



COPPE/UFRJ

USO DE TÉCNICA DE ENGENHARIA REVERSA PARA RECONSTRUÇÃO
TRIDIMENSIONAL DE FÓSSEIS ATRAVÉS DE FOTOGRAFIAS

Marcos Coutinho Monnerat Araujo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Nelson Francisco Favilla Ebecken
Gerson Gomes Cunha

Rio de Janeiro
MARÇO DE 2010

USO DE TÉCNICA DE ENGENHARIA REVERSA PARA RECONSTRUÇÃO
TRIDIMENSIONAL DE FÓSSEIS ATRAVÉS DE FOTOGRAFIAS

Marcos Coutinho Monnerat Araujo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Nelson Francisco Favilla Ebecken, D. Sc.

Prof. Gerson Gomes Cunha, D. Sc.

Prof^ª. Cristina Jasbinschek Haguener, D. Sc.

Prof. José Luis Drummond Alves, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2010

Araujo, Marcos Coutinho Monnerat

Uso de técnica de engenharia reversa para reconstrução tridimensional de fósseis através de fotografias / Marcos Coutinho Monnerat Araujo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

X, 61 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Nelson Francisco Favilla Ebecken

Gerson Gomes Cunha

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 56-61.

1. Engenharia Reversa. 2. Reconstrução tridimensional. 3. Shape-from-silhouete. I. Ebecken, Nelson Francisco Favilla *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu pai e minha mãe, que sempre me deram o suporte e o incentivo necessários para eu poder me dedicar aos estudos e à pesquisa sem preocupações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, à meus pais por me tornarem o que eu sou hoje, à minha noiva pelo ouvido e pelo apoio, aos meus irmãos pelas opiniões, ao time do Museu Nacional (em especial ao Pedro e ao Orlando), à minha sempre orientadora prof. Cristina Haguenuer que me apresenta sempre as oportunidades de estudo e pesquisa, ao time do GRVa/LAMCE, ao meu orientador Nelson Ebecken, ao prof. Gerson Cunha (também orientador) pelo incentivo constante e conhecimento impressionante, e ao CNPq pelo financiamento do projeto Dinosvirtuais.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

USO DE TÉCNICA DE ENGENHARIA REVERSA PARA RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE FÓSSEIS ATRAVÉS DE FOTOGRAFIAS

Marcos Coutinho Monnerat Araujo

Março/2010

Orientadores: Nelson Francisco Favilla Ebecken

Gerson Gomes Cunha

Programa: Engenharia Civil

O projeto Dinosvirtuais tem por objetivo criar uma base de dados de modelos tridimensionais de fósseis e esculturas da coleção de vertebrados fósseis do Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro. As técnicas de engenharia reversa utilizadas para a reconstrução tridimensional de objetos são possíveis de serem utilizadas fora da área de conhecimento da engenharia para auxiliar diversas outras esferas de conhecimento como, no caso, a paleontologia. Diversas técnicas de reconstrução tridimensional de objetos podem ser aplicadas à reconstrução de fósseis, como o escaneamento à laser, o escaneamento por tomografia computadorizada e a *Shape-from-silhouette* (Forma pela silhueta), por exemplo. A técnica de *shape-from-silhouette* é uma alternativa de baixo custo para a reconstrução tridimensional de objetos se comparada a outras como as citadas acima. Este trabalho apresenta algumas possibilidades de técnicas de reconstrução 3D de objetos passíveis de uso em diferentes áreas de conhecimento e a experiência do projeto Dinos Virtuais com a técnica *shape-from-silhouette* com o uso da solução comercial de *software* 3D Software Object Modeler.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

USE OF REVERSE ENGINEER TECHNIQUE FOR 3D RECONSTRUCTION OF
FOSSILS WITH PHOTOGRAPHS

Marcos Coutinho Monnerat Araujo

March/2010

Advisors: Nelson Francisco Favilla Ebecken

Gerson Gomes Cunha

Department: Civil Engineering

The Dinosvirtuais project aims to create a database of 3D models of fossils and sculptures of the collection of the paleovertebrates section of the Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro. The reverse engineering techniques used for 3D reconstruction of objects may be used for different spheres of knowledge rather than Engineering, in this case, paleontology. Different 3D object reconstruction techniques can be applied to fossil reconstruction such as laser scanning, computer tomography scanning and shape-from-silhouette for example. The Shape-from-silhouette 3D reconstruction technique is an alternative to more expensive 3D reconstruction techniques such the ones mentioned above. This work presents some possibilities of 3D reconstruction techniques that can be used for different spheres of knowledge and the Dinosvirtuais experience with the shape-from-silhouette technique using the commercial solution *software* 3D Software Object Modeler.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Apresentação do projeto	1
1.2 – Justificativa	2
1.3 – Objetivos	3
1.4 – Estado da arte	4
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAIS TEÓRICOS.....	10
2.1 – Engenharia Reversa	10
2.2 – Reconstrução Tridimensional	11
2.3 – <i>Shape-from-silhouette</i>	20
CAPÍTULO 3 – A RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE FÓSSEIS	26
3.1 – Técnicas utilizadas	26
3.2 – Opção pelo uso da técnica <i>Shape-from-silhouette</i>	28
3.3 – Etapas da reconstrução tridimensional	33
3.4 – Resultados finais	43
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
4.1 – Resultados parciais	51
4.2 – O projeto Dinosvirtuais	52
4.3 – Aplicação das técnicas de engenharia reversa	52
4.4 – A técnica <i>Shape-from-silhouette</i>	53
4.5 – Trabalhos futuros	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Website Digital Morphology.....	5
Figura 2 – Website 3D Museum.....	6
Figura 3 – Website museu Murberget.....	7
Figura 4 – Website projeto Virtual Vault.....	8
Figura 5 – Website Dinosvirtuais.....	9
Figura 6 – Reconstrução 3D por escaneamento à laser.....	26
Figura 7 – Reconstrução 3D por tomografia computadorizada.....	27
Figura 8 – Reconstrução 3D por <i>Shape-from-silhouette</i>	27
Figura 9 – Imagens de modelos digitalizados.....	35
Figura 10 – Imagem do <i>print mat</i> e exemplos de fotos para a reconstrução 3D.....	35
Figura 11 – Fotos usadas na reconstrução 3D da espécie <i>Pycnonemosaurus nevesi</i>	37
Figura 12 – Detalhes do <i>calibration mat</i>	37
Figura 13 – Identificação dos grupos de pontos do <i>calibration mat</i>	38
Figura 14 – Sequência de procedimentos para identificação da silhueta da imagem.....	39
Figura 15 – Fotos da escultura de um <i>Ceratosaurus nasicornis</i> e do crânio de um <i>Tapejara wellnhoferi</i>	40
Figura 16 – Imagens dos modelos 3D do <i>Vinctifer comptoni</i>	45
Figura 17 – Fotos utilizadas nas reconstruções 3D dos objetos usados nos testes de desempenho da reconstrução 3D de objetos.....	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Dados dos modelos 3D dos objetos reconstruídos.....	43
Tabela 2 – Dados comparativos dos modelos 3D do <i>Vinctifer comptoni</i>	45
Tabela 3 – Teste de desempenho na reconstrução 3D de objetos.....	47

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de técnicas de reconstrução 3D	17
Quadro 2 – Comparação entre técnicas de reconstrução 3D	18
Quadro 3 – Critérios para escolha de técnicas de reconstrução 3D.....	32
Quadro 4 – Espécies selecionadas para o projeto Dinosvirtuais	34
Quadro 5 – Desempenho proporcional de cada etapa da reconstrução 3D dos objetos.....	48

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Apresentação

Este trabalho apresenta um estudo exploratório descritivo, mostrando o uso de técnicas engenharia reversa e reconstrução tridimensional de objetos aplicadas a áreas de conhecimento diferentes da engenharia (no caso a Paleontologia) para a criação de modelos tridimensionais de fósseis e esculturas para visualização na internet através de uma exposição virtual. É detalhado o uso de uma ferramenta comercial para reconstrução tridimensional de objetos através da técnica *Shape-from-silhouette*, que digitaliza objetos através de fotografias convencionais.

