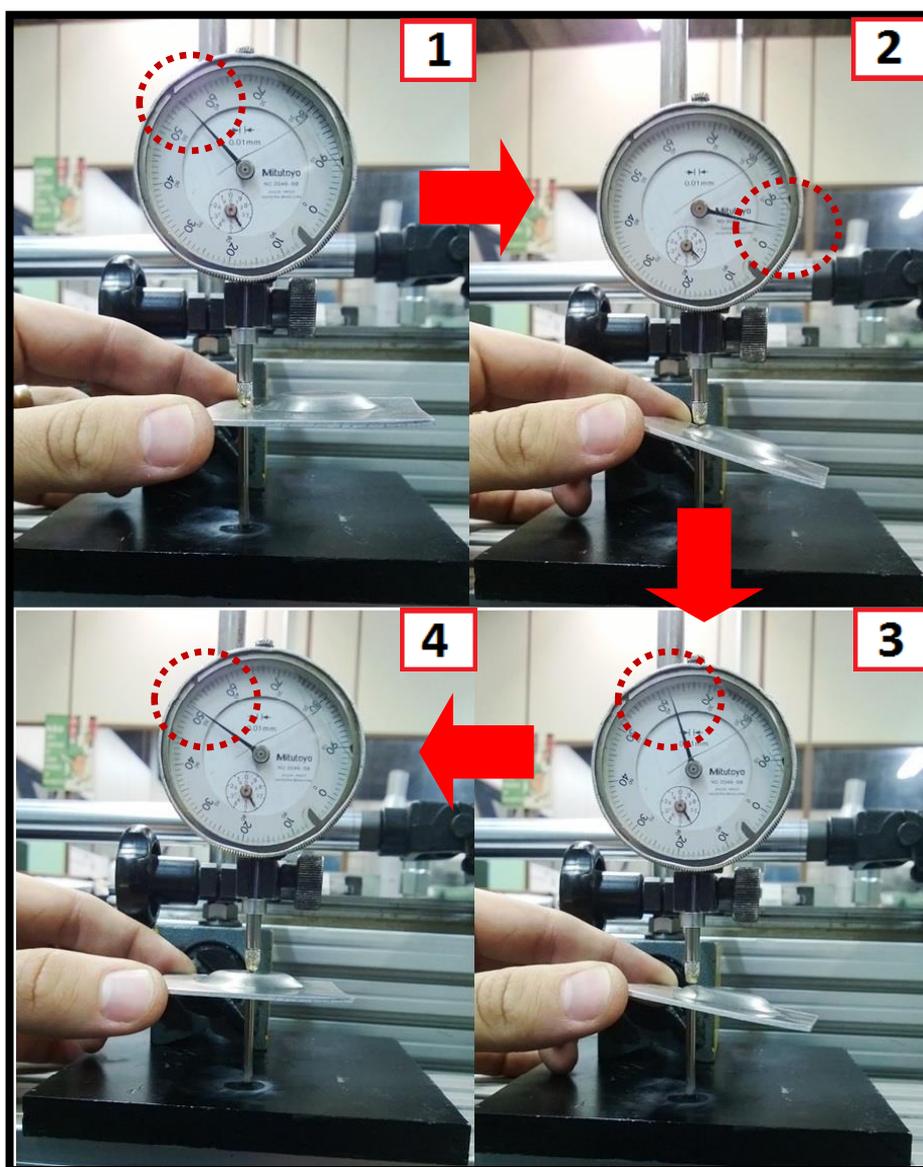


Figura 45 - Experimento de detecção para variação da espessura do embutimento parcial de uma amostra de alumínio.

A sequência de medição é mostrada pelas setas na Figura 45. Este experimento também corrobora com a Figura 9, já apresentada: a partir de uma espessura nominal (1), ocorre o espessamento da borda (2), porém no “meio” do copo de embutimento, a deformação plástica faz com que a espessura diminua (3) e ao centro da amostra (4), apresenta espessura próxima a da chapa não conformada.

Ambos os experimentos apresentaram variações no relógio comparador compatíveis com os resultados apresentados, porém, este tipo de prática é somente qualitativo, pois não apresenta confiabilidade suficiente na medição devido à influência de quem está instrumentando o experimento.

