

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Artes e Comunicação
Departamento de Design



MODELAGEM DIGITAL TRIDIMENSIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA:

**UM ENFOQUE SOBRE A MODELAGEM
ORGÂNICA.**

GUTENBERG BARROS

Recife, 2012

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Artes e Comunicação
Departamento de Design



MODELAGEM DIGITAL TRIDIMENSIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA:

UM ENFOQUE SOBRE A MODELAGEM ORGÂNICA.

GUTENBERG XAVIER DA SILVA BARROS

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de mestre em design pelo Programa de
Pós-Graduação em Design da Universidade Federal de
Pernambuco.

ORIENTADOR: PROF. DR. WALTER FRANKLIN
MARQUES CORREIA

Recife, 2012

Catálogo na fonte
Andréa Marinho, CRB4-1467

B277m Barros, Gutenberg Xavier da Silva.
Modelagem digital tridimensional para o desenvolvimento de prototipagem rápida: um enfoque sobre a modelagem orgânica / Adriana Veras Vasconcelos. – Recife: O Autor, 2012.
vii + 159 f.: il.

Orientador: Walter Franklin Marques Correia.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAC. Design, 2012.
Inclui bibliografia.

1.Design. 2. Modelagem 3D. 3. Prototipagem. I. Correia, Walter Franklin Marques (Orientador). II. Título.

745.2 CDD (22.ed.)

UFPE (CAC 2012-81)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

GUTENBERG XAVIER DA SILVA BARROS

“Modelagem Digital Tridimensional Para o Desenvolvimento de
Prototipagem”.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: DESIGN E ERGONOMIA

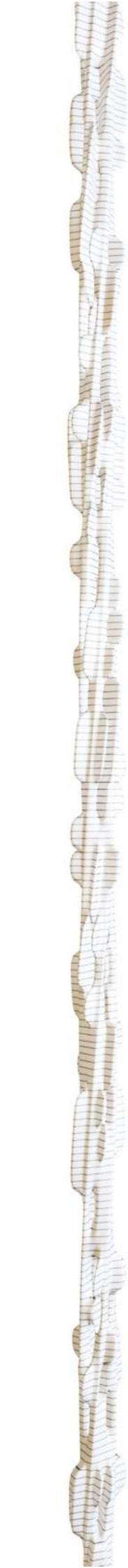
A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o(a) candidato(a) Gutenberg Xavier da Silva_____.

Recife, 28 de fevereiro de 2012.

Profº. Walter Franklin Marques Correia (UFPE)

Profº. Fábio Ferreira da Costa Campos (UFPE)

Profº. Adiel Teixeira de Almeida Filho (UFPE)



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela luz, pelas palavras e por permitir acontecer.

À minha esposa pelo apoio, carinho, compreensão, por existir.

Agradeço ao meu irmão pelas dicas e ajudas.

Aos amigos do Nave pelas dicas, apoio e pelo incentivo.

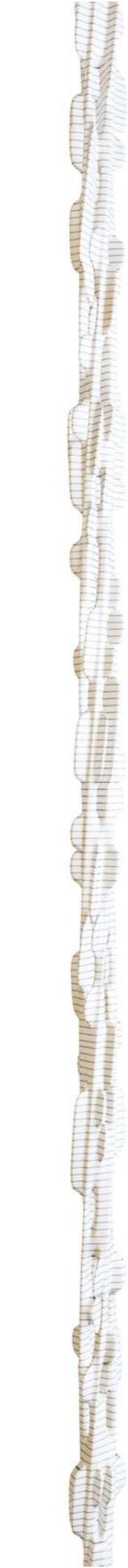
Aos amigos e familiares pela compreensão em minha ausência.

Aos meus pais, a minha madrinha e todos os mestres que trouxeram luz e apoio à formação do meu conhecimento.

RESUMO

Este estudo levanta dados sobre modelagem tridimensional virtual e sobre a prototipagem rápida. A partir de então, gera análises comparativas das dimensões, da contagem de elementos, dos erros detectados e do resultado da impressão de modelos tridimensionais gerados através de três métodos de modelagem tridimensional orgânica, o *Poly Modeling*, o *Spline Modeling* e o Nurbs dentro de dois dos mais utilizados softwares de modelagem 3D, o Autodesk 3ds Max e o Autodesk Maya. Durante o processo também é feita uma comparação entre as atuações dos comandos de construção nos métodos de modelagem tridimensional orgânica. Busca-se as ferramentas, os métodos e o software recomendado para obtenção dos melhores resultados na prototipagem rápida em termos de eficiência de construção, verossimilhança formal e proximidade dimensional entre o modelo virtual e a prototipagem obtida, além das diferenças entre as ferramentas existentes entre os dois softwares citados. A investigação se dá sobre peças construídas baseando-se no modelo feminino da metodologia de Rosa (2005) e impressas pelo processo de prototipagem por FDM. Os resultados elegem o 3ds Max como software ideal, entre outros motivos, pelo *feedback* em tempo real das configurações das suas ferramentas e pela facilidade e precisão da exportação do modelo para a prototipagem. Apresenta o *Poly Modeling* como método com maior flexibilidade de construção e fidelidade tanto formal quanto dimensional. Ainda são apresentados procedimentos alternativos de construção e de exportação para os três métodos e para os dois softwares.

Palavras-chave: modelagem 3D; prototipagem rápida; poly modeling, spline modeling, nurbs.



ABSTRACT

This study collects data on virtual three-dimensional modeling and on rapid prototyping. Since then, generates comparative analysis of the dimensions, of the element count and of the errors detected and the print result of three-dimensional models generated by three methods of organic three-dimensional modeling, the Poly Modeling, the Spline Modeling and the Nurbs, in two of the most used 3D modeling software, the Autodesk 3ds Max and the Autodesk Maya. During the process, is also made a comparison between the performances of the construction tools in the methods of organic three-dimensional modeling. Seeks recommendations for the best results in rapid prototyping in terms of building efficiency, formal likelihood and dimensional proximity between the model and virtual prototyping obtained, and the differences between the tools that exist between the two software mentioned. Research takes place on parts built based on the female model of the methodology of Rose (2005) and printed by the process of prototyping by FDM. Results elect 3ds Max as the ideal software among other reasons, by real-time feedback of the settings of their tools and for exporting the model to the prototyping. Presents the Poly Modeling as the method with greater flexibility of construction and both formal and dimensional fidelity. Also, alternative procedures are presented for construction and exports to the three methods and for both software.

Keywords: *3D modeling; rapid prototyping; poly modeling; spline modeling; nurbs.*

SUMÁRIO

Lista das Ilustrações.....	i
Lista das Tabelas	vi
Lista de abreviações	vii
1 Introdução	1
1.1 Problemas a serem investigados	3
1.2 Objetivo	4
1.2.1 Objetivos específicos.....	4
1.3 Metodologia.....	5
1.4 Justificativa.....	7
2 Referencial Teórico	9
2.1 Conceitos e processos utilizados na Prototipagem rápida	9
2.1.1 Estereolitografia (SLA).....	14
2.1.2 Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM).....	15
2.1.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	16
2.1.4 Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)	17
2.1.5 Cura Sólida na Base (SGC).....	19
2.1.6 Impressão por Jato de Tinta (IJT, MJM)	19
2.1.7 Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS).....	21
2.1.8 Impressão tridimensional (3D Print, 3DP).....	21
2.1.9 Novas tecnologias e usos	23
2.2 Conceitos e Métodos utilizados na modelagem tridimensional	23
2.2.1 Modelagem a partir de linhas (spline modeling)	38
2.2.2 Modelagem a partir de polígonos (box-modeling ou poly-modeling ou nurms) 42	
2.2.3 Modelagem através de linhas do tipo B, racionais não uniformes (Nurbs) 45	
2.3 Revisão da literatura	51
2.3.1.1 Curve and Surface Modeling.....	54
2.3.1.2 Meshing.....	55
2.3.1.3 Modeling And Rendering Dynamic Shapes.....	57
2.3.1.4 Physically Based Modeling: From Contact To Capture	58

2.3.1.5	Shape Editing And Deformation	59
2.3.1.6	Surfaces	61
2.3.1.7	3D Modeling	62
3	Estudos de Campo	65
3.1	Ferramentas de modelagem	65
3.1.1	Interface e filosofia de trabalho e ferramentas.....	68
3.1.1.1	Consumo de memória RAM.....	68
3.1.1.2	Interface	68
3.1.1.3	Controle das vistas.....	68
3.1.1.4	Acionamento dos comandos	70
3.1.1.5	Edição de modificações	71
3.1.1.6	Feedback	72
3.1.1.7	Menus de contexto.....	73
3.1.1.8	Acionamento dos subobjetos/elementos.....	73
3.1.1.9	Repetição do comando	74
3.1.1.10	Cancelamento	75
3.1.1.11	Snap	75
3.1.1.12	Importação / Exportação	75
3.1.1.13	Help	76
3.1.2	Ferramentas	77
3.1.2.1	Seleção	77
3.1.2.2	Manipulação.....	80
3.1.2.3	Clonagem.....	82
3.1.2.4	Alinhamento	82
3.1.2.5	Criação de Primitivas	83
3.1.2.6	Operações Booleanas.....	84
3.1.2.7	Extrude e Bevel.....	84
3.1.2.8	Espessura	85
3.1.2.9	Conexão de arestas e faces.....	86
3.1.2.10	Soldagem e remoção	87
3.1.2.11	Chanfro.....	88
3.1.2.12	Criação de faces e fechamento de aberturas.....	88
3.1.2.13	NURBS	89

3.1.2.14	Edição de Linhas	91
3.1.2.15	Espelhamento, Suavização e Subdivisão da malha	93
3.1.2.16	Medição	95
3.1.2.17	Preparação para exportação para STL	95
3.2	Construção dos modelos.....	96
3.2.1	Poly modeling - 3ds Max	98
3.2.2	Poly modeling - Maya	106
3.2.3	Spline modeling - 3ds Max	112
3.2.4	Spline Modeling - Maya	120
3.2.5	Nurbs - 3ds Max e Maya.....	121
3.3	Impressão	128
4	Resultados	132
4.1	Para Ferramentas de modelagem.....	132
4.2	Para os Métodos de modelagem	134
4.3	Modelos produzidos	137
4.3.1	Dimensão	137
4.3.2	Contagem de elementos.....	139
4.3.3	Erros detectados pelo software de impressão.....	141
4.3.4	Impressão.....	142
5	Conclusões.....	146
5.1	Sobre os métodos de modelagem.....	146
5.2	Sobre as Ferramentas.....	148
5.3	Sobre a Metodologia	149
5.4	Sugestões para estudos posteriores	150
6	Referências bibliográficas	152

LISTA DAS ILUSTRAÇÕES

Figura 1:1 Esquema das fases propostas para este estudo.	6
Figura 2:1 Etapas básicas da prototipagem rápida: a) objeto modelado em um software tridimensional; b) objeto fatiado 'pelo software da máquina de prototipagem; c1) objeto prototipado ainda com o suporte e; c2) objeto prototipado no estágio final. Fonte: o autor, 2010	11
Figura 2:2 Classificação dos processos de prototipagem rápida. Fonte: Mello <i>et al.</i> (2006)	14
Figura 2:3 Sinterização de partículas. Fonte: o autor, 2011	17
Figura 2:4 Componentes de uma malha tridimensional. a) vértice, b) aresta, c) face poligonal e, d) malha (elemento). Fonte: o autor, 2010.....	25
Figura 2:5 Comparação entre um sólido composto por polígonos e um sólido composto por triângulos. a) objeto com faces poligonais; b) objeto com faces triangulares. Fonte: o autor, 2010.	26
Figura 2:6 <i>Tween</i> . a e b são os <i>keyframes</i> . Entre eles vemos 3 quadros intermediários criados pelo programa de animação. Fonte: Autodesk, 2010.....	28
Figura 2:7 A adição de arestas na virilha permitirá que as pernas deste modelo possam se movimentar sem causar deformações indesejadas nesta região. Fonte: Autodesk, 2010.	30
Figura 2:8 Variação na projeção da sombra por consequência da forma do emissor de luz (area shadow planar). Fonte: Autodesk, 2011 (a).....	31
Figura 2:9 A luz se espalha pelo ambiente através da iluminação indireta. Fonte: o autor, 2007.	31
Figura 2:10 Imagem com radiância atuando como indicador de luminosidade para a cena. Fonte: THORNGREN, 2002.	33

Figura 2:11 Editor de materiais e diagrama da montagem dos mapas de um material. Fonte: o autor, 2010	35
Figura 2:12 Os três níveis de modelagem por materiais: macro (tijolos), material (piso) e subpíxel (tampo metálico vermelho). Abaixo, algumas imagens que foram utilizadas na composição dos materiais. Fonte: o autor, 2010.	36
Figura 2:13 Janela para configuração de opções de informação a serem armazenadas em uma imagem do tipo RPF. Fonte: Autodesk, 2011 (a).....	37
Figura 2:14 Exemplos de modificações em objetos 2D: (a) extrusão, (b) chanfro, (c) círculo extrudado por um perfil determinado e, (d) amostras de torneamento. Fonte: o autor, 2011.	39
Figura 2:15 Patches. À esquerda, um patch criado pela interseção de quatro <i>splines</i> (fonte: o autor, 2011). À direita, estrutura modelada por <i>splines</i> e capeada por <i>patches</i> (fonte: Bell, 1999).....	40
Figura 2:16 Objeto complexo inteiramente criado em <i>spline modeling</i> . À esquerda, linhas utilizadas na criação do avião: nota-se que na maioria dos casos, a estrutura forma espaços quadriláteros. À direita, o avião capeado. Fonte: o autor, 2011.....	41
Figura 2:17 Problema de continuidade da superfície <i>patch</i> (detalhe a). O detalhe b apresenta o excesso de faces apresentado por este método. Fonte: o autor, 2011.	41
Figura 2:18 Etapas de construção de uma tampa de garrafa utilizando o método <i>Poly Modeling</i> . Fonte: o autor, 2002.....	43
Figura 2:19 Modelagem do corpo de uma mulher utilizando desenhos bidimensionais posicionados por trás do modelo. Fonte: Rosa, 2005.....	44
Figura 2:20 Suavização da superfície poligonal. À esquerda o personagem como foi modelado em <i>Poly Modeling</i> . À direita, o mesmo modelo após receber a subdivisão de faces. Fonte: o autor, 2003.....	45
Figura 2:21 Tipos de <i>splines</i> Nurbs: à esquerda, <i>spline</i> de interpolação com as alças de Bézier e as informações de posição em um plano bidimensional; à direita, <i>spline</i>	

de aproximação com as mesmas informações de posição. Nota-se a ausência de quinas na imagem da direita. Fonte: o autor, 2010.	47
Figura 2:22 Tipos de superfície Nurbs: à esquerda, superfícies de pontos; à direita, superfícies CV. Fonte: Autodesk, 2011 (a).....	48
Figura 2:23 Superfície Nurbs criada a partir de quatro curvas Nurbs. Fonte: Autodesk, 2011 (b).....	49
Figura 2:24 Etapas da construção de um modelo de precisão em Nurbs através de operações entre curvas e superfícies. Fonte: o autor, 2011.	49
Figura 3:1 Interface do 3D Studio 4.0 para DOS. Fonte: Valcaron, 2009.....	66
Figura 3:2 Primeira versão do Maya. Fonte: Lane, 2011.	67
Figura 3:3 Sequência de criação das partes do corpo feminino na metodologia de Rosa. Fonte: Rosa (2005).....	97
Figura 3:4 Disposição da configuração inicial dos planos gabaritos. Fonte: o autor, 2011.	99
Figura 3:5 Edição de uma forma geométrica básica, substituindo uma sequência de extrusões. (a) colocação de um cilindro para modelagem. (b) cilindro modelado e unido ao pé pela ferramenta <i>Bridge</i> . Fonte: o autor, 2012.	100
Figura 3:6 Modificador <i>Symmetry</i> substituindo a cópia espelhada em instância. Fonte: o autor, 2012.	101
Figura 3:7 Na criação do mamilo, os dois <i>extrudes</i> e um <i>bevel</i> foram substituídos por dois <i>bevel</i> e um <i>edge chamfer</i> . Fonte: o autor, 2011.	102
Figura 3:8 O ângulo medido entre os mamilos através da ferramenta <i>Protractor</i> foi de 78°. Fonte: o autor, 2011.....	103
Figura 3:9 Operações de construção do antebraço aplicadas em um cilindro à parte. a) posicionamento; b) escalonamento frontal das seções transversais e; c) escalonamento superior. Fonte: o autor, 2011.....	103

Figura 3:10 Uso do Bridge para unir os dedos à palma: a) as últimas faces da falange foram deletadas; b) as faces da palma foram apagadas; c) as bordas resultantes foram selecionadas e; d) os componentes foram unidos pelo Bridge. Fonte: o autor, 2011.	104
Figura 3:11 ajustes do fundo da órbita para evitar problemas na operação de união. Fonte: o autor, 2012.	105
Figura 3:12 Resultado da modelagem por <i>Poly Modeling</i> no 3ds Max. Fonte: o autor, 2012.	106
Figura 3:13 situação do corpo após edição inicial dos sólidos-base. Fonte: o autor, 2012.	108
Figura 3:14 Sequências de edição das malhas para as conformações pretendidas. Criação por extrusão do mamilo (a, b, c) e das unhas (d, e, f). Adequação das malhas do pé (g, h). Fonte: o autor, 2012.	110
Figura 3:15 Arestas adicionais posicionadas para equiparar a quantidade de vértices de cada parte do corpo. Fonte: o autor, 2012.	110
Figura 3:16 Resultado da modelagem por <i>Poly Modeling</i> no Maya	112
Figura 3:17 Uso do <i>Section</i> para gerar perfis baseados no objeto tridimensional. (a) objeto tridimensional. (b) perfis gerados pelo <i>Section</i> . (c) linhas geradas pelo <i>Section</i> . (d) novo sólido gerado pela extrusão das linhas geradas. Fonte: o autor, 2012.	113
Figura 3:18 Captação das formas em <i>Splines</i> . (a) Objetos <i>Section</i> no modelo. (b) <i>Ngons</i> editados para ter as mesmas formas das <i>Splines</i> geradas pelos <i>Sections</i> . Fonte: o autor, 2012.	115
Figura 3:19 Criação das linhas de união dos perfis pela ferramenta <i>Cross Section</i> . Fonte: Autodesk, 2011.	115
Figura 3:20 Sequência de criação das unhas.	115

Figura 3:21 resultado do primeiro procedimento de criação por <i>Splines</i> (<i>section</i> , <i>ngon</i> , <i>cross section</i> , <i>edit (spline, patches)</i>)	116
Figura 3:22 Superfície criada com vértices de <i>Splines</i> depositados sobre os vértices da malha poligonal anterior. Fonte: o autor, 2012	118
Figura 3:23 Criação dos olhos utilizando as linhas da órbita. Fonte: o autor, 2012.	118
Figura 3:24 Resultado do segundo procedimento de criação por <i>Splines</i> (um vértice de <i>spline</i> sobre cada vértice da malha poligonal).....	120
Figura 3:25 Sólido-base do tronco conformado ao gabarito. Fonte: o autor, 2012.	122
Figura 3:26 Curvas Nurbs construídas baseando-se no modelo 3D produzido em <i>poly modeling</i> . Detalhes: (a) corpo, (b) face, (c) parte interna da coxa, (d) mão e, (e) clavícula.	123
Figura 3:27 Fazes de produção da ponta dos dedos.	124
Figura 3:28 Fazes da criação da unha. (a) desenho das curvas, (b) loft, (c) corte da curva, (d) capeamento com o birail2 e, (e) forma final.	125
Figura 3:29 Superfícies criadas a partir das curvas desenhadas sobre os vértices do modelo construído em <i>poly modeling</i>	126
Figura 3:30 Erros na malha: distorções causadas pelo <i>attach</i> (a) e pelo <i>Global Stitch</i> (b), conexão com as <i>isoparms</i> erradas (c) e alguns dos retalhos não anexáveis sem erros (d).....	127
Figura 3:31 Pré-visualização do modelo no CatalystEX após o processamento do arquivo STL.....	129
Figura 3:32 Primeiras camadas depositadas na impressão.....	130
Figura 3:33 Camadas intermediárias depositadas na impressão.....	130
Figura 3:34 Resultado da impressão.....	131

Figura 4:1 Diferença entre as medidas extremas da peça (azul) e as medidas da posição em que a peça foi impressa (vermelho). Fonte: o autor, 2012.....	138
Figura 4:2 Resultado das impressões	144

LISTA DAS TABELAS

Tabela 2:1 Comparação entre os diferentes sistemas de Impressão a Jato de Tinta	21
Tabela 2:2 Os dez journals e congressos com maior fator de impacto na área de multimídia, imagens e vídeo (fonte: Keg, 2010).	51
Tabela 2:3 relação dos artigos relacionados à modelagem tridimensional apresentados na Siggraph em 2009 e em 2010. Fonte: o autor, baseado na listagem de Ke-Sen Huang (2009, 2010).....	53
Tabela 3:1 Comparação de termos usados na edição de curvas e superfícies Nurbs	91
Tabela 3:2 Variáveis de criação dos modelos do estudo.....	98
Tabela 3:3 Sólidos primitivos utilizados para agilizar o processo de modelagem por polígonos no Maya. Fonte: o autor, 2012.....	107
Tabela 3:4 Relação de coordenadas dos objetos <i>Section</i> distribuídos para capturar em <i>splines</i> , a forma do modelo construído por <i>poly modeling</i> . Fonte: o autor, 2012.	114
Tabela 3:5 Sólidos primitivos utilizados como nova tentativa de construção por Nurbs no Maya. Fonte: o autor, 2012.....	122
Tabela 3:6 Número de <i>spans</i> utilizados na reconstrução das Nurbs <i>curves</i>	124
Tabela 4:1 Análise paramétrica comparativa entre as ferramentas de modelagem	133
Tabela 4:2 Comparação entre as dimensões dos modelos do estudo.	136

Tabela 4:3 Número de elementos encontrados nos modelos.....	136
Tabela 4:4 Comparação entre as dimensões virtuais e as impressas.....	139
Tabela 4:5 Número de elementos encontrados nos modelos.	140
Tabela 4:6 Erros detectados e reportados pelo CatalystEX.....	142
Tabela 4:7 Diferenças de consumo dos modelos impressos.	143

LISTA DE ABREVIACÕES

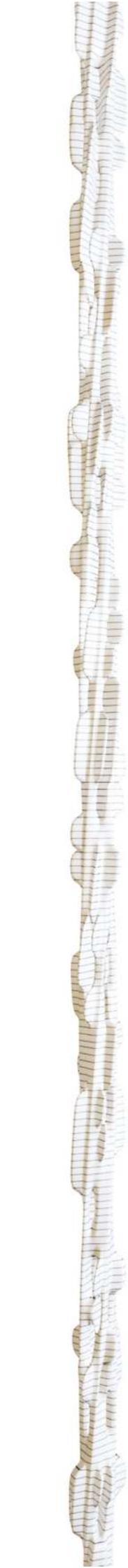
C	comprimento (<i>length</i>)
L	largura (<i>width</i>)
H	altura (<i>height</i>)
R	raio (<i>radius</i>)
Ld	lados (<i>sides</i>)
SegC	segmentos de comprimento (<i>length segments</i>)
SegL	segmentos de largura (<i>width segments</i>)
SegH	seguimentos de altura (<i>height segments</i>)
SegCap	seguimentos na tampa (<i>cap segments</i>)
SubA	subdivisões radiais (<i>subdivision axis</i>)
SubH	subdivisões de altura (<i>subdivision heigth</i>).
X	posição no eixo X (eixo lateral)
Y	posição no eixo Y (eixo de profundidade no 3ds Max, eixo de altura no Maya)
Z	posição no eixo Z (eixo de altura no 3ds Max, eixo de profundidade no Maya)
rotX	angulação do objeto eixo X
rotY	angulação do objeto eixo Y
rotZ	angulação do objeto eixo Z
PX	modelo construído em <i>Poly Modeling</i> no 3ds 3ds Max
PY	modelo construído em <i>Poly Modeling</i> no Maya
SP	modelo construído em <i>Spline Modeling</i> no 3ds Max

1 INTRODUÇÃO

Segundo Gorni (2003), “o termo prototipagem rápida designa um conjunto de tecnologias usadas para se fabricar objetos físicos diretamente a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador”. Mas o próprio autor cita os termos “fabricação sólida com forma livre”, “manufatura automatizada por computador” e “manufatura em camadas” como mais adequados, considerando os novos empregos, diferentes da prototipagem em si, que surgem para estes processos. Este tipo de produção surgiu no final da década de 1980 para gerar modelos e peças para protótipos industriais por adição de material. Hoje, com a criação de novos métodos e pela sua capacidade de produzir peças complexas, seu uso é muito mais abrangente, envolvendo desde a produção de modelos de alta precisão, de forma orgânica ou não, em baixa escala de produção, a peças artísticas.

Ela se diferencia dos demais métodos de criação por dois importantes aspectos: (a) as peças são produzidas diretamente a partir de modelos matemáticos tridimensionais construídos em computadores e passados diretamente para a máquina que as construirá e; (b) as peças são produzidas em camadas de material (cera, metal, polímeros ou papel, entre outros) adicionadas uma a uma de diferentes maneiras. Essas camadas são ligadas ou fundidas de modo a constituir o objeto desejado.

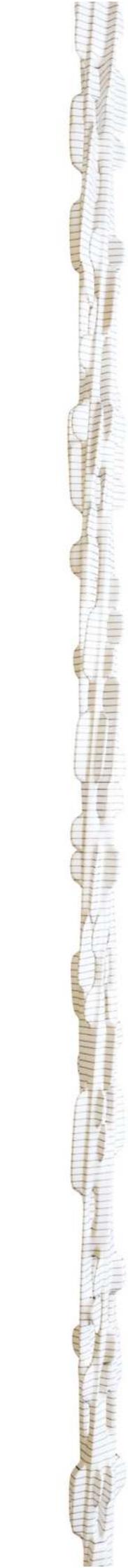
Em paralelo, mas também se baseando no desenvolvimento da matemática na área tridimensional, vários métodos de modelagem virtual em três dimensões surgiram ao longo do tempo para permitir a criação de objetos tridimensionais cada vez mais complexos, chegando ao ponto de se tornar verdadeira a versão virtual da frase de Graham Chapman no filme Monty Python's Flying Circus - “Como construir esse incrementado carro de corrida?! Primeiro se pega um bloco de madeira, em seguida esculpe-se o carro!” (*apud* Bell, 1999). No filme, a instrução dada (a crianças) era apenas esta. Claro que para transformar o bloco em um carro, várias etapas devem ser vencidas, porém a possibilidade de um paralelepípedo se tornar um carro é hoje plenamente real ao ponto de alterar a produção cultural visual e as atuais relações com o que as pessoas tomam como visualmente real. Como exemplo, em 1999,



Steven Stahlberg criou a primeira modelo (de moda) virtual do mundo patrocinada por uma grande agência, a Elite (Stahlberg, 2009). Causou muitos debates na época, sendo mostrada e comentada em diversas mídias. Em 2000, ao mostrar em um dos principais fóruns de discussão a imagem de uma mulher virtual que seria utilizada na capa de um livro, causou questionamentos ao ponto de ele ter que publicar uma imagem da tela do seu computador mostrando que a mulher não era real. Nesta última década, as tecnologias evoluíram ao ponto de se ter sites dedicados a desafiar o leitor a distinguir o real do virtual, como o Fake or Foto (<http://area.autodesk.com/fakeorfoto>). Comerciais de TV e filmes passaram a apresentar cenas impossíveis pelos métodos reais, o que libertou muito a criatividade, especialmente nas produções baseadas em livros de fantasia e histórias em quadrinhos. Nos jogos digitais, o poder desse visual aliado a novas formas de interação, aproximou os jogadores dos seus personagens criando outros tipos de relacionamento virtual tanto entre si e seu avatar, quanto entre si e seus companheiros virtuais. Tais avanços levaram a mudar o pensamento que existia em décadas anteriores de que a TV era o instrumento detentor da verdade: tudo o que se passava ali é porque existiu no mundo físico de alguma maneira. Não mais.

A redução de preços dos equipamentos da prototipagem rápida e o nascimento de novas tecnologias nesta área podem mudar a maneira que os produtos são desenvolvidos, distribuídos, comercializados e consumidos. Hoje um usuário já pode entrar em um website e comprar um produto modelado em um software 3D. A empresa recebe os produtos de designers no mundo todo, oferece os modelos, recebe os pedidos e envia as encomendas. Futuramente, será possível comprar apenas o arquivo do produto, fazer o download e produzi-lo em casa, dispensando a manufatura e distribuição e concentrando os esforços da empresa na criação de novos produtos e no marketing. Assim, a ordem se inverte e, se tudo o que se passava na TV é porque existiu no mundo físico de alguma maneira, hoje se pode ter no mundo real o que se vê na TV/monitor.

Este desenvolvimento das tecnologias e métodos de criação tridimensionais permite que atualmente os designers possam construir as mais variadas formas, desde os mais primitivos sólidos aos mais orgânicos e quase aleatórios objetos. No entanto, a maior parte da documentação relativa à prototipagem rápida a atrela a métodos de



modelagem que reduzem a flexibilidade criativa, devido às suas aplicações originalmente dentro da área específica da manufatura e, apesar da importância para o design de produtos, não se pode reter o design a apenas estas áreas. Uma vez que o processo criativo, permitido das tecnologias atuais e pelas novas metodologias que as acompanham, pode levar o designer à execução de formas mais livres, é de grande importância que a prototipagem rápida também abranja este tipo de modelo.

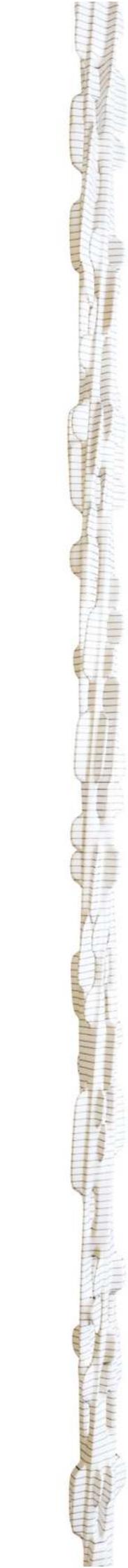
1.1 PROBLEMAS A SEREM INVESTIGADOS

Segundo Lino & Neto (2003), apesar de se poder gerar um modelo tridimensional de uma estrutura orgânica para a prototipagem a partir de uma tomografia axial computadorizada ou de uma ressonância magnética nuclear, não se pode utilizar racionalmente essa tecnologia em qualquer área sem um conhecimento sólido em modelagem tridimensional virtual.

A evolução do cenário da modelagem tridimensional traz a cada ano novos softwares ou versões de outros já existentes com um número de atualizações na casa dos milhares. Estes softwares estão na ponta do desenvolvimento científico na área da computação gráfica. Seus desenvolvedores estão ligados diretamente aos pesquisadores nas universidades e seus resultados absorvem a produção acadêmica em um ou dois anos: eles são verdadeiramente o estado da arte desta área.

Porém, observa-se que os métodos de prototipagem rápida, em sua maioria, ainda se utilizam de programas de CAM¹ concebidos inicialmente para manufatura. Apesar de sua evolução, ainda preveem a manufatura por desbaste de material ou por montagem de peças. Mas o principal problema vem da baixa flexibilidade e liberdade de modelagem para a demanda do processo de design em várias áreas tridimensionais, principalmente aquelas que lidam com formas menos precisas,

¹ Computer Aided Manufacturing – fabricação auxiliada por computador



como o *character* design, a joalheria, o design de produtos médicos, o design de brinquedos, o design de produtos e até mesmo o planejamento de produção. Locais onde a complexidade e organicidade das peças dificulta sua modelagem nestes softwares. Tal fato leva às questões:

- como os métodos de modelagem tridimensional orgânica podem afetar a qualidade e produtividade da prototipagem rápida no âmbito do design desse tipo de produto?
- quais métodos e ferramentas dos softwares de modelagem são mais recomendados e quais devem ser evitados para assegurar uma construção sem falhas?

Esta pesquisa procura levantar dados para a melhor compreensão destas questões em busca de soluções para esses problemas.

1.2 OBJETIVO

Proporcionar o estabelecimento de recomendações de utilização de métodos de modelagem tridimensional virtual orgânica para o desenvolvimento de prototipagem rápida em design de produtos desta natureza.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Oferecer um levantamento e comparação dos resultados da utilização de diferentes métodos de modelagem tridimensional orgânica na produção de produtos por prototipagem rápida.
- Proporcionar o estabelecimento de recomendações de direcionamento aplicativo dos diferentes métodos de modelagem tridimensional virtual orgânica analisados no estudo.
- Contribuir com um mapeamento das principais ferramentas utilizadas na modelagem tridimensional comparando-as em dois dos softwares mais utilizados por designers.

1.3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos deste trabalho, utilizar-se-á uma abordagem exploratória no levantamento das informações iniciais ligadas à prototipagem rápida e aos métodos de modelagem tridimensionais. Buscar-se-á conceituar e contextualizar a prototipagem rápida bem como relacionar as principais tecnologias hoje estabelecidas no mercado e descrever as fases pelas quais os processos passam durante o desenvolvimento de um modelo. No segundo ponto, abordar-se-á a modelagem tridimensional e três dos seus principais métodos.

Após a fase de levantamento de dados, serão realizados estudos de construção e impressão por prototipagem rápida. Para esta fase serão construídos modelos através dos principais métodos de modelagem tridimensional, o *poly modeling*, o *spline modeling* e o *nurbs*. Para a realização dos mesmos e manutenção da capacidade de replicação do processo, os modelos construídos seguirão a metodologia de construção por *poly modeling* descrita por Dimas Rosa (2005) para modelagem da figura feminina. Como esta metodologia aborda apenas um dos métodos necessários a este estudo, este trabalho também buscará adaptar o processo de Dimas aos demais métodos, o *spline modeling* e o *nurbs*, utilizando o modelo gerado pelo processo original como referência para o posicionamento dos vértices e demais formas tridimensionais levantadas pelos demais métodos. Todas as alterações realizadas na metodologia inicial, bem como os testes e execuções das adaptações realizadas serão descritos minuciosamente no capítulo três visando sempre uma possível reprodução dos experimentos.

Os modelos serão produzidos nos softwares 3ds Max e Maya, ambos pertencentes à empresa Autodesk. Desta maneira, é necessária a construção de seis modelos para a comparação: (a) em *poly modeling*, utilizando o 3ds Max; (b) em *spline modeling*, utilizando o 3ds Max, (c) em Nurbs, utilizando o 3ds Max; (d) em *poly modeling*, utilizando o Maya; (e) em *spline modeling*, utilizando o Maya e; (f) em Nurbs, utilizando o Maya.

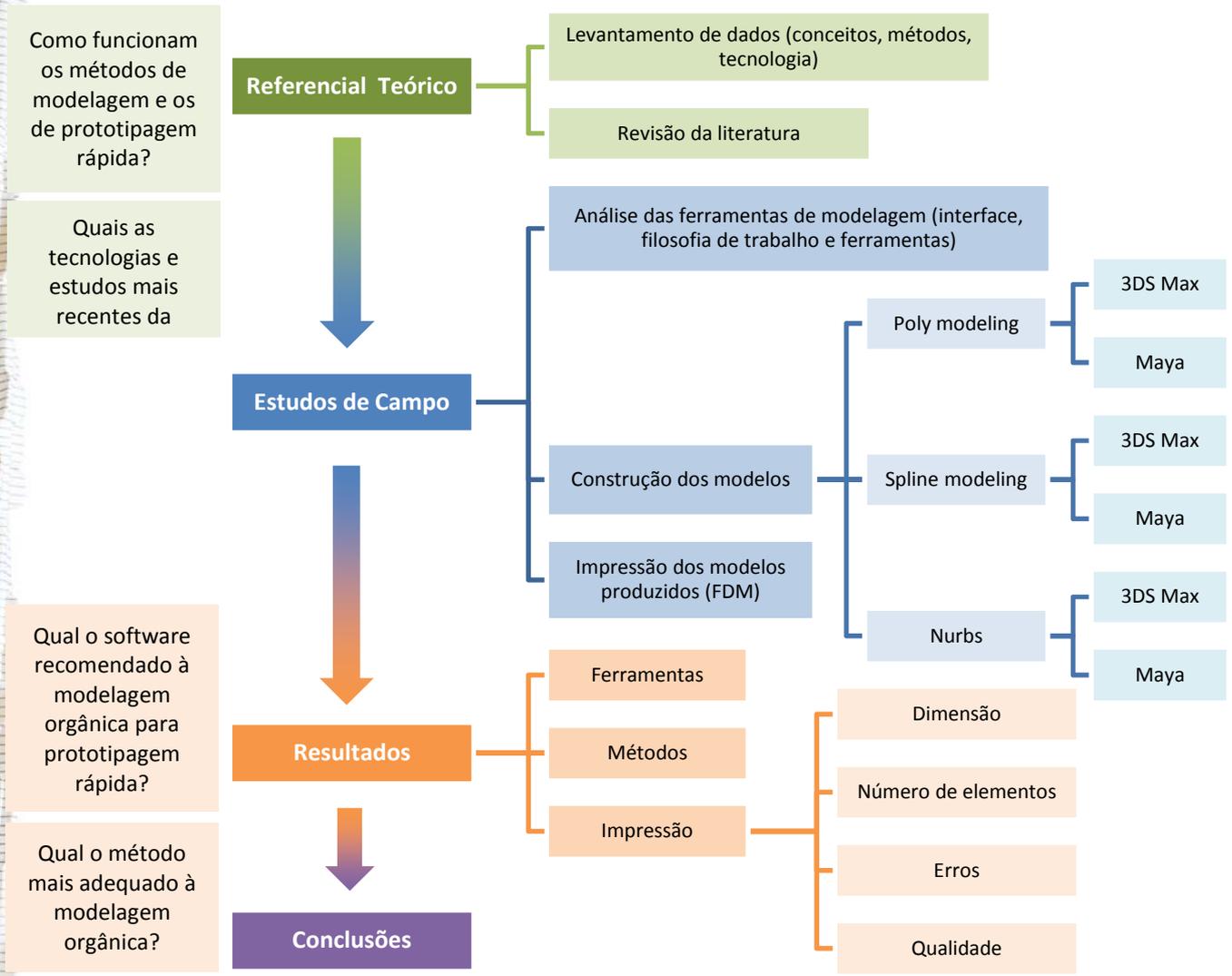


Figura 1:1 Esquema das fases propostas para este estudo.

Então efetuar-se-á uma análise comparativa dividida em duas fases. A primeira relacionará as atuações das ferramentas de construção nos métodos de modelagem tridimensional orgânica. A segunda fase investigará e analisará o desempenho de três métodos de modelagem tridimensional orgânica na prototipagem rápida em termos de eficiência de construção, verossimilhança formal e qualidade da prototipagem obtida pela construção guiada pela metodologia de Rosa (*Op.Cit.*). Para isso, a investigação comparativa crítica se dará com as peças construídas em cada um dos métodos descritos em dois softwares diferentes. Cada modelo gerado por cada programa, em cada um dos métodos serão exportados para o processo de prototipagem e impressos utilizando o processo de prototipagem rápida por Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) e serão realizados no

aparelho pertencente ao Departamento de Design desta Universidade Federal de Pernambuco. Os processos de preparação para exportação e a impressão serão testados e comparados em termos de recursos existentes, tempo de execução e dimensões obtidas.

Ao final serão apresentados os métodos e softwares mais indicados a auxiliar o design de produtos de forma orgânica que visem à prototipagem rápida, primando pela qualidade, pela eficiência e pelo baixo desperdício de tempo e material, bem como suas limitações e restrições. Estas fases podem ser melhor visualizadas através do esquema demonstrado na Figura 1:1

1.4 JUSTIFICATIVA

A Jon Peddie Research (2009), em um estudo divulgado colocou o mercado de modelagem 3D e animação no patamar de faturamento de 237 milhões de dólares em 2008. Afirmaram que haveria uma queda em 2009 devido à crise econômica global, mas que havia a promessa do crescimento retomar em 2011. Tal previsão se pautou no início de uma nova era do 3D na web, na geração de filmes em stereo-3D e o aumento da demanda por este tipo de produto, no crescimento do mercado de jogos, o qual, ainda que incerto pela transição de plataformas, possui uma enorme demanda por 3D, além do surgimento de novas aplicações.

Este estudo cita ainda o uso na TV, na visualização de produtos e na propaganda e nos estudos e aplicações de física. Aborda o crescimento computacional dos dispositivos móveis e o fortalecimento do 3D nos mesmos e ainda cita o crescimento dos métodos de modelagem por escultura.

Ao mesmo tempo, a queda dos custos da prototipagem rápida nos próximos anos ajudará a popularizará esta forma de construção ampliando o volume de aplicações para além da prototipagem. Juntamente com as novas tecnologias e aplicações que estão rapidamente surgindo poderá levar e/ou intensificar a produção em novas áreas, como na construção civil, na indústria cerâmica e na medicina, não só como construção de modelos, mas também como construção do produto em uma linha de produção.



Com as duas áreas avançando tão fortemente por diversos nichos de mercado, o design de produtos de forma geral e o planejamento de produção ganharão mais força e flexibilidade em seus processos.

Bonfim (1995) coloca que “métodos são ferramentas utilizadas no desenvolvimento de um produto e dependem sempre da capacidade técnica e criativa de quem os utiliza”. Tendo isso em mente, aproveitar o conhecimento do designer acerca de um software da área tridimensional (vale salientar a enorme complexidade destas ferramentas, onde em média leva-se seis meses de convívio diário para um especialista em um software se tornar também especialista no outro) do qual ele já disponha e com o qual já trabalhe em seu dia a dia pode manter a eficiência da produção, bem como a qualidade e a precisão dos produtos, sem a necessidade de novos treinamentos ao custo de recursos financeiros e temporais. Como bônus, pode trazer a liberdade para o desenvolvimento de novas possibilidades criativas e/ou o ganho de tempo, principalmente na modelagem de peças mais complexas e orgânicas, as quais encontram uma grande parceria na prototipagem rápida, pelo seu método de construção de modelos.

Além disso, dispondo de diretrizes de utilização das ferramentas e dos métodos de modelagem adicionadas ao conhecimento de suas limitações, o processo de design trará um ganho enorme de tempo e evitará o retrabalho que, neste caso, embarca grande quantidade de horas de trabalho, por vezes de mais de uma pessoa, além da desmotivação e negativa impressão ou do profissional ou da gestão da empresa, uns com os outros e com o cliente.

Permitir que este poderoso recurso possa ser trabalhado por designers livremente na criação de peças orgânicas sem necessidade de retreiná-los em softwares que muitas vezes são limitados neste tipo de modelagem é de um ganho gigantesco para esta atividade. Neste contexto, espera-se que este estudo possa contribuir no que se refere à modelagem orgânica de produtos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção congrega dados importantes a respeito das tecnologias de prototipagem rápida estabelecidas no mercado, como a estereolitografia, a manufatura de objetos em lâminas, a sinterização seletiva a laser, a modelagem por deposição de material fundido, a cura sólida na base, a impressão por jato de tinta, a conformação próxima ao formato final via laser e a impressão tridimensional.

Ainda descreve os métodos de modelagem tridimensional por *poly modeling*, *spline modeling* e Nurbs e apresenta estudos recentes na área da modelagem 3D.

2.1 CONCEITOS E PROCESSOS UTILIZADOS NA PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Sua origem vem da evolução de outras tecnologias de adição de materiais em camadas, desde a criação do processo de construção de modelos topográficos em camadas proposta por Blather em 1890. Na década de 1950, Munz criou um sistema onde uma emulsão recebia radiação em áreas filtradas por máscaras nas formas de seções transversais do objeto. Depois, um pistão abaixava o conjunto para que uma nova camada fosse criada com o auxílio de uma nova máscara.

Na década de 1970, começaram a aparecer os primeiros processos mais próximos dos atuais, utilizando feixes de luz em resinas líquidas fotossensíveis as quais recebiam camadas de material reflexivo nas áreas sem interesse para a peça. Desta forma, apenas a parte protegida pelo material refletor não enrijecia. Posteriormente este processo foi reproduzido com outros materiais e pequenas variações nos procedimentos até que surgiu uma tecnologia onde se utilizava a fundição de pó de metais ou de polímeros como outro meio para construir o modelo (Volpato, 2007). No início da década de 1980, o computador entrou em cena para orientar de forma automatizada os feixes laser que sensibilizariam a resina e, em 1987, a 3D Systems lançou o StereoLithography Apparatus, o primeiro equipamento comercial de prototipagem rápida.

Se no início a prototipagem rápida era aplicada principalmente na produção de modelos para visualização, a evolução das tecnologias e a necessidade de testar funcionalmente esses modelos levaram às melhorias de qualidade e precisão. Atualmente, o processo se encontra bastante difundido na indústria aeroespacial, na automobilística, na bioengenharia, na de produtos elétricos domésticos, na de produtos eletrônicos, na joalheria, nas artes e na arquitetura. As aplicações aparentam estar se estendendo à medida do barateamento e difusão do conhecimento das tecnologias.

Para se obter um produto, pode ser aplicado um ou mais processos de fabricação (PF). Volpato (*op.cit.*) classificou estes processos segundo o tratamento mecânico aplicado à matéria-prima para a obtenção dessa peça/produto. Dessa maneira, foram separados em: (a) processos de fabricação por fusão e moldagem, como a fundição e a injeção de polímeros; (b) processos de fabricação por remoção de material, como o torneamento, o fresamento, e a furação; (c) processos de fabricação por conformação, como a estampagem e a extrusão e; (d) processos de fabricação por adição de material, como a soldagem, a colagem e a fabricação de peças em fibra de vidro. É neste último grupo que está inserida a prototipagem rápida.

Mesmo com toda a evolução tecnológica, os processos de prototipagem rápida continuam se apoiando em três etapas básicas, representadas na Figura 2:1:

- 1) o projetista modela a peça (Figura 2:1 a) em um software tridimensional e a exporta em um formato de arquivo digital específico (hoje o principal é o STL, mas há outros formatos mais atuais se difundindo, como o PLY);
- 2) o software embarcado no equipamento responsável pela prototipagem recebe o arquivo e fatia o modelo em seções transversais (Figura 2:1 b) intercaladas pela distância equivalente à precisão da máquina e;
- 3) o equipamento constrói o protótipo adicionando o material camada por camada (Figura 2:1 c). É importante perceber que a peça não é o único componente impresso. Se a forma do objeto possui partes suspensas ou ocas, outro material é adicionado, funcionando como suporte para que o material principal tenha onde ser depositado até que a peça esteja completa e

curada (Figura 2:1 c1), quando então o material-suporte é retirado, normalmente por algum processo químico ou mecânico, deixando a peça final pronta (Figura 2:1 c2).

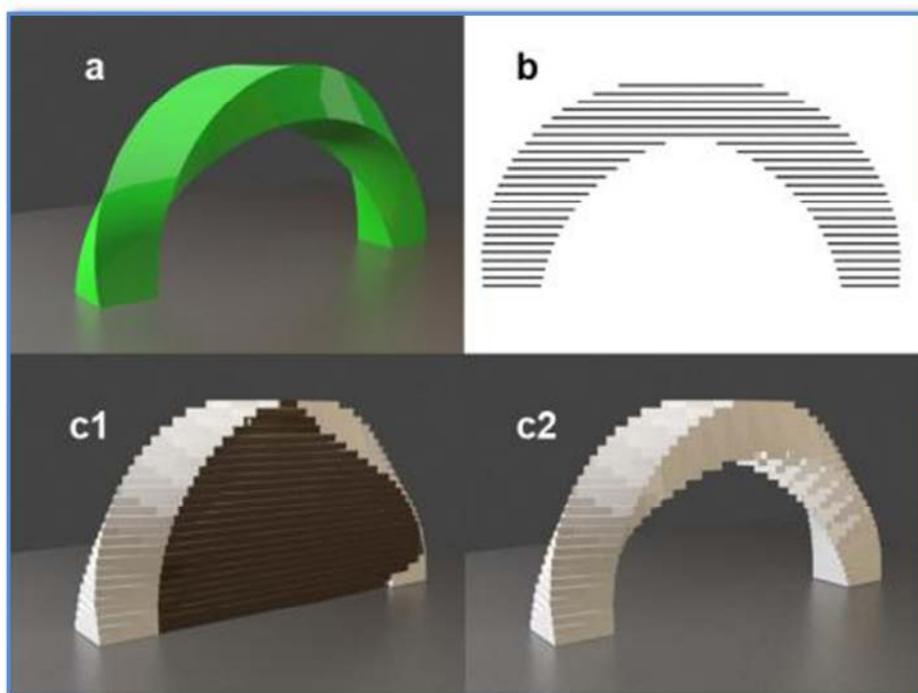
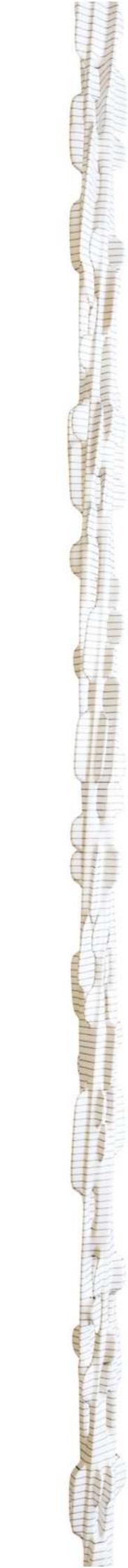


Figura 2:1 Etapas básicas da prototipagem rápida: a) objeto modelado em um software tridimensional; b) objeto fatiado 'pelo software da máquina de prototipagem; c1) objeto prototipado ainda com o suporte e; c2) objeto prototipado no estágio final. Fonte: o autor, 2010

Gorni (2003) coloca a exportação do arquivo como uma fase independente, assim como a retirada do material de suporte. Volpato (*op.cit.*) apresenta a mesma classificação de Gorni, mas acrescenta uma fase de verificação do arquivo de dados entre a conversão do formato do arquivo e o fatiamento das camadas.