A pesquisa foi realizada em paralelo ao projeto “Dinossauros do Brasil: Exposição virtual no Museu Nacional – Dinosvirtuais”, que foi desenvolvido através de uma parceria entre o Setor de Paleovertebrados do Departamento de Geologia e Paleontologia, Museu Nacional (PV/DGP/MN/UFRJ) o Laboratório de Tecnologias da Informação e da Comunicação (LATEC/UFRJ) e o Grupo de Realidade Virtual do Laboratório de Métodos Computacionais da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (GRVA/LAMCE/COPPE/UFRJ) e foi financiado pelo CNPq (projeto número 553221/2006-0). O projeto Dinosvirtuais consiste na criação de uma exposição virtual de vertebrados fósseis do Museu Nacional (MN-UFRJ) em um ambiente de realidade virtual publicado e disponibilizado para visualização na Internet através da integração de ferramentas de reconstrução de modelos tridimensionais, geração de ambientes de realidade virtual (p. ex. modelagem e animação 3D) e formatação para linguagem de Realidade Virtual para a Internet (X3D/VRML – Virtual Reality Modeling Language). Resultados parciais e finais desse projeto foram apresentados em congressos de diferentes áreas de conhecimento como a Paleontologia, o Design e a Realidade Virtual (MONNERAT, *et al.* 2009, 2008, e ROMANO, *et al.* 2007, 2006).

As linhas de ação do projeto Dinosvirtuais incluíram: levantamento de dados e difusão da coleção de vertebrados fósseis do Setor de Paleovertebrados do MN-UFRJ para a sociedade; modelagem de um ambiente virtual da área de exposições do MN-UFRJ, utilizando técnicas de Realidade Virtual, para servir de abrigo para a exposição virtual de vertebrados fósseis; construção de um portal na Internet sobre o material da exposição considerando questões como projeto gráfico, usabilidade, ergonomia cognitiva, arquitetura da informação, interação e navegação para ser usado como suporte ao Ambiente Virtual da exposição.

Este trabalho irá explicitar todas as etapas realizadas para a reconstrução tridimensional dos fósseis e esculturas paleoartísticas do MN-UFRJ, discriminando as tecnologias e as ferramentas utilizadas. Além disso também serão descritos os conceitos e fundamentos da técnica de reconstrução 3D *Shape-from-silhouette* e apresentados os resultados finais da reconstrução dos fósseis e esculturas expostos no projeto Dinosvirtuais. Não será abordado neste trabalho de pesquisa a construção e avaliação da exposição virtual (modelagem do cenário, geração de interações do usuário com os exemplares expostos, etc.), e do portal que dá suporte à exposição virtual.

1.2 – Justificativa

“Nos últimos anos vêm ocorrendo mudanças profundas nas relações entre os diversos campos da engenharia e das ciências básicas, resgatando as chamadas ciências da engenharia, que foram o eixo da criação da COPPE na UFRJ. Nesta reaproximação, destaca-se o papel do uso de computadores na simulação e na otimização de processos e sistemas, no projeto de produtos e na solução matemática de problemas não lineares presentes na engenharia. A COPPE tem fortalecido esta tendência através da iniciativa de promover cursos intensivos de Matemática Aplicada e Computação na Engenharia. Desenvolvem-se, assim, novas áreas na engenharia na fronteira do conhecimento, como a computação de alto desempenho e a Realidade Virtual” (COPPE, 2010).

Somente por meio da realidade virtual é possível proporcionar ao visitante da exposição uma ampliação das possibilidades de interação com as peças expostas. Com o uso da Realidade Virtual é possível, por exemplo, visualizar as peças por qualquer ângulo,

afastar-se e aproximar-se dela quase que a qualquer distância, obter informações mais completas sobre a peça sem limitação de espaço, movê-las para junto umas das outras com o objetivo de comparar forma, tamanho, etc. E através de técnicas de engenharia reversa como a reconstrução tridimensional de objetos reais é possível levar esse acervo de paleontologia do MN-UFRJ para o computador, permitindo então o uso da Realidade Virtual descrito acima, entre outros.

Este trabalho tem relevância na medida em que apresenta novas possibilidades de aplicação de técnicas e tecnologias voltadas principalmente para aplicações em engenharia para outras áreas de conhecimento, no caso a paleontologia, reforçando a importância da interdisciplinaridade.

Também contribui com estudos acadêmicos futuros de outros pesquisadores que possam desenvolver trabalhos sobre o tema dessa pesquisa ou sobre temas relacionados com esse, deixando à disposição uma documentação que possa ser adotada em projetos futuros de digitalização e disponibilização de acervos de laboratórios de pesquisa e museus.

1.3 – Objetivos

O projeto de pesquisa tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade de técnicas de engenharia reversa para a reconstrução tridimensional de objetos para outras áreas de conhecimento fora do campo das engenharias.

Os objetivos específicos da pesquisa são: analisar e comparar diferentes técnicas de reconstrução 3D de objetos; selecionar a técnica de reconstrução 3D de objetos mais apropriada para a obtenção de modelos tridimensionais de fósseis e esculturas paleoartísticas para visualização através da internet; aprofundar a análise da técnica escolhida considerando as particularidades do contexto pré-definido e; avaliar a qualidade dessa técnica sob os aspectos de fidelidade geométrica, resolução, produtividade e desempenho.

1.4 – Estado da arte

O uso de técnicas de Engenharia Reversa e em especial de reconstrução tridimensional vem sendo bastante usado não só na engenharia como também em diversas outras áreas de conhecimento como a medicina, a odontologia, a educação e também os museus.

Atualmente podemos encontrar diversos projetos de museus envolvendo a criação de exposições virtuais de seus acervos. Além do projeto Dinosvirtuais, do MN-UFRJ em parceria com o GRVA/LAMCE/COPPE e com o LATEC/UFRJ, pioneiro no Brasil e na América do Sul, podem ser citados o Inuit 3D (CORCORAN *et al.*, 2002), do Canadian Museum of Civilization and the National Research Council of Canada, o SEE (DI BLAS, 2003), do Israel Museum, em Jerusalem, e o Politecnico di Milano, na Itália e o projeto ARCO (WALCZACK, 2006; PETRIDIS *et al.*, 2005; PATEL *et al.*, 2003, 2004) financiado pela União Européia em parceria com a Universidade de Sussex, a Sussex Archaeological Society, a Akademia Ekonomikzna w Poznaniu, o Commissariat a l' Energie Atomique, o Giunti Gruppo Editoriale, a Universidade de Bath e o Victoria and Albert Museum, entre outros.

Focado especialmente na reconstrução tridimensional o website Digital Morphology (**Figura 1**)“é um arquivo dinâmico de informação em morfologia digital e tomografia computadorizada de alta resolução de espécies biológicas” (<http://digimorph.org/>). Nele são apresentados modelos tridimensionais de estruturas ósseas (em sua maioria) de espécies viventes e extintas. O Digimorph é uma iniciativa da National Science Foundation Digital Libraries, dos Estados Unidos e utiliza um tomógrafo computadorizado de alta resolução projetado e construído especialmente para esse projeto nas instalações da University of Texas High-Resolution X-ray Computed Tomography Facility (UTCT) para realizar a reconstrução tridimensional das espécies.