5 CONCLUSÕES

A priorização e escolha dos processos de corte e embutimento possibilitou a demonstração de uma parte do processo produtivo de um produto envolvendo as etapas de:

- Preparação da matéria prima com o corte dos *blanks* no formato aproximado;
- Setup do equipamento para o processo de corte;
- Processo de corte propriamente dito;
- Avaliação da qualidade do corte;
- Preparação da matéria prima para o embutimento;
- Setup do equipamento para o processo de embutimento;
- Processo de embutimento propriamente dito;
- Avaliação da qualidade do embutimento.

Considerando a avaliação das peças obtidas, atingiu-se a proposta inicial de experimentação e medição nos processos citados acima, porém algumas diferenças foram encontradas se comparadas com a teoria, principalmente no cálculo das forças. Estas diferenças encontradas foram devidamente justificadas devido a presenças de algumas incertezas, como a imprecisão da definição do material utilizado no processo ou adaptações feitas ao longo da experimentação.

A interação com ferramenteiros experientes consultados foi decisiva em alguns passos do projeto: confeccionou-se primeiramente a ferramenta de embutimento e posterior a de corte. Isto possibilitou a experimentação de tamanhos variados de *blanks* provenientes do corte a laser até o objetivo final proposto. Muitas variáveis estão presentes em processos de conformação, sendo que sua completa determinação se torna uma tarefa complexa. Isto demonstra ainda mais a necessidade das aulas práticas para estes processos.

As ferramentas dimensionadas e os produtos obtidos são plenamente representativas de um processo real, pois os aspectos dos produtos se assemelham a de um produto industrial, contendo todas as características encontradas na indústria como verificado na etapa de resultados do CAPÍTULO 4

A minimização dos riscos de operação foi comprovada: o operador fica afastado das ferramentas nos processos envolvidos; ensaio com baixa velocidade representou uma melhor percepção da deformação ocorrida nas peças, além de não ocorrer problemas em relação a desprendimento das peças ensaiadas. Porém para, cabe ressaltar, que para a prensa idealizada, deve ser provisionado sistemas de bloqueio e uma proteção frontal.

O desenvolvimento completo do sistema possibilitou um equipamento compacto, de simples funcionamento e intuitivo. Base disso deveu-se a modularidade do sistema, possibilitando a experimentação dos processos de corte e embutimento em equipamentos distintos. A modularidade possibilita ainda a expansão de sua utilização para outros processos como, por exemplo, forjamento e dobra.

Um ponto a se desenvolver é a elaboração de um sistema de um controle mais preciso que possibilite a verificação de um maior número de variáveis, tornando possível avaliar a influência da velocidade de avanço no processo de corte, influência da temperatura no processo de embutimento e a influência da lubrificação no processo de conformação para a redução do atrito, este, fator importante no processo de embutimento, uma vez que o processo envolve esforços mecânicos.

Uma das hipóteses no início deste trabalho foi à busca de novas tecnologias para confecção das ferramentas e obter o melhor custo. Aplicada à escala deste trabalho (duas ferramentas confeccionadas), a utilização do corte à laser possibilitou um custo benefício atraente frente à outras tecnologias: peças com boa tolerância à custo acessível. O efeito da espessura em relação ao acabamento, que foi abordado no trabalho, também teve grande importância acadêmica, uma vez que foi possível verificar na prática a melhoria da qualidade da borda com a diminuição da espessura, algo que não foi cogitado inicialmente.

Não foi possível a validação didática com alunos devido à falta de tempo para elaboração de procedimentos e inserir os experimentos no semestre letivo. Porém o trabalho desenvolvido foi de grande contribuição acadêmica para os executores por possibilitar a experimentação dos processos propostos e exercício de interdisciplinaridade.

Fatores financeiros foram barreiras encontradas durante o decorrer do trabalho limitando a confecção do protótipo de todo o sistema. O fato de não ser fabricada a prensa como previsto, serviu para comprovar o caráter modular flexível e intercambiável dos componentes. Para sua validação as ferramentas confeccionadas foram facilmente adaptadas em equipamentos já existentes.

