

MINISTERIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

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

PPGEM

METODOLOGIA E APLICABILIDADE DA DIGITALIZAÇÃO 3D A LASER NO
DESENVOLVIMENTO DE MOLDES PARA CALÇADOS E COMPONENTES

Gustavo Freitas

Dissertação para obtenção de Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2006

MINISTERIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

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

PPGEM

METODOLOGIA E APLICABILIDADE DA DIGITALIZAÇÃO 3D A LASER NO
DESENVOLVIMENTO DE MOLDES PARA CALÇADOS E COMPONENTES

Gustavo Freitas

Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia de UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2006

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção de título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca examinadora de Programa de Pós Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aluísio Ávila – CEBC - IBTEC

Prof. Dra. Liane Roldo – LDSM – UFRGS

Prof. Dra. Regina Oliveira Heidrich – ICET - FEEVALE

Prof. Dr. Antonio Cezar Faria Vilela

Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me conduz e protege nesta vida.

As pessoas que mais amo, meus pais João e Gertrudes pelo amor e educação, a meus irmão André e Rafael pelo companheirismo e a Adriana pelo amor e compreensão nas incontáveis horas de ausência.

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Wilson Kindlein Jr. pela atenção e ajuda neste trabalho.

Aos meus sócios Edson e Jefferson pela amizade e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Fabio, Candido e Roberto do Laboratório de Design e Seleção de Materiais pela ajuda e desenvolvimento dos ensaios aplicados neste trabalho.

Ao amigo e empresário Elton Selau pela sua contribuição técnica na área calçadista.

Aos amigos e familiares pelo incentivo.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMARIO

INTRODUÇÃO.....	1
1. REVISÃO BIBLIOGRAFICA DAS TECNOLOGIAS.....	5
1.1 Digitalização 3D.....	5
1.1.1 Braço Mecânico.....	6
1.1.2 Triangulação Ultra-sônica.....	7
1.1.3 Triangulação Eletromagnética.....	9
1.1.4 Apalpamento em Maquina de Fresamento.....	10
1.1.5 Apalpamento em Maquina de Medição por Coordenada.....	12
1.1.6 Triangulação Laser de Varredura por Pontos.....	13
1.1.7 Triangulação Laser de Varredura por Linha.....	15
1.1.8 Triangulação por Cores com Câmera CCD.....	16
1.1.9 Fotogrametria por Conjuntos de Câmera CCD.....	16
1.1.10 Fotogrametria por Fotografias Digitalizadas.....	17
1.1.11 Radar Laser.....	18
1.1.12 Tomografia.....	19
1.1.13 Tunelamento.....	20
1.1.14 Projeção de Moiré.....	21
1.1.15 Luz Infravermelha e CCD Linear.....	22
1.1.16 Conoscópico.....	22
1.2 Engenharia Simultânea.....	23
1.2.1 Definições.....	23

1.2.2 Propósitos.....	24
1.2.3 Métodos de Implementação.....	26
1.3 Suporte Computacional.....	27
1.3.1 Os Sistemas CAD/CAM.....	28
1.3.2 STL.....	29
1.3.3 Modelamento de Superfície Nurbs.....	30
1.3.4 STL x IGES.....	31
1.4 Processos de Usinagem a Alta Velocidade(HSM).....	32
1.4.1 Histórico e Definição.....	32
1.4.2 Características Gerais de Usinagem a Alta Velocidade.....	36
1.4.3 Usinagem HSM na Cadeia de Produção de Moldes e Matrizes.....	39
1.5 Processo de Fabricação de Matrizes para Calçado.....	42
1.5.1 A Importância do Protótipo no Calçado.....	45
1.6 Materiais.....	46
1.6.1 Materiais para fabricação de Protótipos.....	46
1.6.2 Materiais para fabricação de Matrizes.....	47
1.7 Aplicabilidade da Digitalização 3D.....	48
1.7.1 Análise de Aplicabilidade.....	48
1.7.2 Aplicação em Engenharia.....	48
1.7.3 Digitalização Manual.....	50
1.7.4 Digitalização Automática.....	52
1.7.5 Modelamento Geométrico em Engenharia.....	52
2 Materiais e Métodos.....	61

2. 1 Considerações Iniciais.....	61
2. 2 Ensaios.....	62
2. 3 Material Utilizado nos Ensaios de Digitalização.....	64
2. 4 Ensaios de Digitalização.....	66
2. 5 Edição da Nuvem de Pontos.....	66
2. 6 Programa de Usinagem.....	67
3. Resultados Obtidos.....	69
3.1 Referente ao Processo de Digitalização.....	69
3.2 Referente à relação Pontos x Superfície.....	70
3.3 Referente à Edição de Pontos.....	74
3.4 Amostras com Edição de Pontos x sem Edição de Pontos.....	76
3.5 Simulação de Usinagem.....	83
4. Conclusão.....	84
5. Sugestão para Trabalhos Futuros.....	87
6. Referências Bibliográficas.....	88
ANEXO 1: Manual de operação do equipamento Digimill 3D.....	94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Digitalizador ITG - ROMER	6
Figura 2 – Digitalizador Immersion Corp.....	7
Figura 3 – Digitalizador GTCO (Antiga SAC Corp.).....	8
Figura 4 - Mesa eletromagnética Polhemus.....	9
Figura 5 – Sistema Retrosan(RENISHAW) em Fresadora CNC.....	10
Figura 6 – Digitalização em Fresadora CNC DECKEL.....	11
Figura 7 – Máquina de Medição por Coordenadas Tridimensionais.....	12
Figura 8 – Digitalizador Scantech.....	14
Figura 9 – Nuvem obtida com 90.000 pontos.....	14
Figura 10 – Varredura por linha.....	15
Figura 11 – Digitalizador 3D Scanners.....	15
Figura 12 – Equipamento de Fotogrametria.....	18
Figura 13 – Modelo VRML produzido com Photomodeler.....	18
Figura 14 – Sistema de Radar Laser modelo Laser Tracker.....	19
Figura 15 – Osso com pinos Digitalizados.....	20
Figura 16 – Superfície de uma molécula de benzeno.....	21
Figura 17 - Imagem de um rosto.....	22
Figura 18 - Sensor laser Conoscópico marca OPTIMET.....	23
Figura 19 – Possibilidades de redução no tempo de desenvolvimento.....	25
Figura 20 – Tempo ganho com Eng. Simultânea.....	25
Figura 21 Gráfico de velocidade de corte versus temperatura de corte – Teoria de Salomon.....	33
Figura 22 Vantagens da usinagem a altas velocidades de corte.....	36

Figura 23: Etapas do processo de usinagem convencional com HSM substituindo EDM (B) e somente usinagem HSM (C)	41
Figura 24 – Fluxograma de produção atual.....	43
Figura 25 – Fluxograma de produção proposto.....	44
Figura 26 – Digitalização Aplicada em Engenharia.....	53
Figura 27 – Modelos geométricos para aplicações em Engenharia.....	54
Figura 28 – Nuvem e linhas seccionais.....	56
Figura 29 – Densidade de Digitalização.....	56
Figura 30 – Dados dispersos obtidos com digitalização manual.....	57
Figura 31 – Pontos selecionados para compor às curvas de construção.....	58
Figura 32 – Superfícies criadas a partir das curvas de construção.....	58
Figura 33 – Padrões Desenvolvidos e Utilizados.....	65
Figura 34 – Análise dimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.....	70
Figura 35 - Análise dimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.....	71
Figura 36 – Análise tridimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.....	72
Figura 37 – Análise tridimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.....	73
Figura 38 – Análise tridimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.....	73
Figura 39 – Imagens das Geometrias em STL no software Geomagic WRAP.....	74
Figura 40 – Formas digitalizadas com 0.05mm de precisão.....	78
Figura 41 – Formas digitalizadas com 0.15mm de precisão.....	78
Figura 42 – Comparação 3D da amostra 1.....	79

Figura 43 - Comparação 3D da amostra 2.....	80
Figura 44 - Comparação 3D da amostra 3.....	81
Figura 45 - Comparação 3D da amostra 4.....	81
Figura 46 - Comparação 3D da amostra 6.....	82
Figura 47 - Comparação 3D da amostra 5.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Digitalização.....	66
Tabela 2 – Parâmetros de usinagem.....	68
Tabela 3 – Resultado dos tempos e tamanhos das Digitalizações.....	69
Tabela 4 – Tamanho dos arquivos em Mb.....	77
Tabela 5 – Resultado do tempo de usinagem simulado.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Machining
CAI	Computer Aided Inspection
CAID	Computer Aided Industrial Design
CAPP	Computer Aided Process Planining
CAT	Computer Aided Test
CMM	Coordinate Measurement Machine
CNC	Computer Numerical Control
DXF	Data eXchange Format
HSM	High Speed Milling
IGES	International Graphics Exchange Standart
ISO	International Standart Organization
NURBS	Non Uniform Rational B-Spline
STEP	Standart for the Exchange of Product model data
STL	Stereolitography
VRML	Virtual Reality Modeling Language

RESUMO

Este trabalho discute a metodologia da aplicação e a importância do processo de Digitalização 3D em ambientes computacionais de suporte à Engenharia Simultânea aplicada ao setor de calçados. São apresentados os recursos de suporte computacional ao trabalho colaborativo em Engenharia e as tecnologias de digitalização disponíveis. A questão fundamental discutida é a forma de obtenção do arquivo de pontos (nuvem de pontos) e a transformação dos dados (coordenadas dos pontos), adquiridos com o equipamento de digitalização e a sua melhor forma de edição. As alternativas de aplicação da tecnologia são pesquisadas e discutidas, do ponto de vista de definição de produto, em contexto multidisciplinar, e não apenas de modelamento geométrico. São também apresentados e discutidos os materiais passíveis de utilização na prototipagem de calçados. Neste sentido, foram desenvolvidos padrões de geometria que representam as formas geométricas encontradas no mercado de calçado e aplicadas em solados. Os padrões foram digitalizados a laser utilizando o princípio Conoscópico, que se mostrou adequado para a aplicação. As digitalizações foram comparadas com os padrões em modelo CAD onde se pode observar a importância dos parâmetros de digitalização escolhidos. Os arquivos digitalizados foram posteriormente editados em softwares de processamento de pontos, que resultou em modelos triangularizados de boa qualidade superficial e geométrica, bem como um tamanho de arquivo muito reduzido em relação à nuvem de pontos original. Os melhores resultados foram obtidos com as nuvens de pontos de uma digitalização com grande precisão e conseqüentemente um tamanho de arquivo elevado. Pode-se verificar que, quando editada em sua fase de pontos e posterior triangulação, com um software específico para a aplicação, os resultados foram arquivos pequenos com fidelidade geométrica e precisão, demonstrando a necessidade de determinados procedimentos no processamento e edição dos pontos de uma digitalização.

Uma das contribuições científicas deste trabalho está justamente no estudo da influência da edição de pontos e triângulos de várias formas geométricas, desde representações extremamente simples como um plano reto até geometrias complexas formadas por *s-plines*. Outra contribuição científica deste trabalho está na relação estabelecida entre os arquivos digitalizados com e sem edição de pontos em relação à sua posterior usinagem em máquinas CNC “High Speed Milling”. Verificou-se a influência da edição das geometrias, em pontos e triângulos, nos tempos de processamento computacionais, dos softwares de CAM, e os tempos de simulação de usinagem em máquina também. A análise dos materiais utilizados no mercado de calçados também apresentou diferenças, principalmente em relação aos parâmetros de usinagem, pois os materiais que possibilitam as maiores velocidades de avanço e rotação são os mais beneficiados com arquivos leves e de geometrias suavizadas.

ABSTRACT

This research discusses about methodology application and importance of 3D Digitalization process in computer interface of support to Simultaneous Engineering applied to the footwear market. Computer support resources to a cooperating job in Engineering and the available digitalization technologies are presented. The fundamental point is the way of obtaining the dots files (dots cloud) and the data transformation (dots coordinates), acquired with the digitalization equipment, and its best edition. From the product definition point of view, the technology application methods are investigated and discussed, not only under a geometrical model, but also in a multidisciplinary context. In addition to this, we present and discuss the materials which may be used in the footwear prototypes. With this same goal, the geometrical standards that were developed represent the geometrical forms found in the footwear market and applied to soles. The standards were digitalized by laser, using the Conoscopic Principle, which resulted very adapted to the application. The digitals were compared with the CAD standards, and then it was possible to observe the importance of the digitalization parameters that were chosen. After that, the digital files were edited by a dot processing software, which left a result of triangular models with good superficial and geometric quality, as well as a very small file size if compared to the original dot cloud. The best results were obtained with a dot cloud of a high definition digitalization and, consequently, a large file size. It is possible to verify that, when edited during the dot phase, and later on triangular, with an specific software for this application, the results were small file sizes with fidelity and geometrical precision, demonstrating the need for certain proceedings during the processing and editing of the digitalization dots.

One of the scientific contributions of this research is exactly the study is the influence of the dot and triangle edition of several geometrical forms, ranging from extremely simple representations such as a straight plain to complex geometrical forms formed by *s-plines*. Another scientific contribution is the relation that was established between the digital files with or without dot editing in regards to the

posterior milling work in “High Speed Milling” CNC machines. In addition to this, it was possible to verify how the geometrical forms edition in dots and in triangles influence the computer time processing of the CAM software, and the time simulation of the milling work in the machine as well. The analysis of the materials used in the footwear market also presented differences, mainly in regards to the milling parameters, because the materials that offer high speed to advance and rotation are the most improved ones with light files and suave geometrical forms.

INTRODUÇÃO

Especialmente a partir dos anos 2000, com o aumento das tendências de globalização, as indústrias têm enfrentado um forte aumento da concorrência em âmbito internacional. A competição pela conquista de mercado vem exigindo a redução de prazos e custos, bem como a melhoria de qualidade dos produtos. Isso se reflete diretamente nas atividades de engenharia pela exigência de crescente aperfeiçoamento das metodologias de projeto e de manufatura.

A Engenharia Simultânea, ou Concorrente, tem sido definida como uma metodologia de trabalho com a qual se busca a colaboração simultânea das várias equipes de engenharia no processo de desenvolvimento do produto. Conforme Moroup [1] e Kusiak [2], todas as etapas do ciclo de vida do produto devem ser consideradas desde os primeiros estágios do projeto, envolvendo os outros setores da empresa, a fim de atender os requisitos de comercialização, produção, distribuição, uso e descarte. O compartilhamento das informações pode evitar que, por exemplo, dificuldades de manufatura ou manutenção só venham a ser percebidas após a conclusão do projeto. Mesmo antes da conclusão de alguma etapa é possível iniciar as fases seguintes, havendo um ganho de tempo e uma redução significativa dos custos de modificação do projeto. Hartley [3] mostra que, apesar do projeto demandar 5% do custo (relativo ao tempo de produção) ele tem influência sobre 70% dos custos globais. Modificações feitas ainda na fase do projeto têm um custo muito baixo, se comparado ao custo que teriam após o investimento de tempo e recursos em sistemas de manufatura e suporte.

O suporte computacional à engenharia limitou-se, durante vários anos, em atender isoladamente a alguns setores. Iniciou-se com programas de desenho ou projeto auxiliados por computador [CAD], engenharia auxiliada por computador [CAE] e manufatura auxiliada por computador [CAM], expandindo-se

posteriormente para outras áreas como “design” industrial [CAID], planejamento de processos [CAPP], inspeção [CAI] e teste [CAT].

As primeiras soluções apresentadas para a integração dos diferentes sistemas foram as implementações de formatos de arquivos padronizados como IGES e DXF, para a troca de geometria. Depois, o formato STEP começou a ser desenvolvido, visando à troca de informações de produto, não limitada à sua geometria. A integração foi facilitada de diversas maneiras, inclusive no trabalho em redes internas das indústrias (intranet), ou até pela rede global (Internet).

Nos novos sistemas operacionais gráficos, a execução simultânea de várias aplicações (em ambientes “Windows”) está sendo incrementada com a possibilidade de compartilhamento dinâmico de informações geométricas tridimensionais entre as mesmas, sem o uso explícito de padrões de transferência de arquivos. Para transferir um objeto geométrico tridimensional de uma aplicação para a outra, já é possível utilizar uma simples operação de cópia na primeira aplicação, seguida de colagem na segunda. O amadurecimento dos sistemas operacionais e dos programas, além do desenvolvimento de novos processadores para os microcomputadores, permite que se realizem, nestes equipamentos, tarefas de processamento gráfico e matemático, como modelamento de superfícies e sólido, que há pouco tempo exigiam o uso de estações dedicadas de custo muito elevado. Os novos recursos dos equipamentos para entrada e saída de dados também estão acelerando o trabalho dos engenheiros.

A digitalização 3D é uma das novas formas de entrada de dados em sistemas de engenharia. É um processo de amostragem de pontos da superfície do modelo físico de uma forma, tendo como propósito principal a redução do tempo de modelamento geométrico. Pode ser realizada de várias maneiras, conforme as tecnologias de amostragem empregadas nos equipamentos. Cada tecnologia apresenta particularidades que delimitam sua melhor utilização. A digitalização tem diversas possibilidades de aplicação, sendo usada, principalmente, na produção de superfícies de forma livre escultural, em trabalhos de engenharia reversa e de inspeção dimensional.

Os dados obtidos pela digitalização 3D são sempre conjuntos de coordenadas dos pontos, qualquer que seja a tecnologia de digitalização empregada. Isso exige que os arquivos de pontos sejam sempre transformados e formatados de maneira a permitir a sua utilização em sistemas de engenharia como CAD ou CAM. A questão fundamental para a aplicação da digitalização 3D nos ambiente de Engenharia Simultânea, que podem ser implementados com o suporte computacional atualmente disponível, é a necessidade de transformação da estrutura dos dados obtidos. Os arquivos de coordenadas de pontos, atingidos através da digitalização 3D, devem ser adaptados, conforme a estrutura de informações adotada no ambiente.

Posto este cenário, este trabalho apresenta uma discussão sobre a aplicabilidade da Digitalização 3D nos novos ambientes de suporte computacional à Engenharia Simultânea para calçados e seus componentes.

Para isso, são apresentadas, no capítulo 1, as tecnologias de digitalização 3D disponíveis e os novos recursos de suporte computacional à Engenharia Simultânea, tecnologia de usinagem “High Speed Milling”, processos de fabricação de calçados e os materiais utilizados.

No capítulo 2, são analisadas as necessidades de transformação dos dados geométricos (coordenadas de pontos) obtidos na digitalização, em informações de alta confiabilidade, significativos para o trabalho de engenharia. A análise inclui os critérios para a edição de pontos, filtragem, suavização e sua influência na programação de usinagem e na sua fabricação em máquinas de usinagem CNC “High Speed”. Algumas estratégias de aplicação foram testadas, visando demonstrar a importância de uma metodologia adequada de aquisição de pontos através de sistemas de digitalização a laser, os critérios de processamento das nuvens de pontos adquiridas e o seu resultado no produto final. À luz dos sistemas de digitalização 3D, foram também abordados os materiais possíveis de utilização tanto na fabricação de matrizes quanto na prototipagem de calçados.

No terceiro capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos através do procedimento experimental.

O quarto capítulo apresenta as conclusões, tomadas com base na discussão realizada através dos resultados obtidos, e também são fornecidas sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a realização desta dissertação de mestrado.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para avaliar as possibilidades de aplicação da Digitalização 3D em ambientes de Engenharia Simultânea é necessário estudar as diferentes tecnologias de digitalização disponíveis, bem como os recursos atuais dos sistemas de suporte computacional à Engenharia Simultânea, Processo de Fabricação e Materiais de Matrizes para Calçado e Usinagem “High Speed” com Controle Numérico Computadorizado(CNC).

1.1 Digitalização 3D

Os dados fornecidos pela digitalização 3D são sempre um conjunto de coordenadas de pontos. As coordenadas podem ser simplesmente **[x,y,z]**, **[x,y,z,c]** para os digitalizadores capazes de capturar outros parâmetros do ponto, como cor ou temperatura, ou ainda **[x,y,z, i,j,k]** para digitalizações que incluam a inclinação da sonda manual utilizada. A organização dos pontos, a incerteza das coordenadas e a velocidade de leitura dependem da tecnologia empregada no digitalizador. Também dependem do equipamento: o volume, a forma, o material, a cor e o acabamento superficial dos modelos físicos que podem ser usados.

As várias tecnologias, comercialmente disponíveis para digitalização tridimensional, podem ser classificadas, de maneira geral, em duas categorias principais: Digitalização com contato físico com a forma, e Digitalização sem contato físico.

Os digitalizadores de contato com o modelo físico são os do tipo Braço mecânico; Triangulação ultra-sônica; Triangulação eletromagnética; Apalpamento em máquina de fresamento e Apalpamento em máquinas de medição por coordenadas.

Os digitalizadores sem contato com o modelo físico podem ser de Triangulação laser de varredura por ponto; Conoscópico; Triangulação laser de varredura por linha; Triangulação por cores com câmaras CCD (“Coupled Charge

Devices”); Fotogrametria por fotografias digitalizadas; Radar laser; Tomografia; Tunelamento; Moiré de projeção e Luz Infravermelha e CCD linear.

1.1.1 Braços Mecânicos

Estes digitalizadores são estruturas multi-articuladas que têm, montada em sua extremidade, uma sonda que deve ser conduzida manualmente até o ponto a ser digitalizado no objeto. A sonda pode ser movimentada com até 6 graus de liberdade, permitindo alcançar detalhes em praticamente qualquer posição [4].

As coordenadas XYZ dos pontos e a orientação IJK da sonda são calculadas quando o gatilho é pressionado, a partir dos ângulos medidos nas articulações e dos comprimentos conhecidos do braço. Os ângulos são monitorados e processados por processadores digitais de sinais (DSP) e transmitidos ao computador via interface serial RS232 [5] [6]. Podem ser obtidas freqüências de pontos, se o gatilho permanecer pressionado, a taxas de até 1000 pontos por segundo. As figuras 1 e 2 ilustram a operação manual.



Figura 1 – Digitalizador ITG - ROMER [5]

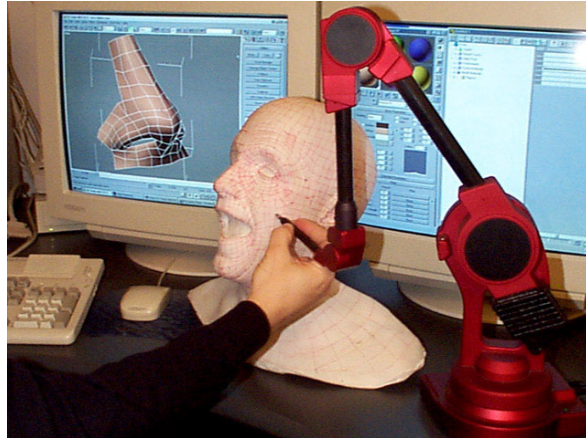


Figura 2 – Digitalizador Immersion Corp. [5]

Os digitalizadores tipo Braços Mecânicos apresentam, como vantagem, a independência do material e cor do modelo, média velocidade de aquisição de pontos, até 500 pt/s, possibilidade de digitalizar detalhes de difícil acesso. Além disso, têm um custo baixo(US\$ 1.600 à 76.000) e permitem a digitalização de volumes grandes, com diâmetros de 900mm a 3650mm.

Porém, apresentam dificuldade de adquirir grandes densidades de pontos, geram nuvens desordenadas e apresentam uma imprecisão média, entre 0,2mm e 0,7mm.

1.1.2 Triangulação Ultra-sônica

Os digitalizadores ultra-sônicos são operados manualmente, devendo-se tocar, com a extremidade da sonda, cada ponto a ser digitalizado na superfície do objeto. A sonda pode ser movimentada com 6 graus de liberdade, permitindo alcançar detalhes em qualquer posição (contato que não haja obstrução do caminho do ultra-som). O equipamento também é dotado de uma barra de calibração, com um emissor e um receptor de ultra-som afastado a uma distância conhecida, para determinar a velocidade de propagação do ultra-som no ambiente de digitalização [7].

As coordenadas dos pontos e a orientação da sonda são calculadas e se baseiam nos tempos cronometrados entre a emissão dos sinais de ultra-som pela sonda e a sua captação pelos microfones nos vértices do sensor (figura 3). Estes tempos são multiplicados pela velocidade do ultra-som para encontrar as distâncias, em linha reta, dos emissores até os microfones. Como a distância entre os microfones é conhecida, pode-se calcular a coordenada do emissor na sonda, por triangulação. A sonda tem dois emissores afastados entre si, a uma distância conhecida, que funcionam um após o outro com um intervalo de tempo definido. Como os dois emissores definem uma linha de espaço, é possível calcular a sua orientação no volume de digitalização. A extremidade da sonda está a uma distância conhecida sobre a linha definida pelos dois emissores. Isso permite calcular a coordenada do ponto digitalizado.



Figura 3 – Digitalizador GTCO (Antiga SAC Corp.).[8]

A Triangulação Ultra-Sônica apresenta, como vantagem, a independência do material e cor do modelo e possibilidade de digitalizar detalhes de difícil acesso. Além disso, permite a digitalização de grandes volumes cúbicos com 1000 ou 2400 mm de lado. Também tem com um custo baixo: US\$ 6.000.