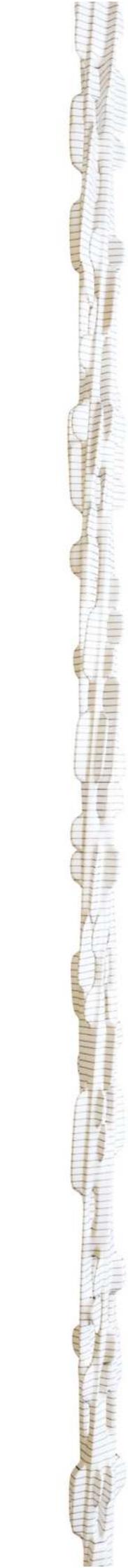
Segundo Gorni (*op.cit.*), os processos de prototipagem rápida apresentam diversos ganhos em relação aos processos tradicionais de retirada de material, como o fresamento ou o torneamento. A natureza aditiva do processo admite a confecção de peças com grande complexidade interna e/ou de componentes separados. Além disso, permitem a criação rápida (de 1 a 72 horas) de um modelo real aceitando assim diversos testes preliminares como algumas análises de uso, testes em túneis de vento e análises de pontos de tensão.



Baxter (1998) alerta para os custos financeiros e de tempo nos processos de prototipagem. No entanto, Volpato (2007) coloca como vantagens, a melhoria na comunicação entre os envolvidos no processo de produção do produto e redução na possibilidade de falhas, graças à análise da forma e da funcionalidade antes do produto final ser produzido. Com o advento da manufatura automatizada por prototipagem rápida, a ótica baxteriana sobre os protótipos começa a mudar. Com esta tecnologia, obtém-se a grande vantagem de reduzir o tempo no processo de modelagem e prototipagem em relação aos processos tradicionais. Gorni (*op.cit.*) apresenta este ganho na ordem de 70 a 90%, taxa alcançada no uso dessa tecnologia na ferramentaria. Além disso, o ganho na precisão dos modelos, chegando a centésimos de milímetro, independentemente da complexidade da peça, tem um efeito redutor do custo final de produção por diminuir a possibilidade de erros e falhas na produção. Assim, pela qualidade e precisão das peças produzidas, a prototipagem rápida se torna um dos melhores meios de se gerar pequenos lotes de peças ou peças de alta complexidade.

Além disso, Modeen (*apud* Mello *et. al.*, 2006) ressalta a possibilidade de instalação em ambientes não industriais, devido ao baixo ruído e desperdício; Lino & Neto (2000) frisam a dispensa na utilização de funcionários especializados; Sass & Oxman (2006) acrescentam que para os conjuntos de peças a precisão da fabricação digital permite a construção de conexões com menos atrito e; Volpato (*op.cit.*) adiciona a estas vantagens a redução dos custos de produção pela dispensa de dispositivos ou ferramentas para fixação das peças, pela ausência de troca entre as ferramentas de trabalho, pelo fato da peça poder ser fisicamente construída em uma única etapa e pela simplificação do planejamento da produção.

Da mesma maneira, este último autor citado coloca restrições e desvantagens no processo: as características dos materiais utilizados não são necessariamente as mesmas dos utilizados na produção final; o acabamento das peças tem qualidade inferior ao das produzidas por usinagem por conta do “efeito escada” criado pela adição dos materiais em camadas necessitando de acabamento secundário; o custo envolvido ainda limita a quantidade de peças produzidas e; em virtude do calor envolvido no processo, alguns processos de prototipagem rápida podem produzir peças com distorções, apesar desse fato estar sendo diminuído com o



desenvolvimento das tecnologias. Gorni (2003) ainda cita que o volume do protótipo é um dos maiores limitadores deste processo. Geralmente, não pode ser maior que $0,125\text{m}^3$, ou seja, deve caber em um cubo de 50 centímetros de lado, embora já haja processos capazes de produzir peças de até 1 m (Volpato, 2007) e estudos para o desenvolvimento de uma tecnologia que permitiria a construção de objetos fora de uma máquina de prototipagem rápida. Estes processos permitiriam a construção de uma casa, por exemplo. Além disso, o processo de produção de modelos de metal ainda não está plenamente desenvolvido e tem custo mais alto que os processos convencionais. Modeen (*op.cit.*) destaca ainda o limitado número de materiais disponíveis para a fabricação, mas o próprio autor salienta que este número vem aumentando gradativamente. Ainda, as pesquisas de Florio *et.al.*(2008) mostram que objetos fabricados por alguns processos com espessura menor que um milímetro, particularmente quando são construídos apoiados apenas pelo material de suporte, rompem com facilidade.

Os processos de prototipagem podem ser classificados de acordo com a forma do material utilizado, segundo Volpato (*op.cit.*), em três grupos: (a) os processos baseados em líquidos, (b) aqueles baseados em sólidos e (c) os que se baseiam nos materiais em forma de pó. Desta maneira, considerando os processos mais utilizados no mercado atualmente, estão no primeiro grupo a Estereolitografia e a Impressão a Jato de Tinta (Polyjet e InVision); no segundo grupo se posicionam a Modelagem Por Fusão e Deposição, a Manufatura Laminar de Objetos e a Impressão a Jato de Tinta (Thermojet e Benchtop); no grupo que utiliza o material na forma de pó se reúnem a Sinterização Seletiva a Laser, a Impressão Tridimensional e a Fabricação da Forma Final a Laser. A Figura 2:2 apresenta uma ilustração que resume essa classificação.

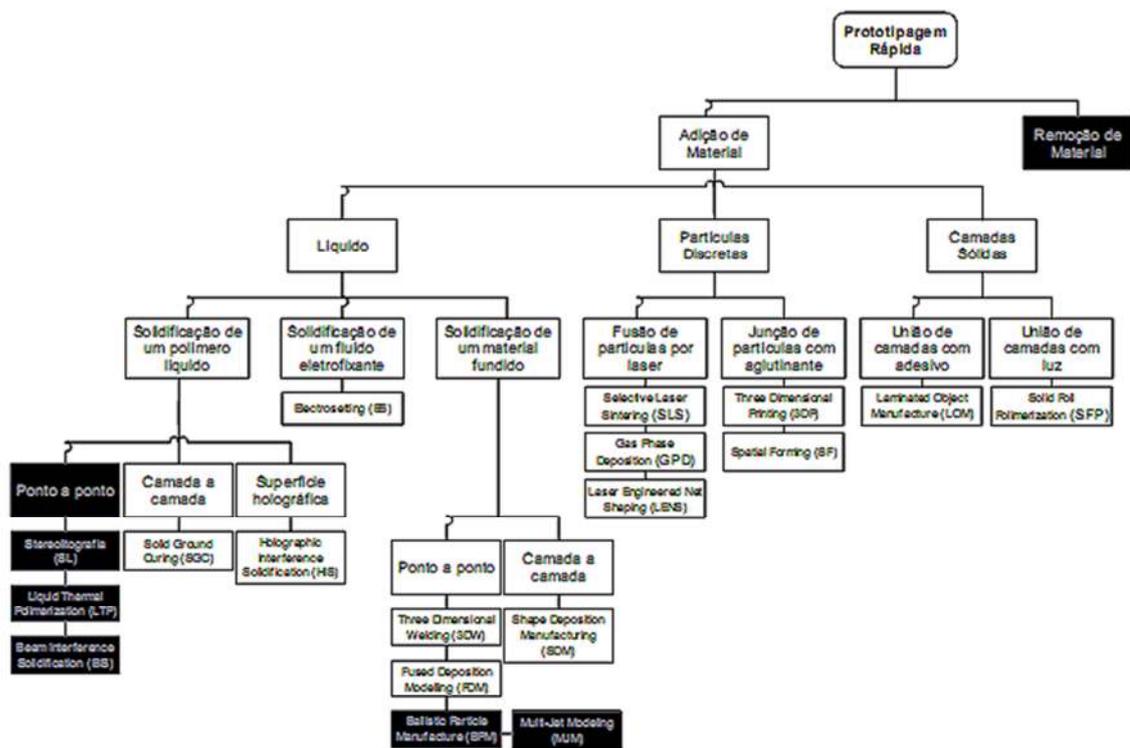


Figura 2:2 Classificação dos processos de prototipagem rápida. Fonte: Mello et. al.(2006)

Os próximos tópicos abordarão características dos processos com maior representação no mercado, segundo Volpato (2007).

2.1.1 ESTEREOLITOGRAFIA (SLA)

Foi o primeiro processo a ser lançado no mercado, em 1988. Nesse sistema, um conjunto de espelhos e lentes direciona um feixe de laser para que seja aplicado com precisão (que pode chegar a 0,075mm) e abertura variável sobre uma resina fotocurável a base de acrilatos ou epóxi contida em um recipiente. O laser realiza a cura desta resina preenchendo os espaços indicados pelo desenho da seção da peça. As seções trabalhadas se apoiam em uma plataforma mergulhada no recipiente, a qual, após o término de cada seção, se move para baixo, imergindo a camada recém finalizada e deixando espaço para que o laser cure a próxima seção. Cada uma destas faixas pode variar entre 0,5mm e 0,025mm de espessura (Volpato, 2007).

Ao final da construção, a peça passa por uma limpeza com solventes para a retirada da resina não curada. Então as estruturas de suporte são retiradas e então ela segue para um forno para completar o processo de cura. Só então é realizado, manualmente, o acabamento superficial.

Pesquisas estudam a possibilidade de utilização de outros materiais, como a mistura com materiais cerâmicos e o reforço com fibra de carbono. Também testam diferentes estratégias de varredura do laser para compensar seu pequeno diâmetro garantindo uma maior velocidade à construção e evitar distorções.

Vantagens: é um dos processos mais difundidos; possui boa precisão e qualidade superficial.

Desvantagens: necessita de estruturas de suporte em regiões não conectadas da peça e de pós-processamento para a retirada destas; requer pós-cura para completar a polimerização da resina; não aceita muitos tipos de materiais; a resina utilizada é tóxica (Volpato, 2007).

2.1.2 MANUFATURA DE OBJETOS EM LÂMINAS (LOM)

Este sistema difere dos demais por não depositar o material através injetores, mas sim por deposição do material em lâminas alimentadas por bobinas. Este material possui um adesivo em uma das faces, o qual é acionado através de um rolo aquecido que percorre a lâmina após a mesma ser aplicada sobre a camada anterior. Então um laser recorta a seção transversal desejada e picota toda a área restante. Desta maneira, o próprio material utilizado atua também como estrutura de suporte para a próxima camada, podendo ser retirado manualmente depois.

Este processo aceita diversos tipos de materiais, como metais, tecidos, cerâmicas, plásticos e papéis, e é com este último que é mais utilizado, embora necessite a aplicação de substância seladora ao final de todas as etapas. Processos de acabamento, como lixamento, polimento e pintura também podem ser aplicados às peças construídas.

Existe um sistema de checagem da altura das camadas, no momento da sua adição. Outra grande vantagem é que o processo pode ser pausado em qualquer momento da construção da peça.

Volpato (*op.cit.*) inclui uma variação deste sistema, criada pela empresa Kira Corporation, a qual atribuiu o nome de *Paper Lamination Technology* (PLT). Nesta variação há três principais diferenciais: (1) existe a opção das folhas poderem vir soltas ou em rolo; (2) é aplicada uma resina termoativada sobre a folha, cobrindo apenas a área relativa à seção transversal desejada, a qual, mediante o contato com uma chapa aquecida fixa a folha de papel às demais e; (3) o corte das peças é realizado por uma faca e não por um laser.

Vantagens: LOM: não requer pós-cura nem estruturas de suporte; a velocidade do processo de construção é alta. PLT: As mesmas do LOM acrescido o fato de não utilizar laser e de que a prensagem contra a placa aquecida garante que não haja distorções na peça.

Desvantagens: LOM: os materiais não são flexíveis, dificultando testes de encaixe; a remoção do suporte é trabalhosa e lenta e; não é indicado para estruturas com pequenos detalhes e paredes finas. PLT: as mesmas do LOM, embora a remoção do suporte seja um pouco menos trabalhosa, mas não é possível fabricar peças com vazios internos.

2.1.3 SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (SLS)

Aqui, a câmara de construção recebe o material de construção (espalhado por um rolo ou aplicado por um sistema de deposição, dependendo do fabricante), em forma de pó e então é aquecida até um ponto próximo ao de fusão do material. Um laser é aplicado sobre o material, varrendo, através de um conjunto de espelhos, a forma da seção transversal desejada, de modo a aquecer o material até que apenas os pontos de contato das partículas se fundam – sinterização (não há fusão completa, ou seja, o material não se liquefaz), e se unam criando uma estrutura sólida, a qual representa a nova camada transversal (Figura 2:3). O excesso do material é retirado por aspiração, liberação de ar comprimido ou por escovação e a plataforma de apoio é rebaixada para a criação da nova camada.

Como o próprio material funciona como material de apoio, a energia dispersada pelo laser afeta o pó imediatamente abaixo de uma região sem camada anterior e gera um acréscimo na dimensão Z daquele local. Para compensar este efeito, as regiões nesta situação sofrem, ainda em seu modelo virtual, um acréscimo na dimensão Z.

Uma das grandes vantagens deste sistema é a enorme variedade de materiais, abrangendo praticamente qualquer material que possa se apresentar em forma de pó, de areia a metal, passando pelos polímeros, cerâmica e outros. Ainda importante é o fato de se poder empilhar várias peças para serem construídas em uma única seção.

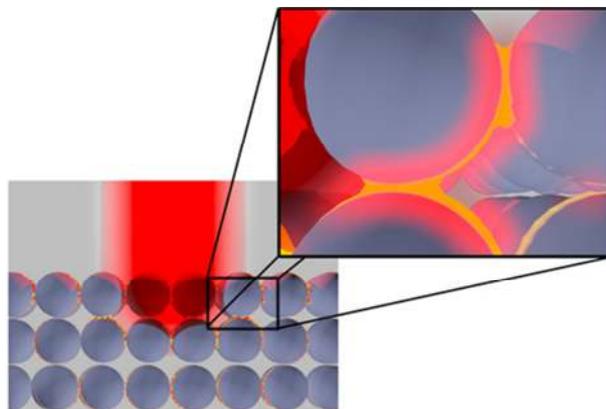


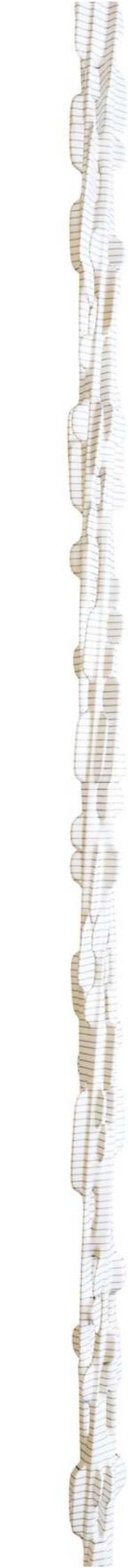
Figura 2:3 Sinterização de partículas. Fonte: o autor, 2011

Vantagens: podem ser utilizados vários tipos de materiais no mesmo aparelho; pode-se fabricar tanto peças para visualização quanto peças funcionais; a retirada do material de suporte é rápida e fácil; pode-se empilhar mais de uma peça para fabricação; não necessita de pós-cura (exceto no caso dos metais, que requerem um forno de alta temperatura para finalização da sinterização).

Desvantagens: o acabamento superficial não é muito bom e; o custo do equipamento e o consumo de energia são elevados.

2.1.4 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO (FDM)

Neste processo, a cabeça de impressão recebe o material, a ser utilizado na construção da peça, em forma de filamento e o aquece até que se torna pastoso. Então a cabeça se desloca para aplicar o material nos pontos desejados de modo a preencher a seção transversal desejada. Ao chegar ao seu local de depósito, o material, em contato com o ar e com a outra camada depositada anteriormente, se



resfria e volta a se solidificar aderindo à camada abaixo. Ao finalizar a camada, a plataforma é baixada e se inicia uma nova camada.

Para apoiar as estruturas suspensas e/ou desconectadas da estrutura principal, existe um outro bico injetor que, pelo mesmo processo, insere o material de suporte, o qual será retirado posteriormente por imersão em uma solução aquecida.

Segundo Volpato (*op.cit.*), neste processo podem ser utilizados vários materiais como a cera, o poliéster, a acrilonitrila butadieno estireno (ABS), o ABSi, o policarbonato (PC) e a polifenilsulfona (PPSF). Eles podem ser adicionados através de diferentes esquemas de preenchimento, como o *contour* (preenchimento radial) e o *raster* (preenchimento em linhas paralelas, invertidas em 90° a cada camada), visando o ganho em velocidade de construção e na resistência estrutural da peça.

Através da substituição manual dos bicos injetores é possível alterar a espessura dos filamentos entre 0,254 mm e 0,406 mm. Neste sistema também é possível controlar a distância entre os filamentos.

Florio *et. al.* (2008) alertam que este processo requer cuidados para evitar fragilidade das peças, distorção das dimensões e encolhimento do material de construção. Recomendam que elementos delgados sejam produzidos em partes para melhorar a precisão, o acabamento e diminuir o tempo de fabricação e o consumo de material.

Também salientam que, em relação ao método de Impressão Tridimensional, a FDM é mais precisa, apresenta melhor acabamento e permite a fabricação de peças mais finas, em até 1 mm de espessura. Em contraposição, alertam para o consumo maior de material, e a deposição em excesso de material de suporte em áreas de menor distância entre os elementos.

Em seus estudos comparativos entre a Modelagem por Deposição de Material Fundido, a Estereolitografia e a Impressão por Jato de Tinta, Mello *et. al.* (2006) concluíram ser a FDM a mais vantajosa em termos de custos de implementação e manutenção e conseqüentemente, o custo por protótipo. O processo é desvantajoso em relação aos outros dois apenas no tempo médio de construção de um protótipo e

no tempo médio total de processamento. E, pelo fato de operar com baixo ruído, ter pouco desperdício de material e não aceitar peças grandes, indicam seu uso em ambientes não-industriais.

Vantagens: as peças construídas possuem até 85% da resistência das peças produzidas por injeção como mesmo material. Assim, podem ser utilizadas para testes funcionais. Este processo também não requer pós-cura dos materiais e tem um boa relação custo-benefício na produção das peças.

Desvantagens: relativa baixa precisão; o processo requer pós-processamento para retirada dos suportes e; a velocidade de construção é lenta e limitada ao fluxo do material por um único bico injetor.

2.1.5 CURA SÓLIDA NA BASE (SGC)

Este processo utiliza a luz ultravioleta para curar uma resina fotossensível borrifada sobre a plataforma de construção. No entanto, diferentemente de outros processos, aqui há a possibilidade de cura de toda a camada de uma só vez através da criação de uma máscara (em um processo semelhante ao das fotocopiadoras), contendo a seção transversal desejada da peça, em uma placa de vidro entre a lâmpada ultravioleta e a plataforma de construção. Desta forma, a luz atinge a camada apenas nos pontos onde se deseja a cura da resina. O excesso do material é aspirado e no seu lugar é aplicada cera, que servirá como material de suporte. A superfície superior é então fresada e a plataforma desce dando lugar à próxima camada. Ao ser finalizada, a peça requer um banho em solvente para a remoção da cera. As principais vantagens são a construção rápida e o fato de permitir protótipos de grande porte.

2.1.6 IMPRESSÃO POR JATO DE TINTA (IJT, MJM)

A Impressão por Jato de Tinta é produzida por diferentes fabricantes com tecnologias análogas, como a PolyJet, da Objet, a InVision e a ThermoJet, da 3D Systems, a mesma criadora da estereolitografia, e a Benchtop, da Solidscape. O preceito básico está em um sistema semelhante ao de uma impressora caseira a jato de tinta (daí seu nome). Nele, o material é aplicado sobre a superfície na área

da seção desejada e então, é curado por uma luz ultravioleta ou pelo resfriamento natural do material. A resolução pode chegar a 600 pontos por polegada (dpi) e espessura de até 0,013mm. Ao final da construção da peça, o material de suporte é removido por um jato de uma solução à base d'água, por um banho em óleo mineral aquecido ou até mesmo pela retirada mecânica manual, dependendo da tecnologia.

As diferenças no processo entre diferentes fabricantes compreendem desde o material utilizado na construção do protótipo à forma como o material de suporte é retirado da peça, passando por diversas outras características, o que leva alguns autores a classificá-los como processos diferentes. A Tabela 2:1 compara os métodos de seis fabricantes sob algumas destas características.

Nome	Polyjet	InVision	ThermoJet	Benchtop
Fabricante	Objet	3D Systems	3D Systems	Solidscape
Material utilizado	Resina líquida polimérica fotossensível	Resina epóxi líquida fotossensível com 30% de cera	Termopolímero	material termoplástico
Material de suporte	Gel fotocurável	Material com propriedades semelhantes as da cera.	Termopolímero (o mesmo do utilizado na peça)	cera
Nº de cabeças de impressão	8	Até 352	Até 352	2, uma para cada material.
Sistema de cura	Luz ultravioleta	Luz ultravioleta	Resfriamento natural do material depositado	Resfriamento natural do material depositado
Retirada do suporte	Por solução química aquosa / meios mecânicos manuais	Por aquecimento em forno	meios mecânicos manuais (facilitada por refrigeração da peça)	Banho em óleo mineral aquecido
Pós-processamento	Não	Aquecimento para retirada do material de suporte	Não	Pouco
Vantagens	Boa precisão / muito boa qualidade superficial / não requer pós-cura	Boa precisão e qualidade superficial / não requer pós-cura	Rapidez na construção / não requer pós-cura	Alta precisão / cabeçotes diferentes para o material utilizado e para o material de suporte / não requer pós-cura

Nome	Polyjet	InVision	ThermoJet	Benchtop
Desvantagens	Poucos materiais disponíveis	Poucos materiais disponíveis	Protótipos frágeis / poucos materiais disponíveis	Lentidão na construção / poucos materiais disponíveis

Tabela 2:1 Comparação entre os diferentes sistemas de Impressão a Jato de Tinta

2.1.7 CONFORMAÇÃO PRÓXIMA AO FORMATO FINAL VIA LASER (LENS)

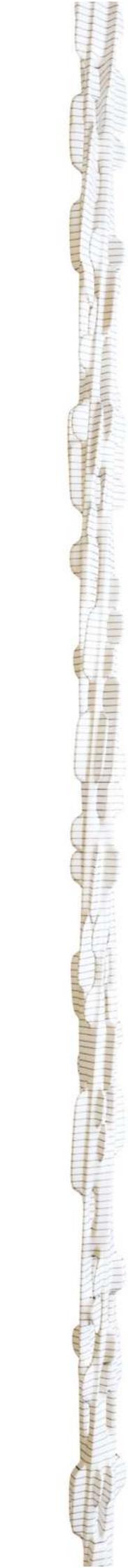
Neste sistema, um laser de alta potência é focado por lentes contra a superfície que está sendo fabricada para fundir o elemento. Neste instante, bicos direcionadores injetam o pó do material que se deposita na superfície ampliando seu volume. Este bico de deposição possui movimentação nos três eixos dimensionais, além de rotação de 180° e inclinação de 90°. Tal característica, aliada ao fato de que a mesa de suporte também possui rotação e inclinação permite a construção das peças sem a necessidade de material de suporte. No entanto, são necessárias operações posteriores de acabamento, visto que a resolução da máquina é baixa: 0,5 mm no eixo horizontal e 5 mm no eixo Z.

Vantagens: possibilidade de construção de peças metálicas de alta qualidade mecânica e portanto pode ser utilizado para reparar peças danificadas.

Desvantagens: pouca presença no mercado (Volpato, 2007); alto consumo de energia; trabalha apenas com metais; acabamento superficial ruim e; dificuldade de fabricação de peças desconectadas do corpo principal.

2.1.8 IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL (3D PRINT, 3DP)

Pode-se dizer que a Impressão Tridimensional é uma variação da impressão por Jato de Tinta já que uma cabeça de impressão deposita material sobre a área da seção transversal desejada. No entanto, ao contrário da Jato de Tinta, este material não é o de construção da peça, mas um aglutinante que recai sobre o material de construção, que se encontra em forma de pó, logo após ele ser nivelado por um rolo.



Assim como na Conformação Próxima Ao Formato Final Via Laser, este processo não requer material de suporte, visto que o próprio pó não aglutinado funciona como suporte para as áreas suspensas ou desconectadas do corpo principal da peça. Outra vantagem é que teoricamente não há limitação de material, podendo ser utilizado cerâmica, metal, polímero, gesso e um material a base de amido. O aglutinante pode ser um ativador de amido à base d'água, no entanto, como a peça gerada é extremamente frágil, normalmente ocorre um pós-processamento no qual infiltra-se na peça outros materiais, como resinas epóxi para aumentar sua resistência ou material a base de uretano, para deixá-la mais flexível.

O aglutinante também pode ser fotopolimérico ativado por luz ultravioleta, em uma outra variação do processo, a qual trabalha especificamente com metais. Mas também nesta variação, a aglutinação não é suficiente para as aplicações finais, o que leva às fases de pós-processamento. Na primeira delas, a peça é aquecida provocando a sinterização do metal. Em uma segunda etapa, a temperatura é aumentada e infiltra-se bronze líquido entre as partículas. Após o resfriamento, normalmente são aplicadas operações de acabamento superficial.

Independentemente da variação, Florio *et. al.* (2008) recomendam aumentar a diferença entre as peças macho e fêmea de encaixes, por conta do excesso de deposição, que, em seus experimentos geraram diferenças de até 1 mm. O autor também salienta a economia de material, se compararmos à Modelagem por Deposição de Material Fundido, embora apresente menor precisão e acabamento menos satisfatório. Em seus experimentos, eles perceberam ainda que a contração da resina pode curvar peças longas e finas.

Vantagens: alta velocidade de produção; não necessita suporte; não há desperdício de material; há possibilidade de gerar peças coloridas e; permite grandes dimensões.

Desvantagens: funcionalidade das peças é limitada; requer pós-processamento para limpeza e resistência.

2.1.9 NOVAS TECNOLOGIAS E USOS

A tecnologia da prototipagem rápida avança rapidamente com a entrada de novas empresas na área e o barateamento dos equipamentos, especialmente fora do país. Também existe uma expansão em métodos, tecnologias, materiais e aplicações.

Há técnicas menos conhecidas, como a Robocasting, onde um robô deposita uma mistura de material cerâmico em pó com água, através de uma seringa, em uma plataforma aquecida (Burroughs, 1999). Outras buscam espaço, como a Sinterização por Inibição Seletiva (SIS), a qual é semelhante à SLS, mas com a substituição do laser por equipamentos menos sensíveis e mais baratos como resistências e maçaricos. Desta maneira, tanto pode permitir que uma peça de alguns centímetros seja construída em 15 s, como permitir a construção de uma casa utilizando prototipagem rápida, o que quebra a limitação volumétrica da maioria dos métodos (Inovação Tecnológica, 2003).

Hoje já é possível confeccionar um objeto com até quatorze materiais diferentes com diferentes graus de flexibilidade, transparência e tonalidade de cor, em uma única impressão cujas camadas podem chegar a 16 μm (0,016 mm) (Objet, 2009 e 2011).

Segundo o TED (2011), a prototipagem rápida está sendo testada também como uma maneira de criar órgãos funcionais artificiais através da construção de estruturas utilizando células vivas, como as que foram utilizadas para criar uma bexiga e um rim, ou com materiais mais tradicionais, como no caso de um implante craniano (Smock, 2011).

2.2 CONCEITOS E MÉTODOS UTILIZADOS NA MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

Baseando-se no desenvolvimento da matemática na área tridimensional, assistimos à evolução da computação gráfica a partir dos primeiros sólidos regulares primitivos, como cubos, esferas, cones e cilindros. Através de vértices localizados em um espaço tridimensional e ligados por arestas, demonstrados ainda em monitores de

fósforo verde, os pesquisadores se valiam de vários cálculos trigonométricos para transformar o sólido tridimensional em uma imagem bidimensional.

Em 1975 Martin Newell deu um novo salto calculando as curvas bézier² necessárias para a construção do modelo virtual tridimensional de uma chaleira que ele possuía em sua mesa. A partir daí, a complexidade, as curvaturas e as superfícies interseccionantes desta chaleira permitiram diversos experimentos e testes de iluminação, de materiais e de finalização da imagem feitos por vários pesquisadores, cujos resultados seriam muito difíceis ou impossíveis em sólidos primitivos (Autodesk, 2010).

McDermott (2009) afirma que o aumento do poder de cálculo dos computadores pessoais aliado à acessibilidade a placas de processamento tridimensional de desenvolvimento tecnológico rampante permitiu que mais pessoas e empresas ingressassem na área aumentando também suas contribuições criativas. Como consequência, atualmente há produção de visualização e animação tridimensional de qualidade pelos cinco continentes massivamente habitados do planeta. Nesta frase, entenda-se por qualidade o fato de que apenas olhos treinados são capazes de distinguir uma imagem virtual produzida com estes recursos de uma fotografia.

Como já citado, é uma área em constantes e rápidas mudanças. A rápida evolução do hardware permite que novas ferramentas e métodos surjam todos os anos baseados nos estudos acadêmicos de várias áreas. Softwares antigos no mercado correm para abarcar essas novas tecnologias enquanto novos softwares buscam seu lugar ao sol, oferecendo leveza e versatilidade através de novos paradigmas de criação tridimensional virtual.

Só para dar uma ideia desta evolução, há cerca de 16 anos, finalizar (*rendering*) a imagem de uma representação virtual de um produto relativamente simples em apenas 640 por 480 píxeis (o que permite uma impressão de boa qualidade, em 300

² Método de desenho criado por Pierre Bézier. Segundo RUSSO (2005), são curvas definidas por quatro pontos (posição inicial e final, e pontos intermediários), cuja manipulação altera a forma da curva.

dpi, com aproximadamente 2,1 cm x 1,6 cm) sem qualquer recurso consumidor extremo de processamento, como reflexões e refrações, em um típico microcomputador doméstico da época (processador Intel 486, rodando a 66 MHz, com 8 MB de RAM), necessitava de trinta minutos para ser completada. Hoje, contabilizar o tempo necessário para a realização dessa tarefa é um pouco difícil pois a imagem pode ser gerada em menos de um segundo em um microcomputador com dois processadores de 2,4 GHz e 4 GB de RAM.

Qualquer que seja o método de produção, há sempre cinco fases constantes no processo de design para o desenvolvimento de uma cena virtual tridimensional (Autodesk, 2011): a) modelagem, b) animação, c) iluminação, d) material e, e) finalização. A ordem destas fases e a distribuição pelos operadores variam muito e seguem de acordo com o modelo produtivo de cada empresa, pela experiência do designer ou pelos requerimentos do projeto. Dependendo da utilização, algumas destas fases podem ser eliminadas ou passadas para outro processo, como acontece com visual tridimensional de um jogo, no qual a finalização da imagem não é feita no software tridimensional que gerou os modelos, mas no motor processador do jogo (*engine*), pois a imagem a ser processada dependerá das escolhas feitas pelo jogador.

A primeira fase, a modelagem, trabalha sobre a topologia de uma malha tridimensional. Esta superfície é um conjunto de vértices ligados por arestas, cujo preenchimento das lacunas intermediárias de um grupo conectado forma faces que, por sua vez, estão interligadas compondo a malha tridimensional da forma desejada, conforme mostrado na Figura 2:4.

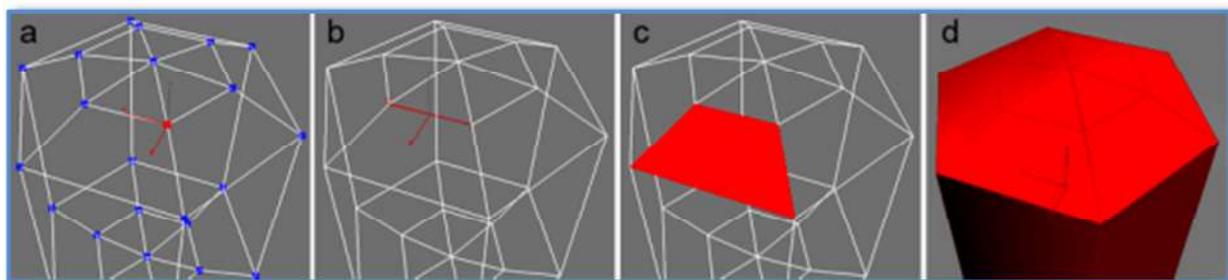


Figura 2:4 Componentes de uma malha tridimensional. a) vértice, b) aresta, c) face poligonal e, d) malha (elemento). Fonte: o autor, 2010.

Tecnicamente, todas as faces são sempre triangulares, mas podem ser manipuladas como polígonos com maior número de lados³. Na Figura 2:5 pode-se comparar os dois modos. No sólido da esquerda (a), as faces laterais são polígonos quadriláteros e as faces do topo e da base são decágonos. Já na imagem da direita (b) temos um sólido totalmente composto por triângulos. Percebe-se que a visualização como polígono deixa a área de trabalho muito menos poluída. As operações de manipulação também ganham uma maior agilidade pois requerem um menor número de ações para selecionar as faces ou arestas a serem trabalhadas. Além disso, os softwares de modelagem possuem ferramentas mais sofisticadas e intuitivas para trabalhar com polígonos que para o trabalho com triângulos. Em parte isso acontece pelo fato de que, mesmo trabalhando com polígonos, o software sempre os quebra e realiza os cálculos com triângulos. Assim, cada decágono da figura é tratado na verdade como oito triângulos coplanares. Um corte efetuado de um lado a outro deste decágono obriga o software a retriangular esta face. A mesma operação efetuada em um sólido de faces triangulares obriga o modelador a selecionar cada uma das arestas intermediárias e, se a operação seguinte necessitar de outro arranjo de triângulos, tal ajuste deverá ser realizado manualmente.

O formato PLY, criado como uma evolução do STL no que diz respeito ao transporte de dados entre o software de modelagem e o equipamento para prototipagem rápida, tem como uma das melhorias a possibilidade de trabalhar com polígonos, aliás seu próprio nome vem dessa opção: Polygon File Format. Há

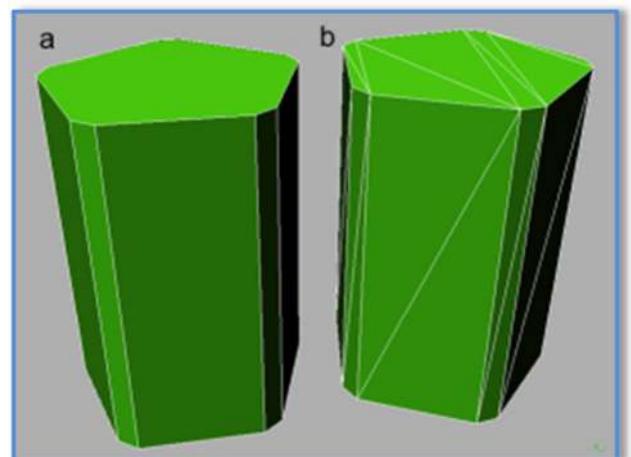


Figura 2:5 Comparação entre um sólido composto por polígonos e um sólido composto por triângulos. a) objeto com faces poligonais; b) objeto com faces triangulares. Fonte: o autor, 2010.

³ Apesar de todo triângulo ser um polígono, em modelagem tridimensional este nome está mais associado a faces com mais de 3 lados.

outras implicações matemáticas na conversão de polígonos para triângulos, tanto na finalização da imagem quanto na geração da mesma nas vistas de trabalho, mas não cabe a este documento se aprofundar nesta questão.

Em geral, a construção dos objetos parte de sólidos primitivos, como esferas e cubos, e/ou de formas bidimensionais, como linhas e elipses. Eles servirão como base para o objeto desejado, o qual surgirá através de uma série de modificações, como capeamento, extrusões, chanfros e perfurações (entre muitas outras) na superfície tridimensional do objeto. A maneira utilizada para gerar essa topologia e a manipulação dos componentes é o que diferencia os métodos de modelagem. A modelagem a partir de linhas, por exemplo, cuja manipulação acontece entre seus vértices e vetores, gerará a superfície apenas em um processo posterior, independente, que pode ser desde uma simples extrusão desta forma ao capeamento da superfície baseando-se na sobreposição dos seus vértices, de modo a simular um polígono de três ou quatro lados através dos segmentos desta linha (ligação entre os vértices) e, então, criando um retalho (*patch*). Estes métodos serão melhor abordados nos subtópicos seguintes.

Com frequência, o método escolhido, a forma de utilizá-lo e da própria limitação de recursos e ferramentas além de outros aspectos como disposição das arestas, o tamanho e subdivisão das faces, a junção entre os sólidos (entre outros) são trabalhados tendo em vista a animação que será realizada com este modelo.

A animação em si são justamente alterações durante a passagem do tempo. É uma simulação da visão humana. Uma das teorias mais antigas para este fenômeno, percebida ainda no Egito Antigo e formulada por Isaac Newton, é a da Persistência Retiniana. Ela diz que, se uma série de imagens é mostrada com intervalos de $1/5$ a $1/20$ de segundo, cada nova imagem atingirá a retina antes que o estímulo da anterior tenha se dissipado (Capuzzo, 2010). Quanto maior essa taxa, mais conhecida como *frame rate* e medida em FPS (*frames per second* – quadros, de animação, por segundo), menor será a percepção de mudança entre as imagens estáticas e conseqüentemente, melhor será a qualidade da animação.

Teorias mais recentes, mais precisamente do início do século passado, como a de Max Wertheimer (1912), a teoria do Movimento Beta e a teoria do movimento Phi, colocam a animação como um processo psíquico e não ótico ou fisiológico. No cérebro, o processo cognitivo cria as imagens intermediárias forçando a conexão entre as imagens dadas pela animação.

Programas de animação virtual se utilizam desta última teoria para simular a animação. Através deste conceito, são criados os quadros-chave das alterações, imagens de maior importância para o desenrolar da animação, os chamados *keyframes*. A partir deles, o software cria os *frames* intermediários que apresentarão a interpolação das alterações entre os *keyframes*. Estes *frames* intermediários recebem o nome de *tween* (Figura 2:6). A criação das animações interpoladas (*tweened animations*) foi fundamental para o aumento da produtividade e trouxe a possibilidade de criação de animações mais longas em um menor tempo de produção, uma vez que cada minuto de animação requer a preparação de 720 a 1800 imagens estáticas (12 a 30 fps) (Autodesk, 2010).

Em algumas empresas, esse processo de animação se dá logo após a modelagem, em outras, somente após todas as demais fases. Isso é muito relativo como já mencionado, até porque é possível animar itens das demais fases, como alterar o visual de um material durante a animação para demonstrar a passagem do tempo ou alterações sofridas no objeto; alterar a iluminação para dar ideia do entardecer ou mesmo alterar a forma do objeto para demonstrar uma deformação por choque ou apenas por movimentação.

Além destes processos mais básicos de animação, há aqueles que exigem mais do processamento do hardware e dos conhecimentos do animador. Estes envolvem animações baseadas na emissão e comportamento de partículas, como em nuvens, chuva, neve, poeira, areia, faíscas, explosões, fumaça e líquidos. Aqui, a animação

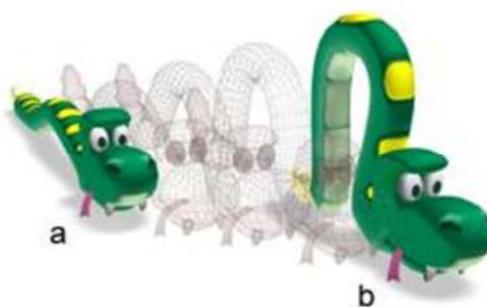


Figura 2:6 Tween. a e b são os *keyframes*. Entre eles vemos 3 quadros intermediários criados pelo programa de animação. Fonte: Autodesk, 2010.



de fluidos merece destaque. Também fazem parte deste grupo as animações de cabelo e pelugem, as de tecido, as de corpos rígidos e de corpos flexíveis. Todas elas se utilizam dos conceitos e leis da física mecânica, como as leis de Newton, densidade, atrito estático e atrito dinâmico, elasticidade, colisão, massa e gravidade, velocidade constante e velocidade uniformemente variada, somam influências externas e forças adicionais, como o vento e a força de motores, para criar uma simulação física da realidade.

Há ainda o grupo das animações de personagens, a qual envolve fases próprias como a construção de um esqueleto, restrição angular dos movimentos dos ossos para impedir movimentos indesejados (como o giro do cotovelo ou do joelho para uma direção que normalmente não é possível, dando a impressão de ter sido quebrado), ligação do esqueleto à malha que compõe o personagem, configurações de reações e de animações secundárias, como a alteração do volume do bíceps durante o movimento do antebraço e/ou reação das partes mais flexíveis (seios, camada adiposa do ventre etc.), e definição de um sistema de controles para facilitar e agilizar o trabalho do animador (*rigging*). Só após estas fases parte-se para a animação propriamente dita.

Na maioria dos casos, as animações de pelos e de partículas não são tão influenciadas pela geometria dos modelos, excetuando os casos de choque e rebatimento. No entanto, todos os demais dependem diretamente da forma da malha tridimensional e de como ela foi construída. Uma bola de boliche rola de uma montanha de forma completamente diferente de uma rocha irregular. Do mesmo modo, uma cadeira atingida por um objeto arremessado contra seu encosto tombará de maneira diferente conforme a localização do seu centro de gravidade e da forma e posicionamento da sua estrutura. Se, ao modelar um personagem, não se criar arestas adicionais nas regiões das articulações (como mostra a Figura 2:7), prevendo seus movimentos, a malha poderá apresentar distorções indesejadas, ao movimentar perna, como vértices e faces adentrando no corpo ou gerando pontas destacadas para fora do mesmo.

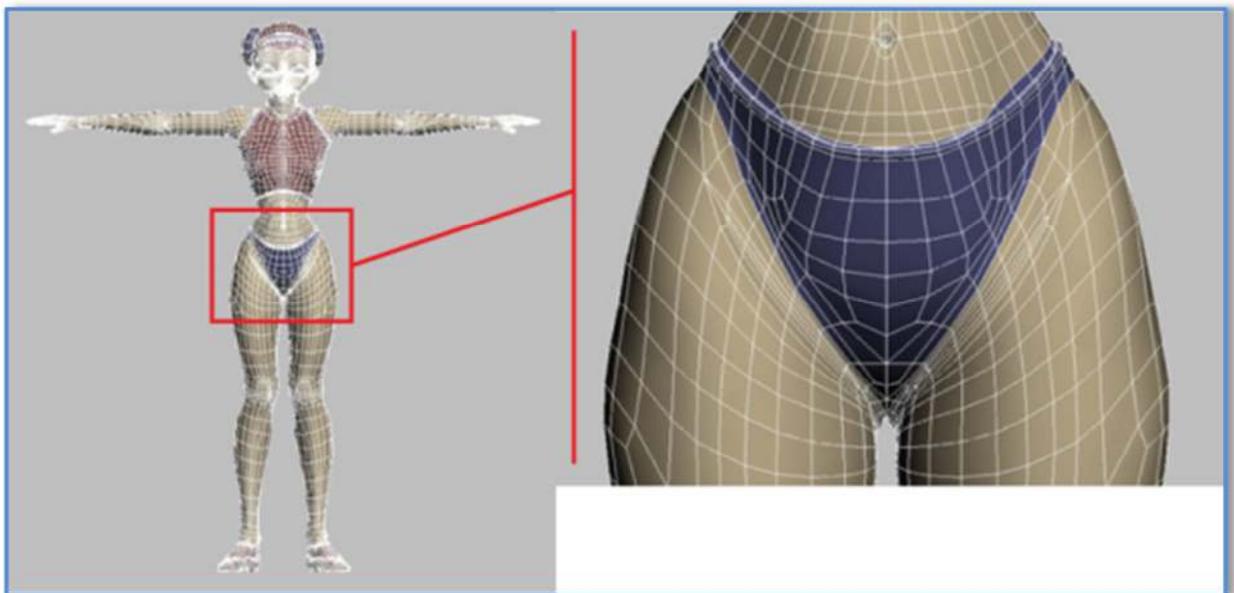


Figura 2:7 A adição de arestas na virilha permitirá que as pernas deste modelo possam se movimentar sem causar deformações indesejadas nesta região. Fonte: Autodesk, 2010.

A iluminação talvez seja a fase que menos influencia a modelagem. Apesar de trabalhar diretamente sobre a forma dos objetos, ela se adéqua aos dados da geometria e se mostra mais como uma consequência. A ligação é muito mais forte com os materiais do objeto que à disposição de suas faces.

As luzes virtuais podem ser divididas conforme sua verossimilhança, forma do emissor, forma de propagação e direção da fonte. De acordo com a primeira classificação, podem ter características e valores atribuídos sem ligação ao mundo real ou serem luzes fotométricas, as quais possuem as mesmas especificações de suas equivalentes no mundo físico.

A forma do emissor pode ser pontual (como uma lâmpada incandescente), linear (como uma fluorescente), planar (simulando uma janela ou holofote), esféricas ou paralelepípedicas (simulando um difusor nestas formas), o que influencia enormemente a propagação da sombra, como pode ser observado na **Figura 2:8**.

Pela forma de propagação, ela pode ser *raytrace*, pela qual vários raios partem do emissor de luz e se propagam pelo espaço. Neste formato, a sombra é formada quando objetos bloqueiam destes raios (Autodesk, 2011 (a)). No entanto estes raios podem ser bloqueados parcialmente, como acontece em materiais transparentes e semitransparentes. A outra maneira de propagação é a *shadow map*, na qual o emissor projeta um *bitmap* que age semelhantemente aos raios do *raytrace*, porém, a *shadow map* não considera a transparência de um objeto, tratando o mais transparente como se fosse opaco. Em contrapartida, este meio é mais leve, em termos de consumo de memória e processamento além de permitir sombras com bordas suaves, cuja qualidade depende da resolução do *bitmap* (configurada no programa 3D).

Quanto à direção da fonte, a iluminação pode ser direta ou indireta. Apesar de ser a mais natural, esta última maneira é relativamente recente. Até então a única opção era simular o efeito com várias outras lâmpadas espalhadas pela cena.

Apesar de consumir muito mais do sistema, através da iluminação indireta podem-se obter imagens

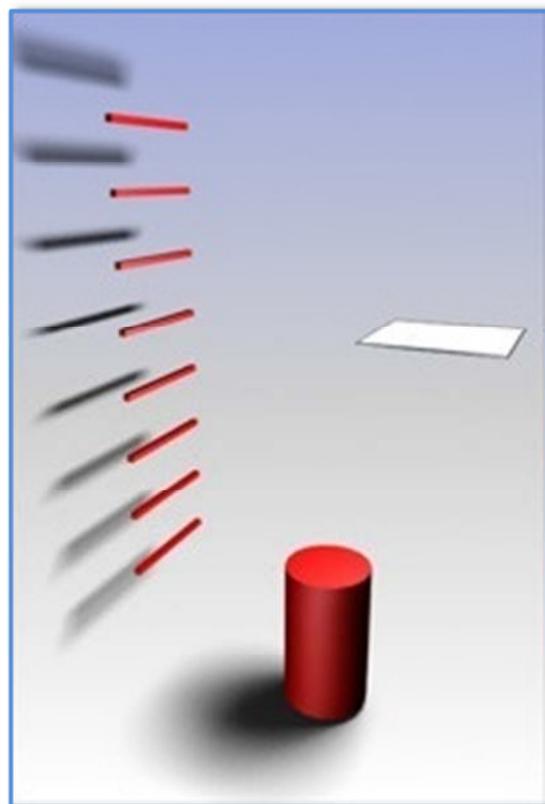


Figura 2:8 Variação na projeção da sombra por consequência da forma do emissor de luz (area shadow planar). Fonte: Autodesk, 2011 (a)

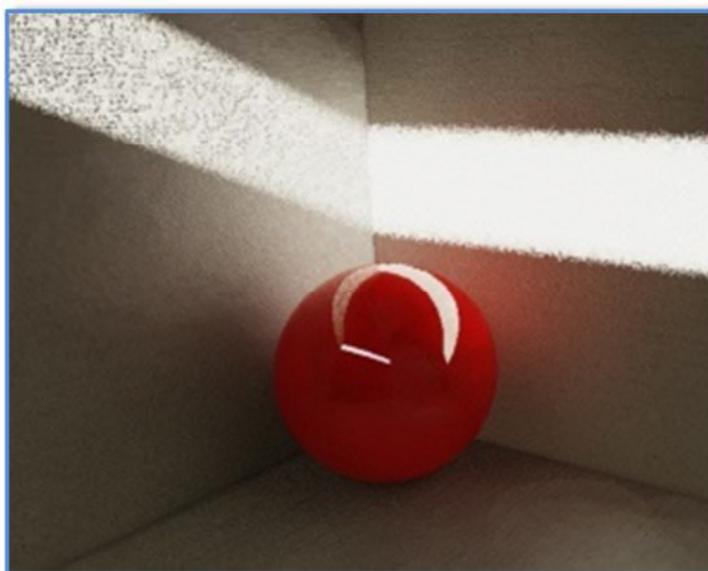


Figura 2:9 A luz se espalha pelo ambiente através da iluminação indireta. Fonte: o autor, 2007.



muito mais realistas. Na cena da **Figura 2:9** uma única luz é emitida, simulando o Sol. Seus raios atravessam uma fenda de um modelo paralelepípedo fechado. Como a iluminação indireta foi ativada e configurada, ao bater na parede os raios de luz rebatem e se dispersam. É importante notar a influência da cor neste processo. Nota-se que a parede do fundo recebeu um tom avermelhando proveniente da esfera que tende a aumentar conforme a visão se aproxima do seu causador.