6 REFERÊNCIAS

ASM INTERNATIONAL. **ASM handbook**. Materials Park, Ohio: ASM International, c1985-c2008. v.

AUSUBEL, D. P; NOVAK, J. D; HANESIAN, Helen. **Psicologia Educacional**, Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.

BATALHA, Gilmar F. **Projeto 2 – Conformação Mecânica – Ensaio Swift: Texto 3 – Ferramental**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2003.

BRESCIANI, Ettore F.; SILVA, Iris B. da; BATALHA, Gilmar F.; BUTTON, Sérgio T. **Conformação Plástica dos Metais**. 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**. 2. ed. São Paulo: Makron: Pearson Education do Brasil, v. 2, 1986.

DIETER, George Ellwood. **Mechanical metallurgy**. 3th ed. London, GB: McGraw-Hill, 1986. xxi, 751 p.

ESTORILIO, Carla C. A.. **Definições do QFD (desdobramento da função qualidade) e aplicações da "Primeira casa da qualidade"**. Extraído de http://ead.ct.utfpr.edu.br/moodle/file.php/183/Areas/Projetos/Carla_Cristina_Amodio_Estorilio/MetodologiaProjetos_EngME67J_S41_1s2011/Material_de_apoio/Apostila_QFD2011.pdf, acesso em 01 de maio de 2012.

FERRAZZA, Paulo H. **Instrumentando a condução da aprendizagem de pneumática básica: proposta de um livro eletrônico**. 2001. 117 f.: Dissertação (Mestrado) - UFSC. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis, 2001.

HOSFORD, William F.; CADDELL, Robert M. **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy**. 3. Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

MOREIRA, M. A; MASINI, E. F.S; **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. 2. ed. São Paulo: Centauro, 2011.

PAHL, Gerhard...[et al.]; **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

PAHL, G. ;Beitz, W. **Engineering Design. A Systematic Approach**. London: Springer Verlag, 1999.

PARKER Training. **Tecnologia Hidráulica Industrial**. Apostila M2001-1 BR. São Paulo: Parker Hannifin Corporation, 1999.

PARKER Training. **Tecnologia Pneumática Industrial**. Apostila M1001-1 BR. São Paulo: Parker Hannifin Corporation, 2000.

SALAMON, Celso. **Desenvolvimento de uma bancada para experimentação de circuitos hidráulicos básicos de uso industrial**. 2003. 207 f.: Dissertação (Mestrado) - CEFET. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Curitiba, 2003.

SENAI. SC. Hidráulica e técnicas de comando. Florianópolis: SENAI/SC, 2004 102 p.

SOUZA, João H. C. de. **Estudo do processo de corte de chapas por cisalhamento**. 2001. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

http://www.mte.gov.br/seg_sau/nr_12_texto.pdf <> Acesso em 28/03/2013

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/industria/pimpfregional/default.sh>
[tm](#) <> Acesso em 23/10/2012

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/industria/pia/produtos/produto2010/defaultproduto.shtm> <> Acesso em 23/10/2012

APÊNCIDE D – Casa da qualidade

		Requisitos da Qualidade											Valor do Consumidor	
		Número de botões de acionamento	Tempo de execução da tarefa	Número de dispositivos de segurança	Tempo de ajuste	Compilação de dados	Dimensões	Massa	Força máxima aplicada	Número de variáveis controladas	Custo do produto	Número de processos envolvidos		Quantidade de tempo de vida
		Tendência												
		↓	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↑	
Necessidades do Consumidor	Facilidade na utilização	5	5	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	4
	Visualização da operação	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	5
	Segurança	0	0	5	0	0	0	0	0	0	3	0	0	5
	Rapidez de ajuste	0	0	1	5	0	1	1	0	0	1	0	0	4
	Interpretação dos dados	0	0	0	0	5	0	0	0	3	1	1	0	5
	Tamanho da prensa	0	0	1	0	0	5	3	3	0	1	3	0	3
	Força aplicada para a conformação	0	0	1	0	0	1	1	5	0	3	0	0	4
	Controle das variáveis	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3	1	0	5
	Preço	1	0	3	0	1	1	1	3	3	5	1	3	5
	Flexibilidade para diversos processos	0	0	0	1	1	1	0	1	1	3	5	0	5
	Vida útil	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	4
Unidades	unid.	seg.	unid.	s	unid.	m ³	kg	ton	unid.	R\$	unid.	anos		
Amatrol														
Valor da importância	25	20	70	25	35	42	22	49	60	118	54	35		
Classificação da importância	9	12	2	9	7	6	11	5	3	1	4	7		

