



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

UTILIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS CAD/CAM PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DO ALUMÍNIO SÉRIE 1000

Jovani Castelan

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2007



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

UTILIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS CAD/CAM PARA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DO ALUMÍNIO SÉRIE 1000

Jovani Castelan

Trabalho realizado no LdTM - Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2007

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Nestor César Heck (PPGEM/UFRGS)

Prof. Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (Escola de Engenharia/UFRGS)

Prof. Dr. Márcio Roberto da Rocha (UNESC)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Dedico a Gabriel e Daniela, pelo apoio, paciência e motivação.

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste Trabalho, o meu reconhecimento. Ao Professor Dr. Lírio Schaeffer, pelo estímulo, dedicação e atenção; ao LdTM e à Faculdade SATC pelo apoio logístico e tecnológico; ao CNPq pelo apoio ao projeto de estampagem incremental no Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM/UFRGS.

E ao colega Anderson Daleffe pelo apoio técnico, pelas sugestões e observações valiosas.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS | VII |
| LISTA DE TABELAS | IX |
| LISTA DE ABREVIATURAS..... | XIV |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XV |
| RESUMO | XVI |
| ABSTRACT | XVII |
| OBJETIVOS..... | XVII |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 18 |
| 2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL..... | 19 |
| 2.1.1 Aplicações e Características | 19 |
| 2.1.2 Descrição do Processo..... | 20 |
| 2.1.3 Parâmetros Essenciais da Estampagem Incremental..... | 22 |
| 2.1.4 Estampagem Incremental com Ponto Simples (SPIF)..... | 23 |
| 2.1.5 Limitações do Processo Relacionadas à Geometria das Peças..... | 23 |
| 2.1.6 Limitações do Processo Relacionadas ao Alumínio..... | 26 |
| 2.1.7 Aplicações Industriais da ISF:..... | 29 |
| 2.2 Parâmetros Observados em Experimentos Práticos | 30 |
| 2.3 Estudos de Caso..... | 31 |
| 2.3.1 Conformidade Geométrica | 31 |
| 2.3.2. Estratégias de Deslocamento de Ferramenta..... | 34 |
| 2.3.3 Medição de Força Aplicada..... | 36 |
| 2.3.4 Desenvolvimento do Dispositivo para Estampagem Incremental..... | 38 |
| 3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL..... | 40 |
| 3.1 Projeto do Ferramental | 40 |
| 3.2 Fabricação do Dispositivo para Estampagem Incremental..... | 41 |
| 3.3 Equipamentos de Medição e Simulação..... | 42 |
| 3.4 Tipos de Ferramentas utilizadas nos testes..... | 42 |
| 3.5 Máquina..... | 43 |
| 3.6 Software CAM..... | 43 |
| 3.7 Metodologia de Simulação Física | 45 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4 | CARACTERIZAÇÃO DO BLANK | 48 |
| 4.1 | Ensaio de Tração | 48 |
| 4.2 | Curva Tensão em Função da Deformação..... | 48 |
| 4.3 | Curvas de Escoamento..... | 50 |
| 4.4 | Análise Química e Metalográfica | 51 |
| 5 | ensaios mecânicos de Estampagem | 53 |
| 5.1 | Setup do Dispositivo..... | 53 |
| 5.2 | Matéria-prima (<i>blank</i>)..... | 54 |
| 5.3 | Teste de Estampagem N° 01 | 54 |
| 5.3.1 | Análises Preliminares | 57 |
| 5.3.2 | Resultados..... | 62 |
| 5.4 | Teste de Estampagem N° 02:..... | 62 |
| 5.5 | Teste de Estampagem N° 03:..... | 64 |
| 5.6 | Resumo dos Testes de Estampagem..... | 64 |
| 5.7 | Testes de Estampagem Variando a Forma Geométrica das Peças | 70 |
| 5.8 | Testes de Estampagem Variando o Diâmetro das Ferramentas | 71 |
| 6 | CONCLUSÕES | 76 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE ESTAMPAGEM INCREMENTAL | 78 |
| 8 | SUGESTÕES | 80 |
| 9 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |
| | ANEXO 1: DESENHOS DO DISPOSITIVO PARA ISF | 84 |
| | ANEXO 2:RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO | 85 |
| | ANEXO 3:DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOFTWARE CAM | 87 |
| | ANEXO 4:CÁLCULOS DOS CUSTOS POR PEÇA..... | 92 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: diferentes configurações de ISF..... | 20 |
| Figura 2: estampagem incremental realizada em um centro de usinagem | 21 |
| Figura 3: estampagem incremental com ponto de apoio | 21 |
| Figura 4: variações da ISF..... | 22 |
| Figura 5: estampagem com ponto simples..... | 23 |
| Figura 6: ângulo máximo de parede | 24 |
| Figura 7: equação dos senos | 25 |
| Figura 8: variação da inclinação do blank | 26 |
| Figura 9: curvas tensão x deformação para aço doce e aAlumínio | 27 |
| Figura 10: aplicações recentes da ISF..... | 29 |
| Figura 11: aplicações médicas da ISF | 30 |
| Figura 12: aplicações artísticas da ISF..... | 30 |
| Figura 13: seção longitudinal da chapa solar..... | 32 |
| Figura 14: altura da crista..... | 32 |
| Figura 15: erros de geometria..... | 33 |
| Figura 16: estratégias de ferramenta | 34 |
| Figura 17: trajetória gerada em sistema CAM | 35 |
| Figura 18: estratégias de usinagem..... | 36 |
| Figura 19: gráfico de força em função do tempo..... | 37 |
| Figura 20: modelo CAD de peça | 38 |
| Figura 21: conceito inicial do dispositivo prensa-chapas | 38 |
| Figura 22: projeto de dispositivo para estampagem incremental..... | 41 |
| Figura 23: dispositivo para estampagem incremental | 42 |
| Figura 24: ferramenta de estampagem..... | 43 |
| Figura 25: constant cusp finishing | 45 |
| Figura 26: projeto da peça a ser estampada..... | 46 |
| Figura 27: fluxo CAD/CAM/CNC | 47 |
| Figura 28: dimensões do corpo de prova..... | 48 |
| Figura 29: curvas de tensão em função da deformação..... | 49 |
| Figura 30: curvas de escoamento obtidas nos ensaios de tração..... | 50 |
| Figura 31: curvas de escoamento típicas de alumínio série 1000 | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 32: análise metalográfica do alumínio laminado | 52 |
| Figura 33: montagem do prensa chapas na maquina CNC..... | 54 |
| Figura 34: peça estampada | 55 |
| Figura 35: medição da chapa conformada..... | 56 |
| Figura 36: ferramenta de estampagem incremental..... | 56 |
| Figura 37: grade de círculos para a análise de visioelasticidade..... | 57 |
| Figura 38: tipos de deformação de chapas metálicas | 59 |
| Figura 39: nova ferramenta utilizada no ensaio..... | 63 |
| Figura 40: simulação CAM | 65 |
| Figura 41: gráfico da velocidade de avanço em função do tempo | 67 |
| Figura 42: gráfico da velocidade de avanço em função da rugosidade..... | 67 |
| Figura 43: variação do tempo em função do incremento vertical | 68 |
| Figura 44: variação da rugosidade em função do incremento vertical..... | 68 |
| Figura 45: ângulos de parede..... | 70 |
| Figura 46: peça estampada com ângulo de parede de 65°. | 71 |
| Figura 47: gráfico ferramenta em função do tempo | 72 |
| Figura 48: cotas radiais das ferramentas..... | 73 |
| Figura 49: gráfico de rugosidade em função do diâmetro das ferramentas..... | 74 |
| Figura 50: viabilidade econômica da ISF | 77 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: estratégias de ferramenta.[9]..... | 34 |
| Tabela 2: características da máquina CNC utilizada nos testes práticos..... | 43 |
| Tabela 3: análise química | 51 |
| Tabela 4: testes de estampagem | 66 |
| Tabela 5: valores de rugosidade de acordo com os diâmetros de ferramenta | 74 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-------|---|
| 3D | Três dimensões |
| CAD | Computer Aided Design |
| CAM | Computer Aided Manufacturing |
| CNC | Comando Numérico Computadorizado |
| ISF | Incremental Sheet Forming |
| LdTM | Laboratório de Transformação Mecânica |
| SATC | Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina |
| SPIF | Single Point Incremental Forming |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-----------------------------------|----------------------|--|
| α | [°] | Ângulo de parede de chapa na estampagem |
| E | [N/mm ²] | Módulo de elasticidade |
| R_0, R_{45}, R_{90} | | Índice de anisotropia segundo a direção da laminação |
| φ | | Deformação verdadeira |
| σ | [N/mm ²] | Tensão de escoamento convencional |
| $\sigma_{z,y,x}$ | [N/mm ²] | Tensões nas direções z , y e x |
| σ_{eq} | [N/mm ²] | Tensão equivalente |
| kf | [N/mm ²] | Tensão de escoamento em função da deformação |
| l | [mm] | Alongamento do corpo de prova no ensaio de tração |
| Δl | [mm] | Variação do comprimento |
| l_0 | [mm] | Comprimento inicial do corpo de prova |
| l_1 | [mm] | Dimensão final do corpo de prova, na direção do estiramento |
| l_2 | [mm] | Dimensão final do corpo de prova, transversal ao estiramento |
| a_p | [mm] | Passo vertical |
| $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ | | Deformações principais |
| F_x, F_y, F_z | [N] | Força de conformação em cada eixo ortogonal |
| S_0 | mm ² | Área inicial da seção da chapa |
| S_1 | mm ² | Área final da seção da chapa |
| d_0 | [mm] | diâmetro inicial do círculo de visioelasticidade |
| a | [mm] | diâmetro final transversal do círculo de visioelasticidade |
| b | [mm] | diâmetro final longitudinal do círculo de visioelasticidade |
| R_z | [μm] | Rugosidade média |
| t | [mm] | Espessura da chapa |
| t_0 | [mm] | Espessura inicial da chapa |
| t_1 | [mm] | Espessura final da chapa |

RESUMO

Este trabalho descreve a adaptação de um equipamento CNC e ferramentas computacionais CAD/CAM (desenvolvidas originalmente para a área de usinagem) na conformação de chapas de alumínio comercialmente puro, através do processo de estampagem incremental. Através das simulações e dos testes reais foi possível obter resultados práticos, relativos às limitações geométricas e ao acabamento superficial. As peças conformadas têm o formato básico de um tronco de cone, onde foram alterados a profundidade e o ângulo do cone. A análise dimensional das peças, comparadas com seu respectivo modelo CAD revelou razoável conformidade geométrica. Por outro lado, ângulos de parede maiores que 65° causaram o rompimento da chapa. As estampagens foram realizadas em um centro de usinagem, e utilizaram-se como valores máximos a velocidade de avanço de 2.200 mm/min e o incremento vertical de 1mm, por questões de segurança e também pela constatação de problemas de acabamento superficial e de vibrações excessivas do equipamento. Como conclusão final, foi demonstrado que, para o tipo específico de peça (material, espessura e geometria), dispositivo prensa-chapas, ferramentas, equipamento CNC e softwares utilizados, o processo de estampagem incremental seria viável para lotes de até 600 peças.

Palavras-chave: CAD, CAM, Estampagem Incremental

ABSTRACT

This paper describes the adaptation of a CNC equipment and CAD/CAM computational tools (originally developed for the machining area) on the conformation of sheets of commercially pure aluminum, through the process of incremental forming. Through simulations and tests were unable to get practical results, for the geometric constraints and surface finishing. Forming parts have the basic format of a truncated cone, which have changed the depth and angle of the cone. A dimensional analysis of the parts, compared with their CAD model showed geometric reasonable compliance. Moreover, the wall angles greater than 65° caused the breaking of the plate. The sheets formings were performed in a machining center, with a maximum speed of advance of 2,200 mm/min and the vertical increase of 1mm, for reasons of safety and also for finding finishing surface problems and the excessive vibration equipment. As final conclusion, it was demonstrated that, for the specific type of piece (material, thickness and geometry), device-press plates, tools, CNC equipment and software used, the process of incremental sheet forming feasible for batches of up to 600 pieces.

Keywords: CAD, CAM, Incremental Sheet Forming

OBJETIVOS

Geral:

Esta dissertação visa o estudo, pesquisa e realização de testes práticos de Estampagem Incremental de chapas, utilizando e adaptando as tecnologias CAD, CAM e CNC, (originalmente desenvolvidas para a área de usinagem) no projeto, desenvolvimento e execução de produtos manufaturados a partir de chapas metálicas de alumínio série 1000. O objetivo básico é conhecer o processo, suas limitações, variações e aplicações industriais, buscando desenvolver uma tecnologia que seja, ao mesmo tempo, técnica e economicamente viável .

Específicos:

- Definir valores relacionados à tecnologia de usinagem, adaptados para o processo de estampagem incremental, a fim de obter a melhor combinação entre acabamento superficial, conformidade geométrica e tempo utilizado para a estampagem de chapas de alumínio, obtendo um panorama de viabilidade técnica-econômica
- Obter peças através da estampagem incremental, variando formas geométricas, dados tecnológicos e ferramentas;
- Utilizar e adaptar recursos de softwares CAD e CAD/CAM para o projeto e fabricação de peças estampadas incrementalmente;
- Utilizar e adaptar centro de usinagem CNC para o processo de estampagem incremental.

1 INTRODUÇÃO

As chapas metálicas têm grande aplicação industrial, sendo utilizadas na fabricação dos mais diversos tipos de produtos. Além da área automobilística, onde sua presença é notória, aplicam-se chapas na manufatura de recipientes metálicos em geral e embalagens de produtos destinados a consumidores finais, tais como latas de bebidas e também de alimentos sólidos. Na área de calderaria, as chapas são utilizadas na construção de tanques, carcaças de proteção de equipamentos eletromecânicos e silos de armazenamento. Há ainda outras aplicações importantes, como a indústria médica, para a confecção de próteses, indústria naval e o setor de utensílios domésticos.

Para atingir a demanda de alto volume de produção, a qual requer baixos tempos e custos de produção, a indústria iniciou a manufatura de chapas utilizando prensas. Entretanto, a desvantagem deste processo é que, para cada novo produto é necessário fabricar o ferramental especial, no qual a chapa será conformada. Os custos para produção deste tipo de ferramental são muito altos, resultando em produtos finais caros. Assim, a conformação de chapas através de prensas é apropriada somente para altos volumes de produção. [1]

Neste trabalho são apresentadas pesquisas, estudos, simulações e experimentos práticos relacionados à estampagem incremental de chapas. Diferentemente da estampagem tradicional, onde a transformação da chapa plana em produto final é feita em poucas ou mesmo em uma única etapa, utilizando moldes e matrizes específicos para cada formato, a estampagem incremental executa a deformação em múltiplos passos, utilizando ferramental de geometria simples e genérica, podendo ser adaptado para a execução de formatos variados, tanto básicos quanto complexos. Entende-se por ferramental todos os dispositivos mecânicos e eletrônicos e também as ferramentas computacionais utilizadas originalmente para outros processos e que são adaptáveis à estampagem incremental. Assim, busca-se determinar as configurações e parâmetros ideais deste ferramental, a fim de proporcionar a viabilidade técnica e econômica do processo. Inicialmente é feita uma pesquisa do estado atual do conhecimento na área de estampagem incremental e suas modalidades específicas.

Nos anos recentes, na área da conformação mecânica, mais precisamente no ramo de estampagem, novos processos foram desenvolvidos visando basicamente a redução dos custos

de manufatura e o tempo de desenvolvimento de novos produtos, quando séries limitadas para testes de utilização e protótipos físicos necessitam ser produzidos. No caso particular da estampagem incremental, patenteada em 1967, foram realizadas várias pesquisas visando sua aplicação comercial, tanto para a construção de protótipos e peças especiais como também para produção de itens seriados. O processo é baseado na idéia de utilizar um equipamento CNC, originalmente concebido para a usinagem de metais, para realizar a conformação de chapas [2].

A estampagem incremental de chapas – *ISF: Incremental Sheet forming* – é um moderno e inovador processo de conformação o qual oferece economia significativa e vantagens relacionadas a flexibilidade de produção e ao meio ambiente, sobretudo para pequenas escalas de produção e para produção customizada (sob medida) de produtos derivados de chapas metálicas. Consiste na conformação de uma geratriz, empregando um pequeno punção comandado por um equipamento CNC, que vai conformando aos poucos a peça através de pequenas deformações. [3 e 9]

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os processos de deformação plástica são definidos e classificados conforme suas características técnicas e aplicações. O forjamento, a extrusão, perfilagem, trefilação, laminação e a calandragem são exemplos de processos de deformação plástica. As duas maiores e mais importantes aplicações da estampagem estão na indústria automobilística e na indústria aeronáutica. Mas vários outros tipos de produtos também são obtidos através deste processo. As indústrias naval, de eletro-eletrônicos, utensílios domésticos, industriais e hospitalares também tem na estampagem seu principal processo de fabricação.

O termo ‘estampagem’ generaliza várias operações de manufatura realizadas em chapas de metal, onde sempre ocorrerão alterações na sua forma geométrica, produzindo dobras, cavidades, saliências, cunhas e furos. Todas estas deformações são realizadas no estado sólido, onde o material é escoado em regime plástico. Tem-se na estampagem um grande aproveitamento da matéria-prima, com reduzido desperdício e geração de sobras de material, diferentemente de outros processos como, por exemplo, a usinagem [4].

A *ISF – Incremental Sheet Forming* – estampagem incremental de chapas, é um processo de conformação inovador, o qual é capaz de produzir chapas de geometria complexa, utilizando a tecnologia CNC já amplamente difundida nos meios de manufatura dos metais. Apresenta como principais vantagens: a) baixos custos de preparação de máquina; b) utilização de maquinário CNC três eixos comum; c) grande flexibilidade, já que novos produtos são obtidos alterando-se apenas o seu modelo CAD, permitindo assim a produção de pequenos lotes [5].

Um dos grandes entraves à aplicação industrial da ISF está relacionado à exatidão entre o modelo CAD e a peça real, devido a deformações elásticas que ocorrem no processo. Existem recursos que compensam este efeito, mas que podem variar muito, dependendo da complexibilidade geométrica do produto, necessitando sua correção e ajuste. Em sistemas de ISF que utilizam ferramenta inferior (com cavidade ou saliência), o formato desta já está corrigido, levando em consideração as deformações elásticas que ocorrem durante a estampagem (*spring back*). Contudo, a utilização de ferramentas-suporte onera o processo, e uma dos principais promessas da ISF é o baixo custo do ferramental [1].

Estudos recentes que analisaram a viabilidade técnica-comercial, demonstraram que a precisão dimensional do produto final é um importante fator de limitação desta tecnologia de conformação. Dessa forma, pesquisas futuras devem ser realizadas neste sentido [6].

2.1 Estampagem Incremental

2.1.1 Aplicações e Características

Devido à grande flexibilidade da ISF, se torna viável sua aplicação a pequenos lotes de produção e até mesmo a lotes de peças individuais, já que o custo do ferramental utilizado na estampagem incremental é bem menor do que o normalmente utilizado nos processos de estampagem tradicionais.. Considerando que a estampagem pode ser realizada com matriz bastante simplificada ou mesmo sem matriz, com apenas uma ferramenta de conformação (SPIF – *single point incremental forming*: estampagem de ponto simples), o processo também se torna viável para prototipagem rápida e também para trabalhos artísticos, compostos geralmente por peças unitárias. Há ainda, aplicações desenvolvidas recentemente para chaparia automobilística e processos de estampagem incremental utilizando jato de água[1].

Além da flexibilidade e a utilização de ferramental de baixo custo, pode-se verificar ainda outras vantagens. A estampagem incremental de ponto simples proporciona economia de energia, em relação ao consumo das máquinas de tradicionais de estampagem. Por outro lado, como as máquinas para ISF (tanto equipamentos originais quanto centros de usinagem adaptados) tem dimensões bem menores que os equipamentos tipicamente utilizados para estampagem, alterações no layout fabril são mais fáceis de serem realizadas, assim como o transporte destes equipamentos para pontos mais distantes, até para uma unidade fabril da empresa, por exemplo.

As variações da estampagem incremental se baseiam na quantidade de pontos de apoio ou de ferramentas utilizadas. Além da estampagem de ponto simples, que utiliza uma ferramenta que executa movimentos de translação e rotação, existe a estampagem com uma ferramenta de forma geométrica simples e estacionária, posicionada sob a chapa. Existem ainda os processos que fazem uso de matrizes positivas ou negativas, posicionadas também sob a chapa, que irão dar forma ao produto final, como pode ser visto na figura 1.

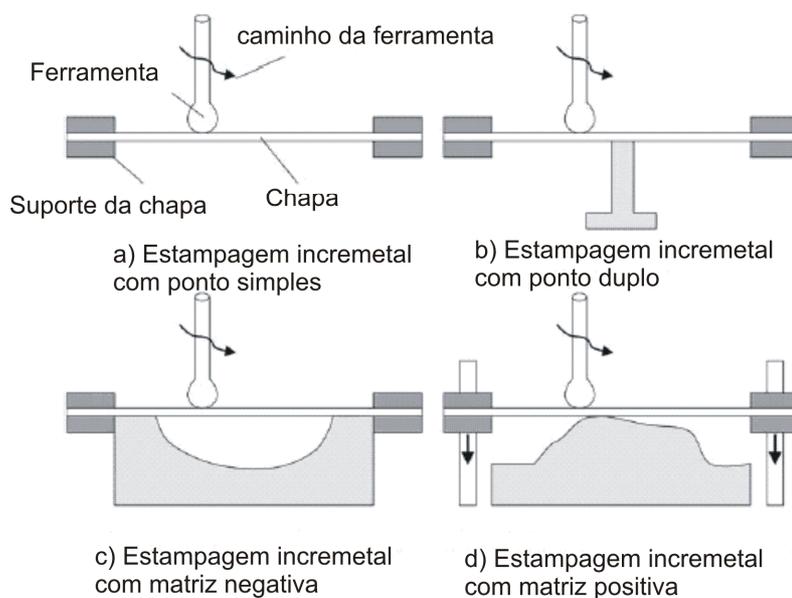


Figura 1: diferentes configurações de ISF.

(a) Ponto simples – sem apoio inferior; (b) ponto duplo – com apoio; (c) ferramenta inferior com cavidade; (d) ferramenta inferior com saliência [17].

