

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Aplicação de Ferramental Rápido para  
Conformação de Chapas Metálicas**

Autor: Valdemir Alves Júnior  
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS**

# **Aplicação de Ferramental Rápido para Conformação de Chapas Metálicas**

Autor: Valdemir Alves Júnior  
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Curso: Engenharia Mecânica  
Área de concentração: Materiais e processos de fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2003  
S.P. - Brasil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Aplicação de Ferramental Rápido para  
Conformação de Chapas Metálicas**

Autor: Valdemir Alves Júnior

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button



---

**Prof. Dr. Jonas de Carvalho – DEM - EESC - USP**



---

**Prof. Dr. Olívio Novaski – DEF – FEM – UNICAMP**



---

**Prof. Dr. Sérgio Tonini Button – DEMa – FEM - UNICAMP**

Campinas, 28 de fevereiro de 2003.

## Dedicatória:

Dedico este trabalho à memória de meu pai, que sempre incentivou e facilitou o prosseguimento dos meus estudos.

## Agradecimentos

Este trabalho teve a sua conclusão facilitada devido à ajuda de várias pessoas, às quais presto minha homenagem:

Ao meu orientador, que esteve presente sempre que necessário, mostrando caminhos e direções a tomar.

A minha esposa, que sempre me incentivou, e assumiu a frente para solução dos problemas, para que eu seguisse adiante.

A minha mãe, pelo incentivo, e por estar sempre presente.

Ao meu diretor na Permetal S/A, Jorge Leal, que acreditou e criou condições para que eu pudesse levar este projeto adiante.

Aos amigos, que sempre me incentivaram no prosseguimento deste projeto.

À Fapesp – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo financiamento do projeto de pesquisa.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente, me ajudaram na conclusão deste projeto.

Persistir sempre, e focar seus atos nas ações que levem aos seus objetivos.

## Resumo

ALVES JÚNIOR, Valdemir, *Prototipagem Rápida de Ferramental para Conformação de Chapas Metálicas*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002, 72 p. Dissertação (Mestrado).

O objetivo deste trabalho é apresentar o estágio de desenvolvimento do processo de prototipagem rápida para ferramentas de conformação de chapas, oferecendo a condição técnica para estampar protótipos ou pequenos lotes de peças usando para isso, um ferramental rápido. Para tanto, comparou-se a construção de um ferramental de conformação de chapas no processo convencional com a de um ferramental construído em prototipagem rápida. A redução de tempo de desenvolvimento de produtos representa uma medida destinada a melhorar a competitividade. A conformação de chapas normalmente requer um ferramental relativamente caro. Portanto, o processo é economicamente atrativo quando um grande número de peças deve ser produzido e/ou quando as propriedades mecânicas exigidas no produto acabado podem ser obtidas somente pelo processo de conformação. Reduzir esse custo do ferramental e seu tempo de confecção é uma das propostas deste trabalho. Usando um dos métodos de prototipagem rápida apresentados no texto, construiu-se um Ferramental Rápido e, após colocá-lo em operação, analisou-se tempos, custos e viabilidade do processo. Os resultados mostraram que o processo de Ferramental Rápido surge como uma opção viável para qualificar um projeto de produto antes da construção do ferramental convencional de produção, pois encurta os tempos no lançamento do produto e minimiza gastos com correções das ferramentas.

### *Palavras chaves*

- Prototipagem, Ferramental Rápido, Estampagem, Chapa Perfurada.

## **Abstract**

ALVES JÚNIOR, *Valdemir*, *Rapid Prototyping of Metal Forming Tools*, Campinas, School of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2002, 72 p., Dissertation (Master of Science).

This work presents a study on the rapid prototyping of tools to sheet metal forming, that will allow to manufacture prototypes of new parts and the production of small lots. The traditional process of designing and manufacturing stamping dies has been compared to the rapid prototyping. The reduction of the lead time related to the development of new products is an important aspect to improve competitiveness. Sheet metal forming processes usually requires expensive tooling, therefore these processes are most cost effective when a large number of parts are produced or when the mechanical properties of the products can only be obtained by stamping. So, one of the goals of this work is the rapid prototyping of tools to reduce the costs associated to the stamping tooling. Tooling prototypes have two advantages: first they can reduce the time to manufacture parts prototypes, and second, they are useful to define the best geometry and dimensions of the tools that will be used in the serial production. The experimental results of this work showed that rapid tooling actually is a viable option to qualify the product design before the manufacturing of the stamping dies. The time to market and the costs involved with the tooling adjustment were significantly reduced.

### *Key Words*

- Prototyping, Rapid tooling, Metal stamping, Multi-hole perforated metal sheet

# Índice

# página

Lista de figuras	i
Lista de tabelas	iii
Nomenclatura e Siglas	iv
1- Introdução	1
2- Objetivos, Justificativas e Resultados esperados	4
3- Critérios para o processamento de chapas metálicas	6
3.1- Dimensões críticas	7
3.2- Sequência de operações	7
3.3- Seleção de ferramentas	7
4- Processo de fabricação por conformação de chapas metálicas	9
4.1- Generalidades sobre o estudo dos ciclos de estampagem	11
4.2- Descrição das etapas de trabalho para confecção de uma ferramenta de conformação de chapas metálicas	13
5- Prototipagem Rápida de produtos e ferramentas	17
5.1-Introdução	17
5.2- Definições	19
5.3- Aplicações	21
5.4- Descrição de alguns processos de prototipagem rápida	22
5.4.1- Modelagem por Fusão e Deposição	22
5.4.2- Fabricação de Objetos Laminados	24
5.4.3- Estereolitografia	26
5.4.4- Sinterização Seletiva a Laser	27

5.4.5- Construção de Ferramental Rápido com fresamento em alta velocidade	29
6- Procedimento Experimental, Materiais e Métodos	32
6.1- Escolha do produto	32
6.1.1- Dados do produto	34
6.1.2- Seqüência de operações para obtenção do produto	34
6.1.3- Seqüência de construção de ferramentas	34
6.2- Definições de parâmetros técnicos para construção de ferramentas	35
6.2.1- Ferramenta de corte	35
6.2.2- Ferramenta de repuxo	37
6.3- Ferramental convencional	38
6.4- Dimensional da cavidade da matriz	38
6.5- Tensão de compressão	39
6.6- Escolha e descrição do processo de Prototipagem Rápida de Ferramental	40
6.7- Modelagem do produto em CAD 3D	42
6.7.1- Criação dos arquivos de usinagem	43
6.7.2- Preparação dos blocos	43
6.7.3- Etapas de usinagem	44
6.8- Montagem das peças	46
6.8.1- Centrador do blanque	46
6.8.2- Definição inicial do blanque	47
6.9- Estampagem das peças	44
6.9.1- Seqüência de estampagem	48
7- Apresentação e Análise dos Resultados	50
7.1- Qualificação visual do produto e otimização do blanque	50
7.2- Estampagem do lote piloto	56
7.3- Tempos envolvidos no processo	58
7.3.1- Matéria Prima	58

7.3.2- Tempos de fabricação para os processos de Ferramental Rápido e Ferramental Convencional	59
7.4- Custos de Fabricação das Ferramentas	63
7.4.1- Ferramental Convencional	63
7.4.2- Ferramental Rápido	63
8- Conclusões e sugestões para outros trabalhos	65
8.1- Conclusões	65
8.2- Sugestões para trabalhos futuros	67
Referências bibliográficas	68

## Lista de figuras

4.1- Estágios sucessivos de estampagem	12
4.2- Ferramenta para produção de transmissão automática	13
5.1.- Custo de alteração de projeto	19
5.2.1- Processos de Prototipagem Rápida	20
5.2.2- Transferência de dados entre o CAD e um sistema de prototipagem Rápida	21
5.3- Distribuição das aplicações de Prototipagem Rápida	22
5.4.1- Processo Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)	23
5.4.2.1- Processo de Fabricação de Objetos Laminados (LOM)	24
5.4.2.2- Modelos em representação fatiados	25
5.4.3- Processo de Estereolitografia	27
5.4.4- Processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	28
5.4.5- Usinagem de poliuretano em máquina CNC	31
6.1- Características do produto	33
6.2.1- Exemplo de chapa perfurada	36
6.3- Ferramenta convencional	38
6.4- Desenho da matriz	39
6.5- Área de atuação da força de repuxo	40
6.8- Ferramental Rápido montado em conjunto de base e cabeçote	46
6.8.1- Ferramental Rápido montado na prensa	47

6.9.1.1- Posicionando o blanque no Ferramental Rápido	48
6.9.1.2- Acionando a prensa	49
6.9.1.3- Ciclo de estampagem completado	49
7.1.1 - Blanque teórico	51
7.1.2- Peça obtida com blanque teórico	51
7.1.3- Blanque corrigido 2	52
7.1.4- Peça obtida com blanque 2	53
7.1.5- Blanque corrigido 3	54
7.1.6- Peça obtida com blanque 3	54
7.1.7- Blanque corrigido 4	55
7.1.8- Peça qualificada	56
7.2- Dimensões de controle do produto	57
7.3.2.1- Lead Time para obtenção do Ferramental Rápido	62
7.3.2.2- Lead Time para obtenção do Ferramental Convencional	62

## **Lista de tabelas**

5.4.5- Propriedades de resinas de poliuretano	30
6.6.1- Processos de Ferramental Rápido	40
6.6.2- Propriedades de produtos prototipados	42
6.7.3.1- Parâmetros de usinagem	45
6.7.3.2- Tempos de usinagem	45
7.2- Dimensões encontradas nas peças estampadas	57
7.3.2.1- Etapas e tempos para fabricação do Ferramental Rápido	60
7.3.2.2- Etapas e tempos para fabricação do Ferramental Convencional	61

## Nomenclatura e Siglas

Q =	Força de corte	[N]
p =	Perímetro de corte	[mm]
s =	Espessura da chapa	[mm]
$\sigma_t$ =	Constante de corte do material	[N/mm <sup>2</sup> ]
P =	Área aberta	[%]
PR =	Força de repuxo	[N]
Deq =	Diâmetro equivalente	[mm]
$\sigma_b$ =	Resistência à tração	[N/mm <sup>2</sup> ]
n =	Coefficiente de correção	-
R =	Raio da matriz	[mm]
CAD =	Projeto Auxiliado por Computador (do inglês <i>Computer Aided Design</i> )	
CNC =	Comando Numérico Computadorizado	
FDM =	Modelagem por Fusão e Deposição (do inglês <i>Fused Deposition Modeling</i> )	
LOM =	Fabricação de Objetos Laminados (do inglês <i>Laminated Object Manufacturing</i> )	
SL =	Estereolitografia (do inglês <i>Stereolithography</i> )	
RT =	Ferramental Rápido (do inglês <i>Rapid Tooling</i> )	
RP =	Prototipagem Rápida (do inglês <i>Rapid Prototyping</i> )	
STL =	Formato eletrônico para arquivos gráficos	
SLS =	Sinterização Seletiva a Laser (do inglês <i>Selective Laser Sintering</i> )	
RPM =	Rotações por Minuto	
MPM =	Metros por minuto	
ABS =	Acrilonitrila Butadieno Estireno	

# Capítulo 1

## Introdução

Segundo GARCIA & CARVALHO (1), os ciclos de desenvolvimento de produtos estão tornando-se cada vez menores, trazendo como consequência um menor tempo para testar-se um produto em seu estágio de protótipo. Tais protótipos têm que satisfazer diferentes necessidades, ou seja existem os protótipos virtuais, os protótipos para *design* e finalmente os protótipos funcionais. O protótipo ideal é aquele que possui características muito próximas das peças de produção. As tendências de tecnologias de produção na indústria estiveram centradas nas últimas décadas no desenvolvimento e aperfeiçoamento de processos automatizados. Atualmente, observa-se como tendência atual, a produção de baixos lotes com uma diversificação elevada de produtos.

Segundo NAKAGAWA (2), um dos maiores avanços em nossa sociedade industrial foi a obtenção da maioria dos produtos industrializados de forma rápida e fácil podendo-se definir esta fase da nossa história como a era de diversificação de nosso desejo. As pressões de tempo, qualidade e custos junto com o aumento da variedade de produtos e o processo de competição mundial entre as empresas, tem tornado a tecnologia de Prototipagem Rápida (RP de *Rapid Prototyping*), parte integrante dos processos de negócios.

O desenvolvimento de produtos construídos a partir de chapas, esbarra no problema do alto custo do ferramental e na demora da construção dos mesmos. O projetista atinge um estágio no desenvolvimento do produto, em que precisa construir um protótipo ou um pequeno lote da sua peça para uma análise mais detalhada de resistência, aparência ou mesmo para verificar a viabilidade técnica do processo, sem partir para a construção do ferramental que irá produzi-la. O

processo de prototipagem rápida de ferramental resolve este problema com rapidez, baixo custo e reproduz quase em sua totalidade, a condição técnica do processo, dando subsídios para que o projetista possa definir seu processo.

Segundo YARLAGADDA, YLYAS & CHRISTODOULOU (3), a idéia básica de um ferramental rápido, é a de produzir peças protótipos utilizando ferramentas protótipos, com peças representativas da produção futura. O trabalho feito com ferramental rápido é o resultado de combinar técnicas de prototipagem rápida ou usinagem CNC com práticas de trabalho feitas com ferramentas de estampagem convencionais, para produzir peças tendo como partida dados eletrônicos do CAD. Como o tempo para obtenção de peças é muito menor se comparado com os métodos tradicionais, temos o nome de ferramental rápido.

Somente quando a peça for produzida em série, em grandes quantidades, que o alto custo do trabalho feito com ferramentas tradicionais pode ser justificado. Em consequência disso, a possibilidade de se produzir mais rapidamente e a um baixo custo, transforma-se em uma ótima opção, além de determinar parâmetros do ciclo de processamento do produto. Pode-se também optar por produzir uma pequena quantidade de protótipos ou de amostras para verificação do funcionamento, montagem, executar testes funcionais, ou avaliar o processo de fabricação. Neste aspecto, o ferramental rápido (RT de *rapid tooling*) torna-se uma ferramenta importante para a indústria no desenvolvimento de produto.

Podem-se destacar as seguintes vantagens do trabalho feito com ferramental rápido:

- Encurtar o tempo de obtenção de peças em trabalhos feitos com ferramentas de estampar que pode ser reduzido de meses a alguns dias ou semanas.
- Custo relativamente baixo, que é reduzido de modo que as experimentações reais sejam avaliadas.
- Possibilita o teste funcional das peças do projeto. Devido ao pequeno tempo necessário para o trabalho feito com ferramental rápido e ao baixo custo relativo, muitos engenheiros preferem produzir peças em estágios iniciais do projeto. Em consequência disso, muitas falhas são eliminadas, erros evitados antes da produção, e há a detecção de vários problemas, o que resultará em uma grande economia de tempo e dinheiro.

- Transferência de dados diretamente do sistema CAD. Muitos erros ocasionados devido a má interpretação de desenhos podem ser evitados. O modelo original do CAD é usado diretamente na fabricação de matrizes do RT.

## **Capítulo 2**

### **Objetivos, Justificativas e Resultados Esperados.**

#### **Objetivos**

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar um ferramental rápido para conformação de chapas metálicas, oferecendo condições técnicas para estampar protótipos ou pequenos lotes de peças. Através da construção de um modelo de ferramental rápido, tornou-se possível avaliar os benefícios que esta tecnologia pode oferecer, além de definir-se algumas condições técnicas para sua aplicação.

#### **Justificativas e Resultados Esperados**

Como apresentado, as técnicas de prototipagem rápida permitem um ganho expressivo de tempo na confecção de peças.