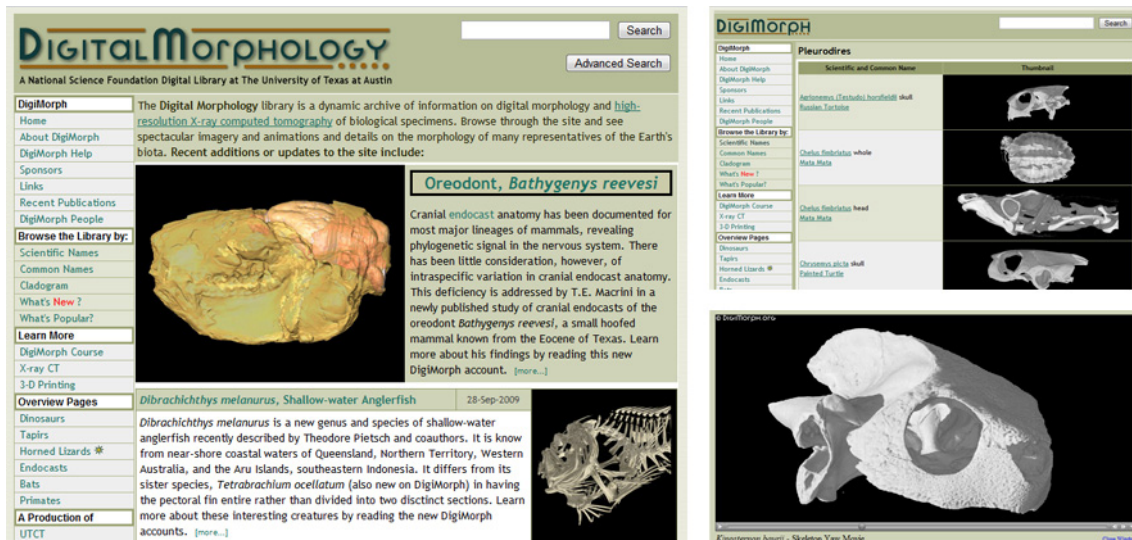


Figura 1. Website Digital Morphology (<http://digimorph.org/>). Catálogo de espécies biológicas digitalizados por tomografia computadorizada.

O projeto Digimorph, assim como o Dinosvirtuais, apresenta um catálogo de modelos 3D de estruturas ósseas de diferentes espécies. Além do fato de o catálogo do Dinosvirtuais ter apenas fósseis de espécies extintas os dois projetos possuem objetivos um pouco distintos. Enquanto o Digimorph se pretende apenas um catálogo de espécies o Dinosvirtuais tem objetivos educacionais e publicitários, buscando atrair o interesse do público geral para os Museus, em especial o MN-UFRJ, através de uma exposição virtual de fósseis. Outras diferenças entre os dois projetos são: a técnica de reconstrução 3D utilizada (o Digimorph obtém os modelos 3D a partir de imagens tomográficas, técnica muito precisa, porém muito custosa (que será apresentada no item 2.2 deste trabalho), enquanto o Dinosvirtuais utiliza, principalmente, a técnica de *shape-from-silhouette*); a tecnologia utilizada na apresentação dos modelos 3D digitalizados (o Digimorph utiliza o Quicktime 3D o Dinosvirtuais utiliza o X3D/VRML). O X3D/VRML (<http://www.web3d.org/x3d/>) apresenta maiores possibilidades de interação do usuário com o modelo 3D do que o Quicktime 3D (<http://www.apple.com/quicktime/>), representando uma vantagem comparativa.

Outra iniciativa semelhante a essa é o 3D Museum (<http://3dmuseum.org/>), mantido pelo Departamento de Geologia da Universidade da Califórnia (**Figura 2**). Ele apresenta modelos tridimensionais de esqueletos de animais (em sua maioria) vivos ou fósseis. Os modelos 3D são obtidos através do *scanner* à laser Minolta Vivid 910 que além de capturar a geometria dos objetos também é capaz de gerar as texturas. Os dados

digitalizados são então processados com os *softwares* Raindrop Geomagic Studio e o Rapidform para finalizar os modelos 3D completos e publicá-los no website.

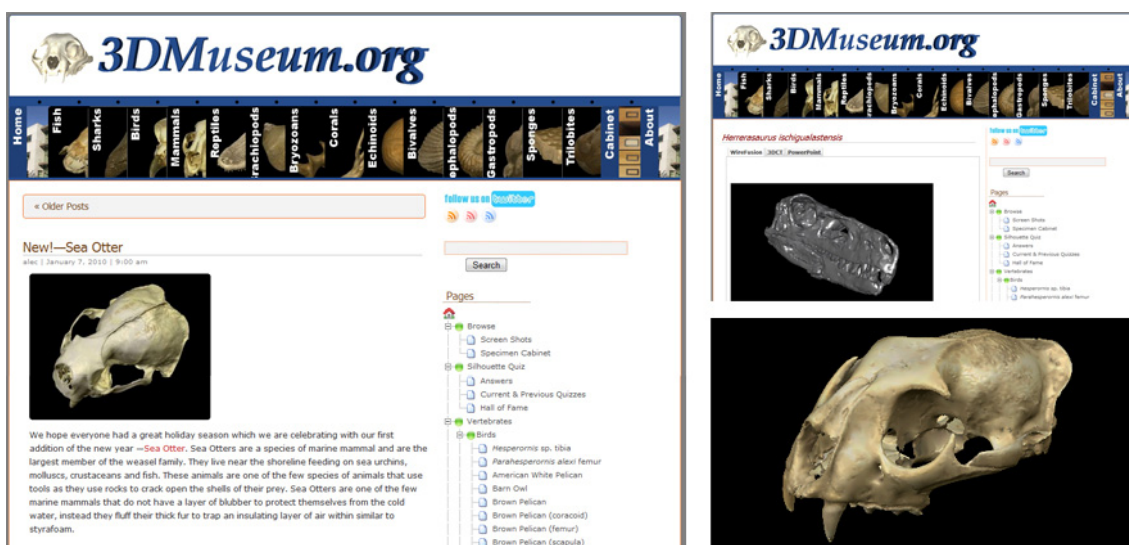


Figura 2. Website 3D Museum (<http://3dmuseum.org>). Catálogo de espécies biológicas digitalizados por scanner à laser.

Assim como o projeto Digimorph, o projeto 3D Museum se apresenta apenas como catálogo de espécies vivente e fósseis que apresenta modelos 3D de estruturas ósseas de diferentes espécies. O 3D Museum obtém os modelos 3D a partir da técnica de escaneamento à laser *structured light* (técnica que será apresentada resumidamente no item 2.2 deste trabalho), mais precisa do que a SFS utilizada no Dinosvirtuais, porém mais lenta e custosa. O 3D Museum utiliza duas tecnologias de apresentação dos modelos 3D, o Wirefusion (<http://www.demicron.com/wirefusion/>), que tem a vantagem de não necessitar da instalação de nenhum plugin para visualizar o modelo e o 3DCT (<http://www.3dcompress.com/>) que necessita da instalação de um plugin e oferece uma maior possibilidade de interação do usuário com o modelo 3D. O X3D/VRML, utilizado pelo projeto Dinosvirtuais também necessita da instalação de um plugin e apresenta diferentes possibilidades de interação em relação ao 3DCT.

O museu Murberget, da cidade de Harnosand, na Suécia, mantém um projeto de digitalização de seu acervo também usando técnicas de SFS. Mensalmente são disponibilizados para visualização gratuita em seu *website* novos modelos 3D do acervo do museu que inclui artefatos diversos além de armas e crânios de animais (<http://www.murberget.se/page.aspx?id=231/>) (Figura 3).

Arkiv

Ljud

Fotografier

Folkminnen

Föremål

Månandens föremål i 3D

Hemsparbässa

Harskramla

Skräddarsax

Väckarklocka

Vallhorn

Lergök

Rivjärn

Transistorradio

Putshyvel

Stämpel

Kaffekvarn

2007-2008

Eldslagningssten

Egyptisk

oljelampa

Kantele

Hjortsvinsskalle

Mekaniskt

elldon

Prydnadstomte

Hällbildsklot

En samisk pung

En flaska

påskmüst

Skrin i

krypsteknik

Oval

spännbuckla

2007-2008

Skriv ut

Se museets föremål tredimensionellt!

I museets samlingar finns många spännande föremål. Varje månad berättar vi mer om ett av dem. Dessutom kan du titta på föremålen tredimensionellt. Du kan vrida och vända och zooma som du vill.



Eldslagningssten

Juli 2007

Hur fungerar forna tiders tändsticksask?



Oljelampa

Augusti 2007

Snedbelysning avslöjade en 2000 år gammal lampa från Egypten!



Kantele

September 2007

Varifrån kommer denna kantele som på 1920-talet flöt iland på stranden vid Sälsten i Härnösand?