Porém, apresenta dificuldade de adquirir grandes densidades de pontos, gera nuvens desordenadas, uma imprecisão alta, entre 0,5mm e 1,2mm, baixa

velocidade de aquisição de pontos, influência do ruído e ecos do ambiente e a necessidade de evitar a obstrução do caminho do ultra-som.

1.1.3 Triangulação Eletromagnética

Os digitalizadores baseados em triangulação eletromagnética são operados manualmente, devendo-se tocar o objeto montado sobre a mesa do digitalizador, em cada ponto a ser digitalizado. São compostos por uma sonda que capta sinais magnéticos, uma mesa que produz o campo e por um equipamento gerador e processador, conforme figura 2-4. O campo magnético da mesa induz, nas bobinas da sonda, uma corrente elétrica cuja intensidade depende da posição e orientação da mesma. Essa corrente é amplificada e medida para ser utilizada como referência para os cálculos. A posição e orientação da sonda no volume de digitação são calculadas e transmitidas para o computador, através da porta de comunicação serial RS232, quando a sonda for pressionada sobre um ponto da forma. Para permitir uma maior estabilidade de posicionamento da sonda, pode-se, opcionalmente, usar um pedal para o acionamento.

A leitura de coordenadas não é prejudicada pela obstrução da linha reta entre a sonda e a mesa, pela forma ou pelo operador, devido à impermeabilidade das substâncias não-metálicas ao campo magnético. A taxa de leitura pode ser de 60 ou 120 pt/s [9].



Figura 4 - Mesa eletromagnética Polhemus [10]

Entre as vantagens da Triangulação Eletromagnética está o baixo custo(até US\$ 6.500), independência da cor e acabamento do modelo, independência da iluminação e climatização do ambiente, possibilidade de digitalização de detalhes escondidos e velocidade de aquisição de pontos media(60 a 120 pt/s). Como desvantagem, apresenta uma elevada incerteza (0.25mm a 2.5mm), impossibilidade de digitalizar materiais ferro-magnéticos, dificuldade de obtenção de grandes densidades de pontos, volumes de digitalização pequenos (300x450x300-760x760x760mm).

1.1.4 Apalpamento em Máquina de Fresamento.

Máquinas de fresamento CNC de três eixos, cujo controle permita a utilização de um sensor apalpado em lugar de ferramenta, podem ser programadas para a leitura de coordenadas 3D ao longo de trajetórias definidas, sobre um modelo físico da forma.

Alguns controles numéricos já possuem ciclos pré-programados para executar uma varredura da superfície de um modelo, registrando as coordenadas em que o sensor a toca. Quando o controle não for dotado de funções para digitalizar, é possível utilizar um microcomputador que recebe uma placa de interface com o apalpador e controla a máquina por comunicação serial [11], conforme figura 5.



Figura 5 – Sistema Retroskan(RENISHAW) em fresadora CNC [11]

As estratégias mais comuns de programação da digitalização são as de leitura das coordenadas por seções transversais ou por planos paralelos à base do modelo, o que resulta em nuvens organizadas. Nas duas estratégias, pode-se programar o passo dado em cada eixo, entre uma leitura e outra, com o propósito de obter uma malha regular. A resolução da nuvem de pontos fica limitada pela rapidez do sistema computador/máquina. Se o conjunto for mais veloz, pode-se usar passos menores, no mesmo tempo de processo [12].

Alguns fornecedores de equipamentos de apalpamento oferecem um sistema de hardware e de software que visa evitar os processos de modelamento em CAD e CAM. São desenvolvidos para controlar a digitalização sem vigilância durante a noite, por exemplo, e também para realizar processamentos simples da geometria digitalizada, como operações de escala, simetria, distorção ou aplicação de sobre-material, para então gerar o programa de usinagem para a mesma máquina CNC (figura 6). Muitas vezes a digitalização pode ser feita com um apalpador de diâmetro e geometria de ponta igual ao da ferramenta que fará a operação de acabamento. Isso permite que se utilize a malha regular obtida, sem modificações, no programa CNC de acabamento, quando for necessário apenas a usinagem de várias cópias de formas [13].



Figura 6 – Digitalização em fresadora CNC DECKEL [13]

As vantagens são a obtenção rápida do programa CNC para moldes simples, independência da cor do modelo, independência da iluminação e climatização do ambiente, possibilidade de obtenção de nuvens organizadas e

baixa incerteza (decorrência da máquina e do sensor), estando entre 0.001mm e 0.01mm. Como desvantagens, é necessário que o material a ser digitalizado tenha resistência superior a pressão de acionamento do sensor para evitar sua deformação, a impossibilidade de digitalizar detalhes escondidos, nuvens de alta densidade demandam muito tempo de máquina e o custo do equipamento mais o cabeçote apalpador tem seu valor mínimo de US\$ 50.000 e Máximo de US\$ 250.000.

1.1.5 Apalpamento em Máquinas de Medição por Coordenadas

As máquinas de medição por coordenadas tridimensionais (CMM), que foram inicialmente desenvolvidas para o uso em salas de metrologia, são também utilizadas para digitalização manual ou programada [14]. São os equipamentos de digitalização por contato que oferecem a menor incerteza, na ordem de 0,009 mm a 20 graus Celsius [15]. São construídos para funcionar em ambientes climatizados, para garantir a estabilidade dimensional. A digitalização 3D, em máquinas de medição programáveis, funciona de modo semelhante ao apalpamento em máquinas CNC, fazendo a leitura de coordenadas 3D de pontos ao longo de trajetórias definidas, sobre a superfície de um modelo físico da forma. O tempo necessário para a digitalização é grande. Diferentemente da digitalização em máquinas CNC de fresamento, é possível trabalhar de forma manual, conduzindo a sonda até os pontos a serem digitalizados [16].



Figura 7 – Máquina de Medição por Coordenadas Tridimensionais [15]

As vantagens são a independência da cor do modelo, independência da iluminação do ambiente, possibilidade de obtenção de nuvens organizadas e baixíssima incerteza (decorrência da máquina e do sensor), estando entre 0.0001mm e 0.005mm. Como desvantagens, é necessário que o material a ser digitalizado tenha resistência superior a pressão de acionamento do sensor para evitar sua deformação, a impossibilidade de digitalizar detalhes escondidos, nuvens de alta densidade demandam muito tempo de máquina, baixa velocidade de aquisição de pontos (140pt/s) e o custo do equipamento tem seu valor mínimo de US\$ 30.000 e máximo de US\$ 150.000.

1.1.6 Triangulação Laser de Varredura por Ponto

A digitalização é realizada de forma automática, sem tocar o modelo físico. Baseia-se no princípio de que se uma luz atinge uma superfície numa determinada direção e pode ser “vista” de outra direção, então a localização do ponto pode ser inferida.

A resolução depende da distância mensurável entre pontos distintos de luz que, por sua vez, dependem da área de luz. Quanto menor o ponto maior a resolução. A incerteza das coordenadas não depende somente da resolução, mas também do sistema ótico, da precisão das partes mecânicas e da cor e textura da superfície do modelo [17].

O sistema é composto de uma mesa giratória e um trilho onde deslizam carros para o projeto de laser e para os sensores. O laser é projetado perpendicularmente à direção de deslocamento lateral. Os sensores, inclinados a 30 graus em relação ao laser, se deslocam lateralmente até que o ponto seja encontrado por um deles. A distância do ponto, medida perpendicularmente ao carro, é encontrada em função da distância entre o projetor laser e o sensor. A forma é rotacionada para medição de todo o contorno de cada uma das seções transversais paralelas à mesa. Este sistema é apontado nas figura 8 e 9 [18].



Figura 8 – Digitalizador Scantech [18]

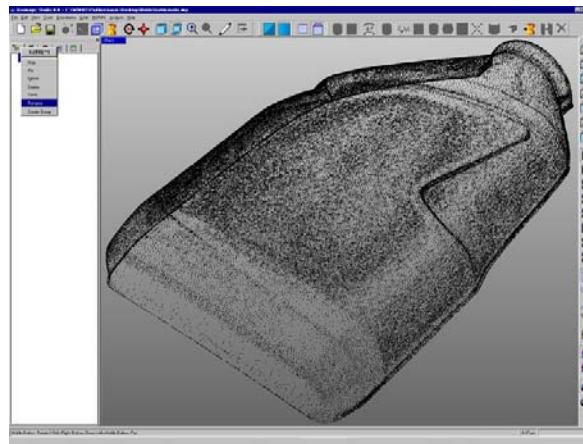


Figura 9 – Nuvem obtida com 90.000 pontos [18]

As vantagens são a baixa incerteza (estando entre 0.02mm e 0.55mm), facilidade de obtenção de grandes densidades de pontos, organização da nuvem (em seções transversais) e boa velocidade de aquisição de pontos de até 1.000 pt/s. Como desvantagens, dependência da cor e do acabamento superficial do modelo, dependência da iluminação do ambiente, dificuldade de digitalizar aberturas profundas ou concavidades, volume de digitalização cilíndrico pequeno (450x 450 mm de diâmetro) e médio custo (US\$ 40 000 a US\$ 80 000).

1.1.7 Triangulação Laser de Varredura por Linha

A digitalização é realizada de forma automática, sem tocar o modelo físico. Baseia-se no mesmo princípio da varredura por ponto, só que os sensores permitem a triangulação de uma linha inteira, não um só ponto por vez, alcançando velocidades muito superiores. Um espelho rotativo de duas faces espelhadas desvia o feixe de laser sobre outro espelho que o reflete sobre a forma, formando uma linha. O laser é captado pelo sensor linear através de outro espelho de mesma inclinação e do próprio espelho rotativo de duas faces [19]. A figura 10 ilustra o funcionamento da varredura, e a figura 11 mostra o equipamento.

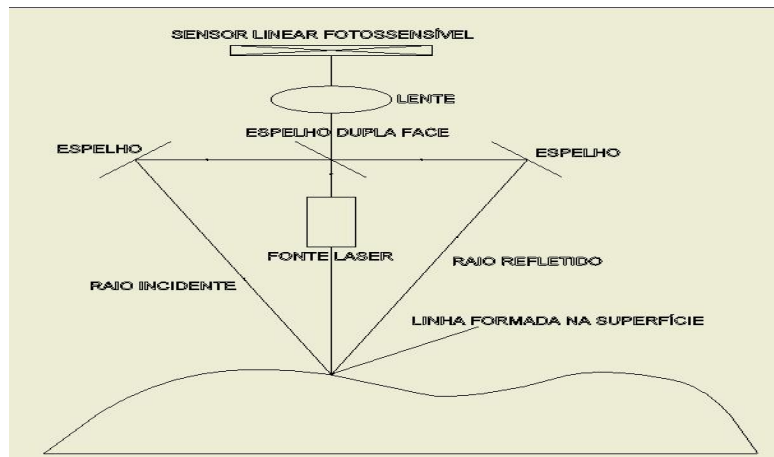


Figura 10 – Varredura por linha

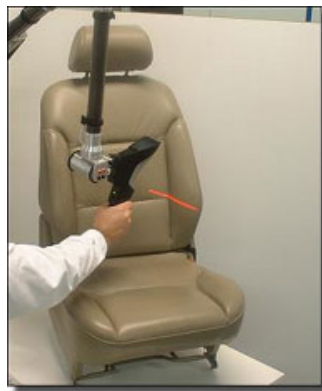


Figura 11 – Digitalizador 3D Scanners [19]

A Triangulação Laser de Varredura por Linha apresenta, como vantagens, baixa incerteza das coordenadas (0,02-0,5mm), facilidade de obtenção de grandes densidades de pontos, velocidade de aquisição de pontos elevada (1.000 a 14.500 pt/s) e volume médio (280x345x110 a 1200x1500x2500mm). As desvantagens são a dependência da cor e do acabamento superficial do modelo, dependência da iluminação do ambiente, dificuldade de digitalizar aberturas profundas ou concavidades e alto custo (US\$ 48.000 a US\$ 514.000).

1.1.8 Triangulação por Cores com Câmara CCD

Ritter [20] apresentou uma técnica de digitalização por triangulação de cores captadas por uma câmara CCD colorida. A forma é iluminada por uma fonte de luz branca refratada através de um prisma. A câmera capta um perfil deformado do espectro sobre a superfície do objeto. Os cálculos de profundidade são feitos por comparação com uma imagem obtida de um plano de referência com altura conhecida. Todos os pontos da imagem são comparados com o do plano de referência, de modo individual para as componentes RGB ("Red, Green and Blue") das imagens. Conforme a intensidade de cada componente, é calculada a altura do ponto correspondente.

Esta técnica é aplicada praticamente apenas em laboratório. Em virtude disto, não é possível obter parâmetros comparativos comerciais como custo e aplicabilidade. Algumas de suas características são as incertezas da medição que dependem da distância e inclinação entre a câmara e o objeto, ficando entre 0,4 e 2mm, que pode ser considerada alta. A velocidade de digitalização, por ser um sistema óptico e de rápido processamento, é um sistema dependente das condições da amostra, como cor e luminosidade do ambiente.

1.1.9 Fotogrametria por Conjuntos de Câmaras CCD

É realizada de forma automática, sem tocar o modelo físico. Baseia-se na obtenção de diferentes perspectivas do objeto através de duas ou três câmaras digitais CCD. Cada câmara produz uma imagem diferente cuja resolução é uma

das características do CCD utilizado. É necessário executar uma calibração [21] do conjunto de câmaras com um modelo físico de dimensões conhecidas. Essa calibração permite corrigir distorções nos cálculos das coordenadas de pontos do objeto, por transformações reversas de perspectiva como as descritas por Foley [22]. Conhecendo-se a posição das câmaras e efetuando sua calibração, pode-se calcular, de modo automático, as coordenadas dos pontos da forma. A rotação da forma, em frente ao conjunto de câmaras, permite um arquivo de pontos de contorno completo da forma, pelo acréscimo das coordenadas obtidas com sucessivas perspectivas.

As principais vantagens deste processo é a facilidade de obtenção de grandes densidades de pontos e a velocidade de aquisição de pontos elevada.

Como desvantagens, podemos citar o pequeno volume de digitalização (200x100x200mm), a dificuldade de digitalizar aberturas profundas ou concavidades e o médio custo (US\$ 40 000).

1.1.10 Fotogrametria por Fotografias Digitalizadas

A partir de um conjunto de fotografias digitalizadas em scanners 2D, pode-se calcular as coordenadas de pontos escolhidos nas fotos. Como as posições da câmera não são conhecidas, é necessário um processo interativo de indicação da correspondência entre os pontos das diferentes imagens utilizadas.

Um exemplo de programa de fotogrametria é Photomodeler [23], que oferece ferramentas para a marcação de arestas nas várias vistas, para depois retirar a textura e aplica-lá às faces do modelo tridimensional.

A precisão dos modelos obtidos depende da resolução da digitalização feita das fotos e também da distância e das proporções do objeto fotografado. Normalmente os modelos são de qualidade insuficiente para aplicações em engenharia, limitando-se o uso à construção de ambientes para simulações em realidade virtual, como é o caso do veículo apresentado na figura 13 .

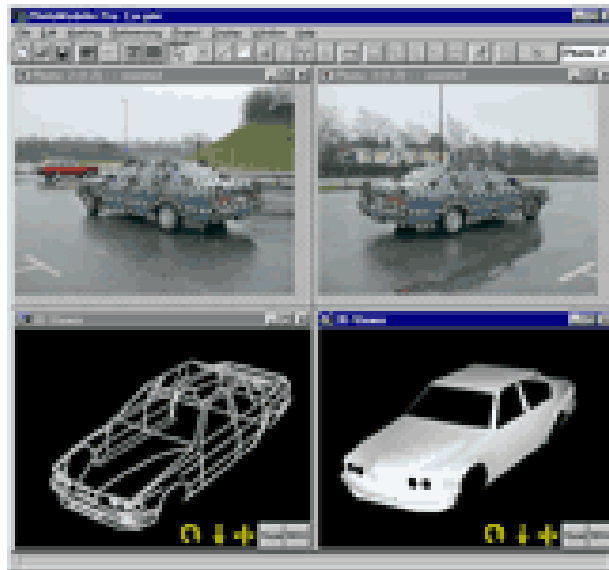


Figura 13 – Modelo VRML produzido com Photomodeler [23]

Suas vantagens são a facilidade de obtenção de modelos poliédricos texturizados, a possibilidade de digitalização de grandes modelos e o baixo custo (US\$600).

Como desvantagem, citamos a dificuldade de digitalizar aberturas profundas ou concavidades e a grande incerteza dimensional.

1.1.11 Radar Laser

É a combinação das tecnologias de medição por laser e radar. Também é chamado Lasar. Serve para a digitalização de grandes estruturas, como pontes e prédios, devido à característica do radar percorrer grandes distâncias sem degradação. Baseia-se na obtenção de duas imagens: uma contendo informações de luminosidade para cada ponto do CCD (obtida pela reflexão do laser), e outra com informação de profundidade para cada ponto (obtida pela reflexão do radar) [24]. Figura 14.



Figura 14 – Sistema de Radar Laser modelo Laser Tracker [24].

Como vantagens deste processo, temos a facilidade de obtenção de grandes densidades de pontos, a velocidade de aquisição elevadíssima (100.000-390.000 pt/s) e a possibilidade de digitalização a grandes distâncias (mais de 1000mm).

Suas desvantagens são o médio custo (US\$ 50.000) e a baixa resolução para grandes volumes (10mm).

1.1.12 Tomografia

É um processo de digitalização com raio X de grande intensidade, desenvolvido para formas metálicas. Permite a obtenção de coordenadas de superfícies exteriores e interiores da forma. Ainda está em desenvolvimento, não sendo produzido comercialmente. A digitalização pode ser feita com incertezas de apenas 0,005mm para formas pequenas ou com 1,0mm para formas de 1,0 metro [25].

Por outro lado, a tomografia vem sendo largamente utilizada na medicina e na biomecânica, na obtenção de imagens no interior do corpo humano (ver figura 15), que podem ser processadas para a obtenção de modelos tridimensionais para próteses ou implantes.



Figura 15 – Osso com pinos Digitalizados [25]

1.1.13 Tunelamento

O tunelamento pode ser usado para a digitalização 3D de superfície de pequeníssimas dimensões. Tunelamento é o fenômeno de passagem de elétrons entre a superfície de uma amostra e uma sonda pontiaguda, quando esta chega à distância de 0,5nm. O salto de elétrons através do vácuo (tunelamento) é extremamente dependente dessa distância, e se for monitorado para permanecer constante, enquanto a sonda é deslocada sobre a superfície, os deslocamentos da sonda podem ser registrados, formando uma representação tridimensional por pontos afastados de 0,1 mm[26].

A figura 16 apresenta a imagem da superfície de uma molécula de benzeno, mostrando uma área de aproximadamente 5,5 x 5,5 μm . A altura das saliências é de 0,6 μm e o comprimento é de 1,2 μm a 4 μm .

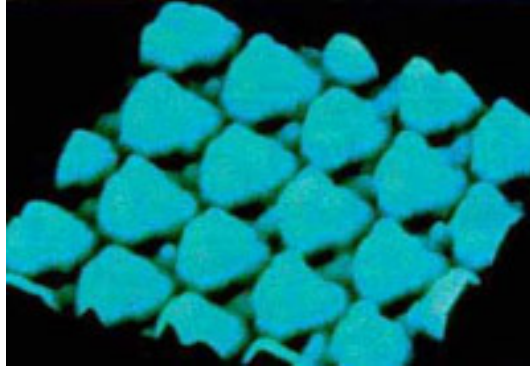


Figura 16 – Superfície de uma molécula de benzeno [26]

1.1.14 Projeção de Moiré

Esta tecnologia (Shadow Moiré) se baseia na captação de uma imagem por uma câmara digital CCD através de uma malha com reticulado muito pequeno. A partir da medição das franjas que resultam do batimento das linhas da malha e sua sombra na superfície da forma, é feito o cálculo das alturas dos pontos correspondentes no modelo [27]. A geometria completa de uma forma pode ser obtida através da associação dos pontos de várias imagens, de diferentes pontos de vista [28].

Suas vantagens são a facilidade de obtenção de grandes densidades de pontos, a velocidade de aquisição de pontos elevada (25 000-200 000 pt/s) e a digitalização de baixíssima incerteza (0,001- 0,1 mm).

Suas desvantagens são o médio custo (US\$ 50 000) e o pequeno volume de digitalização(5x5x0,3mm até 300x300x300mm).



Figura 17 - Imagem de um rosto utilizando Moiré [29]

1.1.15 Luz Infravermelha e CCD Linear

É realizada de forma manual, sem tocar o modelo físico. Baseia-se na incidência de luz infravermelha sobre a superfície a digitalizar e reflexão sobre uma linha de células foto-sensíveis (CCD linear). Suas vantagens são o volume de digitalização grande (2600x3540x6000-6000x3540x8000 mm) e a independência da cor e do acabamento superficial do modelo. Como desvantagens, temos a grande incerteza das coordenadas(0,2mm), a dificuldade de digitalizar aberturas profundas ou concavidades e o médio a alto custo (US\$ 58.000 – US\$ 152.000)

1.1.16 Conoscópico

O Laser pontual emite um feixe de laser que é refletido por um divisor de feixe e incide sobre a peça que está sendo medida. A luz dispersada retorna da peça através do divisor de feixe e do cristal birrefringente e é detectada então pela câmera do CCD do sensor, conforme figura 18.

Como vantagens deste sistema, temos a velocidade de aquisição de pontos elevada (3000 pt/s), uma digitalização de baixíssima incerteza (0,001- 0,1 mm), a possibilidade de medição de paredes com até 85° verticais (baixa região de sombra) e a precisão de medição de até sub-micron (0.1µm). Como desvantagem, é possível citar o seu médio custo (US\$ 50.000).

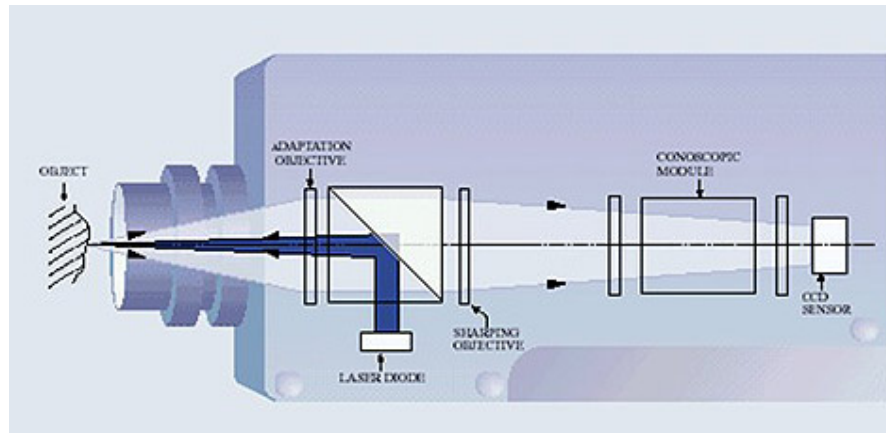


Figura 18 - Sensor laser Conoscópico, marca OPTIMET [30].

1.2 Engenharia Simultânea

1.2.1 Definições

Engenharia Simultânea e Engenharia Concorrente são denominações recentes para o processo de desenvolvimento de produtos, onde se adota a metodologia de trabalho conjunto e cooperativo, em lugar do trabalho independente e seqüencial.

Conforme o dicionário Melhoramentos Eletrônico [31], concorrer significa tanto “juntar-se para uma ação ou fim comum; contribuir, cooperar, correr para o mesmo objetivo”, como também “rivalizar com outrem”. Concorrente, conforme o dicionário Aurélio [32] deriva do latim *concurrente* que adjeta alguém “que concorre”, “competidor”. Neste trabalho, usou-se a denominação Engenharia Simultânea, como expressão que reforça a idéia de paralelismo e simultaneidade na execução das tarefas, sem sugerir competição ou rivalidade como poderia acontecer com Engenharia Concorrente.

1.2.2 Propósitos

Engenharia Simultânea visa ao aumento das chances de sucesso do produto, através da melhoria de qualidade, da redução do tempo para a colocação no mercado e da redução do custo de produção [33].

Melhoria da qualidade:

A qualidade pode ser melhorada através da colaboração de vários setores da empresa no processo de desenvolvimento do produto. Morup[1] e Kusiak[2] defendem que todas as etapas do ciclo de vida do produto devem ser consideradas não só durante a fase ativa do projeto, mas desde a concepção do produto até o seu descarte, a fim de atender aos requisitos de comercialização, produção, distribuição, uso e descarte.

As contribuições feitas desses vários pontos de vista, durante o projeto, podem trazer um aprimoramento em relação à facilidade de manufatura e montagem. Por exemplo, um projeto não considera dificuldades de distribuição, assistência técnica, e até descarte, não trazendo a satisfação completa a todos os consumidores.

O caráter multi-disciplinar do trabalho em Engenharia Simultânea favorece a união de capacidades distintas, permitindo a detecção precoce de problemas.

Redução no Tempo de Desenvolvimento:

O fabricante que consegue lançar um produto novo, antes da concorrência, conquista e mantém a maior parcela do mercado. Um atraso de 6 meses na colocação de um produto no mercado pode reduzir em 33% os lucros esperados[3].

Segundo Dietz [34], 70% a 80% das chances de sucesso de um produto dependem do projeto. O resultado de uma pesquisa feita em 1990 junto a 140 indústrias alemãs mostra que o planejamento efetivo e a organização do processo

de desenvolvimento, com todos os setores envolvidos, reduzia, em média, 46.3% o tempo para lançamento de um novo produto, enquanto o simples uso de CAD/CAM reduziria em apenas 23,5%, conforme figura 19.