2.1.2 Descrição do Processo

O processo apresenta a chapa (*blank*) a ser conformada em formato retangular (independente da forma da chapa final), com espessura variando entre 0,7 e 1,5mm, dependendo do tipo de material e suas características mecânicas. Esta chapa é presa em um dispositivo móvel, deslizando paralelamente ao eixo Z de um sistema CNC (eixo vertical). Elementos de fixação evitam que a chapa se movimente, enquanto a estampagem estiver acontecendo, criando assim uma deformação plástica na chapa. Essa deformação plástica é gerada por uma ferramenta rotativa, acoplada ao eixo árvore de um dispositivo CNC, que inicia o processo de ISF deslizando sobre a superfície da chapa e vai, gradativamente, através de incrementos verticais negativos, realizando a conformação. Este processo é chamado de “ponto simples” (figura 1a), sendo este ponto determinado pela ferramenta rotativa de conformação [6].

Embora existam equipamentos específicos para a ISF, pode-se utilizar máquinas CNC (Centros de Usinagem) para executar a estampagem incremental, em suas diversas modalidades. Na figura 2, temos um exemplo de utilização de um Centro de Usinagem para a estampagem de chapas.



Figura 2: estampagem incremental realizada em um centro de usinagem [18]

Outro processo é o de “ponto duplo” formado por um ponto de apoio (figura 3), colocado no sentido oposto ao da ferramenta que, através do movimento sincronizado (interpolação linear) do incremento vertical (Z) da ferramenta, com movimentos XY da mesa do dispositivo CNC, dá forma ao produto final [1 e 4].

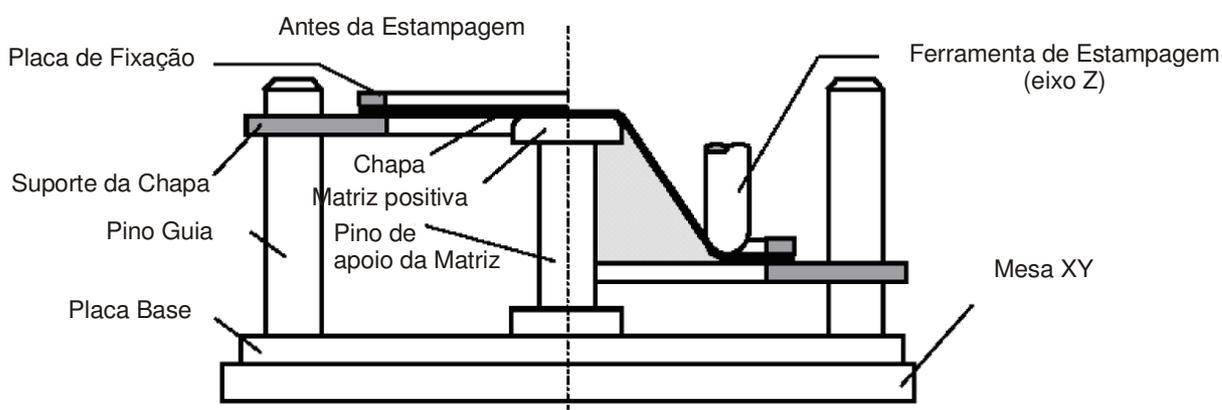


Figura 3: estampagem incremental com ponto de apoio [6].

No caso da estampagem utilizando ponto simples, a ferramenta entra em contato com a parte interna da chapa, gerando incrementalmente uma cavidade cônica. Neste processo, a geometria é gerada exclusivamente pela trajetória da ferramenta, gerando produtos com formas simétricas. Já na estampagem com ponto duplo, a matriz positiva, colocada abaixo da chapa, também é responsável pela determinação da forma geométrica final da chapa, como pode ser visto na figura 4.

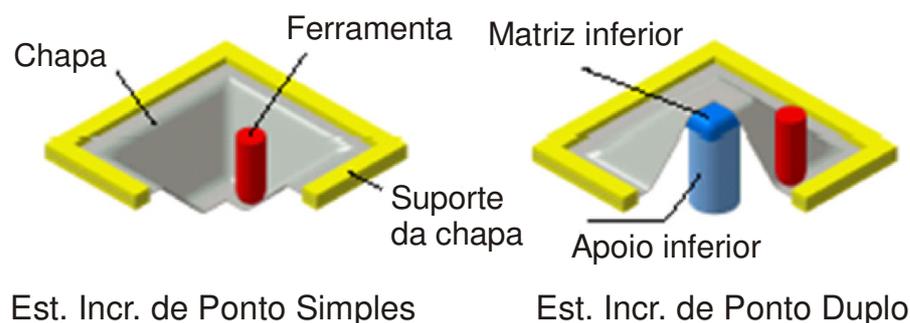


Figura 4: variações da ISF [6].

2.1.3 Parâmetros Essenciais da Estampagem Incremental

Existem vários parâmetros essenciais relacionados à ferramenta de estampagem, à chapa utilizada na conformação, às características técnicas do equipamento CNC, aos valores de translação dos eixos X, Y e Z (e rotação no caso do eixo Z), às configurações do software CAM e ao tipo de lubrificante utilizado.

Com relação a ferramenta de estampagem, é necessário definir seu tamanho (diâmetro), seu formato e seu material. A combinação destes dados interfere no tempo de manufatura, no acabamento superficial e nas limitações geométricas do produto final. O material da chapa e sua espessura definem as limitações do processo de estampagem, de acordo com suas características mecânicas de conformabilidade. A quantidade de força aplicada pelo conjunto “cabeçote-cone-ferramenta” na deformação incremental da chapa é um limitador e deve ser controlado e medido para que não cause danos ao equipamento. A velocidade radial (RPM) do eixo Z e velocidade linear (mm/min) dos três eixos também exerce influência no acabamento superficial e no tempo de manufatura. A estratégia do caminho da ferramenta e seu passo vertical (profundidade de estampagem), definidos no software de CAM interferem no tempo, acabamento e acuidade geométrica do produto final. A existência ou não de lubrificação e qual o tipo de lubrificante utilizado produzem alterações na temperatura da chapa e da ferramenta, na rugosidade superficial da chapa e no desgaste da ferramenta[1].

2.1.4 Estampagem Incremental com Ponto Simples (SPIF)

Nesta modalidade, a ferramenta base, disposta na parte inferior do conjunto de estampagem é eliminada e somente a ferramenta presa ao eixo árvore entra em contato com a chapa. O princípio do método é mostrado na figura 5 abaixo:

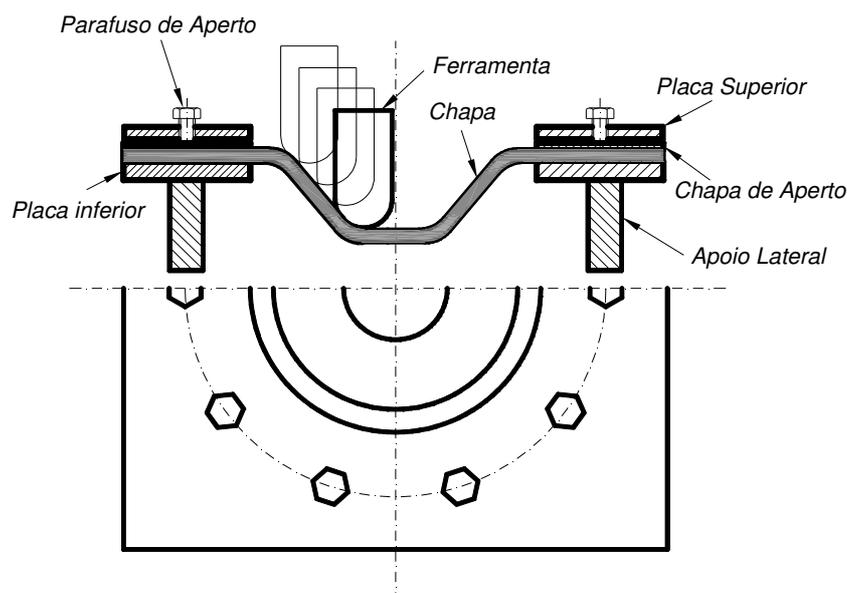


Figura 5: estampagem com ponto simples.

Com a estampagem incremental de ponto simples é possível obter peças com simetria axial, com ferramentas de perfil simples e dispositivo prensa-chapa fixado na mesa do centro de usinagem CNC. Esta foi a modalidade utilizada no projeto de dissertação.

2.1.5 Limitações do Processo Relacionadas à Geometria das Peças

Assim como em outros processos de conformação (forjamento, estampagem convencional), existem valores máximos de ângulos que definem certas regiões da peça, a fim de que seja possível a sua manufatura. No caso da ISF, estudos recentes apontam para um ângulo máximo de parede de chapa de 65° [1], conforme ilustrado na figura 6. Ultrapassando este valor, se torna muito freqüente a ruptura ou, no mínimo, uma diminuição drástica da espessura da chapa, causando uma baixa resistência mecânica localizada.

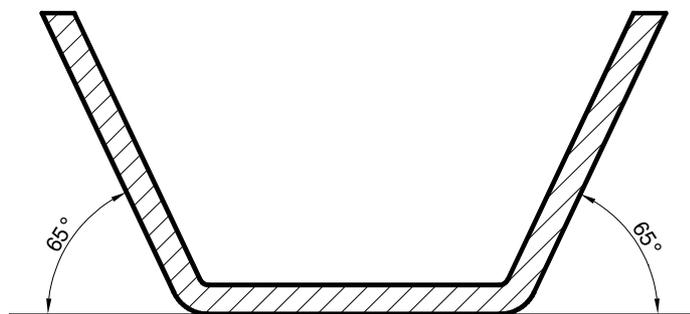
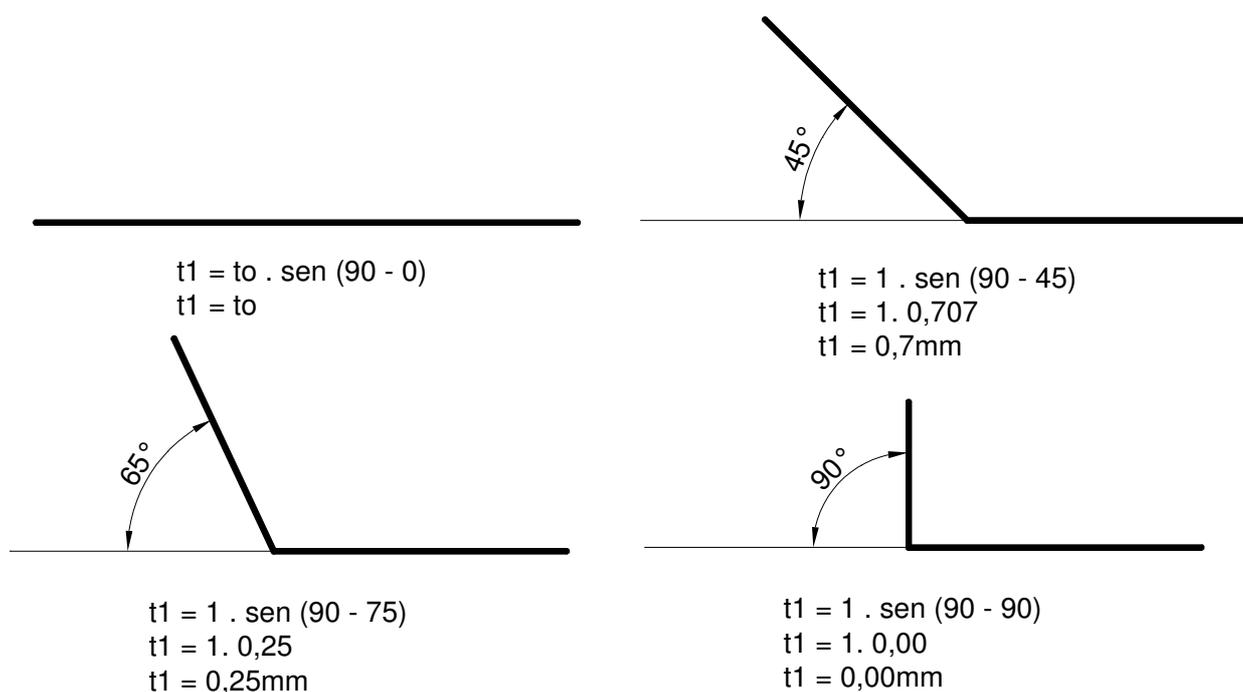


Figura 6: ângulo máximo de parede

O ângulo máximo de estampagem é determinado por uma relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, dada pela equação:

$$t_1 = t_0 * \text{sen}(90 - \alpha) \quad (2.1)$$

Onde t_0 é a espessura original da chapa, t_1 a espessura da chapa medida em um determinado estágio do processo de conformação e α o ângulo de inclinação da chapa neste mesmo ponto. Na figura 7 é mostrado o comportamento da chapa, em relação ao ângulo de inclinação da parede e sua relação com a diminuição de espessura. A espessura de 1mm é utilizada como exemplo, mas na verdade, independente da espessura da chapa, ângulos de parede próximos a 90°, considerando um único estágio de estampagem, tendem a produzir seções extremamente finas, que obviamente constituem um problema a ser evitado.



*Figura 7: equação dos senos
Relação entre o ângulo de parede e a espessura
da chapa no processo de estampagem incremental*

Devido a essas limitações de geometria, novos processos de ISF com múltiplos estágios, originalmente aplicados em geometrias complexas de estampagem convencional, foram desenvolvidos para possibilitar ângulos finais de conformação maiores que 65° [9].

Em pesquisas realizadas sobre o limite de conformação das chapas de alumínio utilizadas na indústria automobilística, foram avaliados dois parâmetros: limite de espessura (*thinning limit*) e o ângulo limite de estampagem (*forming angle limit*). Através da análise dos resultados, constatou-se que variando a inclinação da chapa ao longo da profundidade consegue-se uma maior capacidade de estampagem do que se utilizando uma inclinação constante. A figura 8 demonstra um teste de estampagem onde o ângulo de parede aumentou gradativamente à medida que a profundidade de estampagem também aumentava. Foi observada a profundidade de ruptura, a profundidade atingida e a profundidade projetada de acordo com o modelo CAD da peça. A partir do menor diâmetro o ângulo de parede ficou próximo de 90° , o que causou o rompimento da chapa. A diferença entre a profundidade

atingida e a projetada foi ocasionada pelo retorno elástico do material, comum em operações de estampagem. [10 e 16].

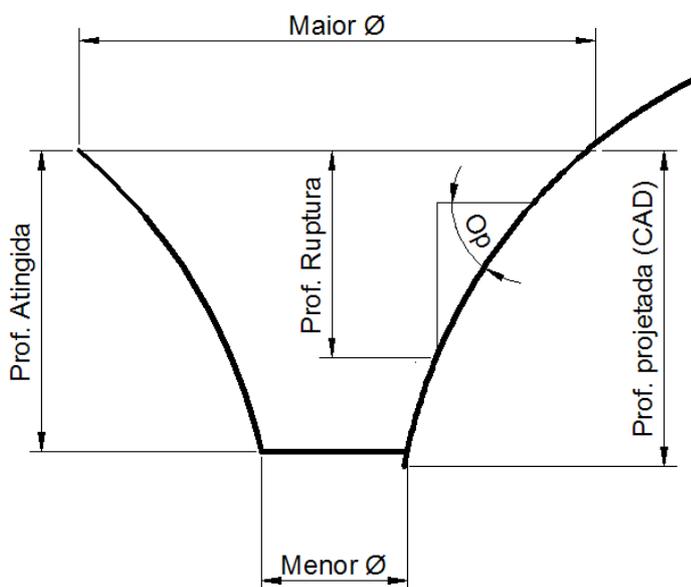


Figura 8: variação da inclinação do blank [16]

Outra característica presente nos processos de estampagem em geral, que também acontece na ISF e que determina limites de acuidade geométrica é o retorno elástico. Além da deformação plástica programada, a deformação elástica produz discrepâncias geométricas entre o produto final e seu modelo correspondente em CAD. A utilização do método de elementos finitos auxilia no desenvolvimento de um algoritmo que venha a diminuir ou excluir totalmente o desvio entre o teórico e o real. Esse algoritmo de correção recebe dados de uma máquina de medir por coordenadas, que é utilizada para medir a primeira peça produzida do lote. Esses dados são comparados com os dados geométricos do modelo em CAD 3D e então é feito o ajuste de coordenadas, gerando uma nova malha (superfície) corrigida. Estando em um ambiente paramétrico, o software de CAM atualiza automaticamente os dados de trajetória das ferramentas. Um novo arquivo NC é gerado e uma peça subsequente é produzida, já com as devidas atualizações [7].

2.1.6 Limitações do Processo Relacionadas ao Alumínio

O alumínio em geral possui o limite de escoamento não tão pronunciado como a maioria dos aços (O limite do alumínio puro é de aproximadamente 12,7 MPa). No caso do aço doce (que contém menos de 0,06% de carbono e cuja estrutura é essencialmente ferrítica),

a presença do patamar de escoamento permite uma fácil identificação da tensão de escoamento [19].

Para o alumínio, esta tensão só é identificada graças a uma *deformação específica residual convencional* de 0,2%, conforme pode ser observado na fig. 9 [24].

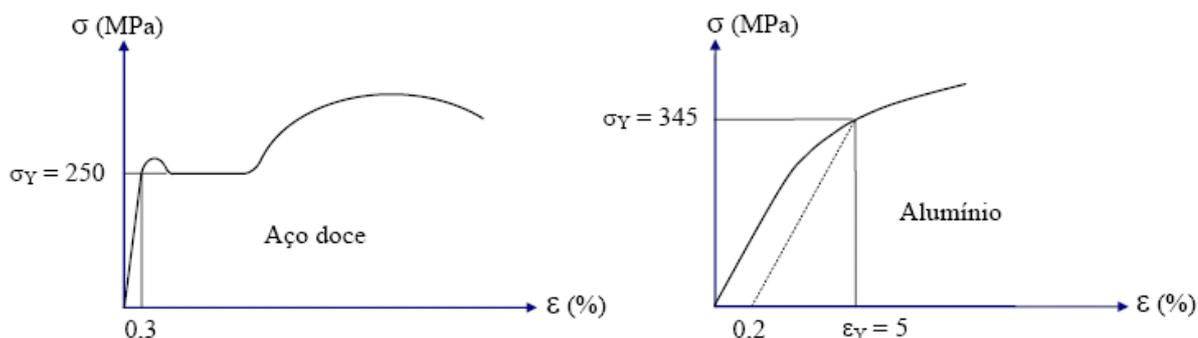


Figura 9: curvas tensão x deformação para aço doce e Alumínio.[25]

Com relação às condições de estampabilidade, as chapas não apresentam, a princípio, bons resultados. Isto ocorre porque o alumínio comercialmente puro (99,33%) é um material anisotrópico, ou seja, para a mesma sollicitação mecânica, a deformação na espessura será maior que na largura ($r_m > 1$). Dessa forma, ao se deformar a chapa em um processo de estampagem, há uma grande redução da sua espessura, para uma pequena variação do alongamento[8].

Apesar destas condições iniciais adversas, o processo de estampagem incremental para chapas de 0,5mm de espessura apresentou algumas vantagens, observadas sob 03 aspectos:

a) Quando comparado à estampagem incremental de aços:

- profundidade alcançada (50 mm), permitindo grandes deformações, considerando-se sua anisotropia, ou seja, apresenta boa ductilidade;
- menor tempo gasto para a estampagem, pois utilizou-se passos verticais de até 1mm e velocidades de avanço de até 1.500 mm/min;
- pouco esforço feito pelo eixo Z da máquina CNC, já que o material oferece menor resistência à deformação elástica

- ($E_{Al} \cong 69.000MPa$; $E_{Aços} \cong 196.000MPa$) [24];
- pequenas discrepâncias geométricas entre o modelo CAD e a peça real (baixo retorno elástico);
- possuem coeficiente de atrito igual ao dos aços em geral, que é de 0,05 e menor do que os aços inoxidáveis, que apresentam o valor de 0,1 [20];

b) Quanto às aplicações comerciais do alumínio em geral:

- tem densidade aproximadamente de um terço da do aço, tornando os produtos mais leves;
- excelente resistência à corrosão e durabilidade;
- bom condutor de calor, sendo muito utilizado em utensílios de cozinha;
- possuem ótima resistência à corrosão, oferecendo durabilidade para o produto final;
- possuem baixo peso específico;
- podem ser conformadas em uma variedade de peças nas mais diferentes formas [23].

c) Quanto à adaptação de estratégias CAM

Embora não seja uma característica exclusiva, a conformação das chapas de alumínio por estampagem incremental obteve êxito no uso da trajetória helicoidal, definida e configurada no software CAM. Esta trajetória faz com que a ferramenta fique em contato permanente com a chapa, evitando deformações e marcas indesejadas no produto final. Além do tipo de trajetória, outros 85 itens, agrupados em 8 categorias, podem ser ajustados e relacionados entre si, gerando uma grande quantidade de combinações possíveis. Estas combinações são norteadas por 03 metas permanentes: a) aprimorar a conformidade geométrica, b) melhorar o acabamento superficial e c) diminuir o tempo de manufatura. Ainda que possam ser antagônicas, buscou-se, nesta dissertação, o ponto ótimo da combinação destes três fatores.

Entre todas as vantagens acima descritas, a relação entre os módulos de elasticidade é a mais importante, em se tratando de custos de produção, já que a energia consumida para deformar a chapa de alumínio é menor. Além disso, essa propriedade dá ao alumínio a

vantagem de dar às estruturas uma elevada capacidade de amortecer golpes e reduzir as tensões produzidas pela variação da temperatura.

2.1.7 Aplicações Industriais da ISF:

As aplicações industriais da estampagem incremental são destinadas a lotes pequenos de peças, com mudanças constantes em sua geometria, possibilitando flexibilidade e economia, já que utiliza ferramental simples e barato, se comparado às matrizes tradicionais de estampagem [1].

Áreas específicas de aplicação:

- *Indústria automobilística*: chaparias de automóveis (interiores e exteriores). A vantagem neste caso seria a grande flexibilidade de alterações do design e o baixo custo, já que não seria necessário a produção de novos moldes. Na figura 10 é mostrado um exemplo de estampagem incremental progressiva, complementado com o corte da chapa;

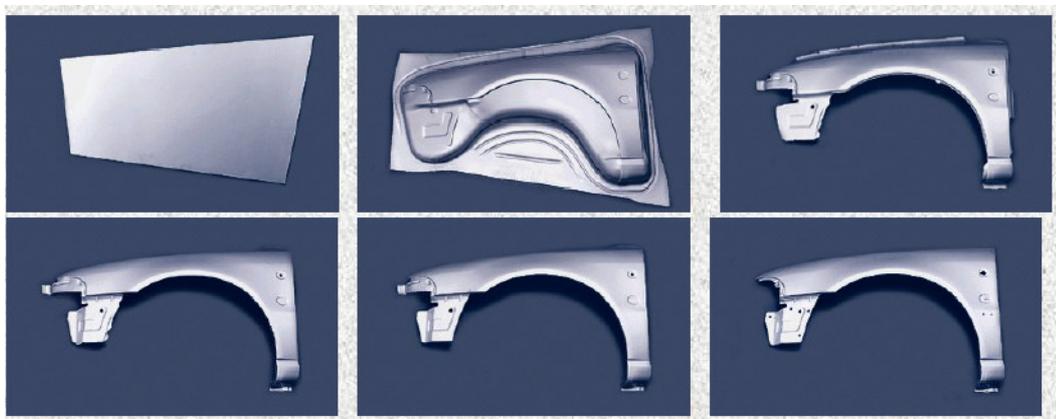


Figura 10: aplicações recentes da ISF.