Hjortsvinsskalle

Oktober 2007

Hjortsvin är ett sällsynt djur som bara finns på ön Sulawesi i Indonesien.



Mekaniskt elldon

November 2007

En avancerad ljus- och braständare från 1700-talet.



Prydnadstomte

December 2007

En prydnadstomte med förmodat ursprung i Tyskland.

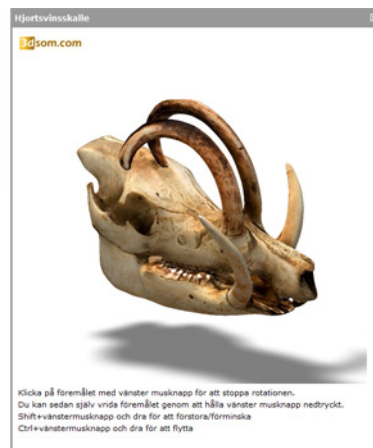


Figura 3. Website do museu Murberget (<http://www.murberget.se/page.aspx?id=231>). Catálogo do acervo do museu digitalizados por SFS.

O projeto Virtual Vault (<http://www.cdarc.org/what-we-do/current-projects/virtual-vault/>) (Figura 4), uma parceria entre o Center of Desert Archaeology (Centro de Arqueologia do Deserto) e o Arizona State Museum (Museu Estadual do Arizona), tem como objetivo disponibilizar na internet o acervo do museu através da sua digitalização tridimensional. Da mesma forma que o museu Murberget, o projeto Virtual Vault utiliza a técnica de SFS para a reconstrução tridimensional dos objetos.

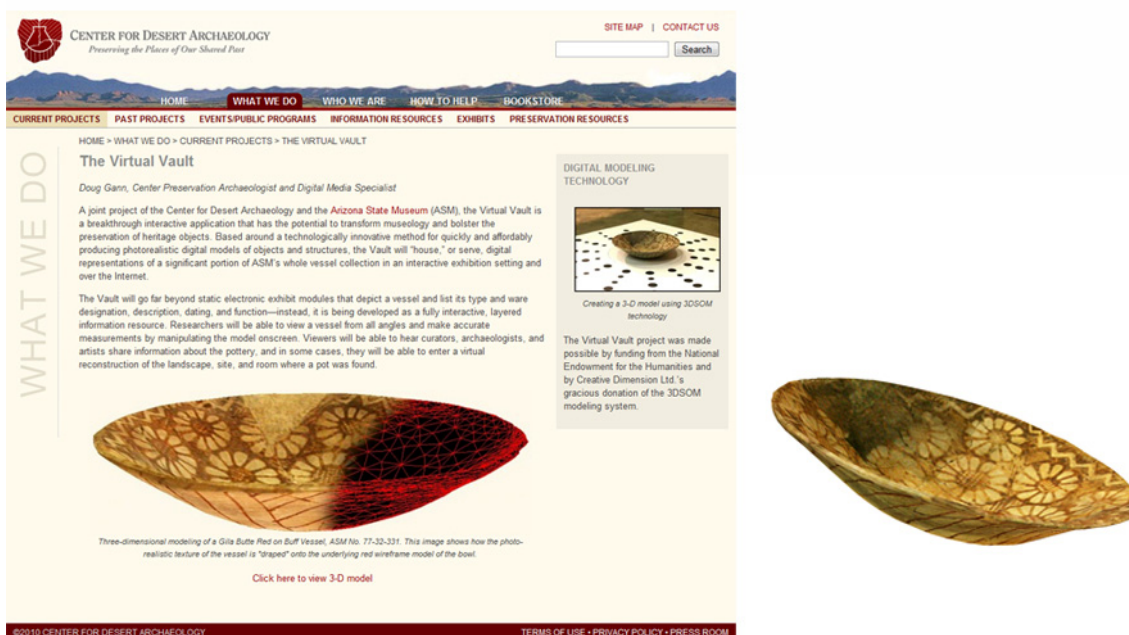


Figura 4. Website do projeto Virtual Vault (<http://www.cdarc.org/what-we-do/current-projects/virtual-vault/>). Digitalização do acervo do museu por SFS.

Tanto o museu Murberget quanto o projeto Virtual Vault utilizam a mesma técnica de reconstrução 3D utilizada primordialmente pelo projeto Dinosvirtuais, a SFS, utilizando o *software* comercial 3D Software Object Modeler (3D S.O.M), também utilizado pelo projeto Dinosvirtuais. Outra semelhança entre as iniciativas do museu Murberget e do projeto Virtual Vault é que ambos utilizam o visualizador que o *software* oferece, que dispensa a instalação de *plugins* para visualizar o modelo 3D, mas oferece poucas possibilidades de interação do usuário com o objeto em relação ao X3D/VRML utilizado pelo Dinosvirtuais.

O projeto Dinosvirtuais apresenta um website (<http://www.dinosvirtuais.museunacional.ufrj.br/>) com um catálogo de fósseis de animais pré-históricos digitalizados através da técnica de SFS com o uso do *software* comercial 3D S.O.M e disponibilizados para visualização em formato X3D/VRML (Figura 5). Além disso apresenta uma exposição tridimensional em um cenário virtual com características visuais semelhantes às do MN-UFRJ onde os modelos digitalizados dos fósseis e das esculturas paleoartísticas são expostos junto com informações básicas sobre as espécies e links para as páginas de cada espécie no catálogo de fósseis.



Figura 5. Website Dinosvirtuais (<http://www.dinosvirtuais.museunacional.ufrj.br>). Catálogo de vertebrados fósseis digitalizados por SFS e exposição virtual interativa.

Capítulo 2

Referenciais teóricos

2.1 – Engenharia Reversa

“Engenharia Reversa (ER) é o processo de descoberta dos princípios tecnológicos de um produto, objeto ou sistema através da análise de sua estrutura, função e operação. Isso envolve separar algo (uma peça mecânica, um componente eletrônico ou um programa de computador, por exemplo) e analisar seu funcionamento em detalhes para ser usado em manutenção ou para tentar fazer um novo produto ou programa que tenha a mesma função sem ser apenas uma cópia do original. (...) O propósito é o de deduzir as decisões de projeto a partir do produto final com pouco ou nenhum conhecimento adicional sobre os procedimentos envolvidos na produção original” (WIKIPEDIA CONTRIBUTORS, 2009 A).

“O termo ‘Engenharia Reversa’ tem sua origem na análise de produtos – onde a prática de se decifrar os projetos através do produto finalizado é senso comum. A Engenharia Reversa é regularmente utilizada para se melhorar os próprios produtos, bem como analisar os produtos do concorrente” (CHIKOFFSKY, 1990). De acordo com CHIKOFFSKY (1990) a Engenharia Reversa por si própria não envolve modificar o sistema analisado ou criar um novo sistema baseado no sistema analisado. A Engenharia Reversa é um processo de exame apenas e não um processo de mudança ou de replicação.

LACERDA (2009) conceitua Engenharia Reversa em sua dissertação de mestrado como sendo o inverso da engenharia convencional, para ele, na Engenharia Reversa parte-se do objeto real e obtém-se o modelo virtual. Da mesma forma LIMA (2003) considera em sua dissertação de mestrado que o “processo de Engenharia Reversa caracteriza-se pela reprodução de um modelo físico, para que este possa transformar-se em um modelo digital”.

Ao contrário do que dizem LACERDA (2009) e LIMA (2003), para este trabalho a reconstrução tridimensional de um objeto (modelo físico) é considerada uma técnica ou um recurso que pode ser utilizado em um processo de Engenharia Reversa, que tem por objetivo examinar e entender os conceitos de engenharia por trás daquele produto final. O modelo digital em si não é o resultado do processo de Engenharia Reversa.

Uma das técnicas de Engenharia Reversa utilizada para se adquirir informações sobre peças mecânicas é a de reconstrução tridimensional seja através de *scanner* à laser, SFS, imagens tomográficas, etc. Após obtido o modelo tridimensional da peça no computador é possível, através de *softwares* CAD/CAM obter informações sobre as propriedades físicas da peça como resistência mecânica a impactos, etc. Além de se poder replicar a peça para realizar testes em laboratório.