Como a intenção deste trabalho é o estudo sobre a prototipagem de ferramentas para estampagem, será feita a comparação entre a construção e uso de um ferramental de conformação de chapas no processo convencional e a construção e uso de um ferramental construído por prototipagem rápida. Serão apresentados os ganhos que o processo oferece no desenvolvimento do produto, na redução dos tempos de colocação do produto no mercado (*time to market*), na determinação das condições do processo, com a obtenção de peças nas formas e dimensões exigidas.

Este trabalho também justifica-se pelo fato de que ainda não existem soluções industriais no Brasil com o emprego da prototipagem rápida para a produção de peças metálicas por estampagem, de modo que este projeto de pesquisa permitirá avaliar como a prototipagem rápida poderá auxiliar na otimização desse processo.

## Capítulo 3

### Critérios para o processamento de chapas metálicas

Segundo EARY & EDWARD (4), para que uma empresa consiga bons resultados no processamento de peças em chapas metálicas, deve haver um bom intercâmbio de informações entre os setores de engenharia de produto e engenharia de processo. As atribuições destes setores devem estar muito bem definidas e facilmente identificáveis.

Para a definição de alguns parâmetros do projeto das ferramentas, a engenharia de produto deve informar a engenharia de processo sobre os seguintes itens:

- detalhamento do produto;
- produção prevista por horas, meses e anos (expectativa de vida do produto);
- montagens e sub-montagens a que o produto pertença;
- cronograma de entrega do ferramental para início da produção;
- nome, número, material e tratamento do produto devidamente especificados;
- informações sobre alterações e atualizações que ocorram em qualquer fase do projeto.

Com base nessas informações, a engenharia de processo terá condições de determinar:

- seqüência ou ordem de operações necessárias à fabricação do produto;
- ordem de fabricação das ferramentas e os orçamentos necessários para a fabricação do produto;
- os equipamentos necessários para a fabricação;

- as correções necessárias para todas as revisões que ocorrerem dentro do projeto.

### **3.1 Dimensões críticas**

Com o detalhamento do produto em mãos, a engenharia de processo determinará as dimensões críticas, que podem ser descritas como tolerâncias, detalhes geométricos para montagem ou ótimo acabamento superficial. Estas dimensões críticas irão definir a seqüência correta de fabricação, o posicionamento da peça nas diversas fases de processamento, para garantir o produto nas condições desejadas.

### **3.2 Seqüência de operações**

A seqüência de operações irá variar de produto para produto a ser obtido. Ela deve determinar o menor número de passos necessários para a execução da peça, e ordenar a seqüência mais prática ou a possível para a sua fabricação. O custo de produção não será o mesmo para diferentes seqüências, por isso deve-se dar grande atenção ao estudo dessas seqüências.

### **3.3 Seleção de ferramentas**

Depois que a seqüência de operações foi determinada, a engenharia de processo tem condições de determinar o tipo e a quantidade de ferramentas necessárias para a fabricação do produto. Este passo é muito importante, pois irá definir o custo de fabricação da peça. A técnica de construção da ferramenta determinará o tempo do ciclo de fabricação.

Para o trabalho com chapas metálicas, a técnica de construção consiste na principal decisão da engenharia de processo. Se as operações podem ser combinadas em uma única ferramenta, por exemplo, podem ser avaliados vários tipos de construção, mais ou menos complexos, analisando a melhor condição caso a caso. Pode-se citar como características importantes na seleção do tipo de ferramenta:

- baixo custo de fabricação;
- alto aproveitamento da chapa;

- facilidade de montagem na prensa;
- facilidade de manutenção e recuperação;
- componentes robustos e baixa manutenção;
- ciclos reduzidos.

## **Capítulo 4**

### **Processo de fabricação por conformação de chapas metálicas**

Este capítulo descreve alguns aspectos do processo de estampagem que são importantes para este trabalho. Um estudo mais detalhado sobre esse processo pode ser encontrado em ROSSI (5), SCHULER (6) ou UMARAS (15).

Nos últimos anos têm aumentado as aplicações de chapa estampada em todos os setores industriais, desde produtos com dimensões reduzidas até peças com grandes dimensões. A produção mecânica tem sido exigida continuamente por uma demanda de maiores quantidades e menores prazos, de onde surge a necessidade de se adotar um sistema de estampagem de chapa que em muitos casos apresenta-se de difícil solução, e que até a alguns anos atrás pareceria arriscada, em termos de qualidade do produto, ou mesmo impossível de se obter.

As peças de chapas estampadas são aplicadas em larga escala como peças automobilísticas, peças para aeronaves, bicicletas, eletrodomésticos, máquinas calculadoras e uma infinidade de aplicações.

A peça estampada em chapa substitui em muitos casos as peças fundidas, com a vantagem de ser um processo mais rápido e ainda apresentar maior resistência mecânica.

Devido a uma demanda por quantidades elevadas e custos reduzidos, com tempos de projeto e fabricação cada vez menores, surge a necessidade de que o desenvolvimento de produto possibilite em suas etapas, o recurso de se poder fabricar um pequeno lote de peças, a um custo baixo e em um curto espaço de tempo, se comparado com os processos convencionais, e de se

obter peças que apresentem a mesma qualidade do processo tradicional e que assim permitam avaliar as condições de resistência, montagem, ergonomia, e que permitam que sejam feitas as correções que se fizerem necessárias.

Segundo ROSSI (5C), o termo "estampagem" conceitua-se como o conjunto de operações com as quais, sem produzir cavaco sujeita-se uma chapa plana a uma ou mais transformações, com o objetivo de obter uma peça com forma geométrica própria. Em outras palavras, a chapa é submetida a uma deformação plástica. A realização prática dessas operações se faz mediante dispositivos especiais denominados estampos ou ferramentas, e aplicados segundo suas características sobre máquinas denominadas prensas. As peças de formas geométricas complexas ou irregulares, podem ser obtidas mediante uma sucessão de operações de estampagem. Essas operações geralmente são divididas em:

- a- Cortar;
- b- Dobrar;
- c- Embutir ou repuxar.

Essas operações são obtidas normalmente em processos a frio, mas podem também ser executadas em processos a quente para produtos de chapas mais espessas. Essas operações se realizam com estampos montados em máquinas dotadas de movimento retilíneo alternado.

O processo de conformação de chapas (estampagem) pode trabalhar com uma variedade muito grande de materiais, entre os quais pode-se citar as chapas de aço, latão, alumínio, cobre, resinas, entre outras.

Segundo VOELKNER (7), as vantagens do processo de conformação de chapas metálicas consistem em alta produtividade, baixo índice de sobras (sucata) e baixo consumo de energia, condição que possibilite um grande número de aplicações, como descrito no início deste item.

#### 4.1 Generalidades sobre o estudo dos ciclos de estampagem

Como citado por ROSSI (5C) as operações mais corriqueiras do processo de estampagem que são cortar, dobrar e repuxar. Para obter-se uma peça acabada proveniente de uma chapa, às vezes basta recorrer a uma dessas operações.

Porém, normalmente não é possível obter uma peça acabada dessa forma, porque frequentemente o formato da peça exige a combinação de duas ou mais operações para sua obtenção.

O ciclo de estampagem, que consiste em uma sucessão ordenada de operações, que transforma parte de uma chapa plana em uma peça de forma definida, depende de diversos fatores. Segundo FERNANDES (14) vários fatores de natureza mecânica e metalúrgica influem no processo de estampagem, e influenciam diretamente nos estados de tensões e deformações, alterando assim o escoamento do material e portanto seu comportamento plástico:

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| Natureza mecânica:    | - forma e dimensões da peça;   |
|                       | - tipo de prensa empregado;  |
|                       | - forma e dimensões da ferramenta;   |
|                       | - condições de lubrificação.   |
| Natureza metalúrgica: | - composição química e estrutura da chapa;   |
|                       | - tratamentos térmicos intermediários, para processos com várias etapas de estampagem. |

Assim, observa-se que:

1ª- A forma da peça a obter impõe, de um modo fundamental, um certo número de operações diretamente proporcional à complexidade da sua forma. Em outras palavras, quanto mais simples for a geometria (forma) de uma peça, menor será o número de operações necessárias para obtê-la.

2ª- As dimensões de uma peça influem igualmente sobre o número de operações necessárias. Por exemplo, para se produzir uma caneca de altura muito maior que o seu diâmetro, são necessárias várias operações de repuxo, além da operação de corte do blanque, como mostrado na figura 4.1.

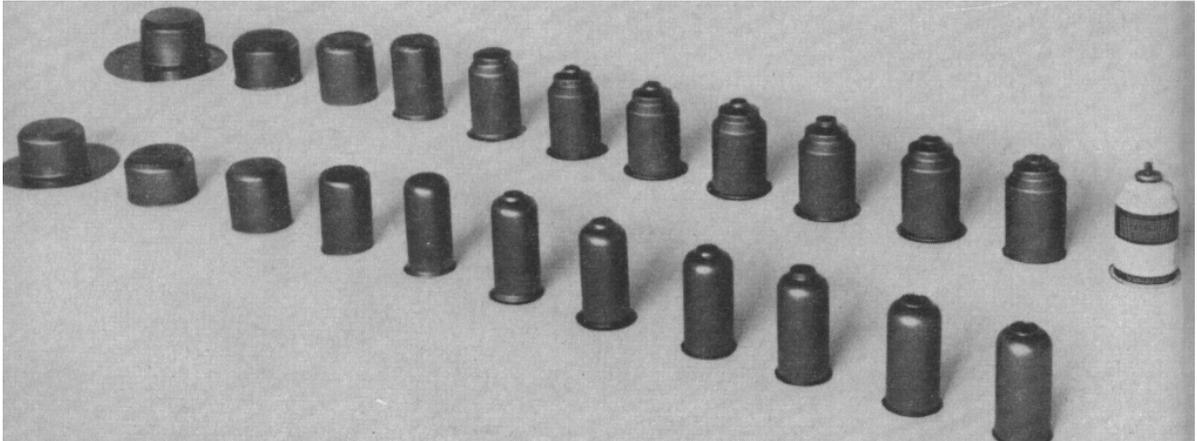


Figura 4.1 Produto obtido por estágios sucessivos de estampagem

3ª- A qualidade do material da chapa, também influi no número de operações necessárias. Há materiais com maior ou menor capacidade de deformação plástica, o que irá diminuir ou aumentar o número de operações necessárias para obtenção da peça, normalmente em operações de dobra ou repuxo. Em outros termos, para se obter uma peça, será necessário um maior ou menor número de operações dependendo da maior ou menor plasticidade do material.

A seleção de uma máquina para efetuar um determinado trabalho, se faz de acordo com a forma e dimensões da peça a produzir, observando-se também as forças envolvidas. Assim, para peças de grandes dimensões correspondem grandes estampas e grandes prensas.

## 4.2 Descrição das etapas de trabalho para confecção de uma ferramenta de conformação de chapas metálicas

Segundo UMARAS (15), as técnicas relativas aos trabalhos em prensa, têm por objetivo empregar métodos de fabricação rápidos e econômicos. Os produtos obtidos pelo processo de estampagem apresentam as seguintes características:

- Alta produtividade;
- Custo reduzido por unidade;
- Intercambialidade absoluta e bom acabamento;
- Leveza e elevada resistência.

A construção de estampos é dispendiosa pelo seu elevado custo, tanto nos materiais nele empregados, bem como pela mão de obra especializada e, ainda, pelo emprego de máquinas e equipamentos de alta qualidade e precisão que sua confecção exige. A figura 4.2 mostra a complexidade que uma ferramenta pode apresentar, dependendo da geometria, tamanho e precisão que o produto possa exigir.

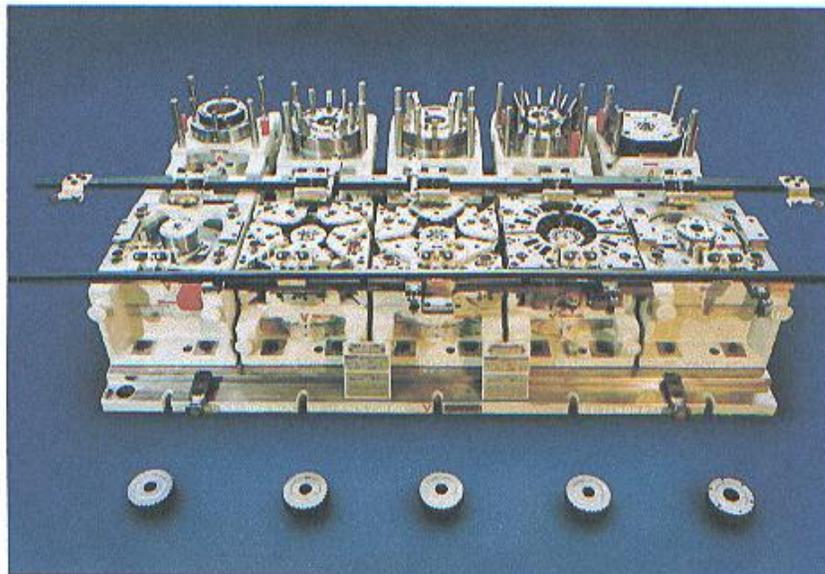


Figura 4.2 Ferramenta de transferência usada na produção de transmissão automotiva

Extraída de Schuller (6)

Para se ter uma visão global do processo ao qual a peça estampada é submetida, apresenta-se a seguir quais as etapas necessárias para obter-se um produto qualquer fabricado pelo processo de estampagem:

- 1- Estudo do produto;
- 2- Projeto do produto;
- 3- Planejamento do ferramental;
- 4- Planejamento dos dispositivos (quando for o caso);
- 5- Projeto dos dispositivos;
- 6- Projetos dos estampos;
- 7- Controle e programação de fabricação de ferramentas e dispositivos;
- 8- Construção das ferramentas;
- 9- Construção dos dispositivos;
- 10- Ensaio (*try-out*) com as ferramentas;
- 11- Ensaio (*try-out*) com os dispositivos;
- 12- Produção piloto;
- 13- Produção em série.

Essas etapas são descritas a seguir.

#### 1- Estudo do produto

Para que um produto possa ser lançado no mercado consumidor seja ele um eletro doméstico ou um automóvel, é preciso um planejamento e estudo detalhado do mesmo, quanto ao seu *design*, dimensões preço etc.

#### 2- Projeto do produto

Quando estão definidas as características gerais do produto, a tarefa a seguir é o estudo pormenorizado de todos os detalhes e do conjunto, devendo-se elaborar um projeto/desenho

completo indicando-se todas as informações necessárias para o produto ser produzido. Nesta fase, normalmente recorre-se à construção de protótipos para análises e eventuais correções.

### 3 e 4- Planejamento de ferramentas e dispositivos

Após a definição do produto, seus desenhos são encaminhados para os departamentos específicos para que se estime a forma e o número de ferramentas e dispositivos necessários para a fabricação de cada peça integrante do conjunto.

### 5 e 6- Projetos de estampas e dispositivos

Os projetistas responsáveis pela área de estampagem receberão informações das folhas de planejamento para a execução dos projetos. Serão consideradas todas as informações sobre os equipamentos disponíveis para a produção das peças.

### 7- Controle e programação de fabricação de ferramentas e dispositivos

Os elementos necessários para o controle e programação de construção são de forma geral:

- Identificação da peça;
- procedência;
- tipo de ferramenta;
- número da ferramenta;
- prazo de execução;
- horas disponíveis.

### 8 e 9- Construção das ferramentas e dispositivos

O setor responsável pela construção de ferramentas e dispositivos é a ferramentaria, que de uma forma geral, pode ser assim subdividida:

- administração;

- construção de ferramentas e dispositivos de acordo com seu porte (tamanho, peso) ou grau de complexidade (precisão);
- preparação;
- usinagem;
- inspeção;
- experiências (*try-out*);
- almoxarifado de ferramentas.