Disponível em <http://www.ist.utl.pt/>. Acesso em: 02 março de 2006.

- *Indústria moveleira*: móveis de aço com formas arredondadas, de difícil produção comercial, devido ao custo;
- *Utensílios domésticos de pequeno porte*: objetos metálicos de espessura fina e formas geométricas complexas;
- *Indústria Médica*: fabricação de próteses metálicas para substituir partes de ossos perdidas em acidentes. Na figura 11 é ilustrado um caso real de reconstrução do crânio de uma vítima de acidente automobilístico;

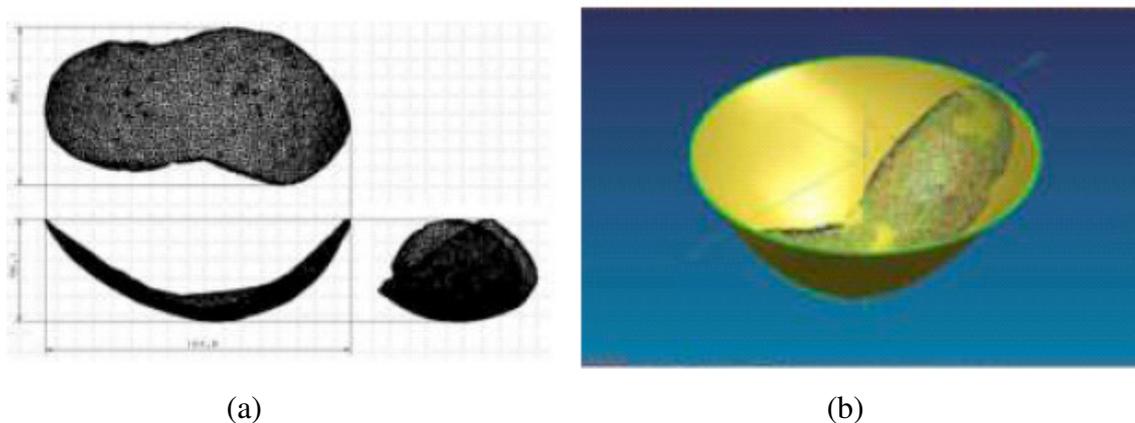


Figura 11: aplicações médicas da ISF.[28]
Prótese craniana: a) geometria do osso craniano do paciente digitalizada em nuvens de pontos (NURBS). b) trajetória de ferramenta gerada a partir do modelo CAD digitalizado.

- *Peças decorativas:* a fabricação de peças exclusivas e com apelo artístico, bem como a reprodução e/ou restauração de antiguidades também se constitui como uma importante aplicação comercial da ISF.



Figura 12: aplicações artísticas da ISF.[3]
Objetos decorativos e obras de arte podem ser reproduzidas através da estampagem incremental.

2.2 Parâmetros Observados em Experimentos Práticos

No desenvolvimento do projeto de dissertação, durante os experimentos práticos, devem ser analisados e controlados os parâmetros [1]:

- a) *Tamanho, forma, material e velocidade da ferramenta*: o raio e o formato da ferramenta limita a geometria da peça, afetando seus raios de arredondamento de cantos e inclinação da parede; a resistência mecânica da ferramenta, aliada à velocidade com que o processo acontece pode determinar o rompimento da chapa;
- c) *Forma, material e espessura da chapa (blank)*: estes parâmetros determinam sua resistência à deformação;
- d) *Estratégia da geração da trajetória*: as estratégias configuradas no software de CAM determinam o acabamento superficial, parâmetros de rugosidade, tempo gasto no processo, ângulos de parede de chapa e influenciam também a resistência mecânica da chapa à deformação;
- e) *Força do prensa chapas*: um parâmetro que deve ser definido de acordo com o sistema de forças calculado durante o processo de estampagem;
- f) *Lubrificação*: permite a diminuição do coeficiente de atrito μ mantendo a temperatura estável e melhorando o acabamento superficial.

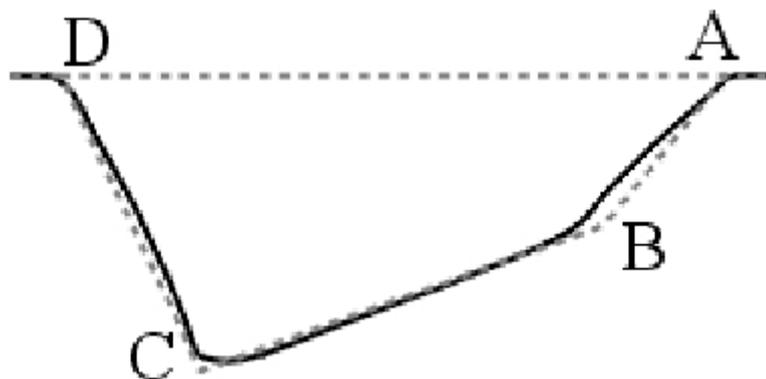
2.3 Estudos de Caso

2.3.1 Conformidade Geométrica

Na experiência realizada por DUFLOU [9], foi utilizada uma ferramenta de ponta esférica, diâmetro 12,7mm, de aço-ferramenta. Foram testadas diversas estratégias de usinagem, a fim de se obter a maior precisão dimensional possível. O avanço foi de 2000 mm/min e o motor do eixo árvore permaneceu desligado. Assim, a rotação da ferramenta se deu através do contato entre esta e a chapa. Também foi utilizado óleo lubrificante para minimizar a fricção. O material da chapa utilizada no processo foi o alumínio 3003, com espessura de 1,2mm.

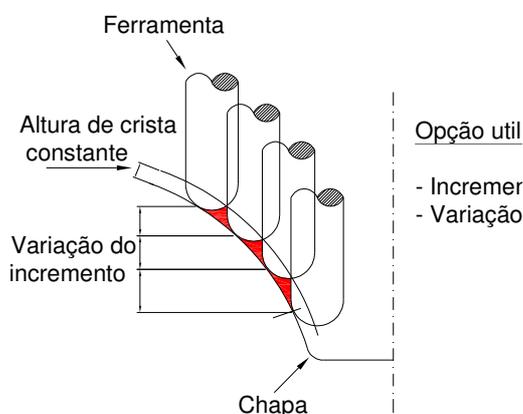
Foram fabricadas duas peças: uma chapa de fogão solar e uma placa craniana, utilizada como prótese em cirurgias reconstrutivas. Na experiência, um scanner a laser com resolução de ± 15 micra foi utilizado na medição da peça acabada. Através deste equipamento foi gerada uma nuvem de pontos que é mapeada e transformada em superfície, utilizando software de CAD. Esta superfície é comparada com o modelo CAD original da peça final para

avaliar o desvio entre o modelo teórico e o real [8], causado pelo retorno elástico da chapa, como demonstrado na figura 13:



*Figura 13: seção longitudinal da chapa solar.[9]
A linha contínua mostra o perfil da chapa conformada;
a linha tracejada mostra o perfil do modelo CAD*

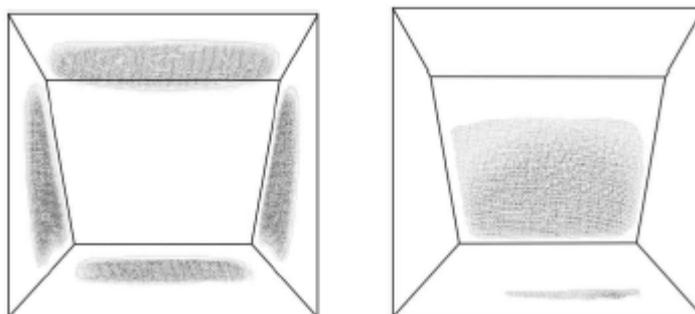
Na estampagem da chapa, foram testadas três estratégias CAM diferentes, relacionadas ao incremento vertical (passe em Z) da ferramenta. Na primeira, o objetivo foi manter a ‘altura da crista’ similar em toda a extensão da chapa. O termo ‘altura da crista’ ou *scallop*, define o valor de rugosidade superficial, após a passagem da ferramenta. É um parâmetro típico da área de usinagem, mas que tem o mesmo efeito na estampagem, ou seja, mantendo a altura da crista constante, consegue-se um melhor acabamento superficial da chapa, como ilustrado na figura 14. Nesse caso, foi aplicado um passe constante de 0,7mm acima do ponto “B” (figura 13) e 0,3mm abaixo deste ponto.



*Figura 14: altura da crista.
Parâmetro que influencia no acabamento superficial da chapa*

O desvio total entre o modelo CAD e a peça conformada ficou em uma faixa de $-1,8\text{mm}$ a $+5,4\text{mm}$. Na figura 15, é possível observar o “efeito-mola” (*spring back*) representado pela área sombreada, presente nas faces semi-verticais da peça. Este efeito ocorre quando a parte abaixo do ponto B é conformada, provocando o desvio geométrico, que neste caso ficou entre $+1,8$ e $2,8\text{mm}$.

Para diminuir o desvio entre o modelo teórico e o real, uma segunda estratégia foi testada, utilizando duas operações, uma de pré-conformação, utilizando uma geometria CAD intermediária para gerar a trajetória de ferramenta e uma operação final de acabamento. Se comparada à estratégia 1, uma substancial diminuição do erro geométrico foi alcançada, ficando o desvio total entre $-2,8\text{mm}$ e $+4,2\text{mm}$. Observando novamente a figura 15, pode-se verificar a comparação do erro geométrico utilizando diferentes estratégias: a figura da esquerda apresenta um percentual de erro maior que o da figura da direita; esta diferença se deve à otimização e diversificação dos parâmetros de usinagem do software CAM.



*Figura 15: erros de geometria. [9]
As áreas sombreadas indicam discrepâncias geométricas
Entre o modelo definido em CAD e a peça real. A figura da
esquerda é relativa à estratégia 1; a da direita é da estratégia 2.*

Na terceira estratégia a operação de acabamento foi aplicada no sentido reverso, contrária à direção da primeira operação. O desvio total ficou entre -2mm e $+1\text{mm}$.

A seguir um quadro comparativo entre as três estratégias:

| (mm) | Estratégia | | |
|--------------------------|------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Média Absoluta do Desvio | 1.317 | 0.955 | 0.379 |
| Desvio Médio Negativo | -0.58 | -0.79 | -0.47 |
| Desvio Médio positivo | 1.513 | 1.067 | 0.305 |
| Mínimo | -1.78 | -2.75 | -2.06 |
| Máximo | 5.398 | 4.223 | 0.980 |
| Sigma (σ) | 1.221 | 1.169 | 0.508 |

Tabela 1: estratégias de ferramenta.[9]

2.3.2. Estratégias de Deslocamento de Ferramenta

Sendo o tema da dissertação a adaptação de estratégias CAM (típicas de usinagem) para a estampagem incremental de chapas, um dos principais itens pesquisados foi a definição da melhor estratégia e suas respectivas variáveis (velocidade de avanço, rotação de ferramenta, profundidade de corte, formas de entradas e saídas de ferramenta, etc...), de acordo com um determinado tipo de material, tipo de ferramenta e geometria da peça, foram feitas pesquisas bibliográficas sobre experiências já realizadas nesta área específica.

Nos testes realizados por SHIM[10], a figura 16 mostra as deformações na espessura e deslocamento vertical da chapa utilizando uma determinada estratégia de usinagem.

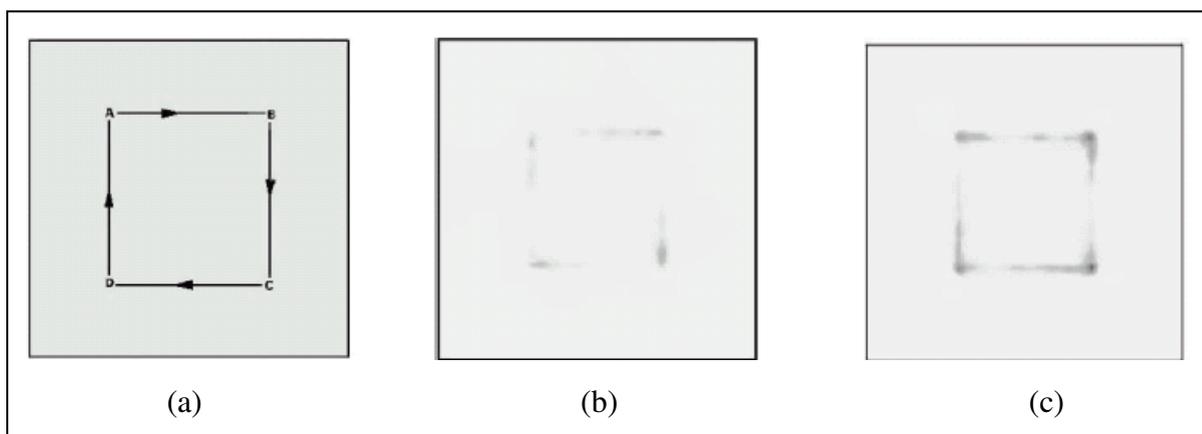
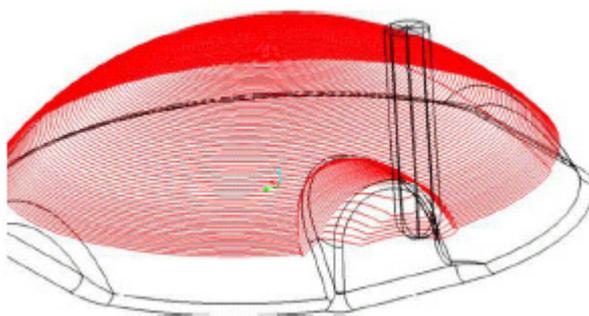


Figura 16: estratégias de ferramenta [10]

a) Sentido de deslocamento da ferramenta sobre a chapa; b) Profundidade de estampagem 0.5mm; c) profundidade de 1.0mm. As manchas indicam a redução de espessura da chapa. SHIM, 2001

CERETTI [11] utiliza em seu experimento, uma matriz sob a chapa, com o formato do produto final e para determinar o melhor caminho de ferramenta foram analisados vários aspectos, tais como: geometria da ferramenta sob a chapa (matriz), o material e espessura da chapa, o acabamento superficial e o tipo de máquina CNC. Utilizando o software CAD/CAM Pro-engineer, os caminhos de ferramenta foram gerados automaticamente (conforme a figura 23), após a definição de parâmetros fundamentais como: diâmetro da ferramenta, velocidade de avanço (dos eixos X e Y, expressos normalmente em mm/min), profundidade de estampagem (em mm). Com estes dados, as trajetórias são geradas automaticamente e através de um pós-processador, estas trajetórias são transformadas em blocos de informações (códigos “G”), transmitidas e executadas na máquina CNC.



*Figura 17: trajetória gerada em sistema CAM [11]
Desenvolvimento de trajetória de ferramenta utilizando tecnologia CAM*

Com relação ao acabamento superficial da chapa, o objetivo é gerar superfícies com uma rugosidade aparente que não influencie o aspecto estético do produto final. Para tanto, utiliza-se ferramentas esféricas com o maior diâmetro possível, dependendo dos raios mínimos existentes no produto final e profundidades de corte (a_p) baixas. O uso de a_p baixo aumenta consideravelmente o tempo de estampagem, além de provocar endurecimento da chapa, provocado pelo acúmulo de tensões residuais. Isto pode provocar a sua ruptura durante o processo [6].

Um dos principais parâmetros a serem observados na escolha da estratégia de usinagem é a forma das entradas e saídas de ferramenta (*leads in e leads out*). Em um dos experimentos de KOPAC[1] dois tipos diferentes de trajetórias foram testadas. No primeiro

(figura 18a), a entrada da ferramenta, representada pela linha vertical causou uma assimetria (torção) na chapa (figura 18b). Além disso, a profundidade na região central ficou diferente da profundidade obtida no restante da chapa, causando problemas de geometria e acabamento. No segundo experimento (figura 18c), a movimentação foi feita eliminando-se os pontos de entrada, fazendo com que a ferramenta ficasse em contato constante com a chapa, realizando a conformação em um ciclo constante e sem interrupções, melhorando tanto a acuidade geométrica quanto o acabamento superficial (figura 18d).

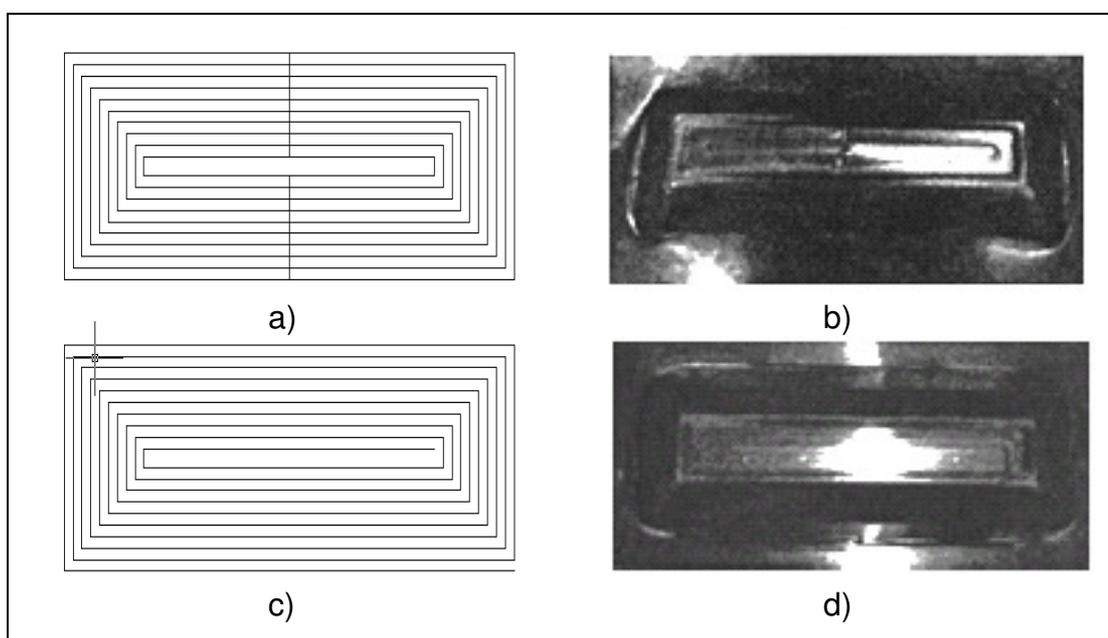


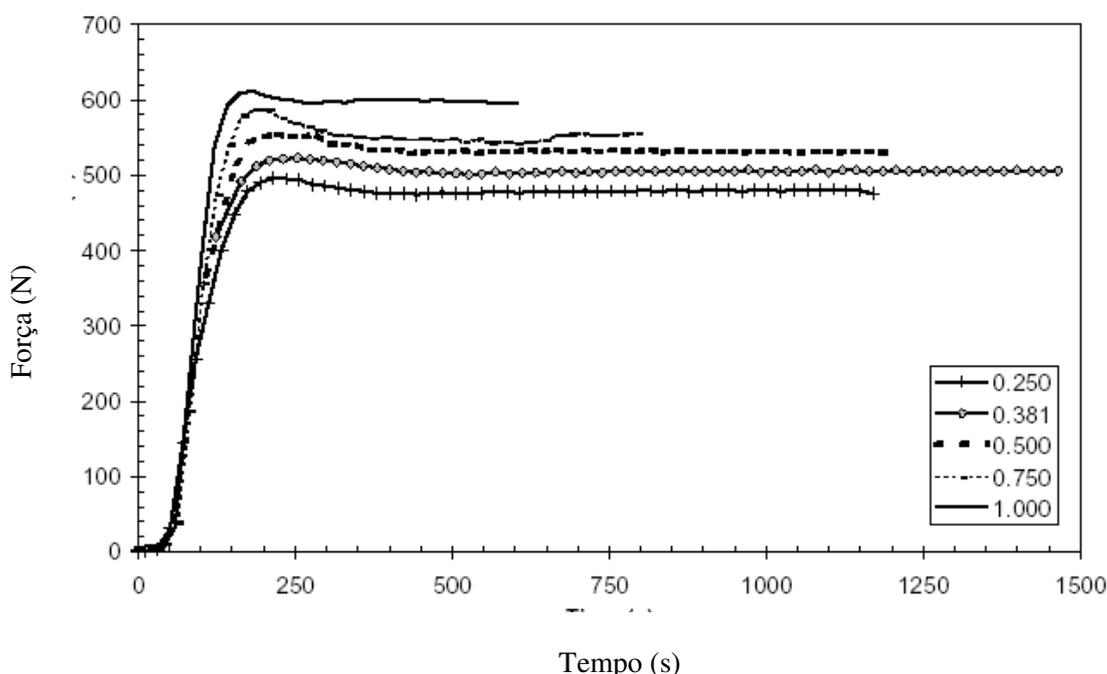
Figura 18: estratégias de usinagem [1]

A peça 'd' estampada apresenta melhor qualidade, pois não possui marcas de entrada de ferramenta, como ocorre em 'b'; a similaridade geométrica com o modelo CAD também é melhor em 'd', já que não apresenta deformações.

2.3.3 Medição de Força Aplicada

Um outro interessante estudo realizado por DUFLOU [9] tem como objetivo medir as forças durante a estampagem e assim poder controlar e identificar pontos críticos e ótimos do processo. Segundo o estudo, os fatores que irão determinar a maior ou menor aplicação de força são: material, espessura e resistência mecânica da chapa, passo vertical e diâmetro da ferramenta.