Ainda existem ferramentas capazes de reproduzir a posição do Sol, dadas a posição geográfica onde se encontra, a data e a hora desejada e, neste contexto, também se pode adicionar a influência da umidade do ar. Também se pode configurar a difração da luz pela refração de um material.

No entanto, uma das tecnologias que ultimamente mais atraem a atenção de pesquisadores neste campo é a iluminação orientada por um bitmap. Neste processo são utilizadas imagens que contém informações da radiância do ambiente. Segundo Meyer (2004), apesar das pesquisas em estado avançado e dos esforços da indústria em criar câmeras fotográficas capazes de captar e criar este tipo de imagem, atualmente elas ainda são geradas unicamente em computadores, pela junção de diversas fotografias obtidas, com diferentes valores de exposição, de um mesmo ponto de vista, possibilitando assim a reprodução exata da iluminação do ambiente fotografado, como mostrado na Figura 2:10.

Juntamente com a iluminação, a fase de materiais e texturas compõe o lado mais subjetivo da produção tridimensional. Enquanto a fase de modelagem normalmente é mais precisa e objetiva remontar o objeto, montar uma configuração de iluminação e materiais requer sutileza e uma boa capacidade de observação. Bell (1999) diz que parte do problema está no fato de que, como vivemos imersos nos ambientes que tentamos reproduzir virtualmente, é fácil detectar quando algo não condiz com a realidade. Cor, saturação, sujeira, poeira e fuligem, intemperismos, descoloração, desbotamento, desgastes, amassados, arranhões, salpicos e manchas de umidade, polimento por desgaste, lascas, cascas e rachaduras e oxidação são as características apresentadas pelo autor às quais se deve ter atenção ao criar um material.

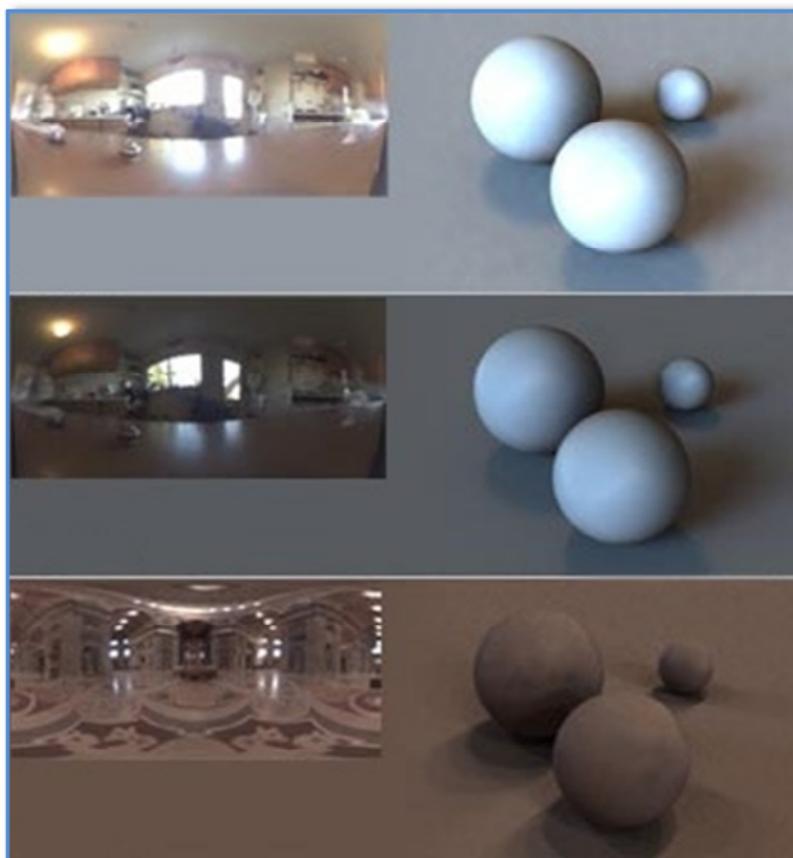
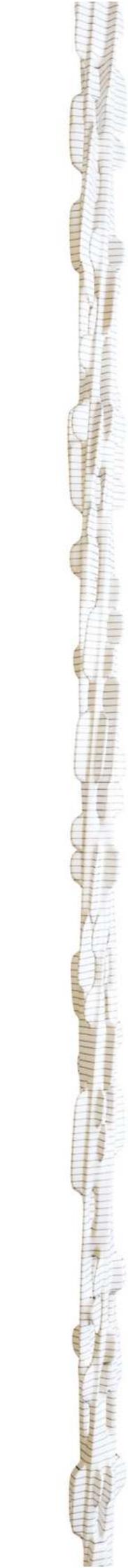


Figura 2:10 Imagem com radiância atuando como indicador de luminosidade para a cena. Fonte: THORNGREN, 2002.

Uma particularidade dos materiais é que tanto a modelagem os influencia quanto é influenciada por eles na busca pelo detalhamento de um objeto. Bell (op.cit.) classifica essa relação em três níveis: macro, material e subpíxel. No nível macro estão as alterações realizadas na malha tridimensional durante a fase da modelagem. Porém o autor não considera as alterações na malha provenientes do deslocamento dos vértices orientado por texturas aplicadas ao material (efeito displacement). Este recurso é a base do método de modelagem por escultura e será melhor explicado, mais adiante.

No nível material estão alterações realizadas diretamente nesta fase. Os efeitos conseguidos seriam extremamente trabalhosos se realizados por modelagem macro. Através dele se obtém a aspereza da face, arranhões, amassados leves, pequenos desníveis e outras características que impedem que a superfície seja completamente plana e lisa. Estes resultados são conseguidos principalmente através do parâmetro bump, o qual utiliza o valor de brilho de uma imagem para



orientar a quantidade de saliência desejada. Quanto mais clara a cor, mais saliente será a aspereza naquele ponto. Esta solução utiliza efeitos de luz e sombra para gerar a impressão de relevo e assim, por não alterar a geometria do objeto, é mais limitado que o displacement, mas ao contrário deste, não exige uma quantidade maior de vértices, embora isso não necessariamente indique uma finalização mais rápida da imagem.

O nível subpíxel carrega a informação de como a luz é dispersada de acordo com o quanto a superfície é microscopicamente plana. Quanto mais plana, maior é a reflexão da luz na mesma direção gerando reflexos especulares e/ou do ambiente. Micro ranhuras e aspereza influenciam e alteram o visual do material dispersando a luz, resultando em um material fosco.

As janelas de configuração de materiais são as que detêm maior densidade de parâmetros em um programa 3D, pois a partir de poucas telas é possível recriar qualquer material existente no mundo físico. Para isso, se valem de materiais com características diferentes, como metal, madeira, concreto e cerâmica ou de materiais básicos através de cujas alterações se pode obter vários aspectos visuais. Em todos os casos, os componentes do material descrevem propriedades visuais e óticas baseando-se em qualidades físicas, como por exemplo, cor difundida, brilho, transparência, reflexão, refração, entre outras (Autodesk, 2011 (a)).

Entre as características dos materiais estão os diferentes tipos de sombreadores (shaders) que definem a forma como a luz é absorvida, refletida e/ou transpassada. Além disso, cada característica pode ser orientada (mapeada) por uma imagem, a qual pode ser uma fotografia ou um fractal gerado por cálculos matemáticos, o que evita a homogeneização dessa característica. A Figura 2:11 mostra o esquema de mapeamento de um material. Nela veem-se vários mapas controlando o aspecto visual da cor dispersada (*diffuse*), a aspereza do material (*bump*) e a variação da intensidade da reflexão da luz ao longo da superfície do material (*specular level*). No editor de material ao lado, tem-se os parâmetros de um desses nós, no caso, o material formado.

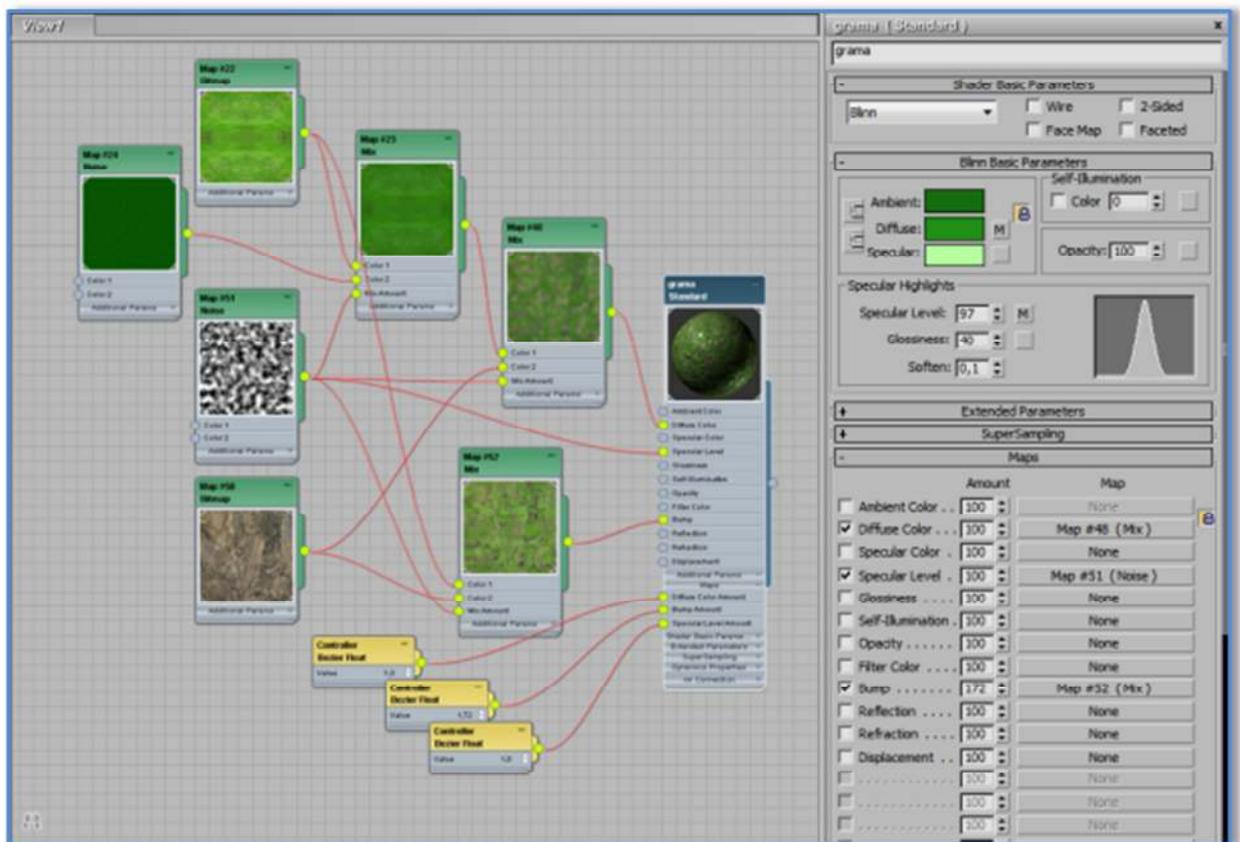


Figura 2:11 Editor de materiais e diagrama da montagem dos mapas de um material. Fonte: o autor, 2010

A Figura 2:12 é um exemplo que mostra os três níveis propostos por Bell, acrescidos da modelagem por displacement. No nível macro, temos os objetos em si: seis paralelepípedos e um plano (piso). Os paralelepípedos, base para as paredes, possuem uma alta densidade de arestas. Ao seu material, no canal displace, foi aplicada a imagem “a”, o que causou o deslocamento dos seus vértices, dando o volume saliente dos tijolos.

O material do plano do piso é o representante do nível material. Seu visual é uma mistura de uma foto de um gramado (b), espelhada em dois eixos, com uma foto de um pedaço de mármore beneditino (c). Quem define a localização e proporção de cada uma das duas fotos é um mapa fractal em preto e branco (d), onde a variação entre estas cores indica a variação entre as fotos. Uma composição semelhante Foi utilizada no canal *bump*, pelo qual foi gerada a aspereza do objeto.



Figura 2:12 Os três níveis de modelagem por materiais: macro (tijolos), material (piso) e subpíxel (tampo metálico vermelho). Abaixo, algumas imagens que foram utilizadas na composição dos materiais. Fonte: o autor, 2010.

No nível subpíxel pode-se observar o brilho e a reflexão do metal que compõe os tetos. Também é possível perceber os microarranhões existentes nesta superfície.

Ao longo de todas as etapas, são necessários testes constantes para checar a qualidade do resultado e evitar surpresas. A geometria sempre pode ser visualizada na tela do programa (*viewport*). Testes de animação podem ser feitos diretamente na tela do programa, na maioria das vezes. Materiais possuem a possibilidade de pré-visualização no próprio editor de materiais. Recentemente, a iluminação passou a ter o mesmo recurso com qualidade próxima da final também diretamente na *viewport* dos programas mais avançados.

Porém, para unir todos os dados é necessário renderizar a imagem, ou seja, finalizá-la. Neste processo todos os dados são mesclados para gerar a imagem final. Da modelagem vem a forma; dos materiais e da iluminação, a correlação dessa forma com o ambiente real e a integração com a memória visual do observador e; da animação vem o movimento destes parâmetros.

A todos estes dados ainda são acrescentados os chamados efeitos de pós-produção. Em geral estes efeitos são colocados como uma camada acima da imagem formada. Como exemplos pode-se citar pelos, gramado, simulação de reflexos e refração da luz na lente de uma câmera fotográfica real (*lens effects*), névoa, fogo, efeitos aplicados sobre partículas, sombras volumétricas (sombras projetadas sobre um ambiente empoeirado ou enevoadado), entre outros. Também é possível aplicar um filtro de antisserrilhamento (*antialiasing*) ao resultado, avivando as bordas da imagem, o que a deixaria mais propícia para impressão, ou desfocando-a, dando a impressão de uma fotografia distorcida pela refração causada pelo calor.

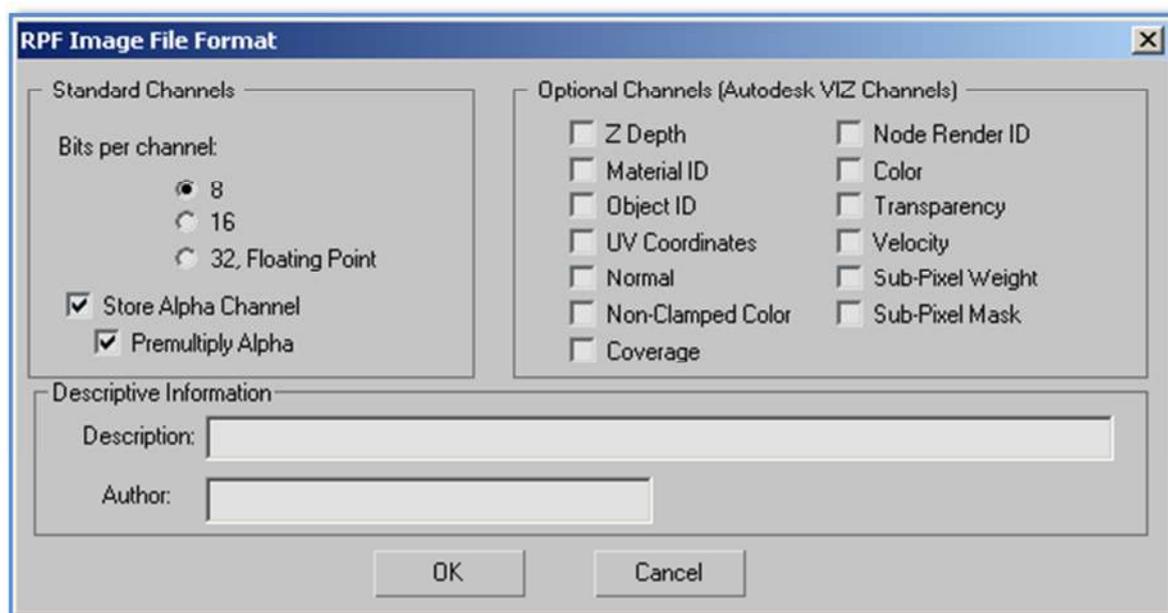


Figura 2:13 Janela para configuração de opções de informação a serem armazenadas em uma imagem do tipo RPF. Fonte: Autodesk, 2011 (a).

Uma vez calculados todos estes dados e suas interações, os resultados são aplicados às camadas de informação da imagem, as quais podem guardar desde informações a cerca da dosagem de cores primárias (imagens de 24 bits com 8 bits, 256 possibilidades, para cada canal de cor primária – vermelho, verde e azul,

totalizando 16.777.216 possibilidades de cores), os quais geram os formatos de imagem mais utilizados, a dados mais complexos como os vetores de suavização da superfície, a refração ou a velocidade do objeto (imagens de 64bits, como o formato RPF, ilustrado pela Figura 2:13). Podem ainda receber as informações da distância de cada parte do objeto à câmera ou mesmo que píxeis pertencem a qual objeto (para fins de seleção posterior), entre outros. Estes resultados são então armazenados em forma de imagem ou de vídeo.

Dentre tantas possibilidades de manipulação, a evolução do cenário tecnológico levou ao estabelecimento de cinco métodos entre as mais utilizados pela comunidade de ilustradores tridimensionais (Russo, 2005), apresentados nos próximos itens. Os designers podem utilizar um ou mais deles na criação de um objeto, dependendo da complexidade do mesmo, do seu contexto de aplicação e da forma como será utilizado posteriormente entre as fases de criação acima apresentadas.

Nos próximos itens serão apresentados três destes métodos: a modelagem a partir de linhas, a modelagem por Nurbs e a modelagem a partir de polígonos.

2.2.1 MODELAGEM A PARTIR DE LINHAS (SPLINE MODELING)

A *Spline Modeling* se baseia no desenho de formas bidimensionais ou no aproveitamento de desenhos construtivos gerados em outros softwares, como o Autodesk Autocad ou o Adobe Illustrator para gerar as formas pretendidas e, através de operações aplicadas a estas linhas, como extrusão, torneamento, chanfro ou um perfil se alongando por uma trajetória predeterminada, transformá-las em objetos tridimensionais. Na Figura 2:14 tem-se exemplos de modificações em objetos 2D. Em a, uma extrusão de 20mm aplicada a um perfil em U de 50mm x 30mm, com 7mm de espessura e duas furações de 2mm de raio. Em b, chanfro de 3 níveis (nível 1: altura 10mm; nível 2: altura 4mm, deslocamento -10mm, nível 3: altura -5mm) aplicado a um quadrado de 40mm com cantos arredondados em 3mm. Em c, estrutura tubular de uma cadeira construída a partir das vistas da linha mediana dos tubos. Em d, várias amostras da aplicação do torneamento a diferentes linhas.

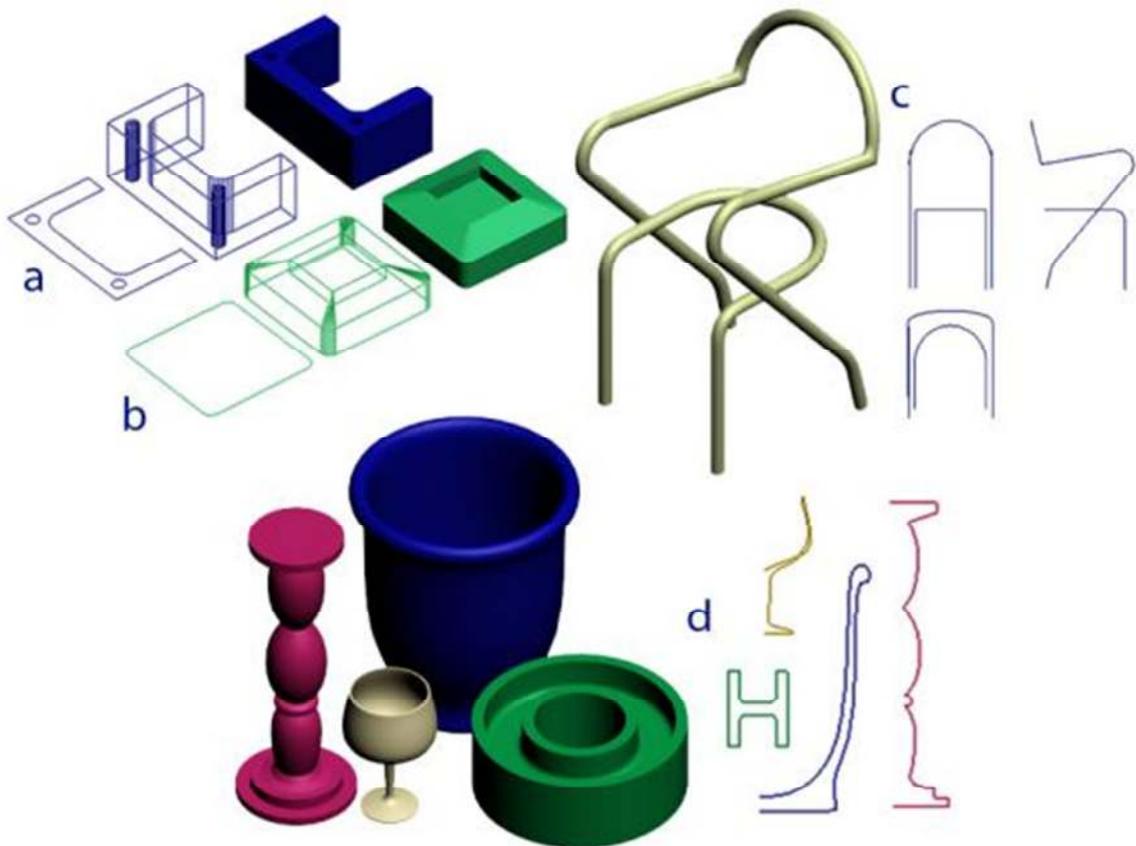


Figura 2:14 Exemplos de modificações em objetos 2D: (a) extrusão, (b) chanfro, (c) círculo extrudado por um perfil determinado e, (d) amostras de torneamento. Fonte: o autor, 2011.

Este método possibilita um alto grau de precisão e edição, principalmente se o software for paramétrico e permitir a reedição das formas bidimensionais originais a qualquer momento. E, por conta da forma como os objetos são construídos, muitas vezes se assemelhando ao modo como o desenho técnico de um produto é elaborado, a *spline modeling* é mais utilizada por designers de produto, arquitetos e engenheiros do que por artistas.

Construindo-se cada peça de maneira a simular a própria construção do produto tem-se uma gama enorme de possibilidades que, aliada ao fato de poder reutilizar desenhos bidimensionais preexistentes, apresentam o grande potencial deste método.

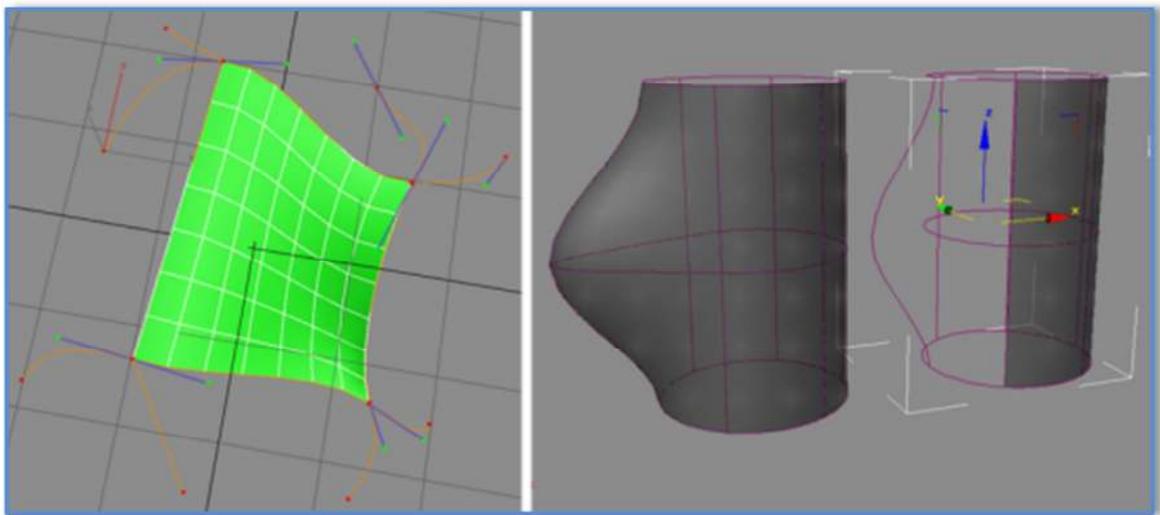


Figura 2:15 Patches. À esquerda, um patch criado pela interseção de quatro *splines* (fonte: o autor, 2011). À direita, estrutura modelada por *splines* e capeada por *patches* (fonte: Bell, 1999).

No entanto, a *spline modeling* apresenta deficiências na produção de peças que seriam criadas por usinagem, moldagem de material líquido ou ainda objetos orgânicos como animais. Essa deficiência foi suprida em 1998, quando Peter Watje criou o pacote de *plugins* chamado *Surface Tools*, cuja ideia posteriormente foi incorporada pelos principais softwares do mercado. Ele permitiu que cada conjunto de três ou quatro arestas bidimensionais fosse transformado em um *patch4* (Bell, 1999) (Figura 2:15), desta maneira, qualquer superfície poderia ser delineada tridimensionalmente por linhas bidimensionais e depois receber um capeamento (Figura 2:16).

Esta nova maneira de se trabalhar as linhas, trouxe ao *spline modeling* a possibilidade de atuar não só na modelagem orgânica, mas também na modelagem de grandes produtos de metal ou tecido, como automóveis. Os problemas deste método residem na impossibilidade de se controlar as subdivisões dos segmentos. Todos tem o mesmo número de faces entre as arestas. Se o número de subdivisões for ajustado para cinco, todos os *patches* terão 25 faces, mesmo que algum seja curto e reto, onde uma única face seria o suficiente. Outro problema está no fato de que é

⁴ superfícies curvas suavizadas definidas por alças bezier. É equivalente aos desenhos vetoriais em linhas bezier, porém, em superfícies tridimensionais (BELL, 1999). Simula bem o comportamento de uma chapa de metal ou de tecido.

difícil manter a suavidade da curvatura de uma superfície que abranja mais de um *patch*: há uma tendência no visual a afundar um pouco nos limites entre os *patches*, mesmo que as linhas indiquem ser uma superfície concordante (Figura 2:17). Finalmente, a visualização de um grande número de linhas se torna extremamente difícil e se perde muito tempo tentando visualizar o modelo e localizar quais linhas pertencem a qual parte da peça.

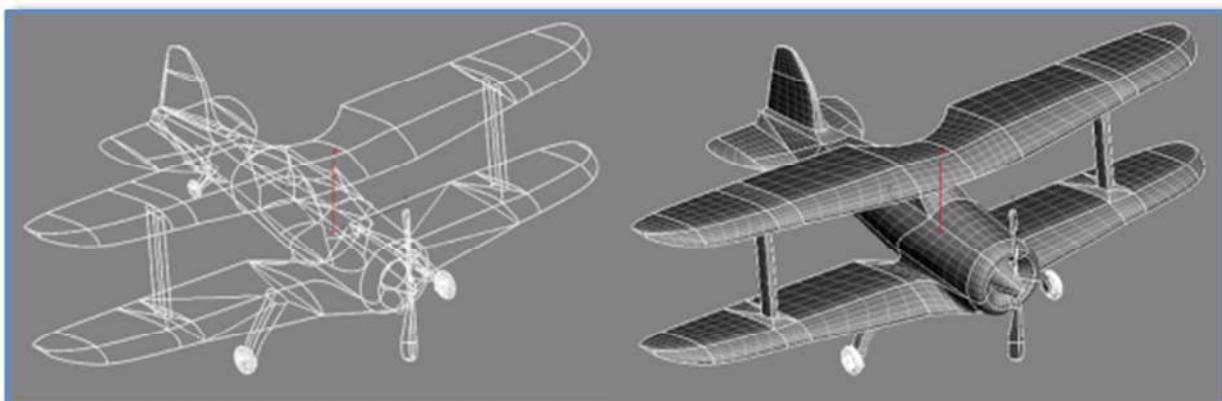


Figura 2:16 Objeto complexo inteiramente criado em *spline modeling*. À esquerda, linhas utilizadas na criação do avião: nota-se que na maioria dos casos, a estrutura forma espaços quadriláteros. À direita, o avião capeado. Fonte: o autor, 2011.

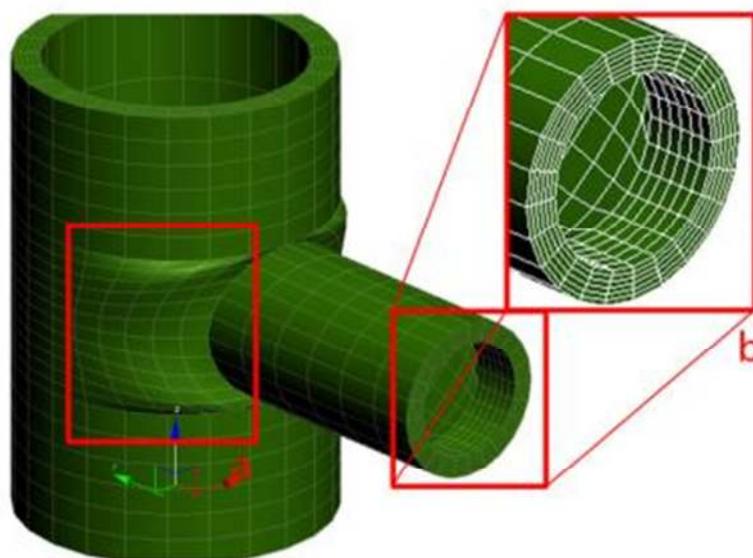


Figura 2:17 Problema de continuidade da superfície *patch* (detalhe a). O detalhe b apresenta o excesso de faces apresentado por este método. Fonte: o autor, 2011.

Os objetos gerados por *spline modeling* podem ser convertidos em objetos Nurbs,

em objetos polígonos ou em objetos *patch* (exceto com a utilização do *surface tools*, através do qual sempre será um *patch*) e, a partir de então, podem ser manipulados como tal, sofrendo quaisquer operações comumente atribuídas a estes tipos de objetos.

2.2.2 MODELAGEM A PARTIR DE POLÍGONOS (BOX-MODELING OU POLY-MODELING OU NURMS)

A *Poly Modeling* se caracteriza por se basear em um sólido primitivo, como um paralelepípedo (daí o termo *box modeling*), uma esfera ou um cilindro, entre outros, e, a partir de suas faces, derivar-se as demais necessárias para a construção da forma desejada. Essa derivação em geral é realizada através de modificações em seus vértices, em suas arestas e/ou em suas faces e pode ser efetuada através de extrusões⁵, chanfros, soldagens e/ou cortes, intercaladas por movimentações, rotações e escalonamento destes elementos. Na Figura 2:18, para transformar um cilindro (a) em uma tampinha de garrafa, chanfrou-se uma de suas bordas (b), apagou-se sua face inferior (c), realizou-se uma extrusão negativa de suas faces laterais inferiores, acompanhada de um chanfro (d), apagou-se as faces inferiores (e), atribuiu-se espessura ao elemento (f) e finalizou-se a imagem com materiais e iluminação (g).

É uma dos principais e mais populares métodos e está presente em todos os principais softwares de modelagem tridimensional, por vezes se apresentando como única opção de construção ao lado das operações booleanas (adição, subtração e interseção) aplicadas aos sólidos.

⁵ Em softwares tridimensionais, a técnica da extrusão de faces ou objetos bidimensionais difere um pouco do processo de extrusão encontrado nas indústrias. Enquanto neste um tarugo da matéria-prima é aquecido e forçado a passar por uma peça matriz, que possui um orifício ao centro cuja forma é igual a da seção transversal da peça final desejada, que então sai como fruto desta prensagem; no mundo dos programas tridimensionais, o perfil desejado, ou seja, a forma do corte transversal da peça final é dado pelo desenho do objeto bidimensional ou da face escolhida para a extrusão que então ocorre na direção paralela ao vetor normal da superfície ou do plano (onde se encontra a figura bidimensional) desejado.

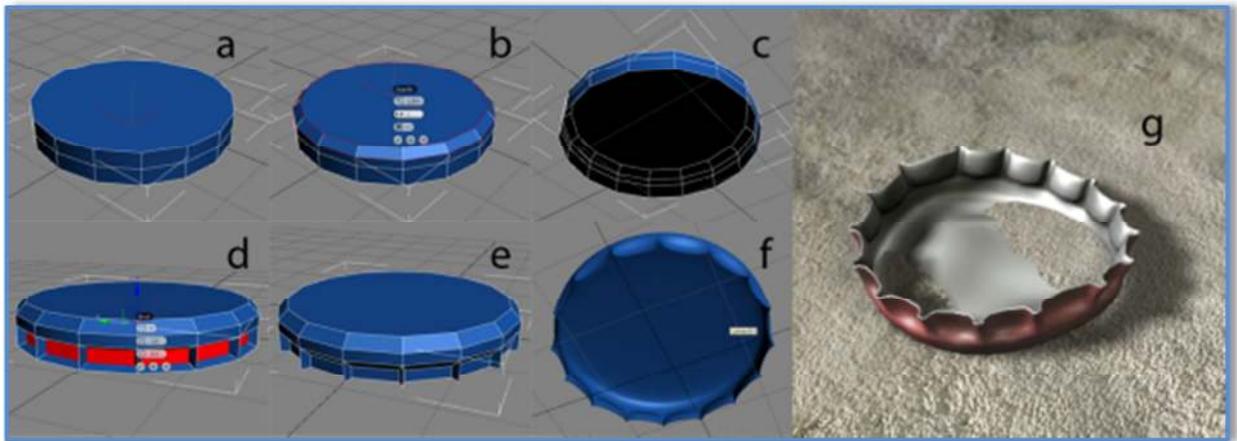


Figura 2:18 Etapas de construção de uma tampa de garrafa utilizando o método *Poly Modeling*. Fonte: o autor, 2002.

Frequentemente é utilizado como método orgânico, ou seja, na maioria das vezes não há uma preocupação com o dimensionamento formal preciso para todas as alterações efetuadas no sólido. Nestes casos, a proximidade do modelo trabalhado com o desejado é garantido por imagens ou desenhos técnicos aplicados em planos posicionados atrás do modelo trabalhado, com o intuito de funcionar como referência de dimensionamento para as operações. Ou seja, posicionam-se imagens do desenho construtivo ou de fotografias dentro do programa, simulando as vistas ortogonais mongeanas e modela-se à frente desta imagem. A Figura 2:19 mostra o posicionamento de dois planos e a modelagem de um tronco humano seguindo este recurso.

Muitos modelos apresentam simetria lateral em pelo menos um dos planos, principalmente os modelos orgânicos. Um bípede, por exemplo, possui dois membros superiores e dois inferiores posicionados em lados opostos; além disso, toda a lateral do corpo é semelhante à versão oposta da outra lateral. Assim, para reduzir o trabalho, há ferramentas que criam uma versão oposta idêntica à trabalhada e mantêm essa lateral atualizada conforme novas alterações são aplicadas na lateral original. Em alguns softwares, não há ferramentas específicas para esta finalidade, então esse efeito é conseguido através de uma cópia instanciada (cópia idêntica à original e vinculada a ela) espelhada. Desta maneira, reutilizando o exemplo do bípede, o modelador teria de gerar apenas o modelo de um dos lados do personagem, deixando a outra lateral para ser criada

automaticamente e, caso necessário, realizando as alterações para diferenciação das laterais ao final do processo. No caso da Figura 2:19, as duas metades do corpo foram criadas em simetria, mas ainda não foram unidas.

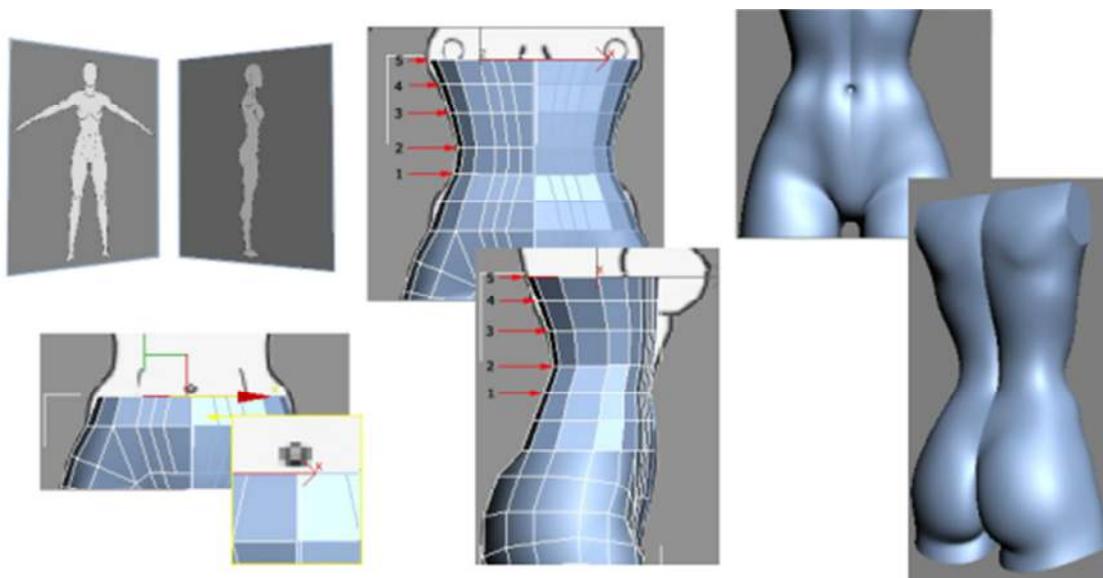


Figura 2:19 Modelagem do corpo de uma mulher utilizando desenhos bidimensionais posicionados por trás do modelo. Fonte: Rosa, 2005.

Como não há como criar faces poligonais curvas, a complexidade das curvas das superfícies é diretamente proporcional ao número de faces requeridas para construí-las. No entanto, esta proporção esbarra na habilidade de edição da malha tridimensional. Um objeto com grande número de faces é de difícil edição, pois cada alteração a ser implantada implicará em um grande número de modificações faciais individuais. Para contornar este problema, foram criados vários algoritmos para suavização da superfície através da subdivisão automática das faces, o que atenua os ângulos mais agudos. Este processo é usualmente aplicado como última etapa, para dar acabamento no modelo (Figura 2:20).

As vantagens deste método recaem no potencial para criar praticamente qualquer objeto. Há processos automatizados cujos resultados não são controláveis, mas é possível manter a precisão geral atentando a isso em cada operação. Porém, para muitos objetos mais precisos, ou seja, onde há uma preocupação com o dimensionamento formal exato para todas as alterações efetuadas no sólido, este método requer mais tempo para atingir seus resultados.

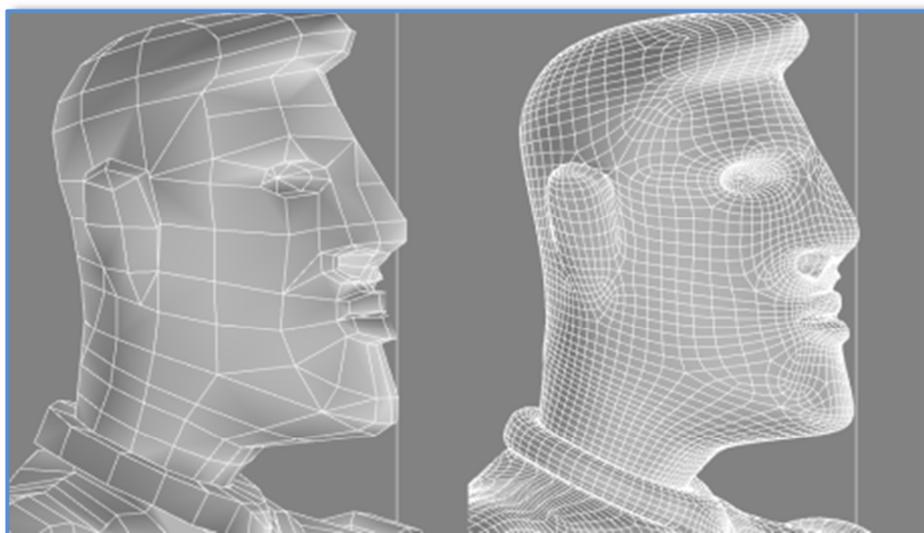


Figura 2:20 Suavização da superfície poligonal. À esquerda o personagem como foi modelado em *Poly Modeling*. À direita, o mesmo modelo após receber a subdivisão de faces. Fonte: o autor, 2003.

Já no campo dos objetos mais orgânicos, novos métodos de escultura têm agilizado o tratamento da topologia, trazendo uma edição mais intuitiva e, em conjunto com métodos de criação de faces e deslocamento de vértices através de informações vindas dos materiais, a possibilidade de criação de modelos altamente detalhados, em menor tempo. Este complemento à *poly modeling* evoluiu nos últimos anos de maneira tão rápida que pode-se dizer que já é um método independente.

2.2.3 MODELAGEM ATRAVÉS DE LINHAS DO TIPO B, RACIONAIS NÃO UNIFORMES (NURBS)

Até a década de 1950, a criação das superfícies de um produto se restringia a curvas simples, pois eram as que poderiam ser matematicamente determinadas e assim, replicadas. Nesta década, os estudos de Pierre Bézier e de Paul de Casteljaou apontaram novas possibilidades ao permitir a manipulação de superfícies livres (como as que vemos nos automóveis atuais, por exemplo), determinadas por curvas não uniformes, ainda que racionais⁶. Estas curvas eram determinadas por pontos no

⁶ O termo racional se refere àquilo que pode ser matematicamente explicado ou determinado. Não uniforme define que a curva pode ser parametrizada e, entre outras coisas, possuir múltiplos nós.

espaço de duas maneiras: a) as splines de interpolação, quando a curva passava por todos os pontos de controle e; b) as splines de aproximação, quando os pontos influenciavam a curva como ímãs atraindo o metal. A estas linhas deu-se o nome de Nurbs, da sigla inglesa para “linhas do tipo B⁷, racionais, não uniformes”. (Piegl & Tiller, 1997)

Apenas em 1989 foi possível o *rendering* de uma superfície Nurbs, em poderosas estações gráficas, mas somente em 1993 surgiu o primeiro programa que permitia a manipulação interativa dessas linhas. Ao longo destas duas últimas décadas, passou-se a chamar de Curvas Bézier as splines de interpolação, enquanto que o termo Curvas Nurbs passou a ser mais utilizado para as splines de aproximação. É sob essa denominação que este trabalho diferencia estes dois tipos de curva vetorial.

Conforme pode ser visto na Figura 2:21, as curvas bézier possuem maior flexibilidade formal, podendo se comportar de quatro maneiras: a) formando uma quina, b) formando uma curva concordante com o mesmo raio antes e depois do ponto de controle, c) formando uma curva concordante com raios diferentes em cada lado do ponto de controle e, d) uma curva não concordante. As curvas Nurbs não podem determinar quinas. Para isso têm-se as opções de iniciar uma nova curva no mesmo ponto, ou concentrar uma série de pontos de controle no mesmo local para aumentar a influência daquele local sobre a curva, ou ainda aumentar o peso da influência daquele ponto sobre a curva. No entanto, ao trabalhar com as Nurbs, a definição de uma forma livre é mais rápida e intuitiva, pois basta mover os pontos de controle para se ter a forma desejada, contra a manipulação dos pontos e de alças, no caso das curvas bézier. A quantidade de informação armazenada também é menor nas curvas Nurbs.

⁷ Linhas que podem desenhar a forma da letra B. Aliando-se ao termo racional, indica que uma curva pode descrever um B e ainda ser descrita por uma fórmula matemática.

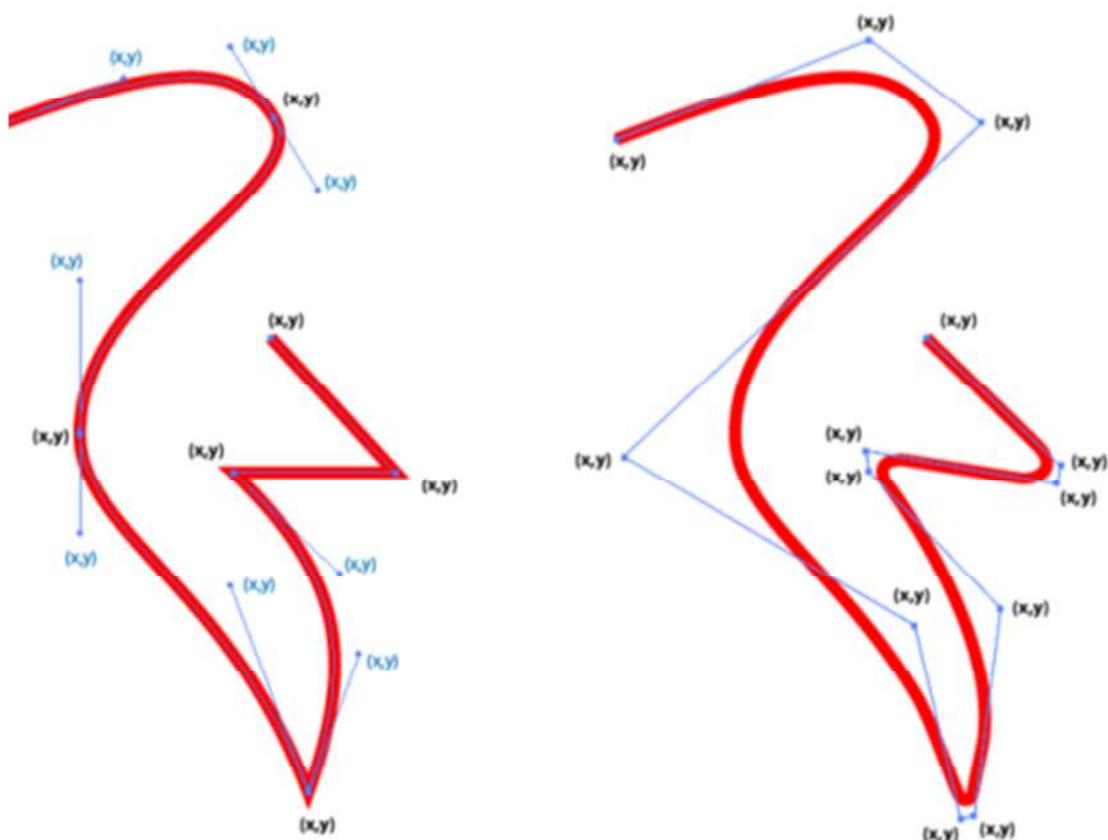


Figura 2:21 Tipos de splines Nurbs: à esquerda, spline de interpolação com as alças de Bézier e as informações de posição em um plano bidimensional; à direita, spline de aproximação com as mesmas informações de posição. Nota-se a ausência de quinas na imagem da direita. Fonte: o autor, 2010.

De um conjunto de linhas Nurbs se formam as superfícies Nurbs. Elas possuem a flexibilidade das superfícies *patches* (que na verdade foram inspiradas nas superfícies Nurbs) e um método próprio de junção entre superfícies geradas por diferentes linhas. São agrupadas em dois tipos: as superfícies de pontos, criadas exatamente pelos pontos principais que a define, como os vértices em um objeto criado por modelagem por polígonos e as splines de interpolação e; as superfícies CV, criadas por vértices de controle, como ocorre nos *patches* e nas splines de aproximação (Autodesk, 2011 (b)).

A Figura 2:22 mostra a diferença estrutural entre os dois tipos de superfície. Em ambas a edição é feita sobre os vértices, arestas e faces. A diferença recai apenas na influência dos vértices sobre a região da superfície que o circunda.