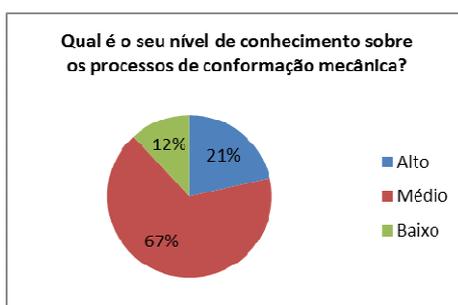
APÊNDICE C – Resultados do levantamento das necessidades dos clientes



Aluno	83	98%
Professor	2	2%

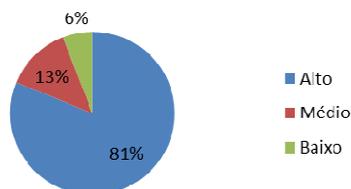


Pública	83	98%
Particular	2	2%



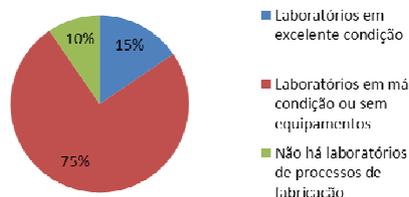
Alto	18	21%
Médio	56	67%
Baixo	10	12%

Qual a importância que você daria para as aulas práticas?



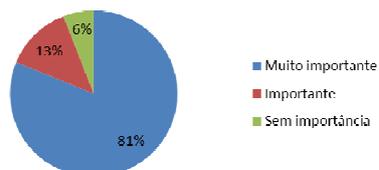
Alto	69	82%
Médio	11	13%
Baixo	5	6%

Qual é a situação da sua universidade em relação aos laboratórios de processos de fabricação?



Laboratórios em excelente condição	13	15%
Laboratórios em má condição ou sem equipamentos	63	75%
Não há laboratórios de processos de fabricação	8	10%

Qual importância você daria ao aprendizado prático de processos de conformação para o profissional da Engenharia Mecânica?