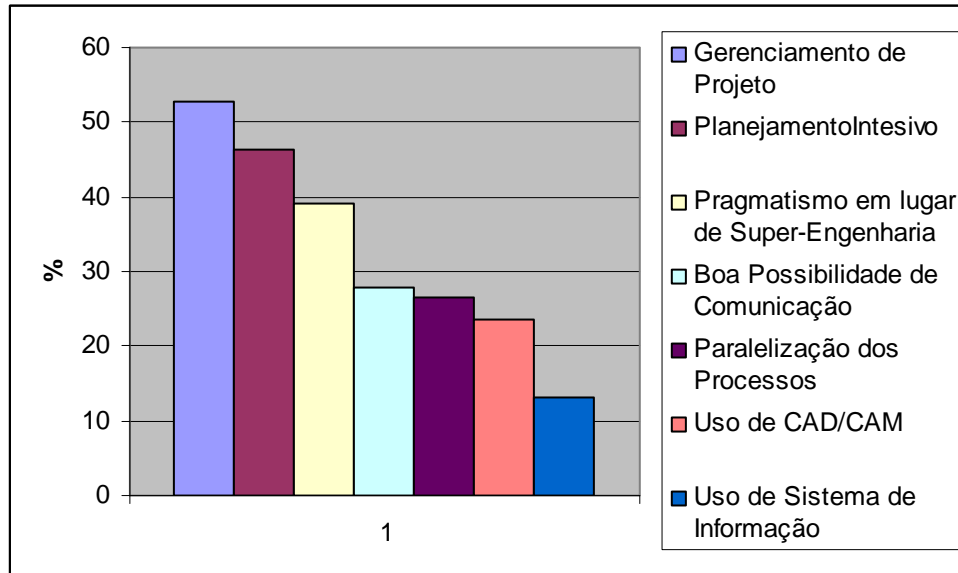


Figura 19 – Possibilidades de redução no tempo de desenvolvimento.

Prasad [35] representa o ganho de tempo que pode ser obtido com o uso de Engenharia Simultânea, em lugar do método tradicional seqüencial com o esquema da figura 20.

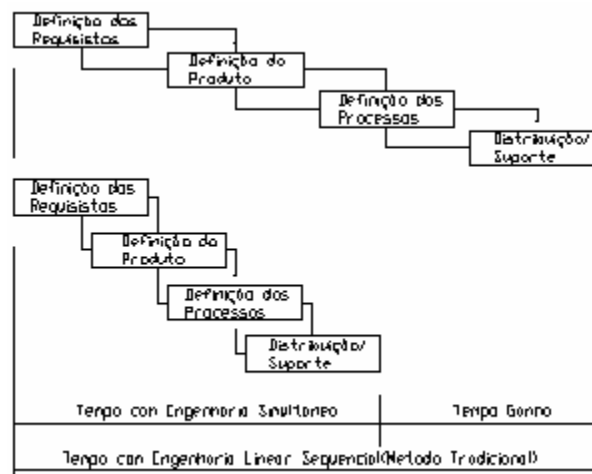


Figura 20 – Tempo ganho com Engenharia Simultânea

A execução paralela das atividades, tradicionalmente posteriores ao projeto, permite um ganho significativo de tempo.

Redução dos Custos:

Hartley[3] mostra que, no caso da Ford Motor, apesar do projeto demandar 5% do custo (relativo ao tempo de produção) ele tem influência sobre 70% dos custos globais. Um projeto que leva em consideração os requisitos de todas as etapas do ciclo de vida de um produto exige poucas modificações posteriores. Modificações feitas ainda durante a fase do projeto têm um custo muito baixo, se comparado ao custo que teriam após o investimento de tempo e recursos em sistemas de manufatura e suporte. A Engenharia Simultânea permite que se percebam necessidades de modificação antes da conclusão do projeto.

Apesar da necessidade de investimentos em treinamento e suporte computacional para Engenharia Simultânea, o custo da etapa de projetos é baixo em relação à lucratividade possível com um produto. Hartley apresenta dados como:

- Um custo de desenvolvimento de produto 50% superior reduz apenas 3,5% dos lucros;

- Produto produzido a custo mais baixo permite mais lucratividade e competitividade (um custo 9% mais alto reduz 22% dos lucros).

Pode-se dizer que o custo da Engenharia Simultânea é muito baixo, se comparado ao benefício que traz.

1.2.3 Métodos de Implementação

A implantação prática da filosofia de Engenharia Simultânea tem se baseado em dois métodos principais [36]:

Formação de Equipes de Engenharia Simultânea – Um grupo multidisciplinar, composto por representantes dos vários setores da empresa (e

seus parceiros), se reúne para discutir e trocar informações sobre o produto nas diversas etapas do seu ciclo de vida. O grupo é responsável pela negociação das características fundamentais do produto, levando em consideração os requisitos de cada etapa. Este método pode, ou não, ser apoiado por sistemas de computador.

Adoção de Sistemas Computacionais de Suporte – Implantação de bancos de dados centralizados ou distribuídos, estruturados para permitir que as informações associadas a estruturas de produtos, sejam compartilhadas sem redundância ou duplicidade. As informações incluídas por equipes do projeto ficam imediatamente acessíveis ao pessoal de planejamento de processos de fabricação, para permitir avaliações e contribuições, mesmo antes do projeto estar concluído. As informações sobre recurso de manufatura e montagem ficam acessíveis aos projetistas, para permitir que sejam levadas em consideração desde as fases iniciais do projeto [37].

1.3 Suporte Computacional

Qual é o estado atual do desenvolvimento de ferramentas de suporte computacional para a engenharia? Quais as atividades suportadas em ambientes computacionais para Engenharia Simultânea? Qual o contexto atual de suporte à Engenharia Simultânea em que se pretende inserir a digitalização 3D?

O suporte computacional às atividades de engenharia evoluiu a partir dos primeiros programas de CAD até os sofisticados sistemas corporativos de engenharia simultânea, baseados em PDM/EDM, que propiciam o fluxo de informações entre as diferentes equipes de trabalho, desde a concepção estilística do produto até o suporte técnico aos usuários.

O computador vem sendo utilizado para modelamento de produtos sob diferentes pontos de vista. Os primeiros programas de CAD produziam uma representação digital bidimensional dos vetores de desenhos de engenharia, substituindo a folha de desenho. Depois os programas de CAM surgiram para

produzir programas de máquinas CNC, criando uma representação própria das trajetórias de ferramentas e seqüências de usinagem, baseada nos desenhos de CAD. O surgimento constante de novas ferramentas trouxe muitas formas diferentes de representar digitalmente o mesmo produto.

A implementação da Engenharia Simultânea cria a necessidade de compartilhar informações entre os diferentes sistemas de suporte computacional, podendo haver a necessidade de transformação das representações particulares a cada programa de suporte, de forma que possam servir aos outros programas quando necessário, como, por exemplo, as representações de CAD que podem ser necessárias para facilitar o trabalho com CAM.

O objetivo de um sistema de suporte à engenharia é manter um modelo que possa ser utilizado por todos, sem dificuldades de transformação de representações, mantendo a associação entre as diferentes visões do produto.

1.3.1 Os sistemas CAD/CAM

Até a década de 70, as cavidades com geometrias tridimensionais eram produzidas por fresamento de cópia. O advento dos sistemas CAD/CAM, aliados às máquina-ferramentas de três eixos, com movimentos simultâneos e controladas numericamente (CNC), trouxeram grandes evoluções para a área de moldes. Não mais era preciso dispor do modelo do produto para fabricar a cavidade; podia-se, então, fabricar moldes com as mais variadas geometrias. Os limites para a criatividade passaram a ser mais amplos, assim como o número de variáveis do processo. A partir deste momento, começaram os estudos para tentar descrever o processo e aperfeiçoar os sistemas.

Ahrens [38] cita a classificação dos sistemas CAM quanto à geração de programas em CAM 2½ D e 3D, respectivamente, para usinagem de modelos 2D em 2½ eixos e, para usinagem de modelos 3D, em 3, 4 ou 5 eixos.

Nos sistemas CAD/CAM, é possível trabalhar com a representação geométrica em *wireframe*, superfícies sólidas e malhas de triângulos, as quais foram descritas por *Cavalheiro* [39]. A malha de triângulo é um formato de arquivo confiável e que armazena apenas características (*features*) essenciais para a representação do modelo geométrico. Assim, alguns sistemas CAM, como o PowerMILL[40], adotam-na como forma de representar seus modelos, pois simplifica a geração de trajetórias e reduz seu tempo de cálculo, apesar de dificultar a manipulação e edição da geometria e exigir mais espaço para armazenamento do arquivo. Entretanto, deve-se atentar para o tamanho dos triângulos, pois estes determinarão a precisão de forma da cavidade[37].

Ainda com relação ao modelo, mais especificamente quanto à integração dos recursos de modelamento, os sistemas CAD/CAM podem ser: totalmente integrados, CAM integrado a um CAD independente e CAM dedicado [41]. Os sistemas CAM dedicados necessitam importar modelos geométricos, sobre os quais as trajetórias serão criadas. Para tanto, utilizam-se interfaces neutras, como IGES, STEP e STL.

Com a grande evolução dos computadores pessoais (PC), que são consideravelmente mais baratos que a Workstation, a tendência é que a maioria dos sistemas CAD/CAM operem em PC. Rodando, geralmente em Windows NT, obtiveram-se melhorias na instalação, visualização gráfica, operação e interface com usuário, edição e integração de dados ou imagens com editores gráficos e de texto [42,43].

1.3.2 STL (Stereolitografia)

Como existem vários tipos de sistemas CAD e eles usam formatos diferentes de algoritmos para desenhar a peça, utiliza-se, como padrão para prototipagem, o STL (Stereolithograph). Esse formato transforma um modelo CAD ou uma nuvem de pontos em uma malha de triângulos. O arquivo contém informação dos vértices e normais da figura. Essa malha é a mesma utilizada em

análise de elementos finitos. Estas malhas também podem ser criadas por softwares de Engenharia Reversa.

Para a conversão de arquivos é aconselhado:

- Usar, como parâmetro de conversão, tolerância de 0,01mm, para que o modelo não fique facetado;
- fechar todos os “furos” na malha;
- orientar as normais para fora e
- exportar o modelo com o parâmetro binário.

1.3.3 Modelamento de Superfícies Nurbs

Para compreendermos melhor o que é uma Superfície Nurbs, necessitamos antes conhecermos conceitualmente a origem do modelamento matemático de uma superfície. A origem é a “Spline”, que é uma curva de forma livre que conecta uma série de pontos de controle com uma curva suave. Mudanças nos pontos de controle resultam em mudanças na curva. “Bspline” e “Bezier” são exemplos de curvas spline.

NURBS (Non-Uniform Rational Bézier Spline): tipo de curva de forma livre que usa B-splines e permite verificação de valor de cada ponto da superfície. Um segundo aspecto da tecnologia digital que tem um impacto crítico sobre a arquitetura é o fato de que programas como Softimage, 3D Studio Max, Alias e Maya são sistemas NURBS, baseados em cálculos. Isto contrasta com outros programas cartesianos muito usados, como o Auto-Cad. Apesar desses programas serem versáteis, é muito difícil desenhar curvas fluidas com eles. São programas que se baseiam em coordenadas pontuais para cada ponto, linha ou plano no sistema de coordenadas X, Y, Z. Em contraste, em um sistema de modelagem baseado em NURBS, as Non-Uniform Rational Bézier Spline são a base para a geração de formas. Um sistema de modelagem NURBS é bem diferente. Mediante o uso de fórmulas algorítmicas, as linhas e as superfícies são ajustadas e recalculadas continuamente. É um sistema inerentemente mais

dinâmico: superfícies e objetos são desenvolvidos em uma relação mutável com a superfície.

1.3.4 STL x IGES

A modelagem NURBS é utilizada para fazer superfícies e construções de formatos bem complexos, através de uma representação matemática bem precisa destes elementos. Imagine uma esfera subdividida em um monte de pequenos triângulos: esta é uma representação chamada de poligonal e necessita de muitos destes triângulos para que a esfera fique com a superfície suave. A mesma esfera pode ser representada por algumas poucas linhas NURBS que contêm informações matemáticas sobre a suavidade da esfera. Qual a diferença? Simples. O arquivo com triângulos é mais "pesado" em relação ao arquivo NURBS, e quanto mais complexa a forma da superfície, muito mais triângulos são necessários, enquanto que quem comanda a complexidade no modelo NURBS é a matemática. Porém, a obtenção de uma superfície seja ela NURBS ou não, através de engenharia reversa, é muito mais difícil do que o a mesma geometria em triângulos. A explicação é simples. A maioria dos produtos submetidos à Engenharia Reversa (Digitalização) partem de um modelo criado manualmente que não obedece equações matemáticas e, portanto, dificilmente podem ser reproduzidas perfeitamente por uma superfície matematicamente construída. No entanto, se forem adquiridos os pontos necessários para manter a precisão requerida, o processo de triangulação apenas une os pontos, o que matematicamente é mais simples. Inclusive, com uma filtragem de triângulos (decimalização), é possível reduzir o número de triângulos sem perder qualidade e precisão em relação ao modelo original.

1.4 Processos de Usinagem a Alta Velocidade (HSM)

1.4.1 Histórico e Definição

Até recentemente, a usinagem a altas velocidades limitava-se à fabricação de protótipos ou estudos desenvolvidos em centros de pesquisa. Basicamente, isto se devia à carência de ferramentas, à dificuldade da obtenção de máquinas-ferramentas com alto desempenho de eixos e árvores com qualidade confiável e custo competitivo. O termo *High Speed Machining* – Usinagem com Altas Velocidades de Corte (HSM ou HSC – *High Speed Cutting*), comumente, se refere ao fresamento de topo com altas velocidades rotacionais e de avanço. É utilizado, por exemplo, na indústria aeroespacial para a abertura de bolsões em seções de alumínio, gerando altas taxas de remoção de material. Outro campo que tem se tornado cada vez mais comum à aplicação da HSM é o da fabricação de moldes e matrizes, também com atribuições técnicas na usinagem de faceamento 2D, principalmente na indústria automobilística. Há algumas décadas, a HSM tem sido aplicada em uma ampla gama de materiais metálicos e não-metálicos, incluindo a produção de peças com necessidades específicas de superfície e usinagem de materiais com dureza igual ou superior a 50 Hrc [44,45].

A definição do termo “Usinagem a altíssimas velocidades de corte”, originalmente proposta por Dr. Carl J. Salomon, sobre a qual obteve patente em 1931, assume que “a uma determinada velocidade de corte (5-10 vezes mais elevada que na usinagem convencional), a temperatura de remoção de cavacos começará a diminuir...” da qual se conclui: “haver uma chance para melhorar a produtividade na usinagem com ferramentas convencionais a altas velocidades...” [44,46]. A patente foi obtida após uma série de experimentos entre os anos de 1924 e 1931, sendo baseada em curvas de velocidade de corte, associadas com a temperatura de corte gerada (figura 21). Estes experimentos foram realizados com metais não-ferrosos, tais como alumínio, cobre e bronze.

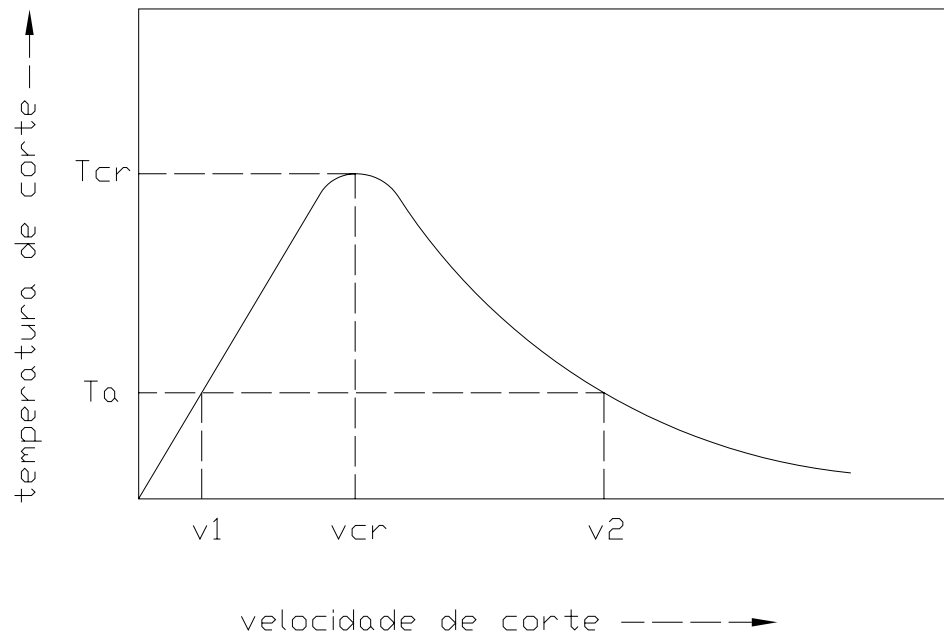


Figura 21: Gráfico de velocidade de corte versus temperatura de corte – Teoria de Salomon.

Segundo Salomon, citado em [46], a temperatura de corte alcança um valor máximo para uma dada velocidade de corte, mas reduz seu valor assim que a velocidade continua sendo elevada. Como a velocidade de corte era elevada de 0 para v_1 numa condição normal, a temperatura eleva-se numa relação direta até que o valor máximo T_{cr} era alcançado. A velocidade de corte para T_{cr} é comumente denominada de velocidade de corte crítica v_{cr} . Se a velocidade de corte era novamente elevada, era previsto que a temperatura de corte reduziria. Próximo ao valor de v_{cr} , Salomon sugeriu que existia um regime de trabalho instável em que as ferramentas de corte não seriam capazes de suportar o processo severo de forças e temperaturas[46].

A forma da curva foi idealizada para ser dependente do material base a ser cortado. Para tanto, a teoria de Salomon propõe que quando a velocidade de corte for suficientemente elevada até v_2 , a temperatura resultante para este valor (ver gráfico da figura 1) se reduz para aquela da temperatura de corte normal para v_1 . Desta maneira, os materiais e ferramentas de corte permitiriam procedimentos

práticos de corte. A mesma temperatura de corte T_a encontrada na faixa de velocidade normal v_1 , poderia ser reproduzida na faixa de alta velocidade v_2 [46].

As pesquisas atuais, no entanto, não têm sido capazes de verificar essa teoria em toda sua extensão. O que tem se verificado é que há uma diminuição relativa da temperatura no gume da ferramenta que se inicia em determinadas velocidades de corte e varia para diferentes materiais. A diminuição é pequena para aços e ferro fundido e maior para alumínio e outros metais não-ferrosos. Portanto, a definição de HSM ainda deve se basear também em outros fatores [47].

Os estudos conduzidos por Salomon são agora principalmente de interesse histórico, desde que pesquisadores desenvolveram e estão desenvolvendo dados mais definitivos a partir de técnicas sofisticadas. VAUGHN, citado em [46], realizou a primeira investigação sistemática de HSM nos Estados Unidos para a *Lockheed Aircraft Corporation* em 1958. O mesmo estudou uma série de variáveis envolvidas na usinagem convencional que adquirem maior importância sob o ponto de vista da usinagem a altas velocidades, tais como tamanho e tipo de máquina, potência disponível, ferramenta de corte utilizada, material a ser usinado, velocidade, avanço e profundidade de corte.

Em 1970, uma segunda série de estudos foi iniciada. Estes estudos foram contratados pela U.S. Navy com a Lockheed Missiles & Space Company com o objetivo de determinar a possibilidade de usar a HSM em um modo de produção, inicialmente com ligas de alumínio e posteriormente com níquel – alumínio – bronze. A equipe de pesquisadores demonstrou que era economicamente viável a introdução da HSM num ambiente de produção, o que conduziu a um aumento de porte global do interesse neste processo. Já no final de 1970 e próximo a 1980, uma terceira série de contratos foi estipulada entre *U.S. Air Force* e a *General Electric Company* com o objetivo de fornecer uma base de dados para a usinagem de ligas de alumínio, ligas de titânio, superligas à base de níquel e aços [46].

De acordo com Field [48], não existe uma resposta definitiva sobre o que é mito e o que é verdade na definição e uso de HSM. Em cada aplicação HSM, os usuários deveriam testar a ferramental para determinar as melhores condições para cada operação em particular (as melhores velocidades e avanços para cada ferramenta), não ficando restritos a especificações dos fornecedores.

Por outro lado, Sandvik[47] afirma existirem muitas opiniões, mitos e diferentes maneiras de definir a HSM. Entretanto, parece haver um consenso com relação as seguintes afirmações:

- HSM não é simplesmente alta velocidade de corte. Deve ser vista como um processo em que todas as operações são realizadas com métodos e equipamentos de produção muito específicos;
- HSM não é necessariamente usinagem com altíssima rotação da árvore. Muitas aplicações HSM são realizadas com rotação de eixo-árvore moderadas e fresas de grande tamanho;
- HSM é realizada no acabamento de aços endurecidos com velocidades de corte e avanço geralmente 4 a 6 vezes maiores que as usadas na usinagem convencional;
- HSM é usinagem para alta produtividade que permite desbaste e acabamento de peças pequenas e acabamento fino em peças de todos os tamanhos;
- HSM crescerá em importância, quanto maior a necessidade de obter peças próximas do formato final por usinagem.

Novas definições e diferentes pontos de vista vem surgindo no campo da HSM, como é o caso de Horn[49], que afirma que o termo High Speed Machining foi e continua sendo uma expressão popular desde o começo da década de 90, particularmente em relação a partes produzidas por centros de usinagem. HSM tende a ser limitada ao fresamento de partes esculturais típicas da indústria de moldes e matrizes e aeroespacial, não se referindo a outras operações comumente encontradas em fábricas de moldes como furação e retificação.

Devido a isso, o termo “Usinagem de Alta Performance”(HPM-High Performance Machining), seria mais apropriado, porque abrange todos os tipos de operações de usinagem. A usinagem de alta performance é alcançada quando a melhor tecnologia e melhor custo efetivo são colocados em uso no chão-da-fábrica, levando em consideração o potencial da máquina-ferramenta (toda a máquina, características mecânicas e de controle), o ferramental, sistemas de fixação, processamento e estratégias de usinagem.

1.4.2 Características Gerais da Usinagem a Altas Velocidades

De acordo com Schulz [50], verifica-se com o aumento da velocidade de corte, uma redução nas forças de usinagem, uma maior taxa de remoção de cavacos, uma melhoria na qualidade superficial das superfícies usinadas e uma redução da vida das ferramentas de corte.

Como consequência direta da utilização de altíssimas velocidades de corte, partindo-se do objetivo de aumentar a taxa de remoção de material, verificou-se que isso proporciona muitas vantagens, as quais podem ser divididas em um aumento na qualidade, umas reduções do tempo de produção e de custos [51], conforme figura 22.

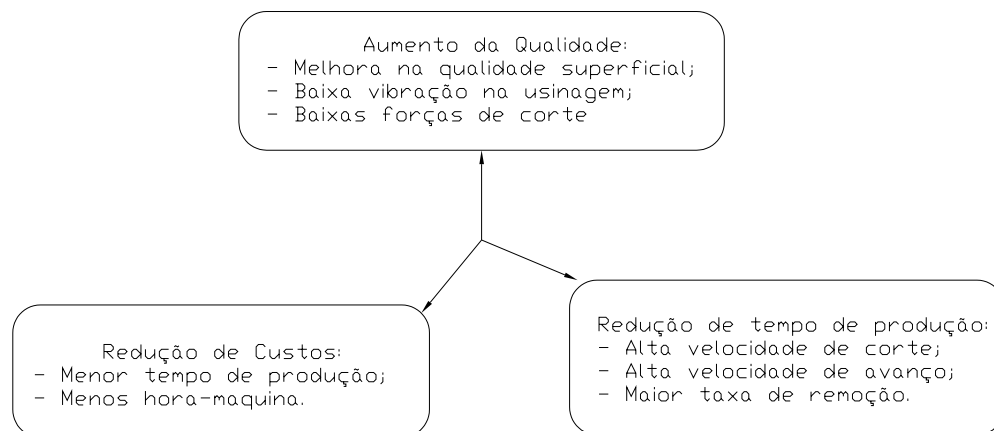


Figura 22: Vantagens da usinagem a altas velocidades de corte [52].

A utilização de altíssimas velocidades de corte oferece um conjunto de vantagens técnicas e econômicas em vários campos de aplicação. A faixa de utilização, considerada para HSM, depende, sobretudo, do material da peça, do tipo de operação de corte e da ferramenta de usinagem.

Geralmente, na usinagem a altas velocidades, trabalha-se com valores de avanços maiores e com profundidade de cortes menores do que aqueles utilizados na usinagem convencional. Em decorrência das menores profundidades de corte utilizadas, têm-se menores forças radiais atuando sobre a ferramenta e a árvore, o que evita desgastes prematuros nos rolamentos, guias e parafusos de acionamento [47]. Conseqüentemente, as tensões superficiais, originadas pelo passe de fresamento, são reduzidas, sendo possível evitar modificações térmicas e químicas que possam alterar as características do material, ou causar problemas para as operações posteriores [53].