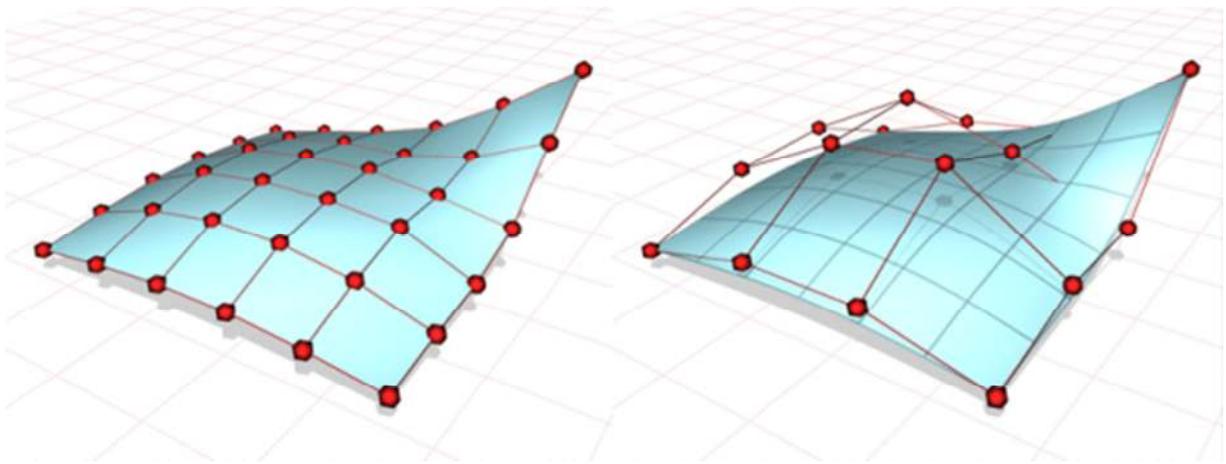


Figura 2:22 Tipos de superfície Nurbs: à esquerda, superfícies de pontos; à direita, superfícies CV.
Fonte: Autodesk, 2011 (a).

Da mesma maneira que as curvas Nurbs se comportam com quinas, as superfícies Nurbs não se dobras em ângulos definidos por uma única aresta. Assim, um cubo é composto com 6 superfícies planas independentes, mas que possuem o vínculo de fazer parte do mesmo objeto, como se tivessem sido agrupadas. Porém, essa deficiência é compensada por uma das maiores vantagens do Nurbs, tanto em linhas quanto em superfícies: o objeto se apresenta conforme suas propriedades matemáticas de curvatura. Desta maneira, por exemplo, um círculo é um conjunto infinito de pontos equidistantes de um ponto central e não um conjunto finito e determinado pelo operador de segmentos de retas, como acontece nas com as splines comuns. Do mesmo modo, um cilindro ou um objeto torneado apresentará uma curvatura perfeita em qualquer resolução ou aproximação, ao contrário dos objetos criados por *spline modeling* ou por *poly modeling*. Para compensar o peso que a visualização destas superfícies pode acarretar no processamento gráfico da vista, os softwares oferecem diferentes níveis de detalhamento, controlados pelo operador, para a visualização dos objetos.

A modelagem por Nurbs possui algumas possibilidades semelhantes às da *spline modeling*, pois aqui também é possível utilizar linhas para gerar as formas pretendidas. A elas também é possível aplicar operações como extrusão, torneamento, chanfro ou um perfil se alongando por uma ou mais (um diferencial) trajetórias predeterminadas para transformá-las em objetos tridimensionais (Figura 2:23).

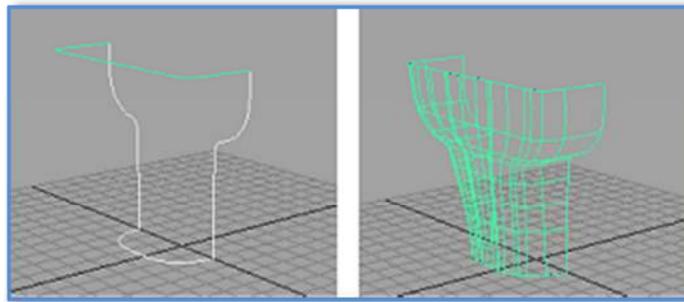


Figura 2:23 Superfície Nurbs criada a partir de quatro curvas Nurbs. Fonte: Autodesk, 2011 (b)

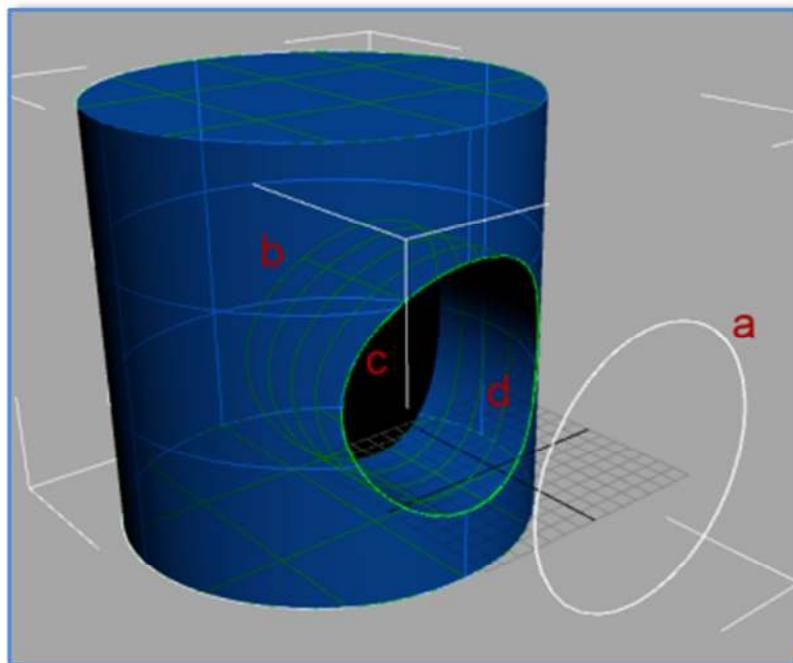
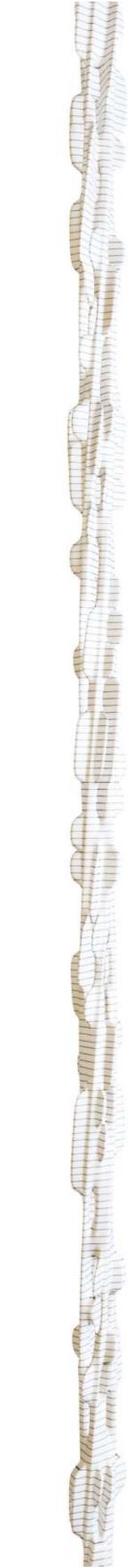


Figura 2:24 Etapas da construção de um modelo de precisão em Nurbs através de operações entre curvas e superfícies. Fonte: o autor, 2011.

Um método próprio da modelagem com Nurbs é que a partir das superfícies criadas também é possível criar novas superfícies atreladas às originais de modo que se as originais forem alteradas, a superfície derivada se alterará automaticamente. Deste modo, pode-se criar um cilindro alinhado longitudinalmente a outro de raio diferente e então estabelecer uma superfície de ligação entre os dois. Se o raio, rotação ou posição de um dos cilindros mudar, a superfície de ligação será alterada automaticamente. Na Figura 2:24, o círculo (a) foi projetado sobre a superfície do cilindro (b). A partir da nova curva formada (c), cortou-se a superfície do cilindro e então criou-se uma nova superfície através da extrusão da curva projetada (d). A



partir de então poder-se-ia chanfrar a entrada do orifício criando uma nova superfície. Esta última superfície seria dependente de todas as criadas anteriormente. São procedimentos de grande precisão, no entanto, a medida em que se realizam mais operações, a modelagem exige cada vez mais processamento, a menos que se realize o procedimento de tornar as curvas e superfícies independentes, mas esta medida tem a contrapartida da perda da edição daquela forma.

Na modelagem por Nurbs também podem ser utilizados os procedimentos da modelagem por polígonos, como extrusão e chanfro. Porém, apesar de não precisar de uma suavização final pela maneira como a superfície é controlada, as superfícies Nurbs não possuem tanta flexibilidade na manipulação das faces, quando se trata de modelagem orgânica, em comparação à *poly modeling*. É muito mais complicado cortar algumas faces e não outras, e inserir vértices em arestas e faces, por exemplo. Além disso, como os objetos são coleções de superfícies independentes, deve-se tomar o cuidado de realizar procedimentos que indiquem a ligação entre as arestas destas superfícies ou elas poderão abrir durante operações de deformação.

Observa-se que nos últimos anos o uso do Nurbs vem sendo substituído por outros métodos. Seu reduto mais forte, no âmbito do design, se encontra na modelagem voltada para a produção de produtos (CAM – Computer Aided Manufacturing), por conta da precisão de suas curvas nos sólidos tridimensionais, enquanto os novos softwares de modelagem tridimensional voltados para design gráfico, visualização de projetos e entretenimento que surgiram mais recentemente não apresentam mais as ferramentas para trabalho com Nurbs, como o Zbrush, da Pixologic, e o Modo, da Luxology.

2.3 REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Keg (2009) a Siggraph (Annual Conference on Computer Graphics) é, destacadamente, o melhor congresso da área da computação gráfica⁸. O fator de impacto de seus artigos e autores sobre as pesquisas mundiais aparecem em quinto lugar dentre todos os congressos de todas as diversas áreas da computação, como pode ser acompanhado pela Tabela 2:2.

Com base nos conteúdos da Siggraph apresentados nos dois últimos anos, segundo Ke-Sen Huang (2009, 2010), e, por ser muito amplo, restringindo-o aos artigos mais ligados à modelagem tridimensional, é possível separar 27 artigos distribuídos por subcategorias, conforme a Tabela 2:3.

Posição	Journal / Congresso	Nome completo
5	SIGGRAPH	Annual Conference on Computer Graphics
12	SI3D	Symposium on Interactive 3D Graphics
59	CVPR	Computer Vision and Pattern Recognition
61	ICCV	International Conference on Computer Vision
75	SCA	The ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation
77	ECCV	European Conference on Computer Vision
117	IEEE Visualization	IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Visualization
119	NOSSDAV	Network and Operating System Support for Digital Audio and Video
148	CIVR	ACM International Conference on Image and Video Retrieval
154	MM	ACM Multimedia

Tabela 2:2 Os dez journals e congressos com maior fator de impacto na área de multimídia, imagens e vídeo (fonte: Keg, 2010).

⁸ O autor classifica como “multimedia, image, vídeo”. Dentre as classificações oferecidas, a mais próxima desta pesquisa.

Ano	Área	Título	Autores
2009	Curve and Surface Modeling	a) 2D Piecewise Algebraic Splines for Implicit Modeling	LI, Q. & TIAN, J.
		b) A BSP-Based Algorithm for Dimensionally Nonhomogeneous Planar Implicit Curves with Topological Guarantees	GOMES, A. J. P., MORGADO J. F. M. & PEREIRA E. S.
		c) A Variational Approach for Automatic Generation of Panoramic Maps	DEGENER, P. & KLEIN, R.
		d) Interpolatory Point Set Surfaces – Convexity and Hermite Data	ALEXA, M. & ADAMSON, A.
	Meshing	a) Cyclic Plain-Weaving on Polygonal Mesh Surfaces with Graph Rotation Systems	AKLEMAN, E., CHEN, J., XING, Q. & GROSS, J. L.
		b) Deforming Meshes that Split and Merge	WOJTAN, C., THÜREY, N., GROSS, M. & TURK, G.
		c) Interleaving Delaunay Refinement and Optimization for Practical Isotropic Tetrahedron Mesh Generation	TOURNOIS, J., WORMSER, C., ALLIEZ, P. & DESBRUN, M.
		d) Mixed-Integer Quadrangulation	BOMMES, D., ZIMMER, H. & KOBELT, L.
	Modeling and Rendering Dynamic Shapes	a) An Edge-Based Computationally Efficient Formulation of Saint Venant-Kirchhoff Tetrahedral Finite Elements	KIKUUWE, R., TABUCHI, H. & YAMAMOTO, M.
		b) Data-driven curvature for real-time line drawing of dynamic scenes	KALOGERAKIS, E., NOWROUZEZAHRAI, D., SIMARI, P., McCRAE, J., HERTZMANN, A. & SINGH, K.
		c) Efficient Reconstruction of Non-rigid Shape and Motion from Real-Time 3D Scanner Data	WAND, M., ADAMS, B., OVSJANIKOV, M., BERNER, A., BOKELOH, M., JENKE, P., GUIBAS, L., SEIDEL, H. P. & SCHILLING, A.
		d) Fitting solid meshes to animated surfaces using linear elasticity	CHOI, J., SZYMCZAK, A.
	Physically Based Modeling: From Contact to Capture	a) Asynchronous Contact Mechanics	HARMON, D., VOUGA, E., SMITH, E., TAMSTORF, R. & GRINSPUN, E..
		b) Capture and Modeling of Non-Linear Heterogeneous Soft Tissue	BICKEL, B. BÄCHER, M., OTADUY, M. A., MATUSIK, W., PFISTER, H. & GROSS, M.
		c) Physically Guided Liquid Surface Modeling from Videos	WANG, H., LIAO, M., ZHANG, Q., YANG, R. & TURK, G.
	Shape Editing and Deformation	a) iWIRES: An Analyze-and-Edit Approach to Shape Manipulation	GAL, R., SORKINE, O., MITRA, N. J. & COHEN-OR, D.
b) Joint-aware Manipulation of Deformable Models		XU, W., WANG, J., YIN, K., ZHOU, K., PANNE, M., CHEN, F. & GUO, B.	

Ano	Área	Título	Autores
2010		c) Semantic Deformation Transfer	BARAN, I., VLASIC, D., GRINSPUN, E. & POPOVIĆ, J.
		d) Variational Harmonic Maps for Space Deformation	BEN-CHEN, M., WEBER, O. & GOTSMAN, C.
	Surfaces	a) Bi-3 C2 Polar Subdivision	MYLES, A. & PETERS, J.
		b) Direct Trimming of NURBS Surfaces on the GPU	SCHOLLMEYER, A. & FRÖHLICHY, B.
		c) NURBS with Extraordinary Points: High-degree, Non-uniform, Rational Subdivision Schemes	CASHMAN, T. J., AUGSDÖRFER, U. H., DODGSON, N. A., SABIN, M. A.
		d) Symmetric Tiling of Closed Surfaces: Visualization of Regular Maps	WIJK, Jarke J. van
	3D Modeling	a) 3D Modeling with Silhouettes	RIVERS, A., DURAND, F. & IGARASHI, T.
		b) A Framework for Modeling 3D Scenes using Pose-free Equations	ALIAGA, D. G., ZHANG, J. & BOUTIN M.
c) Apparent Layer Operations for the Manipulation of Deformable Objects		IGARASHI, T., MITANI, J.	
d) Popup: Automatic Paper Architectures from 3D Models		LI, X. Y., SHEN, C. H., HUANG, S. S. JU, T. & HU, S. M.	

Tabela 2:3 relação dos artigos relacionados à modelagem tridimensional apresentados na Siggraph em 2009 e em 2010. Fonte: o autor, baseado na listagem de Ke-Sen Huang (2009, 2010).

Filtrando os dados tendo em mente o uso dentro de etapas comuns em metodologias de design e a produção de modelos tridimensionais de objetos orgânicos e/ou objetos mais precisos, obtém-se uma visão geral das pesquisas globais da área que podem influenciar o processo produtivo do design dentro da fase de modelagem tridimensional e/ou prototipagem rápida.

Através dos artigos analisados nas diversas categorias, percebeu-se que em 2010 a produção relacionada ao tema deste trabalho foi bem menor que em 2009. Apenas uma área apresentou temas ligados à modelagem tridimensional, a 3D Modeling, e seus textos continham técnicas possivelmente de impacto menor no dia-a-dia de um designer. Pode-se dizer que se tem um método novo, mas ainda carente de alguns ajustes e uma ferramenta para acelerar a edição. Os demais precisariam de um maior refinamento para serem aplicados com eficiência.

Ainda, a área *Curve and Surface Modeling* e a *Surfaces* apontarão mudanças, aos olhos do dia-a-dia dos designers, sutis no aumento de precisão e qualidade nos

resultados. Os frutos alcançados estarão finalmente mais próximos dos desejados ao utilizar as ferramentas de subdivisão e suavização.

Já as áreas *Meshing* e *3D Modeling* apresentaram novidades mais relevantes. A primeira com novos métodos de criação de tramas de tecido e a manipulação de corpos flexíveis ao ponto de se poder unir, dividir e misturá-los. *3D Modeling* apresentou um método de modelagem baseado no desenho de silhuetas bidimensionais em vistas ortogonais e uma ferramenta para alternar a sobreposição dos objetos, semelhante a como acontece no mundo bidimensional da computação gráfica. Os outros artigos apontaram técnicas inovadoras mas que ainda requerem mais desenvolvimento para chegarem ao mundo comercial.

A área *Modeling and Rendering Dynamic Shapes* assinalou inovações voltadas à redução do tempo de trabalho e melhoria da qualidade dos resultados obtidos. A *Physically Based Modeling: From Contact to Capture* foi marcada pela preocupação com a precisão na física dos corpos flexíveis em situações extremas. A *Shape Editing and Deformation* mostrou soluções para a redução no tempo de modelagem através da deformação de objetos e aproveitamento e combinação de poses.

Espera-se que essas mudanças possam ser incorporadas às ferramentas mais utilizadas pelos designers no trabalho diário e, assim, possam contribuir para a redução do tempo de construção dos modelos, deixando mais recursos para o processo de criação e projeção propriamente dito.

Os próximos subtópicos abordarão as pesquisas descritas nos artigos analisados.

2.3.1.1 CURVE AND SURFACE MODELING

Os artigos desta área contemplaram quatro pontos distintos:

- a) *2D Piecewise Algebraic Splines for Implicit Modeling* - uma técnica para aumentar o controle e precisão de splines bidimensionais, especialmente na formação de superfícies (Li & Tian, 2009);
- b) *BSP-Based Algorithm for Dimensionally Nonhomogeneous Planar Implicit Curves with Topological Guarantees* - uma nova maneira de tratar curvas e

superfícies respeitando pontos isolados, linhas auto-interceptantes e outros aspectos normalmente problemáticos nas técnicas já estabelecidas (Gomes, Morgado & Pereira, 2009);

- c) *A Variational Approach for Automatic Generation of Panoramic Maps* - técnica para desenho de paisagens tridimensionais, automaticamente adaptadas aos recursos do hardware onde forem visualizadas (pode ser a base de um sistema de manipulação interativa da topologia para facilitar a criação de mapas) (Degener & Klein, 2009) e;
- d) *Interpolatory Point Set Surfaces: Convexity and Hermite Data* - Uma maneira mais eficiente de calcular a normal de uma nova superfície a partir de alguns pontos dados e então construí-la (Alexa & Adamson, 2009).

Percebe-se que o impacto causado por estes artigos é sutil e possivelmente não seria percebido por designers, a não ser através dos seus resultados mais precisos. No entanto, o artigo de Alexa & Adamson (2009) aparenta ser a base de um novo método de modelagem a partir do qual se poderia definir a superfície apenas posicionando no espaço determinados pontos pertencentes à mesma..

2.3.1.2 MESHING

Os artigos encontrados descrevem:

- a) *Cyclic Plain-Weaving on Polygonal Mesh Surfaces with Graph Rotation Systems* - um método de cobrir uma superfície com uma estrutura entrelaçada semelhante as linhas que compõem um tecido, com controle sobre o espaçamento entre elas - o resultado é como o de um tear (Akleman, Chen, Xing & Gross, 2009).
- b) *Deforming Meshes that Split and Merge* - método de monitoramento de superfície flexível para simulações físicas que requerem superfícies com riqueza de detalhes e que sofrerão inúmeros eventos topológicos. Destaque para a fusão e separação dinâmica de objetos de/em elementos diferentes (como por exemplo, uma massa de vidro fundido sendo dividido após cair e atravessar um outro objeto e sendo reunido logo em seguida em uma espécie de funil) e a precisão dos cálculos frente a operações complexas de dobra,

fusão, alongamento e corte do material flexível (Wojtan, Thürey, Gross & Turk, 2009).

- c) *Interleaving Delaunay Refinement and Optimization for Practical Isotropic Tetrahedron Mesh Generation* - método de otimização da malha capaz de reduzir até 75% do número de faces de um objeto antes de começar a comprometer a integridade da forma geral da geometria. A solução é orientada por parâmetros definidos pelos usuários, como forma e tamanho da face, e aproximação da forma original. Paços posteriores de refinamento são aplicados de maneira independente. Uma grande limitação é não trabalhar bem com bordas bem definidas em ângulos menores que 90° (Tournois, Wormser, Alliez & Desbrun, 2009).
- d) *Mixed-Integer Quadrangulation* - método de quadrangulação da malha que corta a superfície em partes e calcula a reunião dos pedaços de acordo com sua orientação, seu alinhamento e restrições das bordas – o resultado da suavização possui uma precisão muito maior, especialmente nas bordas (Bommes, Zimmer & Kobbelt, 2009).

Os dois primeiros artigos abordam novas técnicas de modelagem que chegam para preencher lacunas. No primeiro porque atualmente é extremamente difícil construir uma trama têxtil com as ferramentas atuais. Isto requereria um trabalho fio a fio ou a criação de algum script que pudesse agilizar essa tarefa, mas ainda assim dificilmente esse script seria capaz de distribuir a trama sobre a malha de um objeto. Atualmente esse trabalho é feito com alterações nas texturas dos mapas utilizados nos materiais dos objetos, o que é suficiente para a maioria dos casos, excetuando-se um nível mais aproximado da visão, onde o detalhamento se torna indispensável.

No segundo, a pesquisa de Wojtan, Thürey, Gross e Turk (2009) traz novidades muito bem vindas. Atualmente é muito difícil simular um corpo flexível e manipulá-lo ao ponto de cortar em partes. Se é possível cortar, não é um corpo único e sim um sistema de partículas ou uma *metaball*. Da mesma maneira, a união de corpos flexíveis é outro grande problema da área. A possibilidade de poder realizar os dois eventos (entre outros) é muito bem-vinda e satisfaz uma grande necessidade atual.

Os dois artigos seguintes são mais sutis porém desejáveis. As soluções atuais de otimização de malha tendem a rapidamente destruir os detalhes e a alterar a forma geral do objeto. A quadrangulação tende normalmente a arredondar as quinas e bordas e a sua ausência, a produzir efeitos indesejáveis após a suavização.

2.3.1.3 MODELING AND RENDERING DYNAMIC SHAPES

Foram analisados artigos relacionados a processos dinâmicos. Sendo implementados nas ferramentas tridimensionais, o impacto dos mesmos no dia-a-dia do designer pode ser sentido na forma da qualidade dos resultados. O primeiro deles deve reduzir o tempo de testes e verificações, o segundo, otimizar um tipo de saída de imagem que, apesar de já existir a vários anos, nunca foi plenamente satisfatória. A solução de Wand, Adams, Ovsjanikov et al. (2009) deve reduzir o trabalho (bastante comum) de limpar a malha vinda de escâneres tridimensionais. Por fim, o método de Choi & Szymczak (2009) deve facilitar muito a vida dos animadores, reduzindo as deformações da malha, especialmente quando lidarem com objetos de baixa densidade, como aqueles destinados a jogos. Os artigos dos quais se trata descrevem:

- a) *An Edge-Based Computationally Efficient Formulation of Saint Venant - Kirchhoff Tetrahedral Finite Elements* - um algoritmo computacionalmente mais eficiente para cálculo simulação física com objetos elásticos. Os ganhos no número de operações variam entre 62% e 73% em relação aos métodos atuais e mesmo assim se mostra mais preciso e com modelos mais estáveis (Kikuuwe, Tabuchi, & Yamamoto, 2009).
- b) *Data-Driven Curvature For Real-Time Line Drawing Of Dynamic Scenes* - o artigo descreve um método para desenhar linhas e contornos sobre os objetos da cena em tempo real durante o *rendering*. O objetivo é criar o aspecto de um desenho vetorial bidimensional. Através deste método, o software analisa as curvas e decide se cabe por uma linha ali ou não. A maior limitação desta abordagem é a necessidade de pré-renderizar a cena para que o software possa analisar as curvaturas que ocorrem durante as deformações das malhas. No entanto funciona como uma pós-produção automatizada (Kalogerakis, Nowrouzezahrai, Simari et al., 2009).

- 
- c) *Efficient Reconstruction of Non-rigid Shape and Motion from Real-Time 3D Scanner Data* – um algoritmo para reconstrução da forma de um objeto recebida de um escâner tridimensional. Ele remove automaticamente os “ruídos” na forma dos objetos e as bordas desconectadas (abertas) da forma escaneada. Não requer *templates* prévios, pois ele calcula automaticamente a forma a partir dos dados recebidos. Ao final otimiza a malha para aceitar deformações (Wand, Adams, Ovsjanikov et al., 2009).
 - d) *Fitting Solid Meshes To Animated Surfaces Using Linear Elasticity* - um novo método para conformar a malha, subordinada a um esqueleto, às posições desejadas (*skinning*). Esta abordagem também pode melhorar do mapeamento de texturas em malhas que sofrem deformações durante uma animação, entre outras operações que requerem a análise do movimento da estrutura. Este novo método permite deformações mais radicais no objeto sem criar falhas de deformação indesejadas (Choi & Szymczak, 2009).

2.3.1.4 PHYSICALLY BASED MODELING: FROM CONTACT TO CAPTURE

Os artigos da área tratam de problemas ligados à simulação baseada nas leis físicas. Aqui a preocupação com o aperfeiçoamento da física dos corpos flexíveis fixa sua presença. Os artigos analisados tratam de:

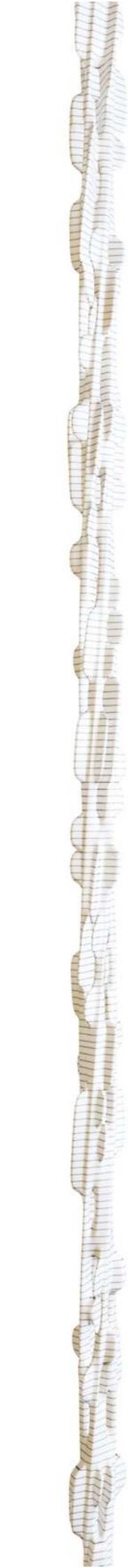
- a) *Asynchronous Contact Mechanics* - um método para simulação de deformação elástica em cenários complexos de colisão. O foco da equipe foi garantir que não houvessem interpenetrações entre os objetos, que eles obedecessem à causalidade, bem como às leis da dinâmica e da conservação de energia, e que a simulação fosse finalizada em um tempo finito (Harmon, Vouga, Smith, et al., 2009)
- b) *Capture and Modeling of Non-Linear Heterogeneous Soft Tissue* - um método de modelagem para simulação de tecidos flexíveis. Ele simplifica a construção dos modelos deformáveis realistas, evitando complexas seleções e ajustes de parâmetros da simulação, porém mantém a riqueza do comportamento e visual casual heterogêneo. No entanto, essa técnica lida apenas com a elasticidade, não leva em consideração a viscosidade nem a plasticidade (Bickel, Bächer, Otaduy, et al., 2009).

- c) *Physically Guided Liquid Surface Modeling from Videos* - uma combinação de métodos: de um lado a modelagem de líquidos baseada em uma sequência de imagens gravadas de uma situação real; de outro, a simulação computadorizada baseada nas leis físicas. A vantagem da união está em obter uma animação realista através das imagens e calcular a animação dos pontos não mostrados pelas a imagens, tanto as partes não visíveis quanto os frames intermediários. Um problema detectado foi o tempo para o cálculo da forma que fica na casa dos 3 minutos por frame utilizando um computador potente em uma simulação simples (Wang, Liao, Zhang, et. al., 2009).

Os dois primeiros artigos desta área trabalham com problemas ligados à simulação de corpos flexíveis, tema, que normalmente consome tempo do designer na criação de uma configuração realista. O artigo de Harmon, Vouga, Smith, et al. (2009) propõe uma solução para alguns dos problemas mais encontrados nas simulações de choque contra objetos flexíveis, dentre os quais, um é descrito pelos autores: quando um objeto rígido a alta velocidade atinge um objeto flexível. Outro acontece com o atrito e a tração sobre corpos flexíveis, como tecidos. Quase sempre os métodos atuais não apresentam soluções realistas no movimento resultante, o que requer uma série de ajustes em algo que deveria ser automático. O método desenvolvido por Bickel, Bäcker, Otaduy, et al., (2009), apesar de ainda não abranger todas as situações possíveis, já é de grande ajuda tanto reduzindo o tempo de configuração e modelagem dos objetos flexíveis para parecerem naturalmente posicionados. O terceiro artigo leva à simulação de líquidos, outro ponto problemático nas simulações físicas. Neste caso, a ideia do grupo de unir o real ao computado é interessante e prevê bons resultados, mas esbarra na necessidade de se ter uma situação real captável por câmeras para que se possa utilizar. É interessante para reprodução, mas não para criação de novas situações.

2.3.1.5 SHAPE EDITING AND DEFORMATION

Esta categoria aborda alterações nas ou através das formas bidimensionais. Também trata das deformações nas malhas. Através das análises, pode-se dizer que de forma geral, as novidades trazidas por estes estudos vão reduzir muito o tempo que o designer necessita para configurar e manipular os objetos e seus



elementos. O artigo “a” desta seção, por exemplo, mostra um método muito prático e rápido de edição de objetos. Com poucas mudanças o software interpreta o que o usuário deseja e realiza as alterações. Sendo implantado, deve agilizar muito os processos de edição, animação e adaptação de objetos reduzindo o tempo e o trabalho do designer. O segundo artigo analisado, foi o *Joint-aware Manipulation of Deformable Models*. Através do sistema proposto, o designer pode manipular rapidamente as junções entre peças e permitir a flexibilização das demais. O terceiro trabalho analisado também reduz o trabalho do designer, pois encarrega o próprio sistema de fazer as mudanças necessárias para adaptar e reaproveitar animações prontas, além de criar novas poses baseadas em elementos das anteriores. Por fim, o artigo “d” trata de uma maneira mais intuitiva e precisa de manipular personagens alterando suas poses através de posicionamento e rotações no sistema e não na grade deformadora, como as soluções mais comuns requerem. A preocupação com a manutenção dos detalhes e com a deformação muscular é muito bem-vinda e eliminaria outros processos que normalmente são aplicados em conjunto para garantir o efeito final desejado. Abaixo, a descrição dos artigos analisados nesta seção.

- a) *iWIRES: An Analyze-and-Edit Approach to Shape Manipulation* - o artigo de Gal, Sorkine, Mitra & Cohen-Or (2009) trabalha com a proposição de que artefatos possuem características comuns que podem ser decompostas em splines. O processo desenvolvido por eles permite que se deforme a malha através da decomposição da mesma em splines, modificação de uma dessas splines, análise da deformação pretendida, alteração das demais splines e reconstrução da malha para seguir a modificação pretendida. A interferência do usuário é mínima e o resultado é o pretendido, mas método não funciona muito bem com formas orgânicas.
- b) *Joint-aware Manipulation of Deformable Models* - o artigo trata de um sistema de deformações onde o usuário indica onde se encontram as junções no modelo. O sistema analisa o tipo de junção ideal e permite que o restante do modelo possa ser deformado como um artefato flexível, enquanto as deformações nas junções são mantidas, bem como suas restrições de

ângulo, as quais também podem ser alteradas pelo usuário (Xu, Wang, Yin et al., 2009).

- c) *Semantic Deformation Transfer* - através da transferência semântica de deformações, uma vez alimentado o sistema com poses prontas, ele é capaz de criar novas, mesmo que o objeto-alvo não tenha a mesma configuração formal. Assim, a pose de uma pessoa andando pode ser transferida para uma mão, onde os dedos indicador e médio fariam o papel de pernas. Da mesma maneira, pode também ser transferida para uma ave, mesmo que ela se apoie sobre seus dedos e não sobre a planta dos pés como os primatas (Baran, Vlastic, Grinspun & Popović, 2009).
- d) *Variational Harmonic Maps for Space Deformation* - propõe um método de deformação espacial onde o usuário manipula posições e restrições de rotações, ao invés de mexer na grade em volta do objeto, como nas soluções atuais. Além disso há uma preocupação grande na manutenção dos detalhes do objeto após a deformação, bem como com a deformação muscular, natural de personagens (Ben-Chen, Weber & Gotsman, 2009).

2.3.1.6 SURFACES

Os artigos desta seção, em semelhança à seção *Curve and Surface Modeling*, terão suas vantagens percebidas pelos designers pela qualidade de seus resultados e não pela manipulação direta pelos mesmos. Eles abordam:

- a) *Bi-3 C2 Polar Subdivision* - um algoritmo mais rápido de suavização da malha por subdivisão das suas faces. O grande diferencial é criar arestas radiais evitando as estrias longitudinais comuns nos processos atuais (Myles & Peters, 2009).
- b) *Direct Trimming of NURBS Surfaces on the GPU* - um método de corte de superfícies do tipo Nurbs com resultados muito mais precisos. Foi adotado o cálculo baseado em GPU (*Graphic Processor Unit* – o processador das placas de vídeo, especializado em cálculos gráficos de geometria, iluminação e materiais) o que permitiu que as superfícies interdependentes interagissem com velocidade muito superior aos processos de corte atuais, que utilizam as

CPU (*Central Processor Unit* - o processador principal do computador, utilizado para finalidades gerais) (Schollmeyer & Fröhlichy, 2009).

- c) *NURBS with Extraordinary Points: High-degree, Non-uniform, Rational Subdivision Schemes* - um método alternativo de gerar uma superfície Nurbs com alto grau de subdivisão, promovendo uma suavização adicional ao custo de processamento um pouco maior que o utilizado em superfícies mais simples (Cashman, Augsdörfer, Dodgson & Sabin, 2009).
- d) *Symmetric Tiling of Closed Surfaces: Visualization of Regular Maps* - um método de criação de coordenadas de mapeamento regulares e simétricas (Wijk, 2009).

O artigo “a” resolve um problema persistente das soluções existentes no mercado, as estrias longitudinais, gerando uma subdivisão da malha mais de acordo com o que o designer espera ao acioná-la. O artigo de Schollmeyer & Fröhlichy (2009) tem o poder de agilizar muito as operações com Nurbs, uma vez que a sobreposição de operações nesta técnica pode derrubar a eficácia da modelagem pelo tempo de recálculo das relações entre as operações executadas, além de permitir cortes mais próximos dos do desenho construtivo original, garantindo a precisão do projeto. O artigo seguinte é uma maneira alternativa de lidar com superfícies Nurbs com alto grau de subdivisão. É útil justamente por se tratar de objetos computacionalmente pesados. O último artigo avaliado nesta seção pode solucionar alguns dos clássicos problemas de mapeamento de texturas, como o da pirâmide.

2.3.1.7 3D MODELING

Os artigos encontrados descrevem:

- a) *3D Modeling with Silhouettes* - um método que busca facilitar e agilizar a modelagem de artefatos permitindo que o software crie um objeto a partir do fornecimento das suas silhuetas (em desenho vetorial bidimensional) projetadas em três vistas principais. Alterações nas linhas das silhuetas provocam alterações imediatas na forma do sólido. Utiliza técnicas booleanas para criar formas internas e um processo de suavização que permite eliminar

a maioria das falhas do processo de transformação 2D-3D (Rivers, Durand & Igarashi, 2010).

- b) *A Framework for Modeling 3D Scenes using Pose-free Equations* - um processo de modelagem de cenas baseado na aquisição das formas por câmeras fotográficas. O programa monta as fotos, avalia a profundidade dos objetos e reconstrói a cena tridimensionalmente utilizando as próprias imagens como mapas de textura (Aliaga, Zhang & Boutin, 2010).
- c) *Apparent Layer Operations for the Manipulation of Deformable Objects* - um método de alternar a posição de objetos em relação à visão como quem alterna o arranjo de objetos bidimensionais, ou seja, clicar e informar qual é o objeto que se deseja ter à frente. Sua limitação se dá em relação à complexidade do objeto, o que aumenta o tempo de cálculo na mesma proporção (Igarashi & Mitani, 2010).
- d) *Popup: Automatic Paper Architectures from 3D Models* - um algoritmo capaz de gerar planificações em papel para a construção de maquetes arquitetônicas a partir de um modelo tridimensional digital especificado pelo usuário. O resultado tem melhor qualidade quando o modelo apresenta a maioria dos seus planos em posição horizontal ou vertical. Superfícies curvas tendem a ser subdivididas em camadas enquanto superfícies côncavas tendem a ter problemas ou mesmo exclusão da sua parte interna (Li, Shen, Huang et al., 2010).

Uma grande desvantagem do método abordado no primeiro artigo é que, como utiliza apenas a silhueta e não as normas padronizadas de desenho construtivo, é difícil modelar detalhes internos, mesmo assim o método é capaz de modelar uma variedade muito grande de artefatos com rapidez e agilidade e, conseqüentemente reduzir o tempo de construção dos objetos de uma cena. Já no segundo, a grande rapidez na finalização da cena tem seu preço: os objetos possuem uma quantidade enorme de faces e a ausência de um processo eficiente de suavização deixa a malha com muito “ruído”. De modo geral a imagem possui um bom aspecto, mas em zoom, as bordas são disformes. Fica ainda a dúvida de como a cena reagiria a uma animação de seus elementos. O processo é extremamente útil uma modelagem de pouco tempo, um *mock-up* digital ou criação de um cenário que ficará desfocado na



animação, situações onde o designer perde muito tempo modelando elementos que pouco serão vistos, mas que fazem falta se não estiverem presentes. O método descrito no artigo de Igarashi & Mitani (2010) torna bastante prático a manipulação de objetos flexíveis. Os próprios autores utilizam como exemplo no artigo a criação de um nó de gravata. Em outro exemplo apresentam a aplicação com cordas e nós e se percebe a eficiência com que se pode trabalhar. O último artigo desta seção foca um tipo bem específico de maquete e tem boa qualidade apenas em formas específicas, mesmo assim reduz em horas o trabalho de quem constrói essas maquetes. Essa solução possui um bom potencial. Se os autores resolverem seus problemas pode ser tornar uma boa opção de planificação de produtos tridimensionais em superfícies planas.

3 ESTUDOS DE CAMPO

Para atender os objetivos desta pesquisa, é necessário investigar três variáveis principais: a) o software de modelagem tridimensional e suas ferramentas, b) o método de modelagem tridimensional orgânica e c) os resultados obtidos por eles em um processo de prototipagem rápida. Desta maneira, foram desenvolvidos modelos utilizando os métodos de modelagem por polígonos (*poly modeling*), por linhas (*spline modeling*) e por Nurbs. Os softwares foram analisados ao longo do processo de modelagem, diretamente nas tarefas exigidas para o cumprimento dos modelos. Dos dois softwares tridimensionais trabalhados, os modelos foram exportados em formato digital e então processados na máquina de em prototipagem rápida por FDM do Departamento de Design da UFPE.

Os tópicos seguintes apresentarão melhor a metodologia utilizada.

3.1 FERRAMENTAS DE MODELAGEM

Segundo Benoît Saint-Moulin (2008), os softwares tridimensionais 3ds Max e Maya, hoje, ambos da empresa Autodesk, estão entre os mais conhecidos, populares, completos e de melhores características entre softwares deste tipo no mundo. Assim, foram os escolhidos para a realização desta pesquisa e adotados em suas versões 2012 de 64bits.

O 3ds Max foi lançado em outubro de 1990 como 3D Studio. Rodava no sistema operacional DOS, da Microsoft em uma época em que, segundo José Maria de Spona (Baker, Blevins, Hadis & Kirvan, 2006), PC e multimídia eram palavras absolutamente antagônicas e que gerar imagens tridimensionais fora de uma *workstation* de aproximadamente € 30.000 era motivo de piada. A alta qualidade do seu *rendering* numa plataforma tão desprezada mas barata ajudou a impulsionar o programa, contrariando o pensamento vigente, pelo qual o valor do hardware era sinônimo de qualidade. As três versões posteriores (Figura 3:1) ampliaram suas qualidades e aplicações, em especial pelo sistema aberto de inclusão de *plugins*.

Em abril de 1996, após 3 anos de desenvolvimento, foi lançado com o nome de Kinetix 3D Studio Max. Kinetix era a recém renomeada divisão multimídia da Autodesk a qual o desenvolvimento deste software estava subordinado. Max era devido a total reformulação de sua interface e modo de trabalho: as ferramentas passaram a ser totalmente orientadas a objeto, utilizando um paradigma de modelagem procedural parametrizada. Uma das características adicionada e até hoje mais marcante deste programa é a pilha de modificadores (Modifier Stack), onde as modificações efetuadas nos objetos se empilham e podem ser alteradas a qualquer momento. Invertendo os valores do mercado trabalhando com um produto de massa a um baixo custo, a Autodesk conseguiu que o Max, em meados dos anos 1990, possuísse mais usuários que a soma de todos os outros softwares 3D juntos.

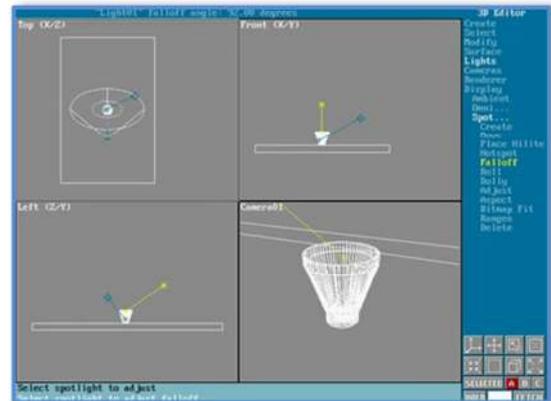


Figura 3:1 Interface do 3D Studio 4.0 para DOS. Fonte: Valcaron, 2009.

Desde então, soma-se catorze versões lançadas. Neste tempo o 3ds Max sofreu inúmeras modificações: a evolução é fortemente percebida entre cada versão, sempre visando o aumento da produtividade. Foram acrescentadas ferramentas para trabalho com Nurbs, efeitos volumétricos, luzes fotométricas e iluminação indireta, objetos arquitetônicos e novos modificadores. Passou a ser vendido em versões de 32 bits e 64 bits, versões voltadas para o design e outra voltada para a visualização e entretenimento. Passou a interagir com outros programas da Autodesk. Recebeu a adição do menu quádruplo de contexto ao clicar no botão direito do mouse, o que agiliza muito a execução das tarefas, em especial na modelagem orgânica. Neste tempo a Kinetix se fundiu com a recém comprada Discreet Logic e em 2008 a Autodesk chamou para si novamente o nome do programa.

Em 1993 eram três grandes empresas de computação gráfica com softwares muito utilizados na indústria cinematográfica: o Advanced Visualizer , da Wavefront (nos EUA), o Thomson Digital Image (TDI) Explore (na França), e o Power Animator, da

Alias (no Canadá). Mas neste ano a Wavefront comprou a TDI e em 1995, a Silicon Graphics, outrora forte empresa na área de *workstations* voltados para computação gráfica, pressionada pela compra de um forte concorrente, o Softimage pela Microsoft naquele ano, comprou tanto a Wavefront quanto a Alias, criando a Alias|Wavefront e unindo as três tecnologias no mesmo pacote, o Alias Studio (para modelagem), que se tornou um dos mais populares da indústria cinematográfica da metade dos anos 1990, juntamente com o Softimage (para animação), da Microsoft e o PhotoRealistic RenderMan (para rendering), da Pixar Animation Studios.

Na época da fusão, a Alias estava desenvolvendo um produto, o Alias Sketch!, para o MacOS, cujo nome-código era Maya, ilusão em sânscrito. Nele havia uma parceria com os animadores da Disney, mas não havia transferência de tecnologia, apenas de experiência em animação. Com a fusão, decidiram manter a base deste software e a ele adicionar as propriedades dos demais. Inicialmente a linguagem para *scripts* seria a Tcl, mas por motivos de desempenho, trocaram pela Wavefront Sophia, a qual foi a base do atual MEL (Maya Embedded Language).

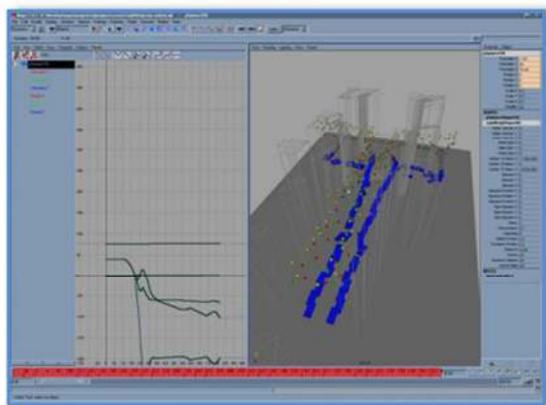


Figura 3:2 Primeira versão do Maya. Fonte: Lane, 2011.

Em janeiro de 1998 o Maya foi lançado (Figura 3:2) e todos os outros softwares da companhia foram descontinuados, sendo seus clientes encorajados a migrar, o que fez com que o programa já nascesse com uma boa participação no mercado e em grandes empresas.

Mais tarde a Alias|Wavefront passou a se chamar apenas Alias, mas em 2005 a Silicon Graphics, em má situação financeira, foi comprada pelo Fundo de Pensão dos Professores de Ontario e em outubro do mesmo ano foi comprada novamente, agora pela Autodesk, que completou sua fusão em janeiro de 2006. Na ocasião surgiram muitas especulações a respeito de uma possível fusão entre o 3ds Max e o Maya, mas a Autodesk preferiu manter suas características e desenvolvimento separados e alocá-los em nichos diferentes de mercado.

A análise das interfaces dos softwares e da filosofia de trabalho (tópico 3.1.1), e das suas ferramentas (tópico 3.1.2) foi realizada durante a construção dos modelos de teste (descrita tópico 3.2) e impressão destes modelos (apresentada no tópico 3.3).

3.1.1 INTERFACE E FILOSOFIA DE TRABALHO E FERRAMENTAS.

O estudo focou as opções que podem interferir no design dos objetos orgânicos. O objetivo não era o de avaliar essas ferramentas, mas de compará-las em busca da mais eficiente. Os testes, medições e averiguações foram efetuados antes, durante e depois da produção dos modelos de estudo relatados no tópico 3.2.

3.1.1.1 CONSUMO DE MEMÓRIA RAM

Durante os testes, no Windows 7, o Maya consumiu entre 24% e 39% menos memória que o 3ds Max, dados coletados pelo Medidor de Recursos, inerente àquele sistema operacional.

3.1.1.2 INTERFACE

3ds Max

Limpa e objetiva, mas o usuário iniciante pode ficar perdido procurando as ações, caso não conheça a forma de trabalho do software.

Maya

Poluída pelo excesso de ícones. Poderia ser interessante para quem está começando, porém deixa o usuário confuso.

3.1.1.3 CONTROLE DAS VISTAS

3ds Max

As opções de zoom, rotação da tela, enquadramento, *pan* e maximização da tela estão acessíveis no canto inferior, mas também podem ser acionadas por teclas de mouse e teclado. Outras opções podem ser acionadas em três menus derivados do nome e forma de visualização da vista. A alteração do layout das vistas fica

escondida nestes menus. Algumas opções como a visualização através da peça ficam escondidas nas propriedades do objeto, porém permitem a edição por objeto. As visualizações em *wireframe* e *shaded* podem ser acionadas pelas teclas de função do teclado. Não há forma de pré-visualizar a subdivisão de faces pelos atalhos de teclado.

Há três modos de giro da visão cuja seleção fica um pouco escondida. O primeiro foca na origem do espaço, o segundo foca no objeto e o terceiro no subobjeto. Como este último funciona também com objetos, os dois primeiros perdem sua função e são confusos, no entanto, por padrão, o primeiro modo, o mais problemático de todos é o que inicia ativado.

Cada objeto é criado com cores diferentes para diferenciar um do outro durante a construção. Também é possível definir a cor do *layer* como a cor a ser utilizada. No entanto, para modificar as propriedades dos *layers* é necessário, no mínimo dar dois cliques. Além disso, se o menu de *layers* estiver ativado, não será possível girar a visão ou realizar outras ações até fechar esse menu.

Os efeitos de qualquer alteração gerada por um modificador podem ser ligados e desligados a qualquer instante, inclusive a subdivisão da malha.

Maya

As opções de zoom, rotação da tela, enquadramento, *pan* e maximização da tela só podem ser acionadas por teclas de mouse e teclado. Outras opções podem ser acionadas na barra de ícones de cada vista, mas afetam todos os objetos. A alteração do layout das vistas é facilmente acionada no menu das ferramentas de manipulação. As visualizações em *wireframe* e *shaded* podem ser acionadas pelas teclas numéricas acima das letras do teclado. Essas primeiras teclas permitem pré-visualizar como o objeto ficará após a subdivisão de faces.

A tecla de atalho para o foco em um objeto/elemento desloca o centro de rotação da visão para aquele elemento, permitindo que, mesmo na visão cônica, possa-se girar a visão sem problemas.