Nesta experiência, o passo vertical foi de 0,5mm, a ferramenta utilizada foi uma fresa de ponta esférica diâmetro 10mm e o ângulo de inclinação de parede foi de 50°. Foram medidas as forças segundo seus componentes F_x , F_y e F_z . É possível notar que o vetor resultante das forças F_x , F_y e F_z inicia a curva com valor = 0 no início do processo de estampagem. Como indicado na figura 19, a medida em que a ferramenta vai se deslocando no eixo Z (aprofundando a chapa), a força ganha incremento rapidamente, até obter a profundidade desejada, onde a partir daí as forças tendem a permanecer aproximadamente constantes. O material do *blank* foi uma chapa de alumínio 3003-O, com 1,2mm de espessura e na figura 16 pode-se verificar a variação da força aplicada ao longo do tempo, na deformação da chapa. Nota-se que no início do processo a força de estampagem aumenta bruscamente, em um curto espaço de tempo. À medida em que a chapa vai se conformando a força utilizada tende a estabilizar. Pode-se concluir que, na configuração da estratégia de usinagem do software CAM, o passo vertical deve ser variável, indo de um menor incremento para um maior, fazendo com que a variação de força seja menor. Conseqüentemente o acabamento superficial melhora, a vida útil da ferramenta e do equipamento aumenta e a diferença geométrica entre o modelo teórico (em CAD) e o real tende a diminuir.



*Figura 19: gráfico de força em função do tempo.[9]
Gráfico de medição de força aplicada durante o processo de estampagem.
A legenda identifica as diferentes espessuras de chapa utilizadas no ensaio.*

A chapa de alumínio é fixada entre duas placas, tendo a inferior um orifício central de 182mm de diâmetro. O avanço utilizado pela ferramenta foi de 2000 mm/min. O produto

final, um segmento de cone, foi estampado utilizando incrementos horizontais e verticais da ferramenta. A relação entre estes incrementos forma o ângulo do cone, de acordo com a figura 17, onde 'v' é o incremento vertical (0.5mm). A relação entre este incremento vertical e o incremento horizontal forma o ângulo de inclinação da parede da chapa, ilustrado na figura 20:

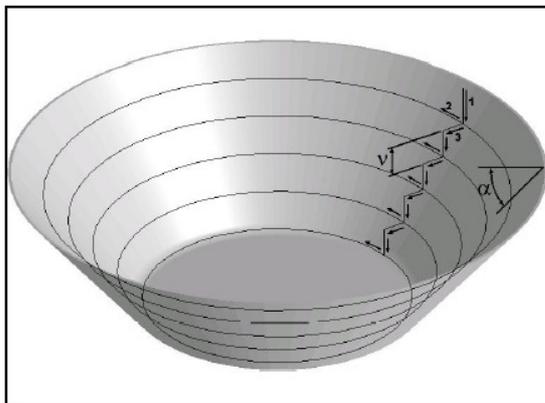


Figura 20: modelo CAD de peça [9]
Modelo CAD do cone estampado, com indicação do ângulo de estampagem .

2.3.4 Desenvolvimento do Dispositivo para Estampagem Incremental

O projeto do dispositivo foi idealizado de acordo com DUFLOU [9], com ajuste e fixação do *blank* feita de forma manual, através de parafusos, conforme pode ser observado na figura 21.

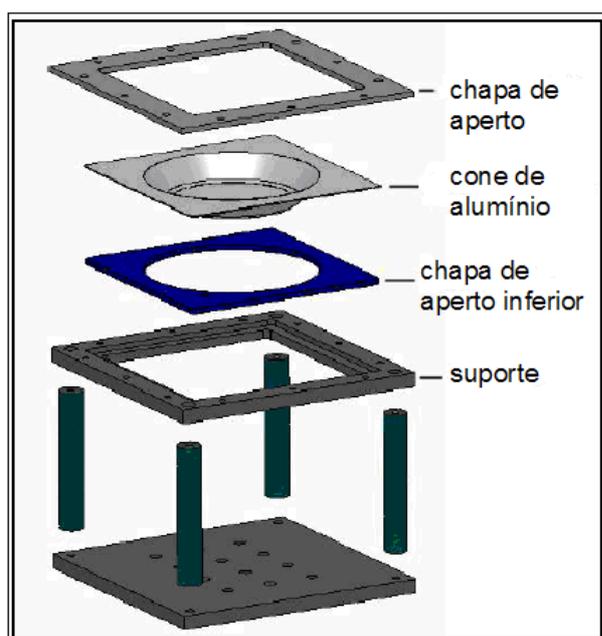


Figura 21: conceito inicial do dispositivo prensa-chapas [9]

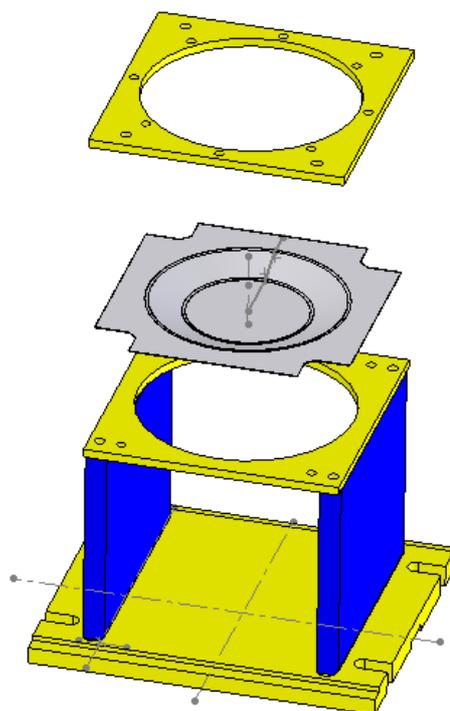
3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A fase inicial do projeto do dispositivo foi focada na rigidez estrutural do dispositivo, a fim de suportar as cargas provenientes da movimentação dos eixos e da ferramenta sobre a chapa. Na fabricação e montagem foram realizados procedimentos a fim de garantir o perfeito alinhamento deste dispositivo com os eixos X, Y e Z do equipamento CNC. Nos primeiros testes de estampagem, existia a preocupação com o rompimento da chapa, já que ainda não existiam os dados relativos às curvas de escoamento, composição química e metalográfica das chapas utilizadas no ensaio. Nestes testes também não foram medidas as forças geradas pela resistência da chapa à deformação, já que não foram utilizadas células de carga para efetuar estas medições. Por outro lado, as simulações fornecidas pelo software de CAM retratavam o comportamento do material em um processo de usinagem e não de conformação. Portanto, os primeiros testes foram críticos porque não se tinha em mãos todas as informações necessárias para se prever os resultados práticos com mais segurança.

3.1 Projeto do Ferramental

Para tornar possível a estampagem da chapa em um centro de usinagem, era necessário fixar a chapa. Dessa forma como primeira etapa do desenvolvimento do dispositivo, foram projetadas no software de CAD 'Solidworks' as peças individuais do dispositivo prensa-chapas. Os sistemas CAD oferecem muitas vantagens ao desenhistas, sendo que o mais importante é a padronização gráfica, que permite que vários editores gráficos interpretem um desenho armazenado em um arquivo padrão [26].

Nas primeiras montagens virtuais, realizada no mesmo software, foram identificados alguns problemas de geometria e encaixe das peças, relacionados à centragem de furos e espaço útil de trabalho para a ferramenta de estampagem. Trabalhando em um ambiente CAD paramétrico, alterações geométricas e dimensionais nas peças, comuns no início do projeto, são atualizadas no contexto de montagem. A utilização desta tecnologia proporcionou rapidez e segurança no desenvolvimento do dispositivo. A documentação técnica completa com os desenhos das peças individuais e montagem do conjunto estão no Anexo 1. O projeto em perspectiva explodida é mostrado na figura 22:



*Figura 22: projeto de dispositivo para estampagem incremental.
Desenvolvido e fabricado na instituição de ensino
colaboradora do projeto de dissertação*

3.2 Fabricação do Dispositivo para Estampagem Incremental

Para a fabricação dos dispositivos foram utilizadas as máquinas-ferramenta existentes no setor de usinagem da SATC – Instituição de Ensino colaboradora do projeto de dissertação. Na fresadora convencional foram fabricadas a base e apoios laterais do dispositivo. No centro de usinagem foram executados os furos centrais e os furos para passagem dos elementos de fixação (parafusos) das placas de aperto. A retífica foi utilizada para nivelar e melhorar o acabamento superficial da superfície inferior da base. As roscas dos furos foram executadas por ferramentas manuais (cossinetes).

Após a fabricação das peças e montagem do conjunto, o dispositivo foi montado na mesa do centro de usinagem e devidamente fixado e ajustado sua posição em relação aos eixos coordenados XYZ, conforme é mostrado na figura 23:

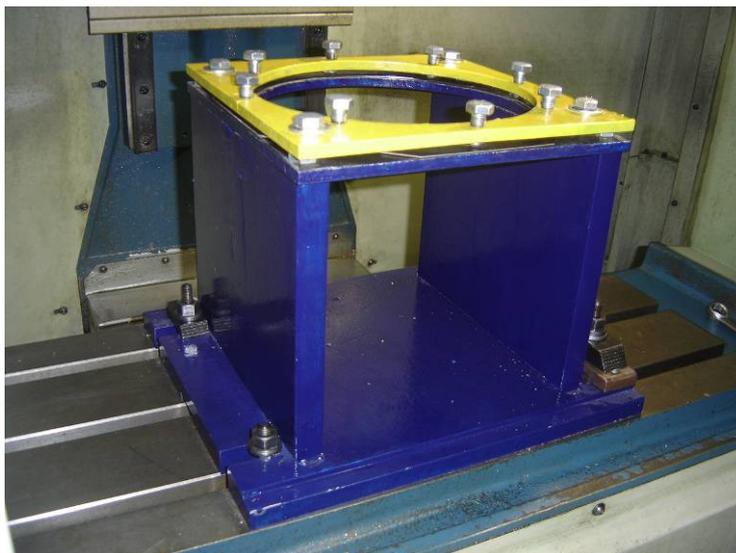


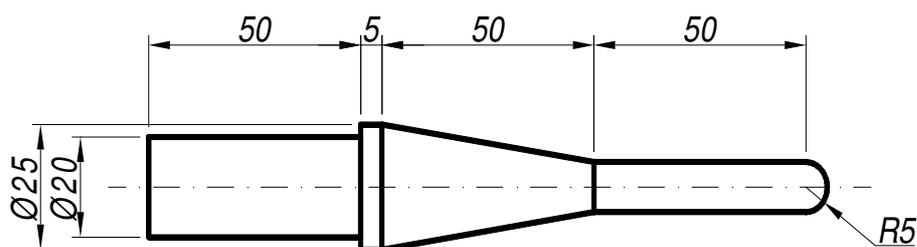
Figura 23: dispositivo para estampagem incremental

3.3 Equipamentos de Medição e Simulação

Além dos equipamentos já citados, também foram utilizados outros equipamentos do setor de mecânica da instituição. A máquina de ensaio de tração foi para obter as curvas de escoamento das chapas de alumínio utilizadas como matéria-prima. No Laboratório de Metrologia, as medições geométricas das peças estampadas foram feitas pela máquina de medir por coordenadas. No laboratório de informática foram utilizados o software de CAD Solidworks, para modelagem 3D, versão 2005, e o software EdgeCAM, versão 11.5, para simulação de estampagem.

3.4 Tipos de Ferramentas utilizadas nos testes

Com relação ao tipo de ferramenta, no primeiro teste foi utilizada uma fresa de ponta esférica (*Ball nose*) de aço rápido, com diâmetro de 10mm (ver figura 24). A definição da melhor ferramenta (material, formato e tamanho) depende das características geométricas, do material e da espessura da peça. A escolha da ferramenta também é definida pela profundidade desejada para a estampagem.



*Figura 24: ferramenta de estampagem
Diferente das ferramentas de usinagem convencionais,
as ferramentas de estampagem incremental não possuem arestas de corte.*

3.5 Máquina

A máquina utilizada para os testes práticos será um Centro de Usinagem Romi Discovery 4022 com as seguintes características físicas: dimensões da mesa - 840 x 360mm, curso eixo x - 590mm, curso eixo y - 406mm., curso eixo z - 508mm. O peso máximo que pode ser colocado sobre a mesa é de 350Kg. Demais dados técnicos estão descritos na tabela 2, a seguir:

| Características Técnicas | ROMI Discovery 4022 |
|--------------------------------------|---|
| Movimento Rápido | X, Y: 20m/min |
| Avanço Máximo (mm/min) | 4000 |
| Tipo/Classe de cone porta ferramenta | BT-40 |
| Número de ferramentas no magazine | 22 |
| Resolução de Posicionamento | 0.001 |
| CNC | Mach 9, 3 eixos de posicionamento, interpolação linear e circular |

Tabela 2: características da máquina CNC utilizada nos testes práticos

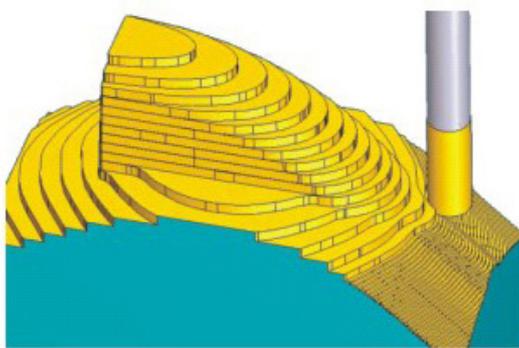
3.6 Software CAM

Originalmente desenvolvido para usinagem, o software utilizado para gerar as simulações foi o EdgeCAM, versão 11.5, da empresa inglesa *Pathtrace*. As simulações computacionais, além da aparência geométrica, fornecem os dados dimensionais, o tempo gasto no processo de conformação, o caminho utilizado pela ferramenta e a existência ou não de colisões entre as partes móveis (ferramenta, peça, dispositivo ISF e mesa XY) da máquina.

As primeiras simulações realizadas demonstram alguns dados interessantes. O tempo de usinagem, por exemplo, é determinado principalmente pelos parâmetros: velocidade de avanço (em mm/min, dos eixos X e Y) e profundidade de corte (em mm, do eixo Z). A rugosidade superficial também é determinada em grande parte pelos mesmos parâmetros, mas o tipo de fluido lubrificante, o material e diâmetro da ferramenta e a rotação ou não desta sobre seu próprio eixo também modificam esta característica.

O software apresenta ciclos avançados de usinagem, permitindo trabalhar desde a geometria mais simples até a mais complexa. Além disso, possui algumas características que são muito úteis para a adaptação para estampagem incremental [12]:

- a) apresenta movimentos suaves de aproximação, conexão e fresamento trocoidal. Esse sistema faz com que a área de contato entre a ferramenta e a peça (chapa) se mantenha uniforme, melhorando o acabamento e mantendo a força de corte constante. As entradas e saídas da ferramenta são tangenciais à superfície, evitando um contato brusco que poderia danificar a chapa e/ou a ferramenta;
- b) possui o recurso *Constant Cusp Finishing* (figura 25) , que mantém o incremento de corte lateral constante. Isto produz um acabamento consistente e constante em toda a superfície estampada;
- c) ciclos '*parallel lace*' e '*profiling*' podem ser controlados pelo incremento lateral, pelo incremento vertical, pela altura da crista e pelos ângulos de contato máximos e mínimos entre ferramenta e chapa. A correta combinação destes ciclos, de acordo com a geometria, material da chapa e material da ferramenta pode gerar superfícies muito bem acabadas (com baixa rugosidade superficial).



*Figura 25: constant cusp finishing [13]
Estratégia “Constant Cusp Finishing” sendo aplicada no acabamento após o desbaste. O incremento vertical é continuamente calculado para compensar a inclinação da geometria e manter a rugosidade (altura da crista) constante.*

3.7 Metodologia de Simulação Física

Existem equipamentos especialmente desenvolvidos para estampagem incremental. Porém, nesta dissertação a proposta foi a de adaptar um centro de usinagem CNC para realizar as operações. A metodologia segue o fluxo normal de utilização de sistemas integrados CAD/CAM/CNC para usinagem. Primeiramente foi modelado o produto final no software Solidworks, versão 2005, utilizando um recurso especial: o módulo *sheet metal*, o qual fornece ferramentas específicas para a modelagem e manipulação de objetos fabricados a partir da conformação de chapas. A figura 26 apresenta o desenho do produto.

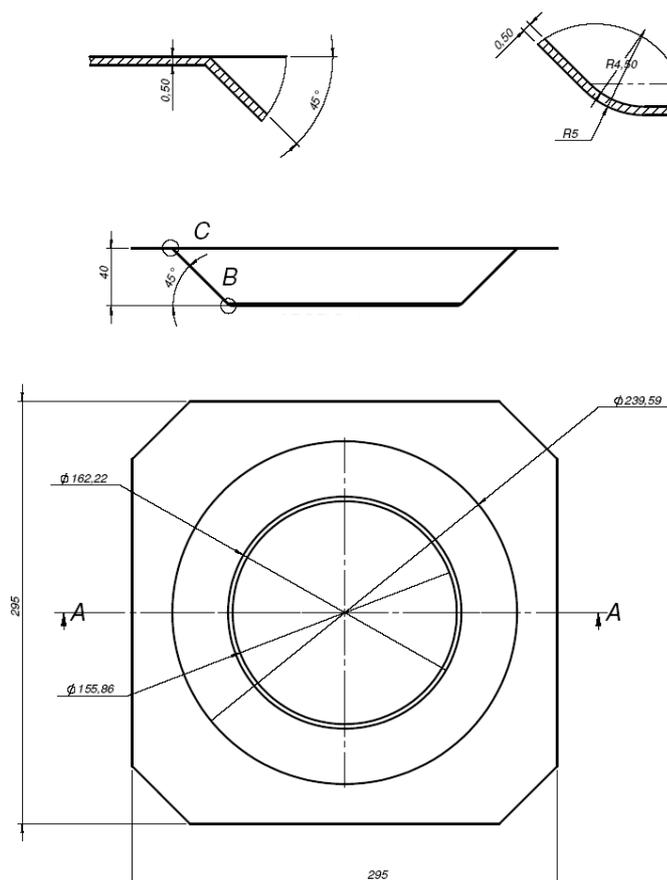


Figura 26: projeto da peça a ser estampada

Após a modelagem CAD 3D, realizou-se a geração dos caminhos de ferramenta para a estampagem da chapa através do software EdgeCAM. Em linhas gerais, observa-se que, para produzir um bom acabamento, o tempo gasto é alto, se considerarmos a produção em série, mesmo em pequenos lotes. Foram realizadas combinações de parâmetros a fim de manter ou até mesmo melhorar o acabamento superficial e reduzir o tempo utilizado. O processo completo, desde o *design* do produto até sua fabricação final, está demonstrado na figura 27. O modelo inicial (arquivo CAD) pode ser criado no software ou originado de um escaneamento 3D, na hipótese de já existir produto semelhante. O arquivo CAD é transportado para um simulador, gerador de estratégias de usinagem e códigos G (*software CAM*), os quais irão comandar a máquina CNC na estampagem da chapa, conforme ilustrado na figura 27:

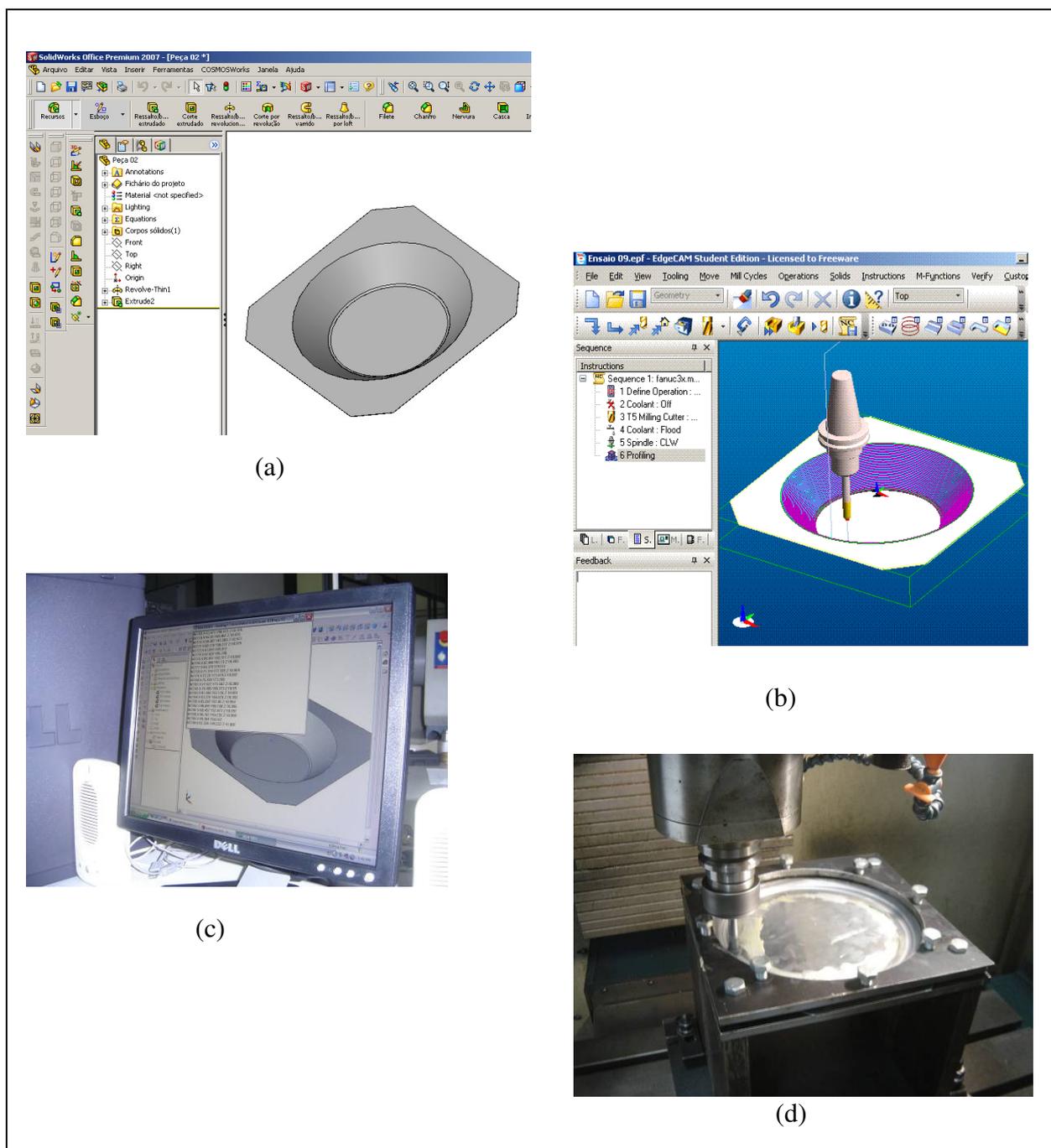


Figura 27: fluxo CAD/CAM/CNC

Fluxo de trabalho integrando os sistemas de produção.