A baixa força de corte resulta em uma deflexão pequena e consistente da ferramenta que, em combinação com um sobremetal constante para cada operação e ferramenta, é um dos pré-requisitos para um processo altamente produtivo e seguro.

Segundo Geist [54], mais importante do que o aumento da velocidade de corte é o aumento da taxa de avanço. Portanto, especialmente no campo da manufatura de moldes e matrizes, usando diâmetros pequenos de ferramentas para a usinagem de superfícies esculpidas (free-form surfaces), as altas frequências do eixo-árvore, em combinação com taxas de avanço elevadas, são uma caracterização mais precisa para a HSM.

A HSM possibilita a usinagem de paredes finas, visto que uma redução das componentes da força de usinagem diminui a tendência das paredes vibrarem. Além disso, as possíveis distorções da peça, críticas na usinagem de paredes finas, são eliminadas, pois a maior parte do calor gerado entre peça/ferramenta é

absorvida e transportada pelo cavaco para fora da área de trabalho. Por exemplo, uma parede de 0,2 mm de espessura e de altura 20mm poderia ser obtida. Para tal, o tempo de contato entre o gume e a peça deve ser extremamente curto para evitar vibrações e deflexão da parede, e a microgeometria da fresa deve ser muito positiva com gumes bastante afiados [47].

De acordo com SMITH e DVORAK [55], a geometria para a ferramenta de corte e as melhores trajetórias de usinagem, necessárias para produzir estruturas complexas de paredes finas, ainda não são óbvias. Também, as trajetórias de usinagem não estão facilmente disponíveis quando se usa um *software* de programação NC (CAM) comercial.

No qual diz respeito a usinagem de moldes e matrizes, se o nível de qualidade superficial, após a usinagem, for insatisfatório, haverá uma necessidade de acabamento manual, o que proporcionará uma precisão superficial adequada, porém com impacto negativo na precisão geométrica e dimensional, tempo e custos. Desse modo, um dos principais objetivos foi, e tem sido, reduzir ou eliminar tal necessidade, a fim de melhorar a qualidade superficial da peça acabada e também reduzir custos. Estes pontos têm se beneficiado sobremaneira através da HSM [47].

A precisão geométrica de componentes das matrizes e moldes proporciona uma montagem mais fácil e mais rápida. A textura e geometria superficial, produzida por um sistema CAM e máquinas CNC, apresenta qualidades muito superiores às resultantes de um polimento manual. Algumas horas podem ser consumidas na usinagem HSM, porém o trabalho de polimento manual pode ser reduzido drasticamente (geralmente 60 – 100%) [47].

Entre as suas desvantagens, a usinagem a altas velocidades apresenta:

- Alto custo do equipamento, ferramental e fixação da ferramenta;
- As taxas de aceleração e desaceleração mais altas e a partida e parada do eixo-árvore ocasionam um desgaste relativamente mais rápido das guias, roscas de acionamento e rolamentos, resultando em maiores custos de manutenção;
- São necessários conhecimentos específicos do processo, equipamentos de proteção e interface para transferência de dados;
- Pode ser difícil encontrar e recrutar pessoal qualificado;
- Erros humanos e erros de *hardware* e *software* geram grandes conseqüências;
- É necessário um bom planejamento de trabalho e processo;
- São necessárias medidas de segurança, tais como máquinas com blindagem de segurança, etc.

A principal limitação do processo de usinagem com altas velocidades de corte tem sido, sem dúvida, o acentuado desgaste da ferramenta, principalmente para o corte de aços, ferros fundidos e ligas de baixa usinabilidade, como o titânio. O sucesso da usinagem nesta área tem ocorrido em virtude do desenvolvimento de novos materiais, revestimentos e geometrias para as ferramentas de corte. Materiais de fácil usinabilidade podem ter a velocidade limitada não pelo desgaste, mas pela máquina-ferramenta disponível para o trabalho [45]. Desenvolvimentos visando à otimização dos parâmetros de usinagem, das condições de contato da ferramenta, do material do gume e de corte, escolha de ferramentas e estratégias de usinagem tem proporcionado um aumento considerável na vida das ferramentas de corte [51].

1.4.3. A Usinagem HSM na Cadeia da Produção de Moldes e Matrizes

Devido à grande importância da usinagem HSM na produção de moldes e matrizes, sendo esta uma das suas principais áreas de aplicação, é importante

enfocar os possíveis benefícios que podem ser alcançados neste setor de produção, em especial, quando são considerados valores de faturamento que este setor vem apresentando.

Segundo GOMES [53], em 1997 o faturamento bruto mundial do setor de ferramentas esteve em torno de 20 bilhões de Euros. Atualmente, os maiores fornecedores mundiais de ferramentas são os EUA, com um faturamento de mais de 5 bilhões de Euros, seguidos pelo Japão e Alemanha. Contudo, estes três líderes de mercado vem enfrentando, desde o início dos anos 90, uma concorrência cada vez maior da França, Itália, Península Ibérica (Portugal e Espanha) e dos Tigres Asiáticos (Coréia, Taiwan, Singapura, etc...), que possuem, como principal vantagem, os menores custos de mão-de-obra, fator decisivo num setor em que as operações de acabamento final das ferramentas requerem um grande percentual de polimento manual.

Na usinagem de moldes e matrizes, uma das principais metas da utilização de HSM é reduzir os custos de produção através de uma produtividade mais alta, principalmente em operações de acabamento e freqüentemente em aços-ferramenta endurecidos/temperados. Outra meta é aumentar a competitividade geral através de prazos de execução e entrega mais curtos, onde os principais fatores que possibilitam isso são:

- Produção de matrizes ou moldes em poucos, ou em único *set-up*;
- Melhoria de precisão geométrica da matriz ou molde através da usinagem, o que, por sua vez, reduz o trabalho manual;
- Aumento da eficácia de utilização das máquinas-ferramentas e da fábrica, através do planejamento de processos, com o auxílio de sistemas CAM e uma programação orientada para a fábrica.

De acordo com GOMES [53], uma grande quantidade de moldes foi fabricada no exterior, no ano de 1997, por um fabricante nacional de conexões.

Esse fabricante encomendou 473 moldes, argumentando, para a não-fabricação no Brasil, o preço e falta de prazos de entrega.

Através do emprego da usinagem a altas velocidades na produção de moldes e matrizes, processos intermediários como tratamento térmico, fresamento de eletrodos e EDM(eletoerosão), podem ser minimizados, o que resulta em custos de investimento mais baixos, além de simplificar a logística do processo. A figura 23 ilustra quais etapas do processo na confecção de um molde/matriz podem ser reduzidas, devido às características tecnológicas provenientes de uma usinagem HSM efetiva.

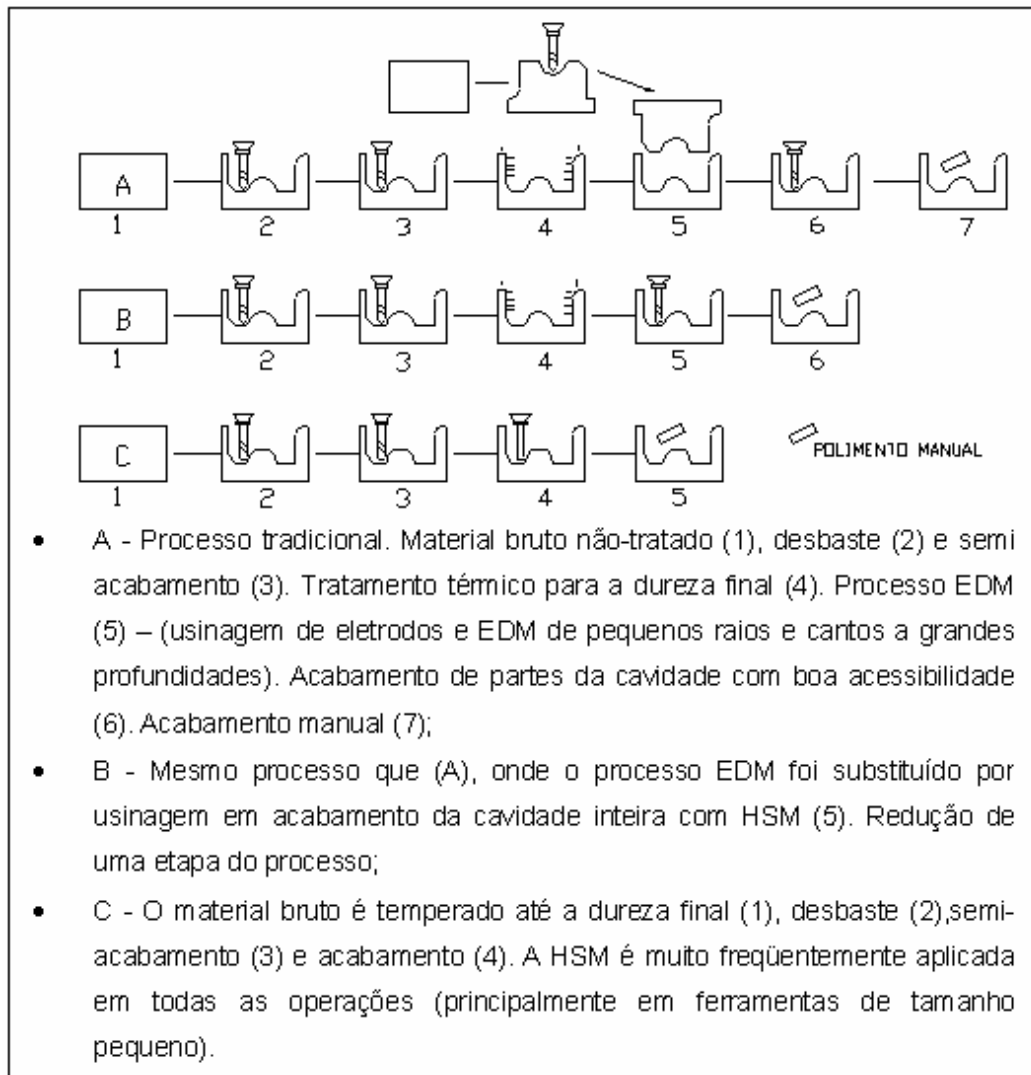


Figura 23: Etapas do processo de usinagem convencional com HSM, substituindo EDM (B) e somente usinagem HSM (C) [47].

SANDVIK [47] cita que a vida de uma matriz ou molde temperado pode, às vezes, ser aumentada quando se substitui o processo de EDM pela usinagem HSM. A EDM pode, se realizada incorretamente, gerar problemas na superfície da camada erodida que resultará em um trabalho de polimento geralmente demorado e difícil de executar. Além disso, a HSM pode usinar com tolerância dimensional de 0,02mm, enquanto a tolerância no caso da EDM é de 0,1 -0,2mm.

NOKEN et al. [56] afirma que o primeiro passo na escolha pelo processo de EDM ou de HSM está na decisão de qual processo é mais adequado para o projeto em questão. O processo de escolha pela tecnologia mais apropriada, freqüentemente, dependerá do cenário específico atual da produção da fábrica, sendo necessária uma contínua atualização de informações por parte do engenheiro, do designer ou qualquer outro projetista. Desta maneira, isto facilitará o projeto das partes e permitirá aos projetistas envolvidos no projeto escolher a técnica de manufatura mais apropriada com respeito a critérios, tais como precisão, custo, tempo de vida etc.

1.5 Processo de Fabricação de Matrizes para Calçado

O costume de retomar as formas outrora em voga para modificar e adaptar às exigências novas tornou-se, na indústria governada pela moda, parte integrante da criação artística. De fato, em uma fábrica moderna os "criadores" dispõem de uma coleção de calçados de todas as épocas e de todos os países para se documentarem. Tão grandes são as possibilidades da fabricação industrial que um determinado modelo que foi, segundo tudo indica, a obra prima única de um artesão, pode ser hoje produto de uma série. A diversidade espantosa das formas e dos desenhos que regem a moda obriga a indústria a criar uma vasta reserva de modelos. A isso obrigada também pelas rápidas mudanças do gosto público e à imperiosa necessidade de produzir sem interrupção.

A seguir (Figura 24), segue uma breve explicação sobre os processos de produção atuais de uma matriz de calçado, para melhor compreensão do todo.

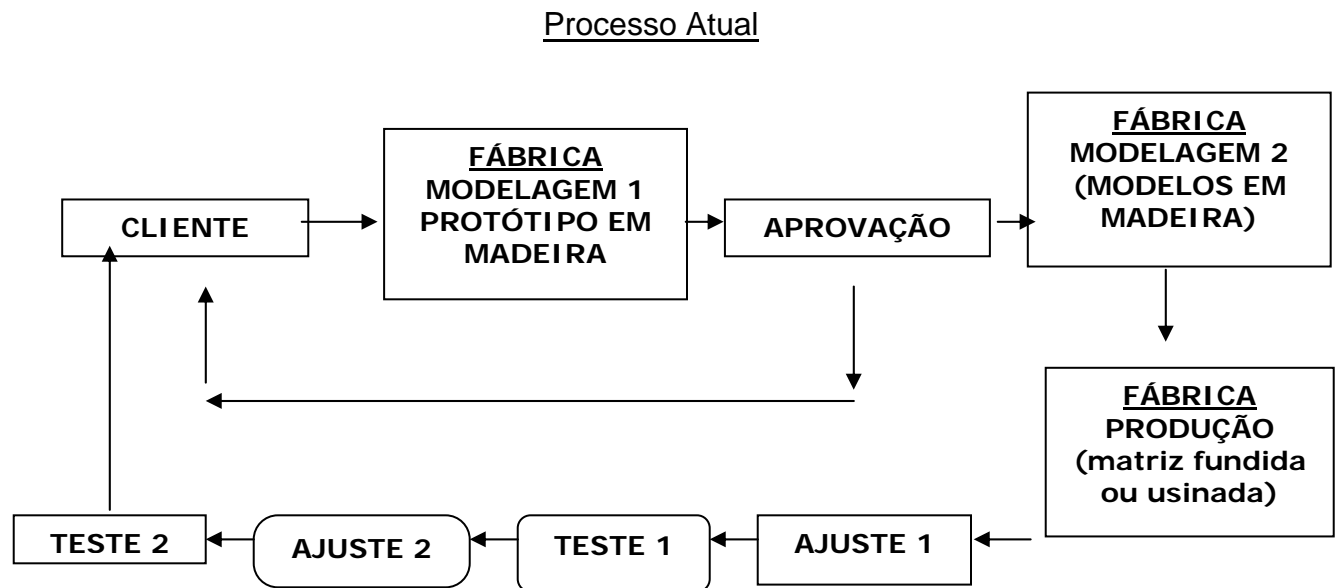


Figura 24 – Fluxograma de produção atual

CLIENTE: Normalmente, quando o cliente necessita de uma matriz, ele fornece um sapato ou uma sola para o modelista da fábrica.

FÁBRICA (MODELAGEM 1): A fábrica, por sua vez, dependendo do que o cliente fornece, começa a confeccionar um modelo (protótipo) em material base de PU, que envia ao cliente para aprovação. Este processo é muito trabalhoso e lento.

APROVAÇÃO: A aprovação é dada de acordo com a qualidade do protótipo e a idéia original do cliente. Esta fase normalmente é demorada, pois é difícil a fábrica acertar de primeira o modelo, até porque depende da habilidade manual do modelista e de informações não muito específicas dos clientes.

FÁBRICA (MODELAGEM 2): Após a aprovação do cliente, o protótipo volta para modelagem para ser confeccionada uma coleção do nº 33 ao 44, dependendo do cliente e do modelo, para servirem de protótipo para fundição da matriz.

Este processo é muito demorado e pode gerar vários problemas, pois a confecção dos modelos em escala é totalmente manual e depende da habilidade do modelista.

PRODUÇÃO (fundição/fresadora): Os modelos são moldados em gesso e fundidos ou usinados em uma fresadora pantográfica.

AJUSTE 1: Como uma matriz é composta de no mínimo 2 partes fundidas, após a fundição, elas tem que ser ajustadas para dar a vedação e não “vazarem” na hora da injeção. Este processo é extremamente lento e desgastante para o operador, uma vez que é feito totalmente de forma manual.

TESTE 1: A matriz é testada .

AJUSTE 2: Normalmente, após o primeiro teste, a matriz volta para mais ajustes e acabamento.

TESTE 2: A matriz é novamente testada e, por fim, aprovada. O número de testes e ajustes é variável, depende da complexidade do modelo e da habilidade do operador. Figura 25.

Processo Proposto

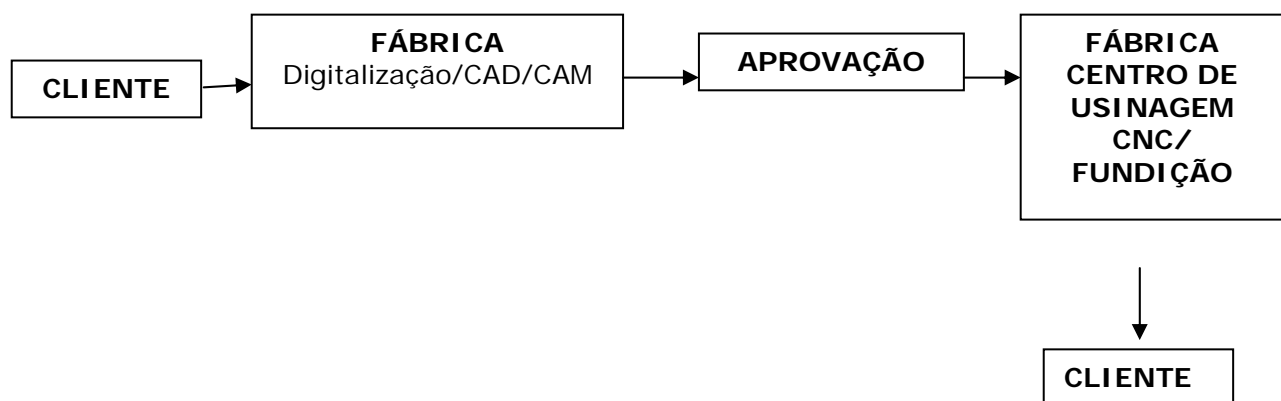


Figura 25 – Fluxograma de produção proposto

CLIENTE: Além das maneiras anteriores, o cliente ainda pode fornecer um arquivo digital da forma ou do sapato, o que hoje é muito comum, inclusive pela internet.

FÁBRICA(DIGIT./CAD/CAM): De posse de uma sola ou sapato, fornecida pelo cliente, a mesma é digitalizada e passada para o CAD, para ser visualizada em 3D e trabalhada de acordo com o cliente. A escala do Nº 33 ao 44 é feita no próprio software. Após, o CAM passa os arquivos CAD para linguagem máquina (ISO). O cliente pode querer ou não um pé de amostra, uma vez que já se tem um modelo no CAD.

APROVAÇÃO: A aprovação é dada de acordo com a qualidade do protótipo e a idéia original do cliente. Como descrito acima, esta fase é muito importante e demorada, porém, com o novo sistema, a correção dos erros e a fabricação do protótipo são muito mais rápidas e eficazes, pois elas são feitas no computador, pelo CAD.

FÁBRICA (CENTRO DE USINAGEM CNC/FUNDIÇÃO): Nessa fase, o sistema se torna mais importante, uma vez que, do CAD, o modelo é passado direto para máquina, sem a necessidade de se fabricar modelos para cópia, pois a escala já é feita no próprio CAD. Assim, há uma garantia do serviço, pois o sistema CAD/CAM/ CNC é extremamente confiável e garante a precisão dimensional, acabamento e um tempo de produção muito menor. Mesmo fazendo via matriz fundida, que igualmente necessita de um modelo para cada par, o processo leva muita vantagem, pois os modelos podem ser usinados na máquina ao invés de serem confeccionados a mão.

1.5.1 A Importância do Protótipo no Calçado

Desde os primórdios, o homem sempre sentiu necessidade de reproduzir em tamanho real ou em pequena escala o formato de seus sonhos. Seja para ter uma visualização do todo ou simplesmente impressionar as platéias. A verdade é

que o protótipo leva a imaginação a alçar vôos bem altos. Em todos os países desenvolvidos industrialmente, a prática da produção e uso de protótipos é altamente difundida. A obra em pequena escala fala por si própria e dá àquele que a utiliza bem um poder muito grande, tanto de visualização como de convencimento.

A visão tridimensional de um projeto mexe com a imaginação humana. A imagem do protótipo possibilita imaginar, virtualmente, a sensação de pertencer àquele diminuto mundo. Além do aspecto emocional, existe também o lado didático e técnico do protótipo. Quando se fala de criar moda e estabelecer padrões de consumo, é necessário dar vazão à criatividade e materializá-la através de protótipos para a aprovação dos clientes. Entender como as coisas funcionam ou como ficarão quando construídas de fato, nos ajudam a compreender os projetos de forma global. Muitas vezes, problemas futuros, sejam eles de design, projeto ou de construção, podem ser detectados simplesmente pelo estudo de um protótipo, economizando tempo e dinheiro.

1.6 Materiais

Os materiais utilizados no processo de fabricação de matrizes de calçado são divididos em materiais para o protótipo de calçado, que normalmente são materiais leves, de fácil edição e conformação, e materiais para fabricação da matriz, que, na maioria das vezes, são alumínio fundido ou laminado, liga 5051 e aço SAE 1045.

1.6.1 Materiais para Fabricação de Protótipos

Os materiais mais utilizados para fabricação de protótipos são placas de poliuretano de baixa densidade (0.52 – 0.57g/cm³) e dureza(50ShD), próprias para rápida usinagem em máquinas CNC, uma alternativa atual para produzir modelos de estilo, padrão, protótipos, gabaritos de aferição e controle, ferramentas protótipo para fundição e vacuum forming, ferramentas para conformação de metais, etc. Além das placas de PU, também são utilizados

materiais alternativos, como borrachas prensadas com texturas próprias, couro e outros tipos de produto que servem, basicamente, para agregar textura ao produto.

1.6.2 Materiais para Fabricação de Matrizes

De acordo com o componente do molde a ser fabricado, sua função e seus requisitos de trabalho existem diversos tipos de aços e outras ligas de alumínio e cobre, adequados às solicitações de projeto dos moldes de injeção de plásticos.

A tendência atual é a contínua integração do alumínio na fabricação de moldes industriais, devido a sua alta resistência mecânica, excelente condutibilidade térmica e fácil usinabilidade:

- Alívio de peso (3x mais leve que o aço);
- Um molde alumínio pode ser até 70% mais leve que o aço;
- Facilidade na troca e manutenção do molde.

Redução de custos.

A redução de custos em um molde de alumínio, em relação o aço, pode chegar a 40%, considerando:

- Tempo de usinagem, reduzido em 70%;
- Tempo de acabamento, reduzido em 80%;
- Ciclos de produção mais rápidos, devido à condutibilidade térmica 4x superior ao aço;
- Velocidade de corte e usinabilidade;
- Tempo de vida útil do molde.

1.7. Aplicabilidade da Digitalização 3D

1.7.1 Análise de Aplicabilidade

À primeira vista, a digitalização 3D parece ser perfeitamente aplicável à construção de quaisquer modelos geométricos para engenharia, sendo até descrita, por alguns fornecedores de equipamentos, como uma forma de “fotocópia tridimensional” de uma peça física. É necessário, porém, que se verifique quais os tipos de modelos geométricos que realmente podem ser construídos. As diferentes tecnologias de digitalização permitem obter diferentes “nuvens de pontos”, que, por sua vez, terão de ser transformadas em diferentes modelos geométricos. A aplicabilidade da digitalização 3D depende dos modelos construídos a partir dos pontos amostrados.

A aplicabilidade da digitalização 3D, em ambientes de Engenharia Simultânea, depende das possibilidades reais de construção de modelos consistentes e significativos do produto, sob o ponto de vista de cada uma das diferentes atividades suportadas pelo sistema computacional.

1.7.2 Aplicações em Engenharia

Se a única aplicação de um modelo geométrico de uma peça fosse a sua visualização em computadores, uma nuvem densa de pontos poderia ser suficiente, especialmente se a cor da superfície também fosse registrada durante a digitalização.

Como normalmente as diferentes aplicações em engenharia exigem a edição ou modificação do modelo geométrico, é natural que se exija uma transformação da nuvem de pontos em uma representação de nível mais elevado, como modelos de superfícies ou sólidos.

Como áreas de aplicação da Digitalização 3D na engenharia mecânica podemos citar:

- Ergonomia e Biomecânica – A digitalização 3D aplicada antropometria de características físicas individuais, visando, por exemplo, à produção de próteses, implantes ou equipamentos de proteção adaptados especificamente para uma determinada pessoa;

- Controle de processos – O controle de processos pode se valer da digitalização 3D, para a automação de operações, como soldagem, usinagem ou montagem.

- Inspeção dimensional – A digitalização 3D de precisão, associada a programas para metrologia dimensional, pode compor um sistema CAI, que permita a verificação por comparação entre uma nuvem de pontos digitalizados e o modelo CAD da peça. Os afastamentos verificados, para cada ponto digitalizado, podem ser apresentados textualmente ou graficamente. Apresentações gráficas podem ser feitas através da aplicação de cores relacionadas ao afastamento verificado, ou através da projeção de vetores normais às superfícies do modelo CAD, passando pelos pontos digitalizados, com módulo proporcional aos afastamentos.