Cada objeto é criado com a cor do *layer* dificultando a diferenciação em cenas mais complexas. Mas pode-se ligar e desligar a visibilidade dos *layers* com apenas um clique.

Com simples toques nos números do teclado é possível pré-visualizar como o objeto ficará quando acionada a subdivisão da malha. Esse *preview* é mais leve e rápido que a operação

3.1.1.4 ACIONAMENTO DOS COMANDOS

3ds Max

Baseada no painel lateral, onde é possível escolher a ação (criar, modificar, animação etc.) e escolher suas opções. As ações também podem ser chamadas a partir da barra de menu superior ou da barra de ferramentas. Novos ícones podem ser acionados a qualquer barra de ferramentas (existem outras escondidas) através do botão direito que dá acesso a um menu de opções (visualizar outras barras, deletar botão, editar aparência, editar script, editar barra etc.). Também através de botões de setagem que mostram as modificações causadas pelas opções escolhidas em tempo real na tela enquanto se define as configurações desejadas. Os *spinners* ajudam e agilizam bastante, pois permitem testar valores arrastando o mouse enquanto se observa seu efeito na tela. Os atalhos de teclado geralmente são bem posicionados, consideram que o operador está com a mão direita sobre o mouse e a esquerda na área esquerda do teclado.

Maya

As ações podem ser acionadas através de ícones na barra de ferramentas e na barra de abas, separadas pela área de atuação e pela barra de menus, que pode ser alterada pelo usuário conforme o tipo de objeto a ser trabalhado (Nurbs, polígonos etc.) através de um menu desdobrável. Esses menus são destacáveis facilitando o repetido acionamento dos mesmo comandos. Novos ícones podem ser adicionados à barra de abas arrastando-se um script para ela. Os comandos podem ser acionados a partir de janelas de configuração, mas não há *feedback* quanto às configurações efetuadas antes de se confirmar o comando. Ao se deslocar um *slider*

não se visualiza qualquer variação do efeito na área de trabalho. Um botão Aplicar, nestes janelas permite que ela continue aberta enquanto se escolhe outros objetos para repetir o comando. Os atalhos de teclado se espalham pelo mesmo obrigando o operador a parar para ver onde está apertando, já que sua mão deve percorrer o teclado várias vezes. Os comandos da barra de menus também não mostram os atalhos de teclado para aqueles comandos, como é padrão em diversos sistemas operacionais de hoje.

3.1.1.5 EDIÇÃO DE MODIFICAÇÕES

3ds Max

A modificação se dá através de uma pilha onde se enfileiram os modificadores atribuídos. A qualquer momento é possível retornar a estes comandos e editar seus parâmetros, ou seja, o fluxo de trabalho não é destrutivo.

Não há como retornar as configurações das ferramentas ao seu estado original. Pode-se resetar todo o software a qualquer momento, o que difere de criar uma nova cena, que mantém as opções da última ativadas, mas não é possível realizar essa ação individualmente para cada ferramenta.

Como separadores decimais só aceita o que estiver como padrão do sistema operacional, no entanto, é possível realizar cálculos simples diretamente no campo de inserção de valores. Por exemplo, ao digitar o [valor do diâmetro]/2, tem-se o texto convertido automaticamente para o raio. Se se digita uma medida em outra unidade que não a que está sendo utilizada, ela é automaticamente convertida para a usual do projeto.

Maya

As modificações se acumulam em um histórico que pode ser apagado, mas apenas alguns comandos podem ser editados, o que não atrapalha no design de produtos orgânicos para a prototipagem rápida, que quase sempre se dá em cima de um único objeto, mas para criação de modelos mais técnicos e cenários isso é problemático.

Algo muito interessante é que todas as ferramentas possuem opção para resetar suas configurações ao seu estado original. Para o usuário iniciante isso dá a segurança para testar a ferramenta e retornar ao seu ponto inicial a qualquer momento.

Outro ponto forte é aceitar ponto ou vírgula como separadores decimais, mas não aceita valores em unidades diferentes das que estão sendo utilizadas, nem permite cálculos rápidos nos campos de inserção.

3.1.1.6 FEEDBACK

3ds Max

As alterações nos comandos e opções dos modificadores são mostradas em tempo real durante a escolha do valor e/ou antes da confirmação do comando. Poucas instruções básicas são dadas na barra de status. O cursor muda conforme o tipo de objeto ou subobjeto sobre o qual está, permitindo ter certeza se está selecionando um vértice ou um ponto de uma aresta próximo a ele, por exemplo. Mas não há qualquer contramedida a uma alta solicitação de subdivisão de malha, nem resposta durante o cálculo.

Maya

Muitas ferramentas têm instruções na barra de status. Nos processos de criação de sólidos a instrução aparece no centro da janela. O cursor muda quando se deve selecionar um elemento, mas não há *feedback* quanto se está sobre um objeto, um elemento ou o tipo de elemento nem durante a configuração de uma ferramenta. A grande maioria dos comandos e ferramentas não mostra qualquer *feedback* anterior à confirmação do comando, ou seja, não é possível saber com antecedência se as configurações escolhidas são as mais indicadas aquela situação antes de se acioná-la. Ainda há outras ferramentas, que possuem manipuladores cuja interatividade só funciona se o *Construction History* estiver ligado.

Existe uma operação que costuma travar todos os softwares quando acionada pela primeira vez: definir o número de subdivisões de um objeto. Valores acima de 3

tendem a consumir todo o processamento e memória, levando ao travamento. No Maya existe um aviso de excesso de *smooth* que solicita confirmação avisando o mal que pode acontecer.

3.1.1.7 MENUS DE CONTEXTO

3ds Max

O botão direito do mouse aciona um menu com quatro painéis. Cada painel é voltado para um determinado conjunto de ações: dois para ferramentas (que muda conforme o que é clicado), um para visualização e outro para manipulação e propriedades. Se uma opção tiver subopções, elas são chamadas ao passar o mouse sobre a opção abrindo outro painel lateral, próximo, sem fechar o menu original. Outros menus de contexto podem ser acionados com o acionamento combinado ou isolado das teclas Ctrl, Alt e Shift, cobrindo rapidamente as principais funcionalidades, mas, neste último caso, exige a memorização de qual contexto se quer chamar. As opções podem ser acrescentadas ou retiradas na área de customização da interface.

Maya

O botão direito do mouse aciona um menu com opções radiais que chamam os elementos. Abaixo fica um outro menu com uma lista de comandos. Acionando combinadamente ou isoladamente com as teclas Ctrl e Shift, o menu radial altera para outros com os principais comandos utilizáveis com aquela seleção. Passando o mouse sobre uma das opções oferecidas, o menu radial muda subopções, caso haja. A barra de espaço reproduz radialmente os menus da barra de menus. No entanto, são tantas opções que pode deixar o usuário perdido, sendo mais útil destacar o menu pretendido.

3.1.1.8 ACIONAMENTO DOS SUBOBJETOS/ELEMENTOS

3ds Max

No painel lateral, através do sinal “+” ao lado do nome do modificador na pilha. Pelos números sobre as letras no teclado (a ordem em que cada subobjeto aparece no

modificador indica o número que deve ser acionado). Podem ser acionadas pelo menu de contexto do mouse. No *Edit/Editable Mesh/Poly*, também podem ser acionados através dos ícones que aparecem no painel lateral.

Para trabalhar com subobjetos de diferentes objetos é necessário escolher um deles e anexar os demais com o comando *Attach* ou com o *Attach Multiple / Attach List* para anexar a partir da lista de objetos. Da mesma maneira é possível isolar um subobjeto do objeto através do comando *Detach*.

Maya

Pelo menu de contexto do mouse. No caso da edição de polígonos, pode ser acionada por atalhos de teclado (teclas de função).

É possível trabalhar com elementos de diferentes objetos simultaneamente. Para os comandos que não permitirem esta facilidade, existe o comando *Combine*, que unifica as peças em um único objeto. A operação inversa é conseguida pelo comando *Separate*, para peças que não se tocam, e pelo comando *Extract*, para quaisquer elementos.

3.1.1.9 REPETIÇÃO DO COMANDO

3ds Max

Se o último comando foi chamado a partir do menu de contexto do mouse, ele pode ser chamado novamente clicando-se no título do painel onde se encontra o comando que fica sempre no ponto mais próximo àquele onde o mouse foi acionado (os últimos comandos de cada um dos quatro painéis fica destacado em outra cor). Entre as opções do *Edit/Editable Poly* existe um botão que repete a última ação, porém com exatamente os mesmos parâmetros.

Maya

O último comando pode ser acionado novamente pelo ícone na barra de ferramentas ou pelo atalho de teclado “g”. É muito prático e eficiente.

3.1.1.10 CANCELAMENTO

3ds Max

O cancelamento dos comandos acionado pode ser feitos pela tecla Esc, pelo botão direito do mouse ou pelo botão X que aparece no menu de janela flutuante.

Maya

O cancelamento se teclando “~” ou dá acionando outro comando, como mover.

3.1.1.11 SNAP

3ds Max

Doze opções de *snap* de posição, mais o *snap* de rotação por ângulo, o de escalonamento por porcentagem e o dos *spinners* por valor (fracionário ou inteiro). Acionados por botões na barra de ferramentas, atalhos de teclado ou pela barra de menu. São editáveis pelo botão direito do mouse sobre estes botões ou pela barra de menu. Algumas definições do snap selecionam objetos indesejáveis como *vertex* que pode acionar um vértice de um objeto, de uma linha ou de outros objetos.

Maya

São cinco opções de posicionamento que podem ser acionados pela barra de ferramentas, pela barra de menu ou por atalhos de teclado (nesta última opção, pode ser acionada durante um comando), incluindo uma que utiliza a superfície de outro objeto. O Snap é inteligente e preciso. Não é atrapalhado pelos vértices das estruturas 3D que estão próximas.

3.1.1.12 IMPORTAÇÃO / EXPORTAÇÃO

3ds Max

São 23 formatos de arquivos⁹ para importação de objetos 3D e 2D, incluindo STL (para prototipagem rápida), IGES (para Nurbs), IPT (do Autodesk Inventor). A importação pode ser realizada de três maneiras: importar (cria uma nova cena), mesclar (une a cena atual à nova) e substituir (troca os objetos). Alguns formatos permitem escolher quais objetos deverão ser importados e como se comportarão ao chegar ao programa.

São 18 opções de exportação de arquivos⁹ de terceiros para importação de objetos 3D e 2D, incluindo STL (para prototipagem rápida), IGES (para Nurbs), VRML e W3D (para web).

As listagens de formatos podem ser ampliadas com *plugins* externos.

Maya

Também existem 23 formatos de arquivos⁹ de terceiros para objetos 3D e 2D, incluindo STL (para prototipagem rápida), IGES (para Nurbs), e MODEL e CAT-PRODUCT (do Dassalt Systems Catia). Os objetos podem ser agrupados automaticamente após a importação.

São 17 formatos de arquivos para exportação, na teoria. A operação só apresenta 2 formatos, mesmo tendo sido realizado e checado o carregamento dos *plugins* de exportação.

As listagens de formatos podem ser ampliadas com *plugins* externos.

3.1.1.13 HELP

3ds Max

O help do 3ds Max é bem completo. Possui alguns tutoriais para iniciantes em vídeo e quase todos os comandos e ferramentas apresentam descrição, passo-a-passo de utilização e imagens que demonstram seu uso e exemplos de resultados, chegando

⁹ Arquivos de animação, de imagens e arquivos de formato próprio não foram considerados.

ao ponto de mostrar a imagem do botão que deve ser acionado e exemplos gerados utilizando-se determinados valores. Um ponto negativo foi a adoção nas últimas versões de deixá-lo na web. Se por um lado permite que se possa acessá-lo sem ter o programa instalado, além de mantê-lo sempre atualizado, para a maioria das consultas, o processo se torna extremamente lento, mas é possível baixar uma versão *offline*.

Maya

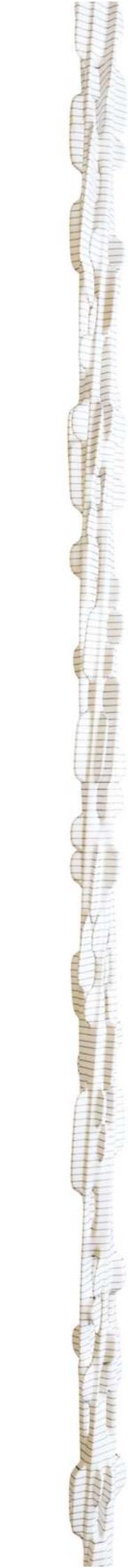
O help do 3ds Max é completo. Possui alguns tutoriais para iniciantes em vídeo e todos os comandos e ferramentas apresentam descrição, muitos possuem um passo-a-passo de utilização, mas poucos apresentam imagens que demonstram seu uso e exemplos de resultados. Apresenta outro ponto negativo, o mesmo encontrado no 3ds Max: a adoção nas últimas versões de deixá-lo na web. Se por um lado permite que se possa acessá-lo sem ter o programa instalado, além de mantê-lo sempre atualizado, para a maioria das consultas, o processo se torna extremamente lento, mas é possível baixar uma versão *offline*.

3.1.2 FERRAMENTAS

3.1.2.1 SELEÇÃO

3ds Max

A seleção pode ser feita pelo menu Edit, pelo nome do objeto (embora o carregamento da janela de seleção seja muito lento) clicando sobre o (sub)objeto ou através do desenho de uma forma geométrica de seleção (retângulo, círculo, polígono, desenho à mão livre ou tocando nos objetos simulando uma pincelada), a qual podem ser configurada para considerar objetos envolvidos ou apenas interceptados. A seleção pode ser filtrada pelo tipo de objeto. Também pode-se filtrar na janela de seleção pelo nome acionando os ícones dos tipos de objetos desejados. Além disso, o 3ds Max possui um sistema de *layers* consistente, pelo qual é possível separar, selecionar e organizar os objetos.



Na edição de malhas, é possível selecionar os vértices, as arestas, a coleção de arestas das bordas, as faces e o elemento completo. Em todos estes níveis é possível filtrar as faces de trás. As faces e as arestas podem ser selecionadas por um dos vértices. As faces ainda podem ser selecionadas pelo ângulo entre elas. Qualquer seleção de faces pode ser expandida (*grow*) ou reduzida (*shrink*). As seleções de arestas podem ser expandidas às suas paralelas (*ring*) ou às suas contínuas (*loop*). Algumas seleções de subobjetos podem ser convertidas para outros subobjetos. Atalhos de teclado facilitam essas opções.

Na edição de linhas, é possível selecionar os vértices, as arestas e toda a linha. Ainda é possível selecionar os vértices clicando em uma das metades de uma aresta ou ainda todos os vértices dentro de uma determinada área.

Nas superfícies Nurbs é possível selecionar os pontos de controle e a própria superfície. Não é possível selecionar os vértices.

Nas curvas Nurbs é possível selecionar os pontos de controle, os vértices da linha e a própria linha.

O 3ds Max conta ainda com um sistema de nomeação de seleção que cria uma lista de coleções objetos selecionados. Se determinados conjuntos de objetos ou de subobjetos são frequentemente selecionados, eles podem receber um nome e assim serem selecionados novamente a qualquer momento.

A seleção suavizada é exibida em tempo real enquanto se altera o diâmetro e as opções da seleção. O gráfico pode ser alterado pelos seus parâmetros ou personalizado livremente (embora essa última opção fique bem escondida), e a seleção pode ser feita por pintura, a qual pode ser visualizada tanto pela seleção das arestas quanto pela alteração das cores do preenchimento das faces. A seleção também pode ser espelhada.

Clicando-se no mesmo local, o software estabelece um ciclo de seleções permitindo alcançar subobjetos ou objetos que se encontram por trás, na visão atual.

A todo momento há um *feedback* do número de objetos ou subobjetos selecionados, ou na barra de status ou no painel lateral.

Os *layers* podem ser congelados permitindo o *snap*, mas não a seleção dos objetos.

Maya

A seleção pode ser feita pelo nome do objeto em uma janela de abertura rápida e que pode ser fixada na lateral da tela, agilizando o trabalho com vários objetos. Também pode ser efetuada clicando sobre o objeto ou através do desenho de uma forma geométrica de seleção, mas só há as opções desenho à mão livre e pintura. Não se pode configurar para considerar objetos envolvidos ou apenas interceptados. A seleção pode ser filtrada pelo tipo de objeto.

Na barra de menus existe um menu Select, mas ele não contém todas as formas de seleção, algumas aparecem no menu Edit, um conflito entre uma solução própria e o padrão do sistema operacional. Além disso a organização em layers não permite visualizar que objetos estão em quais *layers*, e ainda é confusa a transferência dos mesmos entre as camadas.

Na edição de malhas, é possível selecionar os vértices, as arestas, as faces, uma combinação entre faces e arestas, as coordenadas de mapeamento. Em todos estes níveis não é possível filtrar as faces de trás, embora possa-se optar por não mostrá-las. As faces e as arestas podem ser selecionadas por um dos vértices. As faces ainda podem ser selecionadas pelo ângulo entre elas. Qualquer seleção de faces pode ser expandida (*grow*) ou reduzida (*shrink*). As seleções de arestas podem ser expandidas às suas contínuas (*loop*), com apenas dois cliques, ou às suas paralelas (*ring*). Todas as seleções de elementos podem ser convertidas em outros elementos.

Nas superfícies Nurbs é possível selecionar os pontos de controle, as *isoparms* e/ou qualquer ponto em qualquer local da superfície.

Na edição de curvas, é possível selecionar os vértices, os vértices de controle e/ou qualquer ponto em qualquer local da linha.

Assim como o 3ds Max, o Maya conta com um sistema de nomeação de seleção que cria uma lista de coleções objetos selecionados. Se determinados conjuntos de objetos ou de subobjetos são frequentemente selecionados, eles podem receber um

nome e assim serem selecionados novamente a qualquer momento. Se por um lado esses conjuntos aparecem na janela *Outliner* permitindo fácil seleção, por outro o comando de criação da lista fica escondido na barra de menus.

A seleção suavizada não é exibida em tempo real, apenas quando se solta o mouse após a alteração nos parâmetros da ferramenta. O gráfico pode ser facilmente personalizado e a seleção pode ser feita por pintura. A seleção também pode ser espelhada.

Não há como selecionar subobjetos ou objetos que se encontram por trás, na visão atual, mesmo em *wireframe*.

A quantidade de objetos selecionados pode ser visualizada, mas a opção fica um pouco escondida na barra de menus e não considera elementos de curvas.

Os *layers* são dotados dos modos *template* e *reference*. No primeiro modo, os objetos podem ser vistos mas não podem ser selecionados ou utilizados para o *snap*. No modo *reference*, pode-se utilizar o *snap*, mas não se pode selecionar os objetos nem modificá-los.

3.1.2.2 MANIPULAÇÃO

3ds Max

As manipulações podem ser restritas a determinados eixos clicando neles. Em qualquer vista é possível restringir as manipulações a qualquer eixo ou qualquer combinação simultânea entre eles através dos ícones dos eixos e/ou alterá-las (mesmo durante um comando) pelas teclas de função do teclado, passando entre os eixos individuais pelas três combinações possíveis de dois eixos ou a totalidade dos três eixos. Os eixos podem variar entre 8 opções, incluindo a que utiliza outro objeto como centro, uma que utiliza um *grid* secundário personalizável e outra que altera temporariamente sua posição. Os manipuladores permitem que se possa clicar para selecionar o subobjeto desejado e arrastar na mesma hora para já editá-lo, o que agiliza a edição de vários componentes em série.

Se o manipulador atraparhar uma ação com um subobjeto vizinho, por exemplo o eixo Y aparecendo sobre o vértice que superior ao selecionado, é possível desligar temporariamente a interação com o manipulador, mantendo suas propriedades.

A adição de objetos á seleção é feita segurando-se a tecla Ctrl, enquanto a subtração, pela tecla Alt. Algumas funções especiais, como selecionar arestas em *loop* ou *ring*, são acionadas pela tecla *Shift*.

Por conta da sua forma de seleção de subobjetos não é possível manipular elementos de objetos diferentes ao mesmo tempo.

Maya

A restrição aos eixos ocorre apenas com um eixo de cada vez, via ícone do mesmo. Os eixos podem variar entre 8 opções sendo uma delas personalizável pelo ângulo desejado em cada direção. Também há 3 opções para alinhá-lo a uma determinada aresta, ponto ou face.

Não é possível manipular um elemento ou objeto em mais de um eixo simultaneamente em vistas do tipo perspectiva. Deve-se acionar um eixo e, posteriormente completar a ação no outro eixo.

Para manipular é necessário clicar uma vez para selecionar o elemento desejado e outra para a manipulação. Quando se está manipulando uma sequência de elementos, isso reduz a velocidade de trabalho em relação a clicar e arrastar.

Não é possível desligar o manipulador temporariamente durante um comando. Além disso, alguns manipuladores interativos só funcionam se o *Construction History* estiver ligado.

A adição de objetos á seleção é feita segurando-se a tecla Shift, enquanto a subtração, pela tecla Ctrl. No entanto, dentro de uma janela, como a Outliner, a tecla de adição e subtração de seleção assume a padrão do Windows, o Ctrl.

É possível manipular elementos de objetos diferentes ao mesmo tempo.

3.1.2.3 CLONAGEM

3ds Max

Podem ser clonados sem relação entre cópia e original, com igualdade entre a cópia e o original ou com a cópia tomando o original como referência. Pode ser copiado no mesmo local ou, com a tecla shift acionada, durante um deslocamento, rotação ou escala, gerando uma progressão contínua entre as cópias (o número pode ser definido na hora). Pode gerar cópias ao longo do tempo, cópias espelhadas e uma matriz de cópias nos três eixos geradas tanto pelo total da manipulação ou pela diferença entre cada peça. Há ainda uma ferramenta para gerar e distribuir cópias ao longo de uma *spline* selecionada.

Maya

Podem ser clonados sem relação entre cópia e original, com igualdade entre a cópia e o original. Pode ser copiado no mesmo local ou, com medidas específicas de deslocamento, rotação e escala entre eles, mas gerando uma única cópia. Pode ainda gerar cópias espelhadas.

3.1.2.4 ALINHAMENTO

3ds Max

Pode alinhar em posição, rotação e escala ao mesmo tempo, mas não é interativo nem intuitivo. Possui ferramentas para alinhamento à visão, à normal, alinhar uma câmera a uma face e, alinhar uma lâmpada para que sua luz refletida em uma determinada face incida na câmera (esta última opção não influencia na prototipagem rápida, foi incluída apenas por fazer parte deste grupo de ferramentas). Há ainda uma opção para alinhamento rápido, centro com centro.

Maya

A ferramenta ativa uma caixa com ícones interativos indicando em tempo real o alinhamento desejado. Muito prático, mas trabalha apenas com a posição e não é capaz de trabalhar alinhando o eixo do próprio objeto.

3.1.2.5 CRIAÇÃO DE PRIMITIVAS

3ds Max

O 3ds Max conta com 22 primitivas 3D, 10 primitivas 2d, incluindo texto, e 5 formas bidimensionais mais usadas em projeto de produtos. 3 objetos portas, 6 objetos janelas, 4 objetos escadas, objetos para paredes (que interagem com as portas e janelas tendo suas faces cortadas automaticamente por estes objetos), cercas, árvores, hélices (2D e 3D), amortecedor e chaleira. 2 tipos de curvas Nurbs, mas todos os outros tipos de figuras bidimensionais podem ser convertidos para curvas Nurbs. Nurbs 3D, apenas do tipo plano, mas quase todos os tipos de primitivas 3D podem ser convertidas para objetos Nurbs e os que não podem, podem ser convertidos para objetos do tipo *patch* e então convertidos para Nurbs, mas com perdas de propriedades.

Um ponto negativo é que, durante a criação de um objeto, a visão não pode ser alterada, caso contrário, a criação é interrompida naquele instante. Além disso, como é possível selecionar o que está por trás, a criação também pode pegar algum elemento posterior, se utilizado o *snap* em modo wireframe. Também não há uma ferramenta específica para a criação de gabaritos de referência, exigido que se trabalhe com planos e *UVW map*.

Maya

Existem 10 primitivas 3D, 4 sólidos platônicos (mas sem possibilidade de edição dos seus parâmetros de formação), mola e uma bola de futebol. 1 primitiva 2D (curva bézier). 6 primitivas Nurbs 3D e 8 2D, incluindo ferramenta de criação “à mão livre”. Um ponto estranho é que o eixo dos objetos Nurbs são sempre criados na origem, o que atrapalha a posterior manipulação dos mesmos.

Um ponto muito positivo é que o comando de criação de linhas Nurbs só finaliza quando se aciona um botão, permitindo manipular as vistas enquanto se desenha.

Outro ponto positivo é a criação de gabaritos para modelagem simplesmente indicando esta opção dentro do menu *View* de cada vista, embora o plano criado

não seja tão fácil de manipular nem possua boa precisão dimensional além de sua unidade em píxeis.

3.1.2.6 OPERAÇÕES BOOLEANAS

3ds Max

As operações incluem união, subtração, intersecção, mesclagem (cria arestas nos objetos interceptados no plano de interceptação), anexagem (mesmo que união, mas mantém os objetos separados) e inserção (simula um objeto sendo inserido em um líquido). Ainda possui as opções *cookie* (apaga as faces interceptantes dos objetos após a subtração) e *imprint* (projeta a forma do objeto contra a superfície do outro).

Maya

As operações incluem união diferença e intersecção.

3.1.2.7 EXRUDE E BEVEL

3ds Max

São comandos separados. Podem ser acionados separadamente na forma de um modificador adicionado à pilha (mediante a adição anterior de um modificador de seleção) ou de dentro de um dos subobjetos de um Edit/Editável Poly/Mesh. Neste último caso podem ser acionados diretamente com manipulação na tela ou chamando a tela de opções que abre sobre a janela de trabalho. Através desta última opção é possível manipular com precisão a ação tendo um *feedback* em tempo real, também é possível, quando trabalhando com mais de uma face ao mesmo tempo, escolher se a operação se dará em uma única direção, na direção das normais das faces (expandindo ou contraindo elas, conforme a geometria – convexa ou côncava) ou na direção das normais das faces, gerando resultados independentes. Quando se atua sobre arestas ou vértices, pode-se definir a largura de uma base. Nesta janela ainda é possível adicionar outra operação sobre a efetuada.

A manipulação da face extrudada/bevelada só pode ser realizada durante próxima extrusão ou após o encerramento da operação. Existe a opção de extrusão ao longo de uma linha, mas em uma ferramenta isolada, completando assim três ferramentas. Ainda há uma ferramenta separada para o bevelamento sem altura (inset).

Maya

Trata-se de um único comando com as duas funções. A manipulação é interativa e permite mover, rotacionar e escalonar (daí o bevel) a face trabalhada. Em conjunto com a tecla de repetição, pode-se adicionar outras extrusões ou bevelamentos.

A janela de opções não é interativa, mas trás precisão ao comando, o que a torna o oposto da versão interativa, a qual diminui a precisão.

Extrude não possui as opções grupo, normal ou individual, Porém é possível ligar ou desligar a opção *Keep Faces Together* no alto do menu *Edit Mesh*, antes da operação. Depois da operação, a alteração do estado pode ser realizada pelo histórico do objeto.

No *Extrude* do Maya não nem a opção da criação da base para arestas e vértices, mas está presente a extrusão orientada por uma linha.

3.1.2.8 ESPESSURA

3ds Max

Possui o modificador *Shell* que permite criar espessura em objetos com uma única superfície. Essa espessura pode ser interna ou externa, pode-se controlar o número de segmentos e o bevelamento da borda.

Maya

É possível criar espessura de formas simples utilizando o comando *Extrude*, herdando suas vantagens e desvantagens, mas deforma a malha quando lidando com formas mais complexas.

3.1.2.9 CONEXÃO DE ARESTAS E FACES

3ds Max

O comando *Connect* permite conectar arestas, em suas propriedades pode-se configurar o número de arestas, a distância entre elas, o deslocamento entre elas e delas ao centro das arestas conectadas, tudo com *feedback* em tempo real.

Também é possível cortando as faces com *feedback* do subobjeto que se está contando (vértice, aresta ou na face). Clicar na face gera arestas que ligam o vértice criado até os mais próximos. Há uma ferramenta para um plano de corte que gera arestas em toda a peça (*Slice Tool*), bem como a opção para manipular esse plano antes do corte (*Slice Plane*) (com pré-visualização de onde o corte estará). Essa ferramenta também permite dividir o elemento em duas peças (*Split*).

As faces podem ser conectadas pelo comando *Bridge* que também atua sobre as bordas de arestas. É bastante flexível podendo definir interativamente quantas arestas serão criadas entre os subobjetos unidos, a tensão entre elas, o ponto onde ocorrerá esta tensão e se haverá torção. Não precisa haver paridade entre o número de faces dos subobjetos conectados nem precisam ser fechadas..

Maya

A principal ferramenta de corte o Maya, a *Interactive Split Tool*, tem uma opção muito interessante que é a de definir quantas subdivisões a aresta terá em seu *snap*. Assim é possível realizar o corte clicando exatamente em sua metade, ou 1/3, ou 1/4, ou 3/4 e assim por diante. Ela só confirma o corte após finalizar o comando, mas isso impede que se possa realizar cortes auto segmentantes. Outro problema é que a *Interactive Split Tool* não corta se o elemento estiver por trás de outro, mesmo em visão wireframe.

Não há *feedback* até que se tenha confirmado o corte. Não é possível inserir um corte até o meio de uma face, deve ser concluído até a próxima aresta. Há uma ferramenta para um plano de corte que gera arestas em toda a peça (*Cut Faces Tool*).

A conexão entre as faces ou bordas de arestas pode ser gerada pelo comando *Bridge*, mas no Maya ele depende da igualdade no número de arestas, as quais precisam ainda compor um polígono fechado. As alterações na janela de configuração só podem ser visualizadas depois da confirmação da ação.

3.1.2.10 SOLDAGEM E REMOÇÃO

3ds Max

A setagem de distância do *Weld* é interativa e permite visualizar seu efeito em tempo real. O *Collapse* tem a mesma função do *Weld*, mas não há tolerância de distância

O *Target Weld* não permite que mais de um vértice seja soldado simultaneamente ao desejado, também não realiza a ação se não houver uma aresta ligando os dois vértices envolvidos.

Deletar uma aresta mantém os vértices originais, exceto se não houver outra aresta ligada a ele. Não é possível soldar uma aresta pelo *Weld*, mas a ação é permitida pelo *Collapse*, que tem consequência semelhante quando aplicado sobre faces. Também é possível remover (*Remove*) a aresta ou deletá-la.

Remove é um comando presente tanto no subobjeto vértice quanto no aresta, mas o ato de trocar de subobjeto dá a impressão ao usuário que são dois comandos diferentes. Sua ação difere do ato de deletar (delete no teclado) o elemento. Esta última opção, gera uma abertura na malha.

Maya

A *Merge Vertex Tool* permite que vários vértices possam ser soldados de uma só vez a outro determinado e não depende de existência de aresta entre esses vértices.

Um único comando é usado para apagar arestas e vértices, o *Delete Edge/Vertex*. Nele, deletar uma aresta leva consigo vértices remanescentes. Usar a tecla Delete do teclado tem o mesmo efeito, exceto com faces, pois só então abre a malha.

O *Merge do Center* tem efeito semelhante ao *Collapse* do 3ds Max, mas não funciona com faces, neste caso deve ser usado o *Collapse* do Maya. Há ainda a ferramenta *Merge Edge*, mas esta tem efeito semelhante ao *Merge to Center*.

3.1.2.11 CHANFRO

3ds Max

O *Chamfer* no 3ds Max pode ser aplicado a arestas e a vértices. Ao vértice, cria tantos vértices quanto for o número de arestas que estavam ligadas a ele. Há a opção de manter a nova face criada ou removê-la. Quando aplicado a arestas, o *Chamfer* tem o mesmo efeito da aplicação sobre os vértices, alterando apenas o contexto, mas surge mais uma opção, a de gerar n novas arestas sobre a face criada. Novamente, todas as opções têm seu efeito visualizado na tela.

Maya

O *Chamfer Vertex* atua apenas nos vértices. Há a opção de remover a face criada, mas o comando não possui interatividade. Os vértices devem ser selecionados em antecedência e então sofrem o chanfro no valor que estiver escolhido nas opções da ferramenta. Qualquer alteração requer desfazer a ação e reaplicá-la.

3.1.2.12 CRIAÇÃO DE FACES E FECHAMENTO DE ABERTURAS

3ds Max

É possível fechar qualquer abertura na malha através do comando *Cap*, localizado dentro dos subobjetos *Border* e *Polygon*. O subobjeto *Border* por si só já é subobjeto dedicado ao trabalho com arestas abertas. Utilizando ele, pode-se localizar e selecionar rapidamente uma abertura na malha e logo em seguida fechá-lo com o *Cap*. Não foi percebida a falha de capeamento das duas aberturas que compartilham um vértice, como ocorreu com o *Fill Hole*, do Maya. Ainda existe um modificador *Cap Hole* capaz das mesmas ações, porém atuando em toda a malha de uma única vez e de modo dinâmico. Excelente se aplicado, por exemplo, após um modificador *Slice* para gerar o efeito de (des)materialização.

Uma outra opção é criar uma nova face com o comando *Create*, dentro do subobjeto *Polygon*. Com ele basta ir clicando nos vértices (*snap* automático) que delinearão a nova face e encerrá-la com dois cliques no último vértice.

Maya

Após selecionar um loop de arestas abertas com dois cliques em uma delas, o comando *Fill Hole* pode ser usado para fechá-las criando uma nova face. Percebeu-se que há uma limitação: se duas aberturas compartilharem o mesmo vértice, o Maya considera como uma única abertura, mas o *Fill Hole* não consegue fechá-la, nem em sua totalidade nem tratando isoladamente cada uma das áreas que compartilham o vértice.

O comando *Create Polygon* permite a criação de um novo polígono, mas desejando utilizá-lo para fechar uma malha, deve-se ativar o *Snap To Point*. Além disso, ele cria como um objeto a parte. É necessário então aplicar o *Combine*, soldar os vértices e suavizar a face com as vizinhas.

3.1.2.13 NURBS

Em termos de curvas Nurbs, os dois softwares são equivalentes com vantagem para o 3ds Max pela interatividade e *feedback* em tempo real. A operação *Join*, por exemplo, equivalente ao *Attach* do Maya, permite que se escolha qual lado da aresta deverá ser unida a qual da outra. A alteração do raio do *Fillet* é acompanhado da resposta visual enquanto se desliza o *spinner*, e ainda acrescenta opções de *Trim* automático da primeira e/ou da segunda linha.

No entanto, em termos de superfícies Nurbs, o Maya detém um maior número de comandos, como o *Stitch*, que aproxima e alinha as *isoparms* das superfícies criadas, e o *Reverse Surface Direction* que é capaz de trocar o lado horizontal pelo vertical sem alterar a forma do elemento, o que é útil para as posteriores uniões de superfícies.

Por outro lado, a interatividade em tempo real do 3ds Max ajuda em certas operações, já que se aciona o comando para depois escolher os operadores que



sofrerão a ação, ao contrário do Maya, no qual se seleciona antes de ativar o comando. Assim, em uma operação como a *Create Blend Surface*, é possível selecionar quais lados serão ligados das duas superfícies. A seu favor o 3ds Max ainda possui a grande variedade de primitivas, as quais podem ser transformadas em Nurbs, requerendo menos intervenções, porém, é incapaz de unir, por exemplo, a superfície do tampo de um cilindro à do seu corpo, embora em outras superfícies o tenha feito com maior precisão que as mesmas no Maya.

Outro ponto negativo no 3ds Max é que as linhas e colunas (*Row/Column* ou *Iso* – equivalentes às *Isoparms* do Maya) não são mostradas em seu número exato, elas podem ser apresentadas sob o número que o usuário desejar. Se isso é um ponto positivo em uma modelagem convencional, pensando em prototipagem rápida, que requer a união de todas as superfícies, isso atrapalha muito, pois requer que se cheque uma a uma antes do *Join*. Ainda quanto a visualização, no Maya as superfícies se mostram apenas pelas suas *Isoparms*, o que torna a interface mais limpa. No 3ds Max, optando-se por exibir apenas as *Iso*, não será possível visualizar o objeto em modo sombreado (*shaded*), mas se exibir a malha, a visualização ficará extremamente poluída pelas arestas criadas.

No entanto, a possibilidade de manipular as superfícies mesmo depois de criadas atribui um grande poder à edição de Nurbs do 3ds Max. Através deste recurso é possível trocar a ordem da seleção das linhas de uma superfície criada por *Loft* ou por *Birail*, por exemplo, permitindo inserir uma curva entre duas outras e assim redefinir a forma da superfície ou a direção de criação. Ainda é possível editar as tangentes e inverter o sentido em qualquer uma das conexões com as superfícies iniciais.

Um fator que deve ser levado em consideração é a mudança dos termos utilizados nos dois softwares para a mesma função. A Tabela 3:1 estabelece uma relação entre os principais deles. Muitos termos possuem a mesma nomenclatura nos dois softwares, como *Rebuild*, *CV Curve* e *Offset*.

3ds Max	Maya	3ds Max	Maya
Point Curve	EP Curve	Join	Attach
Lathe	Revolve	Break	Detach
Make Independent	Delete History	Attach	Não é necessário
Multisided Blend Surface	Boundary	Join / Zip	Connect / Blend
Create Cap Surface	Planar	Convert Curve / Convert Surface	Não é necessário
Sem correspondente	Stitch	Create Vector Projected Curve	Project Curve On Surface
Sem correspondente	Reverse Surface Direction	Create Normal Projected Curve	Sem correspondente
Create U/V Iso Curve / Create Surface Edge Curve	Insert Isoparms	Rows / Columns	Spams U/V
		Break Row / Column	Detach Surface
		Blend Surface	Project Tangents / Surface Fillet

Tabela 3:1 Comparação de termos usados na edição de curvas e superfícies Nurbs

3.1.2.14 EDIÇÃO DE LINHAS

O Maya apresenta uma ferramenta para desenho de curvas bezier e de curvas à mão livre. A primeira, juntamente com a ferramenta *Bezier Curve Tool*, permite construir qualquer desenho que a ferramenta *Line* do 3ds Max, mas há pouquíssimas opções de edição.

A *Line*, assim como o modificador *Edit Spline* que acrescenta suas funções a qualquer objeto 2D ou a conversão do objeto 2D para uma *Editable Spline*, trás ferramentas poderosas tanto para o desenho descompromissado quanto para o desenho de precisão.

As primitivas retângulo, círculo, arco, polígono, entre outras, em construção paramétrica trazem medidas precisas ao desenho. As ferramentas *Fillet*, *Chamfer* e o *Outline* (equivalente ao *Offset* das Nurbs), são interativos. O *Boolean*, o *Mirror*, o

Trim e o *Extend* possuem operações semelhantes das vistas nas curvas Nurbs do Maya. O *Connect* permite fechar uma linha de maneira interativa. O *Refine* acrescenta vértices melhorando a curvatura e o *Weld* une diferentes segmentos e pode ser ativado automaticamente de acordo com a distância.

Nesta área automatizada, também é possível selecionar um vértice apenas clicando na aresta em um ponto próximo a ele, o que impede de pegar o vértice errado nos pontos de convergência.

As primitivas do tipo *Extended Splines* agilizam a construção de formas tipicamente utilizadas no projeto de produtos, como a cantoneira em L e a em U, a viga T e a H, através da parametrização das características tipicamente editadas nestas peças, como largura, comprimento e raio das junções.

É importante ainda frisar características importantes para a modelagem por splines, obtida através de comandos como o *Cross Section* (interliga seções transversais, como o *Loft* do Nurbs), o *Cross Insert* (insere simultaneamente 2 vértices no mesmo ponto, mas um em cada aresta se elas se cruzam dentro de uma determinada tolerância) e o *Connect Copy* (permite criar uma cópia da forma pretendida já gerando as linhas de ligação, como se tirasse a cópia e depois aplicado o *Cross Section*, ou como um *Loft* do Nurbs interativo).

Há diversos modificadores aplicáveis a linhas. Os *Bevel*, *Bevel Profile* e *Sweep* apresentam controle e flexibilidade muito maior que o *Bevel* e o *Bevel Plus*, do Maya. O *Extrude* já cria as tampa da forma extrudada (ou não), economizando uma operação de capeamento, como acontece no Maya. O *Garment Maker* transforma as linhas em curvas de modelagem de tecido, utilizando o mesmo processo real de criação de roupas. E o *Lathe*, totalmente interativo e com opções para agilizar o posicionamento do eixo e manipulação direta do mesmo, se torna mais eficiente que o *Revolve* do Maya.

Finalmente, com os modificadores *Surface* e o *Edit Patch* é possível transformar a trama criada em *Patches*, através da criação de uma superfície guiada pelos quadriláteros e triângulos desenhados trazendo maior aplicabilidade às linhas e permitindo a construção de objetos orgânicos.

3ds Max

Para cada uma das ações o Max possui um modificador e/ou um comando. O modificador *Smooth* tem a mesma função do grupo de comandos *Smooth*, dentro do subobjeto *Polygon*, de um *Edit/Editable Poly*. Atua definindo quais faces devem ser suavizadas através da seleção dos grupos de suavização que cada uma terá. A suavização ocorre entre as que possuírem os mesmos grupos, mas não altera a topologia do objeto.

Os modificadores *Mesh Smooth* e *Turbo Smooth*, bem como a opção *Use NURMS*¹⁰ *Subdivision* dentro de um *Edit/Editable Poly* possuem basicamente a mesma função: subdividir a malha. O *Mesh Smooth* permite ainda a edição dos vértices, arestas e faces originais com consequências mostradas em tempo real. O efeito é semelhante aos pontos de controle das superfícies Nurbs ou os objetos do tipo *Subdivision Surfaces* do Maya. O *Turbo Smooth* não possui essa opção pois se destina a subdivisão em situações em que não ocorrerão edição da malha suavizada.

Ainda há o modificador *Tessellate*, que subdivide a malha, embora precariamente, e sem a opção de esconder a subdivisão, como acontece com os dois modificadores anteriores, mas é o único que pode atuar sobre *meshs*, *polys*, *nurbs* e *patches*, ou seja, é universal.

Já o modificador HSDS (*Hierarchical SubDivision Surfaces*) permite gerar a subdivisão de maneira heterogênea, escolhendo-se o grau de acordo com a necessidade de cada região do objeto.

O espelhamento pode ser conseguido através do comando *Mirror*, o qual possui os mesmos recursos da clonagem, acrescido do eixo de simetria (há ainda o modificador *Mirror*, porém com menos opções).

¹⁰ Non Uniform Racional Mesh Smooth – uma alusão ao termo NURBS, por produzir superfícies arredondadas como este, mas através da subdivisão da malha.

Uma opção mais refinada é o comando *Symmetry*, que permite a escolha do eixo e a soldagem automática, se os vértices se encontrarem dentro da tolerância determinada pelo usuário. O plano de simetria pode ser editado, como um subobjeto. Apesar da soldagem automática, como se trata de um modificador que fica acima da malha, esta permanece plenamente editável, ao mesmo tempo em que o espelhamento pode ser visualizado em tempo real e/ou pode ser retirado a qualquer momento, apenas retirando o modificador da lista.

Maya

A suavização no Maya é intuitiva e simples. As arestas selecionadas podem realizar a suavidade entre as faces, as quais elas dividem, ativada ou desativada através dos comandos *Soften Edge* e do *Harden Edge*, que atua exatamente onde se deseja o efeito.

O comando *Mirror* é semelhante ao do 3ds Max, ou seja, um comando de clonagem dotado de opção de escolha para o eixo de simetria. Porém não possui opção para deslocamento da cópia. Ela deve ser realizada posteriormente, através de seleção de elementos e movimentação dos mesmos.

O comando *Mirror Cut* atua como o *Symmetry* do 3ds Max: permite a escolha do eixo e a soldagem automática, se os vértices se encontrarem dentro da tolerância determinada pelo usuário. O plano de simetria pode ser manipulado. O que é estranho é que manipulando o objeto, movendo-o, rotacionando-o etc., o plano de simetria não acompanha o objeto, fica parado no ponto onde foi aplicado. Além disso, é difícil desfazer a ação ou alterar seu resultado posteriormente.

Um comando bastante interessante que é o *Subdiv Proxy*. Entre suas configurações estão, entre outras, opções para espelhar a peça e simultaneamente controlar o número de subdivisões e aplicá-las à peça e/ou ao espelhamento. O resultado pode ser visualizado ou escondido a qualquer momento e se altera conforme a edição da malha original. Durante os testes, no entanto, houve um momento no qual, ao reabrir o arquivo, a geometria espelhada e subdividida havia se fundido à original, perdendo a propriedade de edição da malha original e a atualização automática. Foi necessário localizar a original entre os elementos, isolá-la e extraí-la.

3ds Max

O 3ds Max possui uma ferramenta (*Measure*) para medidas máximas nos três eixos, área da superfície, volume e centro de massa, além de dar o comprimento de linhas.

Há uma outras ferramentas (*Helpers Standard*) para medição de comprimentos em linha reta (*Tape*) e para ângulos entre objetos (*Protractor*) e o comando *Measure Distance* que fornece a medida entre dois pontos e a variação entre suas coordenadas X, Y e Z.

Maya

A *Distance Tool* cria linhas de cota para distâncias retas. Os valores são mostrados diretamente na área de trabalho e giram automaticamente buscando estarem sempre visíveis.

A *Parameter Tool* permite posicionar um ponto ou medir as coordenadas em relação ao número de *isoparms* de uma superfície Nurbs.

A *Arc Length Tool* dá a distância de qualquer ponto em uma linha até seu ponto inicial.

3ds Max

O 3ds Max possui uma das mais importantes ferramentas para a prototipagem rápida, a *STL Check*. Ela checa se a integridade do modelo que será exportado está de acordo com o que é necessário para a prototipagem rápida. Entre suas tarefas, ele busca por aberturas na malha, faces duplicadas e posicionadas no mesmo local, faces isoladas com compartilham apenas uma aresta com o modelo e faces que compartilham mais de uma aresta. Se estes problemas não forem resolvidos o modelo não poderá ser exportado. Após identificá-los a ferramenta exibe em vermelho exatamente os pontos onde estão esses problemas para que o usuário possa e corrigi-los rapidamente.

Maya

Não há ferramenta específica para a checagem da malha para a exportação visando a prototipagem rápida, mas Brian Ringley (2011) lista alguns procedimentos que podem auxiliar neste procedimento. Inicia com o comando *Face Normals*, desligando o *Two Sided Lighting* para visualizar as normais das faces e verificar (visualmente) se há alguma invertida, voltada para o interior do modelo, então a inverte-se com o comando *Reverse*. Utiliza-se o *Fill Holes* para fechar os pontos abertos da malha. Para os sólidos propositadamente abertos é necessário incluir o comando *Extrude*, já que o Maya não possui algo similar ao *Shell* do 3ds Max, para dar espessura à forma. Então aplica-se a ferramenta *Cleanup*, a qual permite a correção de algumas das falhas mais comuns, como, faces duplicadas e posicionadas no mesmo local, arestas com comprimento zero e faces de área zero, buracos na malha, entre algumas outras. No entanto, não há *feedback* nem de onde os problemas se encontram, nem se foram resolvidos. O acionamento desta ferramenta também não é garantia de que os problemas sejam solucionados.

3.2 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

Nesta etapa, os modelos foram construídos utilizando os métodos de *poly modeling*, *spline modeling* e Nurbs, no 3ds Max e no Maya. A partir deles, foram exportados para o processo de prototipagem.

Nesta pesquisa, são chamados de objetos orgânicos aqueles em cuja modelagem não há obrigatoriedade de precisão nas medidas. Suas formas podem ser erguidas sem a necessidade de um desenho técnico, no sentido mais formal do termo, no entanto, quase sempre são utilizados desenhos de gabaritos contendo as formas principais do objeto final em vistas ortogonais. Quando aplicado à personagens, sua principal aplicação, esses gabaritos recebem o nome de *Model Sheet*. A modelagem orgânica também é utilizada em objetos de precisão, quando não se dispõe dos seus desenhos construtivos ou de suas medidas.

Para este estudo, o modelo construído seguiu a metodologia descrita por Dimas Rosa (2005), doutor pela Esthetique Technologies Et Creations Artistiques.

Université de Paris, para modelagem da figura feminina. Tal metodologia é extremamente detalhada e respeita nomenclaturas e formas da anatomia humana. Ao contrário da maioria, ela não começa a modelagem pelo tórax ou pelo quadril e segue para as extremidades do corpo. A metodologia de Rosa (*Op.cit.*) parte dos pés e sobe pelo corpo e membros superiores, finalizando com os detalhes da cabeça. A Figura 3:3 mostra a sequência de criação das partes do corpo que foi utilizada neste estudo.

Como esta metodologia aborda apenas um dos métodos necessários a este estudo, o *poly modeling*, neste estudo também buscou-se adaptar o processo de Dimas aos demais métodos, o *spline modeling* e o *nurbs*, utilizando o modelo gerado pelo processo original como referência para o posicionamento dos vértices e demais formas tridimensionais levantadas pelos demais métodos.