- a) modelo CAD da peça; b) geração do programa de estampagem no software CAM; c) transmissão dos códigos G do computador para a máquina CNC; d) estampagem da chapa*

4 CARACTERIZAÇÃO DO BLANK

4.1 Ensaio de Tração

O ensaio mais usado para a determinação das propriedades mecânicas de chapas é o ensaio de tração. Este permite obter o limite de resistência, o limite de escoamento, o grau de encruamento e o índice de anisotropia [8].

Para o ensaio de tração, foram retirados vários corpos de prova, variando os sentidos de laminação da chapa de alumínio (0, 45 e 90°). Seu formato foi estabelecido segundo a norma ABNT 6152 / DIN EM 10002, para corpos de prova de ensaio de tração para chapas, conforme figura 28.

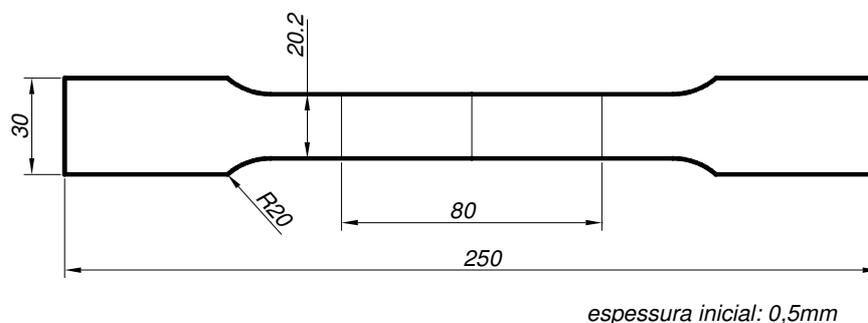


Figura 28: dimensões do corpo de prova

4.2 Curva Tensão em Função da Deformação

Para a obtenção da curva 'tensão em função da deformação', foram realizados 03 ensaios de tração (um para cada direção de laminação), utilizando chapas planas de alumínio com espessura de 0,5mm. As figuras 29a, 29b e 29c mostram as curvas obtidas para cada direção de laminação.

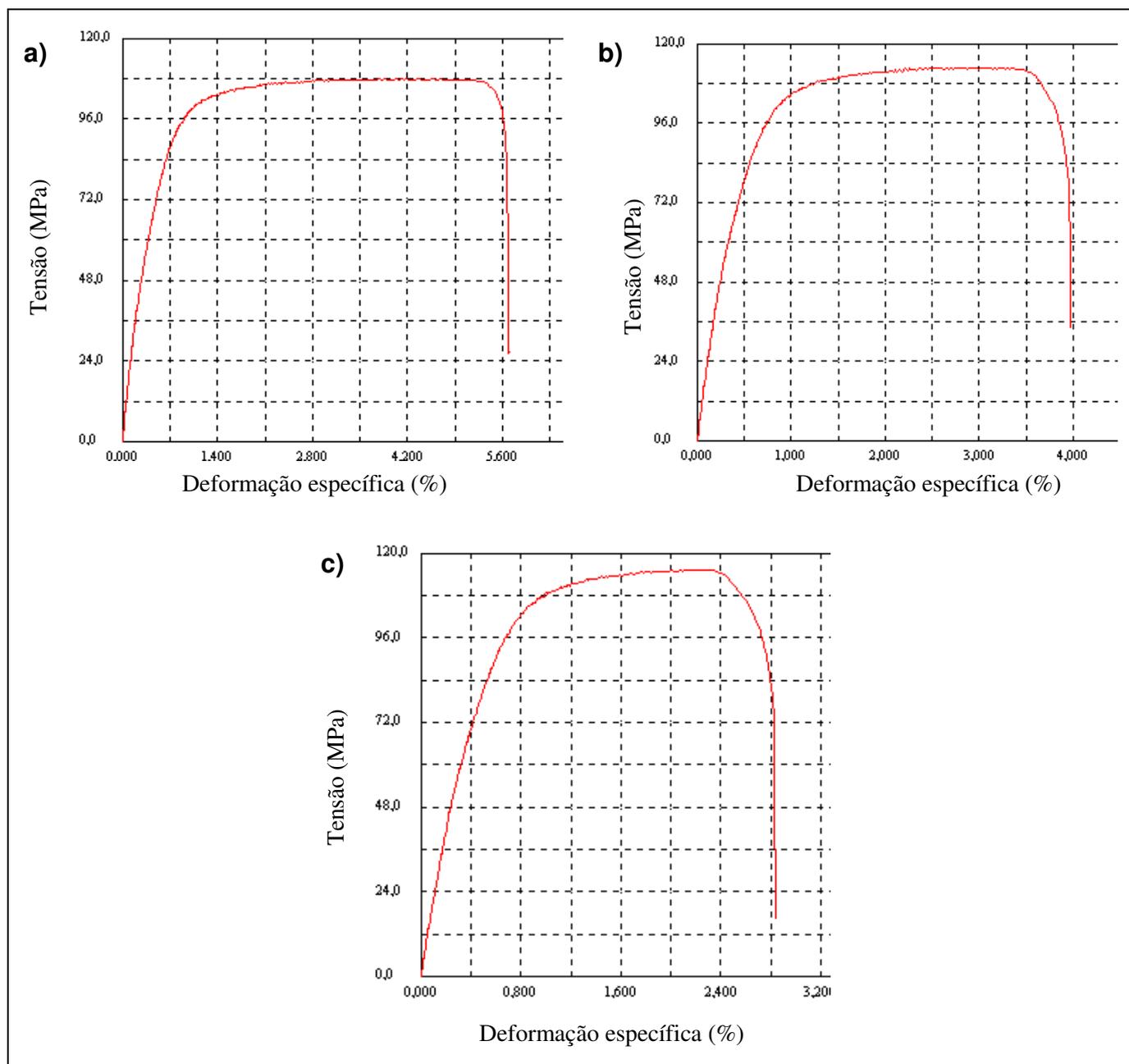


Figura 29: curvas de tensão em função da deformação

- a) curva obtida a partir de um corpo de prova paralelo ao sentido de laminação (0°);
b) curva obtida a partir de um corpo de prova oblíquo ao sentido de laminação (45°);
c) curva obtida a partir de um corpo de prova transversal ao sentido de laminação (90°)

4.3 Curvas de Escoamento

Traçando-se uma reta paralela à região elástica da Curva Tensão x Deformação Média (*Deformação Específica Residual Convencional – 0,2%*) chega-se a uma tensão de escoamento ($\bar{\sigma}$) em torno de 102 MPa, de acordo com a média dos valores verificados nos ensaios de tração. As curvas de escoamento do alumínio puro (99,33%) são apresentadas na figura 30, de acordo com cada sentido de laminação:

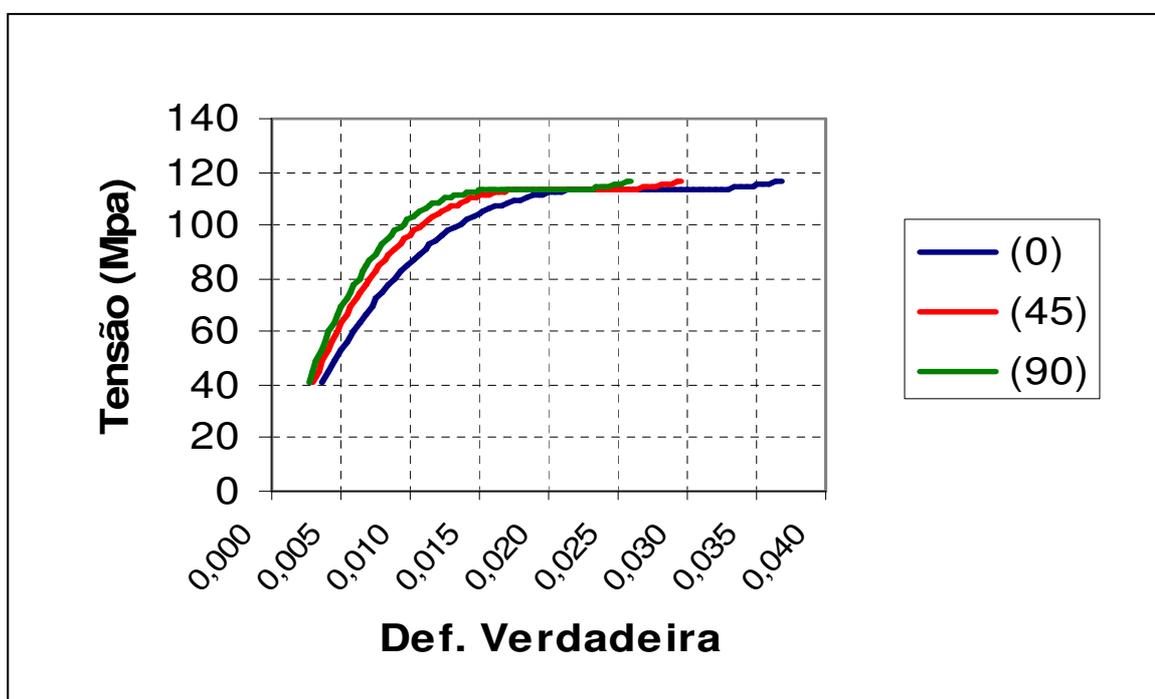


Figura 30: curvas de escoamento obtidas nos ensaios de tração. Pode-se perceber que o corpo de prova paralelo ao sentido de laminação (0°), apresenta uma deformação específica maior, se aproximando de 0,04, enquanto a deformação do corpo de prova transversal (90°) ficou em torno de 0,026.

Verificando outras curvas de escoamento obtidas, podemos realizar uma comparação com uma liga semelhante à da chapa utilizada nos ensaios e testes práticos. Na figura 31 pode-se comparar a curva de escoamento obtida em um dos ensaios (corpo de prova transversal ao sentido de laminação) e a curva do alumínio AA 1050 recristalizado [29], especificado conforme norma ABNT NBR 7823/2001.

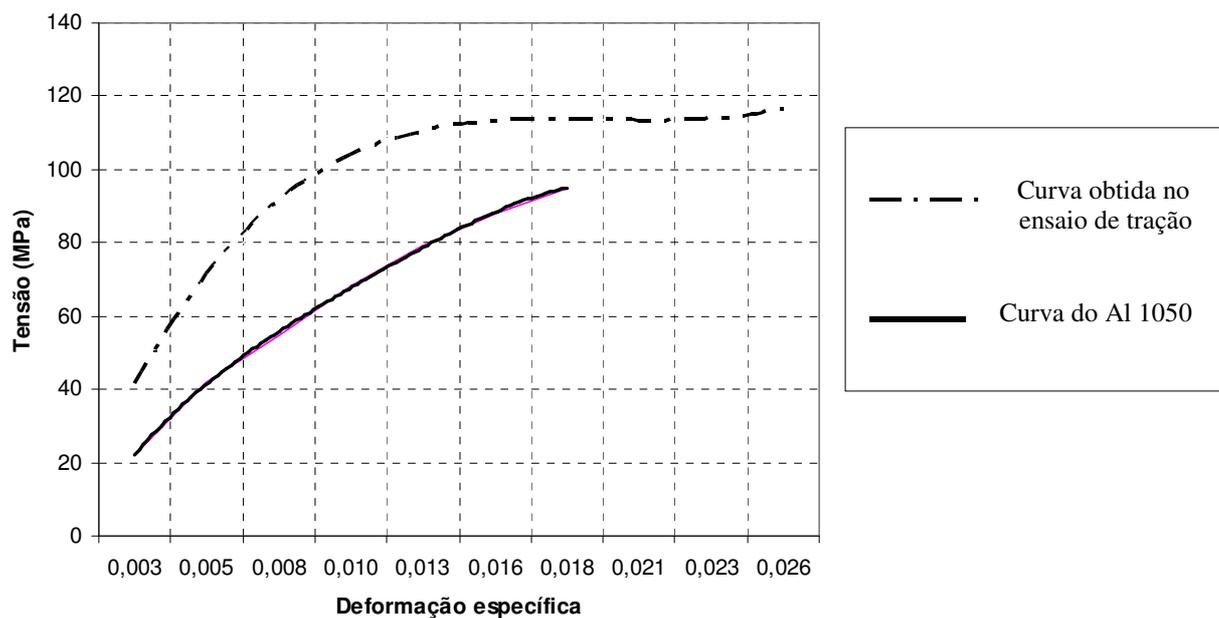


Figura 31: curvas de escoamento típicas de alumínio série 1000

4.4 Análise Química e Metalográfica

A análise química do alumínio laminado, realizada no LdTM/UFRGS, apresentou os seguintes elementos listados na tabela 3, em porcentagem(%):

| Al | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ni | Cr | Pb | Sn | Ti | P |
|-------|------|------|------|------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|
| 99,33 | 0,07 | 0,41 | 0,13 | 0,03 | <0,01 | <0,005 | <0,01 | <0,005 | <0,01 | Sn<0,01 | 0,017 | 0,0013 |

Tabela 3: análise química

A análise metalográfica (conforme figura 32) revelou a matriz de alumínio (solução sólida α) com diversas inclusões não metálicas. Pode-se perceber também o sentido da laminação através do alinhamento das impurezas.

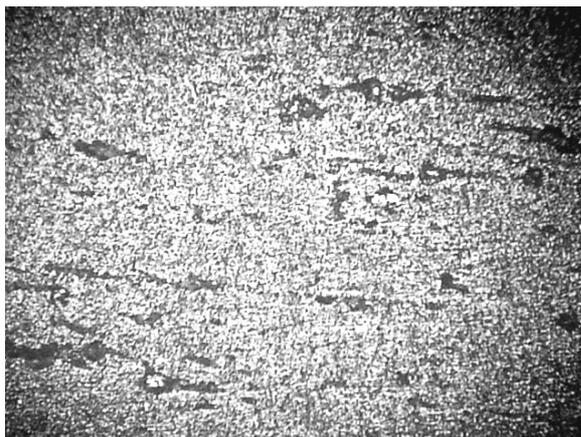


Figura 32: análise metalográfica do alumínio laminado

Escala de ampliação: 100x. Ataque: HCl 75ml, HNO₃ 25 ml, HF 5ml. Tempo: 5min.

Preparação: misturar antes de usar na temperatura ambiente, imersão da amostra, enxaguar e secar.

Comentários: revela contorno de grãos e pode ser diluído com 25% de H₂O p diminuir a velocidade de ataque.

A tabulação completa dos dados relacionados ao ensaio de tração pode ser verificada no anexo 2 – Resultados do Ensaio de Tração.

5 ENSAIOS MECÂNICOS DE ESTAMPAGEM

Na realização dos ensaios mecânicos de estampagem, o objetivo básico era diminuir ao máximo o tempo de manufatura, sem comprometer o acabamento e correspondência geométrica da peça, o bom estado da ferramenta, da máquina CNC e garantir a segurança contra danos pessoais. Os itens que interferem no tempo de estampagem são: a) o incremento vertical, em mm (que na usinagem é designado como “profundidade de corte” (a_p) e b) a velocidade de avanço, em mm/min. Na seqüência dos testes, estes itens foram sendo incrementados e, conseqüentemente, o tempo de cada um foi diminuindo. Com exceção do primeiro teste (cuja rotação do eixo árvore foi de 2000 RPM), a rotação foi zerada, deixando o eixo árvore livre, isto porque ficou constatado (através da observação das peças e de pesquisa bibliográfica) que o eixo árvore em rotação não contribuía nem para a melhoria do acabamento nem tampouco para decrescer o tempo de estampagem.

Esses três parâmetros exercem influência direta sobre o acabamento superficial e o tempo gasto para a conformação. Outras características foram mantidas inalteradas durante os três primeiros testes:

- forma geométrica e dimensional das chapas;
- o diâmetro e formato esférico da ferramenta;
- a estratégia de usinagem, responsável pela definição da trajetória da ferramenta, executada de forma helicoidal;
- lubrificação, feita com graxa (composto base: lítio);
- a velocidade do eixo Z, responsável pelo deslocamento do eixo árvore na direção da chapa.

5.1 Setup do Dispositivo

Antes de realizar o teste, é necessário fixar o dispositivo prensa chapas sobre a mesa XY da máquina CNC e executar o alinhamento dos eixos. A fixação deste dispositivo foi feita através de quatro parafusos e alinhado com relógio comparador, afim de deixar a parte superior do dispositivo alinhada com a mesa do centro de usinagem CNC (conforme mostrado na figura 33), permitindo desta forma centrar a ferramenta no centro do prensa chapas.

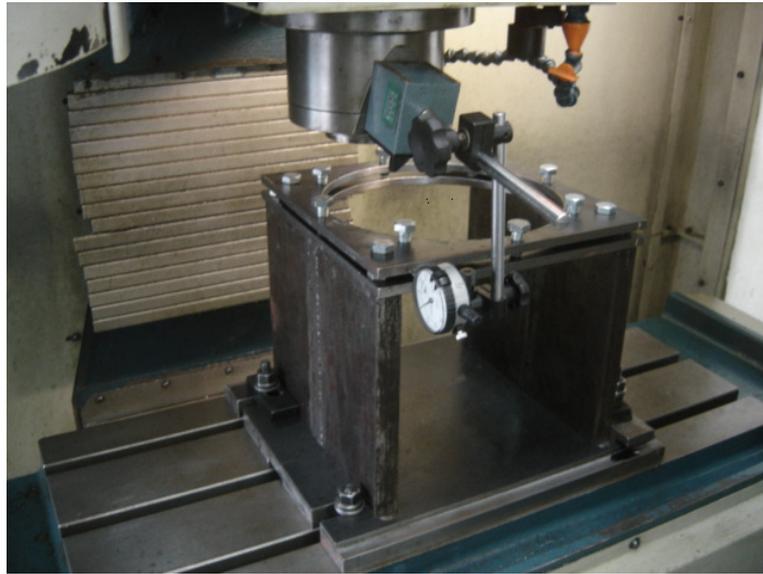


Figura 33: montagem do prensa chapas na maquina CNC.

5.2 Matéria-prima (*blank*)

A chapa plana é presa no dispositivo prensa-chapas através de oito parafusos, que pressionam uma placa de aperto, colocada sobre o *blank*. Desta forma a fixação torna-se mais uniforme e evita marcar a chapa a ser conformada. Os oito parafusos são apertados com a utilização do torquímetro, garantindo que o aperto seja uniforme em todos os parafusos. A chapa tem espessura inicial de 0.5mm e o formato da peça acabada tem o formato de um tronco de cone, com diâmetro maior de 240mm, diâmetro menor de 162mm, profundidade de estampagem (altura do cone) de 40mm e ângulo de inclinação de 45°.

5.3 Teste de Estampagem N° 01

Neste primeiro teste, foram ajustados alguns parâmetros do software CAM para gerar a trajetória de ferramenta. A descrição completa e os valores de cada um são listados no anexo 4: Descrição dos parâmetros do software CAM. A seguir são descritos os que exercem maior influência no tempo e acabamento superficial:

- *Mill Tipe:* é um parâmetro que determina a combinação entre sentido de rotação (horário / anti-horário) e a direção do corte, determinado um corte *concordante* ou *discordante*. A opção “climb” faz com que a ferramenta gire em sentido concordante à peça facilitando, no caso da estampagem incremental, seu deslizamento sobre a chapa;
- *Offset e Z Offset:* a estes parâmetros podem ser acrescentados valores (em mm) para atenuar as discrepâncias geométricas entre o modelo CAD e o produto final;
- *Feed rate, Plunge Feed e Speed:* avanço (em mm/min), avanço do eixo Z (mm/min) e rotação (RPM) respectivamente;
- *Cut Increment:* incremento de corte, conhecido na usinagem como a_p (profundidade de corte) que define o passo da ferramenta em Z;

A peça estampada no primeiro teste de estampagem é mostrada na figura 34, abaixo:

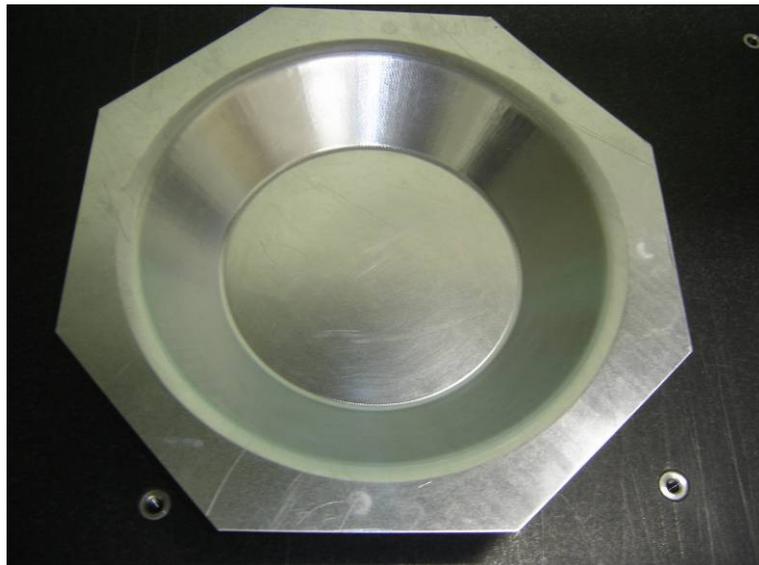


Figura 34: peça estampada

As dimensões coletadas na chapa estampada foram feitas em uma máquina de medição por coordenadas tridimensional, como mostra a figura 35:

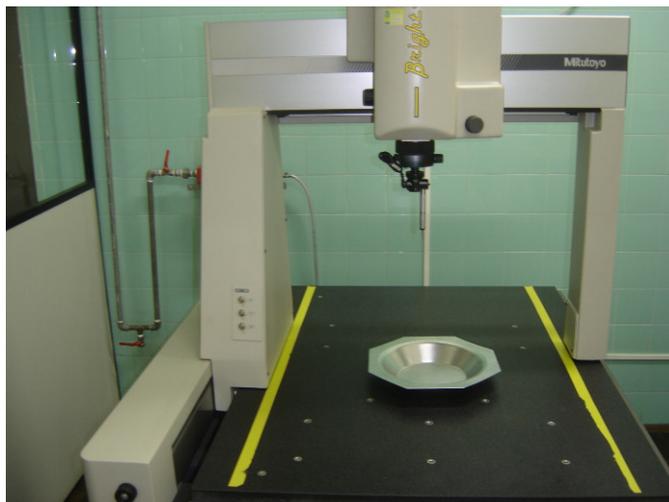
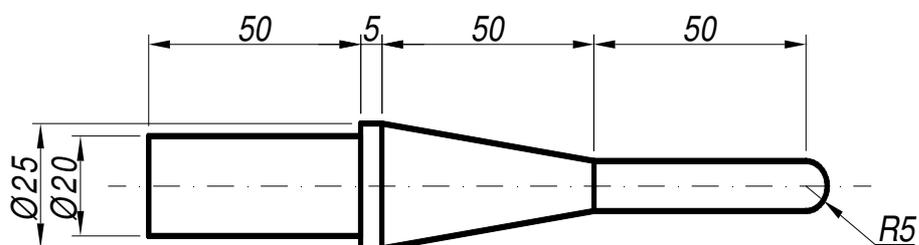


Figura 35: medição da chapa conformada.