- Engenharia reversa – A digitalização pode facilitar a construção de modelos geométricos digitais de peças de geometria complexa, quando não houver especificação técnica, mas um modelo físico da peça estiver disponível. Esses modelos são necessários, por exemplo, para produção de peças de reposição na manutenção de equipamentos. A digitalização 3D de modelos físicos, ou peças existentes é comprada, por alguns, com a duplicação de documentos por fotocópias [57]. Os pontos obtidos podem ser utilizados para produzir um modelo geométrico manipulável em sistemas CAE/ CAD/ CAM. Os modelos geométricos podem ser representações por malhas poligonais, ou superfícies paramétricas. As malhas poligonais são aproximações da geometria

original, que podem ser refinadas adaptativamente. Uma representação por superfícies paramétricas pode ser obtida através de ajustes matemáticos aos pontos da nuvem inteira, ou aos pontos selecionados como os pertencentes a determinadas seções transversais selecionadas da nuvem.

Em todas as aplicações em engenharia, o propósito da digitalização 3D é a produção de um modelo geométrico que atenda aos requisitos da aplicação a que se destina, seja digitalização manual ou automática.

1.7.3 Digitalização Manual

A digitalização manual pode ser feita em 2 níveis:

- Programas dedicados, escritos para monitorar ou controlar o equipamento e fazer o cálculo das coordenadas tridimensionais a partir dos parâmetros do equipamento (ângulo nas articulações e comprimento dos braços ou tempo entre a emissão do ultra-som e a captação nos sensores). Fazem acesso de baixo nível ao hardware. São geralmente fornecidos pelo fabricante do equipamento de digitalização, na forma de drivers para Windows, ou para aplicações específicas.

- Programas que fazem o acionamento dos programas descritos acima, quando são chamados pela aplicação. Chamados “plug-in”.

No primeiro caso, é usado um programa que funciona em “background”, fazendo a leitura das coordenadas X,Y,Z, cada vez que o gatilho (ou pedal) for pressionado, e procedendo à entrada destes valores como texto na posição atual do cursor. Estes programas devem oferecer a possibilidade de configuração da seqüência de caracteres que são inseridos, permitindo definir uma separação dos valores, com vírgula, tabulação, ou uma combinação qualquer. Pode-se também fazer a entrada de valores no aplicativo necessitar.

No segundo caso, um programa de modelamento faz a chamada ao equipamento através de programas do tipo “plug-in” que permitem um controle direto do digitalizador, pelo programa hospedeiro. Neste caso, o digitalizador é controlado pela aplicação sempre que uma coordenada 3D for solicitada pelo operador.

Os programas CAD/CAM oferecem diferentes modos de acesso às suas funções internas, através de API's (Application Program Interface). Isso permite que se desenvolvam aplicações na linguagem oferecida pelos programas CAD para a construção de modelos tridimensionais de tipos específicos, conforme a necessidade (superfícies poligonais, superfícies paramétricas, sólidos poliédricos, ou sólidos delimitados por superfícies paramétricas – NURBS).

A digitalização 3D mais uma vez funciona apenas como modo de aquisição de coordenadas, quando as funções de programa necessitarem. Se as coordenadas já fossem conhecidas pelo operador do sistema, poderiam ser digitadas, numa interação normal com o programa, sem prejuízo à qualidade do modelo gerado pela aplicação.

Os programas do tipo “plug-in” podem transformar as seqüências de pontos em linhas, poli-linhas, ou splines, antes de entregá-las ao programa hospedeiro, que pode ser um CAD, por exemplo.

Fornecedores de digitalizadores 3D oferecem o serviço de desenvolvimento de “plug-in's” gratuitos para desenvolvedores de aplicações utilizarem seu equipamento [58]. Digitalizadores manuais podem servir para controlar ambientes virtuais através da monitoração da sua movimentação no espaço de digitalização.

Porém, para a aplicação no mercado de Engenharia Reversa aplicada ao calçado, a digitalização manual não se mostra eficiente, pois apresenta uma restrição ao número de pontos que podem ser adquiridos, que normalmente fica muito abaixo do necessário. Isto ocorre porque o método se baseia no contato

mecânico entre a máquina e a amostra, o que limita a velocidade de aquisição, tornando o processo lento para uma geometria complexa, que necessita muitos pontos.

1.7.4 Digitalização Automática

O sistema de digitalização 3D automático apresenta um importante diferencial em relação ao manual. Não há o contato entre a peça e a máquina (laser, fotogrametria, radar, tomografia), o que torna o processo muito mais rápido. Ele pode fornecer um arquivo com os pontos diretamente para o programa de aplicação, que fará a construção assistida ou automática do modelo de superfícies, ou sólido.

1.7.5 Modelamento Geométrico em Engenharia

A aplicação em um arquivo de ponto, obtida por digitalização 3D, depende das possibilidades de transformação das coordenadas desse arquivo em representações significativas da peça digitalizada, para tarefas de engenharia.

A realização individual das diversas atividades de engenharia como, por exemplo, modificações de geometria em CAD, simulações de cinemática de mecanismos e análises de resistência em CAE, planejamento de processos de fabricação com CAPP ou programação de usinagem CAM, depende da produção de representações válidas sob cada um desses pontos de vista. Qualquer aplicação individual da digitalização 3D depende da transformação das nuvens de pontos digitalizados em modelos geométricos e topologicamente consistentes e do ponto de vista específico dessa aplicação, possibilitando sua edição e manipulação. A figura 26 apresenta um esquema das etapas desenvolvidas na aplicação da digitalização 3D na criação de um modelo de engenharia puramente geométrico.

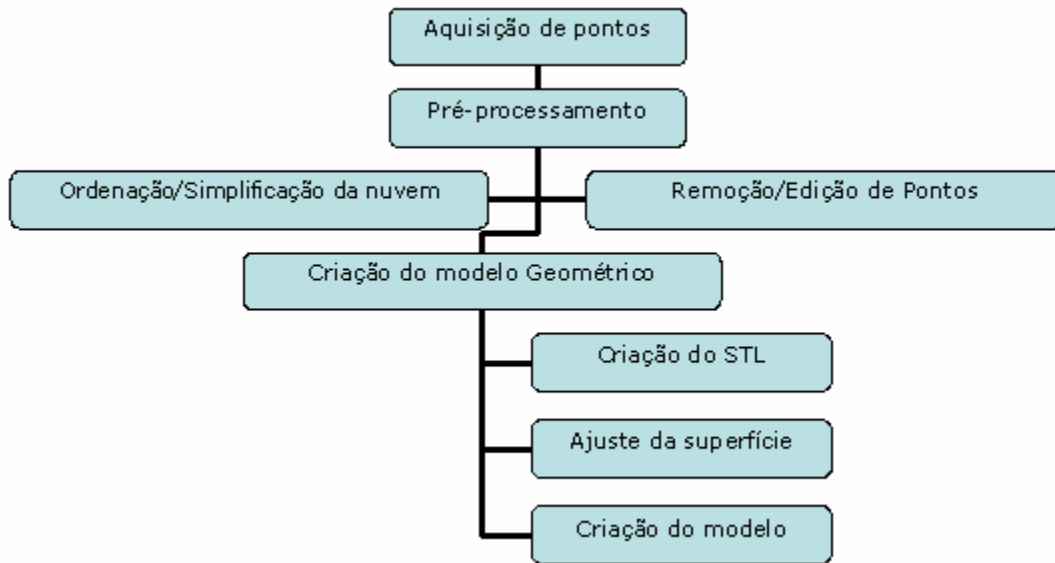


Figura 26 – Digitalização Aplicada em Engenharia.

Diferentemente da aplicação em ambientes de Engenharia Simultânea, em aplicações não colaborativas, não há preocupação com a compatibilidade da representação construída para uma aplicação, com as outras aplicações.

Aplicações como CAE, CAD ou CAM podem necessitar modelos sólidos ou apenas de superfícies. Os modelos sólidos podem ser construídos diretamente a partir da nuvem de pontos, ou a partir da transformação de um modelo de superfície consistente. A figura 27 ilustra o exposto:

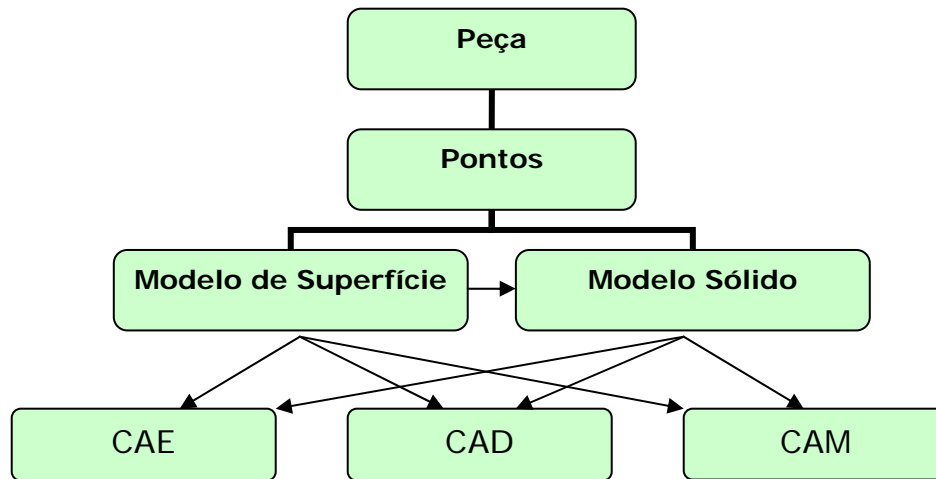


Figura 27 – Modelos geométricos para aplicações em Engenharia.

Os arquivos geométricos podem ser produzidos pelo simples “fechamento” externo da nuvem, com faces poligonais, ou por sofisticados algoritmos de ajuste de superfícies paramétricas sobre os pontos da nuvem.

Várias limitações existem na produção de modelos sólidos. A principal é o fornecimento de nuvens com regiões onde há insuficiência de pontos para a construção de um modelo totalmente fechado. Isso decorre da geometria digitalizada e da tecnologia de digitalização empregada. Em alguns casos é possível compor o modelo a partir de nuvens complementares, resultantes de duas fixações da peça.

Atualmente, existem desenvolvimentos de modeladores de sólidos com funções que permitam o início do modelamento a partir de dados digitalizados.

Arquivos de Superfície Poliédricas (STL)

Quando uma representação poliédrica for suficiente, como em casos de aplicação em prototipagem rápida por estéreio-litografia ou tecnologias afins, é necessário utilizar os algoritmos disponíveis para a produção da casca poligonal. Estes algoritmos fazem a ligação dos pontos adjacentes por arestas e depois fazem as faces poligonais pela associação das arestas.

Alguns algoritmos, como o proposto por Vénon [59], fazem a redução da quantidade de faces em função dos ângulos entre as normais a cada polígono. Ângulos pequenos significam pouca curvatura e, dependendo das tolerâncias estabelecidas, isso possibilita o agrupamento de várias faces em uma. Onde as curvaturas forem maiores, será necessário manter uma quantidade maior de faces para respeitar as tolerâncias.

Arquivos de Superfície Paramétricas

Quando uma representação poliédrica não for suficiente, como em tarefas de reprodução de acabamento fino em moldes com CAM, é necessário proceder a ajustes de superfícies “B-spline” sobre os pontos. Os algoritmos de ajuste mais simples necessitam estruturação regular da nuvem em seções transversais, com quantidades iguais de pontos em cada seção [60]. Se a nuvem, obtida no processo de digitalização, não for regular, poderá ser feito um tratamento dos dados para selecionar seções e equalizar o número de pontos antes do ajuste.

Na figura 28-a, têm-se 25.000 pontos digitalizados. Na figura 28-b, têm-se somente as linhas de seção transversal selecionadas entre os pontos digitalizados, para a construção das superfícies.

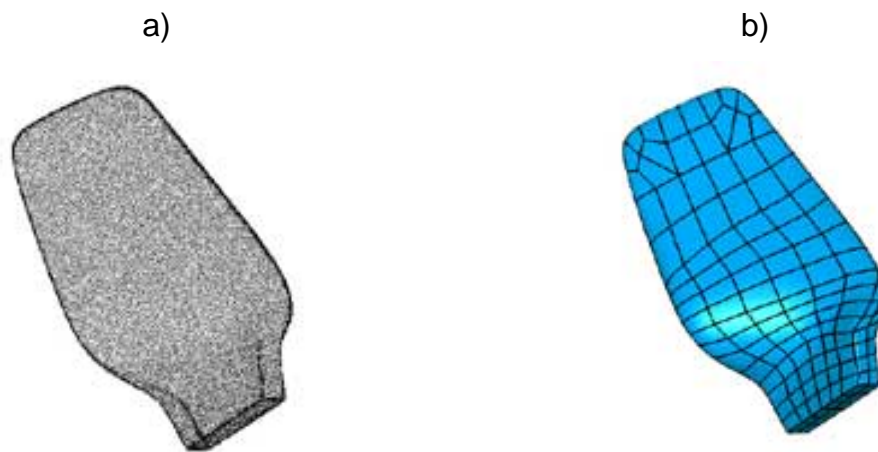


Figura 28 – Nuvem e linhas seccionais [61]

Na figura 29-a, têm-se os perfis digitalizados com baixa densidade, totalizando 2730 pontos; e na 29-b, a mesma peça, digitalizada com alta densidade, totalizando 57000 pontos.

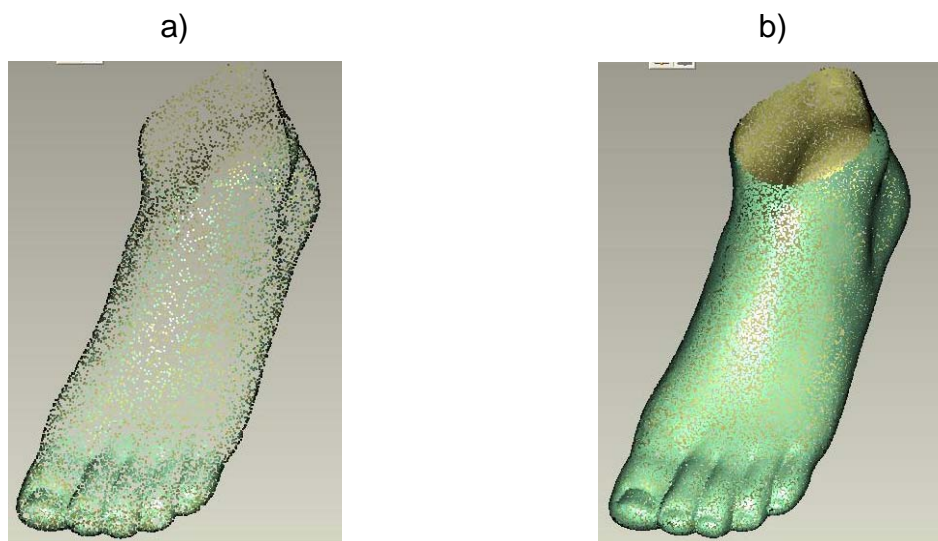


Figura 29 – Densidade de Digitalização [61]

Conforme o tipo de peça digitalizada, pode ser recomendável que os pontos digitalizados venham alinhados com as seções transversais que definem a peça, para a construção das curvas que serão usadas para definir as superfícies.

Uma digitalização de alta densidade obtém uma quantidade muito grande de pontos que, por um lado, podem permitir uma descrição completa da peça, mas que, por outro, podem não ser todo necessário e, por isso, representar uma dificuldade de processamento.

Os dados podem vir estruturados do próprio equipamento de digitalização, na forma de fatias da peça, ou podem vir dispersos, como os apresentados na figura 30:



Figura 30 – Dados dispersos obtidos com digitalização manual [61]

Entre os pontos dispersos da figura 30, foram selecionados alguns para a construção manual de curvas paramétricas que, por sua vez, serão usadas para criar as superfícies paramétricas, como mostram as figuras 31 e 32:

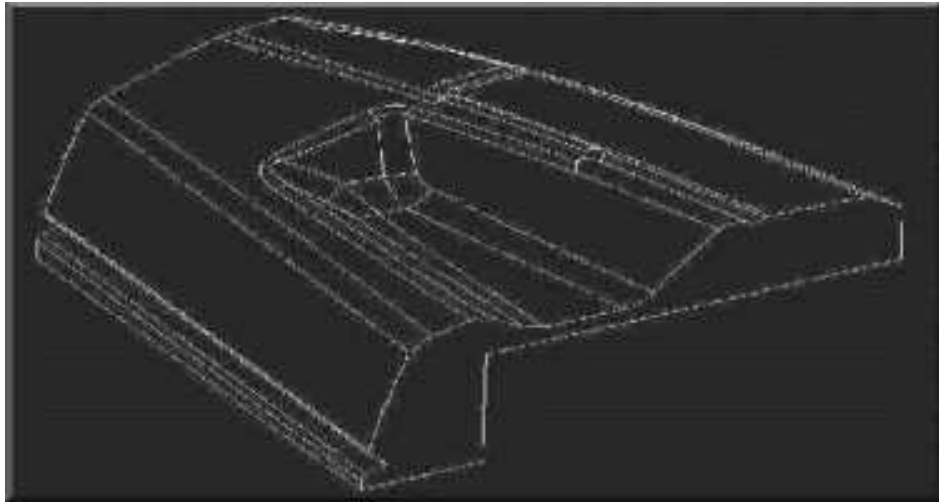


Figura 31 – Pontos selecionados para compor as curvas de construção [61]

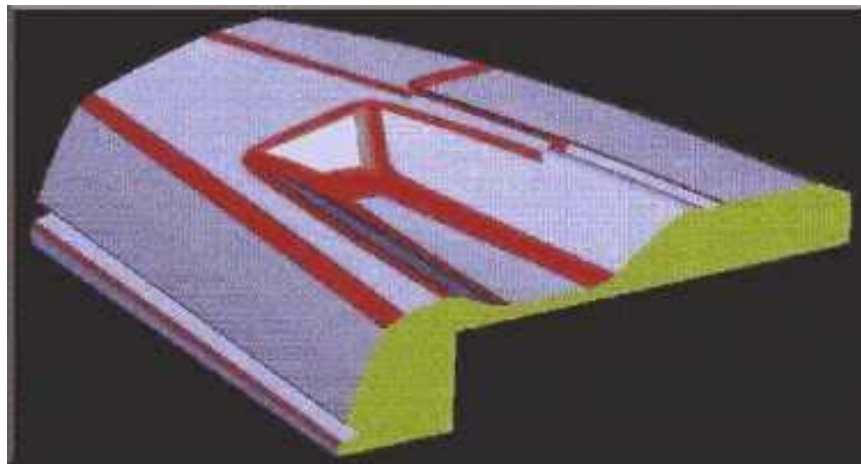


Figura 32 – Superfícies criadas a partir das curvas de construção [61]

Para a utilização de pontos não estruturados é necessário que o programa de pós-processamento da nuvem de pontos disponha de ferramentas para a seleção de pontos pertencentes a seções perpendiculares a um eixo escolhido, ou perpendicular a um contorno especificado, ou ainda a uma seção transversal qualquer, escolhida interativamente pelo usuário. Também é importante oferecer a possibilidade de inferir a posição de eventuais pontos ausentes e editar a posição de pontos.

Também se deve ter a possibilidade de comparar as superfícies construídas com os pontos digitalizados, para verificar a exatidão do modelo.

Programas comerciais como o Geomagic [61], oferecem alternativas de pós-processamento da nuvem de pontos para obtenção de superfícies paramétricas e sua comparação com o modelo original da nuvem de pontos, para verificação da confiabilidade e exatidão em relação ao modelo original.

Sistema de Digitalização Utilizado

Baseado nas informações da revisão bibliográfica e as apresentadas na análise de aplicabilidade, descartam os sistemas de digitalização manual como braço mecânico, apalpamento em máquina CNC e por CMM. Com isso, optou-se por sistemas sem contato com o modelo físico, pelo tempo e o tipo de aplicação, neste estudo focado no calçado, que apresenta elevada complexidade geométrica e um número muito grande de pontos para ser bem definido geometricamente.

Dentro dos sistemas disponíveis para a realização dos ensaios, verificou-se que o sistema baseado na tecnologia Conoscópica foi a melhor opção. Isto porque as tecnologias baseadas na análise de imagem, como Fotogrametria, Luz Infravermelha, Triangulação por cores com CCD e Tomografia, não possuem a precisão e a densidade de pontos necessários para a aplicação estudada. As tecnologias mais apropriadas para a aplicação são as Conoscópica, Triangulação a Laser de Varredura por Ponto e por Linha. Como visto no Capítulo Revisão Bibliográfica, a tecnologia Conoscópica apresenta um resultado de alta qualidade e confiabilidade e, por ser uma digitalização com o menor ruído e “áreas de sombra”, obtêm-se resultados de digitalização adequados a complexidade do produto (calçado).

Os experimentos práticos desta dissertação de mestrado foram desenvolvidos no Laboratório de Design e Seleção de Materiais do Departamento de Engenharia dos Materiais – DEMAT da Escola de Engenharia da Universidade

Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS e na empresa Tecnodrill Ind. Máquinas, com o equipamento DIGIMILL 3D, que é um equipamento multifuncional de Fresamento e Digitalização a Laser Conoscópica (Apêndice A). Durante os ensaios foram desenvolvidos e implementados novos comandos e melhorias para o equipamento, a fim de obtermos melhores resultados na digitalização, como, por exemplo, a possibilidade de adquirir uma nuvem de pontos perfeitamente ordenada nos planos X e Y, implantação de um 4º eixo eletrônico para realização de digitalização e usinagem rotativa e a implantação de novas lentes que possibilitam uma digitalização submicron ($0.1\mu\text{m}$), fundamental para a avaliação de texturas.

2. MATERIAIS E MÈTODOS

2.1 Considerações Iniciais

A fim de estudar sistematicamente a utilização de sistemas de digitalização voltados à área de moldes e matrizes, foram realizados estudos de caso de aplicação, envolvendo digitalização a laser para protótipos de diferentes geometrias utilizadas em calçados.

A opção pela utilização de protótipos de diferentes geometrias de calçado se deu pelo fato da indústria calçadista ser um ótimo exemplo de utilização para engenharia reversa, pois trabalha com o fator moda, que se altera muito rapidamente e que exige uma grande flexibilidade e, principalmente, rapidez na criação dos protótipos e moldes para injeção. Outro fator muito relevante na escolha do segmento calçadista é a variação e o nível de complexidade dos modelos. Como não existem normas que as classifiquem, foi adotada a classificação feita por Cavalheiro[39], baseada em termos comumente utilizados por profissionais da indústria de moldes, quais sejam:

a) Geometria com complexidade baixa: Refere-se a modelos construídos somente por planos inclinados, planos horizontais, superfícies regradas derivadas de retas e curvas planas, raios constantes no arredondamento de cantos.

b) Geometria com complexidade média: Caso as entidades com complexidade baixa estejam irregularmente distribuídas pelo modelo ou a combinação destas acabe resultando em formas irregulares, considera-se uma geometria de complexidade média.

c) Geometria com complexidade alta: São considerados de complexidade alta os modelos construídos (modelados) totais ou, principalmente, com superfícies de forma-livre construídas a partir de entidades bi-cúbicas, superfícies regradas

derivadas de entidades de terceiro grau, superfícies de arredondamento de cantos com raio variável.

Em função disto, foi realizada uma pesquisa das várias formas e desenhos que as solas de calçados possuem para estabelecer os padrões de geometrias a serem utilizados como amostras para este estudo. A pesquisa foi realizada junto às fabricas de calçado, Centros de Design de Calçado e no Museu do Calçado. Este último foi muito útil para a avaliação da evolução do design do solado ao longo do último século, principalmente os avanços em relação a materiais e formas.

2.2 Ensaios

Como o objetivo deste estudo foi estabelecer uma metodologia de aplicação da digitalização 3D, bem como a melhor edição da nuvem de pontos, utilizando softwares específicos para a aplicação, é importante salientarmos alguns fatores que influenciam diretamente o processo.

Como o princípio básico da tecnologia de Digitalização 3D é a captura de pontos de um objeto no espaço, a fim de reconstruí-lo em um ambiente digital gráfico, é necessário que se obtenha um número de pontos necessários para reconstruir o objeto. Este número depende da complexidade da geometria, conforme classificação feita por Cavalheiro[39], por exemplo, e, na maioria das vezes, não pode ser mensurado previamente, a não ser quando se esteja trabalhando com geometrias padrões, como quadrados e circunferências, o que não ocorre na maioria das vezes.

Em função dos softwares de Engenharia Reversa trabalharem como algoritmos matemáticos que recriam a superfície do objeto a partir da informação das coordenadas de cada ponto, para cada detalhe ou variação geométrica que se tenha, deve-se ter um ponto ou um conjunto de pontos que represente geometricamente a superfície, o que torna impossível prever a quantidade exata de pontos e a sua densidade ao longo da peça, pois para um mesmo objeto

poderemos necessitar uma grande quantidade de pontos em uma determinada região e poucos pontos em outras, dependendo da sua forma e complexidade geométrica.

Em virtude disto, o melhor a fazer é realizar uma digitalização com o maior número de pontos possíveis e com a melhor qualidade de ponto também. Porém, isto depende muito do tipo de tecnologia de Digitalização utilizada e do equipamento escolhido, pois existem limitações de quantidade de pontos, qualidade (confiabilidade) do ponto e o ordenamento dos pontos, dependendo do tipo de aparelho e tecnologia escolhidos.