Houve algumas adaptações realizadas na metodologia inicial para agilizar o procedimento e melhorar a replicabilidade.

Nos próximos parágrafos e tópicos, serão descritas minuciosamente todas as alterações, bem como os testes e execuções das adaptações realizadas visando sempre uma possível reprodução dos experimentos.

As unidades padrão utilizadas foram o centímetro, em escala 1:1, para os comprimentos; o grau para as rotações e; a porcentagem, para as escalas. Neste



Figura 3:3 Sequência de criação das partes do corpo feminino na metodologia de Rosa.

Fonte: Rosa (2005)

texto, as dimensões serão abreviadas para C (comprimento – *length*), L (largura – *width*), H (altura – *height*) e R (raio – *radius*); os segmentos para SegC (segmentos de comprimento), SegL (segmentos de largura), SegH (segmentos de altura), SegCap (segmentos na tampa), Ld (lados), SubA (subdivisões ao redor do eixo) e SubH (subdivisões de altura). Já as coordenadas serão mostradas sempre na ordem X, Y e Z. No 3ds Max eles representam respectivamente, os eixos lateral, de profundidade e de altura¹¹, enquanto no Maya representam respectivamente, os eixos lateral, de altura e de profundidade. Algumas vezes as rotações aparecerão como rotX (rotação no eixo X), rotY (rotação no eixo Y) e rotZ (rotação no eixo Z).

Método	<i>Poly Modeling</i>	<i>Spline Modeling</i>	Nurbs
Software	3ds Max	Maya	

Tabela 3:2 Variáveis de criação dos modelos do estudo.

As construções seguiram as variáveis apresentadas pela Tabela 3:2. Desta maneira, a pesquisa necessitaria da construção de seis modelos: (a) em *poly modeling*, utilizando o 3ds Max; (b) em *spline modeling*, utilizando o 3ds Max, (c) em Nurbs, utilizando o 3ds Max; (d) em *poly modeling*, utilizando o Maya; (e) em *spline modeling*, utilizando o Maya e; (f) em Nurbs, utilizando o Maya. Os próximos tópicos abordarão as alterações realizadas na metodologia de Rosa (*Op.Cit.*) as adaptações e os testes para as outras técnicas.

3.2.1 POLY MODELING - 3DS MAX

Na etapa “Gabaritos do Corpo” da metodologia de Rosa (*op.cit.*), optou-se por utilizar um paralelepípedo de 170 cm de altura (com a opção *See-Through* ativada) como referência para a altura do personagem. O centro da base foi posicionado nas coordenadas 0,0,0. Para garantir a proporção da dimensão do gabarito, citada no

¹¹ As coordenadas X e Y das vistas não-perspectiva (sempre relativas à visão) do 3ds Max não serão utilizadas para não confundir os eixos Y (de uma vista frontal ou lateral) com o eixo Z (das perspectivas).

item 4, utilizou-se a opção *Bitmap Fit*, do modificador *UVW Map*, aplicado ao plano criado no item 3 da etapa. Assim, o plano gerado para a vista frontal possuía dimensões 185 x 168 (C x L), posição 0,481; 100; 86,8 (X; Y; Z) e rotação 90, 0, 0 (X, Y, Z). Para a vista lateral, 185 x 65 (C x L), posição 200; 0; 86,8 (X; Y; Z) e rotação 90, 0, -90 (X, Y, Z). O *UVW Map* apresentou dimensão 186,0 x 168,21 (C x L), mapeamento *Planar* com alinhamento em Z, nos dois casos. A disposição dessa configuração inicial é apresentada na Figura 3:4.

Na etapa “Pés – Dedos” da citada metodologia, optou-se por unir os dedos aos pés através do comando *Bridge*. Para isso, a seção de faces dos dedos mais próxima do pé foi retirada, assim como as faces às quais cada dedo seria ligado. As bordas criadas tanto nos dedos quanto no pé foram ligadas com o comando *Bridge*, sem subsegmentos. Esse processo tornou a operação mais rápida que o alinhamento dos vértices descrito pelo autor.

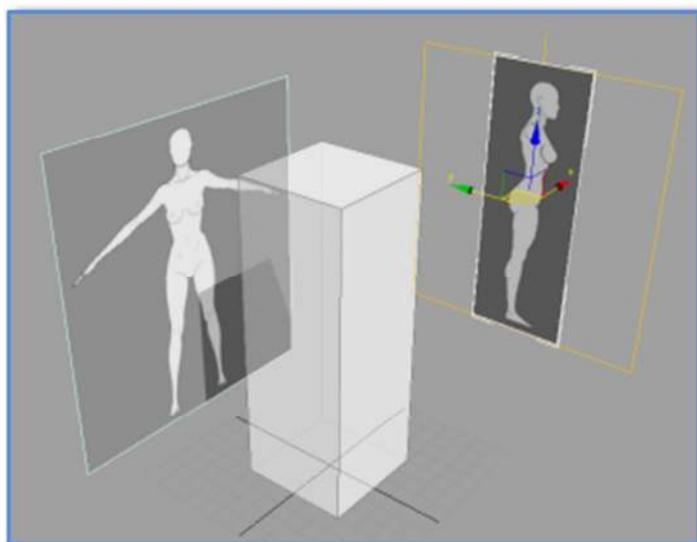


Figura 3:4 Disposição da configuração inicial dos planos gabaritos. Fonte: o autor, 2011.

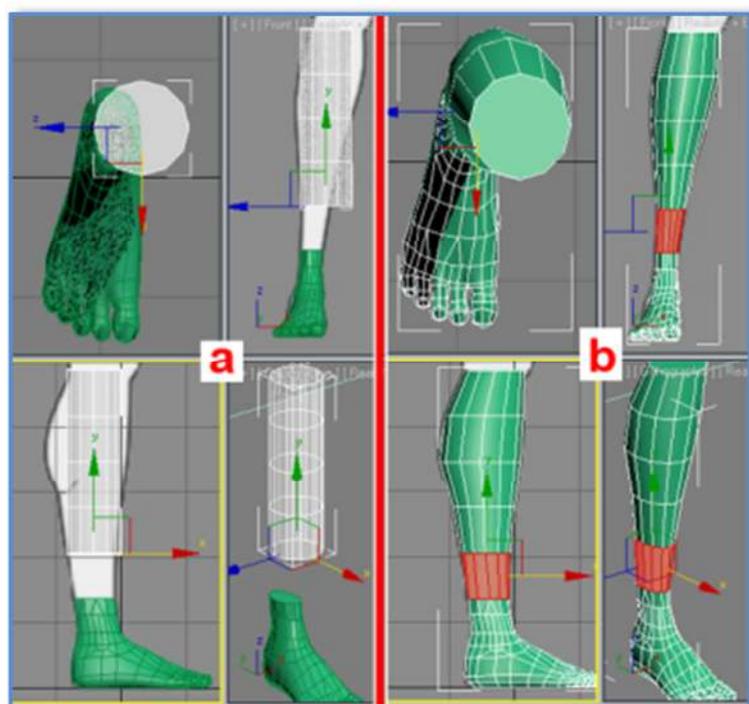


Figura 3:5 Edição de uma forma geométrica básica, substituindo uma sequência de extrusões. (a) colocação de um cilindro para modelagem. (b) cilindro modelado e unido ao pé pela ferramenta *Bridge*. Fonte: o autor, 2012.

Já na fase “Membros Inferiores – Pernas”, a etapa sete foi substituída pela colocação de um cilindro de R 4, H 28, segH 4, segCap 1 e Ld 12, na posição (X; Y; Z) 16,44; 4,16; 20,67. Esta forma foi transformada em *Editable Poly*, e modelada para as formas recomendadas utilizando apenas o escalonamento no eixo X do grupo de vértices de cada segmento horizontal e movimentação dos mesmos para o alinhamento com o gabarito. Esse processo foi realizado tanto na vista frontal quanto na lateral; o novo sólido foi anexado (*attach*) ao pé e então as faces foram unidas por *Bridge*, sem subsegmentos, como apresentado na Figura 3:5. Então se seguiu com as demais etapas.

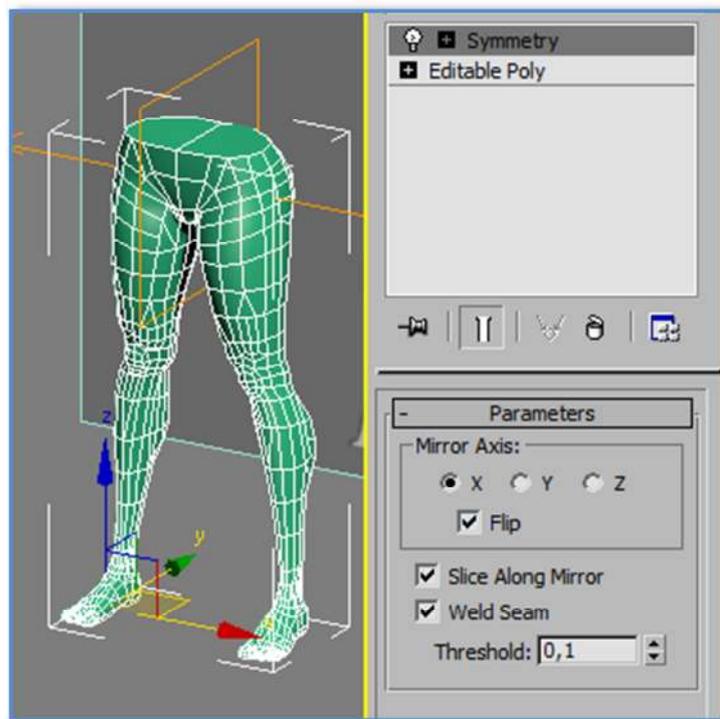


Figura 3:6 Modificador *Symmetry* substituindo a cópia espelhada em instância. Fonte: o autor, 2012.

A mesma intervenção foi feita na fase “Membros Inferiores – Joelhos” substituindo as etapas um, dois e três por um cilindro com as propriedades R 4,8; H 7,2; segH 3; segCap 1 e; Ld 12; posicionado em (X; Y; Z) -12,71; 2,326; 50,276. Com o mesmo procedimento, na primeira etapa de “Membros Inferiores – Coxas e Glúteos 1” foi utilizado um cilindro com as propriedades R 8; H 22; segH4; Ld 12. (X; Y; Z) -10,597; 0,876; 61,266.

Na etapa treze dos “Membros Inferiores – Coxas e Glúteos 2”, a operação de cópia espelhada baseada em instância foi substituída pela aplicação do modificador *Symmetry* com o subobjeto *Mirror* posicionado em (x,y,z) 0,0,90, *Mirror Axis* em X e as opções *Flip* (para inverter o eixo X), *Slice Along Mirror* (para cortar eventuais faces que tenham ultrapassado o eixo de simetria na coordenada x=0) e *Weld Seam* (para soldar automaticamente os vértices da emenda) ativadas e *Threshold* em 0,01 (uma margem de segurança para a união dos vértices que não afeta a precisão do modelo). Deste modo obteve-se o mesmo resultado do espelhamento copiado, porém, com a simulação da solda da emenda entre as duas partes, como pode ser

observado na Figura 3:6. Este procedimento também abreviou algumas fases da etapa final, “montagem cabeça e corpo”, como será descrito adiante.

Em “Costas e Abdômen”, as fases quatro, cinco, seis e sete, foram construídas através de um cilindro com características R 14, H 29, segH 7, segT 1, L 22; posicionado em (X; Y; Z) 0; 0; 103; rotacionado para 0; 0; 90 para garantir a simetria; escalonado para 63% em Y para alinhar os vértices ao topo da parte inferior do corpo. As bordas superior e inferior, bem como a lateral esquerda do corpo foram excluídas e o bloco foi unido a outra parte do corpo pelo *Bridge*, após o *attach*. O vértices então foram movidos como descrito na etapa seis. Na décima fase, foi utilizado um *Extrude* único de 10,5; Os segmentos intermediários foram acrescentados depois, através do comando *Connect* (no subobjeto *segments*) com valor 2 nos *segments*, -16 no *pinch*, e *slide* -50.

Na décima primeira e décima segunda etapas da fase “Seios”, trocou-se as duas extrusões por um bevel sem deslocamento lateral, o que o assemelha a um *Extrude*, mas agiliza o procedimento por deixar o comando ativo para o próximo nível do bevel. O primeiro *Extrude* foi substituído por um *Chamfer* nas arestas da base, como mostrado na Figura 3:7.



Figura 3:7 Na criação do mamilo, os dois *extrudes* e um *bevel* foram substituídos por dois *bevel* e um *edge chamfer*. Fonte: o autor, 2011.

Ainda na etapa doze desta fase, o ângulo medido através da ferramenta *Protractor* foi de 78° e não 90°, como sugerido pelo autor. A Figura 3:8 mostra o posicionamento da ferramenta para esta medição.

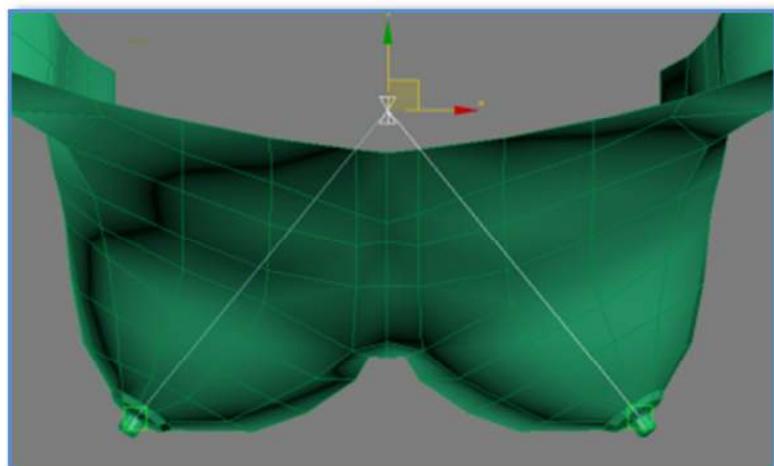


Figura 3:8 O ângulo medido entre os mamilos através da ferramenta *Protractor* foi de 78°. Fonte: o autor, 2011.

Outro cilindro foi posicionado na décima primeira etapa da fase “Braço e Antebraço” para agilizar a sequência de extrusões. Tal objeto foi configurado para ter R 3, H 30, SegH 6, Ld 8; e posicionado em (X; Y; Z) -33,4; 2; 128,63; e então rotacionado para (X; Y; Z) 0; -113,722; 0. Os ajustes da forma seguiram as instruções da etapa doze (Figura 3:9) e só então o sólido foi anexado ao corpo e unido ao braço pelo comando *Bridge*.

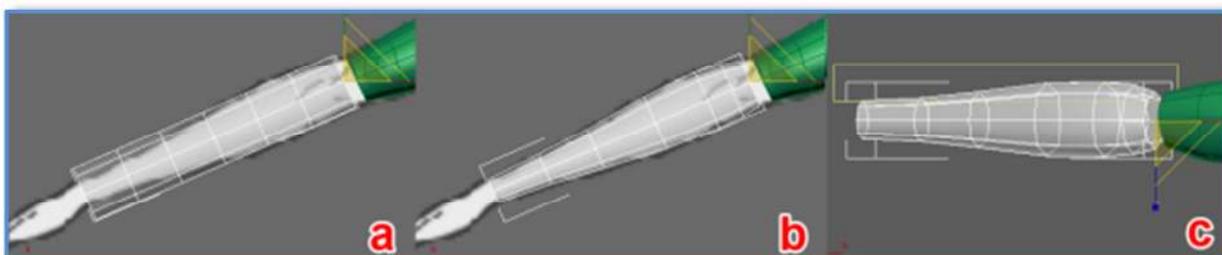


Figura 3:9 Operações de construção do antebraço aplicadas em um cilindro à parte. a) posicionamento; b) escalonamento frontal das seções transversais e; c) escalonamento superior.

Fonte: o autor, 2011.

O NGon tratado na vigésima primeira etapa da fase “Palma” foi construído sob raio 1,6 com 8 segmentos e foi posicionado em -64,5; -1,5; 114,0 (X; Y; Z) e rotacionado para 90; 0; -10 (x;y;z).

Semelhante ao processo de união dos dedos do pé, as quatro primeiras etapas da fase “Dedos 2” foram substituídas pelo uso da ferramenta *Bridge* contra a ferramenta

Weld, indicada pelo autor. Isto garantiu maior precisão na união dos dedos à palma e agilidade ao processo. A ação pode ser acompanhada na Figura 3:10.

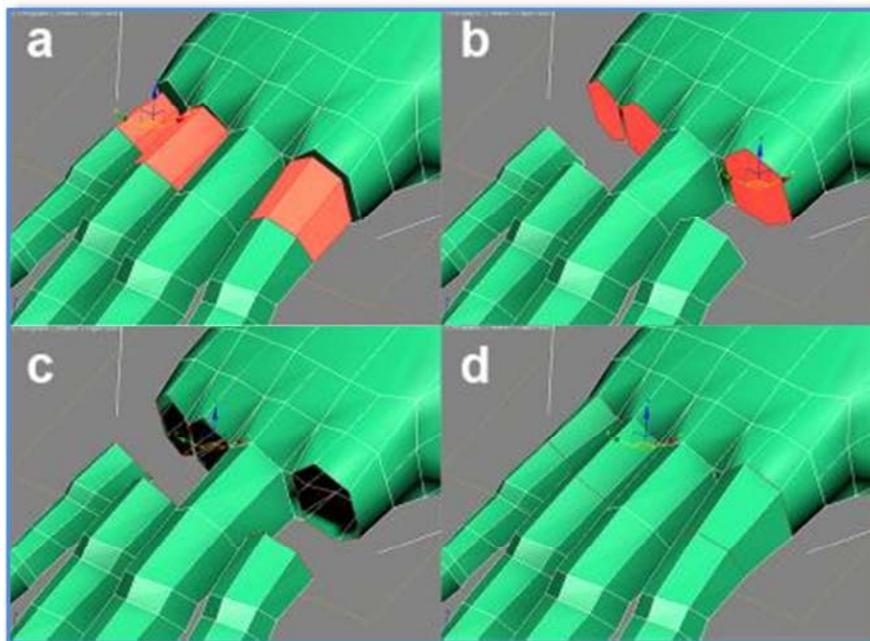


Figura 3:10 Uso do Bridge para unir os dedos à palma: a) as últimas faces da falange foram deletadas; b) as faces da palma foram apagadas; c) as bordas resultantes foram selecionadas e; d) os componentes foram unidos pelo Bridge.

Fonte: o autor, 2011.

Para a colocação dos gabaritos da cabeça, de forma proporcional às medidas utilizadas no corpo, foram utilizados planos de dimensões (C x L) 25,6 x 23,7 com o *Bitmap Fit* do modificador *UVW Map* aplicado de acordo com as imagens fornecidas por Rosa (*op.cit.*), “Gabarito_Cabeca_Frontal.jpg” e “Gabarito_Cabeca_Lateral.jpg”. O plano frontal, construído na vista frontal (rotação 90; 0; 0 – x;y;z), foi posicionado em (x;y;z) 0; 12; 158,217. O plano lateral foi construído a partir de uma cópia instanciada do plano frontal rotacionada no eixo Y em 90° (90; 0; -90 / x;y;z) e então posicionada em 15; -4 ; 158,217 (X; Y; Z).

Pelo mesmo motivo, na fase “Crânio e Pescoço”, a esfera criada no primeiro passo assumiu o raio 6,6. Na décima primeira fase, o espelhamento da peça foi substituído pela aplicação do modificador *Symmetry*, atuando no eixo Z da esfera.

Neste ponto foi muito importante a utilização do modificador STL Check.

Para os olhos, as esferas que dão suas formas passaram a ter raio 1,35, contra o raio 5 descrito. Foram posicionadas em -2,905; -9,546; 159,561 (direita) e 2,905; -9,546; 159,561 (esquerda). O formato STL só aceita um único objeto, então para exportar o modelo foi necessário unir os olhos ao corpo. Porém, como mostra a Figura 3:11, o fundo da órbita está além dos olhos, o que geraria um sólido isolado dentro do corpo. Assim, moveu-se a face do fundo para dentro dos olhos.

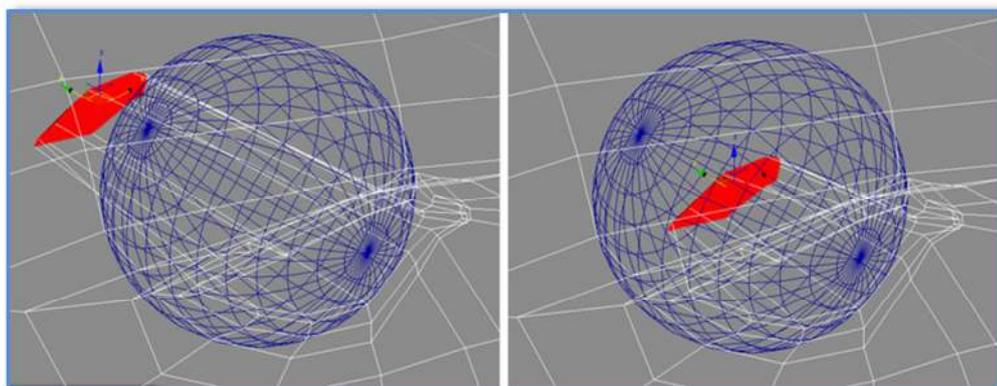


Figura 3:11 ajustes do fundo da órbita para evitar problemas na operação de união. Fonte: o autor, 2012.

Na fase final, a “montagem cabeça e corpo”, foi retirado o *Symmetry* da cabeça, antes de ser anexada ao corpo (etapa 8), além disso, as etapas 3, 6, 7, 14, 15, 16 e 17 foram ignoradas devido a aplicação do *Symmetry* no corpo. Ainda, a etapa 18 foi realizada em um modificador *Turbo Smooth* (interação 2), aplicado acima do *Symmetry*.

Utilizou-se o ProBoolean em modo união acima do *Turbo Smooth* e clicou-se nos dois olhos. O objeto final foi transformado em Editable Poly e então exportado para o formato STL (binário).

A Figura 3:12 apresenta do resultado da modelagem. O produto final apresenta 72.162 faces.

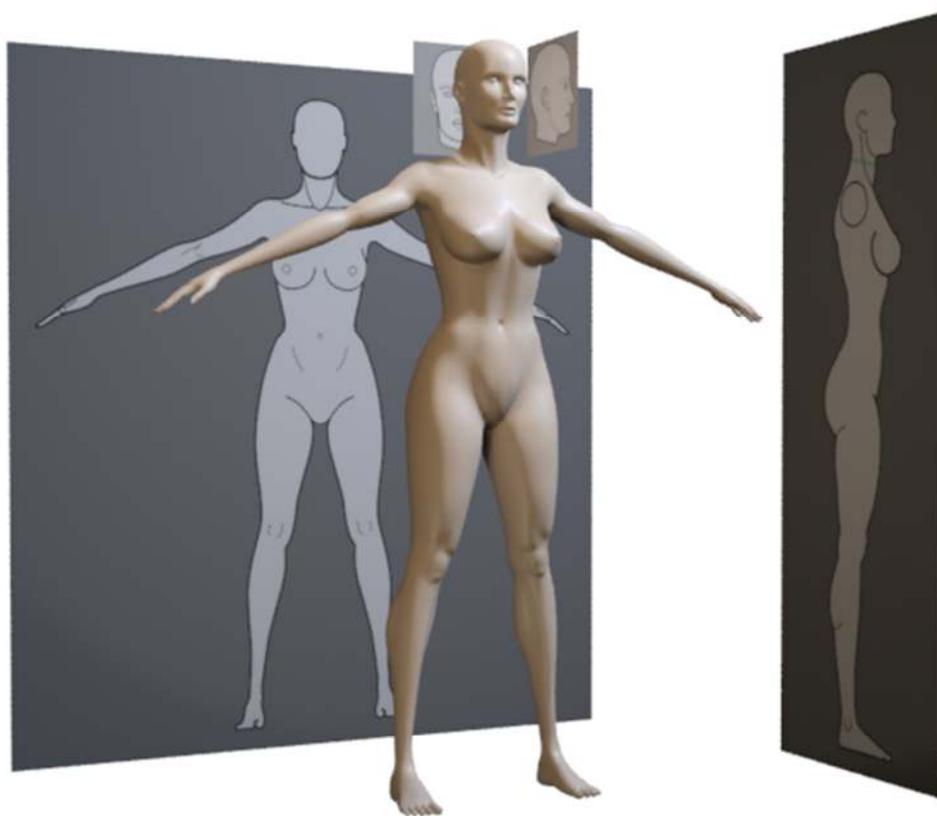


Figura 3:12 Resultado da modelagem por *Poly Modeling* no 3ds Max. Fonte: o autor, 2012.

3.2.2 POLY MODELING - MAYA

Para a construção da malha poder-se-ia seguir os mesmos procedimentos que foram utilizados na construção por *Poly Modeling* utilizada no 3ds Max, mas para poupar tempo, importou-se a malha do Max para utilizá-la como referência ao invés dos gabaritos, ganhando assim maior precisão e igualdade entre os sólidos, além de reduzir o tempo de construção. O sólido importado foi alocado em um *layer* com exibição do tipo *Template*. Em outro *layer*, com exibição normal, foi realizada a construção do novo sólido.

Como já citado durante o processo de modelagem por polígonos com o 3ds Max, a construção de objetos primitivos pode ser mais ágil que a execução de uma sequência de extrusões. Pensando assim, construiu-se uma série de sólidos poligonais primitivos, os quais foram espalhados pelo espaço tridimensional. A tabela abaixo indica as características destes sólidos-base.

Parte	Características		Parte	Características	
Tronco	Forma	polyCylinder R 15 H 45 SubA 20 SubH 11 Subdivisions Caps 2 Round Cap ativado	Mão	Forma	polyCylinder R 2,5 H 6,5 SubA 12 SubH 4
	Posição	x: 0 y: 120 z: 0		Posição	x: -64.598 y: 114.735 z: -2.234
Seio	Forma	polySphere R 5,5 SubA 11 SubH 10	Dedos Mão	Forma	polyCylinder R 0,7 H 8 SubA 6 SubH 9
	Posição	x: -7.340 y: 123.998 z: 10.823		Posição	x: -71.156 y: 110.726 z: -1.405
Cabeça	Rotação	rotX: -76.190 rotY: 31.580 rotZ: 187.858	Pé (calcanhar e tornozelo)	Forma	polyCylinder R 3 H 11 SubA 19 SubH 6
	Forma	polySphere R 11,5 SubA 13 Sub H 10		Posição	x: -18.497 y: 5.505 z: -3.569
Perna	Forma	polySphere R 11,5 SubA 13 Sub H 10	Pé (metacarpo)	Forma	polyCylinder R 3,5 H 11 SubA 17 SubH 4
	Posição	x: 0 y: 159 z: 1		Posição	x: -19.618 y: 2.065 z: 4.546
Braço	Rotação	rotZ: 90	Dedos do pé	Forma	polyCylinder R 1 H 3 SubA 8 SubH 5
	Forma	polyCylinder R 5,5 H 82 SubA 13 SubH 19		Forma	polyCylinder R 1 H 3 SubA 8 SubH 5
Braço	Forma	polyCylinder R 3 H 52 SubA 8 SubH 14	Dedos do pé	Posição	x: -17.298 y: 0.864 z: 11.923
	Posição	x: -13.254 y: 51.601 z: 0		Posição	x: -17.298 y: 0.864 z: 11.923
Braço	Rotação	rotY: 6	Dedos do pé	Rotação	rotX: 90
	Forma	polyCylinder R 3 H 52 SubA 8 SubH 14		Rotação	rotX: 90
Braço	Forma	polyCylinder R 3 H 52 SubA 8 SubH 14	Dedos do pé	Forma	polyCylinder R 1 H 3 SubA 8 SubH 5
	Posição	x: -38.013 y: 126.786 z: -1.953		Forma	polyCylinder R 1 H 3 SubA 8 SubH 5
Braço	Rotação	rotZ: -66.516	Dedos do pé	Posição	x: -17.298 y: 0.864 z: 11.923
	Forma	polyCylinder R 3 H 52 SubA 8 SubH 14		Rotação	rotX: 90

Tabela 3:3 Sólidos primitivos utilizados para agilizar o processo de modelagem por polígonos no Maya. Fonte: o autor, 2012.

Os vértices das formas foram então escalonados através das vistas frontal (no eixo X) e lateral (no eixo Y). No braço, na mão e nos dedos da mão, formas que não estão alinhadas ao eixo X ou Y, o eixo de escalonamento e de movimentação foram

alinhados a uma aresta perpendicular ao eixo de comprimento do sólido, encontrada nas tampas dos cilindros-base, fazendo proveito da opção dessas ferramentas, *Set To Edge*. A perna ainda exigiu a rotação dos eixos da coxa, na proximidade da virilha. Pela sua complexidade formal, a cabeça sofreu apenas um escalonamento básico para alinhar as arestas principais à vista frontal. Então, dos cilindros foram retiradas as tampas, exceto no tronco, nas pontas dos dedos e na base do calcanhar. Também foram retiradas as faces da esquerda do tronco e da cabeça (para posterior união por simetria) e da metade da esfera do seio que estava voltada para dentro do corpo. A Figura 3:13 mostra as formas-base após estas etapas de edição.

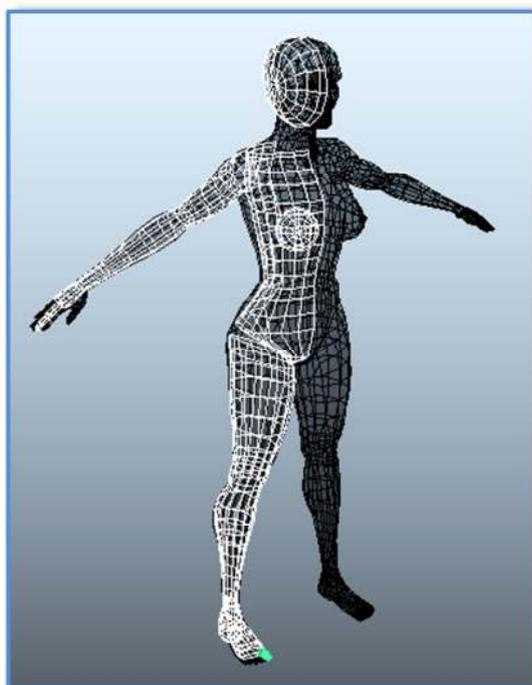


Figura 3:13 situação do corpo após edição inicial dos sólidos-base. Fonte: o autor, 2012

A partir de então os vértices foram movidos para seus correspondentes na malha-modelo, trazida do Max, utilizando o *Snap To Points* para garantir a precisão. Novos vértices foram criados através de processos de extrusão (ferramenta *Extrude*) e corte (ferramentas *Interactive Split Tool*, *Insert Edge Loop Tool* e *Connect Components*) das faces, chanfro (ferramenta *Chamfer Vertex*) e soldagem (ferramentas *Merge*, *Merge To Center* e *Merge Vertex Tool*) dos vértices. As arestas e os vértices indesejados foram retirados com a ferramenta *Delete Edge/Vertex*.



A Figura 3:14 apresenta as sequências de criação de algumas destas partes. A esfera conformada para a criação da forma do seio não apresenta o mamilo (a), o qual foi gerado por cinco extrusões chanfradas (b), chegando então a sua forma final (c). A partir de duas faces do cilindro que gerou a forma do dedão do pé (d), foi extrudada a unha (e) que então foi alinhada aos vértices de referência no modelo produzido no Max (f). Os cilindros-base para os pés foram conformados e seus vértices alinhados aos do modelo base. Várias faces internas ao pé do cilindro do calcanhar foram apagadas. O mesmo ocorreu com o cilindro do metacarpo. Outras foram cortadas para gerar as faces restantes (g, h).

Uma vez construído um dos dedos (do pé e da mão) a partir do sólido-base, este foi copiado para as posições dos dedos adjacentes e então teve seus vértices alinhados ao modelo de referência, ou mesclado a outros (quando ocorreu do novo dedo possuir menos subdivisões e vértices que o inicial).

Ao longo dessas atividades, o *Construction History* foi constantemente apagado após cada conjunto de alterações em cada forma-base para reduzir impacto de algumas deformações em outras, bem como manter a performance do software.

Ao final do processo, utilizou-se o comando *Combine* para unir todas as formas isoladas em um único objeto. O próximo passo seria mesclar os vértices para a completa fusão, mas percebeu-se que havia incoerência no número de vértices nos pontos fronteiros entre a mão e os dedos (próximo aos dedos mínimo e indicador), entre o antebraço e a mão, entre o braço e o tronco (na região superior do deltoide) entre a perna e o pé. Para corrigir isso, as faces que apresentavam menor número de vértices foram cortadas para garantir a igualdade, como mostra a Figura 3:15.

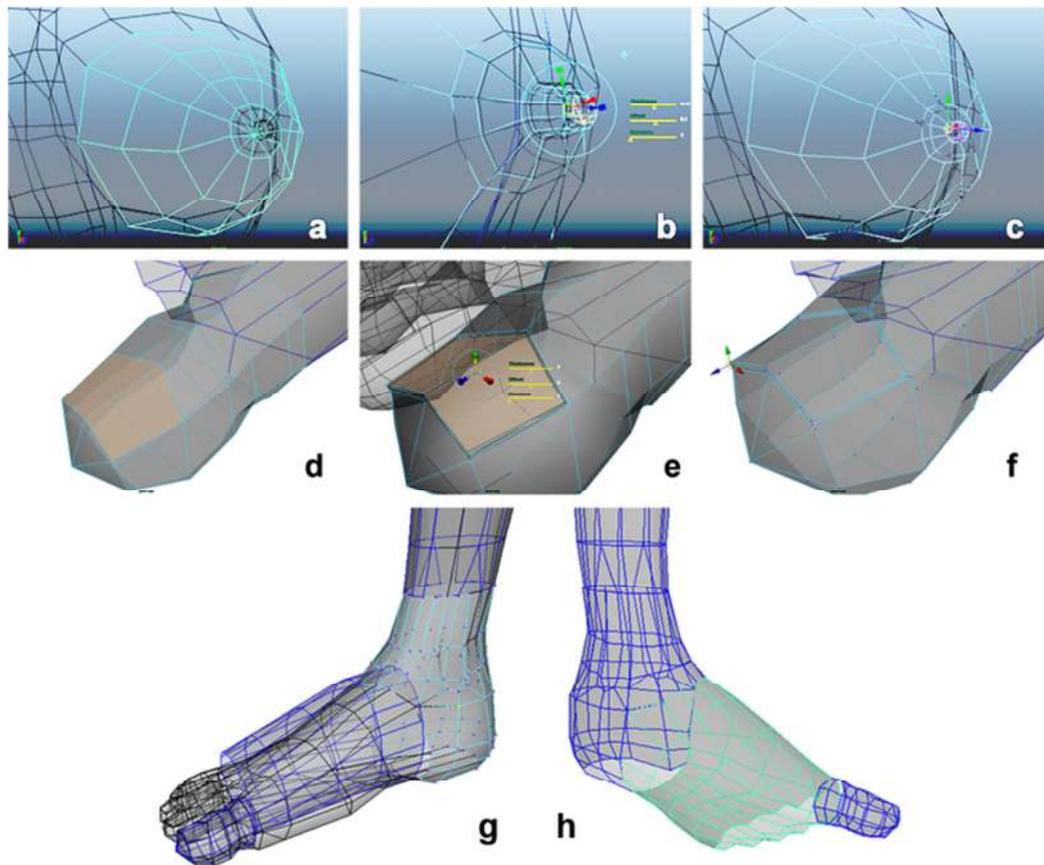


Figura 3:14 Sequências de edição das malhas para as conformações pretendidas. Criação por extrusão do mamilo (a, b, c) e das unhas (d, e, f). Adequação das malhas do pé (g, h). Fonte: o autor, 2012.

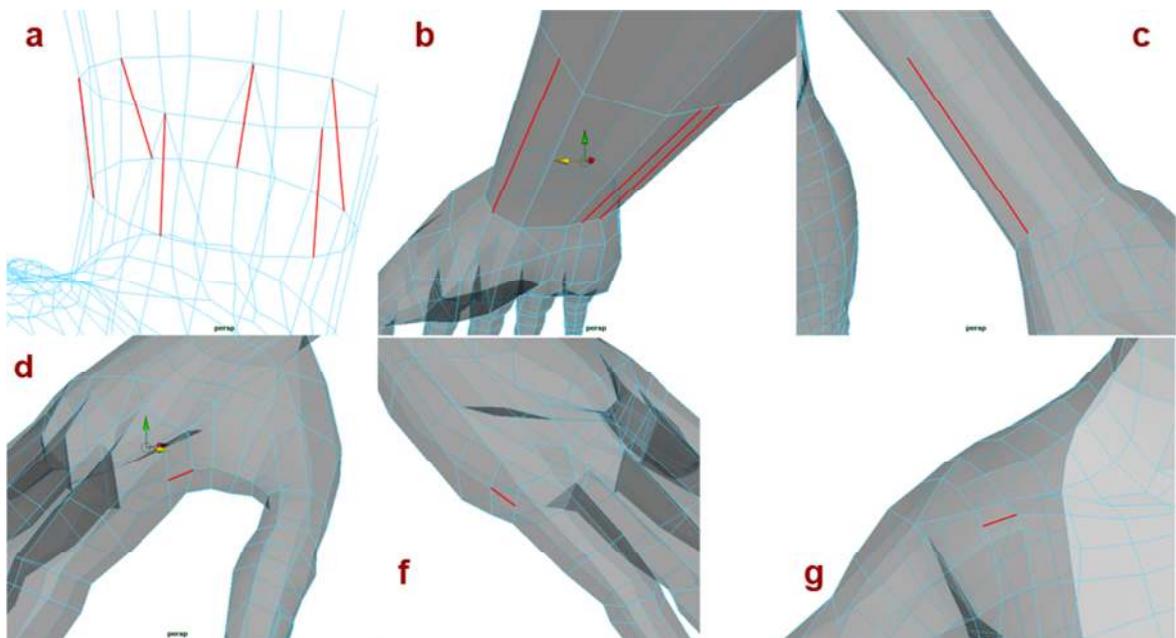
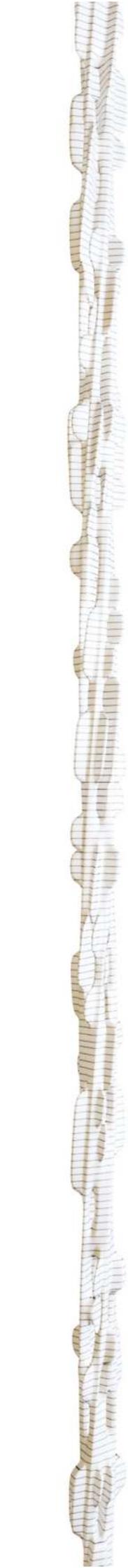


Figura 3:15 Arestas adicionais posicionadas para equiparar a quantidade de vértices de cada parte do corpo. Fonte: o autor, 2012.



Uma vez corrigidos os encaixes, todos os vértices foram selecionados e receberam o comando *Merge* com tolerância 0,01. As arestas adicionais foram então apagadas. Foram aplicados os comandos *Cleanup* e *Fill Holes* para retirar possíveis problemas na malha e fechar possíveis aberturas, respectivamente, reduzindo a chance de ocorrência de locais problemáticos. O modelo foi então exportado em formato FBX para o 3ds Max, onde passou pela checagem do *STL Check*, o qual encontrou ainda alguns vértices não soldados e uma face interna na altura do ombro, mas essa ação foi utilizada apenas com o intuito de ter um *feedback*. Esses problemas foram corrigidos diretamente no Maya.

Para os olhos, foi utilizada uma esfera com R 1,35; SubA 8 e; SubH 8; posicionada em (X; Y; Z) -2.905; 159.561; 9.546, com rotação em X de 90°.

De volta ao corpo, com a metade do modelo pronta, foi aplicado o comando *Soft Edge* para suavizar as normais da superfície. Como o objetivo era a exportação de uma peça única subdividida, preferiu-se ao comando *Subdiv Proxy*, que é capaz de espelhar e subdividir a malha em uma etapa e ainda manter a malha original para posteriores modificações, uma sequência de ações mais conservadora. Assim, a malha foi duplicada e a original escondida (para o caso de necessitar de edições posteriores).

Com o comando *Boolean*, subcomando *Union*, a esfera do olho foi unida ao corpo. Neste momento foi retirada a face central do corpo, criada pelo *Fill Holes* durante o processo de checagem. O modelo foi espelhado com o comando *Mirror Geometry*, com a opção de mesclar os vértices ativada, e então recebeu o comando *Smooth*, com *Division Levels* em 2.

Apesar de poder importar, aparentemente o Maya não possui a capacidade nativa de exportar modelos no formato STL. Para contornar essa limitação, utilizou-se o *plugin* gratuito MultiTool, o qual, após sua instalação, foi ativado através da janela *Plug-in Manager*. Assim a opção de formato *STereoLithography* surgiu na janela de exportação e o arquivo foi gerado com a opção *Binary*.

A Figura 3:16 ilustra o resultado do modelo gerado por este método no Maya, o qual totalizou 74.000 faces.



Figura 3:16 Resultado da modelagem por *Poly Modeling* no Maya

3.2.3 SPLINE MODELING - 3DS MAX

Para garantir a semelhança entre os modelos construídos com os diferentes métodos, utilizou-se o corpo construído anteriormente por polígonos como base para o construído por linhas. A partir dele, dois procedimentos diferentes foram tomados para transferir os dados mantendo a igualdade das formas. No primeiro, utilizou-se o objeto bidimensional *Section*, o qual cria uma seção transversal em linhas bidimensionais baseando-se nos sólidos tridimensionais que ele intercepta. A Figura 3:17 mostra o objeto *Section* atuando sobre um objeto tridimensional, gerando perfis de corte transversais. O mesmo procedimento foi utilizado no corpo gerado pela metodologia apresentada no tópico anterior.

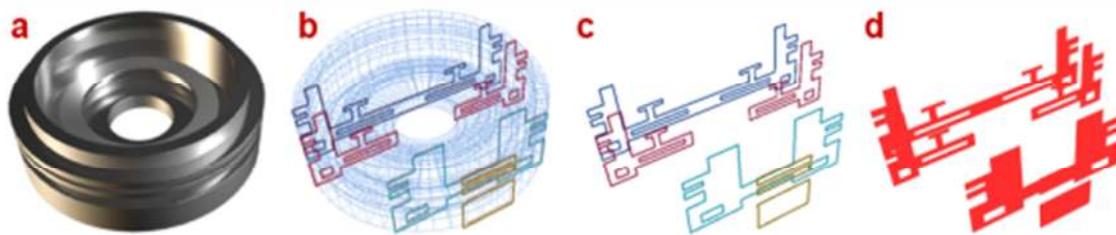


Figura 3:17 Uso do *Section* para gerar perfis baseados no objeto tridimensional. (a) objeto tridimensional. (b) perfis gerados pelo *Section*. (c) linhas geradas pelo *Section*. (d) novo sólido gerado pela extrusão das linhas geradas. Fonte: o autor, 2012

Desta maneira, 98 objetos *Sections* foram distribuídos ao longo do corpo, de acordo com as coordenadas apresentadas na tabela a seguir e mostradas na Figura 3:18(a).

	Nº	Posição			Rotação		
		X	Y	Z	X	Y	Z
Cabeça	1			169,077			
	2			165,81			
	3			162,57			
	4			161,033			
	5			159,531			
	6		-4	158,342	0		
	7			157,055			
	8	0		155,874		0	0
	9			155,074			
	10			154,014			
	11			152,958			
	12		3,97	151,966	2,786		
	13		3,669	151,021	4,119		
	14		3,767	149,515	6,831		
	15		3,597	148,648	9,842		
Tronco	1		-1,094	146,96	8,706		
	2		-0,695	145,127	13,317		
	3		-2,5	143,023	11,096		
	4		-2,443	140,94	16,44		
	5		-0,209	139,785	11,095		
	6		-2,485	137,406	6,541		
	7			134,571			
	8			131,197			
	9			125,296		0	0
	10	0		119,096			
	11			115,732			
	12		-2,5	109,857	0		
	13			106,267			
	14			102,53			
	15			97,617			
	16			92,6			
	17			86,557			
	18			82,685			
Pé	1	-7,333	-10,551	125,032	90		
	2	-8,463	-12,848	125,032	83,894	0	-27,0
Mão	1	-62,843		115,909			
	2	-64,699	2,394	115,127	0	67,149	0
	3	-67,211		114,068			
Polegar	1	-64,78	-1,651	113,29	-83,879	59,481	0,734
	2	-65,476	-2,525	112,926	-53,622	65,31	6,967
	3	-66,223	-2,859	112,092	-3,581		
	4	-67,201	-2,995	111,264			
	5	-67,795	-3,121	110,75	5,073	49,559	18,637
	6	-68,29	-3,226	110,322			
Dedos	1	-67,939		113,223			
	2	-68,91		112,492			
	3	-69,987		111,832			
	4	-70,927		111,255			
	5	-71,733	2,394	110,761	0	58,496	0
	6	-72,388		110,36			
	7	-73,036		109,963			
	8	-73,704		109,553			
Perna	9	-74,371		109,145			
	1	-6,521		93,332		60,183	
	2	-9,482		89,384		40,057	
	3			80,772			
	4			72,609			
	5			66,877			
	6			61,341			
	7			57,646			
	8			55,187	0		0
	9	-14,541	3,964	51,865		0	
	10			48,476			
	11			39,49			
	12			34,727			
	13			27,74			
	14			20,473			
	15			13,748			
16			8,317				
17	-18,483	3,067	7,078	-14,317	0	0	

Nº	Posição			Rotação		
	X	Y	Z	X	Y	Z
3	-9,886	-15,075		80,938		-31,682
4	-10,226	-15,627	125,135			
5	-10,39	-15,873	125,189	79,656	-0,465	-33,626
6	-10,566	-16,136	125,247			
7	-10,635	-16,24	125,27			
Braço	1	-15,089			90	
	2	-17,483	136,633		73,656	
	3	-20,787	134,343			
	4	-26,245	131,882			
	5	-32,39	128,622	0		0
	6	-38,442	126,419		67,149	
	7	-47,1	122,771			
	8	-55,875	119,394			
	9	-61,209	116,598			

Nº	Posição			Rotação		
	X	Y	Z	X	Y	Z
2	-18,676	2,806	5,294	-31,814		
3	-18,557	2	4,2	-39,292		
4	-18,769	-0,617	3,658	-51,704	2,374	-3,003
5	-19,152	-2,861	3,432	-68,916	2,064	-5,337
6	-19,749	-5,548	2,813	-68,083	2,654	-6,566
7	-20,047	-8,291	1,739	-85,445	0,906	-11,225
8	-20,109	-9,339	1,507	-90,0	0	-14,917
Dedos (pé)	1	-20,125	-10,18			
	2		-10,645			-11,305
	3	-20,149	-11,157			
	4	-19,929	-11,595	1,507	-90	0
	5	-19,806	-12,035			-4,762
	6	-19,537	-12,422			-1,339

Tabela 3:4 Relação de coordenadas dos objetos *Section* distribuídos para capturar em *splines*, a forma do modelo construído por *poly modeling*. Fonte: o autor, 2012.

No entanto, devido ao grande número de faces do modelo, os *Sections* geraram figuras bidimensionais com uma quantidade muito grande de vértices, o que inviabilizaria manipulações futuras. Então foram adicionados objetos bidimensionais do tipo *Ngon* (polígonos de N lados) com a opção *Circular* ativada (o polígono se mostra como um círculo, com o mesmo número de vértices) nas mesmas posições e rotações das *splines* criadas pelos *Sections*. Na cabeça e tronco foram utilizados *Ngons* de vinte lados, mas dez foram removidos, para garantir a simetria futura. Nas pernas, braços, mão, pé, polegar e demais dedos da mão foram utilizados oito lados. Nos dedos do pé foram utilizados quatro lados. Estes *Ngons* foram editados e seus vértices alinhados às *Splines* dos *Sections* para adquirirem as mesmas formas, mas então com muito menos vértices (Figura 3:18(b)).

As seções transversais foram então unidas pela ferramenta *Cross Section*, a qual cria automaticamente as linhas e vértices que passam perpendicularmente pelos vértices, como mostrado na Figura 3:19. Porém, como o *Cross Section* une os vértices com mesma numeração, primeiramente foi realizado o alinhamento dos números dos vértices com as ferramentas *Show Vertex Numbers*, *Make First e Reverse*. Algumas linhas foram acrescentadas, principalmente no tórax e junção dos dedos com a mão e o pé para manter o pré-requisito de ter três ou quatro arestas para a criação da superfície. A Figura 3:20 mostra o processo de criação das unhas,

fechando a ponta dos dedos. A mesma sequência foi utilizada para o fechamento de outras extremidades, como a base do tronco, e o topo da cabeça.