#### 10 e 11- Ensaio (*try-out*)

O *try-out* é uma fase que se desenvolve diretamente nas prensas, avaliando-se as características dimensionais, visuais e de processo e procedendo-se as correções que se fizerem necessárias. Atualmente, tem-se tornado comum o uso de prensas específicas para *try-out*, a fim de reduzir os tempos internos e evitar ocupação dos equipamentos de produção para ensaios HARSCH & VIEHWEGER (16).

#### 12- Produção piloto

Depois da peça ter sido aprovada no *try-out*, todo o projeto será submetido a uma pré produção, denominada de produção piloto. Este estágio permite avaliar como será o comportamento das ferramentas e dispositivos durante o processo produtivo, permitindo ainda algumas correções, antes da produção efetiva.

#### 13- Produção em série

Após terem sido feitas todas as correções dos problemas encontrados durante a fase piloto, o ferramental está em condições de ser liberado para a produção.

## Capítulo 5

### Prototipagem Rápida de Produtos e Ferramentas

#### 5.1 - Introdução

O uso da prototipagem rápida de componentes e ferramentas tem se revelado uma grande revolução no processo de desenvolvimento de produtos.

Segundo ROSOCHOWSKI & MATUSZAK (8), a contínua necessidade de redução do tempo de desenvolvimento de produto (*time to market*) tem aumentado de maneira acentuada a demanda para a construção de protótipos físicos de maneira rápida e precisa. Tal fato, associado à crescente complexidade das peças, vem tornando indispensável o uso de técnicas de prototipagem rápida para encurtar o tempo de desenvolvimento do produto, descobrir falhas e melhorar sua qualidade final.

Para a produção rápida de ferramentas (do inglês *rapid tooling*) uma série de tecnologias já existe, variando desde aquelas em silicone, voltadas à produção em baixas séries, até as que partem para a produção direta da ferramenta na própria máquina de prototipagem, utilizando processos de sinterização ou deposição de metais, ROZENFELD et al (9).

Nos últimos anos surgiu uma nova família de máquinas de prototipagem altamente inovadoras que permitem, com tecnologia e materiais não-convencionais, obter um protótipo de um modelo ou de um molde, de maneira precisa e rápida a partir do modelo sólido gerado no sistema CAD 3D. Tais máquinas, conhecidas como máquinas de Prototipagem Rápida, permitem

obter peças físicas acabadas, de modo automático, com qualquer forma e nas dimensões finais, com complexidade e detalhes que não permitiriam sua obtenção em máquinas convencionais de usinagem, ou tornariam sua execução demorada ou complexa em centros de usinagem numericamente comandados.

Dessa forma, segundo ROSOCHOWSKI & MATUSZAK (8) tais máquinas possibilitam uma maior velocidade e menor custo na obtenção de protótipos se comparado aos processos tradicionais de usinagem. Além disso, em certos casos, estas técnicas permitem a obtenção de matrizes capazes de produzir uma quantidade limitada de peças, ideal para o emprego na produção de lotes pilotos.

Segundo MÜLLER & SLADOJEVIC (10), a quantidade ideal de peças protótipos necessária e viável para a avaliação de um processo ou produto está entre 1 a 100 unidades.

A Prototipagem Rápida possibilita que as empresas possam desenvolver produtos mais rapidamente e com menor custo, e, principalmente, com um acréscimo na qualidade por meio de uma melhor avaliação do projeto, o que acaba levando também a uma diminuição das incertezas e riscos .

Segundo WOHLERS (11), o custo das mudanças de projeto ao longo do ciclo de desenvolvimento do produto, aumenta aproximadamente em cerca de uma ordem de magnitude ao se passar de uma fase para a seguinte como mostrado na figura 5.1.

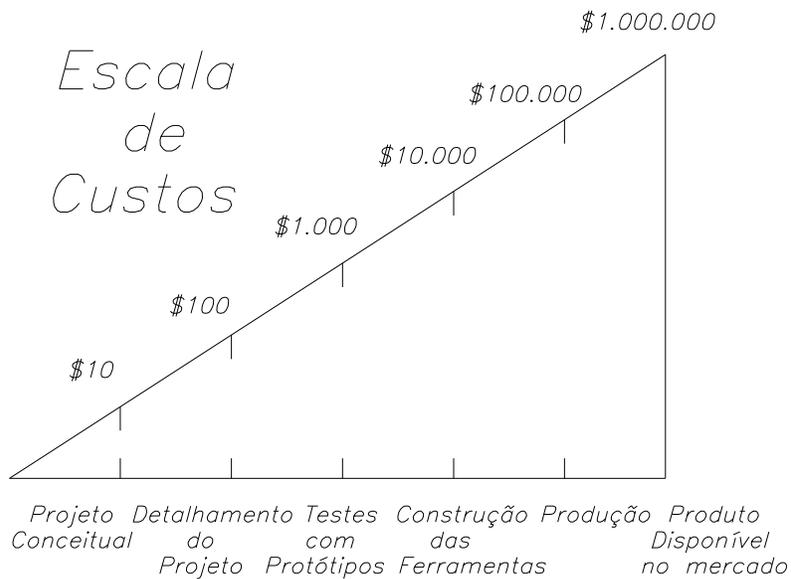


Figura 5.1 – Custo de alteração de projeto ao longo de ciclo de desenvolvimento do produto, extraída e adaptada de WOHLERS (11).

## 5.2 Definições

A Prototipagem Rápida pode ser definida como uma tecnologia que possibilita produzir-se modelos e protótipos diretamente a partir do modelo sólido 3D gerado no sistema CAD.

Podemos classificar os processos de prototipagem rápida, em dois grupos:

- 1- Prototipagem por deposição de camadas;
- 2- Prototipagem por usinagem CNC.

A figura 5.2.1a seguir, mostra alguns dos métodos de prototipagem rápida classificadas de acordo com o tipo de processo.

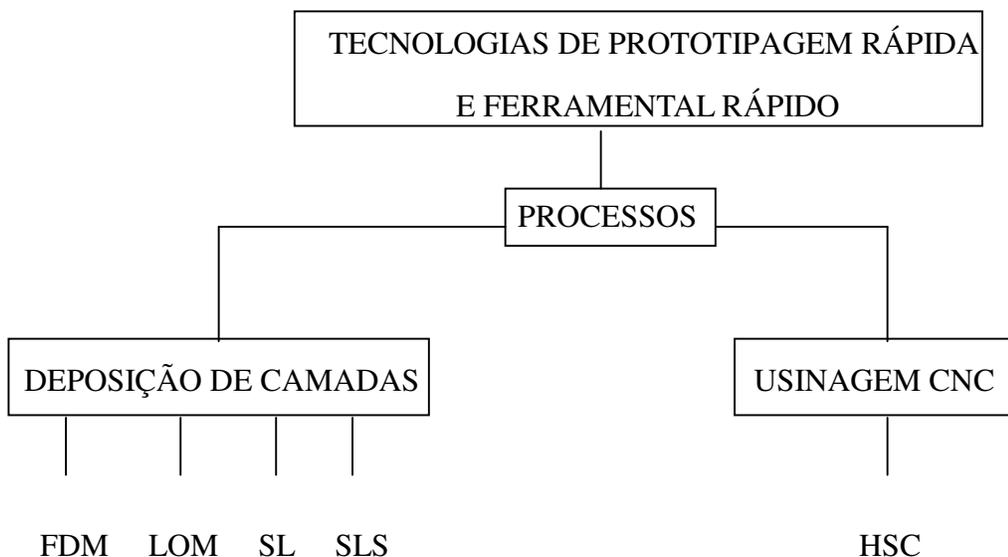


Figura 5.2.1 – Processos de prototipagem Rápida

Ao contrário dos processos de usinagem, que removem material da peça em bruto para se obter a peça desejada, os sistemas de prototipagem rápida que trabalham com deposição de camadas, geram a peça a partir da união gradativa de líquidos, pós ou folhas de papel. Camada por camada, a partir de seções transversais da peça obtidas a partir do modelo 3D, as máquinas de prototipagem rápida produzem peças em plásticos, madeira, cerâmica ou metais, sem ferramental específico, e em tempo menor que os processos convencionais.

Os dados para as máquinas de prototipagem são gerados no sistema CAD em arquivos eletrônicos de formato próprio, sendo o formato STL, o mais utilizado, que aproxima o modelo sólido por pequenos triângulos ou facetas. Quanto menores forem estes triângulos, melhor a aproximação da superfície, naturalmente ao custo de um maior tamanho do arquivo STL e do tempo de processamento. Um vez que o arquivo eletrônico é gerado, as demais operações são executadas pelo próprio *software* que acompanha as máquinas de prototipagem rápida. Basicamente estes softwares, além de operações básicas de visualização, irão gerar as seções transversais do modelo que será construído. Tais dados são então transferidos para a máquina de prototipagem que irá depositar as camadas sucessivamente até que a peça seja gerada.

A figura 5.2.2 representa a transferência de dados entre o CAD e um sistema de prototipagem rápida.

Sistema CAD.

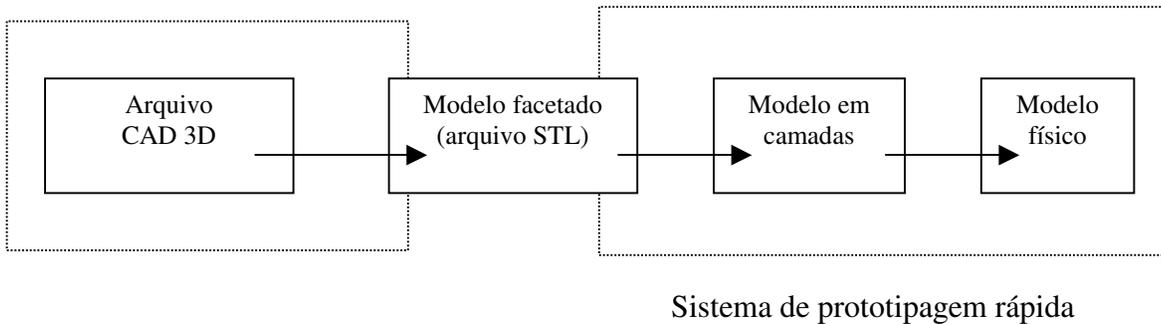


Figura 5.2.2, extraída e adaptada de ROSOCHOWSK & MATUSZAK (8).

### 5.3 Aplicações

As técnicas de prototipagem rápida podem ser aplicadas às mais diversas áreas tais como, automotiva, aeronáutica, marketing, restaurações, educação, paleontologia e arquitetura. A figura 5.3 ilustra como estas técnicas têm sido utilizadas nos EUA nas diversas áreas.

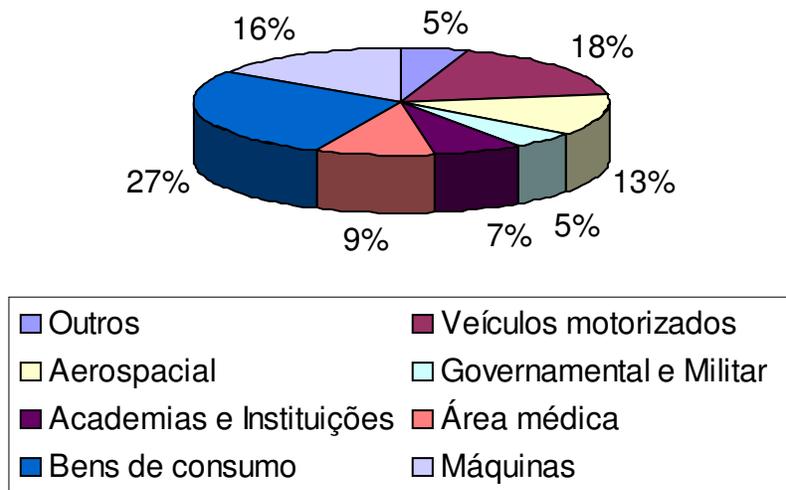


Figura 5.3 Distribuição das aplicações de prototipagem rápida em diferentes áreas, extraída e adaptada de WOHLERS (11).

#### 5.4 Descrição de alguns processos de prototipagem rápida

A seguir, são descritos alguns processos de prototipagem rápida, considerados os mais representativos, por serem os mais conhecidos e empregados na indústria.

##### 5.4.1 Modelagem por fusão e deposição ( *Fused Deposition Modeling – FDM* )

O processo FDM produz protótipos em ABS, elastômeros ou cera. Ele é baseado em uma máquina que possui um cabeçote provido de dois bicos extrusores aquecidos, que se movimenta no plano horizontal (plano XY) e uma mesa que se movimenta no sentido vertical (eixo Z). O *software* é um misto de CAD e CAM e não é integrado com a máquina de prototipagem que apenas é conectada ao computador com o sistema CAM dos quais recebe constantemente os comandos de construção, não havendo uma realimentação de informações da máquina para o

computador. O *software* gera em cada camada, caminhos pelos quais o bico extrusor deve seguir depositando material. Ao final de cada camada, a mesa desce e o cabeçote extrusor começa a acrescentar mais uma camada, repetindo este procedimento até formar o objeto 3D.

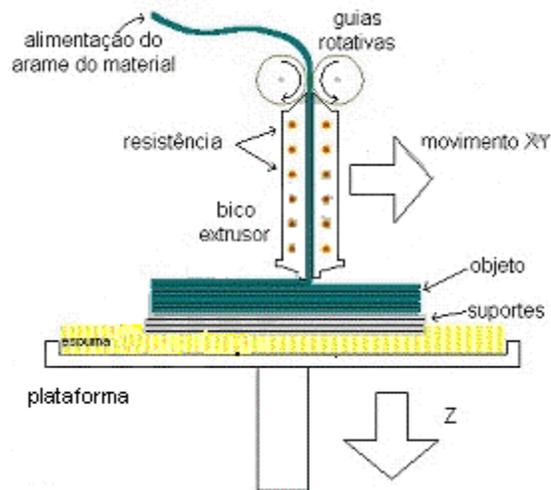


Figura 5.4.1 -Esquema do processo FDM, extraída e adaptada de CIMJECT ON LINE (13)

Para superfícies suspensas, como abas, o *software* cria suportes para que elas possam ser fabricadas sem problemas pelo bico extrusor. É por isso que existem dois bicos extrusores, um para o material do modelo (ABS) e outro para os suportes que posteriormente deverão ser facilmente removidos, daí serem extrudados com uma mistura de ABS com cal.

Os bicos extrusores são basicamente compostos por um resistor elétrico pelo qual o material é empurrado com a ajuda de duas guias rotativas ligadas a um motor. O material fica estocado em rolos dentro da máquina, sob baixa pressão e aquecido, para diminuir a absorção de umidade pelo material que é higroscópico, pois a umidade do material dentro do bico extrusor causa um escorrimento contínuo que impede a continuidade de deposição de material pelo bico extrusor, CIMJECT ON LINE (13) .

#### 5.4.2 Fabricação de Objetos Laminados (*Laminated Object Manufacturing – LOM*)

O LOM é baseado na adesão de camadas de algum material já laminado, por exemplo papel, seguida de um corte a laser. O canhão laser é fixo na máquina e um conjunto de guias e polias movimenta espelhos, no plano XY, que direcionam o feixe de laser sobre uma plataforma. A plataforma movimenta-se em Z, e entre ela e o sistema de movimentação do feixe de laser existe um sistema que transporta o papel em rolos. O papel possui cola termo-ativada do lado de baixo e é alimentado por um rolo. A plataforma posiciona-se no máximo limite em Z, e o papel é colado sobre a plataforma com a ajuda de um rolo de laminação aquecido. Os espelhos se movimentam em XY e o feixe do laser corta uma camada de papel. A plataforma abaixa e os rolos de papel rodam até contemplar uma nova camada, a plataforma sobe novamente e o papel é colado sobre a camada anterior com a ajuda do rolo de laminação aquecido, o sistema corta mais uma camada e processo continua até a completa finalização do objeto.