Outro fator muito importante que deve ser considerado é a escolha do software de edição de pontos. A etapa de edição de pontos é fundamental para o processo, pois uma boa digitalização, com um grande número de pontos, gera um arquivo muito grande e “pesado”, com algumas dezenas de Megabytes, o que acaba travando muitos dos softwares de CAD disponíveis no mercado, tornando o processo muito lento. Para solucionar este problema, alguns softwares de Engenharia Reversa possuem comandos de filtragem de pontos que, através de uma análise matemática da geometria obtida e uma tolerância dimensional estabelecida pelo usuário, exclui pontos que não seriam necessários para a criação da geometria. Existem vários tipos de filtros disponíveis nos softwares. Sua aplicação depende do tipo de geometria e do objetivo que o usuário deseja. Estes filtros matemáticos podem reduzir em até 95% o número de pontos necessários para a reconstrução do objeto, sem perder a confiabilidade geométrica requerida. Com isso, o tamanho do arquivo se reduz incrivelmente, tornando-o leve para sua manipulação em softwares de CAD convencionais.

Para demonstrar a importância da densidade e da qualidade de pontos, foram utilizadas amostras de diferentes graus de complexidade, todas sendo digitalizadas com densidade alta e baixa de pontos, ou seja, uma digitalização com grande quantidade de pontos e outra com baixa quantidade de pontos para cada modelo escolhido.

Após os ensaios de digitalização e posterior edição dos pontos, foram realizados ensaios de simulação de usinagem das amostras, para verificação da influência de uma boa digitalização e edição de pontos no processo de usinagem. Para isto, foi utilizado um software de CAM (Manufatura Assistida por Computador) e avaliado o tempo de cálculo da trajetória da ferramenta para o processamento das amostras e o tempo calculado para usinagem, simulado pelo software. Foram considerados parâmetros para dois materiais diferentes, alumínio liga 5052 e Placas de Poliuretanos, de diferente densidades e durezas, que são as principais matérias primas utilizadas na indústria calçadista de moldes. O objetivo é avaliar a influência da qualidade de digitalização e processamento dos pontos em diferentes materiais, utilizando os processos de usinagem HSM, onde se utilizam altas velocidades de avanço e aceleração.

2.3 Material Utilizado nos Ensaio de Digitalização

O material utilizado para o ensaio foi escolhido utilizando vários critérios, como complexidade geométrica, grau de precisão requerido e a representatividade das geometrias escolhidas em relação ao enorme campo amostral existente que o mercado de calçado apresenta. Foram realizadas pesquisas junto aos fabricantes de solados, no acervo do Museu do Calçado, na Materioteca do Centro de Design do Centro Universitário Feevale, focado no mercado de calçado e acompanhando as tendências da moda dos próximos lançamentos.

Com base nisto, foram selecionados seis formas de geometrias diferentes, tamanhos padronizados e com representatividade geométrica elevada. As formas foram desenvolvidas em Alumínio e usinadas em máquinas CNC, conforme figura 33.

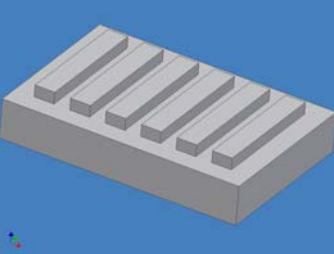

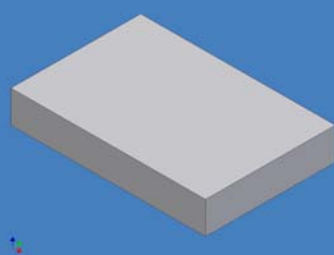

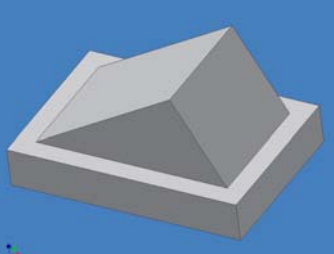

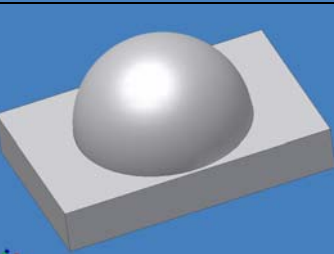
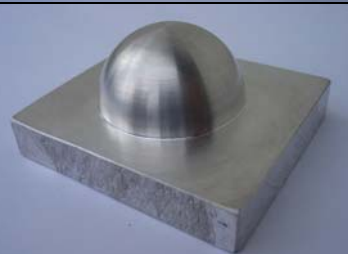
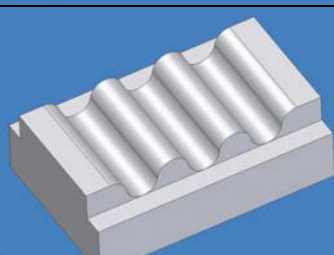

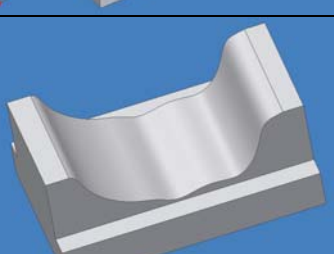

Descrição(forma imaginada)	Modelo (virtual)	Padrões de referencia (AL)
<p>Padrão 01</p> <p>Perfil quadrático representa as geometrias com paredes verticais com cantos bem definidos</p> <p>(Desenho Técnico anexo 1)</p>		
<p>Padrão 02</p> <p>Geometria lisa, muito utilizada nos solados.</p> <p>(Desenho Técnico anexo 1)</p>		
<p>Padrão 03</p> <p>Perfil em ângulo, representando os sistemas tipo trava, nos solados.</p> <p>(Desenho Técnico anexo 1)</p>		
<p>Padrão 04</p> <p>Perfil esférico, muito utilizado em composição com outras geometrias para a confecção do desenho final da sola.</p> <p>(Desenho Técnico anexo 1)</p>		
<p>Padrão 05</p> <p>Perfil tipo onda (senóide), muito utilizado em solados femininos e infantis pelo seu design e relativa aderência.</p> <p>(Desenho Técnico anexo 1)</p>		
<p>Padrão 06</p> <p>Perfil livre, tipo "Freeform", representado as variações de geometrias complexas, que podem compor uma sola.</p> <p>(Desenho Técnico anexo 1)</p>		

Figura 33 – Padrões Desenvolvidos e Utilizados

2.4 Ensaio de Digitalização

Os ensaios de Digitalização foram realizados em um equipamento de Digitalização a laser Tecnodrill, modelo Digimill 3D(LDSM), utilizando a lente de 75mm e os parâmetros de distância, conforme tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de Digitalização

Geometria	Distância	
	X	Y
Padrões geométricos 1, 2, 3, 4, 5 e 6	0.05	0.05
	0.15	0.15

O ensaio de Digitalização foi realizado com dois parâmetros de precisão diferentes para cada padrão, gerando 12 arquivos distintos: seis com alta precisão (0.05mm) e seis com média precisão (0.15mm).

2.5 Edição da Nuvem de Pontos

A manipulação dos pontos das amostras digitalizadas e a reconstrução da geometria foram feitas, utilizando-se o programa Geomagic WRAP(Tecnodrill), baseado em regras de geometria. O algoritmo aplicado interpreta a nuvem de pontos, obtida através de algum processo de digitalização 3D, e procura ligar os pontos entre si por uma malha, cujas linhas são posteriormente usadas como arestas de faces poligonais.

Visando a comparar a influência da qualidade e da densidade de pontos de uma nuvem dos pontos de um produto para sua posterior reconstrução, os arquivos, gerados pelo digitalizador, foram trabalhados no software da seguinte forma: cada amostra foi manipulada de duas formas diferentes: uma foi apenas triangularizada diretamente como obtida do digitalizador; e a outra, foi utilizar todos os recursos disponíveis e necessários do software como filtragem dos

pontos, redução de ruídos mecânicos e ópticos, processo de redução da quantidade de polígonos (decimalização), suavização da superfície e regeneração de “cantos vivos”.

Essa edição nos gerou 24 arquivos distintos: 12 arquivos sem nenhum processo de filtragem e edição; e 12 arquivos com edição de acordo com a geometria.

Utilizando o mesmo software, os resultados, obtidos na geração das geometrias, foram comparados com as nuvens originais, obtidas diretamente do digitalizador, a fim de verificar a fidelidade da reconstrução geométrica, suas perdas e deformações.

2.6 Programa de Usinagem

Depois de realizada a reconstrução da geometria das amostras, foi feita a programação de usinagem, utilizando o software EdgeCam(LdSM). A estratégia utilizada foi “Raster”, também conhecida por “zig-zag”. Como um dos objetivos deste trabalho foi a avaliação da influência da edição de pontos na qualidade e produtividade de peças digitalizadas, em especial solados de calçado, a estratégia tipo Raster é a mais indicada, pois é de processamento matemático simples e demonstra a influência da rugosidade, do acabamento e da qualidade geométrica do modelo. Juntamente com o programa, foi gerado a simulação de usinagem para obtermos um resultado de tempo de usinagem, com a intenção de avaliar o seu aumento ou diminuição em relação à edição dos pontos.

Para este ensaio, foram utilizadas as formas 2, 5 e 6, pois, do ponto de vista da usinagem, representam geometricamente as diferentes variações que podemos ter entre retas (padrão 2), curvas (padrão 5) e Splines (padrão 6).

Para cada amostra, foram utilizados parâmetros de usinagem para dois materiais: o alumínio liga 5052 e o Resina de Poliuretano.

Os parâmetros de usinagem e a ferramenta de usinagem foram selecionados conforme a geometria das peças e conforme orientação dos fabricantes de ferramentas, como Sandvik e Iscar, também utilizados pelas empresas que utilizam este processo nas fábricas de moldes e matrizes de calçado, conforme tabela 2:

Tabela 2: Parâmetros de usinagem.

Parâmetros de usinagem	Alumínio liga 5052	Resina de PU
Profundidade de corte (mm)	0.5 mm	0.5 mm
Estratégia	Raster	Raster
Velocidade de avanço (m/min)	6	10
Velocidade de corte (m/min)	30	30
Avanço lateral (mm)	0.05	0.05
Precisão de cálculo (mm)	0.01	0.01
Tipo de ferramenta	Piramidal com ponta 0.1mm	Piramidal com ponta 0.1mm

3. Resultados

Os resultados são apresentados em cinco grupos com diferentes abordagens, iniciando com uma avaliação do processo de digitalização, seguido de uma relação entre pontos e a superfície virtual. Após foi avaliado o processo de edição de pontos, a relação entre as amostra com edição de pontos e sem edição de pontos e finalizando com a simulação de usinagem dos modelos obtidos com a digitalização.

3.1 Referente ao Processo de Digitalização

Como um dos objetivos deste trabalho foi avaliar a metodologia de obtenção e edição de nuvens de ponto para posterior reengenharia, o tempo de digitalização e o tamanho dos arquivos gerados são de fundamental relevância para a avaliação do processo. Os resultados obtidos estão demonstrados na tabela 3.

Tabela 3: Resultado dos tempos e tamanhos das Digitalizações.

Geometria	Distancia X - Y (mm)	Tempo (min)	Tamanho de arquivo em pontos (Mb)
Padrão 1	0.05 x 0.05	24	15.22
	0.15 x 0.15	4	1.67
Padrão 2	0.05 x 0.05	25	15.54
	0.15 x 0.15	9	1.7
Padrão 3	0.05 x 0.05	18	16.81
	0.15 x 0.15	4	1.85
Padrão 4	0.05 x 0.05	25	36.04
	0.15 x 0.15	6	3.96
Padrão 5	0.05 x 0.05	48	22.22
	0.15 x 0.15	8	2.45
Padrão 6	0.05 x 0.05	22	22.13
	0.15 x 0.15	6	2.45

Verifica-se que os arquivos digitalizados, com uma precisão de 0.05mm, resultam em arquivos grandes, acima de 15Mb e necessitam de um tempo de processo médio. Em contrapartida, os arquivos com 0.15mm de precisão são rápidos e com tamanho de arquivo pequeno. A razão do tamanho e tempo entre as configurações de distâncias é de 4 a 6 vezes, dependendo da geometria. Porém, a necessidade real da quantidade de pontos para a reconstrução da forma só foi realmente conhecida após o seu processamento no software de engenharia reversa.

3.2 Relação de Pontos X Superfície

A fim de avaliar a influência da densidade de pontos para uma boa representação da geometria como um todo, foram comparadas a nuvens de pontos com os modelos CAD originais, realizando uma inspeção digital com o software. A figura 34 mostra uma secção da Amostra 1 com as duas precisões utilizadas:

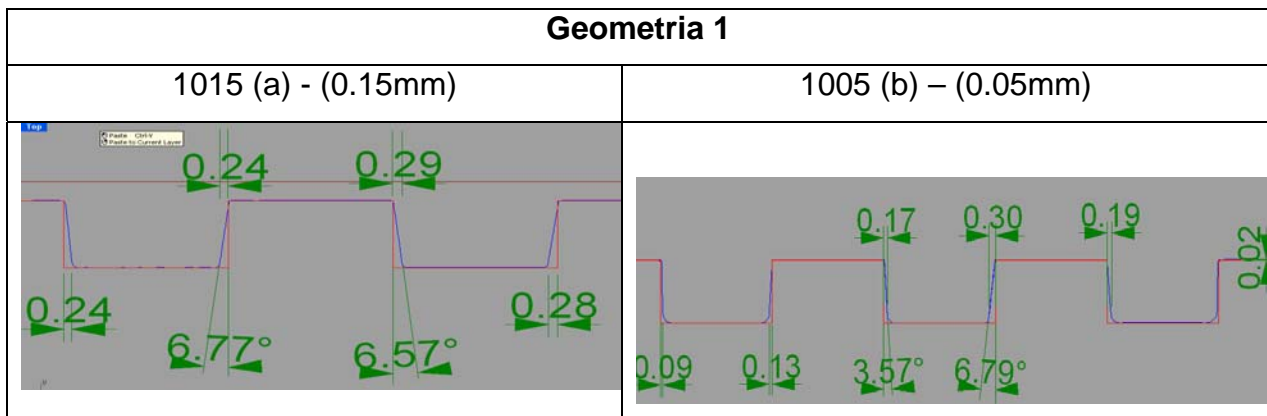


Figura 34 – Análise dimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.

Observa-se na Geometria 1 que a digitalização, realizada com 0.15mm (a) de espaçamento entre os pontos, acarreta erros maiores em comparação com o modelo CAD. Isto ocorre porque, em geometrias com cantos e paredes retas (degrau), existe uma imprecisão na medição nas fronteiras, uma vez que o laser

captura um ponto a uma altura Z , imediatamente após adquirir outro com uma altura Z' , sendo que a distância no plano X - Y , entre os dois, foi determinada pelo usuário, que é o espaçamento entre os pontos. No entanto, como houve uma variação brusca de geometria (degrau) entre as duas, é difícil estabelecer em qual ponto no plano X - Y isso aconteceu, transformando paredes retas em inclinadas, como se observa na figura 34.

Como a amostra 2 é uma geometria lisa e plana, a densidade e o afastamento entre os pontos não têm efeito na reconstrução da forma.

O caso da amostra 3 é a junção do que se observou nas amostras 1 e 2. Nas áreas planas, praticamente não houve uma diferença significativa, sendo o máximo de 0.02mm, como se observa na figura 35 (a) e (b). Porém, na ponta superior, na mudança da inclinação, observa-se um arredondamento do canto em função da distância entre os pontos, sendo maior na amostra com maior espaçamento entre pontos (a).

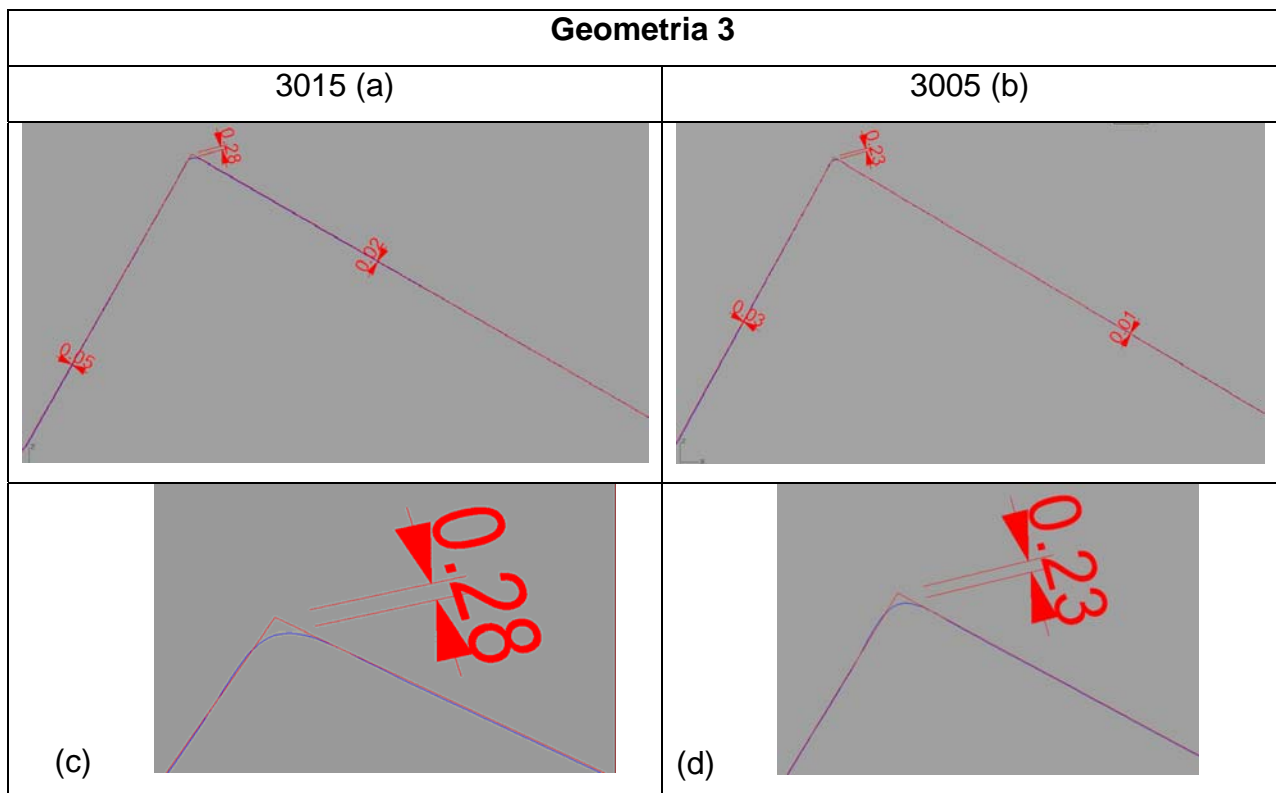


Figura 35 - Análise dimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.

As Geometrias 4, 5 e 6, foram analisadas, utilizando-se o mesmo software de edição, onde as nuvens foram comparadas em 3D e o resultado é demonstrado em um diagrama de cores com a variação dimensional associada. As figuras 36, 37 e 38 demonstram estes resultados.

Nestes casos, as variações foram muito pequenas entre as amostras. Todas apresentam uma variação máxima de 0.1mm. Observa-se, também, que existe uma pequena melhora nas amostras com uma digitalização mais densa, fig. 36–b, 37-b e 38-b.

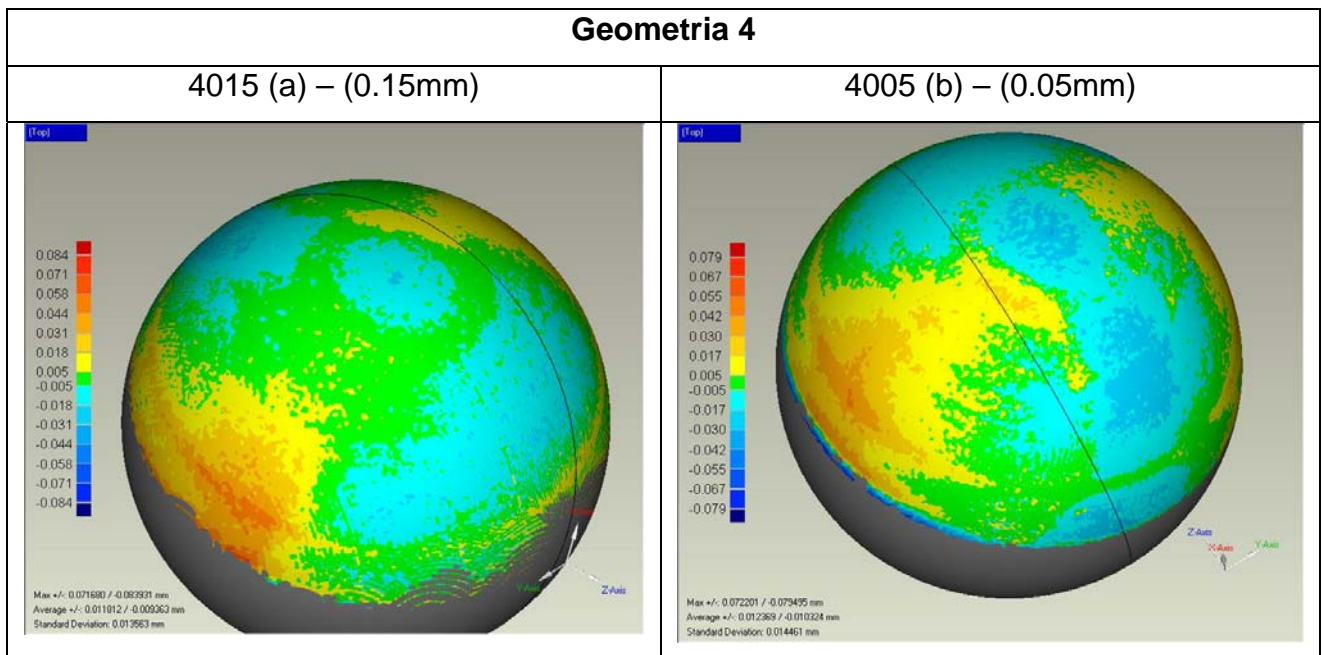


Figura 36 – Análise tridimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.

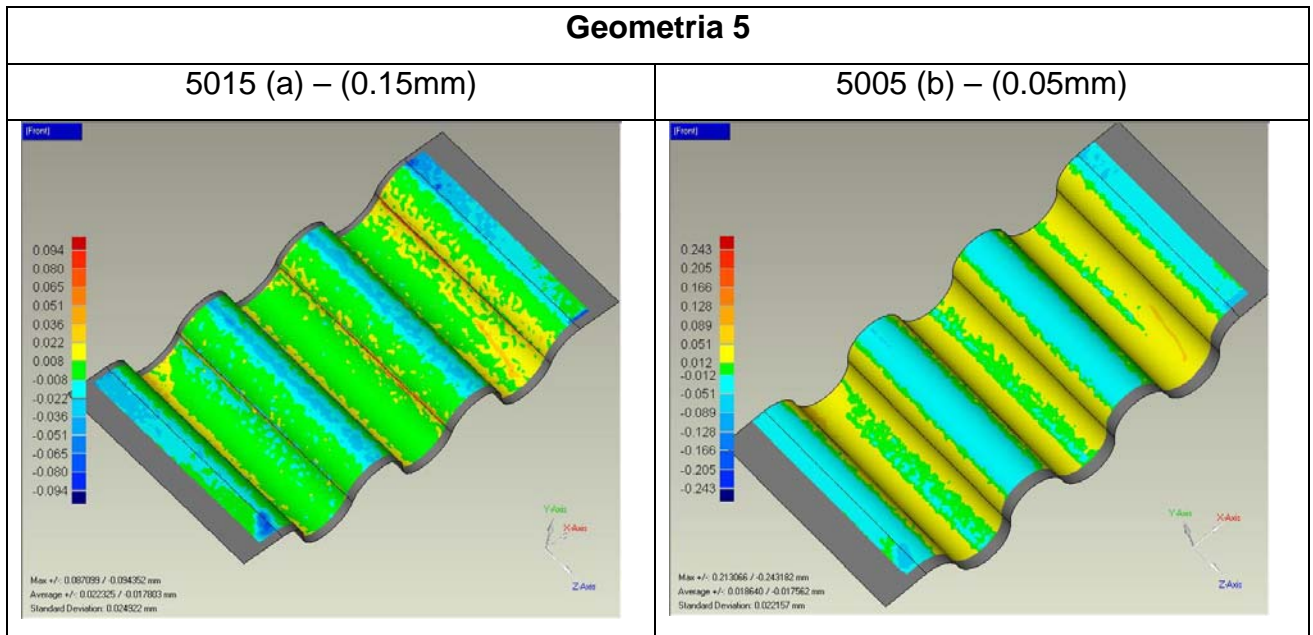


Figura 37 – Análise tridimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.