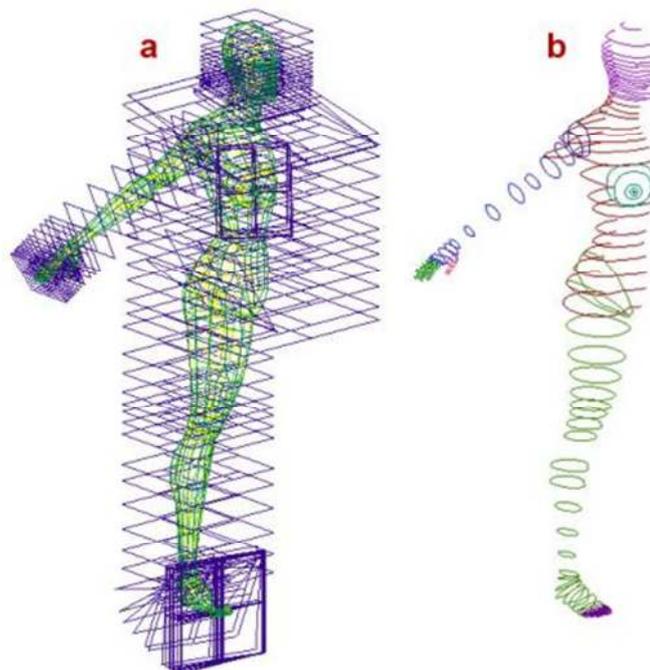


Figura 3:18 Captação das formas em *Splines*. (a) Objetos *Section* no modelo. (b) *Ngons* editados para ter as mesmas formas das *Splines* geradas pelos *Sections*. Fonte: o autor, 2012.

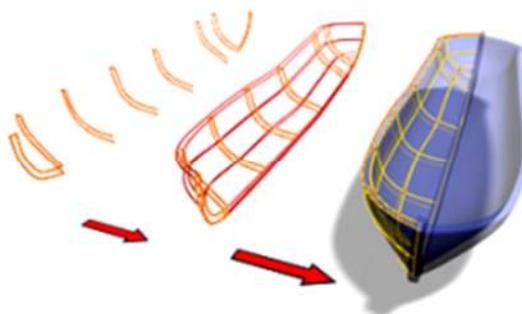


Figura 3:19 Criação das linhas de união dos perfis pela ferramenta *Cross Section*. Fonte: Autodesk, 2011

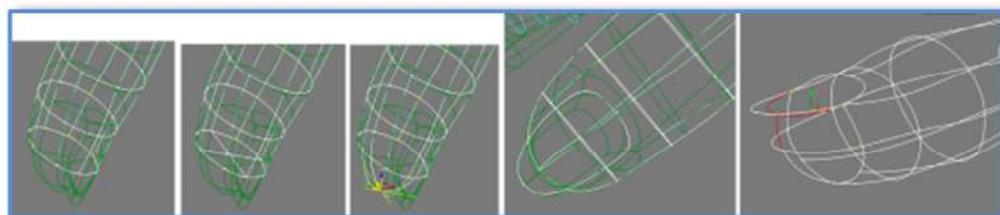


Figura 3:20 Sequência de criação das unhas.

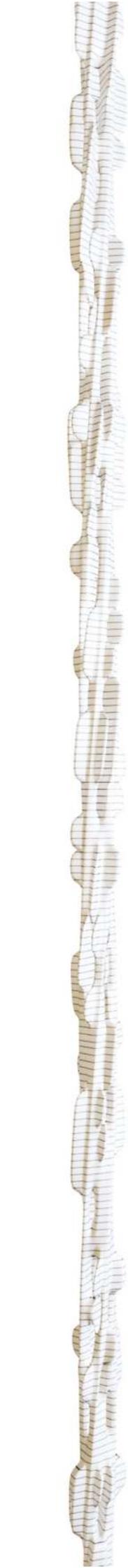
Sobre a malha de vértices foi aplicado o modificador *Edit Patch* com as opções *Generate Surface* e *Remove Interior Patches* ativadas. O *Threshold* foi fixado em 0,01 para aceitar pequenas variações na posição dos vértices transversais ao mesmo tempo em que permite o detalhamento da forma. O *View Steps* foi fixado em 4 para garantir uma boa subdivisão do modelo. Por cima destes modificadores foi adicionado o modificador *Symmetry* com as mesmas opções aplicadas ao modelo construído por *poly modeling*. O resultado pode ser conferido na Figura 3:21.



Figura 3:21 resultado do primeiro procedimento de criação por *Splines (section, ngon, cross section, edit (spline, patches)*

A cabeça foi deixada por último. Porém, neste ponto percebeu-se que, apesar das formas gerais terem sido mantidas, houve perdas nos pequenos detalhes devido ao número insuficiente de objetos *Section* para manter os detalhes da forma. E isso seria agravado na região encefálica, região do corpo mais densa em detalhes e vértices.

Para contornar este problema, um novo procedimento foi testado. Devido à natureza quadrática da metodologia de modelagem de Rosa (*Op.Cit.*), que na ocasião visava a otimização da subdivisão das faces, passou-se a criar linhas sobre os vértices já existentes seguindo o fluxo das formas das linhas. Todos os vértices foram criados como do tipo *Corner* com *Snap 3D* configurado para *End Point*, para garantir e



facilitar o posicionamento dos mesmos. Ao final foi adicionado o modificador *Surface* com as opções *Flip Normals* e *Remove Interior Patches* ativadas. O *Threshold* foi fixado em 0,01 para aceitar pequenas variações na posição dos vértices de diferentes *splines*, transversais entre si, ao mesmo tempo em que permite o detalhamento da forma. Na topologia, o *Steps* foi fixado em 3 para garantir uma boa subdivisão do modelo com número de faces semelhante ao resultado da modelagem por *Poly Modeling*.

Como uma malha tridimensional do tipo polígono aceita faces com mais que quatro lados, a superfície criada apresentou aberturas nas faces que excediam este número. Foram detectadas oito aberturas distribuídas pela boca, olhos, narina, na parte frontal do pescoço, entre olho e o nariz e três ao redor da orelha. Linhas foram adicionadas cortando estas faces de modo a criar novos polígonos de quatro ou três lados, o que resolveu o problema.

Então todos os vértices foram selecionados e neles foi aplicado o comando *Weld*, para soldar os vértices formando linhas contínuas que foram criadas em mais de um passo. Então foram convertidos para *Smooth* e só então para *Bezier*, para garantir a suavidade das formas e a igualdade nos vetores das curvas. Os vetores dos vértices próximos às regiões mais estreitas, como nos lábios, olhos, orelhas e unhas foram escalonados (nos três eixos, simultaneamente) para reduzir a deformação causada pelo *Smooth*.

A Figura 3:22 mostra estes dois estágios. À esquerda, logo após a conclusão da fase de distribuição das *splines* sobre o modelo de malha poligonal. A imagem da direita já apresenta as correções das faces abertas, além da conversão final dos vértices para *Bezier* e os ajustes efetuados nos vetores problemáticos.

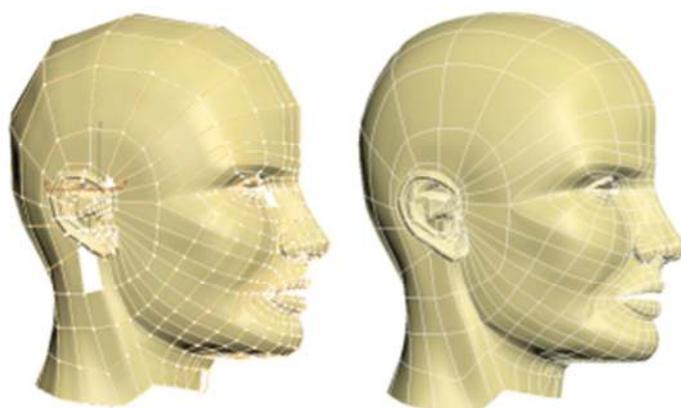


Figura 3:22 Superfície criada com vértices de Splines depositados sobre os vértices da malha poligonal anterior. Fonte: o autor, 2012

O novo resultado demonstrou uma riqueza de detalhes muito semelhante à malha poligonal então se optou por estender o procedimento para o restante do corpo e avaliar seus resultados.

Neste método, a criação dos olhos apresentaram uma peculiaridade. Para evitar a contaminação de *polys* e *meshs* nas *splines*, não foi utilizada operações de união entre o corpo e os olhos, como ocorreu nos outros métodos. Preferiu-se anular as linhas que se dirigiram ao fundo da órbita e criar os olhos a partir de ligações entre os vértices da pálpebra. A Figura 3:23 mostra a criação destes segmentos e a posterior edição dos vetores para que as linhas possam repousar sobre uma superfície curva de referência, no caso, uma esfera com R 1,35, posicionada em - 2,905; -9,546; 159,561 (X; Y; Z), idêntica a utilizada nos outros métodos.

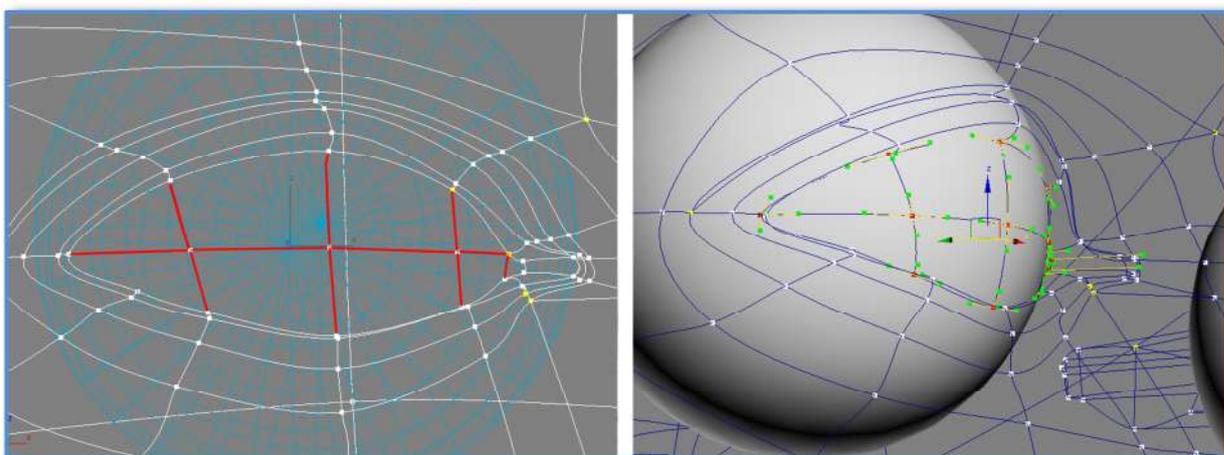


Figura 3:23 Criação dos olhos utilizando as linhas da órbita. Fonte: o autor, 2012.



Porém outro detalhe importante foi percebido no momento da simetria da forma: o modificador *Symmetry* aparentemente transforma a peça *Patch* em uma malha poligonal. Isto poderia interferir nos resultados finais de impressão. Para evitar, a simetria foi realizada por métodos tradicionais. Foi tirada uma cópia espelhada em X e dela se extraiu os segmentos centrais (da base do tronco ao topo da cabeça, tanto da parte frontal quando da posterior). Então, para a peça original foi anexada (*attach*) à cópia e seguiu-se com os mesmos passos realizados na cabeça (fechamento das faces abertas, *Weld*, *Smooth*, *bezier* e edição dos vetores dos vértices situados nos pontos mais densos).

O modificador *STL Check*, apesar de indicar a ocorrência e número de erros na malha, não indica no produto desta técnica, onde eles estão, como ocorre com um modelo em polígonos. Assim, adicionou-se temporariamente um modificador *Edit Poly* acima do *Surface* para que o *STL Check* exibisse com *feedback* completo e interativo. Uma vez corrigidos algumas imperfeições no interior da narina e nas unhas da mão, o *STL Check* e o *Edit Poly* foram retirados e a malha foi exportada para o formato STL binário.

A Figura 3:24 mostra o resultado desta modelagem a partir de seus 9800 vértices de splines (74.176 faces).



Figura 3:24 Resultado do segundo procedimento de criação por *Splines* (um vértice de *spline* sobre cada vértice da malha poligonal)

3.2.4 SPLINE MODELING - MAYA

Analisando o software, percebeu-se que o Maya não possui ferramentas para modelagem por *spline*. Linhas vetoriais do tipo bézier podem ser importadas no formato AI e podem ter seus vetores manipulados, mas a maioria das operações de transformação em objeto tridimensional requerem que as linhas sejam transformadas em curvas Nurbs antes da operação. Outro ponto muito importante é que no processo de *spline modeling*, o modelo é transformado em um *patch* ao final do processo, o que permite a criação da superfície em torno das linhas. No entanto, o Maya não trabalha com *patches*, operações semelhantes são realizadas em superfícies Nurbs. Tais informações inviabilizaram o estudo deste método no Maya.

3.2.5 NURBS - 3DS MAX E MAYA

O novo experimento partiu da ideia que foi aplicada na construção pelo método *poly modeling* no Maya, baseada na modificação de sólidos-base. Inclusive, o Black Orbit Studios (2005) apresenta uma boa sequência de procedimentos para esse tipo de construção. Desta maneira, os sólidos foram criados neste software utilizando características semelhantes àquelas daquele método, alterando apenas os termos usados no Nurbs no Maya como os *Spans* e *Sections* no lugar de *Subdivision Axis* e *Subdivision Height*. Além disso, a altura dos sólidos primitivos no Nurbs é dada, não pelo seu valor absoluto, mas pela sua relação com outras dimensões (*Height Ratio*), como o raio, no caso do cilindro. Assim, a divisão do valor da altura do cilindro *poly* pelo seu raio gerou o valor a ser utilizado como altura do cilindro Nurbs. A Tabela 3:5 indica as características utilizadas neste estudo.

Parte	Características	
Tronco	Forma	NurbsCylinder R 15 Height Ratio 4 Sections 20 Spans 15
	Posição	x: 0 y: 113 z: 0
Seio	Forma	NurbsSphere R 5,5 Sections 11 Spans 10
	Posição	x: -7.340 y: 123.998 z: 10.823
	Rotação	rotX: -76.190 rotY: 31.580 rotZ: 187.858
Cabeça	Forma	NurbsSphere R 11,5 Sections 13 Spans 10
	Posição	x: 0 y: 159 z: 1
	Rotação	rotZ: 90
Perna	Forma	NurbsCylinder R 5,5 Height Ratio 3,6 Sections 13 Spans 19

Parte	Características	
Mão	Forma	NurbsCylinder R 2,5 Height Ratio 2,6 Sections 12 Spans 4
	Posição	x: -64.598 y: 114.735 z: -2.234
	Rotação	rotZ: -61.824
Dedos Mão	Forma	NurbsCylinder R 0,7 Height Ratio 11,42 Sections 6 Spans 9
	Posição	x: -71.156 y: 110.726 z: -1.405
	Rotação	rotZ: -53.576
Pé (calcanhar e tornozelo)	Forma	NurbsCylinder R 3 Height Ratio 3,6 Sections 19 Spans 6
	Posição	x: -18.497 y: 5.505 z: -3.569
Pé (metacarpo)	Forma	NurbsCylinder R 3,5 Height Ratio 3,142 Sections 17 Spans 4

Parte	Características
Posição	x: -13.254
	y: 51.601
Rotação	z: 0
	rotY: 6
Braço	NurbsCylinder
	R 3
	Height Ratio 17,33
	Sections 8
	Spans 14
Posição	x: -38.013
	y: 126.786
	z: -1.953
Rotação	rotZ: -66.516

Parte	Características
Posição	x: -19.618
	y: 2.065
	z: 4.546
Rotação	rotX: 90
	rotY: -9.180
Dedos do pé	NurbsCylinder
	R 1
	Height Ratio 3
	Sections 8
	Spans 5
Posição	x: -17.298
	y: 0.864
	z: 11.923
Rotação	rotX: 90

Tabela 3:5 Sólidos primitivos utilizados como nova tentativa de construção por Nurbs no Maya. Fonte: o autor, 2012.

O cilindro do tronco teve seus *Control Vertex* escalonados para se conformar ao modelo de polígonos importado, utilizado como gabarito (Figura 3:25). Após essa montagem, o próximo passo seria inserir *isoparms* (loop de arestas) para refinar a malha e ajustar os novos vértices de controle para corresponder às novas posições, mas percebeu-se que no 3ds Max a malha não é refinada ao acrescentar uma *V Iso Curve* e no Maya todos os vértices de controle ficam bloqueados para movimentação quando novas *isoparms* são inseridas, ou seja, não seria possível acrescentar detalhes à forma.

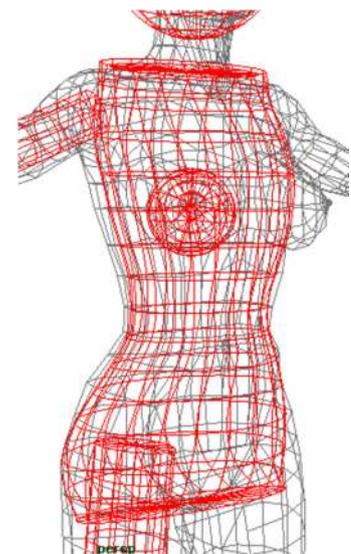


Figura 3:25 Sólido-base do tronco conformado ao gabarito. Fonte: o autor, 2012

Apesar da sequência do Black Orbit (*op. cit.*) aparentemente ser voltada para personagens simples, as instruções para gerar uma malha sem emendas ainda era uma possibilidade que precisava ser testada, alterando apenas a forma de criação das malhas iniciais. Desta maneira foram criadas curvas Nurbs para todo o corpo. Foram utilizadas curvas de grau 7 (*curve degree*) e *Knot Spacing* do tipo uniforme. Seus *Edit Points* foram colocados exatamente sobre os vértices do modelo de referência através do *Snap To Point* e seguiram o sentido das arestas transversal aos volumes do corpo, como pode ser conferido na Figura 3:26 (a). Na cabeça, a criação seguiu o sentido da musculatura facial, já apresentada pela colocação dos vértices na versão do modelo em polígonos (Figura 3:26 (b)). Em

todas as partes, as *curves* foram criadas tendo em mente que as *isoparms* são contínuas, indo sempre de um lado ao outro do objeto. Assim, mesmo que um *loop* de arestas finalizasse, as *curves* prosseguiam até encontrar seu próprio início (Figura 3:26 (c)) ou outra curva transversal (Figura 3:26 (e)). Em algumas regiões, notadamente nas mãos, joelhos e parte superior do tronco, foram criadas *curves* para delinear um ponto algum *loop* de arestas encontrou seu fim em uma aresta transversal à *curve* (Figura 3:26 (c, e)). Em outros, como no polegar e nos seios, considerou-se que essas superfícies poderiam ser conectadas ao restante do corpo pela criação de uma superfície intermediária, como a *Surface Fillet*, desta maneira, as *curvas* destas regiões poderiam seguir em outros eixos (Figura 3:26 (d)).

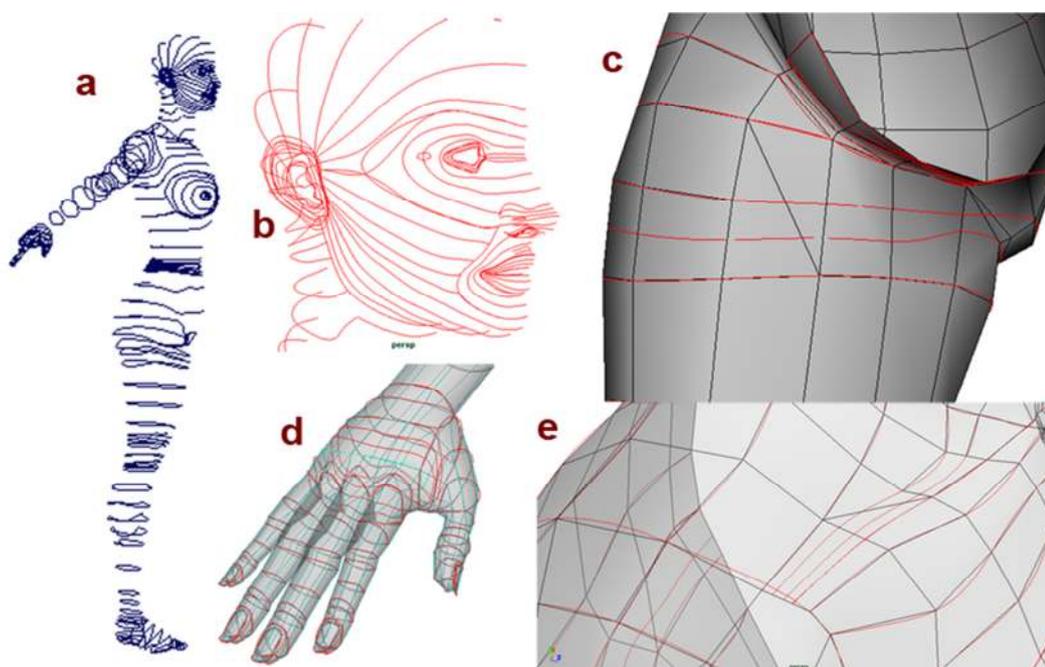


Figura 3:26 Curvas Nurbs construídas baseando-se no modelo 3D produzido em *poly modeling*.
Detalhes: (a) corpo, (b) face, (c) parte interna da coxa, (d) mão e, (e) clavícula.

Como as formas do modelo são muito complexas, o *Loft*, ferramenta que seria utilizada para gerar as superfícies apresentou várias distorções na malha. Para amenizá-las optou-se por cortar as linhas em pontos alinhados, através dos comandos *Insert Knot* (em *Curve Points*, quando não existiam *Edit Points* no local desejado) e *Detach Curves* criando limites controlados que ajudariam a restringir as distorções até o ponto cortado, não afetando a estrutura vizinha. Assim os volumes do corpo foram divididos em subáreas. Para distribuir as futuras *isoparms* uniformemente sem perder a precisão da forma, cada subárea teve suas *curvas*

reconstruídas com o *rebuild curve*, configurado em: *Type: Uniform; Parameter Range: 0 to #Spans; Keeps: ends, tangents; number of spans*: máximo número de arestas transversais (ver Tabela 3:6) e; *degree: 7*. Só então as curvas foram selecionadas na ordem desejada, e aplicado o *Loft* a cada subárea.

Subárea	Spans	Subárea	Spans	Subárea	Spans
CinturaFrente	9	PescoçoFrente	9	BraçoFrente	6
CinturaTrás	5	Mandíbula	11	BraçoTrás	7
TroncoFrente	7	Queixo	6	Polegar	8
TroncoCostas	5	Bochecha	7	MãoSup	13
Clavícula	9	LábiosRedor	10	MãoInf	13
Seio	11	Lábio	14	Dedo	6
Trapézio	5	Nariz	9	PéCalcanhar	9
Axila	4	Órbita	10	PéCalcanharBase (Chord Length na base)	(boundary)
Púbis	4	Olho (Loft em Chord Length)	12	PéMetacarpoSup	11
PernaFrente	8	OlhoFundo	(Boundary)	PéMetacarpInf (Loft em Chord Length)	13
PernaTrás	9	Orelha	21	PéTornozeloFrente	10
Virilha	5	OrelhaFundo	(Boundary)	PéTornozeloTrás	9
Nádegas	7	CrânioPesçoço	10	PéDedo	8
AbdomemBaixo	5			Unha (Chord Length)	8

Tabela 3:6 Número de *spans* utilizados na reconstrução das Nurbs *curves*.

A ponta dos dedos estabelece o final das cadeias de curvas. Para fechá-las, foi feita uma cópia da última curva, que então foi cortada em quatro partes com o comando *Detach Curves* e aplicado o comando *Boundary* para fechar a região. Como o resultado não condizia com a forma arredondada do gabarito, utilizou-se a *Curve Edit Tool* para puxar o centro da tampa (Figura 3:27).

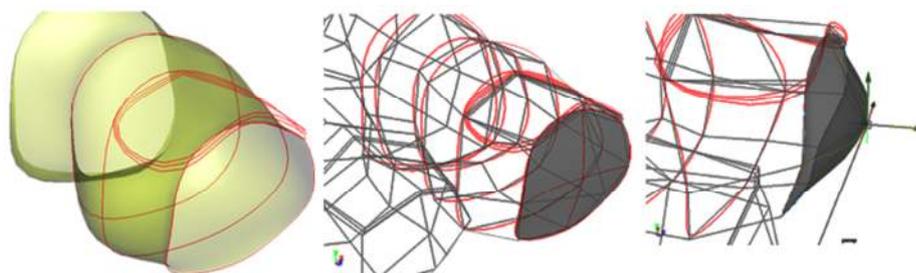


Figura 3:27 Fazes de produção da ponta dos dedos.

As unhas representaram outro desafio. Para superá-lo foram utilizadas curvas do tipo *3 bezier* (Figura 3:28 (a)), pois as linhas Nurbs criavam uma curvatura que

extrapolava a superfície do dedo. Estas linhas foram criadas orientando-se pelo gabarito do modelo *poly* e então convertidas em Nurbs com o comando *Convert To Nurbs*. Foram reconstruídas com o *Rebuild Curve*, e receberam o *Loft* (Figura 3:28 (b)). No entanto, ao contrário de uma operação de extrusão ou “bevelamento” em *poly modeling*, o *Loft* em Nurbs não cria a superfície superior, a tampa. Para criá-la, a *curve* superior da unha foi duplicada e cortada em quatro partes em seus *Edit Points* com o *Detach Curves*. Como a criação da *curve* havia sido iniciada em um ponto que então se encontrava entre os cortes, os dois segmentos (o primeiro e o último) foram unidos com o comando *Attach Curves* (do tipo *Blend*). Para limpar as modificações e igualar suas características, as quatro linhas sofreram uma reconstrução (*Rebuild Curve*) com a opção *Rebuild Spam* em 2 (Figura 3:28 (c)). Finalmente, para fechar a tampa foi utilizado o comando *Birail2 Tool*, sendo as linhas laterais utilizadas como perfil e as linhas da ponta e da base como trilho (a escolha contrária causaria o afundamento da tampa) (Figura 3:28 (d)). A Figura 3:28 (e) mostra o resultado final da operação.

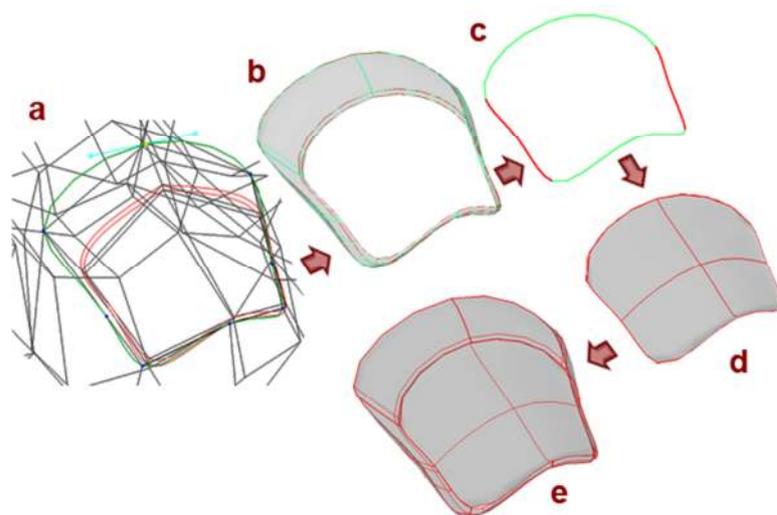


Figura 3:28 Fazes da criação da unha. (a) desenho das curvas, (b) loft, (c) corte da curva, (d) capeamento com o birail2 e, (e) forma final.

A base do calcanhar, e o fundo do pavilhão auricular e da órbita foram criados da mesma maneira que a tampa das unhas. Os olhos foram acrescentados através de duas *Nurbs Sphere* de raio 1,35 colocadas em (X; Y; Z) -2.905; 159,561; 9,546 e 2.905; 159,561; 9,546, ambas rotacionadas em 90° no eixo X.

Ao final de todas as fases, tinha-se 77 superfícies obtidas a partir de 485 curvas, sem contar com os olhos (Figura 3:29).

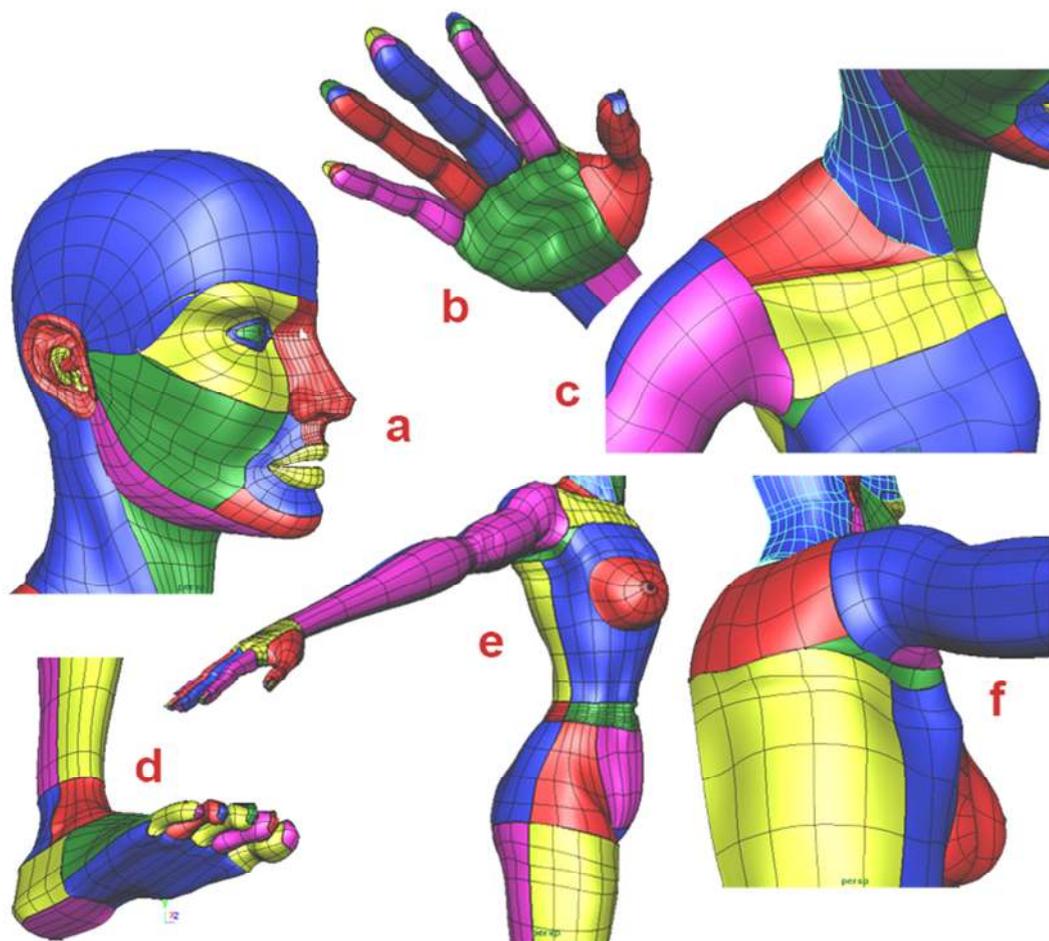


Figura 3:29 Superfícies criadas a partir das curvas desenhadas sobre os vértices do modelo construído em *poly modeling*.

Para uma modelagem tradicional, o objeto estaria finalizado. Porém, como a geração do arquivo STL para a prototipagem rápida exige que todo o modelo seja um único objeto sem aberturas na malha e cada fronteira entre as subáreas é uma abertura, a união entre os elementos era fundamental.

O Black Orbit Studios (2005) possui uma metodologia simples para a união de superfícies Nurbs. A primeira etapa é cortar as superfícies para preparar o alinhamento das *Spans*, mas a construção das *curves* com o *Snap To Points* garantiu que elas fossem geradas de forma alinhada. A segunda etapa, reconstruir as superfícies (*Rebuild Surface*) para torná-las independentes das curvas e,

principalmente, alinhar o número de *Spans* aos das superfícies vizinhas para evitar distorções na união, gerou poucas alterações, pois, como o modelo foi construído baseando-se em uma malha poligonal bem resolvida, já se sabia o número de *Spans* necessários desde o início da modelagem.

A partir deste ponto ocorreram uma série de falhas que inviabilizaram o resultado final. Na terceira etapa, o *Freeform Fillet* entre as superfícies vizinhas não funcionou em todas situações, e não havia *feedback* que informasse o erro ocorrido, para sua correção. Isso afetou a fase seguinte, reconstruir a superfície criada pelo *Fillet*. Apagar o *Construction History* (fase 5) não mudou o resultado. Finalmente, a aplicação do *Global Stitch* para aproximar e alinhar as *isoparms* até conseguiu unir as superfícies e retirar muita das fendas entre elas, quando ativada a opção *Stitch Partial Edges*, mas também deformou a malha, principalmente nos pontos onde mais de uma superfície se encontravam e onde havia detalhes em pequenas proporções, como nas unhas, mesmo variando os valores de tolerância (Figura 3:30(b)).

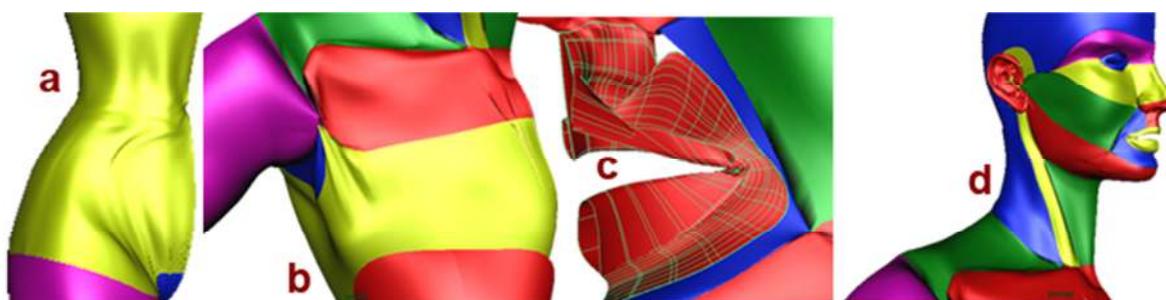


Figura 3:30 Erros na malha: distorções causadas pelo *attach* (a) e pelo *Global Stitch* (b), conexão com as *isoparms* erradas (c) e alguns dos retalhos não anexáveis sem erros (d).

A anexagem funcionou apenas em algumas das superfícies alinhadas pelo *Global Stitch*. O *Attach Surfaces* não possui uma opção de anexagem utilizando-se apenas parte das superfícies, o que inviabiliza sua atuação nas zonas mais complexas. Cortando as superfícies para simular essa ação gera novas superfícies e, conseqüentemente uma colcha de retalhos que não necessariamente pode ser costurada, devido a forma orgânica não se basear em retas, ou seja, em algum momento entra-se em um *loop* de cortes que não terminará. Em outra tentativa, tanto o comando *Reverse Surface Direction* quanto o *Rebuild Surface* não afetaram a estrutura das superfícies impedindo que os erros de ligação (Figura 3:30(c)) entre

elas fosse evitado. Assim, algumas superfícies sofreram deformação e/ou foram anexadas e o modelo não pode ser fechado.

Em outra tentativa, as superfícies foram exportadas, via formato FBX para o 3ds Max. O comando *Join* deste *software*, equivalente ao *Attach Surfaces* possui resultados mais previsíveis com costuras mais discretas, porém, mesmo mais escondidos, os problemas de ligação entre as malhas persistiram.

Na quarta tentativa, iniciando um novo modelo no 3ds Max, utilizando *Point Surface* e alinhando cada ponto a um vértice da malha de referência em *poly*, mas deixando o espaço de um *ring* de arestas entre cada malha, gerou outra colcha de retalhos que esbarrou na dificuldade de execução sem alterar o sentido das *Row* e *Columns* para evitar o mesmo erro durante a união das malhas.

Com o componente tempo das metas de construção dos experimentos já extrapolado, optou-se por abandonar este método.

3.3 IMPRESSÃO

A impressão dos modelos foi realizada em uma máquina uPrint SE, da Dimension, uma impressora do tipo FDM (modelagem por deposição de material fundido), que utiliza o polímero ABS como material, em camadas de no mínimo 0,254 mm e dimensão máxima de impressão de 203 mm x 152 mm x 152 mm.

A importação do modelo STL foi realizada em um PC com Windows 7. O programa da impressora, o CatalystEX, versão 4.01 – build 3818, foi configurado como:

- espessura de camada (*Layer resolution*): 0,254 mm, a mínima da máquina para a melhor resolução possível;
- interior do modelo (*Model interior*): *Sparce – low density*, para reduzir tanto o tempo de impressão quanto a quantidade de material utilizada;
- preenchimento de suporte (*Support fill*): *Sparce*, pelos mesmos motivos da escolha do tipo de preenchimento interior;

- unidades do arquivo STL (*STL units*): *millimeters*, como o modelo do arquivo foi criado em centímetros, a abertura como milímetro realizou uma conversão automática para a escala 1:10.
- escala do arquivo STL (*STL scale*): 1,000, como a dimensão da modelagem foi reduzida pela conversão de unidade, não foi necessário alterar escala.

Todos os modelos gerados atingiram quase o limite máximo de dimensionamento da máquina e foram girados de modo a ficarem deitados no sentido longitudinal da mesa/suporte de impressão através da opção *Auto Orientation* do CatalystEX. A Figura 3:31 mostra esse posicionamento. A Figura 3:31(b) apresenta o feedback visual do resultado dos cálculos iniciais para geração do volume e forma necessários de material de suporte para apoiar a confecção dos modelos, os quais foram enviados para impressão. Em vermelho, vê-se o modelo desejado. Em azul claro o material de suporte. As linhas em volta indicam o volume máximo aceito pela máquina.

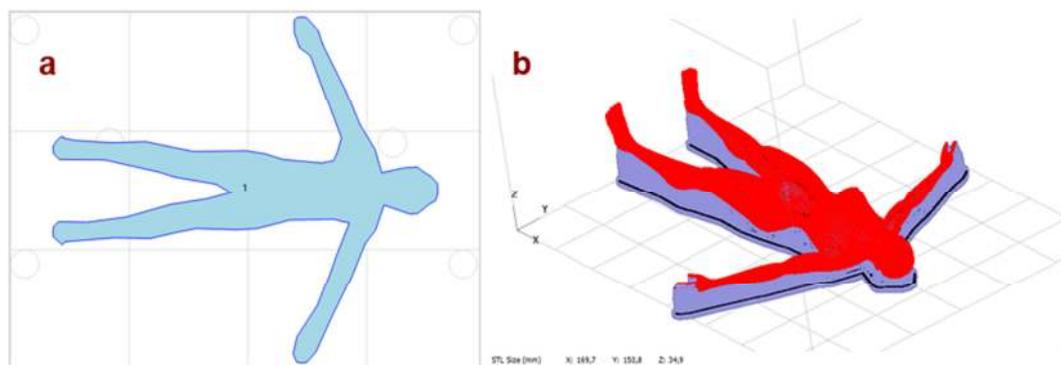


Figura 3:31 Pré-visualização¹² do modelo no CatalystEX após o processamento do arquivo STL.

A impressão ocorreu sem problemas e o processo não se diferenciou entre os modelos. O material de suporte criou internamente faixas em diagonal ligando as laterais do seu contorno (Figura 3:32) e, nos pontos mais próximos ao recebimento do material de impressão, intensificou a trama gerando uma rede para o apoio. O

¹² O fundo da imagem (b) era originalmente preto com linhas brancas. Foi invertido por questões de impressão desta pesquisa. As cores do modelo e do material de suporte não foram alteradas.

material impresso foi depositado primeiramente na forma do contorno da camada e depois preenchido internamente formando uma grade (Figura 3:33).



Figura 3:32 Primeiras camadas depositadas na impressão.



Figura 3:33 Camadas intermediárias depositadas na impressão.

Após a impressão (Figura 3:34), os modelos foram deixados de bruços em um recipiente de poliestireno expandido contendo solução de soda cáustica a uma concentração de 53,6 g/L (quase o dobro da recomendada pelo fabricante da soda (22,6 g/L), para acelerar o processo de dissolução do material de suporte), durante aproximadamente 19:00 h, sob temperatura ambiente média de 28°C , depois passaram para outro recipiente, com a mesma solução, mas em concentração de 31,25 g/L, à mesma temperatura, por mais 6:00 h para a dissolução do material fixado às costas, enquanto o modelo seguinte ocupava o primeiro recipiente. Ao final da dissolução foram lavados em água corrente e secados à sombra.

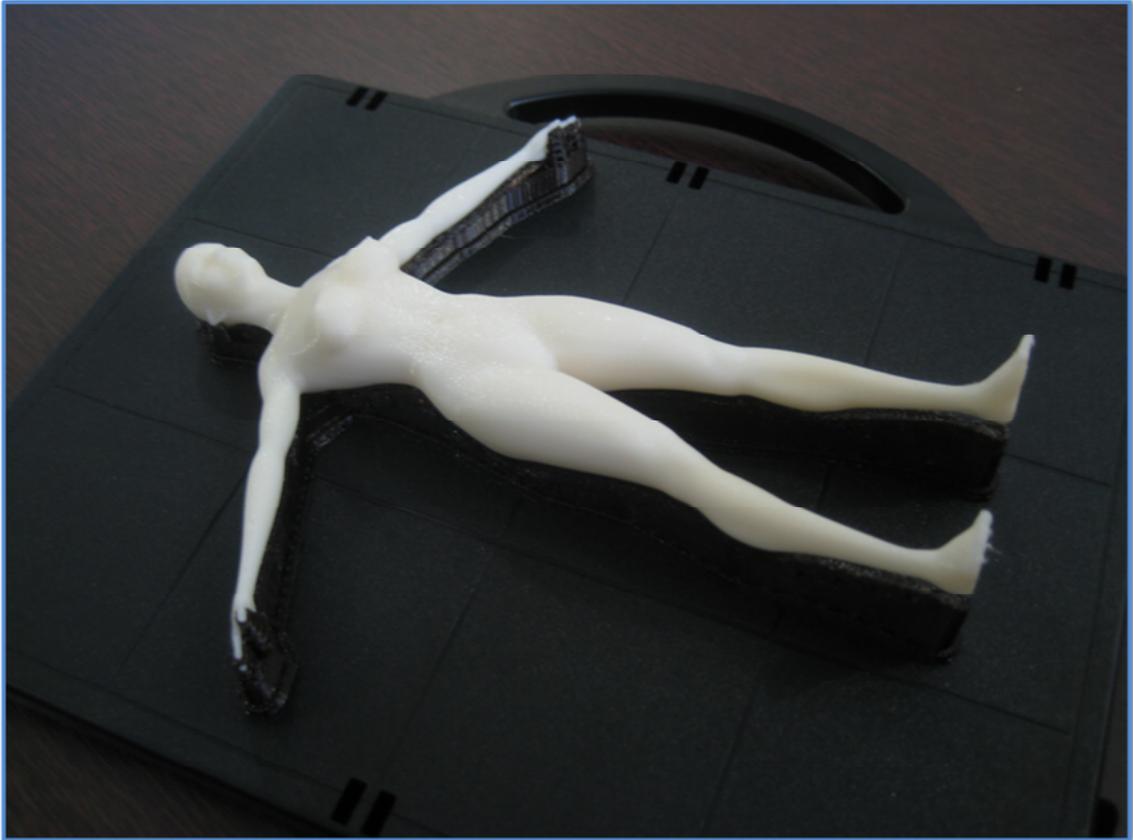


Figura 3:34 Resultado da impressão

4 RESULTADOS

Os próximos itens abordarão os resultados encontrados nos três estudos efetuados. Frequentemente serão utilizadas as abreviações PX para o modelo construído em *Poly Modeling* no 3ds Max, PY para o modelo construído em *Poly Modeling* no Maya e SP para o modelo construído em *Spline Modeling* no 3ds Max.

4.1 PARA FERRAMENTAS DE MODELAGEM

Baseando-se nas análises efetuadas sobre as ferramentas no item 3.1 foi criada a Tabela 4:1 atribuindo-se notas 0 (inexistente), 1 (fraca), 2 (razoável), 3 (boa) e 4 (excelente) conforme a eficiência com que se mostrou durante os trabalhos de construção dos modelos.

Item		3ds Max	Maya
Interface e filosofia de trabalho e ferramentas			
1	Consumo de memória RAM	2	4
2	Interface	4	2
3	Controle das vistas	4	3
4	Acionamento dos comandos	4	3
5	Edição das modificações	4	4
6	Feedback	4	1
7	Menus de contexto	4	3
8	Acionamento dos subobjetos/elementos	3	4
9	Repetição do comando	2	4
10	Cancelamento	4	3
11	Snap	4	3
12	Importação / exportação	4	2
13	Help	4	3
Ferramentas			
1	Seleção	4	3
2	Manipulação	4	3
3	Clonagem	4	2
4	Alinhamento	3	1
5	Criação de primitivas	4	1
6	Operações booleanas	4	2
7	Extrude e bevel	4	4
8	Espessura	4	1
9	Conexão de arestas e faces	4	4
10	Soldagem e remoção	3	4
11	Chanfro	4	2
12	Criação de faces e fechamento de aberturas	4	3

Item		3ds Max	Maya
13	Nurbs	3	3
14	Edição de linhas	4	1
15	Espelhamento, suavização, e subdivisão da malha	4	3
16	Medição	4	3
17	Preparação para exportação para STL	4	2
Total		112	81

Tabela 4:1 Análise paramétrica comparativa entre as ferramentas de modelagem

Somando-se as notas, o Maya atingiu 72,32% da nota do 3ds Max. Seus principais problemas identificados foram a falta de *feedback* ao usuário, a falta de alinhamento de rotação e escalonamento, o baixo número de primitivas, a inexistência de um método próprio para gerar espessura nos objetos e a fraca edição de *splines*. Por outro lado, suas maiores virtudes foram o consumo de memória RAM mais baixo, as formas como aciona os elementos, a excelente repetição de comandos, as maneiras de conectar arestas e faces, seus métodos de soldagem, principalmente a múltipla atuação simultânea na soldagem a um vértice específico e a edição de superfícies Nurbs.

O 3ds Max tem como pontos fortes a interface limpa, o controle das vistas acessível por diversas maneiras, o rápido acionamento dos comandos, o excelente menu de contexto, o grande número de ferramentas com *feedback* em tempo real para o usuário, o uso de maneiras já conhecidas de cancelamento de comandos, o snap extremamente flexível e variado, a diversidade de formatos de importação e exportação de arquivos, o help extremamente ilustrado, as múltiplas, flexíveis e ágeis maneiras de selecionar objetos, de manipulá-los e de copiá-los, o enorme número de primitivas de diversos tipos, as flexíveis e variadas operações booleanas, seu método rápido e eficiente de dar espessura aos objetos, os poderosos meios de chanfrar e de criar faces, sua extensa lista de possibilidades de edição de linhas, suas flexíveis operações de espelhamento, suavização, e subdivisão da malha, sua prática forma de medir componentes e sua eficaz preparação para exportação para STL. Como pontos mais fracos encontramos a necessidade de uma máquina poderosa para rodá-lo, a fraca estrutura de repetição de comandos, um alinhamento não muito intuitivo, embora flexível e a lentidão para soldar múltiplos vértices a um outro.

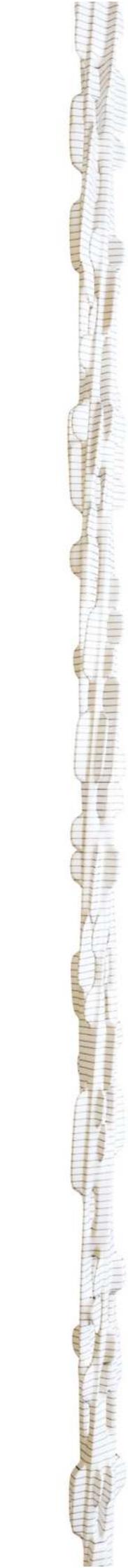
Os dois softwares empataram na forma como editam as modificações e no *Extrude/Bevel*, interativo no Maya e cheio de opções no 3ds Max. Houve empate também no trabalho com Nurbs, no entanto, o Maya se destaca na edição de superfícies enquanto o 3ds Max se sai melhor na edição de curvas, mas os dois precisam ainda de ferramentas adicionais de construção e principalmente de edição.

4.2 PARA OS MÉTODOS DE MODELAGEM

A primeira construção por *Poly Modeling* consumiu um tempo muito maior do que se previra inicialmente. O modelo foi fechado em aproximadamente 100 horas de trabalho, boa parte delas dedicadas a emparelhar os vértices em posição em relação às imagens mostradas por Rosa (2005). O gabarito foi fundamental no delineamento da forma, mas como não havia descrição das distâncias exatas, o posicionamento foi dado pela proporção visual entre os vértices vizinhos em um forte trabalho de desenho de observação.