A figura 5.4.2.1 apresenta os vários detalhes de uma peça prototipada por esse processo.

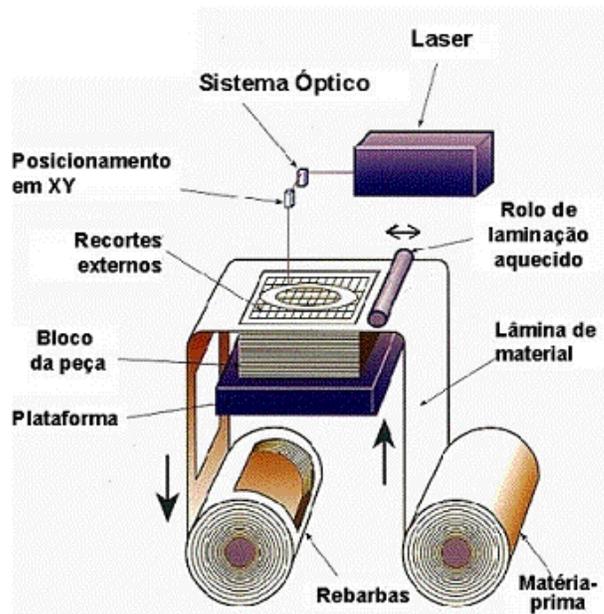


Figura 5.4.2.1 Funcionamento de um sistema LOM. Extraída e adaptada de CIMJECT ON LINE (13)

Segundo CHO et al (12), as características interessantes deste processo de deposição em prototipagem rápida, são os seguintes:

- peças grandes podem ser fabricadas;
- o custo do material é baixo, porque é utilizado papel ou vinil;
- não ocorrem deformações causadas por mudanças de fase.

Por outro lado, ao final da construção, o usuário depara-se com um enorme bloco de papel que deve ser então desmanchado para extrair a peça, sendo muito trabalhoso separar a peça do papel não aproveitado. Além disso, essa tecnologia não oferece protótipos com boa precisão dimensional. Para minimizar esses inconvenientes, existem pesquisas com o uso de novos materiais como polímeros, metais, compósitos e cerâmicas.

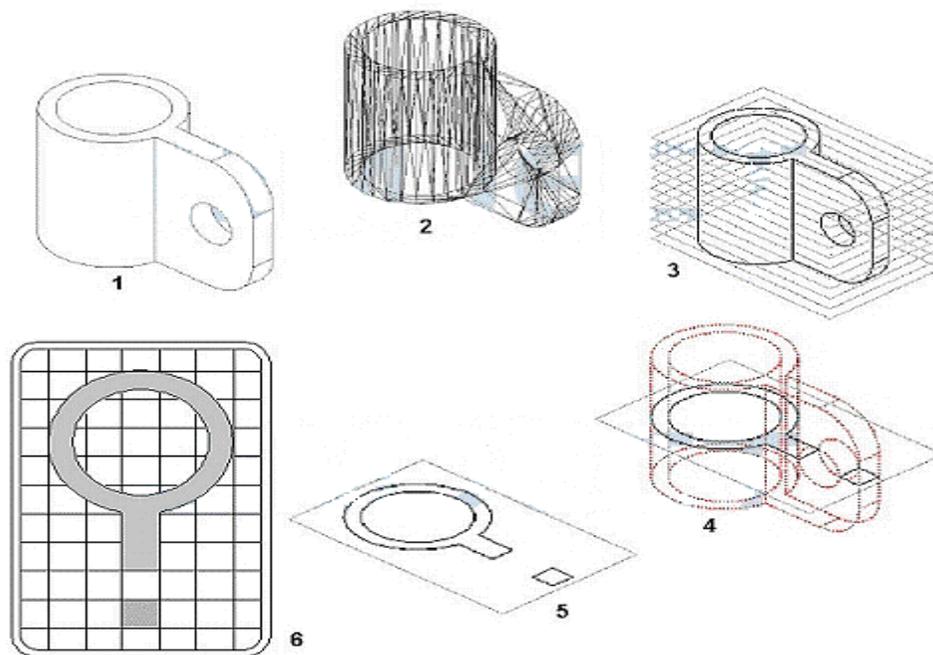


Figura 5.4.2.2

1) Modelo CAD; 2) Modelo STL; 3) Planos de corte; 4) Geração de fatias com intersecção de um plano; 5) Fatia; 6) Geometria de corte: Em linha por onde o laser passa. A região cinza é a camada da peça. Extraída e adaptada de CHO et al.

Uma característica muito interessante nesse processo é que podem ser notados os triângulos do arquivo STL sobre a superfície do objeto construído. Isso acontece porque como a

camada do objeto é formada pela intersecção com os planos paralelos, ocorre a formação de um segmento entre os triângulos e os planos, o feixe de laser “marca” (queima mais) aonde ocorre a mudança de direção entre dois segmentos retilíneos, CIMJECT ON LINE (13) .

### **5.4.3 Estereolitografia (*Stereolithography – SL*)**

A estereolitografia é a tecnologia pioneira de Prototipagem Rápida, desenvolvida ao final dos anos 80 e teve sua comercialização no início dos anos 90 do século XX. Desde então, representa a tecnologia com o maior número de equipamentos vendidos por ano.

Essa tecnologia é baseada na foto-polimerização de uma resina por um feixe de laser UV (Ultra Violeta). O sistema é formado por uma plataforma que se movimenta no eixo Z dentro de uma cuba com resina, e um laser com conjunto óptico e direcionamento do feixe por espelhos galvanométricos.

O controle numérico da máquina posiciona a plataforma na superfície da resina e os espelhos galvanométricos direcionam o feixe de laser desenhando a primeira camada do objeto a ser construído. Por onde o feixe do laser incide na superfície da resina, ocorre uma polimerização localizada, o que causa a solidificação da resina.

Essa resina é um composto de monômeros, fotoiniciadores e aditivos. Quando o feixe do laser incide sobre a superfície da resina, os fotoiniciadores iniciam uma reação localizada que promove a formação da cadeia polimérica entre as moléculas do monômero da resina. Existem três grupos de resinas disponíveis com base em monômeros de epóxi, acrílico e vinil. Quando a camada é concluída, a plataforma desce, mergulhando a camada fabricada dentro da cuba com resina. A plataforma sobe novamente, mas retorna com um decréscimo de deslocamento correspondente à espessura de camada desejada. Devido a alta viscosidade da resina, um subsistema regulariza a nova camada de líquido para que ela fique plana. Os espelhos novamente direcionam o feixe de laser sobre a superfície da resina, formando uma nova camada que se une à camada anterior. O processo segue continuamente até a completa finalização do objeto, CIMJECT ON LINE (13)

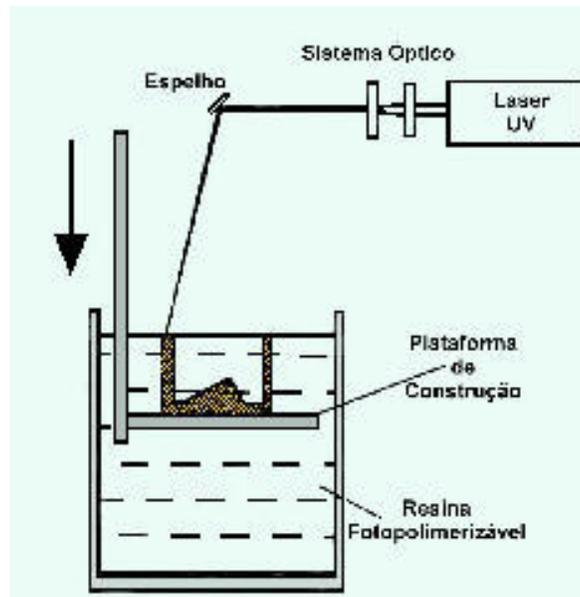


Figura 5.4.3- Representação do processo de estereolitografia, extraída de AGILTEC (18).

#### 5.4.4 Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering – SLS*)

A sinterização seletiva a laser é baseada, como o próprio nome já diz, em um sistema laser que sinteriza localmente pó. Existem máquinas que funcionam para qualquer classe de material (metais, termoplásticos, elastômeros, cerâmicas e compósitos) e máquinas que trabalham especificamente para cada tipo de material.

O aquecimento das partículas causa a fusão ou sinterização das mesmas para criar uma fina camada sólida. Esta camada é coberta por mais pó e então, a próximas camadas formadas sucessivamente, até que o objeto seja completamente gerado.

O mesmo processo pode ser realizado a partir de uma combinação de aço de baixo carbono e uma pasta em pó termoplástico, resultando em uma peça em "estado verde". A pasta é então levada a um forno e as partículas de aço são sinterizadas. O esqueleto de aço resultante é subsequentemente infiltrado com cobre, resultando em uma peça de metal composto. GARCIA & CARVALHO (1).

A máquina comercializada pela DTM Corp, modelo Sinterstation2500Plus é constituída de um laser de CO2 com sistema ótico e espelhos robóticos, de uma plataforma que se

movimenta na direção Z e um sub sistema que armazena o pó e distribui ele sobre a plataforma uniformemente. A figura 5.4.4 mostra a máquina da DTM Corp.

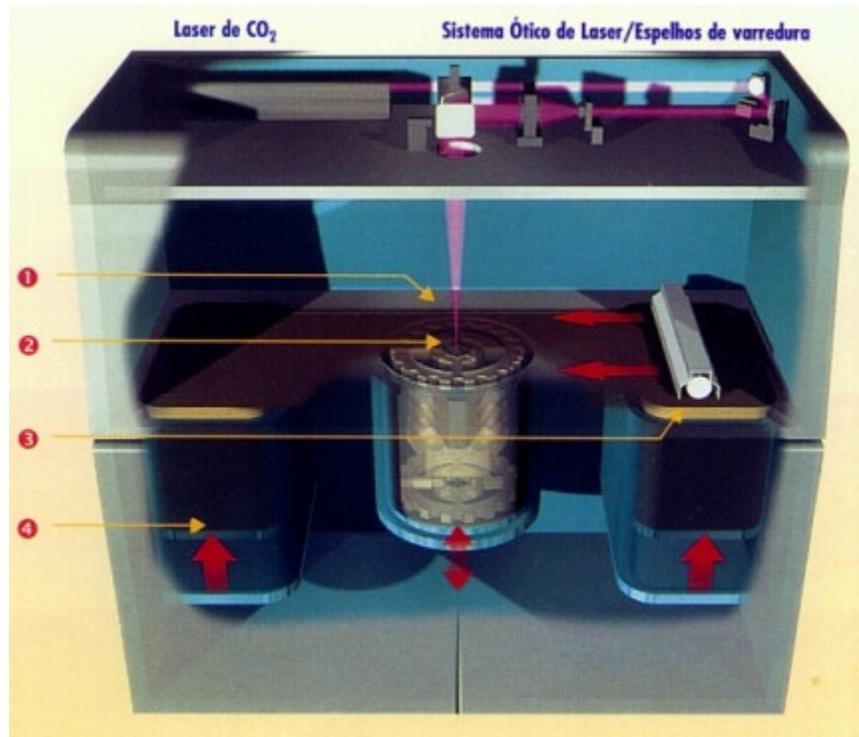


Figura 5.4.4 - Máquina SLS da DTM Corp. CINJECT ON LINE (13)

Esquema de funcionamento do processo SLS da DTM:

- 1) Iniciado o processo, uma fina camada de pó fusível ao calor é depositada no cilindro de formação do objeto;
- 2) O laser de CO<sub>2</sub> desenha uma camada do objeto fundindo o pó por onde ele passa;
- 3) outra camada adicional de pó é depositada sobre o cilindro de formação;
- 4) o processo segue continuamente até a formação do objeto completo.

O sistema funciona com o feixe de laser “escaneando” (percorrendo) a superfície do material em pó que foi depositado e regularizado pelo sub sistema de alimentação. Por onde o laser passa ocorre o aquecimento das partículas de pó que acabam grudando umas as outras formando então uma camada sólida. Os espelhos apontam o feixe de laser para um ponto um ponto específico, a plataforma se movimenta para baixo e o sub sistema de alimentação adiciona

uma nova camada de pó. Os espelhos comandados pelo NC voltam a funcionar e novamente ocorre a sinterização por onde os espelhos direcionam o feixe de laser sobre a superfície da camada de pó. Assim o sistema funciona sucessivamente até completa o objeto 3D.

A DTM Corp fornece diferentes materiais para a construção de objetos. Para objetos em plástico o mais usual é o pó de poliamida que dá boa resistência mecânica ao objeto. Existem ainda termoplásticos como o policarbonato. Também é possível utilizar pós de elastômeros. O aspecto superficial é bom, com a formação do efeito escada e superfície áspera. Para a construção de objetos metálicos existem diferentes tipos de pós. Um composto muito utilizado devido as boas propriedades de condutibilidade térmica é o cobre-poliamida, onde as partículas de pó de cobre são revestidas com uma camada do material polimérico. Quando o laser passa pela superfície ele funde somente o termoplástico grudando as partículas. No caso do aço (RapidSteel 2) as partículas de aço também são recobertas por um termoplástico que é fundido pelo feixe do laser. Depois de pronto o objeto apresenta propriedades mecânicas ruins, por isso ele sofre dois processos posteriores, que são a queima do termoplástico, seguida de uma pré-sinterização das partículas metálicas e posterior infiltração de cobre por efeito capilar. CINJECT ON LINE (13)

#### **5.4.5- Construção de Ferramental Rápido com Fresamento em Alta Velocidade**

A ferramenta de conformação é normalmente fabricada em máquinas como fresadoras CNC ou centros de usinagem.

As matrizes usadas em pequenos lotes de fabricação tem de ser produzidas rapidamente e a baixos custos. Para estes casos, devem ser escolhidos materiais que suportem os esforços do processo de conformação.

Ligas de alumínio são bons materiais para fabricação de matrizes e tem boa usinabilidade. Como os lotes são pequenos, estas ligas podem ser usadas na fabricação de moldes para borracha e plásticos. Entretanto, no caso de conformação de chapas, vários problemas podem ocorrer. Como as ligas de alumínio são moles, a superfície da matriz pode riscar facilmente e também pode ocorrer a deformação em seus cantos. Devido a estas condições, raramente utilizam-se ligas de alumínio na construção de matrizes de conformação.

Tem-se então como opções a utilização de ligas de zinco, ligas de cobre, aço ou resina de poliuretano. Em termos de custos, o aço é o mais recomendado, mas a sua baixa usinabilidade se comparado com esses materiais, dificulta a obtenção de matrizes com a rapidez necessária.

A resina de poliuretano é uma alternativa interessante devido a sua elevada resistência e boa usinabilidade. A tabela 5.4.5 apresenta algumas propriedades e características de algumas resinas comerciais de poliuretano e do aço ABNT 1020, para que se possa comparar as algumas propriedades de resistência e dureza mecânica.