2.2 – Reconstrução Tridimensional

“Os sensores de captura de imagens tridimensionais operam, de modo geral, projetando (na forma ativa) ou adquirindo (na forma passiva) energia eletromagnética em/de um objeto, em seguida, registrando essa energia transmitida ou refletida. O exemplo mais importante de medida de transmissão de energia é a tomografia computadorizada industrial (CT no acrônimo em inglês), que utiliza raios X de alta energia e mede a radiação transmitida pelo objeto.” (SANSONI *et al.* 2009).

Diversas técnicas de reconstrução tridimensional de objetos podem ser utilizadas com vantagens e desvantagens em diversas áreas de conhecimento. PAVLIDIS *et al.* (2007) apresenta um trabalho de avaliação entre diversas técnicas de reconstrução 3D de objetos para uso na área da arqueologia. Algumas características dos objetos de estudo da arqueologia e da paleontologia são semelhantes como a complexidade geométrica dos objetos em termos de forma e tamanho e a importância da obtenção da textura dos objetos no modelo obtido.

Para uma revisão sobre diversas técnicas de reconstrução tridimensional de objetos ver BLAIS (2004), SANSONI *et al.* (2009) e PAVLIDIS *et al.* (2007). Algumas dessas técnicas de reconstrução tridimensional vêm sendo usadas na área da paleontologia

(reconstrução de esculturas e fósseis). Algumas delas, que já vem sendo utilizadas em projetos de pesquisa do MN-UFRJ e também de outros museus no Brasil e no mundo são: Escaneamento à laser (*structured light* e *time-of-flight*); Escaneamento por tomografia computadorizada, *Shape-from-silhouette* e Fotogrametria. As diferentes técnicas óticas de reconstrução 3D são apresentadas por SANSONI *et al.* (2009) e descritas resumidamente a seguir.

2.2.1. Trianguladores à laser e *structured light*

As técnicas de triangulação à laser e de escaneamento à laser por *structured light* seguem o mesmo princípio e, segundo SANSONI *et al.* (2009) possuem a diferença de que na primeira existe a projeção de pontos ou linhas de laser sobre o objeto a ser reconstruído enquanto na segunda ocorre a projeção de feixes laser.

O scanamento à laser por *structured light* é uma técnica de reconstrução tridimensional bastante desenvolvida e que possui potencial para ser utilizada para praticamente qualquer propósito. É uma técnica ótica que funciona através da projeção de padrões de feixes laser sobre o objeto e a captura desses padrões por câmeras com os limites observados através de imagens (ZHANG *et al.*, 2002).

Existem atualmente diversos modelos comerciais de *scanners* à laser que usam a técnica *structured light* para as mais diferentes aplicações. O Polhemus FastScan, um modelo de *scanner* a laser portátil indicado para digitalizações rápidas de objetos com formas complexas e irregulares sem a necessidade de se retirar o objeto de seu lugar para realizar a digitalização. O Polhemus FastScan foi utilizado na reconstrução tridimensional de um fóssil de um Plesiosauro (JOHNSTON R. A. *et al.* 2004). LI *et al.* (2003) também utilizou o Polhemus FasScan para digitalizar fósseis e minérios além de outro modelo de *scanner* à laser, o Minolta Vivid 700 que também usa a técnica *structured light*. Outro exemplo é o *scanner* Next Engine, que se apresenta como o modelo mais popular de *scanner* à laser encontrado no mercado (<https://www.nextengine.com/>).

2.2.2. Stereo vision

A técnica de *stereo vision* utiliza pares de câmeras que capturam imagens do objeto por dois ângulos diferentes. As imagens são processadas por um algoritmo que gera uma terceira imagem em escala de cinza chamada *range image* onde a posição de cada *pixel* determina as coordenadas X e Y de cada ponto e cada tonalidade de cinza

representa um valor para a coordenada *Z* de cada *pixel* possibilitando assim a reconstrução 3D da cena. A geração de pares de imagens por diversos ângulos do objeto torna possível a reconstrução completa desse objeto através da técnica *stereo vision*. CHIARI *et al.* (2008) apresenta um trabalho em que utiliza a técnica *stereo vision* com o objetivo de gerar modelos tridimensionais de espécies viventes para estudos morfológicos. A técnica é testada isoladamente e também associada à técnica de fotogrametria.

2.2.3. Shape-from-silhouette

A técnica de reconstrução tridimensional chamada *shape-from-silhouette* (SFS) é considerada por SANSONI *et al.* (2009) uma variação da técnica *stereo vision*. Como mencionado anteriormente, este trabalho considera *stereo vision* e SFS como duas técnicas distintas já que o princípio utilizado na obtenção do modelo 3D a partir de fotografias é diferente nas duas técnicas. Nessa técnica a geometria do objeto é capturada a partir de fotografias 2D convencionais obtidas por diversos ângulos. Algoritmos são utilizados para, a partir dessas fotografias, se obter o posicionamento da câmera e a silhueta do objeto em cada uma das fotografias. Essas informações são, então, processadas e a partir delas se obtém o modelo 3D do objeto. As duas principais vantagens dessa técnica são o custo e o fato de ela não ser invasiva, ou seja não exige nenhum contato físico com a peça a ser reconstruída. No item 2.3 desse trabalho o funcionamento da técnica de SFS é explicada em mais detalhes.

2.2.4. Fotogrametria

A técnica de fotogrametria, assim como as técnicas de *stereo vision* e SFS, se utiliza de fotografias do objeto por diferentes ângulos para se obter o modelo 3D desse objeto. Nesse caso, o processo de reconstrução 3D segue os seguintes passos: calibração e orientação da câmera em cada fotografia; identificação e correspondência de pontos em diferentes imagens; geração da nuvem de pontos; geração da superfície; e mapeamento da textura. Esse processo pode ser automático (menor precisão, maior velocidade na aquisição do modelo 3D) ou semi-automático (maior precisão e menor velocidade). *Softwares* comerciais estão disponíveis e alguns exemplos são: EOS Systems Photomodeler (<http://www.photomodeler.com/>), Photometrix Australis (<http://www.photometrix.com.au/>) e Leica Photogrammetry Suite (http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-Photogrammetry-Suite_2518.htm/). CHIARI *et al.* (2008)

também testa em seu trabalho a técnica de fotogrametria isoladamente além de associada à técnica de *stereo vision*.

2.2.5. Escaneamento à laser (*time-of-flight*)

A técnica *time-of-flight* funciona através do envio de pulsos laser e recepção do reflexo desse pulso depois que ele atinge o objeto a ser escaneado. O sistema detecta o tempo que o pulso levou para ser recebido de volta e, com essa informação, consegue determinar as coordenadas x , y e z de cada ponto determinado pelo envio de cada pulso. Segundo BLAIS (2004) esse é o método mais adequado para a digitalização de grandes estruturas com precisão entre 5 e 10 milímetros. Existem atualmente diversos modelos comerciais de *scanners* à laser que usam a técnica *time-of-flight* para as mais diferentes aplicações. O Cyberware Large Statue *Scanner* é um modelo de *scanner* à laser desenvolvido pela empresa Cyberware especificamente para digitalizar obras de Michelangelo na Itália para o projeto Digital Michelangelo Project da Universidade de Stanford (LEVOY, M. *et al.* 2000).

2.2.6. Interferometria

O método de reconstrução 3D por interferometria obtém a informação 3D de uma imagem através da projeção de um padrão sobre a superfície do objeto que varia no tempo ou no espaço seguido pelo processamento da luz refletida com um padrão de referência. O interferômetro reconhece a variação da frequência de onda da radiação laser refletida para determinar a informação 3D da imagem.

2.2.7. *Moiré fringe range contours*

Essa técnica obtém o contorno 3D de superfícies através da projeção de uma grade padrão através de uma fonte de luz e a captura de uma imagem dessa cena com uma câmera através de uma grade idêntica a primeira. Essa técnica tem dificuldades de identificar concavidades na cena observada.