Muito importante	69	82%
Importante	11	13%
Sem importância	5	6%

APÊNDICE A – Questionário aplicado

	<p style="text-align: center;">Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Mecânica</p>																					
<h3>Questionário</h3>																						
<p>O presente questionário foi desenvolvido por alunos da Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como parte fundamental para o desenvolvimento de um Projeto Final de Curso. O objetivo é coletar informações para o desenvolvimento do protótipo de uma bancada para simulações de processos de conformação mecânica. As respostas são anônimas e confidenciais. Desde já nossos agradecimentos pela colaboração.</p>																						
<p>Qual a sua posição acadêmica? <input type="checkbox"/> Aluno <input type="checkbox"/> Professor</p> <p>Sua instituição de ensino é: <input type="checkbox"/> Pública <input type="checkbox"/> Particular</p> <p>Qual a importância que você daria para as aulas práticas? <input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Média <input type="checkbox"/> Baixa</p> <p>Sua instituição preza pelo aprendizado prático? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Mais ou menos <input type="checkbox"/> Não</p> <p>Qual a situação da universidade em relação aos laboratórios de processos de fabricação? <input type="checkbox"/> Laboratórios em excelente condição <input type="checkbox"/> Laboratórios sem equipamentos <input type="checkbox"/> Não há laboratórios para processos de fabricação</p> <p>Você conhece e sabe como funcionam os processos de conformação mecânica? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Mais ou menos <input type="checkbox"/> Não</p> <p>Os laboratórios da sua instituição abrangem os processos de conformação mecânica? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não</p> <p>Qual a importância que você daria ao aprendizado prático de processos de conformação para o profissional da Engenharia Mecânica? <input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Média <input type="checkbox"/> Baixa</p>	<p>Para as perguntas abaixo utilize o seguinte critério:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Irrelevante 2 Pouco Importante 3 Importante 4 Muito Importante 5 Essencial <p>Qual grau de importância daria você para os seguintes atributos de um dispositivo didático?</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Fácil operação</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Praticidade na utilização</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Segurança</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Rapidez de ajuste</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> </table>	Fácil operação		Praticidade na utilização		Segurança		Rapidez de ajuste														
Fácil operação																						
Praticidade na utilização																						
Segurança																						
Rapidez de ajuste																						
<p><i>* A Parte abaixo é destinada somente aos professores.</i></p>																						
	<p>Qual grau de importância daria você para os seguintes atributos de uma prensa didática? Marque a tendência que julga ser melhor para cada atributo, por exemplo: marque (+) caso considere que quanto maior o tamanho da prensa melhor, caso contrário marque (-).</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 60%;"></th> <th style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Importância</th> <th style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Tendência</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Tamanho da prensa</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Força aplicada para conformação</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Grau de controle das variáveis</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Preço</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Flexível para diversos processos</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">Vida Útil</td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px;"></td> </tr> </tbody> </table>		Importância	Tendência	Tamanho da prensa			Força aplicada para conformação			Grau de controle das variáveis			Preço			Flexível para diversos processos			Vida Útil		
	Importância	Tendência																				
Tamanho da prensa																						
Força aplicada para conformação																						
Grau de controle das variáveis																						
Preço																						
Flexível para diversos processos																						
Vida Útil																						

Composição Química:

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,85	0,90	0,40	8,00	2,00	0,50

Normas / Similares:

Sem similar

Cores de Identificação:

Branco - Azul – Branco

Características gerais:

Aço com uma composição química especialmente desenvolvida para proporcionar boa resistência ao desgaste associada a elevada tenacidade. Tem elevada temperabilidade, podendo ser temperado ao ar ou em óleo, inclusive com aquecimento em forno a vácuo. Reduzida susceptibilidade a trincas durante e após usinagem por eletroerosão em comparação aos aços da série D.

Estado de fornecimento:

Recozido, com dureza máxima de 250 HB.

Aplicações Típicas:

Matrizes e ferramentas para estampagem, prensagem, extrusão, corte, rolos laminadores de rosca, conformação a frio e todas as aplicações de processamento de materiais abaixo de 250 °C, especialmente à temperatura ambiente, onde estejam envolvidas elevadas tensões.

Alívio de Tensões:

Deve ser realizado após usinagem e antes da têmpera. O alívio de tensões é necessário em peças com gravuras e perfis, nas quais a retirada de material tenha sido superior a 30%, a fim de minimizar as distorções durante a têmpera. O procedimento de alívio deve envolver aquecimento lento até temperaturas entre 500 e 600 °C e resfriamento em forno até a temperatura de 200 °C. Se aplicado após o trabalho, o alívio de tensões deve ser realizado em uma temperatura 50 °C inferior a temperatura do último revenimento.

Têmpera:

O aquecimento para têmpera deve ser entre 1.020 e 1.040 °C.

Recomenda-se pré-aquecer as ferramentas.