Tabela 5.4.5 - Propriedades de resinas de poliuretano, extraída e adaptada de VANTICO (17)

CÓDIGO REN SHAPE	5166	5168	EXPRESS 2000	AÇO ABNT 1020
COR	MARFIM	VERDE	CINZA	----
APLICAÇÃO	FERRAMENTAS PARA CONFORMAÇÃO DE METAIS	MODELOS DE FUNDIÇÃO, DISPOSITIVOS	MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS	AÇO PARA APLICAÇÕES GERAIS
DENSIDADE g/cm <sup>3</sup>	1,7	1,2	1,8	7,85
RESISTÊNCIA A FLEXÃO N/mm <sup>2</sup>	55 - 65	105 - 110	80 - 85	147
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO N/mm <sup>2</sup>	90 - 100	80 - 90	250 - 260	137
DUREZA SHORE D	85 - 90	80 - 85	90 - 91	121 HB

Na prototipagem de ferramental com usinagem CNC, alguns avanços foram feitos para obtenção de matrizes de ferramental rápido. Um deles é a introdução de máquinas de usinagem CNC. Usando máquinas com comandos de três eixos pode-se obter peças usinadas diretamente em materiais como ligas de alumínio, zinco, bronze ou resinas desenvolvidas para esta finalidade

como epóxi ou poliuretano . Estes sistemas trabalham fixando à máquina um bloco do material que terá movimentos em um plano normalmente horizontal com coordenadas em uma tabela para os eixos X-Y. O eixo do vertical controla a linha Z central. Como nos sistemas de prototipagem rápida, os três eixos da máquina comandados pelo CNC podem acomodar dados 3-D do CAD e produzir uma peça do protótipo, no caso uma matriz.

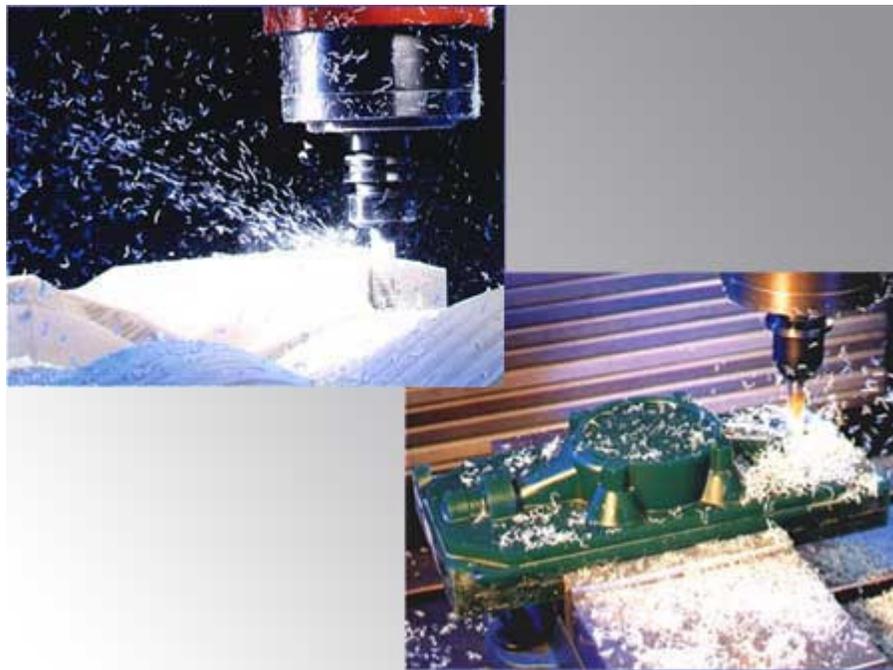


Figura 5.4.5 - Usinagem de poliuretano em máquina CNC, extraída de VANTICO (17)

## **Capítulo 6**

### **Procedimento Experimental – Materiais e métodos**

#### **6.1 - Escolha do produto**

A peça que será usada como exemplo neste trabalho, é uma tela metálica que será montada em um gabinete plástico, devendo obedecer as tolerâncias dimensionais e uma forma definida em projeto, como mostrado na figura 6.1 A proposta é obter um lote de 20 peças com a qualidade exigida, para que sejam feitos os testes de montagem e análise do aspecto visual, além de definir os parâmetros técnicos de estampagem.

Como o autor deste trabalho é um profissional atuante na área de projeto de ferramentas e processos de estampagem, e percebeu a importância de se estudar a Prototipagem de Ferramentas, pelas vantagens que este método oferece e decidiu-se pela escolha deste produto, que permitiu comparar-se os procedimentos convencionais de fabricação de ferramentas com os de Ferramental Rápido.

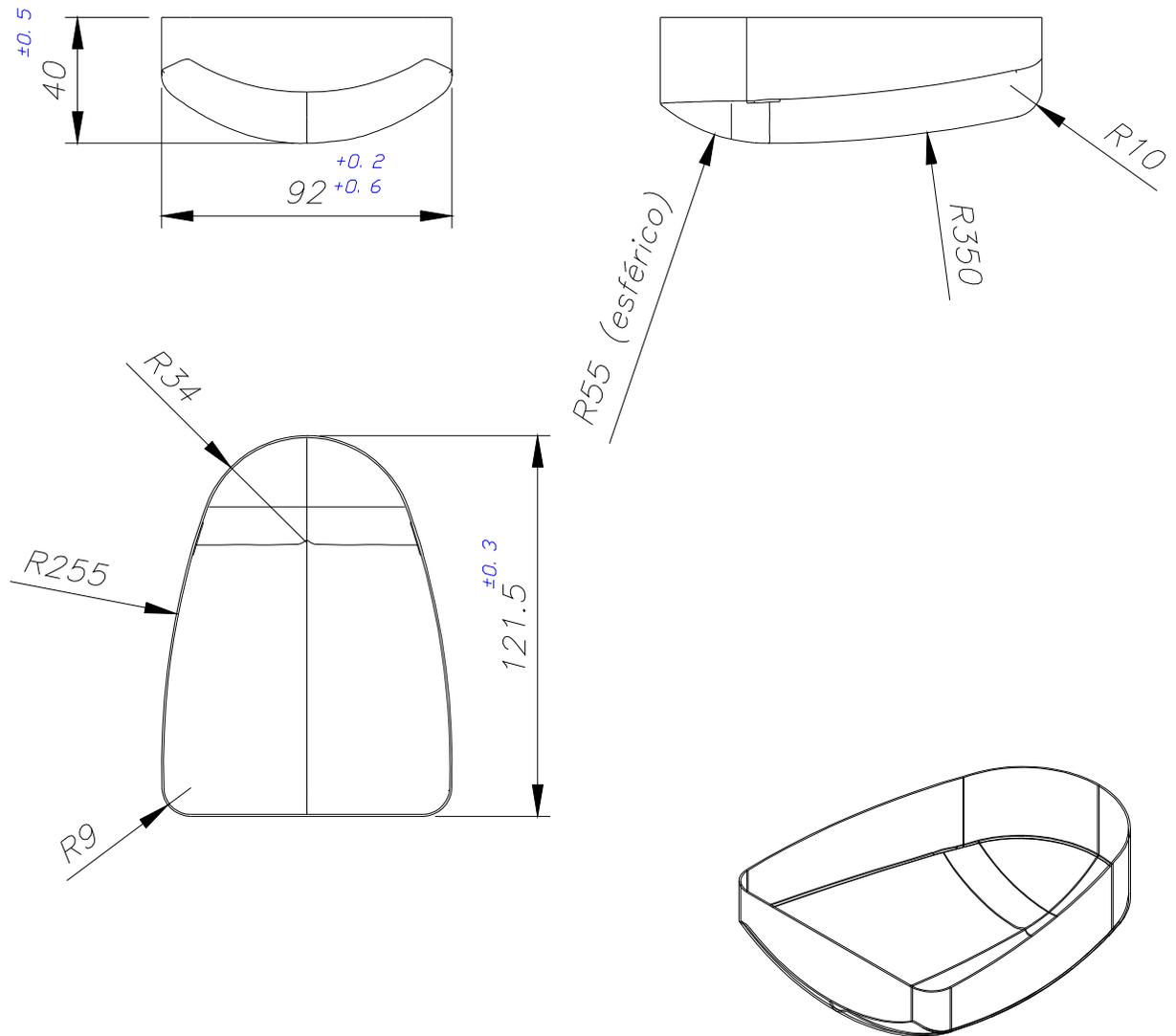


Figura 6.1 – Características do produto escolhido

### 6.1.1 Dados do produto

Produção prevista : 30.000 peças/mês

Dimensões críticas: geometria de contorno e dimensões de  $92^{+0,2}_{+0,6}$  mm  
e  $121,5^{+0,3}_{-0,3}$  mm

Cronograma de entrega do ferramental: 60 dias a partir da confirmação do cliente

Nome do produto: tela para caixa acústica

Material: chapa perfurada  $\varnothing 1,5$  entre centros 2,0 mm, espessura = 0,6 mm SAE 1006/8

EEP

Acabamento: pintura epóxi cor preta

### 6.1.2 Seqüência de operações para obtenção do produto

- Perfuração da chapa;
- Corte em tiras com largura 140 mm;
- Corte do blanque;
- Repuxo da peça;
- Fosfatização;
- Pintura;
- Inspeção total;
- Embalagem;

### 6.1.3 Seqüência de construção de ferramentas

Para a fabricação do produto estudado, são necessários três conjuntos de ferramentas, que são projetadas e construídas na seguinte ordem:

- 1) Ferramenta de perfuração;
- 2) Ferramenta de repuxar;
- 3) Ferramenta de cortar blanque.

Para a realização deste trabalho, as seguintes considerações sobre as ferramentas devem ser destacadas:

- a ferramenta de perfuração já está disponível, pois chapa perfurada é um produto de fornecimento constante pela empresa.
- a ferramenta de repuxo é construída antes da ferramenta de cortar o blanque, pois a definição do formato exato do blanque somente é possível a partir de ensaios práticos.
- somente a ferramenta de repuxo será objeto de estudo deste trabalho, no qual será comparada com a ferramenta construída no processo convencional.
- a princípio, serão empregados os mesmos critérios para o dimensionamento do ferramental rápido (folgas, dimensões da cavidade e raios da matriz) que os usados no projeto da ferramenta convencional. Após a análise dos resultados, serão feitas as modificações necessárias nesse dimensionamento.
- o tempo efetivamente gasto na obtenção da ferramenta será registrado para comparação com o mesmo tempo relativo ao ferramental convencional.

## **6.2 Definições de parâmetros técnicos para construção das ferramentas**

### **6.2.1 Ferramenta de corte**

Segundo ROSSI (5A), o cálculo da força de corte necessária será:

$$Q = p * s * \sigma_t$$

Q = Força de corte (kgf)

p = perímetro de corte em mm

s = espessura da chapa em mm

$\sigma_t$  = constante de corte em função do material (75% da carga de ruptura) em kgf/mm<sup>2</sup>

Como o produto estudado será feito com chapa perfurada, o cálculo da força de corte deve ser multiplicado por (1 – porcentagem da área aberta). A figura 6.2.1 mostra a configuração de uma chapa perfurada.

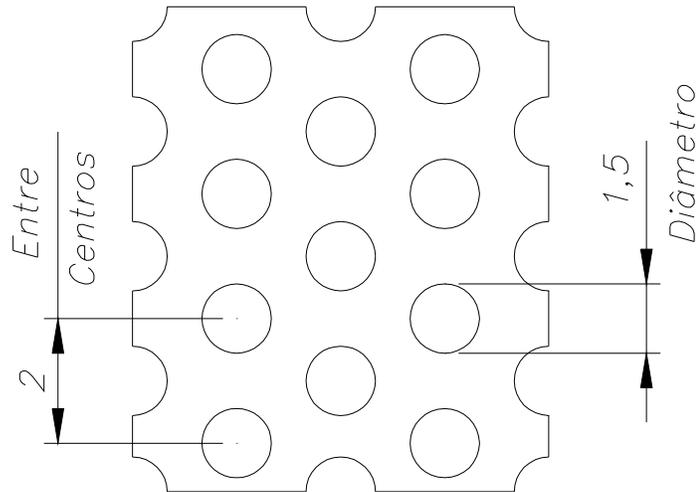


Figura 6.2.1 - Exemplo de chapa perfurada.

Para o cálculo da área aberta tem-se:

$$P = 90 * (\text{Øfuro} / \text{entre centros})^2$$

$$P = \text{área aberta}$$

Teremos então:

$$P = 90 * (1.5/2)^2$$

$$P = 50\%$$

$$1 - 50/100 = 1/2$$

$$Q = 820 * 0.6 * 31 * 1/2$$

$$Q = 7626 \text{ kgf}$$

$$Q = 76260 \text{ N}$$

### 6.2.2 Ferramenta de repuxo

Segundo ROSSI (5B), o cálculo da força de repuxo necessária será:

$$PR = \pi * (Deq) * s * \sigma_b * n$$

PR = força de repuxo (kgf)

Deq = diâmetro equivalente em mm

e = espessura da chapa em mm

$\sigma_b$  = resistência a tração em kgf/mm<sup>2</sup>

n = coeficiente de correção

$$Deq = \sqrt{4 * S / \pi}$$

$$Deq = \sqrt{4 * 9200 / \pi}$$

$$Deq = 108,3 \text{ mm}$$

$$PR = 3,14 * 108,3 * 0,6 * 31 * 1,2 * 1/2$$

O valor de 1/2 foi obtido para compensar a utilização de chapa perfurada.

$$PR = 3917 \text{ kgf}$$

$$PR = 39170 \text{ N}$$

Raio da matriz:

$$R = 0,8 \sqrt{(D - d) * e}$$

$$Deq \text{ do blaque} = \sqrt{4 * 50000 / \pi}$$

$$Deq \text{ do blaque} = 252,4 \text{ mm}$$

$$R = 0,8\sqrt{(252,4 - 108,3) * 0,6}$$

$$R = 7,4 \text{ mm}$$

### 6.3 Ferramental Convencional

O ferramental convencional para a fabricação do produto escolhido está mostrado na figura 6.3.

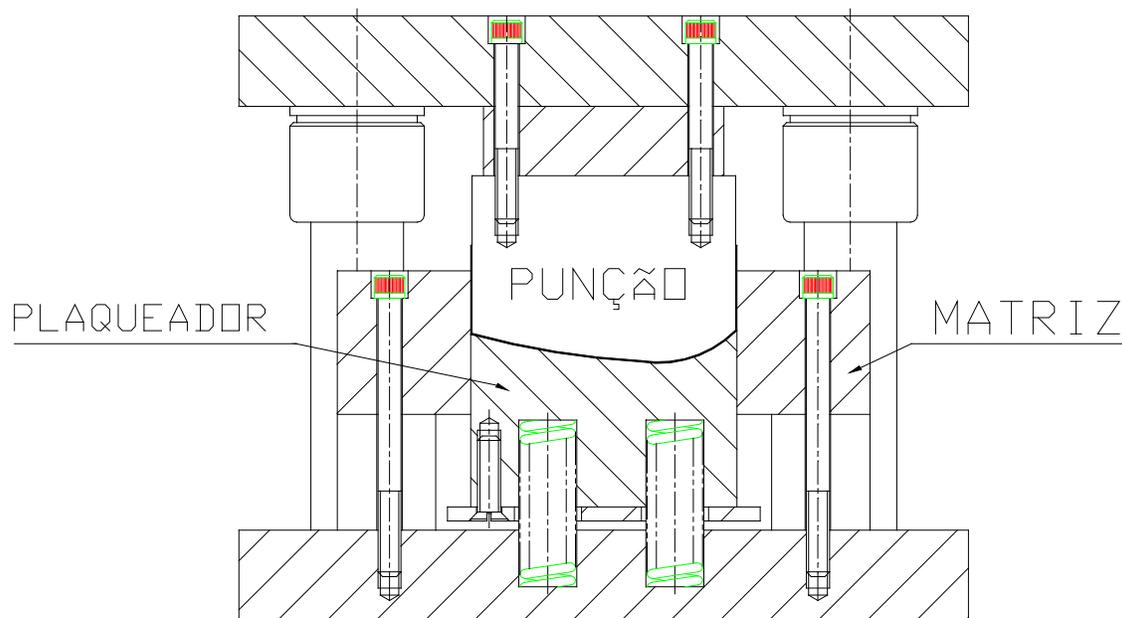


Figura 6.3 - Ferramenta Convencional

### 6.4 Dimensional da cavidade da matriz

A matriz é o item responsável pela geometria externa da peça. A determinação dos seus valores deve eliminar as incertezas existentes na construção da ferramenta convencional, já que estas medidas podem sofrer variações influenciadas pela geometria da peça, dureza do material e tolerância dimensional da peça. Os valores das dimensões das cavidades da matriz foram determinados por condições que garantissem a tolerância, permitindo variações dimensionais devidas a desgastes. A figura 6.4 mostra o desenho da matriz com o dimensional da cavidade.