2.2.8. *Shape from focusing*

Na técnica de *shape from focusing* as propriedades de foco de uma lente são utilizadas para determinar a distância dos pontos para a câmera. Para cada posição focal da lente são identificados os pontos em foco na imagem capturada e descartados os pontos fora de foco, formando a nuvem de pontos que irá gerar a superfície 3D.

2.2.9. *Shape from shadows*

Essa técnica funciona da mesma forma que a técnica *structured light* com a diferença de que ao invés de se projetar um padrão laser sobre o objeto, é projetada a sombra de um padrão conhecido sobre ele. A precisão do modelo gerado é consideravelmente menor do que na *structured light*. O baixo custo e a simplicidade do equipamento são as principais vantagens.

2.2.10. *Texture gradients*

O objetivo dessa técnica é encontrar possíveis transformações de elementos de textura para reproduzir a orientação da superfície. É um método simples e barato, mas que produz resultados de baixa qualidade.

2.2.11. *Shape from shading*

Nessa técnica o modelo 3D do objeto é obtido através do processamento de imagens do objeto capturadas por um ângulo determinado com diferentes posições de uma fonte de luz sobre o objeto. O equipamento necessário para a reconstrução por *shape from shading* é bastante simples e barato, porém, a precisão do modelo 3D gerado é baixa, especialmente em condições de iluminação não controladas.

2.2.12. Tomografia Computadorizada

A reconstrução tridimensional de objetos a partir de imagens tomográficas não é abordada por SANSONI *et al.* (2009) mas a técnica que apresenta o maior potencial de qualidade nos resultados para a área da paleontologia. O motivo disso é o fato de as imagens tomográficas conseguirem captar estruturas internas dos fósseis, impossíveis de serem obtidas por outras técnicas de reconstrução 3D que só conseguem captar a geometria externa dos objetos. Além disso, com a tomografia computadorizada, também é possível reconstruir a geometria de fósseis que ainda não estão preparados, ou seja, que ainda estão inseridos dentro das formações rochosas onde foram encontrados, auxiliando inclusive no preparo desses fósseis de maneira mais segura, evitando danos a eles. Na Tomografia Computadorizada o objeto é bombardeado por radiação X que produz seções transversais desse objeto. As várias imagens (geralmente em escala de cinza) de seções transversais são processadas de forma a se obter o contorno do objeto em cada uma das imagens. Esse contorno é identificado pela densidade do material do

qual ele é formado (as variações de densidade são representadas pelas gradações de cinza das imagens). A partir desses contornos é possível gerar a nuvem de pontos e em seguida a superfície do objeto, considerando que a técnica permite se identificar os buracos internos do objeto, o que não pode ser obtido por nenhuma outra técnica de reconstrução 3D de superfícies.

A principal área de conhecimento que utiliza imagens tomográficas para reconstrução 3D é a medicina. SILVA *et al.* (2008) apresenta um trabalho em que foram usadas imagens tomográficas da coluna de uma mulher de 59 anos para reconstruir uma vértebra específica para auxiliar projetos de implantes ortopédicos, mostrando a importância da reconstrução tridimensional a partir de imagens tomográficas para a área médica.

KETCHAM e CARLSON (2001) apresentam um trabalho onde descrevem detalhadamente todo o processo de obtenção das imagens tomográficas e o processamento dessas imagens para se obter o modelo 3D dos objetos, além de apresentar exemplos de aplicações da técnica para as geociências, incluindo a paleontologia, citando a reconstrução do crânio de um *Kryptobataar dashzevegi* realizada pela Universidade de Louisville, nos Estados Unidos. AZEVEDO e CARVALHO (2009) apresentam uma revisão de trabalhos publicados sobre a aplicação da tomografia computadorizada em paleontologia de vertebrados desde a década de 1980.

O principal fator que dificulta o uso da tomografia computadorizada para a reconstrução 3D é o custo. Uma instalação para tomografia computadorizada necessita de um investimento muito alto, ultrapassando um milhão de reais, não só pelo alto custo do equipamento como também por exigir instalações físicas especiais para seu uso por causa da radiação que emite e além de possuir um custo significativo de manutenção de equipamentos e insumos.

Abaixo são apresentados dois quadros comparativos de diferentes técnicas de reconstrução tridimensionais adaptados de SANSONI *et al.* (2009). O **Quadro 1** resume e distingue as diferentes técnicas de acordo com as características de seu funcionamento, enquanto o **Quadro 2** apresenta os pontos fortes e fracos de cada uma das técnicas. Segundo SANSONI *et al.* (2009) a técnica de *shape-from-silhouette* se trata de uma variação da técnica chamada *stereo vision*. Entretanto, este trabalho considera as duas abordagens como técnicas de reconstrução 3D distintas. As técnicas de *shape-from-silhouette* e de escaneamento por tomografia computadorizada foram acrescentadas aos quadros 1 e 2 adaptados do trabalho de SANSONI *et al.* (2009).

Quadro 1. Classificação de técnicas de reconstrução 3D.

	<i>Triangulation</i> (triangulação)	<i>Time delay</i> (diferença de tempo)	<i>Monocular Images</i> (imagens monoculares)	<i>Passive</i> (passive)	<i>Active</i> (ativo)	<i>Direct</i> (direto)	<i>Indirect</i> (indireto)	<i>Range</i> (alcance)	<i>Surface Orientation</i> (orientação de superfície)
<i>Laser triangulators</i> (Trianguladores à laser)	X				X	X		X	
<i>Structured light</i> (Luz estruturada)	X				X	X		X	
<i>Stereo vision</i> (Visão estéreo)	X			X		X		X	
<i>Photogrammetry</i> (Fotogrametria)	X			X		X		X	
<i>Time of Flight</i> (Tempo de vôo)		X			X	X		X	
<i>Interferometry</i> (Interferometria)		X			X	X		X	
<i>Moiré fringe range contours</i> (Gama de contornos moiré)			X		X		X	X	
<i>Shape from focusing</i> (Forma pelo foco)			X	X	X		X	X	
<i>Shape from shadows</i> (Forma por sombras)			X		X		X	X	
<i>Texture gradients</i> (Gradação de textura)			X	X			X		X
<i>Shape from shading</i> (Forma por sombreamento)			X		X		X		X
<i>Shape from photometry</i> (Forma por fotometria)			X		X		X		X
<i>Shape-from-silhouette</i> (Forma pela silhueta)	X			X		X		X	
<i>Computer tomography</i> (Tomografia computadorizada)	X				X	X			

Quadro 2. Comparação entre as técnicas de reconstrução 3D.

Tecnologia	Pontos fortes	Pontos fracos
<i>Laser triangulators</i> (Trianguladores à laser)	<ul style="list-style-type: none"> - Relativamente simples - Performance geralmente independente da luz ambiente - Alto nível de aquisição de dados 	<ul style="list-style-type: none"> - Problemas de segurança associados ao uso de fonte laser - Volume de alcance e medição limitados - Perda de dados por oclusões e sombras - Custo
<i>Structured Light</i> (Luz estruturada)	<ul style="list-style-type: none"> - Alto nível de aquisição de dados - Volume de medição intermediário - Performance geralmente dependente da luz ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> - Problemas de segurança quando baseados em laser - Relativamente complexo computacionalmente - Perda de dados por oclusões e sombras - Custo
<i>Stereo Vision</i> (Visão estéreo)	<ul style="list-style-type: none"> - Simples e barato - Precisão alta para objetos bem definidos 	<ul style="list-style-type: none"> - Computacionalmente custoso - Cobertura de dados esparsa - Limitado para cenários bem definidos - Baixo nível de aquisição de dados
<i>Photogrammetry</i> (Fotogrametria)	<ul style="list-style-type: none"> - Simples e barato - Precisão alta para objetos bem definidos 	<ul style="list-style-type: none"> - Computacionalmente custoso - Cobertura de dados esparsa - Limitado para cenários bem definidos - Baixo nível de aquisição de dados
<i>Time-of-Flight</i> (Tempo de voo)	<ul style="list-style-type: none"> - Distância de medida de médio para grande - Bom nível de aquisição de dados - Performance geralmente independente da luz ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo - Precisão inferior ao da triangulação em pequenas distâncias

Quadro 2. Comparação entre as técnicas de reconstrução 3D. (continuação)