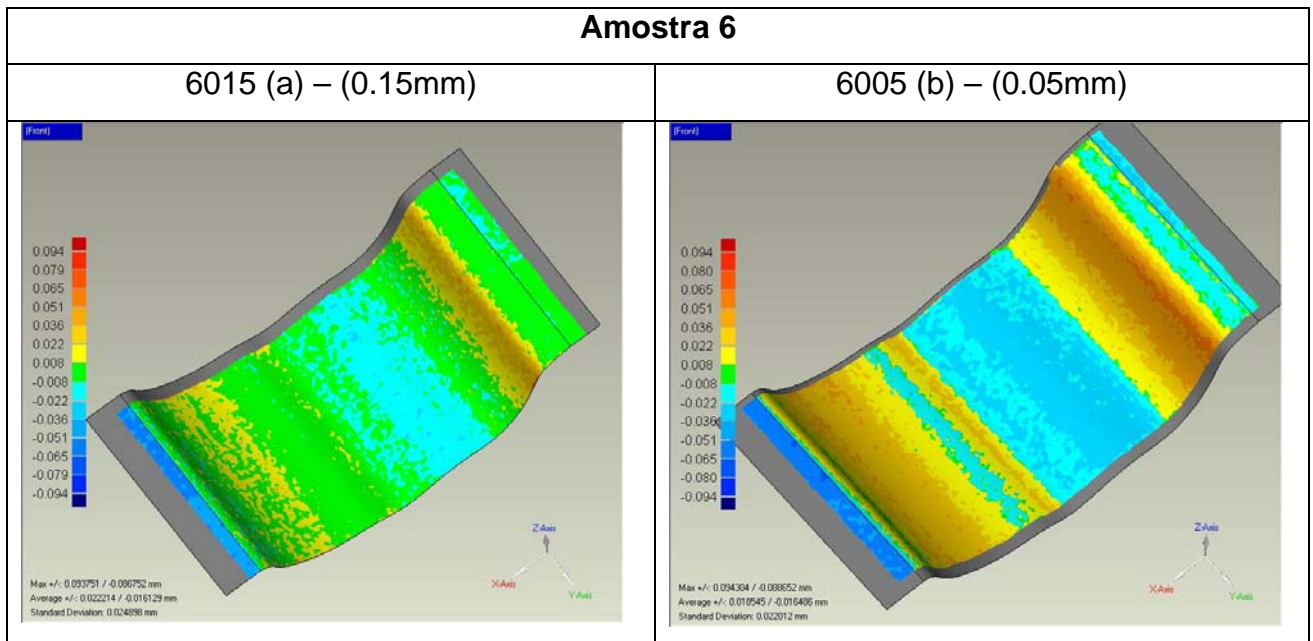


Figura 38 – Análise tridimensional entre a nuvem de pontos e a superfície original.

Deve-se considerar a possibilidade de haver alguma distorção entre o resultado da digitalização e a superfície original, uma vez que as amostras foram confeccionadas por máquinas operatrizes que acarretam erro em sua confecção.

Porém, como a mesma amostra foi utilizada com os dois parâmetros de resolução, alta e baixa densidade, o efeito se reproduz em todos os casos.

3.3 Edição de Pontos

Após a realização das digitalizações, os arquivos de nuvem de pontos em formato texto(.txt) foram abertos e triangularizados no software Geomagic (Tecnodrill). Cada Geometria deu origem a dois arquivos: um sem edição, sendo os pontos apenas triangularizados e outro, utilizando comandos de filtragem de pontos e posterior edição dos triângulos.

A figura 39 mostra um exemplo de duas geometrias apenas triangularizadas(a - c) e outras também editadas com filtros e decimalizações(b – d).

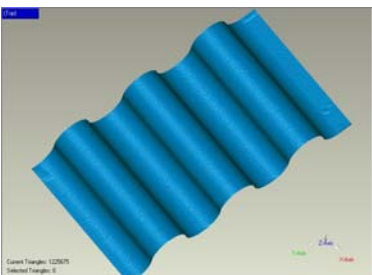
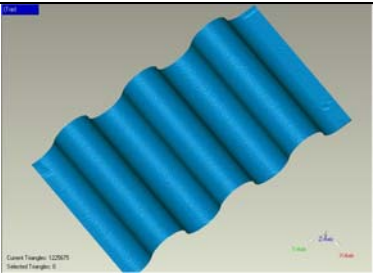
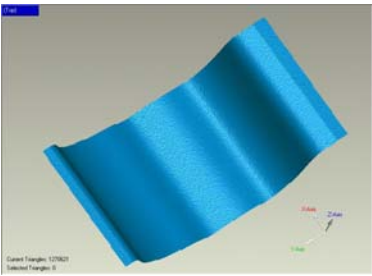
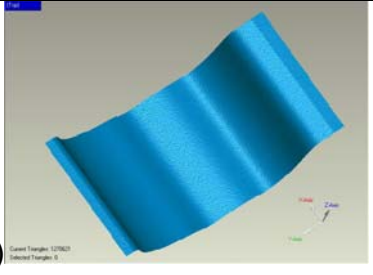
Geometria	Apenas triangularizada	Triangularizada e Manipulada
Padrão 5 (0.05 X 0.05)	(a) 	(b) 
Padrão 6 (0.05 X 0.05)	(c) 	(d) 

Figura 39 – Imagens das Geometrias em STL no software Geomagic WRAP [62]

Os arquivos com extensão em STL(Stereolitografia), sem nenhum processo de filtragem, resultam em arquivos muito pesados, acima de 15Mb. Isto os torna de difícil manipulação tanto em sistemas CAD quanto em sistemas CAM e posterior usinagem. Os mesmos, foram trabalhados no software Geomagic de acordo com as suas respectivas geometrias, a fim de gerar amostras, utilizando ferramentas de edição de pontos. Primeiramente, os arquivos foram tratados em sua fase de pontos. Foram aplicados filtros de ruído, que suaviza a nuvem de pontos em função das fontes de ruídos gerados pelo processo de digitalização, que podem ser ruídos ópticos, mecânicos, elétricos ou térmicos. Após, foi utilizado um filtro de geometria, que pode ser randômico, de curvatura ou uniforme. Estes filtros fazem uma análise da geometria, como um todo, e recalculam o número de pontos necessários para reconstruí-las, eliminando os pontos desnecessários. Atuando de forma randômica, ele retira pontos de forma aleatória, priorizando a redução de pontos em detrimento da precisão geométrica. No caso da utilização do filtro uniforme, sua remoção de pontos ocorre de forma igual em toda peça, não importando a geometria. Com este filtro, se obtém uma boa redução de pontos; no entanto, se perde definição nas geometrias agudas, pois ele remove pontos necessários para a sua perfeita reconstrução. Já o filtro de curvatura prioriza a precisão geométrica e remove a maioria dos pontos nas partes planas, mantendo uma boa densidade de pontos em curvas e cantos, o que evita as distorções. Este tipo de filtro é muito utilizado, pois o resultado obtido é muito bom, uma vez que diminuem o número de pontos significativamente, melhorando muito o seu posterior processamento, tornando os arquivos mais leves e com mais mobilidade.

Após os arquivos terem sido triangularizados, foram aplicados outros tipos de ferramentas, também para suavizar a superfície e diminuir seu tamanho. Primeiramente foram fechados os furos e descontinuidades deixadas pelas nuvens de pontos que o software não conseguiu triangularizar de forma automática. Após, foram aplicados três ferramentas de correção de geometria: uma de relaxamento, uma de suavização e outra de decimalização (redução de triângulos). Esta última é mais importante, pois sua função é recalculer a

geometria e reduzir o número de triângulos sem alterar a geometria, mediante uma tolerância previamente estabelecida, ou seja, manter apenas os triângulos necessários para a representação da geometria.

3.4 Amostras com Edição de Pontos X sem Edição de Pontos

Os resultados mais importantes obtidos, com essa edição, são as reduções de tamanho dos arquivos, sem prejudicar a sua geometria, bem como a correção ou suavização de imperfeições oriundas do processo de digitalização. Esta última é muito importante, pois, quando apenas triangularizamos a nuvem de pontos, a sua superfície resultante apresenta algumas irregularidades, pequenos triângulos apontados aleatoriamente, resultando em uma superfície com uma rugosidade elevada. Isto acarreta um processo de usinagem mais demorado, tanto no seu processamento no software de CAM quanto na máquina CNC, pois, dependendo da precisão de cálculo da trajetória de usinagem, o software tenta acompanhar a rugosidade da superfície, gerando um caminho muito maior, com um tamanho de arquivo mais pesado e com um tempo de usinagem elevado. Outro aspecto a ser considerado é o acabamento superficial da peça resultante, pois, dependendo da precisão de cálculo utilizada e a forma da ferramenta (ponta zero), o acabamento será prejudicado em relação a uma forma com geometria suavizada. Na Tabela 4, verifica-se os valores do tamanho dos arquivos de cada amostra, com e sem filtragem:

Tabela 4: Tamanho dos arquivos em STL, em Mb.

Amostra (mm)	Arquivo STL (Mb)	
	Sem filtro	Com filtro
Padrão 1 – 0,05	66,1	15,4
Padrão 1 – 0,15	12,0	2,9
Padrão 2 – 0,05	53,9	5,9
Padrão 2 – 0,15	5,5	0,99
Padrão 3 – 0,05	39,2	9,0
Padrão 3 – 0,15	5,6	2,6
Padrão 4 – 0,05	79,1	7,6
Padrão 4 – 0,15	10,6	4,4
Padrão 5 – 0,05	51,2	6,1
Padrão 5 – 0,15	5,45	2,5
Padrão 6 – 0,05	53,1	5,4
Padrão 6 – 0,15	5,81	2,7

Na figura 40 e 41, é possível verificar os gráficos das diferenças entre os arquivos em Mb. Observa-se que os ensaios realizados com precisão de captura de 0.05mm apresentam os maiores ganhos em termos da redução do tamanho, o que é muito importante para o seu posterior processamento.

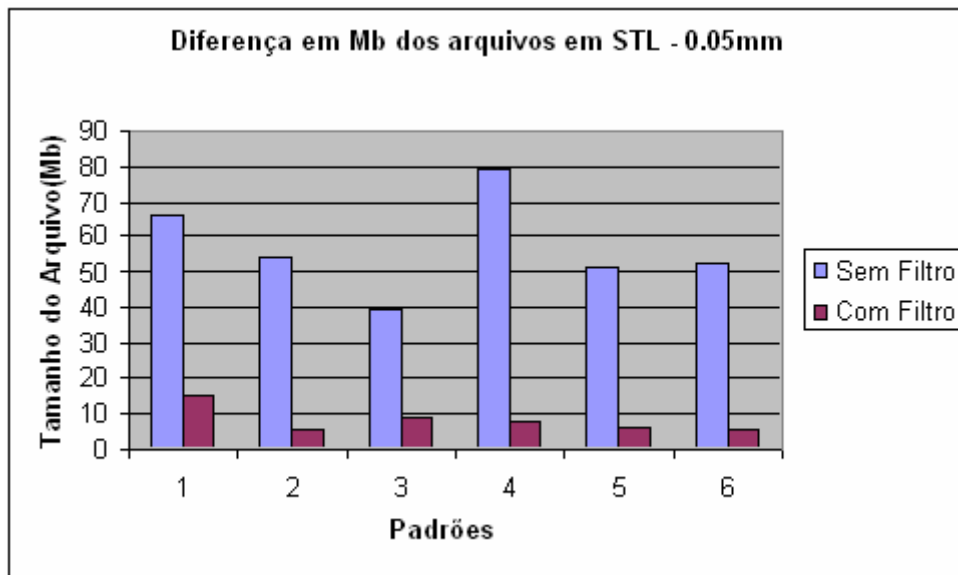


Figura 40 – Padrões digitalizados com 0,05mm de precisão.

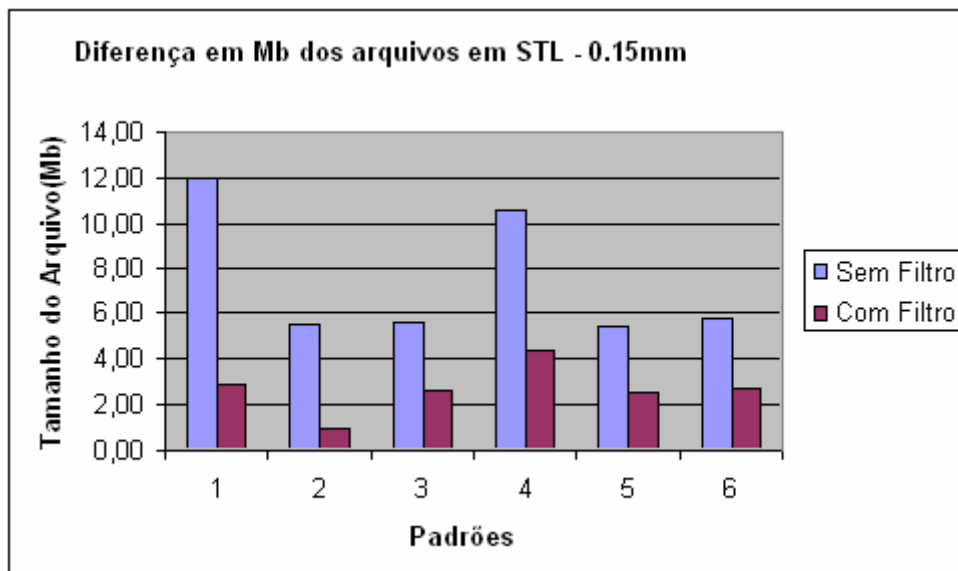


Figura 41 – Padrões digitalizados com 0,15mm de precisão.

Em relação à geometria, quando é realizado algum processo de edição tanto dos pontos quanto dos triângulos, é muito importante não remover alguma parte fundamental da geometria ou diminuir demais o número de informações. Tanto pontos quanto triângulos, são informações essenciais para a reconstrução geométrica da forma; portanto, se for retirado ou alterado a sua posição no espaço, utilizando algum filtro ou decimalizando, é muito provável que haja alguma distorção da geometria, prejudicando o processo.

Utilizando o mesmo software de Engenharia Reversa, realizou-se a comparação 3D das nuvens de pontos originais em relação às geometrias em STL das amostras editadas no software, a fim de avaliar as perdas e a confiabilidade da edição. Neste caso optou-se em utilizar as amostras com o menor espaçamento entre os pontos (0,05mm), pois apresenta maior quantidade de informação (pontos) e demonstra os maiores ganhos.

Na figura 42, verifica-se através de uma comparação 3D da nuvem de pontos original com o arquivo STL, já suavizado.

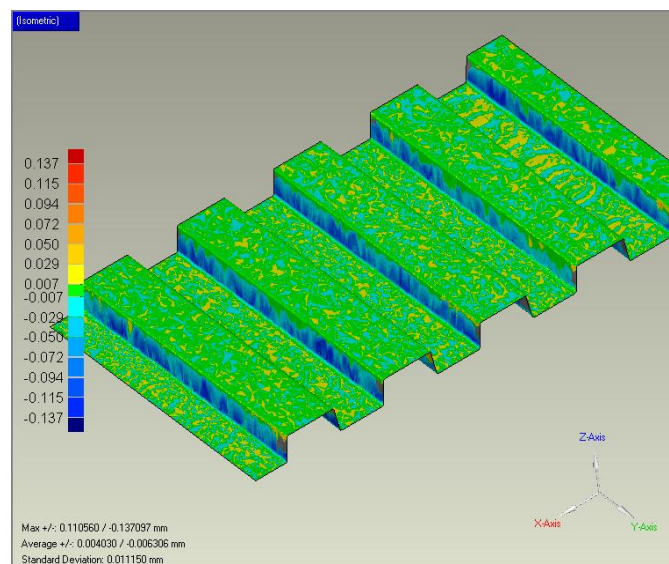


Figura 42 – Comparação 3D da amostra 1

Na amostra 1, observa-se, nas áreas onde há pontos, basicamente nas regiões planas horizontais, que a variação máxima fica em torno de 0.04mm. As áreas de maior variação são as de cor azul (0.13mm); porém, estas áreas apenas demonstram a ausência de pontos nas paredes verticais que foram criadas em STL manualmente na fase de triangulação, ou seja, existe o triângulo mas não o ponto, o que causa esta suposta diferença.

A figura 43 refere-se a amostra 2, que tem uma geometria plana, o que demonstra a independência em relação à quantidade de pontos, uma vez que necessita apenas de pontos nos vértices, para delimitar as fronteiras e o plano.

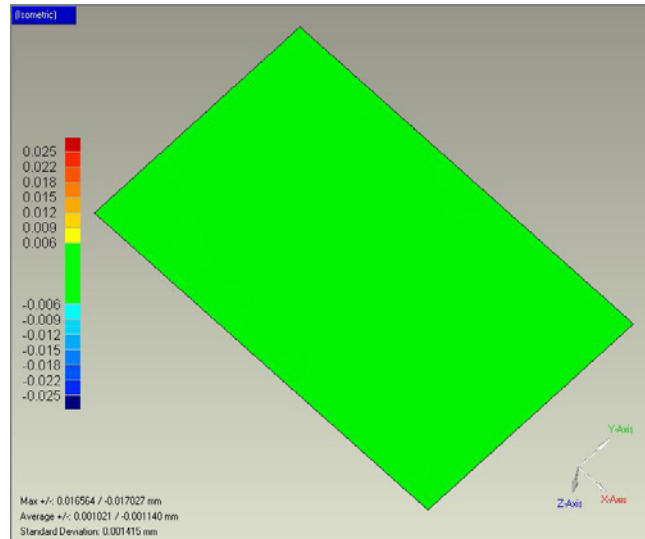


Figura 43 - Comparação 3D da amostra 2

Já na amostra 3, representada pela figura 44, houve uma pequena distorção nos extremos da geometria, causada provavelmente pelo fato de ter sido digitalizado em ângulo, e as extremidades sempre apresentam uma zona de ruído causada pela inversão de sentido de digitalização da máquina, aceleração e desaceleração. Porém, mesmo havendo uma variação, ela é muito pequena, menor que 0,05mm.

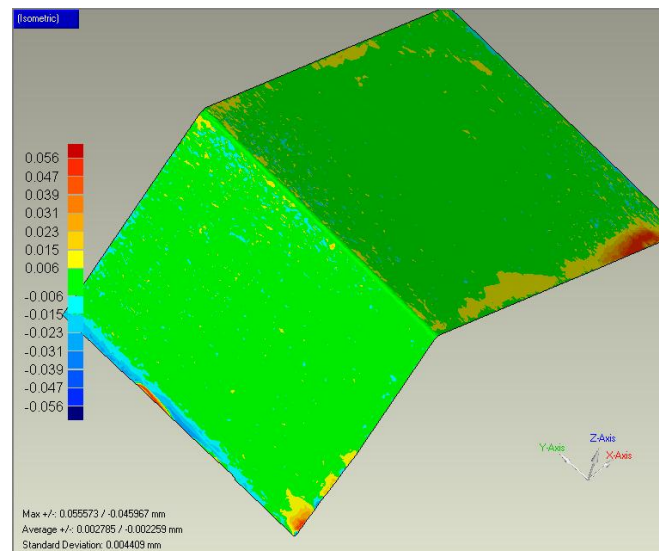


Figura 44 - Comparação 3D da amostra 3

Observa-se nas figuras 45 e 46 que, nas áreas de curvatura média, em relação ao ângulo de incidência do laser, há apenas uma pequena variação nas áreas próximas onde o ângulo de incidência do laser ultrapassa aproximadamente 80°. Mesmo com esta pequena distorção ($< 0,05\text{mm}$), o modelo está dentro das tolerâncias utilizadas em engenharia reversa na área de calçados, que é $\pm 0,1\text{mm}$.

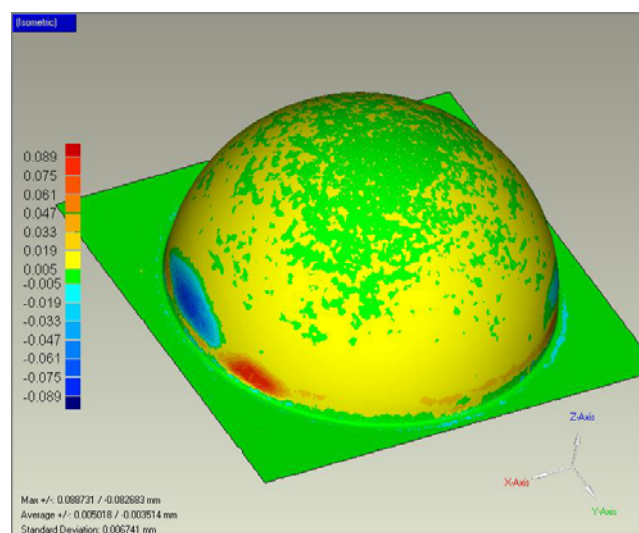


Figura 45 - Comparação 3D da amostra 4

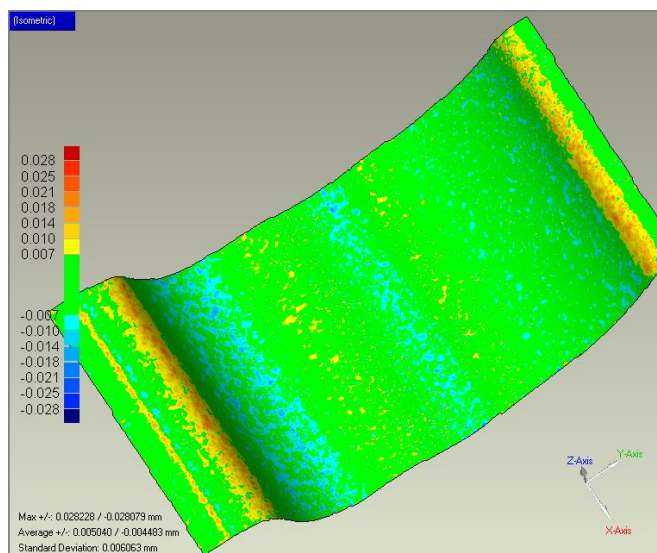


Figura 46 - Comparação 3D da amostra 6

O caso que apresentou a maior incidência de distorção foi observado na amostra 5, demonstrado na figura 47. Verifica-se aproximadamente 0.09mm de desvio Máximo e 0.05mm de desvio médio. Isto se deve ao fato da geometria ser uma senóide, fazendo com que a matemática de suavização e decimalização atue, aproximando as irregularidades para uma linha média da geometria. O efeito em uma senóide é o de achatamento, causando esta variação, ainda aceitável para os padrões calçadistas.

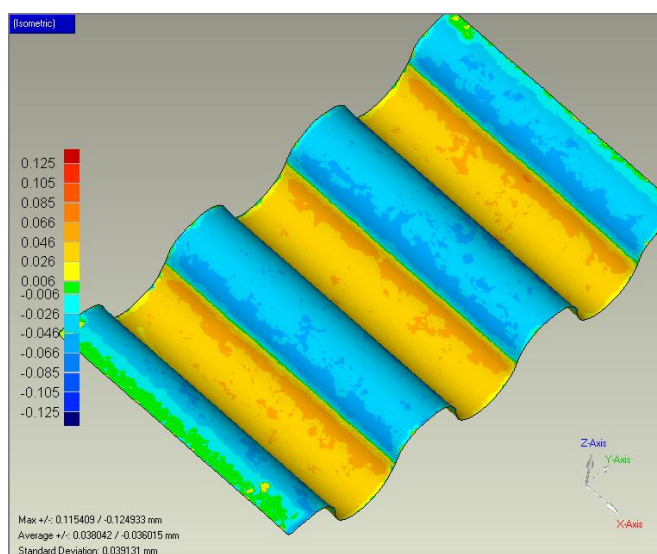


Figura 47 - Comparação 3D da amostra 5

3.5 Simulação de Usinagem

Observando a tabela 5, verifica-se a influência da manipulação dos arquivos digitalizados, principalmente nos arquivos de usinagem. Isso ocorre devido à rugosidade das geometrias, pois o caminho da ferramenta é diretamente proporcional à área superficial da peça que, tendo uma rugosidade elevada, tem sua área aumentada. Quanto menor a ferramenta utilizada, mais pronunciado este efeito, pois a ferramenta tem a possibilidade de entrar em áreas menores.

Em relação aos diferentes materiais, por apresentarem características e parâmetros de usinagem diferentes, a proporção de tempo é inversa, ou seja, quanto maior a Velocidade de Avanço, menor o tempo de usinagem. Esse resultado é esperado, pois a velocidade é função do caminho percorrido, que, neste caso, é o mesmo, em função do tempo, que depende de cada material. O tamanho de arquivo não muda em relação ao material, pois depende unicamente da trajetória, que, em ambos os casos, é a mesma.

O tamanho do arquivo também depende da rugosidade, pois é determinado pelos pontos necessários para descrever a geometria que, tendo maior área superficial, tem maior número de pontos e tamanho de arquivo.

Tabela 5: Resultado do tempo de usinagem, simulado e do tamanho do arquivo pós-processado gerado.

Amostra	Tipo	Tempo de usinagem (min)		Tamanho de arquivo (Mb)	
		Alumínio liga 5052	Resina de PU	Alumínio liga 5052	Resina de PU
2	Sem filtro	21,3	10,6	3.2	3.2
	Com filtro	11,5	5,2	1.16	1.16
5	Sem filtro	29,4	14,7	25.3	25.3
	Com filtro	17.4	8,7	16.6	16.6
6	Sem filtro	26,3	13,1	13.2	13.2
	Com filtro	16	8	7	7

4.CONCLUSÃO

A questão fundamental analisada, neste trabalho, foi a metodologia da aplicação e a importância do processo de Digitalização 3D em ambientes computacionais de suporte à Engenharia Simultânea aplicada ao setor de calçados. As análises feitas, com base na revisão bibliográfica, e os resultados obtidos com as experiências de aplicação realizadas, permitem chegar a várias conclusões sobre a APLICABILIDADE DA DIGITALIZAÇÃO 3D EM AMBIENTES DE ENGENHARIA SIMULTÂNEA.