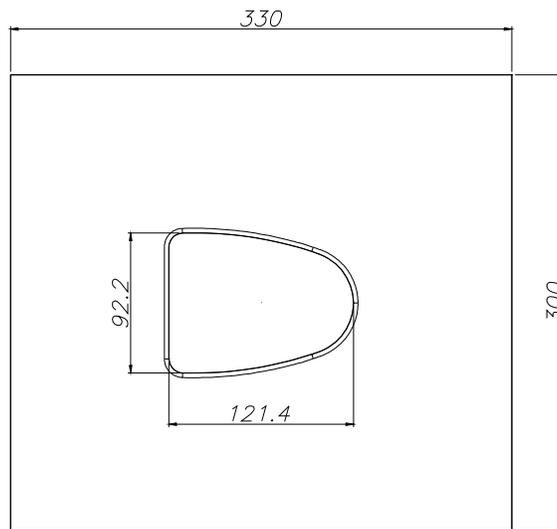


Figura 6.4 - Desenho da matriz com o dimensional da cavidade.

### 6.5 Tensão de compressão

Para determinação da tensão de compressão atuante na área do raio da matriz, divide-se o valor da força necessária para o repuxo (PR) pela área de distribuição desta força (Figura 7.5.1), utilizando um coeficiente de segurança igual a 2.

$$PR = 38422 \text{ N}$$

$$\text{Area} = 1049,4 \text{ mm}^2$$

$$\text{Coeficiente de segurança} = 2$$

$$\text{Pressão resultante } Pr = 36,6 * 2 = 73,2 \text{ N/mm}^2 = 73,2 \text{ MPa}$$

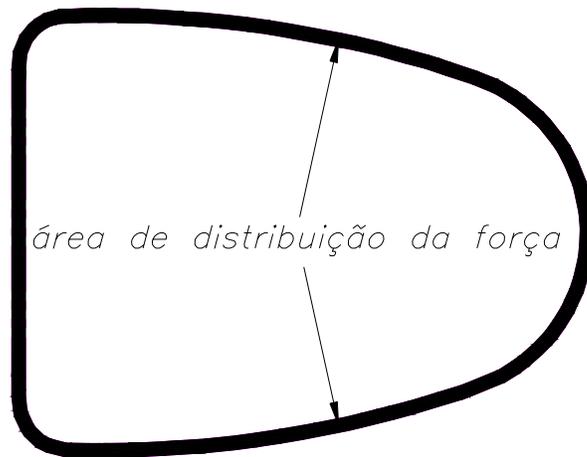


Figura 6.5 - Área de atuação da força de repuxo

## 6.6 - Escolha e descrição do processo de prototipagem rápida do ferramental

Na tabela 6.6.1 apresentam-se alguns dos processos disponíveis para confecção dos itens do ferramental rápido, que são a matriz, o punção e o plaqueador.

Tabela 6.6.1 - Processos de Ferramental Rápido

ÍTEMS	PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA				MATERIAIS PARA FERRAMENTA			
	PROCESSO STL	PROCESSO FDM	PROCESSO SLS	FRESA CNC	RP 6470 (MOLDAR)		REN SHAPE (PLACA)	
PRODUTO	1	2	3					
MATRIZ				4	1	2	3	4
PUNÇÃO				4	1	2	3	4
PLAQUEADOR				4	1	2	3	4

Descrição dos processos:

Processo 1:

- Modelar o produto em CAD 3D, gerando um arquivo STL:
- Prototipar o produto usando o processo de Estereolitografia:
- Com o produto como modelo, moldar em resina a matriz, o punção e o plaqueador;

Processo 2:

- Modelar o produto em CAD 3D, gerando um arquivo STL:
- Prototipar o produto usando o processo de Modelagem por Fusão e Deposição;
- Com o produto como modelo, moldar a matriz, o punção e o plaqueador.

Processo 3:

- Modelar o produto em CAD 3D, gerando um arquivo STL:
- Prototipar o produto usando o processo de Sinterização Seletiva a Laser;
- Com o produto como modelo, moldar a matriz, o punção e o plaqueador;

Processo 4:

- Modelar o produto em CAD 3D, gerando um arquivo CAM para usinagem:
- Gerar arquivos de usinagem a partir do modelo 3D para a matriz, punção e plaqueador;
- Usinar a matriz, o punção e o plaqueador a partir de placas de poliuretano

A tabela 6.6.2 apresenta as propriedades mecânicas dos produtos obtidos pelos processos de Prototipagem Rápida, para os materiais empregados.

Tabela 6.6.2 – Propriedades de produtos prototipados.

PROCESSO	MATERIAL	DUREZA SHORE D	CARGA DE COMPRESSÃO MPa
ESTEREOLITOGRAFIA	RESINA DSM SOMOS7110	82	56
FDM	ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO (ABS)	79	69
FRESAMENTO DE ALTA VELOCIDADE	RESINA DE POLIURETANO	90	100

As tensões de compressão envolvidas na operação de repuxo impedem que as peças que irão compor o ferramental rápido (matriz, punção e plaqueador) sejam feitas diretamente em um dos processos de prototipagem rápida, daí a escolha ter recaído sobre a prototipagem pela usinagem de placas de poliuretano.

Dentre os materiais disponíveis escolheu-se o poliuretano como matéria prima pela sua alta resistência a compressão, maior que a calculada no ítem 6.5.

Este material pode ser encontrado de duas formas:

- Resina + endurecedor + carga. Este conjunto de produtos deve ser usado para moldagem.
- Placa pronta. Material pronto para usinagem.

## 6.7 - Modelagem do Produto em CAD 3D

O produto necessita ter sua modelagem feita em CAD 3D, para criação dos arquivos CAM para usinagem. Para isso, foi utilizado o software de CAD SolidWorks, com as informações dimensionais da peça e da sua geometria, para gerar um arquivo de desenho 3D, denominado peça.prt, e que contém todas as informações para a visualização da peça.

### **6.7.1 - Criação dos Arquivos de Usinagem**

A partir do arquivo peça.prt, geram-se os programas para usinagem das peças no programa de CAM chamado Solid Edge. Como este programa não lê diretamente arquivos criados no software SolidWorks, foi necessário criar um arquivo intermediário denominado peça.igs, para ser lido e convertido para o ambiente do Solid Edge. Com o arquivo peça.igs, utilizou-se a geometria modelada para criar os programas de usinagem do contorno da cavidade da matriz, dos contornos e das superfícies do punção e do plaqueador.

Deve ser ressaltado que os programas CAM estão prontos para usinagem das peças, já considerando as folgas necessárias, os passes de desbaste e de acabamento

### **6.7.2 – Preparação dos blocos**

Cada bloco foi preparado com material adicional para usinagem, empregando o seguinte procedimento:

- 1- Construção de caixas de madeira para a moldagem;
- 2- Definição das quantidades de cada produto,;
- 3- Pesagem dos produtos;
- 4- Mistura da massa;
- 5- Despejo da massa nas caixas;
- 6- Aguardar o tempo de cura, recomendado pelo fabricante de 24 horas em temperatura ambiente.

A proporção usada para a obtenção das placas foi:

Resina = 80 partes;

Endurecedor = 100 partes;

Carga = 300 partes.

De acordo com os valores recomendados pelo fabricante obtendo-se então:

- 1 placa de 50 x 300 x 330 mm;
- 1 bloco de 50 x 90 x 150 mm;
- 1 bloco de 50 x 90 x 150 mm;

### **6.7.3 - Etapas de usinagem**

A máquina utilizada para as operações de usinagem foi uma fresadora vertical marca FIRST modelo M1000 com comando FANUC, potência do motor principal de 7,5 CV, controle de velocidades com variação contínua na faixa de 60 a 15000 freqüências de giro e gama de avanços na faixa de 1 a 3000 mm/min . A usinagem se dividiu em uma etapa de desbaste e uma etapa de acabamento, com o seguinte procedimento:

*Setup* da peça:

- fixação da peça na mesa da máquina;
- alinhamento do bloco utilizando relógio comparador.

*Setup* da máquina:

- carregar o programa de usinagem na memória da máquina (desbaste e acabamento);
- colocação da ferramenta;
- zerar a ferramenta na peça.

Os parâmetros de usinagem utilizados foram extraídos do catálogo do fabricante do poliuretano, conforme mostrado na tabela 6.7.3.1.

Tabela 6.7.3.1- Parâmetros de usinagem das placas de poliuretano

<b>USINAGEM DE DESBASTE</b>					
ROTAÇÃO (Frequência de giro)	AVANÇO (MPM)	PROFUNDIDADE POR PASSADA (mm)	φ DA FERRAMENTA	MATERIAL DA FERRAMENTA	VELOCIDADE PERIFÉRICA (MPM)
1500	1,5	8	20	AÇO RÁPIDO	94,2

<b>USINAGEM DE ACABAMENTO</b>					
ROTAÇÃO (Frequência de giro)	AVANÇO (MPM)	PROFUNDIDADE POR PASSADA (mm)	φ DA FERRAMENTA	MATERIAL DA FERRAMENTA	VELOCIDADE PERIFÉRICA (MPM)
10000	2,5	1	10	AÇO RÁPIDO	314

Os tempos de usinagem em minutos obtidos nas etapas de desbaste e acabamento da matriz, do punção e do plaqueador estão mostrados na tabela 6.7.3.2.

Tabela 6.7.3.2- Tempos de usinagem em minutos

	DESBASTE	ACABAMENTO	SETUP PEÇA E MÁQUINA	TOTAL
MATRIZ	4,0	11,0	15,0	30,0
PUNÇÃO	6,0	11,0	15,0	32,0
PLAQUEADOR	6,0	11,0	15,0	32,0
			<b>TOTAL</b>	<b>94,0</b>

## 6.8 Montagem das peças

As peças foram montadas em um conjunto de base-cabeçote, com o objetivo de manter o punção guiado durante a sua penetração na matriz, mantendo sempre a folga igualmente distribuída (Figura 6.8)



Figura 6.8 - Matriz, Punção e Plaqueador montados em um conjunto de base-cabeçote.

### 6.8.1 Centrador do blanque

O blanque inicial é teórico e tem uma geometria definida.

A localização do blanque sobre a matriz é feita colando-se pequenos calços para manter sua posição. A cada peça estampada um novo blanque é posicionado novamente entre os calços repetindo sempre sua localização (Figura 6.8.1) .



Figura 6.8.1 - Ferramental Rápido montado na prensa, com os localizadores do blanche

### 6.8.2 Definição inicial do blanche

A geometria e as dimensões do blanche são inicialmente definidas a partir do desenvolvimento da superfície do produto (Figura 6.1). Na prática industrial, essa geometria pode ser otimizada a partir dos resultados experimentais da etapa de *try-out*, como será visto no capítulo 7.

### 6.9 Estampagem das peças

De acordo com as forças calculadas no item 6.2 escolheu-se uma prensa excêntrica de capacidade 40 ton, usando um curso de 54 mm e velocidade de trabalho máxima de 80 golpes por minuto.

O *setup* da máquina (preparação mais regulagem) é feito da mesma forma que no processo de estampagem convencional, fixando a ferramenta na prensa e regulando curso e altura do martelo.

Após o *setup*, procedeu-se a estampagem posicionando o blanche, acionando o pedal da prensa e conformando a peça conforme a sequência mostrada a seguir.

### 6.9.1 Seqüência de estampagem

As figuras 6.9.1.1 a 6.9.1.3 apresentam a seqüência de estampagem da peça, desde a colocação do blanche na ferramenta até a obtenção do produto estampado.



Figura 6.9.1.1 Com a ferramenta montada na prensa, posiciona-se o blanche entre os localizadores.



Figura 6.9.1.2- Com o blanque posicionado, aciona-se a prensa, que inicia o movimento de descida do martelo fazendo o punção penetrar na matriz, levando o blanque para dentro da cavidade.



Figura 6.9.1.3 - Após o ciclo da prensa, a peça estampada fica presa no punção, e posteriormente é extraída pelo plaqueador acionado por molas.

## **Capítulo 7**

### **Apresentação e Análise dos Resultados**

#### **7.1- Qualificação visual do produto e otimização do blanque**

A primeira definição importante que se obtém assim que a primeira peça é estampada, é se a geometria teórica do blanque apresentada na figura 7.1.1 está correta. Normalmente, esta geometria precisa de correções com adição ou remoção de material até obter-se o formato adequado.

O processo de conformação de chapas perfuradas não se faz com a utilização de prensa-chapas nas ferramentas, porque este recurso cria um estiramento na chapa que normalmente causa sua ruptura.

Tem-se então que definir o blanque a partir de tentativas práticas, até que toda a geometria da peça tenha o seu formato definido corretamente.

Nas figuras 7.1.1 e 7.1.2 estão apresentados o blanque teórico e o produto estampado dele obtido.

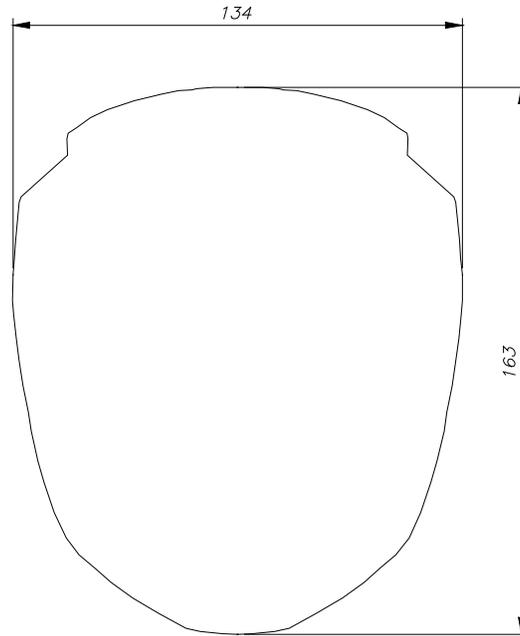


Figura 7.1.1 – Blanque teórico usado na primeira operação de estampagem



Figura 7.1.2 – Peça obtida na primeira operação de estampagem

O produto obtido foi desqualificado, pois observou-se excesso de material em regiões do blanque que causou sua ruptura, durante a passagem pela cavidade da matriz.

Além disso, a parte superior da peça, que ficará visível após a montagem, apresentou uma deformação excessiva dos furos previamente perfurados.

Para eliminar esse defeitos observados no produto obtido com o blanque teórico, propôs-se a criação de vazios no blanque para evitar o acúmulo de material e o conseqüente rasgamento da chapa durante o processo.

Também inseriu-se um recorte na parte superior do blanque para diminuir as forças de estiramento durante o processo, tentando assim diminuir as deformações nos furos. A figura 7.1.3 apresenta o novo blanque proposto e a figura 7.1.4 o produto com ele obtido.