Dados do teste 01:

- Ferramenta: \varnothing 10mm, ponta esférica (figura 36);
- Material da ferramenta: Aço 4340;
- Material da chapa: alumínio comercialmente puro (99,33% de Al);
- Profundidade da Superfície cônica: 40mm;
- Espessura da chapa: 0,5mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling);
- Profundidade de estampagem (passo vertical da ferramenta): 0,2mm;
- Avanço da mesa XY: 500 mm/min;
- Rotação do eixo árvore: 2000 RPM.



*Figura 36: ferramenta de estampagem incremental
Ferramenta utilizada no 1º teste de estampagem*

5.3.1 Análises Preliminares

Após o primeiro teste de estampagem, com o emprego de círculos impressos na chapa (figura 37), foi possível verificar a distribuição das deformações. De acordo com as análises realizadas, foi possível determinar as três deformações principais ocorridas na chapa e o índice de anisotropia. Os cálculos estão demonstrados a seguir:

a) *Dados iniciais:*

- Chapa do teste de estampagem nº. 01:
- Espessura inicial da chapa: 0,5mm
- Ø inicial (parte não estirada): 12,75 mm
- Ø parte estirada: 18,65 mm
- Medições obtidas na linha central da chapa, transversais ao sentido de laminação.

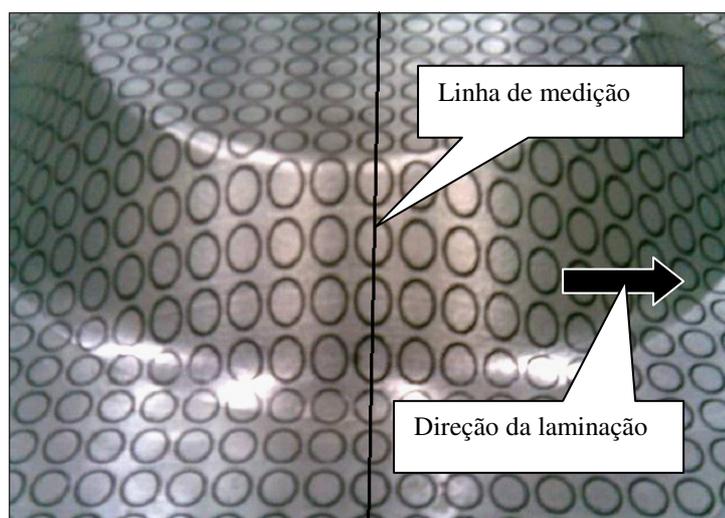


Figura 37: grade de círculos para a análise de visioelasticidade
A impressão dos círculos foi feita através da técnica de silk-screen (serigrafia)

b) *Equações::*

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad \varphi_2 = \ln \frac{l_2}{l_0} \quad \varphi_3 = \ln \frac{S_1}{S_0}$$

Onde:

φ_1 = deformação na direção do estiramento (adimensional);

φ_2 = deformação transversal ao estiramento (adimensional);

φ_3 = deformação na espessura da chapa (adimensional).

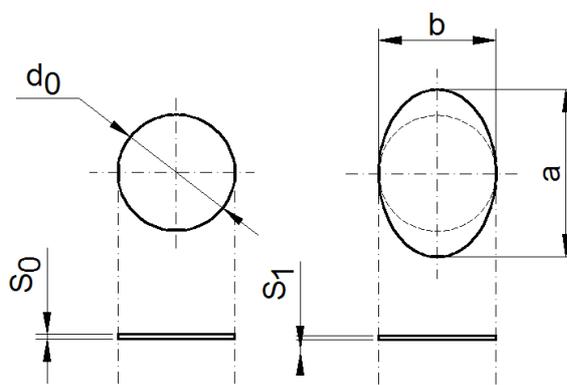
l_0 = dimensão inicial do corpo de prova;

l_1 = dimensão final do corpo de prova, na direção do estiramento;

l_2 = dimensão final do corpo de prova, transversal ao estiramento;

Fazendo a substituição para medições de círculo ficam as equações:

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{d_0} \quad \varphi_2 = \ln \frac{b}{d_0} \quad \varphi_3 = \ln \frac{S_1}{S_0}$$



Onde:

d_0 = diâmetro inicial do círculo impresso (chapa plana);

S_0 = área inicial da seção transversal da chapa (antes do estiramento);

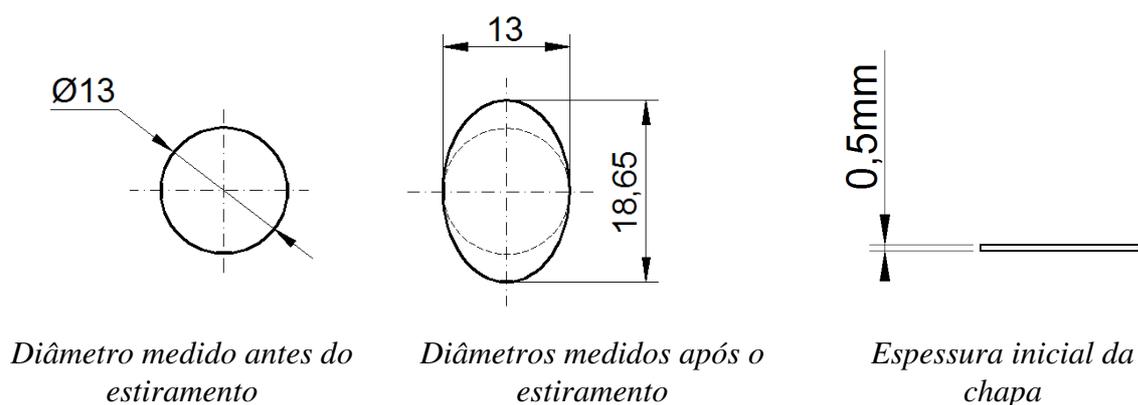
b = diâmetro do círculo impresso, transversal à direção de estiramento;

a = diâmetro do círculo impresso, longitudinal à direção de estiramento;

S_1 = área final da seção transversal da chapa (após o estiramento);

c) Cálculo das deformações:

Medições realizadas:



$$\varphi_1 = \ln \frac{18,65}{13} = 0,15 \quad \varphi_2 = \ln \frac{13}{13} = 0 \quad \varphi_3 = -0,15$$

Como $\varphi_2 = 0$ então trata-se de deformação plana, conforme a figura 38:

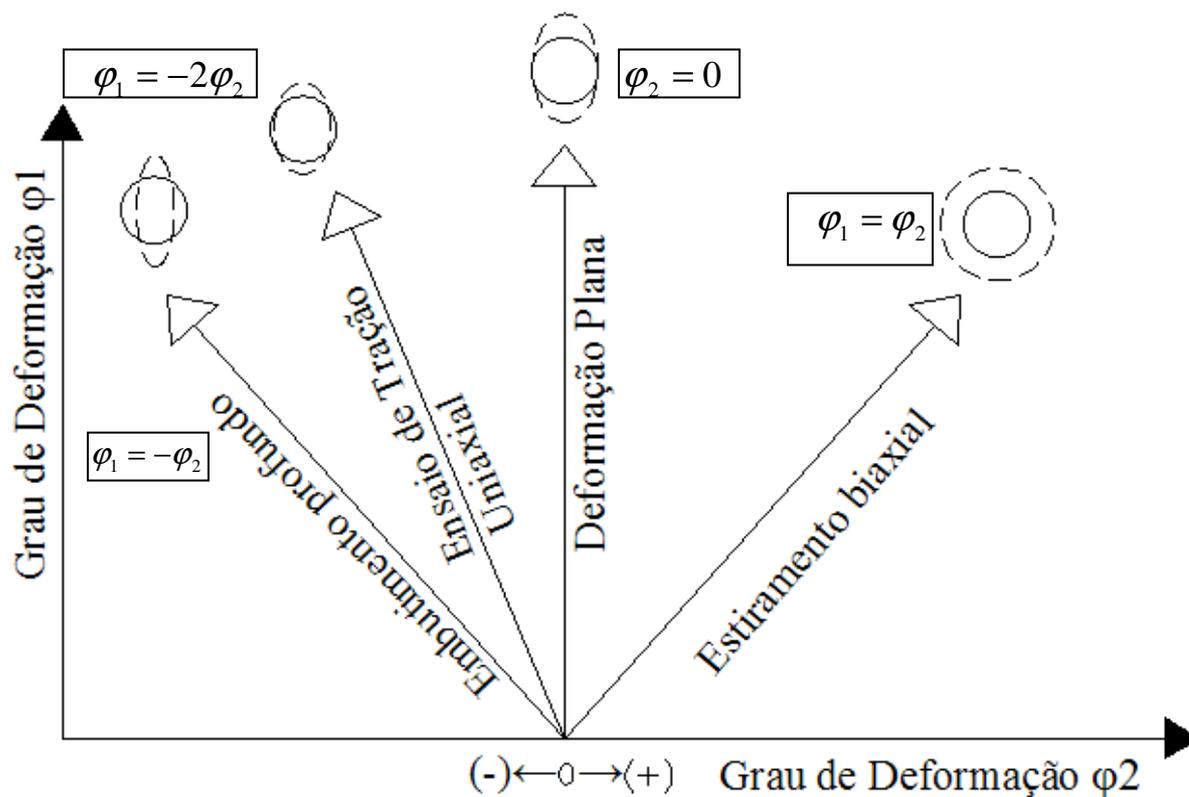
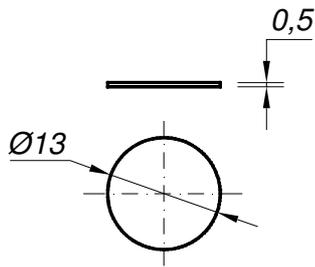


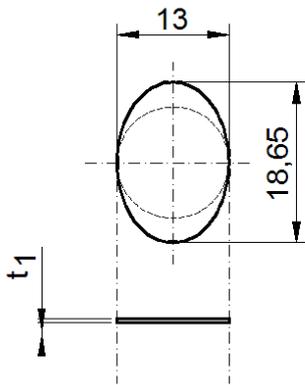
Figura 38: tipos de deformação de chapas metálicas [8]
Deformação em diferentes posições em uma linha de peça estampada.

- Cálculo da área inicial S_0 :



$$S_0 = 13 \times 0,5 = 6,5 \text{ mm}^2$$

- Cálculo da espessura final t_1 da peça:



$$\varphi_3 = \ln \frac{S_1}{S_0}$$

$$-0,15 = \ln \frac{18,65}{6,5} * t_1$$

$$S_1 = 18,65 * t_1$$

$$e^{-0,15} = \frac{18,65}{6,5} * t_1$$

$$t_1 = 0,30 \text{ mm}$$

- Cálculo da deformação equivalente:

$$\varphi_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2}$$

$$\varphi_{eq} = 0,2449$$

Pode-se notar uma correspondência entre os valores obtidos através de processos diferentes, sendo o primeiro pela lei de constância de volume $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$ e outro pela lei

dos senos $t_1 = t_0 * \text{sen}(90 - \alpha)$, havendo uma pequena variação, de 0,053mm entre um cálculo e outro. Isso demonstra a validação da lei dos senos para chapas de alumínio puro (99,33 % Al), com espessura inicial de 0,5mm:

$$t_0 = t_1 * \text{sen}(90 - \alpha)$$

$$0,5 = t_1 * \text{sen}(90 - 45)$$

| |
|-----------------|
| $t_1 = 0,353mm$ |
|-----------------|

d) Cálculo do índice de anisotropia (r):

Durante o processo de estampagem por estiramento, ocorre a deformação da microestrutura e se originam grãos mais alongados na direção da laminação. Esta característica provoca uma heterogeneidade nas propriedades das chapas. A quantificação do efeito desta deformação é realizada pelo “índice de anisotropia” (r). O índice de anisotropia “r” é definido como a razão entre as deformações principais na direção da largura (φ_b) e a deformação na espessura (φ_s)[8]:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s}$$

A anisotropia apresenta valores diferentes, que dependem de como os corpos de prova são cortados em relação à direção em que o material foi laminado. A laminação modifica a orientação da estrutura cristalina dos grãos que compõem o material. O índice de anisotropia “r” mostra o quanto um material é heterogêneo ou não em função da direção da laminação. A realização do ensaio para a determinação do índice de anisotropia é realizado normalmente em dois ou três locais diferentes do corpo de prova, efetuando-se, posteriormente, os cálculos com um valor médio das larguras [8].

Nos experimentos práticos foram utilizadas chapas de alumínio laminado (chapas planas) com 0,5 mm de espessura. Através dos ensaios de tração, foram obtidos os valores de anisotropia, de acordo com o sentido de laminação da chapa:

$$R_0 = -1,0553601 \quad , \quad R_{45} = -1,3384111, \quad R_{90} = -1,9588964.$$

O valor médio desta propriedade foi definido através da equação:

$$r_m = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) = -1,4227697$$

5.3.2 Resultados

O tempo de estampagem da primeira peça foi alto: 02:48:30 (hh:min:seg), considerando que para as peças subseqüentes houve uma redução considerável. Com relação à correspondência entre o modelo CAD e a peça real, houve uma variação média de $\pm 0,7$ mm. Essa variação foi obtida através da medição de pontos cartesianos da peça em uma máquina de medir por coordenadas, mostrada na figura 35. Comparou-se as coordenadas X,Y e Z de pontos aleatórios da peça com os pontos correspondentes do modelo CAD. Somaram-se as diferenças e efetuou-se a média aritmética para chegar ao valor de $\pm 0,7$ mm.

5.4 Teste de Estampagem N° 02:

No 1º teste de estampagem foi verificado que o sistema de fixação por parafusos diretamente sobre a chapa (*blank*) marcava e deformava a peça, prejudicando o resultado final e a comparação de dimensões entre o modelo CAD e a peça real. Assim, no segundo teste de estampagem foi incluído no dispositivo um anel de chapa de aço com 5mm de espessura. Este anel é colocado entre o *blank* e os parafusos de aperto, distribuindo melhor a força de compressão e melhorando o aspecto e a geometria final da peça.

Foram alterados os seguintes parâmetros:

- O incremento vertical (eixo Z) da ferramenta, que era de 0,2mm, foi aumentado para 0,5mm;
- A velocidade de avanço dos eixos X e Y (mesa da máquina) foi aumentada para 1000 mm/min;
- A rotação (RPM) foi zerada (0 RPM);
- A estratégia de estampagem foi mantida na forma helicoidal. Esta estratégia gera uma trajetória que mantém a ferramenta em contato constante com a chapa, evitando entradas e saídas de ferramenta, típicas nos processos de usinagem. A desvantagem desta trajetória é que os arcos de deslocamento são gerados ponto a ponto, formando assim milhares de coordenas XYZ para definir apenas um caminho. Esta característica é uma limitação do comando da máquina CNC utilizada para o teste;
- A ferramenta foi substituída por uma de metal duro com ponta esférica (ver figura 39), diâmetro de 10mm e comprimento útil de 80mm.



Figura 39: nova ferramenta utilizada no ensaio

Resumo dos dados do teste No. 02:

- Tempo total de estampagem: 00:50:30
- Ferramenta: \varnothing 10mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: metal-duro, classe K;
- Material da chapa: alumínio comercialmente puro (99,33% de Al);

- Profundidade da Superfície cônica: 40mm;
- Espessura da chapa: 0,5mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling);
- Profundidade de estampagem (passo vertical da ferramenta): 0,5mm;
- Avanço da mesa XY: 1000 mm/min;
- Rotação do eixo árvore: 0 RPM.

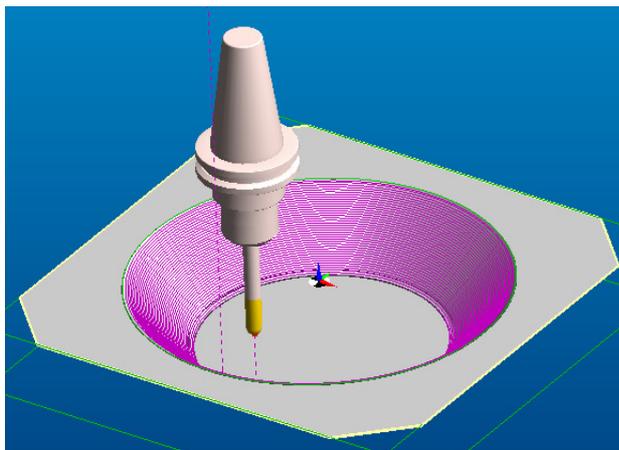
5.5 Teste de Estampagem N° 03:

Dados do teste:

- Tempo total de estampagem: 00:35:30
- Ferramenta: \varnothing 10mm, ponta esférica (ball nose);
- Material da ferramenta: metal-duro, classe K;
- Material da chapa: alumínio comercialmente puro (99,33% de Al);
- Profundidade da Superfície cônica: 40mm;
- Espessura da chapa: 0,5mm;
- Tipo de estratégia: Acabamento (Profiling), com deslocamento helicoidal e contato constante e ininterrupto entre a ferramenta e a chapa (blank);
- Incremento vertical: 0,75 mm;
- Avanço (deslocamento interpolando X, Y e Z): 1000 mm/min;
- Rotação da ferramenta: 0 (zero). O eixo árvore permaneceu livre durante o ensaio.

5.6 Resumo dos Testes de Estampagem

No total foram realizados 09 testes de estampagem incremental. Para cada teste prático, antes eram geradas as simulações gráficas para detectar a existência de possíveis colisões, imperfeições geométricas e análise de dimensões da peça acabada, como demonstrado na figura 40. Na tabela 4 podem ser vistos os dados resumidos de todos eles, onde as linhas trazem as informações do processo e as colunas indicam a seqüência dos testes. Em destaque os parâmetros que foram alterados: avanço dos eixos X e Y, em mm/min e o incremento vertical, em mm.

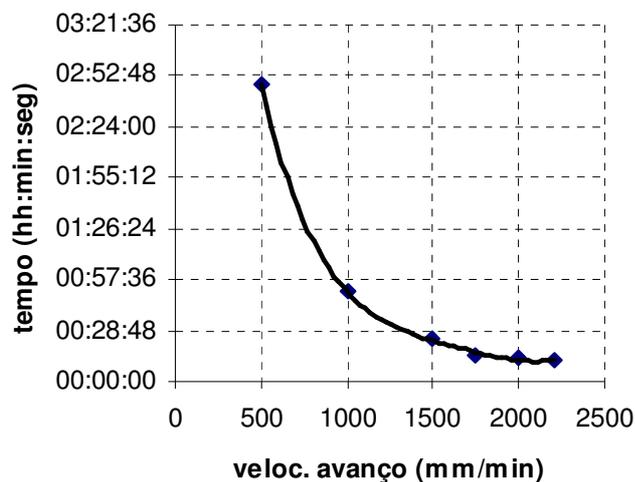


*Figura 40: simulação CAM
Simulação de deslocamento de ferramenta realizada em software CAM
originalmente desenvolvido para usinagem..*

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Ferramenta: | Ø 10mm, ponta esférica | Ø 10mm, ponta esférica | Ø 10mm, ponta esférica | Ø 10mm, ponta esférica | Ø 10mm, ponta esférica | Ø 10mm, ponta esférica | Ø 10mm, ponta esférica | Ø 10mm, ponta esférica | Ø 10mm, ponta esférica |
| Material da ferramenta: | Aço 4340 | Metal duro |
| Material da chapa: | alumínio | alumínio | alumínio | alumínio | alumínio | alumínio | alumínio | alumínio | alumínio |
| Profundidade da Superfície cônica: | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Espessura da chapa: | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Tipo de estratégia: | Acabamento (Profiling), com deslocamento helicoidal | Profiling |
| Incremento vertical (mm): | 0,2 | 0,5 | 0,75 | 1,00 | 0,75 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Avanço: deslocamento interpolando X, Y e Z, em mm/min | 500 | 1000 | 1000 | 1000 | 1500 | 1500 | 1750 | 2000 | 2200 |
| Ângulo de parede | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Rotação da ferramenta: | 2000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tempo total de estampagem: (hh:min:seg) | 02:48:03 | 00:50:30 | 00:35:30 | 00:25:58 | 00:24:02 | 00:17:22 | 00:14:55 | 00:13:05 | 00:11:54 |

Tabela 4: testes de estampagem

As figuras 41 e 42 apresentam, respectivamente, os gráficos referentes à velocidade de avanço em função do tempo e velocidade de avanço em função da rugosidade, utilizando os dados dos testes realizados.