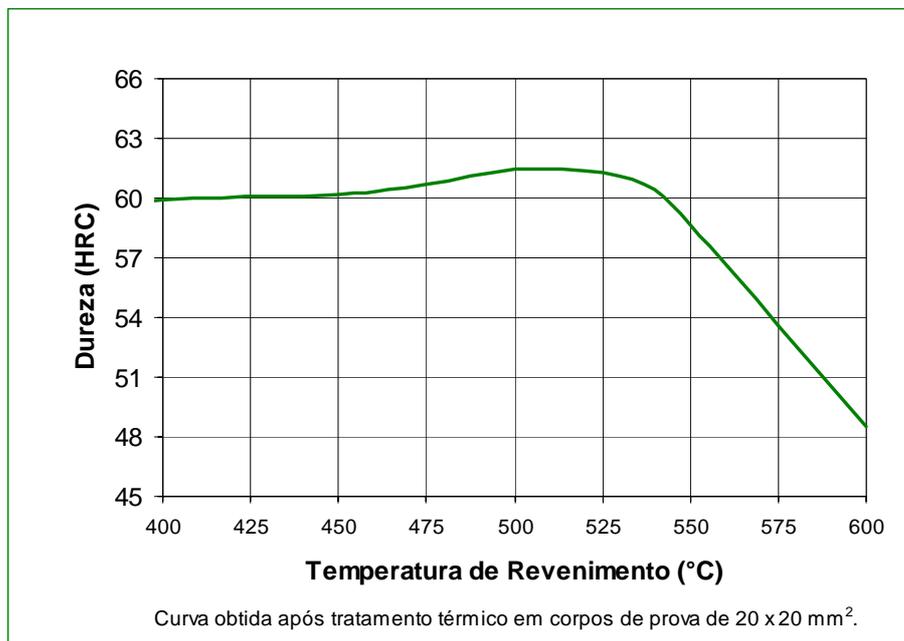
Resfriar em:

- Óleo apropriado, com agitação e aquecido entre 40 e 70 °C.
- Banho de sal fundido, mantido entre 500 e 550 °C.
- Ar calmo.

Revenimento:

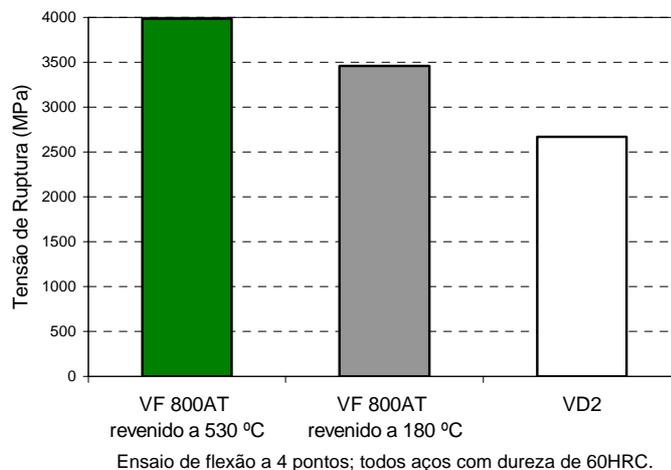
As ferramentas devem ser revenidas imediatamente após a têmpera, tão logo atinjam 60 °C. Fazer, no mínimo, 2 revenimentos e entre cada revenimento as peças devem resfriar lentamente até a temperatura ambiente. Recomenda-se temperaturas de revenimento entre 520 e 600 °C, conforme a dureza desejada (curva a seguir). O tempo de cada revenimento deve ser, de no mínimo, 2 horas. Para peças maiores que 70 mm, deve-se calcular o tempo em função de sua dimensão. Considerar 1 hora para cada polegada de espessura.

Curva de Revenimento



Revenimento em Alta Temperatura

As temperaturas de revenimento devem estar acima de 520 °C, para que a máxima tenacidade seja promovida. O gráfico ao lado permite verificar este ganho.



Variação Dimensional

Após têmpera e revenimento nas condições indicadas, é esperado aumento das dimensões em aproximadamente +0,10% (em média). Este valor deve ser considerado especialmente em ferramentas de grandes dimensões, como por exemplo facas de grande comprimento.

Tratamento Superficial:

Nitretação e coberturas de nitretos / carbonitretos, são recomendados quando se deseja elevar a resistência ao desgaste. Devem ser realizados após a têmpera e revenimento, desde que a temperatura do tratamento seja no mínimo 50 °C inferior a temperatura do ultimo revenimento.

Eletroerosão:

Quando utilizada a eletroerosão em ferramentas tratadas, recomenda-se remover a camada superficial alterada (camada branca) com rebolo de grana fina. Revenir novamente a peça em uma temperatura 50 °C abaixo do último revenimento realizado.

Nota: Todas as informações apresentadas são apenas orientativas. Elas não têm relação com garantias de propriedades específicas.