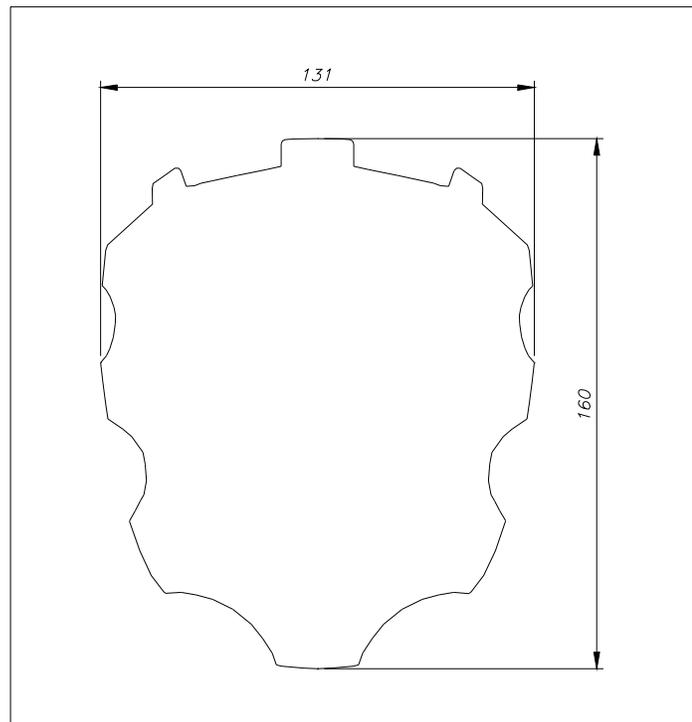


Figura 7.1.3 – Blanque corrigido usado na segunda operação de estampagem



Figura 7.1.4 – Peça obtida na segunda operação de estampagem

O produto obtido com esse segundo blanque também foi desqualificado, pois apesar do rasgamento ter sido praticamente eliminado, ainda observou-se um acúmulo de material em algumas regiões que se apresentaram amassadas.

Assim, os vazios no blanque tiveram de ser reposicionados e modificados.

A deformação dos furos diminuiu bastante, mas ainda encontrava-se fora das condições aceitáveis.

Deste modo, propôs-se o reposicionamento dos vazios e a alteração das suas geometrias, bem como a alteração dos recortes da parte superior.

As figuras 7.1.5 e 7.1.6 apresentam o novo blanque proposto e o produto com ele estampado.

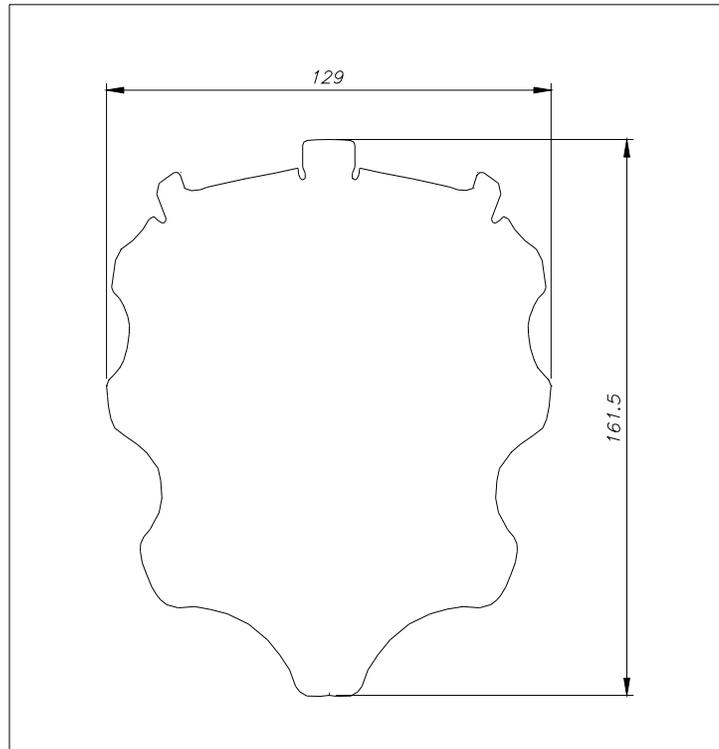


Figura 7.1.5 – Blanque corrigido novamente e usado na terceira operação de estampagem

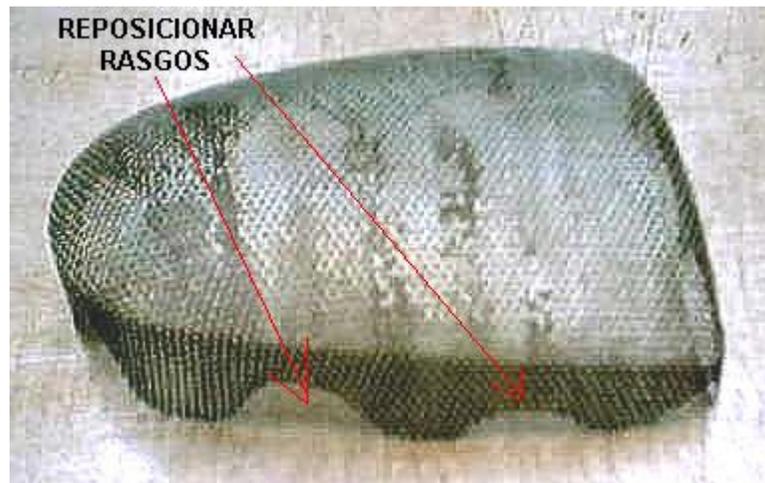


Figura 7.1.6 – Peça obtida na terceira operação de estampagem.

Como se observa na figura 7.1.6, o produto apresenta-se visualmente bom, mas ainda apresenta alguns pontos de excesso ou falta de material que devem ser corrigidos na geometria do blanche. Após as correções, o blanche mostrado na figura 7.1.7 qualificou a peça que aparece na figura 7.1.8

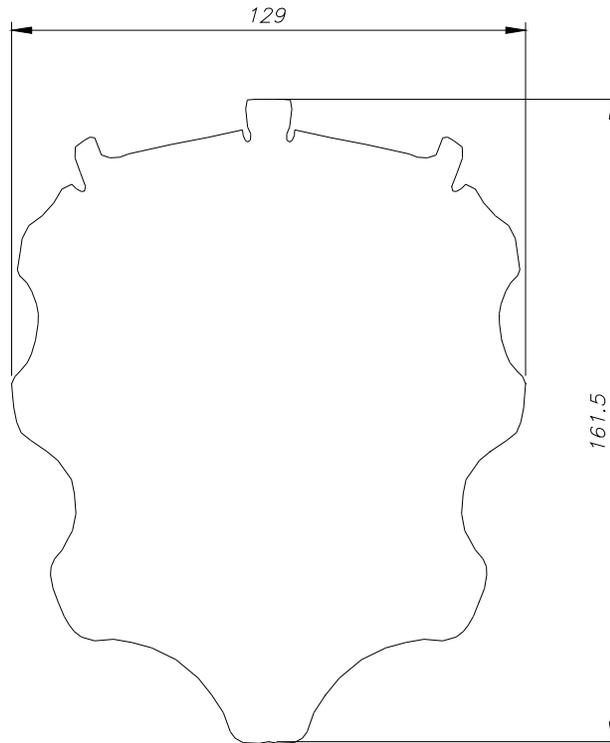


Figura 7.1.7 – Blanche corrigido novamente e usado na quarta operação de estampagem.

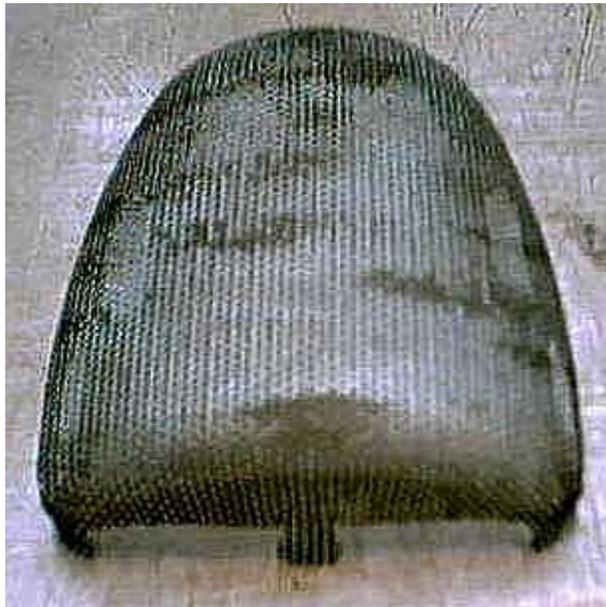


Figura 7.1.8– Peça qualificada obtida na quarta operação de estampagem.

A figura 7.1.8 apresenta o produto obtido com este novo blaque proposto e observa-se que o produto pode ser qualificado pois:

- Peça em condições de aprovação de processo.
- Blaque definido sem excesso ou falta de material.
- Dimensões dentro das tolerâncias especificadas.

## **7.2 Estampagem do lote piloto**

Duas dimensões de referência foram definidas para controle de fabricação da peça, em função da condição de montagem , como mostrado na figura 7.2.

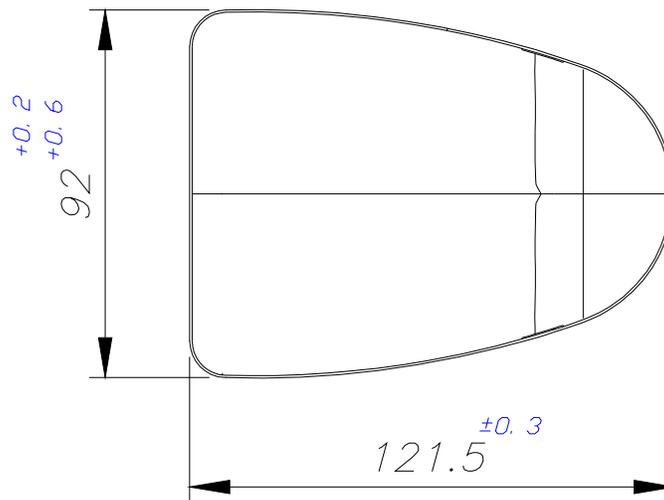


Figura 7.2.- Dimensões de controle do produto

A vida útil das ferramentas dependerá de quantas peças forem estampadas, mantendo-se as medidas dentro das tolerâncias especificadas. Caso o número de peças supere 20, assume-se que as ferramentas construídas atendem a condição de fornecimento do lote piloto.

A tabela 7.2 apresenta os resultados obtidos para as dimensões de 92 e 121,5 mm

Tabela 7.2 - Dimensões encontradas nas peças estampadas

PEÇA NÚMERO	DIMENSÃO (mm)	PEÇA NÚMERO	DIMENSÃO (mm)
1	92,5 X 121,5	11	92,4 X 121,8
2	92,5 X 121,6	12	92,4 X 121,7
3	92,4 X 121,6	13	92,6 X 121,8
4	92,6 X 121,5	14	92,4 X 121,6
5	92,4 X 121,6	15	92,6 X 121,6
6	92,6 X 121,7	16	92,4 X 121,8
7	92,4 X 121,6	17	92,6 X 121,6
8	92,2 X 121,6	18	92,6 X 121,7
9	92,5 X 121,5	19	92,6 X 121,8
10	92,5 X 121,6	20	92,7 X 121,7

As peças estampadas mantiveram-se dentro das tolerâncias indicadas, com exceção da número 20, que na dimensão de 92 mm apresentou um desvio de 0,1 mm acima do tolerado. Não é possível afirmar que este desvio foi causado pelo desgaste da matriz, já que foi uma ocorrência única no lote. Para confirmar este fato, seria necessário que o processo de estampagem fosse continuado, e as peças tivessem suas dimensões analisadas por um processo estatístico de controle.

Observou-se um desgaste localizado na matriz, resultado do acúmulo de material do blanque na formação da geometria da peça, durante a sua estampagem. Esse desgaste se apresenta como canais em pontos da cavidade da matriz (dois no total). Caso fosse necessário a continuidade do processo de estampagem, o poliuretano permite a condição de ser remoldado apenas nas regiões do desgaste, e posteriormente re-usinado. No caso de um ferramental convencional a matriz também estaria sujeita a esses esforços. Porém, a matriz de aço temperado teria resistência suficiente ao desgaste para suportá-los e não se desgastar naquela região.

### **7.3 Tempos envolvidos no processo**

#### **7.3.1 Matéria prima**

Os tempos de aquisição e entrega da matéria prima serão analisados em separado, porque essa etapa pode ocorrer em duas condições distintas:

1- placa pronta.

Neste caso, a empresa fornece o material a pronta entrega, com um dimensional padrão de 50 x 50 x 1520 mm. O inconveniente desta condição é não se poder comprar uma parte do material, tendo que encomendar a placa toda, às vezes sem a necessidade de sua total utilização.

2- moldagem das placas.

O material também é fornecido a pronta entrega, em um kit de resina + endurecedor + carga. As quantidades são determinadas pelo comprador, que irá se basear na massa necessária para moldar cada componente da ferramenta.

Tem-se que somar um tempo de 24 horas para a moldagem das placas, que envolverá os passos apresentados no ítem 7.7.2.

### **7.3.2 Tempos de fabricação com os processos de Ferramental Rápido e Ferramental Convencional**

Os processos de fabricação de peças pelos métodos convencional e ferramental rápido usados neste trabalho serão analisados a seguir em termos de tempos de fabricação, desde sua concepção até a liberação das ferramentas para a produção.

A tabela 7.3.2.1 apresenta os tempos envolvidos nas etapas de fabricação do ferramental rápido de estampagem e a tabela 7.3.2.2 apresenta os tempos envolvidos na fabricação do ferramental convencional.

Tabela 7.3.2.1- Etapas e tempos para fabricação do Ferramental Rápido

DESCRIÇÃO DE CADA ETAPA	TEMPO (horas)
1- Modelamento do produto em arquivo eletrônico de CAD 3D	3.0
2- Projeto e detalhamento do ferramental rápido baseando-se no dimensional e na geometria da peça.	4.0
3-Moldagem da placa matriz, bloco do punção e bloco do plaqueador, observando-se o tempo de cura em temperatura ambiente.	24.0
4- Preparação dos arquivos eletrônicos de CAM para usinagem da matriz, punção e plaqueador	5.0
5- Usinagem da matriz, punção e plaqueador	1.6
6- Montagem das peças do ferramental rápido em um conjunto de base e cabeçote	4.0
7- Definição teórica do blanque	2.0
8- Posicionamento dos localizadores do blanque sobre a matriz do ferramental rápido.	1.0
9- Estampagem da primeira peça, considerando-se o <i>setup</i> da máquina.	0.5
10- Correções.	6.0
11-Liberação do Ferramental Rápido para a produção.	-

Tabela 7.3.2.2- Etapas e tempos para fabricação do Ferramental Convencional

DESCRIÇÃO DE CADA ETAPA	TEMPO (horas)
1- Modelamento do produto em arquivo eletrônico de CAD 3D	3.0
2- Projeto e detalhamento do ferramental convencional baseando-se no dimensional e na geometria da peça.	40.0
3- Preparação dos arquivos eletrônicos de CAM para usinagem da matriz, punção e plaqueador	5.0
4- Usinagem CNC da matriz, punção e plaqueador	6.5
5- Usinagem das peças que compõem o conjunto da ferramenta.	195.0
6- Montagem das peças da ferramenta em um conjunto de base e cabeçote	42.0
7- Definição teórica do blanque	2.0
8- Posicionamento dos localizadores do blanque sobre a matriz da ferramenta.	1.0
9- Estampagem da primeira peça, considerando-se o <i>setup</i> da máquina.	0.5
10- Correções	6.0
11- Tratamento térmico de tempera e revenimento na matriz, punção e plaqueador.	6.0
12-Liberação do Ferramental Rápido para a produção.	-

As figuras 7.3.2.1 e 7.3.2.2 mostram os *lead times* dos processos de Ferramental Rápido e Ferramental Convencional, respectivamente, e foram obtidos a partir dos resultados das tabelas 7.3.2.1 e 7.3.2.2.