Tecnologia	Pontos fortes	Pontos fracos
<i>Interferometry</i> (Interferometria)	- Precisão de Sub-micron para micro-distâncias	- Capacidade de medida limitada a superfícies quase lisas - Custo - Aplicabilidade limitada em ambiente industrial
<i>Moiré fringe range contours</i> (Gama de contornos moiré)	- Simples e barato - Pequenas distâncias	- Limitado para medidas de superfícies suavizadas
<i>Shape from focusing</i> (Forma pelo foco)	- Simples e barato - Sensores disponíveis para inspeção de superfícies e microprofilometria	- Campos de visão limitados - Resolução especial não-uniforme - Performance afetada pela luz ambiente (quando passiva)
<i>Shape from shadows</i> (Forma por sombras)	- Barato - Demanda pouca capacidade computacional	- Baixa precisão
<i>Texture gradients</i> (Gradação de textura)	- Simples e barato	- Baixa precisão
<i>Shape from shading</i> (Forma por sombreamento)	- Simples e barato	- Baixa precisão
<i>Shape-from-silhouette</i> (Forma pela silhueta)	- Simples e barato - Precisão relativamente alta para objetos bem definidos - Pode ser usado para objetos de diferentes tamanhos	- Performance alterada pela luz ambiente - Baixa precisão geométrica para objetos com formas côncavas

Quadro 2. Comparação entre as técnicas de reconstrução 3D. (continuação)

Tecnologia	Pontos fortes	Pontos fracos
<i>Computer tomography</i> (Tomografia computadorizada)	<ul style="list-style-type: none">- Performance independente da luz ambiente- Alto nível de aquisição de dados- Permite aquisição da geometria interna dos objetos	<ul style="list-style-type: none">- Custo- Computacionalmente custoso- Necessita de instalações específicas- Problemas de segurança devido a radiação- Necessita de operador especializado

2.3 – Shape-from-silhouette

A partir das avaliações e comparações entre as diferentes técnicas de reconstrução tridimensional de objetos a técnica de SFS foi considerada a mais apropriada para ser utilizada na reconstrução tridimensional de fósseis e esculturas paleoartísticas para disponibilização e visualização na internet (ver capítulo 3). A técnica será descrita em detalhes nesta sessão.

SFS é o termo usado para a técnica de reconstrução 3D através da silhueta do objeto em fotografias 2D obtidas por diversos ângulos. O processo de obtenção do objeto 3D pela técnica de SFS pode ser resumido, segundo NIEM (1999) em três etapas: reconstrução da forma 3D através das silhuetas; a superfície do modelo volumétrico é aproximada por um modelo em malha (*wireframe model*); e finalmente a textura do objeto real é projetada no *wireframe model*. A ideia de se extrair a forma de um objeto através da silhueta dele em imagens de diversos ângulos remonta à década de 1960, quando François Villedieu desenvolveu um método chamado *photo-sculpting* (foto-escultura): 24 fotografias da superfície do objeto são feitas e projetadas no barro (PAVLIDIS *et al.* 2007).

LAURENTINI (1994) apresentou o conceito de *visual hull*, que é a base para todos os algoritmos desenvolvidos de SFS. Para cada imagem 2D do objeto a ser reconstruído deve ser determinada a silhueta desse objeto, ou seja, deve ser destacado na imagem o

que faz parte do objeto e o que faz parte do fundo da imagem, e a posição no espaço da câmera que capturou essa imagem (*viewpoint*). Com essas informações são definidos cones para cada imagem, que começam no *viewpoint* e passam pela silhueta do objeto dessa imagem. A interseção dos cones gerados por cada imagem do objeto é chamado de *visual hull*.

O que vai diferenciar as diferentes formas de uso da SFS são os algoritmos ou estratégias desenvolvidos para cada uma das etapas da técnica, como a obtenção da silhueta de cada imagem, a obtenção da posição da câmera no espaço em cada uma das imagens, a geração dos cones, a interseção desses cones, aplicação da textura do objeto no modelo 3D reconstruído, etc.

Segundo BAUMBERG *et al.* (2005) existem duas formas básicas para se gerar modelo 3D que represente o *visual hull* que são chamadas de: Amostragem volumétrica (*Volumetric sampling*); e Interseção direta (*Direct intersection*). A primeira forma, normalmente utiliza um grid de *voxels* envolvendo o objeto produzindo uma “escultura de *voxels*” (*voxel carving*). Os *voxels* que estão completamente dentro ou completamente fora da silhueta do objeto são descartados enquanto os *voxels* que são cortados pela silhueta são mantidos. O conjunto de todos os *voxels* mantidos de todas as imagens processadas formam uma representação do *visual hull*. Esses *voxels* são então processados e convertidos em uma malha triangular com o uso do algoritmo chamado *Marching cubes* (LORENSEN, *et al.* 1987). Esse método gera uma malha regular de triângulos, geralmente necessitando de um passo a mais para a otimização da geometria para que o modelo 3D final não seja muito pesado. A segunda forma (*Direct intersection*) gera diretamente uma malha poligonal representativa do *visual hull*. Nesse método, o primeiro passo é gerar uma aproximação poligonal da silhueta do objeto em cada imagem para em seguida gerar a partir dessa representação da silhueta gerar “cones poligonais”. Os “cones poligonais” são, então, processados dois a dois, gerando interseções que no final gerarão a malha poligonal representativa do *visual hull*. MATUSIK *et al.* (2001) apresenta um algoritmo que utiliza esse método de *Direct intersection* em tempo real utilizando quatro câmeras filmadoras sincronizadas resultando em uma animação formada por modelos 3D gerados a partir das silhuetas de cada frame de cada filmadora.

Independente da forma utilizada para se gerar o modelo 3D representativo do *visual hull*, a técnica SFS de reconstrução 3D de objetos deve passar pelas seguintes etapas: geração de imagens do objeto por vários ângulos; determinação dos pontos de vista de cada imagem; identificação das silhuetas do objeto em cada imagem; geração dos cones de silhueta de cada imagem; geração da malha poligonal representativa do *visual hull*; e mapeamento e geração da textura do modelo 3D.

2.3.1. Geração de imagens do objeto por vários ângulos

Dependendo da abordagem do uso da SFS para reconstrução de objetos 3D a etapa de geração das imagens 2D do objeto irá requerer mais ou menos preparação e cuidado. É evidente que a resolução final das imagens pode aumentar ou diminuir a qualidade final do modelo 3D reconstruído, porém esse não é o único fator que influencia o resultado final. A iluminação do ambiente e a sua preparação podem ser determinantes para se conseguir que os algoritmos que irão “encontrar” a silhueta do objeto em cada imagem tenha sucesso e o posicionamento da câmera em cada imagem também tenha sucesso. Além disso, tanto a resolução quanto a iluminação do ambiente são determinantes para se obter uma boa qualidade na textura final do modelo 3D. Lentes que causem menor distorção na imagem também são importantes para se obter um resultado fiel. Em geral, quanto mais imagens forem obtidas por diferentes ângulos, melhor será o resultado da reconstrução, e maior será o tempo de processamento realizado para realizar a tarefa. Alcançar a quantidade ideal de imagens para se obter um bom resultado em menor tempo de processamento é um dos desafios da técnica SFS. Algumas abordagens apresentam estruturas fixas que automatizam o posicionamento da câmera em relação ao objeto e a quantidade de imagens a ser obtidas. É o caso de JUNG-HO CHO *et al.* (2003), que apresenta uma estrutura em que o objeto é posicionado em uma mesa giratória automatizada e a câmera é posicionada em um arco motorizado que determina o posicionamento da câmera em relação ao objeto para cada imagem. Os movimentos realizados pela mesa e pela câmera para cada imagem são programados de forma a evitar redundância de posições, diminuindo a quantidade de imagens necessárias. SABLATNIG *et al.* (2003) apresenta um algoritmo que busca encontrar os ângulos importantes para se obter a geometria mais precisa do objeto a ser reconstruído com menos imagens associando a técnica de SFS com a técnica de *Shape from Structured Light* (Forma por Luz Estruturada). Utilizando apenas um ângulo vertical para todas as imagens, foram

obtidos resultados satisfatórios com quantidade significativamente menor de imagens para determinados objetos testados. Na abordagem apresentada por BAUMBERG *et al.* (2005) e utilizada no *software* comercial 3D S.O.M. a quantidade de imagens e os ângulos são determinados pelo usuário que deve perceber quais ângulos são mais determinantes para se obter uma geometria final similar ao objeto original.