Os aspectos de contribuição tecnológica deste trabalho ocorreram através do desenvolvimento de padrões geométricos para digitalização 3D(até então inexistentes), baseados nas geometrias encontradas no mercado de calçado. Foram também avaliadas e demonstradas as formas de digitalização 3D e posterior processamento em softwares de Engenharia Reversa. Este estudo demonstrou a importância da realização de uma análise prévia da geometria a ser realizada e a posterior edição e triangulação dos pontos, a fim de se obter os melhores resultados na qualidade e confiabilidade da geometria, com o menor tamanho de arquivo e tempo de processamento.

A análise prévia do modelo a ser digitalizado deve ser muito criteriosa, pois dela resultarão os parâmetros de digitalização e posterior processamento. Quando o modelo apresentar apenas formas curvas, planas ou a junção de ambas com transição suave, a digitalização pode ser feita com um espaçamento médio entre pontos. Isto resultará em um arquivo leve e de rápida aquisição e processamento. Porém, quando a geometria apresentar formas muito complexas, cantos e regiões de inflexão acentuada, podendo conter geometrias simplificadas em sua forma, devem ser realizada uma digitalização com espaçamento de pontos pequeno. Isto resultará em um tempo elevado de digitalização, processamento e arquivos grandes. Contudo, é possível reduzir estes arquivos significativamente sem perder a precisão geométrica, melhorando o seu posterior processamento e produção.

Analisando os valores das variações geométricas dos padrões digitalizados, verifica-se que a digitalização 3D se aplica à construção de modelos geométricos para CAD/CAE/CAM/CNC, nas tarefas de engenharia reversa de componentes cujas superfícies não puderem ser descritas através de um conjunto simples de parâmetros e não houver a necessidade de utilização dos modelos resultantes em ambientes de Engenharia Simultânea baseada em “features”.

Avaliando as diferenças entre as digitalizações realizadas com alta (0.05mm) e baixa (0.15mm) precisão, pode-se concluir que a construção de um modelo geometricamente consistente, a partir das nuvens resultantes de trabalhos de digitalização 3D, será inviável sempre que a densidade ou organização da nuvem de pontos for incompatível com o nível de detalhes da peça. Mesmo que o programa verifique a topologia do modelo, evitando descontinuidades, não é possível “adivinhar” pontos ausentes.

Observando os valores dos tempos e do tamanho em Mbytes dos arquivos da digitalização, verifica-se, como esperado, que o número de pontos é diretamente proporcional ao tempo de digitalização e tamanho do arquivo. Contudo, a densidade para se obter a melhor nuvem de pontos para descrever a geometria requerida é muito difícil de ser estabelecida previamente. Isso ocorre porque não há informações prévias sobre a geometria da peça; portanto, sempre que for possível e que se tenha o equipamento indicado, uma digitalização, com alta densidade de pontos, produz melhores resultados, especialmente em geometria complexas, com cantos e inversões bruscas de geometria. Em se tratando de formas curvilíneas, esféricas e planas, a densidade de pontos pode ser menor, uma vez que os algoritmos dos softwares de CAD, responsáveis por descrever este tipo de geometria, não necessitam de um número elevado de pontos.

Verificando os resultados obtidos com os arquivos com edição de triângulos em relação aos sem edição, observa-se que o processo de triangulação dos pontos (STL) é fundamental no resultado final da geometria. Com o auxílio de um

software específico para Engenharia Reversa, é possível reduzir o número de pontos e de triângulos, preservando as medidas geométricas necessárias. Quanto maior a densidade de pontos da nuvem original, maior a redução, diminuindo significativamente o tamanho do arquivo final. Os ganhos podem chegar uma redução de até 90% do arquivo original, em MB, dependendo da geometria.

Nos ensaios de simulação de usinagem, pode-se determinar que a usinagem, em CNC de geometrias digitalizadas, é muito afetada pelo processo de digitalização e edição de pontos. O tempo de usinagem aumenta muito quando temos arquivos grandes e de rugosidade alta, isso porque o processo de digitalização e a edição dos pontos irão gerar arquivos com mais ou menos rugosidade superficial, o que determinará um percurso maior ou menor da ferramenta. Sendo que quanto menor a ferramenta, maior é o percurso descrito e, por consequência, maior o tempo. Isso causa também um acabamento superficial da peça ruim, com uma aparência “riscada”.

No mercado de calçados, temos duas divisões no processo produtivo das matrizes que são: o desenvolvimento da matriz usinada diretamente em Alumínio ou a usinagem do protótipo, normalmente em Resina de PU para a confecção do molde fundido. Avaliando os resultados da simulação de usinagem em relação aos materiais, a digitalização tem forte influência no processo de usinagem, pois depende dos parâmetros de corte e velocidade. Portanto, em se tratando de usinagem e, principalmente HSM, os materiais compósitos, não metálicos e poliméricos são os mais prejudicados, uma vez que poderiam ser usinados a altíssimas velocidades, diminuindo muito o seu tempo de fabricação e melhorando o seu acabamento.

Sugestões para Futuros Trabalhos

É interessante estender o presente trabalho a outras investigações, Sugere-se as seguintes ações na continuidade deste estudo:

- Realizar a continuidade dos estudos, na área de construção de geométricos em formato de superfícies (IGES), classe A, a partir da digitalização de modelos para a indústria de moldes a matrizes técnicas e automobilísticas, que necessitem de alta precisão dimensional e tolerâncias de montagem. Essa pesquisa visa a contribuir para a ampliação do uso da digitalização em ambientes onde a precisão da geometria e, principalmente a qualidade matemática da superfície sejam fundamentais, como o mercado automobilístico, por exemplo.
- Estudar novas alternativas em algoritmos para a produção de modelos com superfície Nurbs, a partir de ajuste de pontos digitalizados. Esta sugestão pode melhorar o processo de edição de pontos, inclusive eliminar o processo de triangulação de pontos, passando diretamente da etapa de pontos para a de superfície NURBS, podendo ser trabalhada com as ferramentas de superfície.
- Estudar a influência das diferentes técnicas de digitalização na confiabilidade e rugosidade superficial geométrica do modelo CAD gerado. A pesquisa destes procedimentos auxiliariam muito os usuários a selecionar o melhor processo e técnica de digitalização para cada aplicação do mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MORUP, M, Total Life Models: Na important tool design for quality. ICED, 1993 v.1. p. 849-856.
- [2] KUSIAK, A, (Ed) Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques. New York: John Wiley e Sons, 1993. p.19.
- [3] HARTLEY, J. R. Concurrent Engineering: Shortening lead-times, raising quality, and lowering costs. Cambridge: Productivity Press, 1992. p.124.
- [4] IMMERSION Corp. <http://www.immersion.com> (Outubro 2005).
- [5] FARO Technologies Inc. <http://www.faro.com/faroarm.htm> (Outubro 2005).
- [6] FARO Technologies Inc. Faro Arm: Bronze Series Catalog. (Fevereiro 2004).
- [7] SAC GP-12-3D a three dimensional sonic digitizing system. Science Accessories Corp. Shelton, 1993
- [8] GTCO Inc. <http://www.ctco.com> (Outubro 2005).
- [9] POLHEMUS Inc. <http://www.polhemus.com/3drawds.htm> (Outubro 2005).
- [10] POLHEMUS Inc. <http://www.polhemus.com/products.htm> (Outubro 2005).
- [11] RENISHAW. <http://www.renishaw.com/scanning/htm>. (Outubro 2005).
- [12] HEIDENHAIN, J. Digitalisieren mit dem 3d-Tastsystem. Lieferübersicht, p 47-49, Traunreut, 1999.

- [13] DECKEL, F. El novo sistema de digitalizacion del especialista del fresado-copiado. Catálogo. München, 1999.
- [14] PFEIFER, T. Introdução a técnica de medição por coordenadas. Colóquio: Técnicas avançadas de medição por coordenadas, UFSC/CERTI 1987.
- [15] MITUTOYO CNC CMM Briht 504 Series 196. Catalogo 1996.
- [16] BRITE0-MODESTI 3D digitizing devices and coordinate measurement machines. Status report. 1999.
- [17] NVISION <http://www.nvision3d.com/techno.htm> (Outubro 2005).
- [18] SCANTECH <http://www.scantech.com> (Outubro 2005).
- [19] 3D SCANNERS <http://www.3dscanners.com> (Novembro 2005).
- [20] RITTER, D. Paralleler, optischer 3D-Sensor.
http://gareth.physik.uni-erlangen.de/optik/people/dr/dipl/dipl_e.html (Outubro 1997).
- [21] HAEUSLER G. Calibration of optical 3d Sensors,
http://gareth.physik.uni-erlangen.de/optik/people/dr/dipl/dipl_e.html (Outubro 1997).
- [22] FOLEY, J, D. Computer graphics: principles and practice. – 2 ed. Reading: Addison-Welsey, c1990. 1175p.: il.
- [23] PHOTOMODELER <http://www.photodeler.com> (Agosto 2005).
- [24] PERCEPTRON <http://www.perceptron.com/web/index.htm> (Agosto 2005).
- [25] AEA TECHNOLOGY Tomohawk
<http://www.aeat.co.uk/ndt/tomohawk/tomohawk.html>. (Junho 2005).

- [26] STRUERS, Inc. Tunnelscope 2400, Catalogo 1996.
- [27] MEDAR, Inc. To Introduce 3D Automotive Body Panel Flaw Detection System. <http://www.medar.com/whatnew/budd.html> (Março 2005).
- [28] EOIS <http://www.eois.com/handy.htm> (Dezembro 2005).
- [29] XYZCORP <http://www.xyzcorp.com> (Outubro 2005).
- [30] OPTIMET www.optimet.com (Novembro 2005)
- [31] MELHOREMENTOS Dicionário Eletrônico Melhoramentos Soft da Língua Portuguesa. São Paulo: Melhoramentos, 1995.
- [32] FERREIRA, Aurélio B. de H. Novo Dicionário da Língua Portuguesa. 2 ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1996.
- [33] KUME, H. Quality Management in New-Product Development: Simultaneous Engineering. Kenshu n. 143. 1997.
- [34] DIETZ, P. Concurrent Engineering: Folgen für die Ausbildung, Konstruktion, n 48, p. 5-11. Berlin 1996.
- [35] PRASAD, B. Concurrent engineering fundamentals: integrated product and process organization. New Jersey: Prentice Hall, 1996. v. 1 p. 92.
- [36] PRASAD, B. Concurrent engineering fundamentals: integrated product and process organization. New Jersey: Prentice Hall, 1996. v. 1 pp.207-258.
- [37] SAAD, M.; MAER, M. L. Shared Understanding in computer-supported collaborative design. Computer Aided Design, vol. 28 n.3 pp 183-192, 1996.

- [38] AHRENS, C. H. Características desejáveis para implantação e o emprego de sistemas CAE/CAD/CAM no setor de moldes de injeção de plásticos. Florianópolis, 1994. Tese (Doutorado em Eng. Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [39] CAVALHEIRO, A. Z. Sistematização do Planejamento da programação via CAM do Fresamento de cavidades de moldes para peças injetadas. Florianópolis, 1998. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [40] DELCAM plc. Powermill Reference Manual. Birmingham (GBR) 1996.
- [41] GUNNINK, J. W. How to speed up prototyping & tooling processes by using STL-technology. Time-Compression Technologies '98 Conference, 1998.
- [42] DIEHL, L. Machining Methods for Complex Models. Modern Machine Shop. V6. jul. 1996. Disponível na internet. <http://www.mmsonline.com> 16 mar. 1998.
- [43] MARTIN, R., Martin, C. The Windows Trio powers CAM software; Computer Aided Engineering, março 1996.
- [44] MARINAC, D. Tool Path Strategies For High Speed Machining. Modern Machine Shop. (Disponível na internet. <http://www.mmsonline.com>) 2005.
- [45] MACEDO, S. E. M. Análise de Forças no Fresamento de Topo Convencional e Com Altas Velocidades de Corte. Florianópolis, 2001. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [46] ASM INTERNATIONAL. High Speed Machining (retired: General Electric Corporate Research & Development).

[47] SANDVIK. Usinagem com Altas Velocidades de Corte e Usinagem Convencional de Moldes e Matrizes. Coletânea com sete artigos. Sandvik Coromant, p. 1-24, 2000.

[48] FIELD, R. Myths of High-Speed Machining. Metifax, maio 2000 (Disponível na Internet. <http://www.manufacturingcenter.com>), julho 2005.

[49] HORN, D. High Performance Machining – Putting it Into Practice. Moldmakingtechnology Magazine., <http://www.moldmakingtechnology.com> , Julho 2004.

[50] SCHULZ, H. High Speed Machine. Seminário de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte: Fresamento, Torneamento, Furação. Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), Julho de 1997.

[51] SCHULZ, H. State of Art and Trends of High Speed Machining. Seminário de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte e Alta Precisão. Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), Julho de 1997.

[52] GOMES, J. O. Exame de qualificação para doutorado submetido a Universidade Federal de Santa Catarina. Outubro de 1998, 55f.

[53] GOMES, J. O. Fabricação de Superfícies de Forma Livre por Fresamento no Aço Temperado DIN 1.2083, na Liga de Alumínio (AMP8000) e na Liga de Cobre (Cu-Be). Florianópolis, 2001. Tese (Doutorado em Eng. Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

[54] GEIST, J. Influence of HSC-Appropriate Machining Parameters on NC Programming. Seminário Internacional de Alta Tecnologia. Inovações Tecnológicas na Manufatura para Aço 2000. Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), agosto 1999.

[55] SMITH, S. DVORAK, D. Tool Path Strategies for High Speed Milling Aluminum Work pieces With Thin Webs. Mechatronics (Pergamon), v. 8, p. 291-300, 1998.

[56] NOKEN, S.; KNODT, S; ALTMULLER, S.; WIRTZ, H. To Mill or To EDM – That is the Question. Moldmakingtechnology Magazine., <http://www.moldmakingtechnology.com> , Setembro 2004.

[57] WOHLERS, T. 3D Digitizer for Engineering. Computer Graphics World v. 18, n. 3. 1995.

[58] IMMERSION Corp. <http://www.immercion.com/wwwpages/software.htm> (Fevereiro 2005).

[59] VENON, P. LEON, J. C. Static Polyhedron Simplification using error measurements. Computer Aided Design, V.29, n.4 pp 287-298, 1997.

[60] ROGERS, D. F. Mathematical Elements for Computer Graphics. 2 ed. New York: McGrawHill, 1990. pp. 348-350.

[61] GEOMAGIC <http://www.geomagic.com> (Novembro 2005).

[62] TECNODRILL INDUSTRIA DE MAQUINAS LTDA – www.tecnodrill.com

ANEXO 1: Manual de operação do equipamento DIGIMILL 3D.

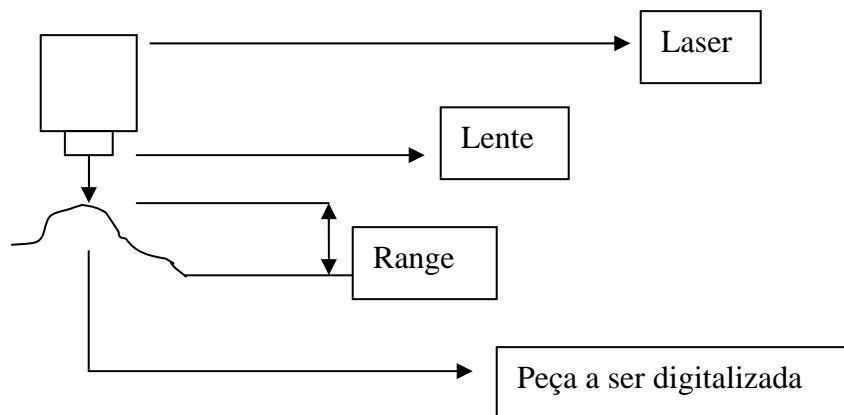
Procedimento de Digitalização

Primeiramente deve-se colocar o laser no suporte, localizado ao lado esquerdo do spindle e ligar o conector (que está na máquina) a ele. Após, liga-se o laser no botão que está no lado direito, atrás da máquina (na lateral do quadro elétrico), e conferir se o ponto vermelho do laser esta visível.

Lentes:

Com a máquina acompanham três lentes, de 150mm, de 100mm e de 75mm. Cada uma tem características diferentes como o range e a qualidade de digitalização.

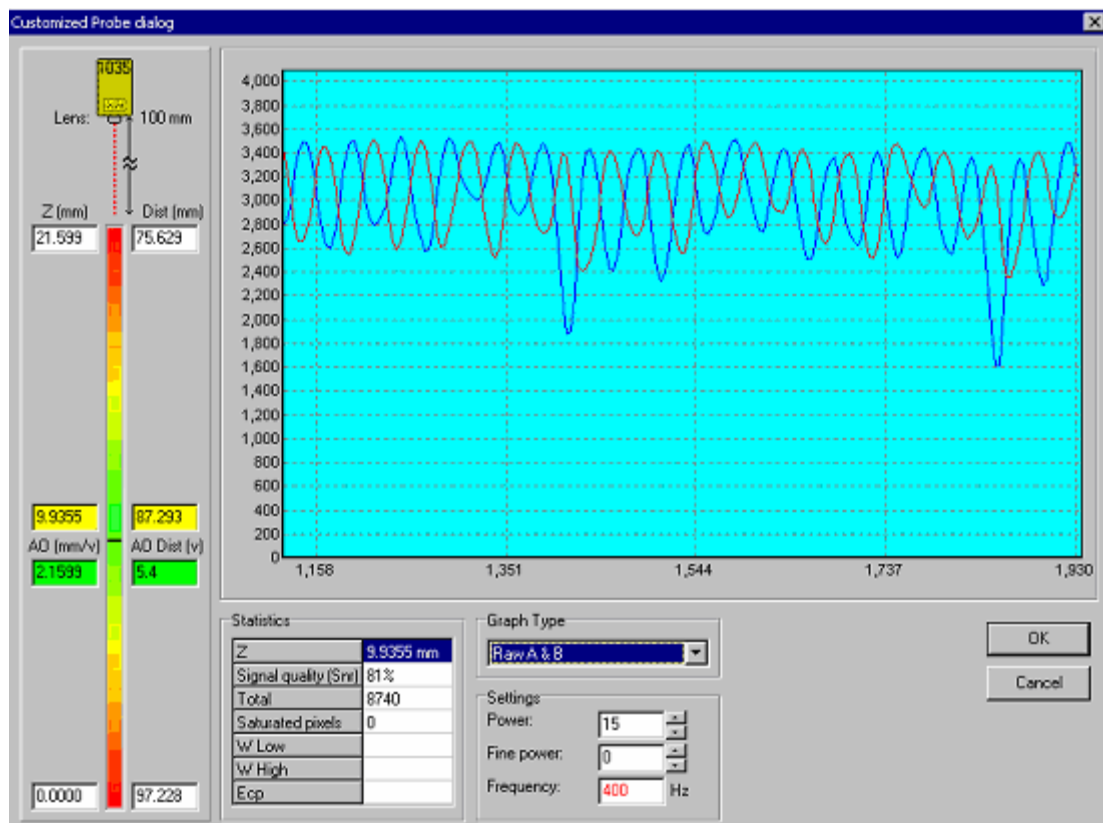
A lente que será usada deve ser escolhida de acordo com a peça. Deve ser observado na peça determinadas características com altura, desnível, detalhes da peça, etc.



Lente	Range médio	Qualidade
150mm	70 a 80 mm	+
100mm	20 a 25 mm	++
75mm	15 a 20 mm	+++

Ajuste de altura:

O próximo passo é fixar a peça a ser digitalizada no dispositivo de digitalização, aproximar o laser, movimentando a máquina em jog, colocando o ponto vermelho na parte mais alta da peça:

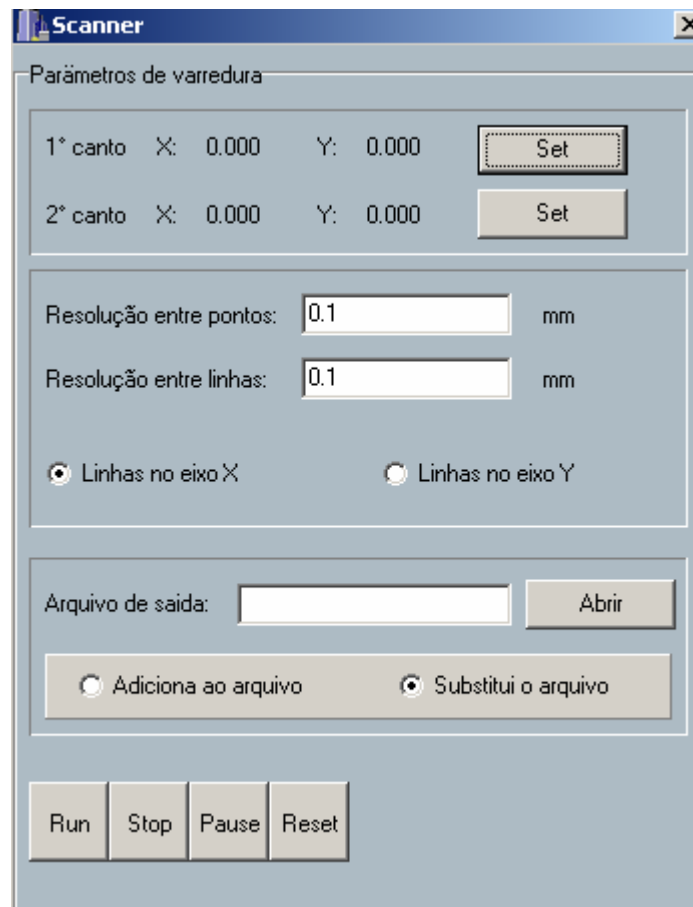


Ajuste da área:

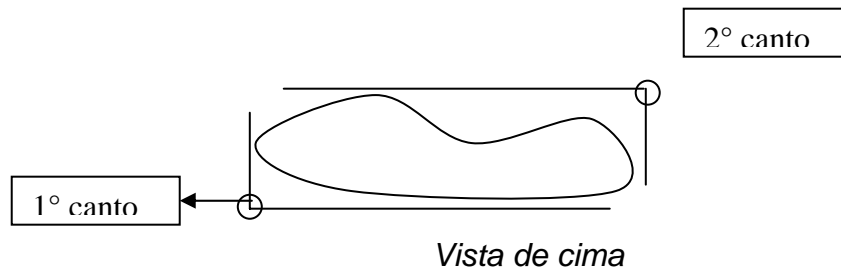
Após o set de altura estar pronto deve se ajustar a área a ser digitalizada, para isso abrir o menu FERRAMENTAS, SCANNER:



Ao entrar nesse menu abrirá a seguinte tela:



Então deve-se começar a analisar a área a ser digitalizada, conforme exemplificado na figura abaixo:



Deve-se posicionar o laser no primeiro canto e clicar no set para o primeiro canto nos parâmetros de varredura.

Parâmetros de varredura				
1° canto	X:	0.000	Y: 0.000	Set
2° canto	X:	0.000	Y: 0.000	Set

Fazer o mesmo com o segundo canto.

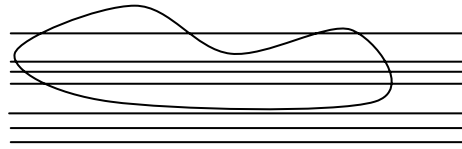
Ajuste da resolução:

Para o set de resolução devem-se analisar os detalhes da peça, quanto mais detalhe menos espaçamento entre linhas e pontos deve ter.

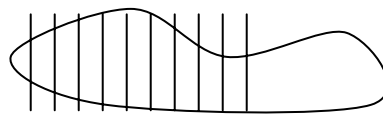
Resolução entre pontos:	<input type="text" value="0.1"/>	mm
Resolução entre linhas:	<input type="text" value="0.1"/>	mm
<input checked="" type="radio"/> Linhas no eixo X	<input type="radio"/> Linhas no eixo Y	

A resolução entre pontos é a distância que o laser vai identificar entre um ponto e outro, e a resolução entre linhas é a distância que o laser vai andar entre uma linha e outra.

Nesse menu ainda tem o set de sentido de digitalização, onde se escolhe se as linhas de digitalização serão feitas no eixo X ou no eixo Y.



Linha no eixo X - Vista de cima



Linhas no eixo Y - Vista de cima

Iniciando a digitalização:

Após fazer todas as configurações necessárias basta clicar no botão RUN do menu de comandos:



Iniciar digitalização

Nesse menu existem mais dois botões com funções bastante simples:

STOP: Para a digitalização, se for apertado o botão de RUN novamente a digitalização não começará de onde parou e sim do início.

PAUSE: Para a digitalização, se for apertado o botão de RUN novamente a digitalização começará de onde parou.

Condições ideais da peça:

A peça a ser digitalizada não deve ter brilho, quanto menos melhor é a qualidade da digitalização. Se caso for brilhosa é aconselhável o uso do SPRAY REVELADOR BRANCO, que é um produto que tira o brilho da peça quando seca, e para removê-lo basta passar um pano.

Obs: não deixar uma camada muito espessa desse produto para não alterar detalhes pequenos e nem criar desníveis na peça.