Como pode-se observar nessas tabelas e figuras, o tempo total de fabricação do Ferramental Rápido é bem menor do que o necessário para a fabricação do Ferramental Convencional, pois no primeiro caso tem-se um tempo total de 44,1 horas que representa cerca de 15% do tempo total para o ferramental convencional.

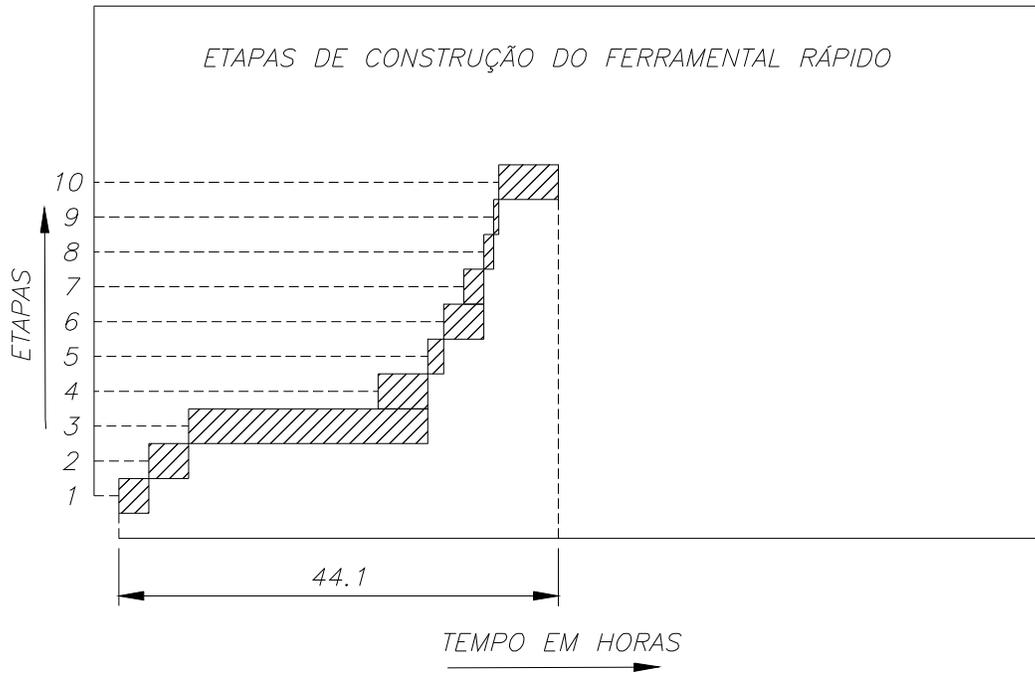


Figura 7.3.2.1 Lead Time para obtenção do Ferramental Rápido

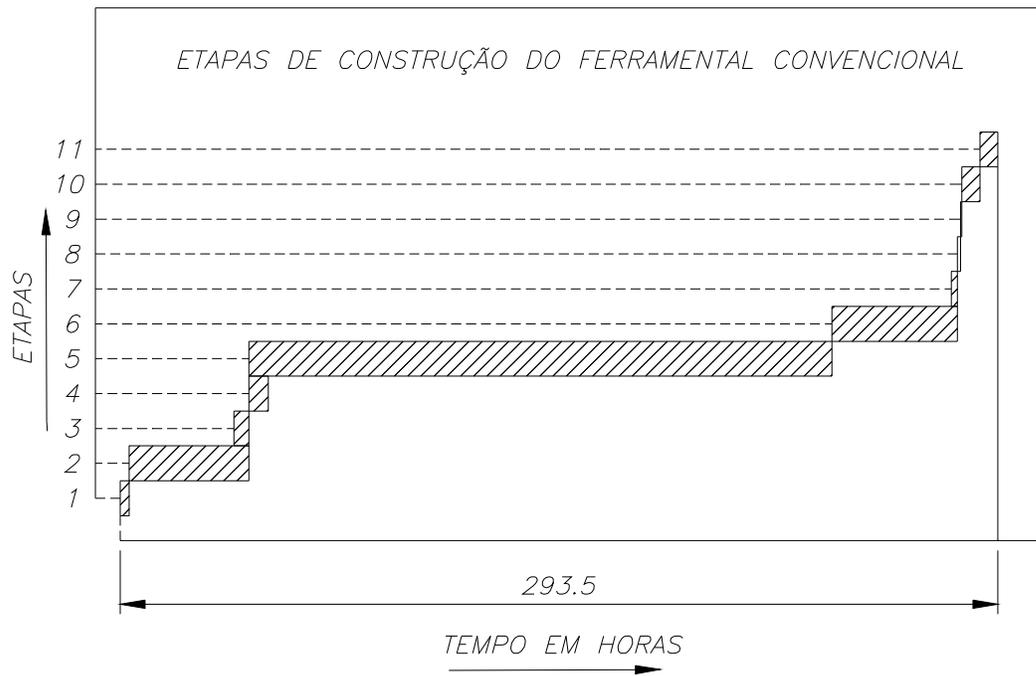


Figura 7.3.2.2 Lead Time para obtenção do Ferramental Convencional

## **7.4 Custos de fabricação dos ferramentais**

### **7.4.1 Ferramental Convencional**

Para determinação dos custos, fez-se a soma dos tempos de cada etapa dos processos, menos a etapa de usinagem CNC que foi cobrada a parte, e multiplicou-se por um valor fixo de custo hora, já que todas as operações foram executadas dentro do setor de ferramentaria. Este valor fixo foi o efetivamente pago pelo trabalho de usinagem e montagem da ferramenta.

Os valores aqui calculados para o ferramental rápido e o ferramental convencional, não podem ser comparados de forma direta, já que em cada caso, o número de peças que podem ser fabricadas, são bem diferentes. No caso do ferramental rápido, a quantidade de peças fabricadas foram de 20. No ferramental convencional, a expectativa de vida útil da ferramenta é para uma quantidade em torno de 500.000 peças.

Para que os valores possam ser atualizados, apresenta-se a cotação do dólar americano no câmbio turismo do dia do faturamento do serviço.

Total de horas (soma das etapas) = 300,5 horas \* R\$ 43,00 = R\$ 12.921,50

Usinagem CNC = R\$ 3250,00

Total gasto = R\$ 16.171,50

Valor do dólar em 03/11/2002 = R\$ 3,42

### **7.4.2 Ferramental Rápido**

Neste caso, o custo total é a soma do preço da matéria prima mais o custo da programação e usinagem CNC.

Matéria Prima = R\$ 345,00

Programação e Usinagem = R\$ 2080,00

Total = R\$ 2425,00

Como se pode observar comparando-se os custos totais para fabricação dos ferramentais, o ferramental rápido apresenta um custo bem menor que o do ferramental convencional, pois seu custo total (R\$ 2425,00) representa cerca de 15% do processo convencional.

Esses resultados obtidos para tempos de fabricação e custos demonstram a viabilidade da prototipagem rápida de ferramentais e sua importância para o aprimoramento do projeto do produto.

## Capítulo 8

### Conclusões e sugestões para outros trabalhos

#### 8.1 Conclusões

A partir da análise dos resultados obtidos durante o desenvolvimento do ferramental prototipado e dos ensaios de estampagem com esse ferramental, pode-se apresentar as seguintes conclusões:

1. A usinagem da resina de poliuretano mostrou-se de fácil execução, possibilitando a utilização de altas velocidades de corte, se compararmos com as mesmas peças feitas em aço, o que reduz sensivelmente os tempos de obtenção das peças acabadas (matriz, punção e plaqueador). Apesar da grande precisão dimensional, o custo da hora de usinagem em máquinas de CNC é um fator que pesa sensivelmente na composição dos gastos do ferramental rápido. Como existem outras alternativas para a construção do ferramental rápido, que não necessitam de operações de usinagem CNC, os custos envolvidos no processo podem ainda diminuir sensivelmente;
2. As peças feitas em resina de poliuretano, mostraram-se altamente resistentes às forças envolvidas no processo de estampagem. Os desgastes que surgiram após alguns ciclos foram localizados e não influenciaram na obtenção do lote proposto. Caso fosse necessário a continuidade do processo, o poliuretano permitiria uma remoldagem nos locais do desgaste, e uma posterior re-

usinagem, colocando a matriz novamente em condições de processo. O fato do produto ser estampado em chapa perfurada, também acentuou a aparição prematura do desgaste, visto que os vazios dos furos arrastavam parte do material da matriz. Produtos processados com chapa lisa devem manter a matriz em boas condições por um tempo maior;

3. Neste estudo, a peça teórica idealizada pelo engenheiro de produto, não previa vazios em seu contorno. Como o processo gera um acúmulo de material em algumas regiões, foi necessário criar vazios em locais não visíveis após a montagem, para acomodação do material durante a estampagem, obtendo-se assim o formato definitivo do blanque;
4. A peça ensaiada apresenta uma geometria relativamente complexa, o que criava algumas incertezas quanto a sua montagem. Mesmo mantendo-se dentro das tolerâncias dimensionais, sua forma era um ponto determinante para seu encaixe. Com a estampagem de produtos com o ferramental rápido foi possível analisar os testes necessários para a definição do processo de soldagem por ultra-som, que foi comprovado posteriormente à estampagem de peças com o ferramental convencional. Ressalte-se que somente uma peça representativa estampada em condições de processo poderia fornecer essas condições de análise, e isso foi conseguido com a estampagem do lote de 20 peças;
5. A rapidez com que o ferramental rápido pode disponibilizar peças em comparação com o processo convencional, é outro grande atrativo desse processo. Essa rapidez se mostra mais importante quando na fase de desenvolvimento do produto, quando se necessita de dados para a tomada de decisões referentes aos investimentos com ferramental, tolerâncias e formas das matrizes, além da viabilidade técnica no processamento do produto;

6. Considerando os aspectos positivos apresentados nas conclusões anteriores a respeito da facilidade de usinagem, do menor custo do ferramental, de sua boa resistência, da boa qualidade geral dos produtos estampados e da facilidade de avaliar sua montagem, pode-se afirmar que o processo de prototipagem rápida do ferramental de estampagem demonstrou ser viável sob esses aspectos, atingindo os objetivos propostos para este trabalho.

## **8.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como foi citado nas conclusões, problemas como o desgaste localizado poderiam não ter ocorrido se o produto estampado fosse de chapa lisa. Uma proposta na continuidade deste trabalho seria a de estampar um novo lote de peças para um outro produto metálico resultante da estampagem de chapas lisas.

Outra condição a ser analisada, seria a escolha de um processo de construção do ferramental rápido que não envolva usinagem CNC. Como a usinagem é o item mais importante na composição dos custos, a escolha de um processo que não necessite desta condição terá uma redução sensível de gastos, e mostrará qual a ordem de variação das tolerâncias na obtenção das matrizes, punções e peças que compõem o ferramental rápido. Esta abordagem pode ser feita utilizando um processo indireto de construção de ferramental rápido. Através de um dos sistemas de prototipagem rápida aqui descritos, as peças poderiam ser geradas como padrões, e posteriormente serem replicadas em um processo de moldagem utilizando também uma resina de poliuretano.

## **Referências Bibliográficas**

### **1- GARCIA, JEAN P. & CARVALHO, JONAS DE**

"Ferramental Rápido - Uma Nova Tecnologia no Desenvolvimento de Produtos"

IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

TCOB072, 2001, Curitiba, PR Brasil. CD-ROOM. Apud NAKAGAWA, T. Advances in Prototype and Low Volume Sheet Forming and Tooling, p. 1-2

### **2- NAKAGAWA, T.**

"Advances in Prototype and Low Volume Sheet Forming and Tooling."

IN: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY.

1998, p. 244-250

### **3- YARLAGADDA, PRASAD K. D. V.**

**YLYAS, ISMET P.**

**CHRISTODOULOU, PERIKLIS**

"Development of rapid tooling for sheet metals drawing using nickel electroforming and stereolithograph processes"

IN: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY.

111, 2001, Australia, p. 286-294

**4- EARY, DONALD F.**

**EDWARD, A. REED**

"Techniques of Pressworking Sheet Metal"

Second Edition, New Jersey, USA: Printice Hall, Inc., 1974, p. 492,529.

**5A- ROSSI, MARIO**

"Estampado en Frio de La Chapa"

9ª Edição, Barcelona, Espanha : HOEPLI Editorial Cientifico e medico, 1971, Cap. 2 - Punzonado o Corte de La Chapa, p. 24-25.

**5B- ROSSI, MARIO**

"Estampado en Frio de La Chapa"

9ª Edição, Barcelona, Espanha : HOEPLI Editorial Cientifico e medico, 1971, Cap. 4 - Embutido, Estirado, Extrusion, p. 84-102

**5C- ROSSI, MARIO**

"Estampado en Frio de La Chapa"

9ª Edição, Barcelona, Espanha : HOEPLI Editorial Cientifico e medico, 1971, Cap. 1 - Procedimentos de Fabricacion, p. 5-9.

**6- SCHULER, ALTAN T. (EDITOR)**

"Metal Forming Handbook"

Springer-Verlag, Berlin Heldelberg, 1998

**7- VOELKNER, W.**

"Present and Future Developments of Metal Forming Selected Examples"

IN: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY

106, 2000, p. 236-242.

**8- ROSOCHOWSKI, A.**

**MATUSZAK, A.**

"Rapid Tooling: The State of the Art"

IN: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY

106, 2000, p. 191-198.

**9- ROZENFELD, HENRIQUE**

**AMARAL, DANIEL CAPALDO**

**TOLEDO, JOSÉ CARLOS DE**

**CARVALHO, JONAS DE**

“ O Processo de Desenvolvimento de Produto”

FÁBRICA DO FUTURO, p.62, Extraído da revista PS- Edição de Dezembro de 2000.

**10-MÜLLER, H.**

**SLADOJEVIC, J.**

"Rapid Tooling Approaches For Small Lot Production of Sheet Metal Parts"

IN: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY

115, 2001, p. 97-103.

**11-WOHLERS, T.**

"Rapid Prototyping & Tooling"

Word Wide Progress Report,Colorado, USA, 1998

**12- CHO, INHAENG**

**LEE, KUNWOO**

**CHOI, WON CHEOL**

**SONG, YONG-AK**

"Development of a new sheet deposition type rapid prototyping system"

IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS & MANUFACTURE

40, 2000, Seoul, Korea, p. 1813- -1829.

**13- CIMJECT ON LINE**

"Laboratório de Projeto e Fabricação de Componentes de Plástico Injetados"

Disponível em <<http://www.cimject.ufsc.br>>

Acesso em 20 de janeiro de 2001.

**14- FERNANDES, JOSÉ MANOEL**

“Estudo de Fabricação de Latas em Folhas de Flandres pelo processo de Embutimento Profundo e Estiramento”

1998, Campinas, Brasil , p. 16.

**15-UMARAS, JOSÉ**

"Tecnologia de Estampagem"

Editora Técnica Piping, Ltda, 1ª Edição V1,1979 São Paulo, Brasil, p. 1-35.

**16- HARSCH, ERICH**

**VIEHWEGER, BERND**

“Universal Tryout Presses”

Werkstatt und Betrieb, 130, 1997

### **17- VANTICO**

“Curso Básico de Resinas para Modelação, Ferramentaria e Prototipagem Peças em Minutos”  
São Paulo, Brasil, p.11 a , 2001

### **18- AGILTEC ENGENHARIA E TECNOLOGIA**

Disponível em <[http://www.agiltec.pt/portugues/id/engenharia\\_produto/estereolitografia.htm](http://www.agiltec.pt/portugues/id/engenharia_produto/estereolitografia.htm)>  
Acessado em 20 de Agosto de 2002