*Figura 41: gráfico da velocidade de avanço em função do tempo
Nota-se uma grande redução do tempo com o aumento da velocidade de avanço*

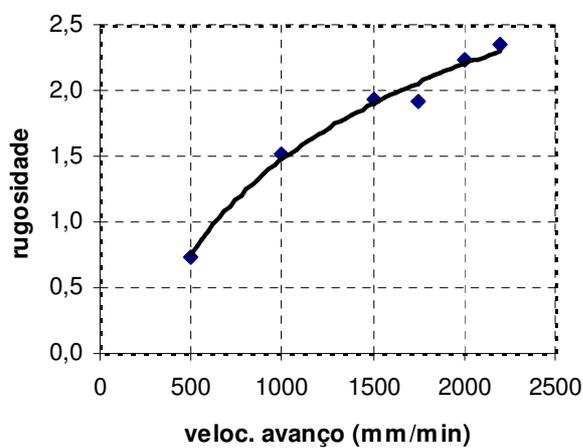


Figura 42: gráfico da velocidade de avanço em função da rugosidade

Nas figuras 43 e 44 são apresentados os gráficos que relacionam o incremento vertical com o tempo e a rugosidade da chapa:

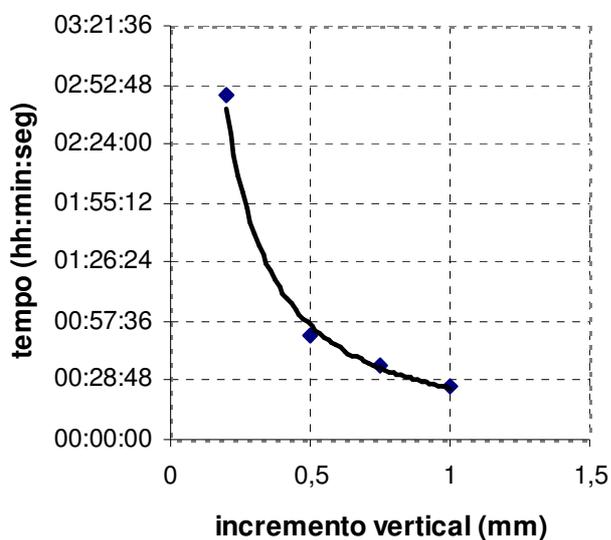


Figura 43: variação do tempo em função do incremento vertical

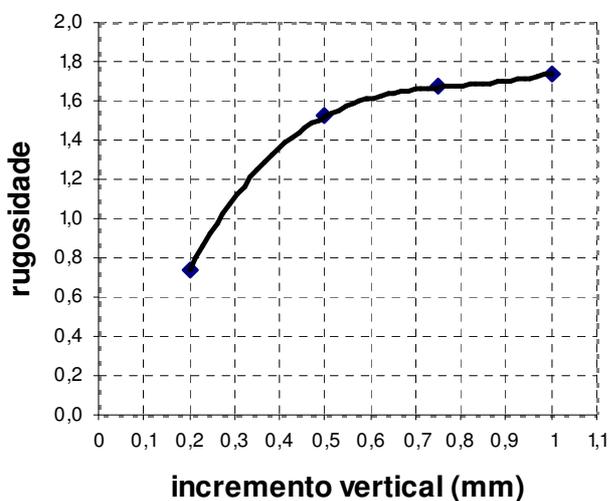


Figura 44: variação da rugosidade em função do incremento vertical

Pode-se observar que os parâmetros “velocidade de avanço” e “incremento vertical” interferem diretamente nos valores de tempo utilizado e rugosidade superficial. Como estes valores são antagônicos, pode-se utilizar diferentes taxas de avanço e incremento, dependendo do tipo de aplicação comercial. Se o produto final é mais rústico e necessita-se uma quantidade razoável de peças, então se dará prioridade para a diminuição do tempo em

detrimento do acabamento superficial. Por outro lado, para peças das quais se necessitam poucas unidades, com uma tolerância dimensional menor e que necessitam de um melhor aspecto visual, pode-se utilizar mapas de parâmetros que otimizam o acabamento, em prejuízo do tempo de manufatura.

Nos 09 testes realizados, a estratégia em passes helicoidais da ferramenta fez com que o pós-processador (aplicativo do software CAM que transforma os caminhos de ferramenta em códigos “G”) gerasse milhares de linhas de programação G1. A função G1 é utilizada para determinar trajetórias lineares, através das coordenadas X, Y e Z, sendo que o tronco de cone modelado no software CAD apresenta geometria perfeitamente cilíndrica em sua seção transversal. Assim, o pós-processador, ao invés de gerar poucas funções G3, responsáveis pela geração de trajetórias em arco anti-horário, divide cada curva incremental em diversos segmentos de reta, gerando para cada um destes, uma linha de programação. Como sempre se busca aumentar a velocidade de avanço para diminuir o tempo de estampagem, ocorre o problema de vibração em todo o conjunto CNC, pelo contínuo funcionamento interpolado dos motores de passo, responsáveis pelos eixos X e Y. Têm-se outras alternativas como, por exemplo, gerar passes em forma de círculo plano, sendo o incremento no eixo Z aplicado somente ao final de cada círculo completo. Isto geraria poucas linhas de programação, incluindo a função G3. Se considerarmos que a profundidade dos modelos gerados em CAD nos 03 primeiros testes é de 40mm e que o incremento vertical é de 1mm teríamos 40 linhas de programação de translação de eixos, mais as funções de cabeçalho de programa e demais funções miscelâneas. Dessa forma, o deslocamento dos eixos se daria de forma mais suave, provocando menor vibração; o tempo de manufatura também seria menor e o acabamento superficial teria menor índice de rugosidade. Porém, apesar de todas essas vantagens, a trajetória em passes planos tem o inconveniente de marcar a peça no início e fim de cada incremento, pois a ferramenta executa a saída e re-entrada na chapa, já com o incremento de 1mm em Z. Isto não ocorre com a trajetória helicoidal já que o contato entre ferramenta e chapa é constante, distribuindo o incremento vertical durante todo o percurso circular da ferramenta.

Além destes 09 testes, onde foi mantido o mesmo formato (esférico) e diâmetro (10mm) da ferramenta de estampagem e as mesmas dimensões e forma geométrica da peça (tronco de cone), mais seis testes foram realizados. Nos três primeiros foi alterada a forma

geométrica da peça, com a finalidade de verificar até que ângulo de parede era possível estampar sem romper a chapa. Nos três últimos foram utilizadas ferramentas de diâmetros diferentes, com o objetivo de verificar a possibilidade de diminuir ainda mais o tempo de estampagem, sem comprometer a qualidade da peça.

5.7 Testes de Estampagem Variando a Forma Geométrica das Peças

Nesta bateria de testes o objetivo foi o de alterar a forma geométrica para verificar o máximo ângulo de parede das peças, conforme ilustrado na figura 45:

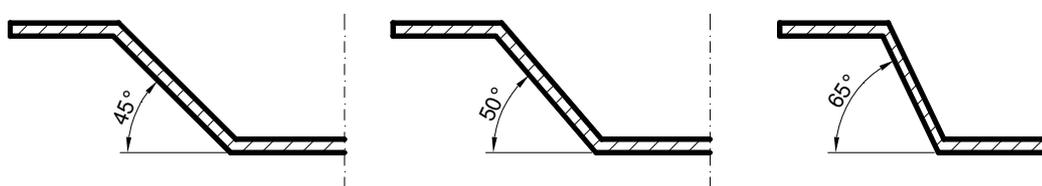


Figura 45: ângulos de parede

Quantidade de testes: 03

Parâmetros mantidos (software):

Velocidade de avanço: 1.500 mm/min;

Incremento vertical: 1mm;

Ferramenta;

Estratégia Helicoidal;

Demais parâmetros ajustáveis do software

Parâmetros alterados (geometria da peça):

Ângulo de inclinação de parede (45, 50 e 65°);

Profundidade do cone: 80mm;

Perfil axial da chapa.

Resultados:

Ficou constatado que ângulos acima de 65° causam o rompimento da chapa (lei dos senos) e deformam drasticamente a peça, tornando-a assimétrica e com grandes variações dimensionais em relação ao modelo CAD, como mostra a figura 46:



Figura 46: peça estampada com ângulo de parede de 65°. Grandes deformações causadas pelo acúmulo de tensões residuais e rompimento da chapa causado pela drástica diminuição da espessura da chapa durante o estiramento.

5.8 Testes de Estampagem Variando o Diâmetro das Ferramentas

Na terceira bateria de testes, foram utilizadas ferramentas semi-esféricas de diâmetros 10, 15 e 20mm. Os demais parâmetros, tais como velocidade de avanço (1500 mm/min), profundidade de estampagem (1 mm) e estratégia helicoidal foram mantidos. O objetivo era medir o tempo e a rugosidade produzida por cada ferramenta e comparar estes valores com os obtidos nos ensaios anteriores.

Observando atentamente o gráfico exposto na figura 47, onde são apresentados os resultados comparativos dos três testes entre as ferramentas e o tempo gasto em cada um, pode-se notar que as diferenças entre os tempos das ferramentas de 10, 15 e 20mm não são iguais. Enquanto o tempo total da ferramenta Ø10 é de 18min 42s, os tempos das ferramentas Ø15 e Ø20 são, respectivamente, 17min 38s e 17min 27s. Esperava-se que os intervalos entre os tempos fossem iguais, mas isto não ocorre devido às diferentes medidas de tangência entre as ferramentas e as chapas, como demonstrado na figura 48:

Ferramenta / Tempo

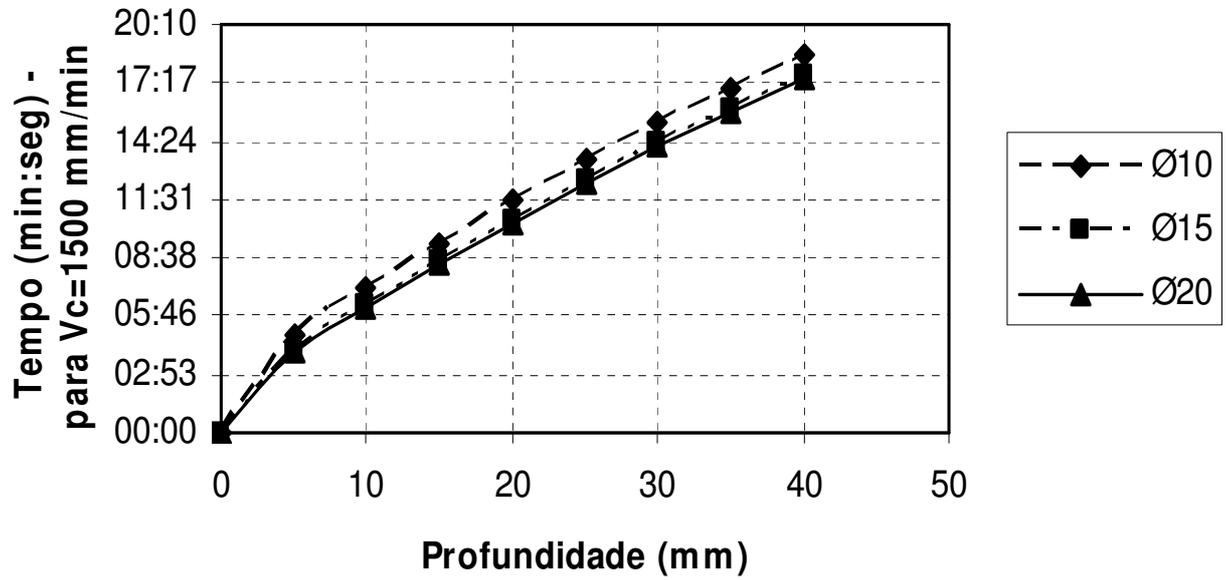


Figura 47: gráfico ferramenta em função do tempo

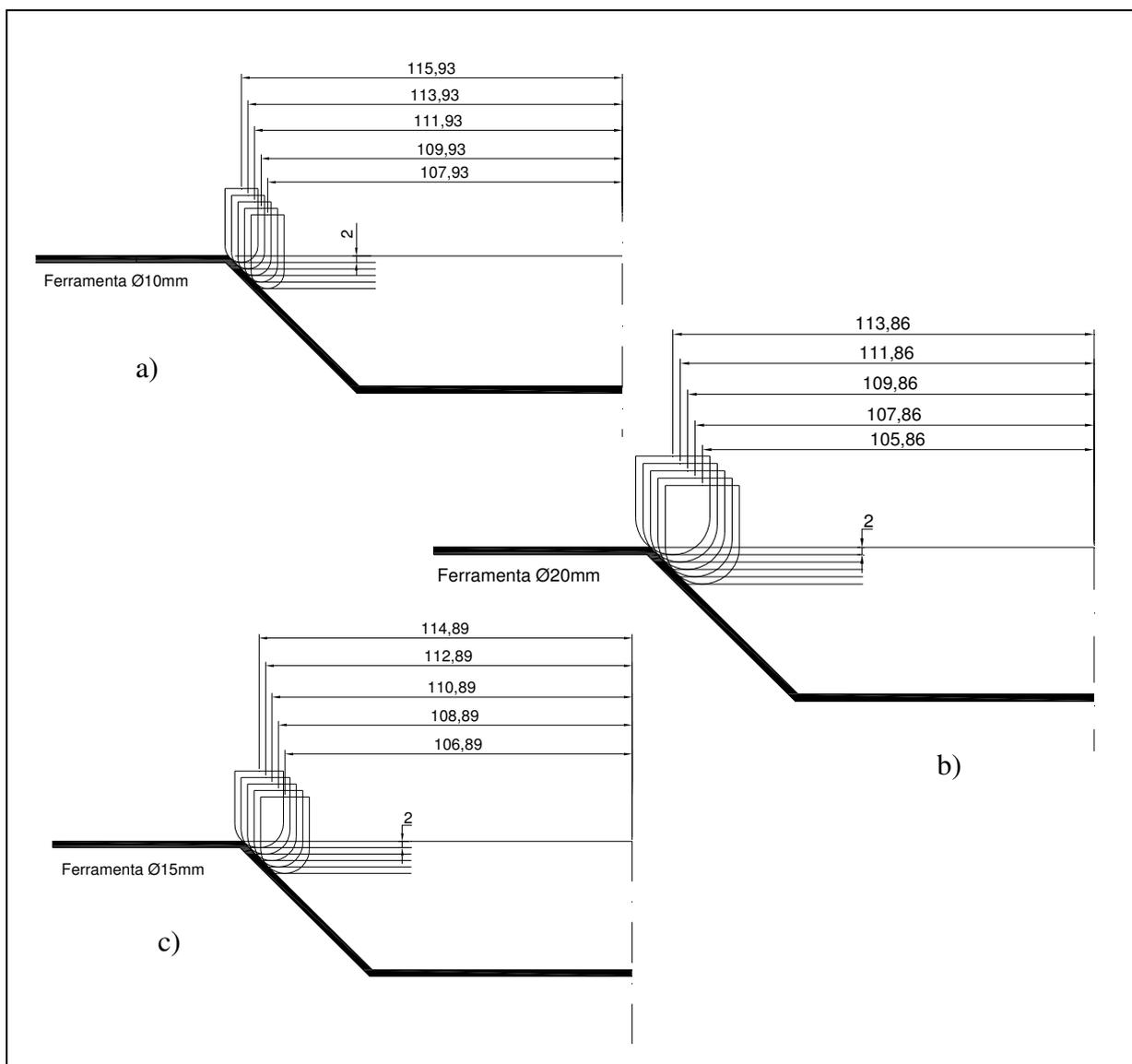


Figura 48: cotas radiais das ferramentas

As figuras 48a, 48b e 48c mostram que a relação entre os raios de translação das ferramentas não é uniforme, devido aos diferentes pontos de tangência.

As cotas radiais irão determinar os perímetros (caminhos percorridos) de cada ferramenta. Como a velocidade de avanço é constante (1.500 mm/min), o tempo de cada passe é determinado pela retificação da distância de cada trajetória circular helicoidal. Maiores detalhes podem ser conferidos no Anexo 3 – Tabelas de Tempo e Rugosidade em função do Diâmetro das Ferramentas.

Analisando as figuras 47 e 49, pode-se concluir que, dependendo do resultado esperado, deve-se escolher entre uma ou outra ferramenta. Percebe-se, por exemplo, que se o

desejo for obter o produto no menor tempo possível, a ferramenta com 20mm de diâmetro é a mais indicada. Porém, é necessário considerar as limitações geométricas impostas pelo seu raio e também a maior rugosidade superficial obtida em função do maior diâmetro. Se o objetivo é atingir um valor de rugosidade baixo, então deve-se optar pela ferramenta de diâmetro 10mm. A ferramenta de 15mm ficaria como alternativa entre os dois casos. As medições de rugosidade são detalhadas na tabela 5. A figura 48 mostra o gráfico da rugosidade em função do diâmetro das ferramentas utilizadas.

| MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA FERRAMENTA | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Ferramenta (Ømm) / Rugosidade (µm) | | | | |
| Ø10 | | | | |
| Veloc. Avanço (mm/min) | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média |
| 1500 | 1,24 | 0,51 | 0,32 | 0,69 |
| Ø15 | | | | |
| | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média |
| 1500 | 0,74 | 0,90 | 0,97 | 0,87 |
| Ø20 | | | | |
| | Medição 1 | Medição 2 | Medição 3 | Média |
| 1500 | 1 | 2,61 | 0,67 | 1,43 |

Tabela 5: valores de rugosidade de acordo com os diâmetros de ferramenta

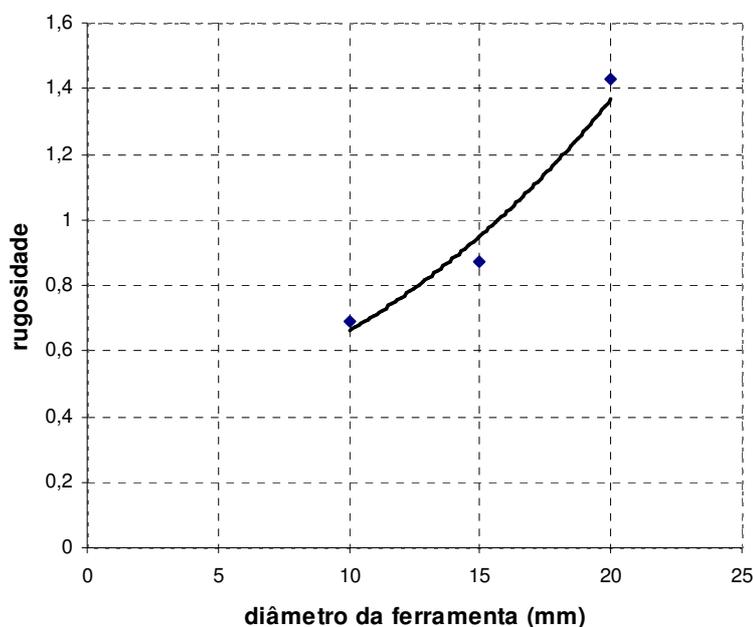


Figura 49: gráfico de rugosidade em função do diâmetro das ferramentas

Esperava-se que a ferramenta com maior diâmetro produzisse um melhor acabamento, porém, devido à maior área de contato entre esta ferramenta e a chapa, houve maior esforço da máquina CNC no trabalho de conformação. Esse maior esforço provocou vibrações em todo o conjunto (máquina, ferramenta, chapa e dispositivo prensa-chapas), o que explica a maior rugosidade da chapa estampada com a ferramenta de 20mm.

6 CONCLUSÕES

De acordo com as características e limitações do equipamento CNC utilizado para estampagem incremental de chapas de alumínio série 1000 de 0,5mm de espessura, velocidades de avanço acima de 2.200 mm/min causam vibração excessiva. Por outro lado, o incremento vertical de 1mm foi utilizado como valor máximo, pois não foi verificado a força ocasionada pela resistência da chapa à conformação. Além disso, quanto maior o incremento, pior o acabamento.

Com relação ao estado geral das peças estampadas incrementalmente, fica bem visível seu encruamento (“casca de laranja”) e há uma razoável conformidade geométrica entre o modelo CAD e a peça real.

Com relação à viabilidade comercial, pode-se considerar que, para o tipo de peça produzida (material alumínio série 1000, espessura de 0,5mm e geometria no formato tronco de cone, com diâmetro maior de 295mm, ângulo de parede de 45° e profundidade de 40mm), o processo incremental seria viável para lotes de até 600 peças, conforme demonstrado na figura 50, utilizando o modelo de TIBURI [15]:

Custos por peça

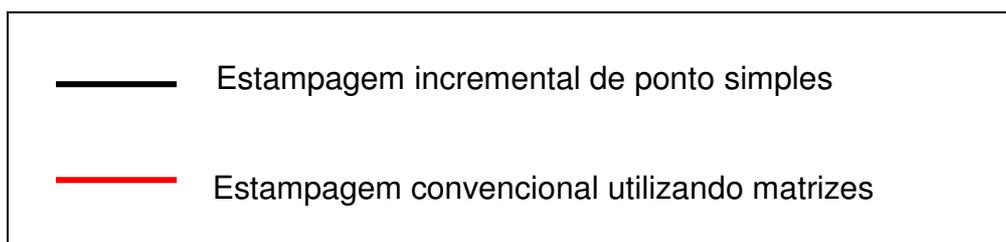
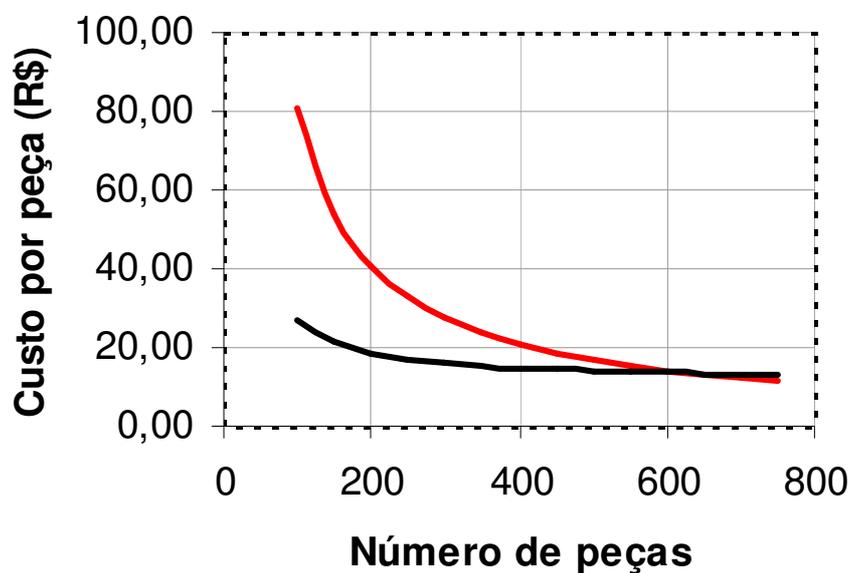


Figura 50: viabilidade econômica da ISF

Custos considerados:

- Ferramental (matrizes)
- Ferramental (prensa-chapas + ferramenta semi-esférica)
- Hora-máquina (prensa)
- Hora-máquina (Centro de usinagem)
- Custo unitário de matéria-prima

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A Estampagem Incremental de Chapas (ISF) é, atualmente, um processo de conformação mecânica viável para produção de pequenos lotes, peças personalizadas, protótipos experimentais e peças que mudam constantemente sua forma geométrica em curtos espaços de tempo e em quantidades reduzidas. Para aumentar o seu espectro comercial, se faz necessário desenvolver soluções que o viabilizem economicamente, permitindo sua aplicação em escala industrial. Neste caso, um dos grandes desafios é o tempo gasto em cada unidade produzida, já que em um processo de estampagem convencional, poucos segundos são necessários para a conformação. Chega-se a conclusão de que será necessário utilizar altas taxas de avanço dos eixos X, Y, e Z e isto implica em identificar os limites máximos relacionados às características mecânicas de ferramentas de conformação e da chapa

As vantagens relacionadas ao baixo custo das ferramentas se aplicam principalmente às variações de ponto simples e ponto duplo. Nos processos onde são utilizados matrizes positivas ou negativas, há que se considerar algum custo adicional para sua confecção, mesmo sendo de execução mais simples do que um molde convencional de estampagem, além da perda da flexibilidade em gerar produtos diferentes com o mínimo de alterações de ferramental. Pode-se prever, então, alternativas para baratear e manter a flexibilidade, utilizando matrizes montáveis em diferentes configurações, compostas por peças de geometria básica que, através da sua combinação, podem gerar diferentes produtos.