A inserção de sólidos primitivos durante o processo levantou a hipótese de aceleração da construção, hipótese esta que foi confirmada pela modelagem da peça em *Poly Modeling* no Maya e na primeira tentativa em *Spline Modeling*, no 3ds Max. Poder-se-ia dizer que o *snap* nos vértices do primeiro modelo afetaria uma comparação justa, porém, o que está sendo colocado é a construção de um modelo. Nas atividades diárias de um designer, não há a necessidade de construção de diversos modelos idênticos. Para isso a malha poderia ser simplesmente exportada ou clonada. A necessidade de máxima igualdade partiu deste estudo especificamente, para garantir que as comparações das impressões possuíssem um mínimo de interferência. Assim, seguindo o gabarito em imagem, a edição de vários sólidos primitivos leva ao ganho de tempo na modelagem do todo.

Isolando-se as ferramentas e concentrando-se nos métodos, houve diferenças visuais significativas entre os modelos construídos por *Poly Modeling* e por *Spline Modeling*. Durante a criação da superfície, a única relação entre um *patch*, delineado pelas *splines*, e seus vizinhos são os vetores compartilhados pelos vértices que fazem parte destes subobjetos simultaneamente se eles tiverem sido definidos como



do tipo bezier ou smooth, já que o corner e o bezier corner permitem a edição dos vetores de forma independente ou dependente das configurações de um terceiro vértice. Ao acrescentar subdivisões, os *patches* vizinhos não são considerados, como acontece entre as faces no *Poly Modeling* isso gerou tensão na malha e realçou as formas corporais, principalmente musculares evitando, por exemplo, uma união mais suave entre os seios e o tórax. Também aumentou o volume da peça em 6,31%, de 49.353,36 cm³ no *Poly Modeling* para 52.468,32 cm³ na *Spline Modeling*. A necessidade de se manter sempre três ou quatro arestas também restringiu a construção mantendo sempre essa preocupação em mente, mas não tão diferente, já que a malha em polígonos também deve respeitar isso para garantir uma subdivisão sem muitas deformações.

O Nurbs possui uma modelagem com paradigmas próprios. Pelas limitações das ferramentas, a não ser que se queira construir um objeto de precisão ou puramente artístico, a modelagem orgânica requer um planejamento total da construção antes de iniciar, mesmo assim não há garantias de sua conclusão. Se não possui a preocupação com a quantidade de faces e segmentos, como no *Poly Modeling* e no *Spline Modeling*, apresenta uma preocupação com o número de *isoparms* e com o sentido de criação das superfícies. A dificuldade de unir essas superfícies e a falta de previsibilidade do seu resultado é o principal problema, mas ainda existem outros como o posicionamento do eixo do objeto sempre nas coordenadas 0,0,0, no Maya, independentemente de onde o objeto foi criado, dificultando sua manipulação.

A Tabela 4:4 mostra as demais diferenças de dimensionamento entre as peças. As medidas virtuais foram coletadas pelas próprias ferramentas dos softwares sobre os modelos virtuais, enquanto foi utilizado um paquímetro digital para os modelos físicos. Percebe-se que entre os softwares trabalhando em *Poly Modeling*, é muito pequena, havendo apenas uma variação de 0,016 mm na largura e 0,015, na altura. Já entre os diferentes métodos houve variações em todas as medidas, sendo as maiores entre o *Poly Modeling* e o Nurbs. Se se considerar estes dados como relativos à impressão, eles seriam absorvidos pela tolerância dimensional mínima das camadas impressas pelo modelo de impressora utilizado (0,254 mm). Mas considerando que outros modelos virtuais podem ser destinados a diferentes

utilizações, o conhecimento dessa diferença dimensional pode ser importante, principalmente se forem utilizados métodos de confecção de maior precisão.

Considerando o número de subobjetos/elementos encontrados, houve variações na contagem das faces, dos vértices e das arestas entre os modelos construídos tanto utilizando os diferentes métodos quanto utilizando os diferentes softwares, conforme apresentado pela Tabela 4:5.

Método	Poly Modeling		Spline Modeling		Nurbs ¹³			
	Software	Maya	3ds Max		3ds Max / Maya			
Dimensões (mm)	X	150,809	X	150,794	X	151,038	X	151,113
	Z	30,423	Y	30,423	Y	31,224	Z	28,897
	Y	169,683	Z	169,692	Z	169,993	Y	170,270

Tabela 4:2 Comparação entre as dimensões dos modelos do estudo.

Construção	Método	Poly Modeling	Poly Modeling	Spline Modeling
	Software	3ds Max	Maya	3ds Max
Virtual (a)	Faces	72.162	74.000	74.176
	Vértices	72.384	74.012	72.482
	Arestas	144.543	148.012	146.656

Tabela 4:3 Número de elementos encontrados nos modelos.

Entre os softwares, a explicação vem da variação nos algoritmos que executam a subdivisão das faces, nas ferramentas de espelhamento, na forma como é feita a união e a triangulação durante a exportação para o formato STL.

Entre os métodos, os diferentes processos de construção e subdivisão levam a quantidades diferentes. No *Spline Modeling*, não só a forma das curvas bezier e o algoritmo de criação da superfície em *patches*, quanto a forma como eles se subdividem afetaram os resultados. No Poly Modeling não há estas fazes, a

¹³ Baseado no modelo de retalhos, a versão mais próxima do modelo completo alcançada.

subdivisão é realizada sobre os polígonos do objeto, mas disposição dos vértices, arestas e polígonos vizinhos afetam essa etapa, assim como o fato de que os olhos vieram de um elemento externo.

O Poly Modeling no 3ds Max apresentou a menor quantidade de subobjetos. Já o Maya, mesmo utilizando o mesmo método obteve os maiores números (em média 2,4% maiores), sendo seguido de perto pelo Spline (média de 1,46% maior) no 3ds Max.

Uma outra questão que merece destaque foi a dificuldade em exportar o modelo do Maya para o STL. Não só pela sequência de procedimentos que são necessários para evitar problemas (ver tópico 3.1.2.17), quanto pela ausência de feedback de resultados das ações e de localização dos problemas, fato que não ocorreu no 3ds Max por conta da ferramenta STL Check.

4.3 MODELOS PRODUZIDOS

Houve variações nos modelos impressos, tanto quando utilizados o mesmo método em softwares diferentes quanto utilizando métodos diferentes no mesmo software. Os itens seguintes apresentam análises paramétricas das diferenças entre os resultados produzidos pela impressão.

4.3.1 DIMENSÃO

Com a rotação das peças para um melhor aproveitamento do material e redução do tempo de produção, os eixos das coordenadas no software da impressora diferem daqueles dos softwares de construção 3D. Assim, as medidas do eixo X do 3ds Max e do Maya, foram comparadas com as do eixo Y do CatalystEX. As do eixo Y do 3ds Max, equivalente ao eixo Z do Maya, foram comparadas ao eixo Z do CatalystEX e as do eixo Z do 3ds Max, Y no Maya, comparadas ao eixo X do CatalystEX.

O modelo construído em *Poly Modeling* no 3ds Max possui 150,794 mm X 30,423 mm X 169,692 mm. No entanto, a tela do programa mostrava 169,7 mm X 150,8 mm X 34,9 mm. Suspeitou-se a princípio que os 4,5 mm a mais das nádegas à ponta dos

pés¹⁴ se devia ao depósito de material de suporte realizado pela máquina antes da construção do modelo propriamente dito para permitir o posterior destacamento da peça da plataforma. Porém, medindo a peça percebeu-se que o giro automático do CatalystEX, não a girou em 90° no eixo X, ao deitá-la. O giro foi maior. Se o ângulo foi baseado no repouso das nádegas à da omoplata no mesmo plano, então a rotação adicional foi de 4,607° (ângulo em que se encontra uma reta que tangencia os dois pontos extremos).

Para checar essa hipótese foi construído um retângulo com as dimensões de altura e profundidade iguais as dadas pelo CatalystEX e colocado no ângulo da reta construída. O retângulo tocou a peça exatamente nos pontos extremos (nádegas, omoplata, cabeça e calcanhar), confirmando a hipótese (Figura 4:1) de que a opção *Auto Orientation* do CatalystEX busca horizontalizar a maior área possível, mesmo que gere ângulos diferentes dos quadrantes. O único ponto não tocado foi a ponta dos dedos do pé, eles estavam 0,112 mm abaixo (medido em linha perpendicular ao retângulo vermelho da Figura 4:1). Essa sim é a diferença entre as dimensões da profundidade analisada e da virtual, um pouco menos da metade da espessura mínima das camadas da máquina.

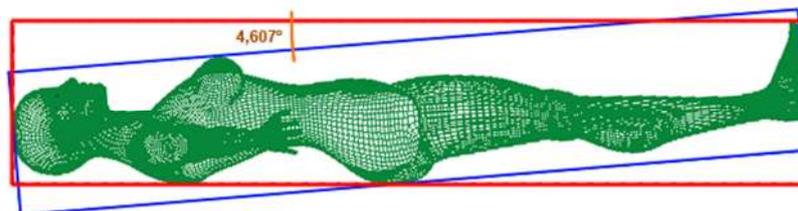


Figura 4:1 Diferença entre as medidas extremas da peça (azul) e as medidas da posição em que a peça foi impressa (vermelho).

Fonte: o autor, 2012

O modelo construído em *Poly Modeling* no Maya possui 150,809 mm X 30,423 mm X 169,683 mm, mas a tela do programa mostrou 169,7 mm X 150,8 mm X 35 mm. Aplicando a teoria do ângulo de impressão obteve-se o ângulo de 4,75°. Neste caso a ponta dos dedos do pé ultrapassaram o limite em 0,110 mm.

¹⁴ Nos softwares3D, a maior dimensão de profundidade vai das nádegas aos mamilos.

A diferença causada pelos vetores das curvas da omoplata e das nádegas do modelo construído em *Spline Modeling* no 3ds Max gerou a maior inclinação registrada entre os modelos: 5,564°. O modelo possui 151,038 mm X 31,224 mm X 169,993 mm e a tela do programa mostrou 170,2 mm X 151,0 mm X 37,5 mm. Este também foi o único modelo a apresentar diferenças na altura, além da maior na profundidade, embora tenha a menor distância entre a ponta dos dedos do pé e o limite dimensional encontrado pelo CatalystEX: 0,107 mm.

Para comparar as medidas virtuais com a peça impressa, utilizou-se a teoria do ângulo de impressão e, com isso se mediu novamente os modelos virtuais. Das peças impressas foram captadas através de um paquímetro digital.

A Tabela 4:4 mostra o comparativo das medidas tomadas.

Método	Software	Dimensão virtual (cm)	Dimensão prevista pela impressora (mm)	Dimensão impressa (mm)
<i>Poly Modeling</i>	3ds Max	X 150,794	Y 150,8	X 149,47
		Y 34,788	Z 34,9	Y 36,09
		Z 169,692	X 169,7	Z 169,54
<i>Poly Modeling</i>	Maya	X 150,809	Y 150,8	X 149,50
		Z 35,110	Z 35,0	Y 35,96
		Y 169,683	X 169,7	Z 169,89
<i>Spline Modeling</i>	3ds Max	X 151,038	X 151,0	X 149,70
		Y 37,393	Z 37,5	Y 38,05
		Z 169,993	Y 170,2	Z 170,25

Tabela 4:4 Comparação entre as dimensões virtuais e as impressas.

Pode-se dizer que houve perda de precisão dimensional na impressão tanto pelo escalonamento das peças quanto pelo limite mínimo de 0,254 mm para cada camada. O posicionamento do objeto sobre o material de deposição altera o posicionamento das camadas e conseqüentemente, as dimensões nas extremidades, mas são valores muito pequenos e provavelmente alguns deles oriundos de alguma pequena inclinação dos instrumentos de medida no momento da captação.

4.3.2 CONTAGEM DE ELEMENTOS

Houve variações na contagem das faces, vértices e arestas entre os modelos construídos tanto utilizando os diferentes métodos quanto utilizando os diferentes softwares e ainda entre eles e o software da impressora, conforme apresentado pela Tabela 4:5.

Entre os softwares, a explicação vem da variação nos algoritmos que executam a subdivisão das faces, nas ferramentas de espelhamento, na forma como é feita a união e a triangulação durante a exportação para o formato STL.

Entre os métodos, os diferentes processos de construção e subdivisão levam a quantidades diferentes. No *Spline Modeling*, não só a forma das curvas bezier e o algoritmo de criação da superfície em *patches*, quanto a forma como eles se subdividem afetaram os resultados. No Poly Modeling não há estas fazes, a subdivisão é realizada sobre os polígonos do objeto, mas disposição dos vértices, arestas e polígonos vizinhos afetam essa etapa, assim como o fato de que os olhos vieram de um elemento externo.

Construção	Método	Poly Modeling	Poly Modeling	Spline Modeling
	Software	3ds Max	Maya	3ds Max
Virtual (a)	Faces	72.162	74.000	74.176
	Vértices	72.384	74.012	72.482
	Arestas	144.543	148.012	146.656
Analisado pelo software da impressora (b)	Faces	144.752	148.000	144.960
	Vértices	72.378	74.006	72.482
	Arestas	217.128	222.015	217.440
Diferença (a-b)	Faces	-72.590	-74.000	-70.784
	Vértices	6	6	0
	Arestas	-72.585	-74.003	-70.784

Tabela 4:5 Número de elementos encontrados nos modelos.

O Poly Modeling no 3ds Max apresentou a menor quantidade de elementos virtuais. Já o Maya, mesmo utilizando o mesmo método obteve os maiores números (em média 2,4% maiores), sendo seguido de perto pelo Spline (média de 1,46% maior) no 3ds Max. Entre os números analisados pelo CatalystEX, em termos proporcionais, a diferença foi menor e mais constante: em torno de 2,25% entre PX e PY e 0,14% entre PX e SP.

Se compararmos dentro do mesmo método, as menores diferenças entre as versões virtuais e os arquivos analisados vieram do SP, chegando a não haver diferença no número de vértices, embora haja diferenças no número de faces e arestas, fruto da citada distorção geométrica incompreendida. Se não considerarmos o zero, elas são em média 2,5% menores que o PX, o segundo lugar. O PY, além de ter a maior quantidade de elementos, apresenta as maiores diferenças entre as versões virtuais e analisadas pelo CatalystEX.

Nas numerações analisadas pela impressora, poderia-se dizer que há uma distorção geométrica pela duplicação da quantidade de faces com a permanência do mesmo número de vértices. Mas como o software CatalystEX, da impressora não era objeto deste estudo, não se aprofundou a questão em busca de uma causa e o motivo real permanece não identificado. Algumas hipóteses podem ser levantadas como a possibilidade de que os diferentes algoritmos de conversão para o formato STL tenham influenciado os resultados diferentes; ou a inclusão pelo Catalyst do volume do material de suporte na contabilidade dos elementos. Um estudo posterior analisando os dados mais aprofundadamente, junto ao fabricante é necessário para encontrar o motivo desta diferença.

4.3.3 ERROS DETECTADOS PELO SOFTWARE DE IMPRESSÃO

Não houve erros ou problemas durante a impressão. Porém, ao analisar os arquivos STL, o CatalystEX encontrou alguns problemas. Em todos os arquivos houve curvas tão pequenas que foram descartadas, é muito provável que estivessem localizadas nas unhas, pois estas eram as menores estruturas do corpo modelado. No PX e SP, 28 linhas foram ignoradas, mas no Maya foram 32. Este último software também foi o único a apresentar defeitos no arquivo. O STL apresentava 30 arestas não unidas.,

o que é estranho pois teoricamente não deveria haver a possibilidade de exportação sem a correção destes erros.

Percebe-se que a origem está na escolha do software. A ausência de comandos próprios de checagem e exportação para o STL no Maya é a causa mais provável deste resultado, mas há também a possibilidade da baixa qualidade do plugin utilizado.

A Tabela 4:6 mostra a lista dos erros perseguidos pelo CatalystEX e o número dos encontrados.

Método	Software	Arestas não unidas	Peq. curvas descartadas	Curvas abertas fechadas	Curvas mescladas	Curvas sem orientação	Curvas auto-intersectantes	Curvas abertas
<i>Poly Modeling</i>	3ds Max	0	28	0	0	0	0	0
<i>Poly Modeling</i>	Maya	30	32	0	0	0	0	0
<i>Spline Modeling</i>	3ds Max	0	28	0	0	0	0	0

Tabela 4:6 Erros detectados e reportados pelo CatalystEX.

4.3.4 IMPRESSÃO

Entre diferentes softwares as diferenças foram mínimas. O processamento dos arquivos STL de PX e de PY dividiu os objetos em 147 camadas. Houve uma diferença de apenas 1 minuto entre as duas impressões, a favor do PY. Nos materiais consumidos, PY custou 1,21% mais material que PX, porém compensou consumindo 0,96% a menos material de deposição. Essa variação pode ter origem nas alterações dos números de faces e no posicionamento da peça.

As cópias impressas são visualmente praticamente idênticas. As únicas diferenças detectadas são provenientes da diferença de dimensionamento da altura do material de deposição ou da inclinação entre PX e PY. O 0,1 mm apresentado pelo CatalystEX e comentado no item 4.3.1 fez com que as camadas, embora em mesmo

número, fossem depositadas em seções transversais ligeiramente diferentes nas mesmas regiões do corpo. Assim, a camada mais alta da barriga, por exemplo, é apresentada como um ponto em PY e como uma elipse em PX; a primeira camada depositada para a construção das nádegas é mais larga em PY, o mesmo acontecendo na região da omoplata; a ponta dos mamilos recebeu um pequeno, quase imperceptível, ponto no canto em PX, mas em PY aparece como plano.

Entre os diferentes métodos, SP foi dividido em 157 camadas, 6,8% a mais que os demais modelos. Isso refletiu em mais de 20 minutos a mais de impressão, um tempo em média 10,59% maior. O consumo de materiais também foi maior em 7,49% para o material de preenchimento e 9,39% para o de suporte.

A Tabela 4:7 mostra as diferenças encontradas nos valores detectados pelo CatalystEX. É curioso perceber que o volume das peças (material de impressão) encontrado por este software é bem menor que o apresentado pela ferramenta *Measure* do 3ds Max. Os 27,29 cm³ de PX são mostrados no software 3D como 49,35 cm³, os 29,51 cm³ de SP são mostrados como 51,33 cm³.

Método	Software	Camadas	Tempo de impressão	Volume de mat. Preenchimento	Volume mat. suporte
<i>Poly Modeling</i>	3ds Max	147	3:33 h	27,29 cm ³	16,60 cm ³
<i>Poly Modeling</i>	Maya	147	3:32 h	27,62 cm ³	16,44 cm ³
<i>Spline Modeling</i>	3ds Max	157	3:55 h	29,51 cm ³	18,07 cm ³

Tabela 4:7 Diferenças de consumo dos modelos impressos.

De qualquer maneira, o resultado virtual de SP apontava para um maior consumo de material devido à tensão de suas formas. A posição dos vetores dos vértices criou um grande contraste formal realçando os músculos e divisões do corpo, como entre o tórax e os seios, nos músculos da coxa, próximos à rótula, na virilha, no esternocleidomastódeo, na região do abdome, na panturrilha, nas nádegas, na região das omoplatas e na face, tanto na altura da maçã do rosto quanto na região da sobrancelha. Todas essas regiões ficaram mais definidas, com detalhes mais perceptíveis. O efeito é o de um modelo anabolizado (Figura 4:2). Essa variação formal refletiu também na estrutura de suporte. Diferentemente das impressões em

Poly Modeling a impressão SP saiu da máquina com material de suporte dentro da boca e nas orelhas. Esta última deposição, por sinal, gerou uma deformação no pavilhão auricular que não é percebida nas outras cópias e que quase impediu a formação da orelha esquerda. O mais interessante é que, mesmo o modelo sendo absolutamente simétrico, a impressora adicionou o material de suporte apenas na orelha esquerda, assim como na parte esquerda interna da boca.

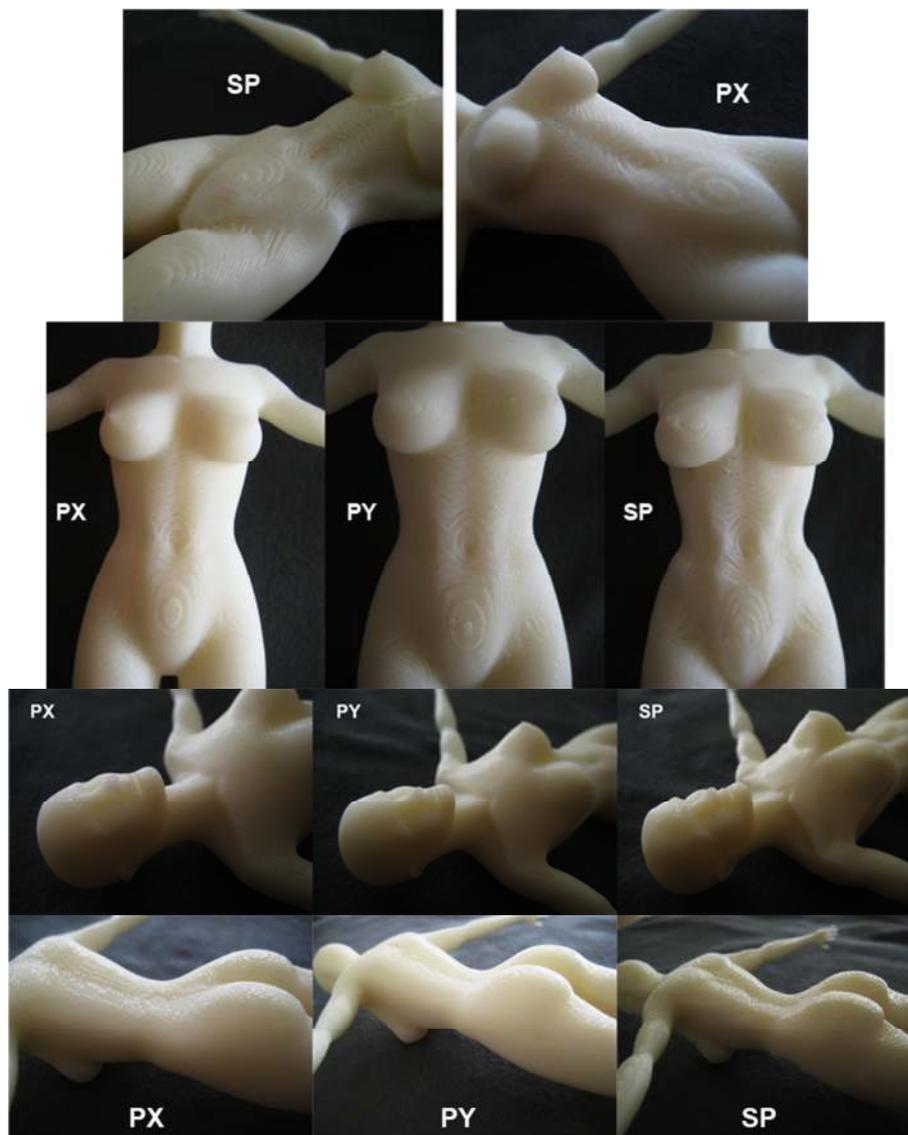


Figura 4:2 Resultado das impressões

Como era de se esperar, muitos detalhes foram perdidos na redução de escala. Em qualquer que seja a variável, as unhas foram perdidas, assim como os olhos, as pálpebras, os lóbulos do pavilhão auricular, os detalhes dos lábios e da região entre eles e o nariz. O tensionamento da malha de SP garantiu que outros detalhes não se



perdessem, como a forma da rótula, da lateral do joelho, e da panturrilha; do cotovelo e uma definição melhor do que deveria ser os olhos. Por outro lado, esse mesmo tensionamento trouxe estranheza à forma final, perdeu-se a harmonia das curvas suaves do corpo feminino proposto por Rosa (2005).

5 CONCLUSÕES

Ao longo deste estudo passou-se por diversos comandos e ferramentas em dois softwares testando três métodos de construção de produtos orgânicos. Muitas informações foram apreendidas e neste documento relatadas.

5.1 SOBRE OS MÉTODOS DE MODELAGEM

Dentre os métodos de modelagem, o *Poly Modeling* se apresentou como um método de construção extremamente flexível em todas as partes do modelo. Este dado indica um bom potencial para variadas aplicações. Em uma observação empírica superficial paralela à pesquisa, percebeu-se que muitos softwares menos conhecidos têm sido lançados com módulos de trabalho exclusivamente voltados para este tipo de modelagem. E mesmo nos softwares que foram analisados neste estudo, mais estabelecidos no mercado, percebe-se que há uma dedicação maior ao desenvolvimento e aperfeiçoamento das ferramentas ligadas a este método.

A forma de modelagem indireta do Nurbs (requer a construção de outras estruturas baseadas na original para, a partir delas, erguer novas estruturas) funcionou bem durante a construção dos modelos para as imagens dos capítulo 2.2.3 deste trabalho, e leva a acreditar ser um dos melhores métodos em precisão dimensional na modelagem não-orgânica pela maneira como trabalha os elementos internos. Porém, como não foram registrados dados concretos, nem havia na metodologia proposta qualquer intenção de análise destes dados, os estudos e seus respectivos resultados aqui registrados se concentram na abrangência da modelagem orgânica e nela mostrou dificuldades de construção, imprecisão nas medidas e resultados inesperados que inviabilizaram a adaptação da metodologia de Rosa (2005), a partir do *poly modeling*. As formas geradas se uniram em partes indesejadas e houve alteração dimensional e formal durante a união dos retalhos ou impossibilidade de edição de sólidos unidos ou ainda inflexibilidade na manipulação dos elementos.

A *Spline Modeling* trás as vantagens das curvas bézier, mas de uma maneira mais livre que no nurbs, o que permite o desenho mais artístico requerido pela modelagem orgânica. Outros estudos poderiam comprovar a eficiência de suas

ferramentas de precisão como o torneamento (*Revolve/Lathe*), a extrusão, o bevelamento e as operações de tupia e perfil, o que o tornaria um dos métodos mais flexíveis se unir a maleabilidade na construção orgânica à comprovação da precisão na construção não-orgânica.

Neste trabalho testou-se o *Poly Modeling* em duas formas de construção: (1) a edição de um sólido-base único e, através de extrusões e bevelamentos, criação de toda a estrutura do produto, o qual é de longe o processo mais conhecido e; (2) a edição de vários sólidos-base e posterior junção entre eles. Este último conceito manteve a malha mais limpa e quadrangulada, requisito para uma boa subdivisão das faces. Não foram detectadas grandes variações nos resultados gerados por diferentes softwares, mas se mostrou como o método que melhor conservou a precisão e dimensões das formas depois de prototipadas.

Utilizando o *Spline Modeling* também foram realizados dois processos construtivos. No primeiro se utilizou de seções transversais para reproduzir o modelo. No segundo, construiu-se pela criação de vértices distribuídos pelo espaço tridimensional. Apesar da primeira opção ter enfrentado limitações quando se atingiu o detalhamento requerido para a face e orelha, ela apresentou um visual mais suave, semelhante ao alcançado pela subdivisão do *Poly Modeling*. O segundo processo deixou a malha tensa e volumosa, como se o modelo possuísse músculos hipertrofiados. Apresentou as maiores diferenças dimensionais entre o modelo virtual e o prototipado.

O método de modelagem orgânica utilizando Nurbs foi de longe o mais problemático e maior consumidor de tempo, não necessariamente para construir, mas para desvendar uma trajetória possível de execução para a metodologia de Rosa (2005). Pelos testes executados, observa-se que, se os retalhos houvessem sido unidos, a malha teria uma boa proximidade dimensional, mas é justamente neste ponto onde se encontrou o problema: o Nurbs requer uma construção que mantenha a direção das *Isoparms* das superfícies alinhadas para que estas possam ser unidas, mas a modelagem orgânica não pode garantir esse alinhamento por toda a superfície, por definição, imprecisa. Além disso, os softwares se mostraram ineficientes não só no processo de alinhamento e rotação das *Isoparms*, como na união delas, gerando,

neste último caso, resultados imprevisíveis. Ainda, em outro caso de ineficiência, não permitiram a edição da malha após seu refinamento. Este fato é tão espantoso que merece outras averiguações através de outras estratégias construtivas, porém, baseando-se no que foi estudado, este é um método não recomendado para a construção de objetos orgânicos, embora se saia muito bem na construção de objetos de precisão. A ineficiência relatada, somada ao avanço da precisão e flexibilidade do *Spline Modeling* ilustram motivos para a derrocada do uso do Nurbs fora dos ambientes da engenharia.

5.2 SOBRE AS FERRAMENTAS

Em meio aos resultados das análises, percebeu-se que tanto o 3ds Max quanto o Maya são softwares poderosíssimos, são capazes de construir qualquer objeto com uma consistente e vasta gama de ferramentas para as mais variadas finalidades dentro do processo construtivo. No Maya, há aspectos de usabilidade conflitantes, como utilizar o Ctrl em uma tela, adiciona seleção enquanto em outra janela a subtrai. Por outro lado, é um software que consome menos recursos do sistema (entre 24% e 39% menos, durante os estudos realizados), se mostrando mais leve que o 3ds Max, além de possuir um excelente meio de repetição de comandos acionado a qualquer momento por uma única tecla do teclado.

Porém outro ponto foi o maior diferencial que levou à escolha do 3ds Max como o mais indicado para a modelagem: o feedback em tempo real enquanto se configura as opções das suas ferramentas. No caso específico da prototipagem rápida há outros aspectos vitoriosos: a checagem da malha a procura de problemas que afetem a prototipagem, além da capacidade de exportação para o formato utilizado.

Mas estes não são os únicos pontos fortes deste modelador. A interface limpa, mas de boa acessibilidade, o excelente menu de contexto e o grande número de objetos primitivos são alguns dos outros pontos fortes listados.

Se o Maya é for única opção de modelagem, é importante apagar o histórico construtivo com certa frequência para minimizar interferências em processos posteriores da modelagem. Também se recomenda fazer cópias com diferentes

nomes dos arquivos ao longo da construção, uma vez que a ausência de feedback pode levar a opções sem retorno. Por último, é importante testar mais de um plugin de exportação para STL e seguir as orientações de preparação da malha, colocadas por Brian Ringley (2011) e citadas no item 3.1.2.17, já durante a construção da mesma, para reduzir a chance/número de erros na malha.

5.3 SOBRE A METODOLOGIA

Quanto à metodologia seguida, verificou-se que a proposta de Rosa (2005) é bem construída e uma das mais completas em termos de modelagem do corpo humano. Porém, o modelo impresso ajudou a visualizar aspectos que a tela plana do monitor ocultava, como a curvatura acentuada da boca descrevendo uma parábola estreita. Este problema só seria detectado na vista superior, mas a mesma é frequentemente descartada por se manter muito poluída em qualquer método e software de construção estudados e, acredita-se, na maioria dos modelos orgânicos que se mostrarem mais verticais que outra direção. Outro problema que até foi percebido, mas que se confirmou apenas após a impressão foi a reduzida espessura dos membros superiores e inferiores (excetuando especificamente a panturrilha e a coxa), além da desproporção entre os comprimentos do braço e do antebraço. No mais, a proporção, as curvas, e o quanto cada vértice deveria salientar para gerar a suavidade do músculo sobre a pele, e principalmente a constante preocupação com a quadrangularidade da malha, além das estratégias de corte das faces em busca disto, geraram não só um bom aprendizado, como uma experiência prazerosa com resultados satisfatórios no método proposto. No mais, pela preocupação com a quadrangulação, portá-la para os demais métodos não gerou maiores problemas, embora a finalização dos modelos em nurbs não ter sido possível, neste caso muito mais pela ineficiência de suas ferramentas aplicadas à modelagem orgânica que pela adaptação da metodologia escolhida.

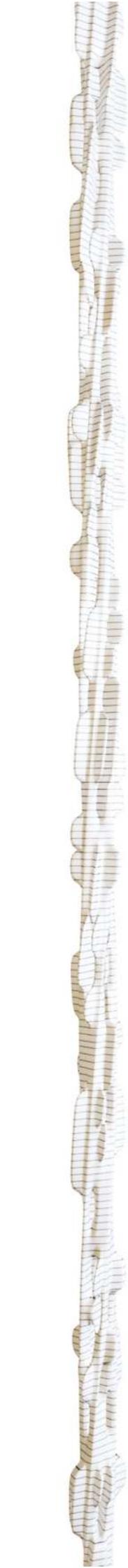
5.4 SUGESTÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES

Evidências percebidas com os estudos em *Spline modeling* levam a acreditar que o mais próximo da utilização ideal deste método talvez fosse uma combinação dos processos de construção por seções transversais e a construção pela criação de vértices distribuídos pelo espaço tridimensional. O processo por construção de seções transversais (não necessariamente geradas pelo *Section*, mas também por desenho livre) pode se assemelhar em velocidade ao do *Poly Modeling* com múltiplos sólidos-base: poderia ser mais rápido e provavelmente garantir a fidelidade da forma. Porém provavelmente formas mais complexas e orgânicas, como a cabeça do modelo utilizado neste estudo ainda seria afetada pelas mesmas deformações que sofreu. A união seria então uma excelente opção para a criação de objetos baseados em tecido e/ou outros tipos de chapas flexíveis, como de metais e de polímeros.

Ainda relacionado ao *Spline Modeling*, em um teste informal, posterior aos realizados neste estudo sob o método *Spline Modeling*, adicionou-se sobre o *Surface* o modificador *Relax* com *Value* 1 e *Iterations* 10, para amenizar as tensões da malha, já que um *patch* não interage com seus vizinhos, exceto pelos seus vetores compartilhados, durante o processo de subdivisão gerado pelo *Surface*. O resultado amenizou quase todas as tensões trazendo o método de volta às possibilidades de uso, dentro da fidelidade formal e dimensional, mas ainda seriam necessários mais testes e impressões para comprovar esta nova hipótese que, por enquanto, se mantém nos testes virtuais.

As construções geradas neste trabalho levam a acreditar que o uso de *Poly Modeling* através da pré-modelagem e posterior união de sólidos primitivos seja mais econômico em termos temporais. Experiências com grupos distintos com cronometragem de tempo para a construção de diferentes formas orgânicas poderiam verificar esta possibilidade.

A escultura digital é outro método existente que tem avançado no mercado, mas que não foi investigado. Iniciou como suporte ao *Poly Modeling* visando à construção de modelos ainda mais orgânicos de maneira mais rápida, pois se baseia em alterações



simultâneas de múltiplos vértices sobre uma malha já subdividida ou que se subdivide por demanda. Por ser muito artístico apresenta um grau maior de dificuldade de replicabilidade, mas seria um bom alvo para um próximo estudo: compreender como a modelagem baseada em pintura de formas, juntamente com as alterações via *normal map* e *displacement*, baseados em imagens, podem se comportar dentro de um processo de prototipagem rápida.

Com relação à impressão, foi percebido que, se o modelo fosse impresso na vertical, talvez o acabamento tivesse sido melhor, pois nesta posição a taxa de alteração da área das camadas é menor. Porém, o volume de material de suporte necessário teria sido bem maior e aumentaria as chances de ocorrerem deformações, como aconteceu com a orelha esquerda do modelo gerado em *Spline Modeling* no 3ds Max.

Outro ponto é a dúvida que fica em como estes modelos se comportariam em outros métodos de prototipagem, como a Impressão Tridimensional ou a Jato de Tinta, ou ainda em processos de prototipagem por desbaste de material.

Esta pesquisa, assim, desponta como uma integrante de em um longo caminho de possibilidades. Espera-se que os dados aqui fornecidos possam ajudar outros pesquisadores e profissionais das áreas correlatas em suas tomadas de decisão.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKLEMAN, E., CHEN, J., XING, Q. & GROSS, J. L. **Cyclic Plain-Weaving on Polygonal Mesh Surfaces with Graph Rotation Systems** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531384)
- ALEXA, M. & ADAMSON, A. **Interpolatory Point Set Surfaces** – Convexity and Hermite Data in ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol.28, Ed. 2, Nova York: ACM, Abril 2009. (DOI 10.1145/1516522.1516531)
- ALIAGA, D. G., ZHANG, J. & BOUTIN M. **A Framework for Modeling 3D Scenes using Pose-free Equations** in ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol.29, Ed. 1, Nova York: ACM, Dezembro 2010. (DOI 10.1145/1640443.1640450)
- AUTODESK. **3ds Max 2011 Help**. Autodesk: 2010
- _____. **3ds Max 2012 Help**. Autodesk: 2011 (a)
- _____. **Maya 2012 Help**. Autodesk: 2011 (b)
- BAKER, D. BLEVINS, N. HADIS P. & KIRVAN, S. **The History Of 3D Studio**. 2006. Disponível em <http://www.maxunderground.com/the_history_of_3d_studio>. Acesso em 16 de outubro e 2010.
- BARAN, I., VLASIC, D., GRINSPUN, E. & POPOVIĆ, J. **Semantic Deformation Transfer** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531342)
- BAXTER, M. **Projeto do Produto: Guia Prático Para o Desenvolvimento de Novos Produtos**. São Paulo, Editora: Edgar Blücher, 1998.
- BELL, J. A.; OW J. **3D Studio MAX R3 f/x and design**. Editora: Coriolis Group Books, 1999.
- BEN-CHEN, M., WEBER, O. & GOTSMAN, C. **Variational Harmonic Maps for Space Deformation** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of

ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531340)

BICKEL, B. BÄCHER, M., OTADUY, M. A., et al. **Capture and Modeling of Non-Linear Heterogeneous Soft Tissue** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531395)

BLACK ORBIT STUDIOS. **Model a Seamless NURBS Human Character**. 2005. Disponível em <<http://www.webdesign.org/3d-graphics/tutorials/model-a-seamless-Nurbs-human-character.4844.html>>. Acesso em 13 de janeiro de 2012.

BOMFIM, G. A. **Metodologia para o Desenvolvimento de Projetos**. João Pessoa, Editora Universitária/UFPB, 1995.

BOMMES, D., ZIMMER, H. & KOBELT, L. **Mixed-Integer Quadrangulation** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531383)

BURROUGHS, C. **Robocasting**: Sandia develops new way to fabricate ceramics. 1999. Disponível em <<http://www.sandia.gov/media/robocast.htm>>. Acessado em 19 fev 2010.

CAPUZZO, H (coordenador). **Gênese e Primórdios**. Disponível em <<http://eba.ufmg.br/panorama/genesis/genese01.html>>. Acesso em 21 de junho de 2010

CASHMAN, T. J., AUGSDÖRFER, U. H., DODGSON, N. A., SABIN, M. A. **NURBS with Extraordinary Points**: High-degree, Non-uniform, Rational Subdivision Schemes in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531352)

CHOI, J., SZYMCZAK, A. **Fitting solid meshes to animated surfaces using linear elasticity** in ACM Transactions on Graphics (TOG). Vol. 28. Ed. 1. Nova York: ACM, Janeiro, 2009. (DOI 10.1145/1477926.1477932)

- CHOI, S. H. e CHAN, A. M. M. **A virtual prototyping system for rapid product development** in *Computer-Aided Design*, n.36. 2004
- DANIELE, T. **Poly-Modeling with 3ds Max: Thinking Outside of the Box**. Editora: Focal Press, 2008.
- DEGENER, P. & KLEIN, R. **A Variational Approach for Automatic Generation of Panoramic Maps** in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. Vol. 28. Ed. 1. Nova York: ACM, Janeiro, 2009. (DOI 10.1145/1477926.1477928)
- FLORIO, W.; ARAÚJO, N. S.; SEGALL, M. L. **Protótipos rápidos de coberturas complexas em arquitetura: comparação entre os processos FDM e 3D Printer**. 14 Convención Científica de Ingeniería Y Arquitectura. Cuba, 2008.
- GAL, R., SORKINE, O., MITRA, N. J. & COHEN-OR, D. **iWIRES: An Analyze-and-Edit Approach to Shape Manipulation** in *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009*. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531339)
- GOMES, A. J. P., MORGADO J. F. M. & PEREIRA E. S. **A BSP-Based Algorithm for Dimensionally Nonhomogeneous Planar Implicit Curves with Topological Guarantees** in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol.28, Ed. 2, Nova York: ACM, Abril 2009. (DOI 10.1145/1516522.1516528)
- GORNI, A. A. **Prototipagem Rápida: O Que É, Quem Faz e Por Que Utilizá-la**. In: *Plástico Industrial*. São Paulo, p. 230-239. Março 2001.
- HARMON, D., VOUGA, E., SMITH, E., et al. **Asynchronous Contact Mechanics** in *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009*. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531393)
- HUANG, Ke-Sen. **Siggraph 2009 papers on the web**. 2009. Disponível em <<http://kesen.realtimerendering.com/sig2009.html>>. Acesso em 24 de setembro de 2010.

_____. **Siggraph 2010 papers on the web**. 2010. Disponível em <<http://kesen.realtimerendering.com/sig2010.html>>. Acesso em 24 de setembro de 2010.

IGARASHI, T., MITANI, J. **Apparent Layer Operations for the Manipulation of Deformable Objects** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010. Vol. 29. Ed. 4. Nova York: ACM, Julho 2010. (DOI 10.1145/1833349.1778847)

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Novo Processo de Prototipagem Rápida**. Disponível <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010170031209>>. Acessado em 18 fev 2010.

JACOBS. **Stereolithography and Other RP&M Technologies**.SME/RPA, 1996.

JON PEDDIE RESEARCH. **3D Modeling and Animation Market Study**. 2009. Disponível em <<http://jonpeddie.com/publications/3d-modeling-and-animation-market/>>. Acessado em 25 de janeiro de 2012.

KALOGERAKIS, E., NOWROUZEZHAI, D., SIMARI, P. et al. **Data-driven curvature for real-time line drawing of dynamic scenes** in ACM Transactions on Graphics (TOG). Vol. 28. Ed. 1. Nova York: ACM, Janeiro, 2009. (DOI 10.1145/1477926.1477937)

KEG, Tsinghua. **ArnetMiner**: Conference Rank: Multimedia,image,video. 2009. Disponível em <<http://arnetminer.org/page/conference-rank/html/Multimedia,image,video.html>>. Acesso em 24 de setembro de 2010.

KIKUUWE, R., TABUCHI, H. & YAMAMOTO, M. **An Edge-Based Computationally Efficient Formulation of Saint Venant-Kirchhoff Tetrahedral Finite Elements** in ACM Transactions on Graphics (TOG). Vol. 28. Ed. 1. Nova York: ACM, Janeiro, 2009. (DOI 10.1145/1477926.1477934)

LANE, J. **History of Maya**. 2011. Disponível em <<http://tourke.wordpress.com/2011/04/04/history-of-maya/>>. Acesso em 22 de janeiro de 2012.

LI, Q. & TIAN, J. **2D Piecewise Algebraic Splines for Implicit Modeling** in ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol.28, Ed. 2, Nova York: ACM, Abril 2009. (DOI 10.1145/1516522.1516524)

LI, X. Y., SHEN, C. H., HUANG, S. S. et al. **Popup: Automatic Paper Architectures from 3D Models** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010. Vol. 29. Ed. 4. Nova York: ACM, Julho 2010. (DOI 10.1145/1833349.1778848)

LINO, F. J.; NETO, R. J. **A Prototipagem Rápida na Indústria Nacional** in 2º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica da Ordem dos Engenheiros, Coimbra, p. 4.15-4.22, dez 2000.

_____. **A Prototipagem Rápida Na Indústria Cerâmica, Comparação Com Outros Sectores Industriais.** *Kerâmica: A Revista da indústria cerâmica portuguesa.* N. 260. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2003

LINO, F. J.; CAMBOA, H.; PAIVA, B.; NETO, R. J. **Direct Conversion of Rapid Prototyping Models** in MATERIAIS 2001, 1st International Materials Symposium, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, abril 2001.

MARAFFI, C. **Maya Character Creation: Modeling and Animation Controls.** Editora: New Riders Press: 2003.

MCDERMOTT, W. **Real World modo: The Authorized Guide: In the Trenches with modo.** Focal Press; 2009.

MELLO, C. H. P.; SILVA, C. E. S.; COSTA, S. C. **Comparação de três diferentes tecnologias de prototipagem rápida em relação a critérios de custo e tempo.** XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2006.

MEYER, J. **The Future of Digital Imaging** - High Dynamic Range Photography. 2004. Disponível em <<http://www.cybergrain.com/tech/hdr>>. Acesso em 10 de junho de 2010.

MYLES, A. & PETERS, J. **Bi-3 C² Polar Subdivision** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531354)

OBJET. **Objet Connex Family**. 2009. Disponível em <http://www.objet.com/3D-Printer/Objet_Connex_Family/> Acesso em 28 de março de 2011.

_____. **Simulate Standard Plastics – Transparent**. 2011. Disponível em <<http://www.objet.com/3D-Printing-Materials/Overview/Transparent/>>. Acesso em 19 de abril de 2011

PHAM, D. T. & GAULT, R. S. **A Comparison Of Rapid Prototyping Technologies**. *in* International Journal of Machine Tools and Manufacture, Cardiff, v.38, ed. 10-11, p. 1257-1287, 1998.

PIEGL, L. & TILLER, W. **The NURBS Book**. Springer-Verlag. 1997

RIGLEY, B. **STL File Prep Maya 2011**. 2011. Disponível em <<http://wiki.daap.uc.edu/groups/infocenter/wiki/a4e78/>>. Acesso em 21 de janeiro de 2012.

RIVERS, A., DURAND, F. & IGARASHI, T. **3D Modeling with Silhouettes** *in* ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010. Vol. 29. Ed. 4. Nova York: ACM, Julho 2010. (DOI 10.1145/1833349.1778846)

ROSA, D. R., **Modelagem do Corpo Humano**. 2005. Disponível em <http://www.escultopintura.com.br/Tutoriais/Tutorial_Modelagem_Corpo_Humano/Sumario/Sumario_Corpo_Humano.htm>. Acesso em 8 de fevereiro de 2011.

RUSSO, M. **Polygonal Modeling: Basic and Advanced Techniques**. Jones & Bartlett Publishers, 2005.

SAINT-MOULIN, B. **3D softwares comparisons table**. 2008. Disponível em <http://www.tdt3d.be/articles_viewer.php?art_id=99>. Acesso em 11 de junho de 2011.

SANTOS, J. **O Uso de Modelos tridimensionais Físicos para o desenvolvimento de Produtos**. Rio de Janeiro: Tese COPPE / UFRJ, 1999.

SANTOS, J. R. L.; ZAMBERLAN, M. C. P. L.; SANTOS, I. A. **Novas Tecnologias de Modelagem Tridimensional Física e Virtual no Design de Jóias**. Rio de Janeiro, 2003.

- SASS, L. & OXMAN, R. **Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design**. Design Studies. Vol. 27. N. 3. Maio, 2006.
- SCHODEK, D. **Digital Design and Manufacturing**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- SCHOLLMEYER, A. & FRÖHLICHY, B. **Direct Trimming of NURBS Surfaces on the GPU** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531353)
- SMOCK, D. **High-Tech Implants**. 2011. Disponível em <http://www.designnews.com/document.asp?doc_id=230500>. Acesso em 19 de abril de 2011.
- SPENCER, S. **ZBrush Character Creation: Advanced Digital Sculpting**. 2 ed. Sybex, 2010.
- STAHLBERG, Steven. **About me**. 2009. Disponível em <<http://www.androidblues.com/about/>>. Acesso em 10 de janeiro de 2011.
- STEINMAN, R. M., PIZLO, Z. & PIZLO F. **J.Phi is not beta, and why Wertheimer's discovery launched the Gestalt revolution: a minireview**. 2000
- TED. **Anthony Atala: Printing a human kidney**. 2011. Disponível em <http://www.ted.com/talks/lang/en/anthony_atala_printing_a_human_kidney.html> Acesso em 19 de abril de 2011.
- THORNGREN, J. **HDRI & Luminance Space**, 2002. Disponível em <http://www.trinisica.com/sub_learn_typedissue.asp?lv=3&mode=1&issue=002>. Acesso em 10 de junho de 2010.
- TOURNOIS, J., WORMSER, C., ALLIEZ, P. & DESBRUN, M. **Interleaving Delaunay Refinement and Optimization for Practical Isotropic Tetrahedron Mesh Generation** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531381)

- VALCARON. **Messing around in 3D Studio R4: 2D Shaper, Lofter, and 90's-style Raytracing**. 2009. Disponível em http://www.youtube.com/watch?v=BayZZQFFO_s. Acesso em 22 de janeiro de 2012.
- VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.
- WAND, M., ADAMS, B., OVSJANIKOV, et al. **Efficient Reconstruction of Non-rigid Shape and Motion from Real-Time 3D Scanner Data** in ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol.28, Ed. 2, Nova York: ACM, Abril 2009. (DOI 10.1145/1516522.1516526)
- WANG, H., LIAO, M., ZHANG, Q., et al. **Physically Guided Liquid Surface Modeling from Videos** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531396)
- WERTHEIMER, M. **Experimental Studies on the Seeing of Motion**. 1912
- WIJK, Jarke J. van. **Symmetric Tiling of Closed Surfaces: Visualization of Regular Maps** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531355)
- WOJTAN, C., THÜREY, N., GROSS, M. & TURK, G. **Deforming Meshes that Split and Merge** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1576246.1531382)
- XU, W., WANG, J., YIN, K., et al. **Joint-aware Manipulation of Deformable Models** in ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. Vol. 28, Ed. 3, Nova York: ACM, Agosto 2009. (DOI 10.1145/1531326.1531341)