Com relação à adaptação dos centros de usinagem para a ISF, têm-se alguns aspectos a considerar:

- O eixo-árvore de um equipamento CNC não foi projetados para suportar grandes esforços normais ao seu plano de trabalho, ou seja, sobre o eixo Z. Portanto, será necessário quantificar a força de estampagem aplicada na realização do processo, para não danificar o equipamento;
- Máquinas CNC não possuem equipamentos que possam medir as forças que estão atuando sobre cada eixo;
- A estrutura rígida do Centro de Usinagem não permite a manufatura de peças dentro de certas limitações geométricas.

. Como considerações finais, ainda pode-se salientar algumas vantagens da estampagem incremental:

- Geometrias complexas que necessitariam moldes com alto custo podem ser obtidas com a ISF, a custos bem menores, por não utilizar conjunto de moldes no seu processo;
- Protótipos e peças experimentais podem ser produzidas com os materiais e métodos reais, e assim serem testados como produtos reais;
- Estratégias CAM para usinagem são perfeitamente aplicáveis à estampagem incremental para gerar os deslocamentos de ferramenta;
- Flexibilidade na variação geométrica do produto e a utilização de ferramental de baixo custo;
- Menor consumo de energia, se comparado ao consumo das máquinas de estampagem, que necessitam dispensar centenas de toneladas-força para gerar cada produto;

8 SUGESTÕES

Além das alterações de avanço, estratégia de movimentação de ferramenta e incremento vertical, que foram pesquisadas e utilizadas nesta dissertação, outras variáveis podem ser alteradas. O tipo de fluido lubrificante, formas de entrada e saída de ferramenta e sentido de corte, entre outros, combinados com diferentes materiais e perfis de ferramentas, possibilitam a geração de uma série de alternativas, dentre as quais deve-se escolher aquela que melhor se ajuste aos objetivos propostos.

Uma outra interessante linha de pesquisa em projetos futuros seria a de adaptação da tecnologia HSM (*High Speed Machining*) – Usinagem em Altas Velocidades – no processo ISF, visando a diminuição do tempo unitário de produção e, conseqüentemente, o aumento do volume do lote comercialmente viável.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J.KOPAC, Z. CAMPUS. **Incremental sheet metal forming on CNC-milling machine tool.** Journal of Materials Processing Technology, n. 162-163, p. 622-628. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia, 2005.
2. A. ATTANASIO¹, E. CERETTI¹, C. GIARDINI². **Optimization of tool path in two points incremental forming.** Journal of Materials Processing Technology, n. 177, p. 409–412, 2006.
¹Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Brescia, Italy
²Università di Bergamo, Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, Dalmine, Italy
3. JACSON, K. P.; ALLWOOD, M. **Incremental sheet forming research at cambridge University.** Institute for Manufacturing – University of Cambridge, Mill Lane, Cambridge, U.K., [2006?]
4. RODRIGUES, J. e MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica.** Vol. 1 e 2. [S.l.], Escolar Editora, 2005.
5. MICARI, F.; AMBROGIO, G.; FILICE, L. **Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends.** Journal of Materials Processing Technology, 2007.
6. HIRT, G.; JUNK, S.; BAMBACH, M.; CHOUVALOVA, I.; AMES, J. **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation.** Institute of Materials Technology / Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany, 2005.
7. J. R. DUFLOU; B. LAUWERS; J. VERBERT; Y. TUNCKOL, H. DE BAERDEMAEKER. **Achievable Accuracy in Single Point Incremental Forming: Case Studies.** Katholieke Universiteit Leuven – Department of Mechanical Engineering, Belgium, [2005?].
8. SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
9. DUFLOU, J. R.; SZEKERES, A.; VANHERCK, P. **Force measures for single point incremental forming: an experimental study.** Katholieke Universiteit Leuven – Department of Mechanical Engineering, Belgium, 2005.
10. SHIM, M.; PARK, J. **The formability of aluminium sheet in incremental forming.** Journal of Materials Processing Technology 113, p. 654-658. Department of Mechanical and system Design Engineering, Hong-Ik University, Seoul, South Korea, 2001.
11. CERETI, E.; GIARDINI, C.; ATANASIO, A. **Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines.** Journal of Materials Processing Technology, n. 152, p. 176–184. Department of Mechanical Engineering, University of Brescia, Italy, 2004.

12. SKA. **EdgeCAM**. Disponível em: <<http://skarenderworks.com.br/edgecam>>. Acesso em: 20 março 2007.
13. BAMBACH¹ M.; AMES¹ J.; AZAOUZI³ M.; CAMPAGNE³ L.; HIRT² G.; BATOZ³ J. L. **Initial experimental and numerical investigations into a class of new strategies for single point incremental sheet forming (SPIF)**. Institute of Materials Technology, Saarland University, Germany, 2004.
14. HIRT, G.; AMES, J. **Environmental and Economic Benefits of CNC incremental Sheet Forming for Prototyping and Low Volume Production of Sheet Components**. 9th International Workshop on Ecology and Economy in Manufacture, ICEM 2003, 18-21, Mislock, Hungary. Saarland University, Germany, 2003.
15. TIBURI, F.; SHAEFFER, L. **Aspectos técnicos e econômicos da estampagem incremental**. In: X Conferência Nacional de Conformação de Chapas (XVII SENAFOR), Bento Gonçalves, RS, p. 255-275, 2007.
16. HUSSAIN¹ G.; DAR² N. U.; GAO¹ L.; CHEN¹ M. H. **A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming**. Journal of Materials Processing Technology p. 187–188, 2007.
¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, PR China
²College of Mechanical Engineering, University of Engineering & Technology, Taxila, Pakistan
17. ALLWOOD¹ J. M.; BRAMLEY² A. N.; RIDGMAN¹ T. W.; MILEHAM² A. R. **A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming**. Proc. IMechE Vol. 220 Part B: J. Engineering Manufacture, 2005
¹Institute for Manufacturing, University of Cambridge, Cambridge, UK
²Department of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath, UK
18. MCLOUGHIN, K. **Institute of Technology Tallaght**. Imagem extraída da Internet. Disponível em <<http://www.irishscientist.ie>>. Acesso: 12 julho 2005.
19. HIRT, G.; BAMBACH, M.; CHOUVALOVA, I. e AMES, J. **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation**. Institute of Materials Technology / Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany, 2005
20. ABAL. **Propriedades Mecânicas do Alumínio**. Disponível em <http://www.abal.org.br/aluminio/propriedades_mecanicas.asp>. Acesso: 05 abril 2007
21. ABAL. **Propriedades Mecânicas do Alumínio**. Disponível em <http://www.abal.org.br/aluminio/propriedades_mecanicas.asp>. Acesso: 02 junho 2007
22. SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre: 2004
23. SCHAEFFER, L. **Conformação dos Metais**. Ed. Rigel, Porto Alegre, 1995.

24. ABAL. **Propriedades Mecânicas do Alumínio**. Disponível em <http://www.abal.org.br/aluminio/propriedades_mecanicas.asp>. Acesso: 07 agosto 2007
25. ABAL. **Curvas Tensão x Deformação para Aço doce e Alumínio**. Disponível em <<http://www.cpgec.ufrgs.br/alex/Disciplinas/ENG01169>>. Acesso em: 08 agosto 2007
26. ESPINOZA, M.; SCHAEFFER, L. **Uso do CAD/CAM/CAE na produção de matrizes para os processos novos de conformação mecânica**. Revista Del Instituto de Investigación FIGMMG. V. 7, n. 14, p. 84-91, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2004.
27. KOUZELI, M.; WEBER, L.; SAN MARCHI, C.; MORTENSEN, A. **Influence of damage on the tensile behaviour of pure aluminium reinforced with 40 vol. pct alumina particles**. Laboratory for mechanical metallurgy, école polytechnique fédérale de lausanne, 1015 lausanne, Switzerland, 2001.
28. HOSOMI, Y. **Basic Study on Forming Cranial Implants by Incremental Sheet Forming**. Keio University, School of Integrated Design Engineering, Center for Integrated Systems Engineering, Hideki Aoyama Laboratory, Yokohama, Kanagawa, Japan, 2005.
29. LOPES, A.B.; BARLAT, F.; GRACIO, J. J.; DUARTE, J.F.F.; RAUGH, E. F.; **Effect of textura and microstructure on strain hardening anisotropy for aluminium deformation uniaxial tension and simple shear**. International Journal of Plasticity, p. 19-22, [S.l.], 2003.

ANEXO 1: DESENHOS DO DISPOSITIVO PARA ISF

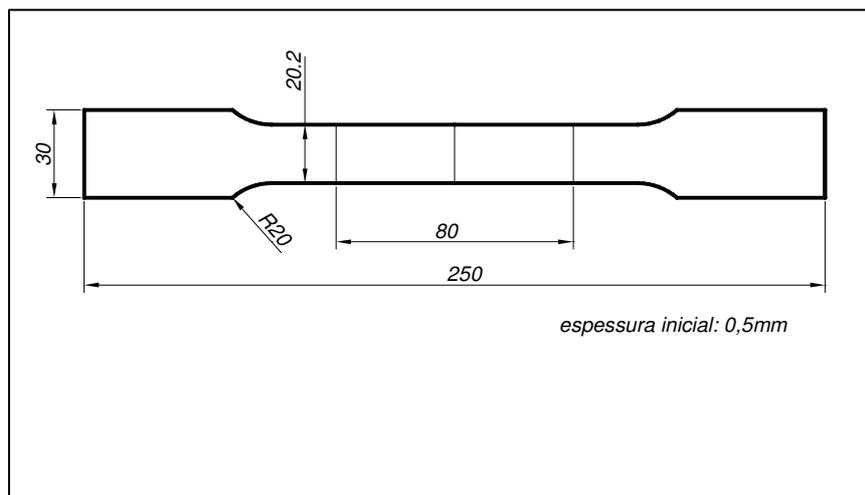
ANEXO 2: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

| CURVA DE ESCOAMENTO MATERIAL: ALUMÍNIO LAMINADO PURO (99,33%) | | | | | | | |
|--|------------|----------|--------------------------------------|------------------------|------------|--|--|
| Etapa | Δl | σ | $A = \frac{A_0 l_0}{l_0 + \Delta l}$ | $F = \sigma \cdot A$ | $kf = F/A$ | $\varphi = \ln\left(\frac{\Delta l + l_0}{l_0}\right)$ | $kf = \frac{F(l_0 + \Delta l)}{A_0 l_0}$ |
| 0 | 0 | 0 | 10,1000 | 0,00 | 0,000 | 0,000000 | 0 |
| 1 | 0,25 | 42 | 10,0685 | 422,88 | 42,000 | 0,003120 | 268800 |
| 2 | 0,50 | 70 | 10,0373 | 702,61 | 70,000 | 0,006231 | 448000 |
| 3 | 0,75 | 90 | 10,0062 | 900,56 | 90,000 | 0,009331 | 576000 |
| 4 | 1,00 | 108 | 9,9753 | 1077,33 | 108,000 | 0,012423 | 691200 |
| 5 | 1,25 | 110 | 9,9446 | 1093,91 | 110,000 | 0,015504 | 704000 |
| 6 | 1,50 | 112 | 9,9141 | 1110,38 | 112,000 | 0,018576 | 716800 |
| 7 | 1,75 | 113 | 9,8838 | 1116,87 | 113,000 | 0,021639 | 723200 |
| 8 | 2,00 | 114 | 9,8537 | 1123,32 | 114,000 | 0,024693 | 729600 |
| 9 | 2,25 | 115 | 9,8237 | 1129,73 | 115,000 | 0,027737 | 736000 |
| 10 | 2,50 | 116 | 9,7939 | 1136,10 | 116,000 | 0,030772 | 742400 |
| E=65000 N/mm ² | | | Δl | Média entre 0,45 e 90: | | 82,500000 | |

CORPO DE PROVA

$$l_0 = 80$$

$$A_0 = 20.2 \times 0.5 = 10.1 \text{ mm}^2$$



ANEXO 3:DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOFTWARE CAM

Estratégia Profiling – Tela 1

Página “General” – Configurações gerais

| Campo | Item Selecionado | Descrição | Valor utilizado | Resultados Obtidos |
|-------------------------|------------------------|--|-----------------|---|
| <i>Model Type</i> | <i>Solid</i> | Indica o tipo de modelo CAD importado | | |
| <i>Mill Type</i> | <i>Convencional</i> | Indica o tipo de usinagem (concordante ou discordante) | | Como os testes de estampagem serão realizados com o eixo árvore liberado (sem rotação), este parâmetro não exerce influência, embora seja obrigatório a escolha de um tipo. |
| <i>NC Output Offset</i> | <i>Line Arc Smooth</i> | Indica, em mm, o 0 sobremetal da peça. | 0 | Este parâmetro será verificado e alterado conforme a análise do efeito “Spring back”, que ocasiona o retorno elástico da chapa após a passagem da ferramenta. Setado com valor negativo, este parâmetro pode fazer a correção da trajetória da ferramenta, aproximando as dimensões finais da peça às do modelo CAD |
| <i>Tolerance</i> | | Tolerância, em mm, na geração das coordenadas X, Y, Z | 0,01 | Pode se utilizar uma maior capacidade de resolução (0,005 a 0,001) para diminuir as diferenças |

| | | | |
|-------------|--------------------|--|--------|
| <i>Feed</i> | <i>Feedrate</i> | Velocidade de Avanço, em mm/min. Controla a velocidade dos eixos X e Y | de 500 |
| | <i>Plunge Feed</i> | Velocidade de Avanço, em mm/min. Controla a velocidade do eixo Z. | de 200 |
| | <i>Speed</i> | Rotação do eixo árvore | |

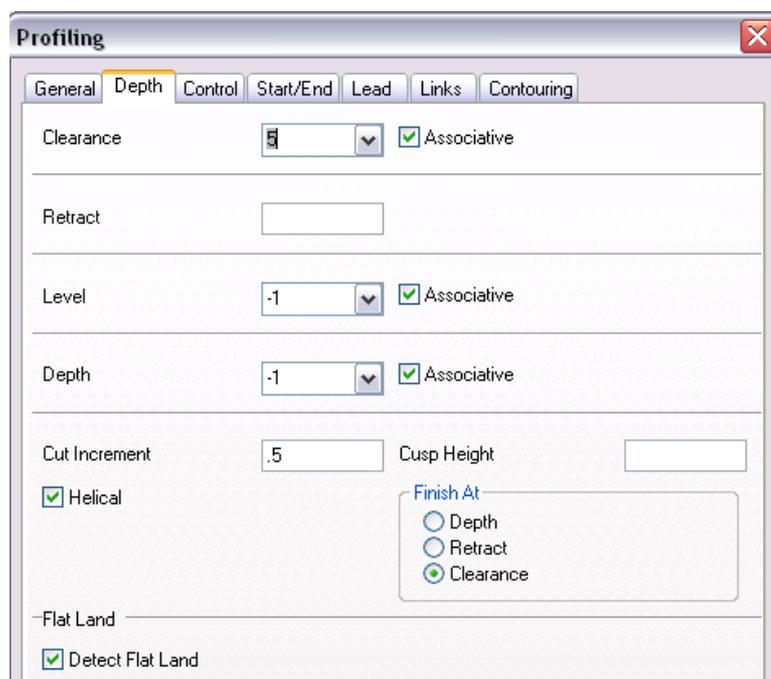
de dimensões entre a peça acabada e o modelo CAD.

O objetivo sempre será aumentar este valor, a fim de diminuir o tempo de usinagem. O limite será dado pelo comportamento da chapa, no que se refere a acabamento superficial e resistência mecânica.

Da mesma forma que o parâmetro *Feedrate*, a alteração deste valor dependerá do material e do incremento vertical (profundidade de corte) utilizado.

No teste de estampagem, o eixo árvore trabalha livre (sem rotação). Mas devido à uma exigência de programação, não é possível setar a rotação como sendo igual a 0 (zero). O código CNC gerado conterá o valor de RPM atribuído, mas será editado manualmente, retirando esta informação do programa.

Parâmetros de acabamento – Página 1

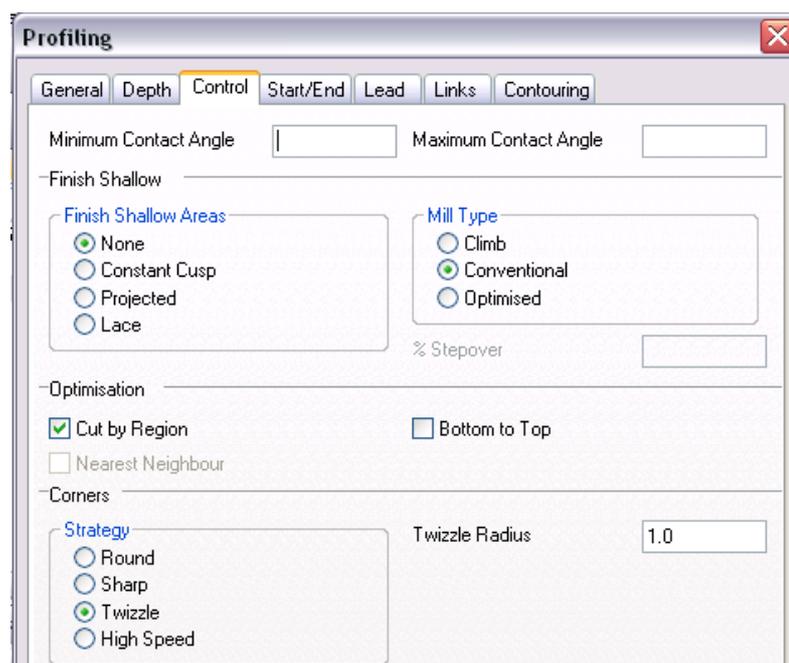


Estratégia Profiling – Tela 2

Página “Depth” – Profundidade de Estampagem

| Campo | Item Selecionado | Descrição | Valor utilizado | Resultados Obtidos |
|----------------------------|---|--|-----------------|---|
| <i>Clearence</i> | | Controla a distância de segurança entre a peça e a ferramenta onde, a partir do valor indicado, o movimento em G0 (rápido) passa a ser movimento controlado pelo parâmetro <i>Feed</i> . | Associative | O critério <i>Associative</i> torna o parâmetro <i>Clearence</i> relacionado interativamente com o modelo CAD. Assim, qualquer alteração na espessura ou geometria do modelo CAD, será parametrizado com este valor, que manterá sempre a mesma distância de segurança entre a peça e a ferramenta. |
| | <i>Level</i> | | Associative | |
| | <i>Depth</i> | | Associative | |
| | <i>Cut Increment</i> | | 0.5 | |
| | <i>Cusp Height</i> | Altura da crista | | |
| | <i>Helical</i> | | Selecionado | Faz com que a ferramenta fique permanentemente em contato com a chapa, perfazendo os incrementos verticais (eixo Z) em uma trajetória helicoidal. |
| <i>Finish At Flat Land</i> | <i>Clearence</i> <i>Detect Flat Land</i> | Detecta a existência de superfícies planas já acabadas | Selecionado | Na estampagem incremental, a ferramenta entrará em contato com uma pequena parte da chapa. Na região central que forma o fundo da peça acabada, não haverá contato da ferramenta. Para que a ferramenta não trabalhe nesta região, o parâmetro <i>Detect Flat Land</i> precisa estar acionado . |

Parâmetros de acabamento – Página 2



Estratégia Profiling – Tela 3

Página “Control” – controle de trajetória

| Campo | Item | Descrição | Valor utilizado | Resultados Obtidos |
|---|---|---|----------------------------------|---|
| <i>Minimum / Maximum</i> <i>Contact Angle</i> <i>Finish Shallow</i> | <i>None / Constant</i> <i>Cusp / Project /</i> <i>Lace</i> | | | |
| <i>Mill Type</i> | <i>Climb</i> / <i>Convencional</i> / <i>Optimized</i> | Controla o tipo de sentido de corte: concordante, discordante ou otimizado | Convencional | Como o eixo árvore trabalha livre (sem rotação), a setagem deste parâmetro não interfere no tempo de execução da tarefa e nem no acabamento superficial. |
| <i>Optization</i> | <i>Cut by region</i> | Em geometrias com duas ou mais cavidades, este parâmetro controla a ordem de execução de cada uma delas | Selecionado | Como o modelo de teste de estampagem tem apenas uma cavidade, este parâmetro não interfere no processo. Caso haja mais de uma cavidade na mesma chapa, este parâmetro deve ser observado. |
| <i>Corners</i> | <i>Strategy:</i> <i>Round / Sharp /</i> <i>Twizzle / High</i> <i>Speed</i> | Determina o tipo de movimentação da ferramenta. | Twizzle Twizzle Radius | |

ANEXO 4: CÁLCULOS DOS CUSTOS POR PEÇA

| |
|-------------------------|
| QUADRO DE CUSTOS |
|-------------------------|

| | Convencional | ISF |
|-----------------|----------------|----------------|
| Número de peças | Custo por peça | Custo por peça |
| 1 | 8000,87 | 1610,83 |
| 50 | 160,87 | 42,83 |
| 100 | 80,87 | 26,83 |
| 150 | 54,20 | 21,50 |
| 200 | 40,87 | 18,83 |
| 250 | 32,87 | 17,23 |
| 300 | 27,54 | 16,16 |
| 350 | 23,73 | 15,40 |
| 400 | 20,87 | 14,83 |
| 450 | 18,65 | 14,38 |
| 500 | 16,87 | 14,03 |
| 550 | 15,42 | 13,74 |
| 600 | 14,20 | 13,50 |
| 650 | 13,18 | 13,29 |
| 700 | 12,30 | 13,12 |
| 750 | 11,54 | 12,96 |

Dados:

| Estampagem Convencional | | |
|--------------------------------|-------------|----------|
| Item | Custo (R\$) | Unidade |
| Ferramental (matrizes) | 8000,00 | conjunto |
| Serviço de estampagem | 0,013888 | segundo* |
| Matéria-prima | 0,85 | peça |

equivalente a R\$ 50,00 / hora

Estampagem Incremental

| Item | Custo (R\$) | Unidade |
|--|-------------|----------|
| Ferramental (dispositivo + ferramenta esférica + automação do sistema de fixação do blank) | 1600,00 | conjunto |
| Hora-máquina (usinagem) | 0,013888 | segundo |
| Matéria-prima | 0,85 | peça |
| Tempo de estampagem | 720 | segundo* |

equivalente a 12 min