2.3.2. Determinação dos pontos de vista de cada imagem

A determinação precisa do ponto de vista de cada imagem do objeto a ser reconstruído é crucial para o resultado final do processo. Existem duas formas principais de se obter o ponto de vista das imagens. Na primeira, utilizada por JUNG-HO CHO *et al.* (2003) e SABLATNIG *et al.* (2003), os pontos de vista são determinados previamente por sistemas fixos, motorizados e automatizados de posicionamento da câmera para cada imagem. Ou seja, o sistema que processará as imagens já é alimentado previamente com as coordenadas dos pontos de vista de cada uma delas. Na segunda forma, a câmera é livre, ou seja, não está fixada em nenhuma estrutura previamente identificada pelo sistema. Nesse caso é necessário que seja desenvolvido algum algoritmo que identifique elementos nas imagens e através deles, identifique a posição da câmera para cada imagem. Essa abordagem é utilizada por BAUMBERG *et al.* (2005), MATUSIK *et al.* (2001). Sem que se obtenha o ponto de vista de cada imagem não será possível obter os cones de silhueta de cada imagem para poder chegar no *visual hull*.

2.3.3. Identificação das silhuetas do objeto em cada imagem

Para que se possa obter o modelo 3D a partir das fotografias é necessário que se obtenha a silhueta do objeto em cada uma das imagens. Ou seja, é necessário separar o objeto do fundo da imagem. Isso pode ser realizado manualmente, selecionando em cada parte da imagem o que é fundo e o que é objeto. Outra forma para separar o objeto do fundo da imagem é utilizar a técnica conhecida como *Chroma key*, em que se usa um fundo de uma cor única contrastante com as cores do objeto que é detectada pelo sistema que assim consegue separar o fundo do objeto.

Essa técnica começou a ser utilizada na década de 30 e ficou conhecida por seu uso em filmes e apresentações de previsão do tempo em programas de televisão e consiste, em sua forma mais simples de uma identificação em cada pixel da imagem de seus valores de vermelho, verde e azul (RGB – *red-green-blue*). Quando esses valores

ultrapassam uma certa constante determinada pelo *software* ou ajustada pelo usuário esses pixels são considerados como parte do objeto e quando os valores são menores do que essa constante são considerados como fundo. $f(r, g, b) \rightarrow K_0 * b - K_1 * g + K_2$ ($K_{0..2}$ são constantes que podem ser ajustadas pelo usuário). (WIKIPEDIA CONTRIBUTORS, 2009 B).

2.3.4. Geração dos cones de silhueta de cada imagem

Tendo obtido os *viewpoints* e separado nas imagens o fundo do objeto a ser reconstruído, é possível se obter os cones de silhueta de cada imagem. É definido em cada imagem um polígono representativo dessa silhueta a partir da separação fundo-objeto conseguida através da técnica de *Chroma-key*. Cada polígono consiste de uma sequência de arestas que ligam vértices consecutivos que definem o seu contorno (MATUSIK *et al.*, 2001). Cada vértice do polígono representativo da silhueta da imagem forma uma aresta do cone de silhueta junto com o *viewpoint*.

2.3.5. Geração da malha poligonal representativa do *visual hull*

Através dos diferentes cones de silhueta obtidos pelas imagens do objeto a ser reconstruído é possível se obter uma malha poligonal representativa do *visual hull*, ou seja, uma geometria representativa do próprio objeto. Segundo as abordagens que seguem a tendência chamada de *direct intersection* (Interseção direta) essa geometria é o resultado da interseção entre todos os cones de silhueta gerados, o que pode ser feito através do uso de algoritmos para operações booleanas. Outros algoritmos mais avançados foram desenvolvidos para realizar essa operação de interseção dos cones com maior rapidez e precisão (MATUSIK, *et al.* 2001; BAUMBERG, 2005). Segundo as abordagens que seguem a tendência chamada *voxel carving* (escultura de *voxels*) os cones de silhueta marcam os *voxels* pertencentes à geometria representativa do objeto que depois são triangulados formando a malha poligonal desse objeto. Algumas iniciativas que usam essa abordagem podem ser destacadas como: CHO, J. *et al.* (2003), CHEUNG, G. *et al.* (2003). É importante destacar que através da abordagem chamada *direct intersection* a superfície do modelo 3D gerada é irregular, possuindo polígonos de tamanhos e formas diferentes de acordo com o resultado das interseções entre os cones de silhueta (superfícies planas tenderão a possuir menos polígonos em sua malha) enquanto na abordagem chamada *voxel carving* a superfície do modelo 3D gerada possui uma malha poligonal regular, independente das características geométricas do objeto.

2.3.6. Mapeamento e geração da textura do modelo 3D

Depois de gerada a geometria, o último passo do processo de reconstrução 3D de um objeto é a geração da textura do modelo 3D obtido. Essa textura é obtida através das mesmas fotografias utilizadas para a geração da geometria. O mapeamento dessa textura é feito através da determinação de quais partes da geometria do objeto são visíveis por quais câmeras. Com isso essas imagens são projetadas nos polígonos da malha do modelo 3D. Segundo BUEHLER, C. *et al.* (2001) se destacam duas formas de se obter a textura de um modelo 3D a partir de fotografias: A primeira é conhecida como *view-dependent texture mapping* (mapeamento de textura dependente do ponto de vista) que foi desenvolvido por DEBEVEC, P. *et al.* (1996) em que, dependendo do ângulo de visualização do modelo 3D, diferentes imagens são projetadas sobre as faces da geometria, apresentando uma melhor qualidade visual do modelo e dando, inclusive, a ilusão de detalhes na geometria que não existem no modelo 3D, minimizando problemas de captação do *visual hull* pela técnica de SFS. A segunda forma de obtenção da textura do modelo 3D pelas fotografias é conhecida como *lightfield/lumigraph* (LEVOY, M *et al.*, 1996; GORTLER, S., 1996). Nessa abordagem, uma função busca descrever as características de luz em cada ponto no espaço (x, y, z) para cada direção do raio de luz (θ, ϕ) , o *lightfield*. Cada imagem adquirida do objeto original é considerada como uma fatia dentro do *lightfield*. Para cada ponto de vista uma imagem será apresentada de acordo com a posição e direção desse ponto de vista, gerando a imagem final do objeto 3D reconstruído.

Capítulo 3

A reconstrução tridimensional de fósseis

3.1 – Técnicas utilizadas

Neste estudo foram analisadas diferentes técnicas de reconstrução tridimensional de objetos para obter os modelos dos fósseis e das esculturas do setor de paleovertebrados do MN-UFRJ. Projetos de pesquisa anteriores e parcerias do MN-UFRJ com o Instituto Nacional de Tecnologia (INT), o Centro de Diagnóstico por Imagem (CDPI), o Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA), o Hospital Central do Exército (HCE) e o Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (HUCFF/UFRJ) permitiram a análise das técnicas de escaneamento à laser e de reconstrução por imagens tomográficas (CRUZ, 2002, GRILLO, 2004, AZEVEDO *et al.*, 2004, AZEVEDO, 2006, CARVALHO 2007). Essas duas técnicas, somadas a técnica de SFS foram avaliadas com mais profundidade com o objetivo de se identificar qual delas seria a mais adequada aos objetivos dessa pesquisa. As **Figuras X, Y e Z** apresentam imagens de reconstruções tridimensionais de exemplares do Museu Nacional realizadas por escaneamento à laser, por imagens tomográficas e por fotografias através da técnica de SFS.



Figura 6. Imagem da reconstrução por escaneamento à laser do fóssil do osso metacarpal (osso da mão) de um *Angaturama limai* (esquerda) e de imagens utilizadas para geração da textura do modelo 3D.

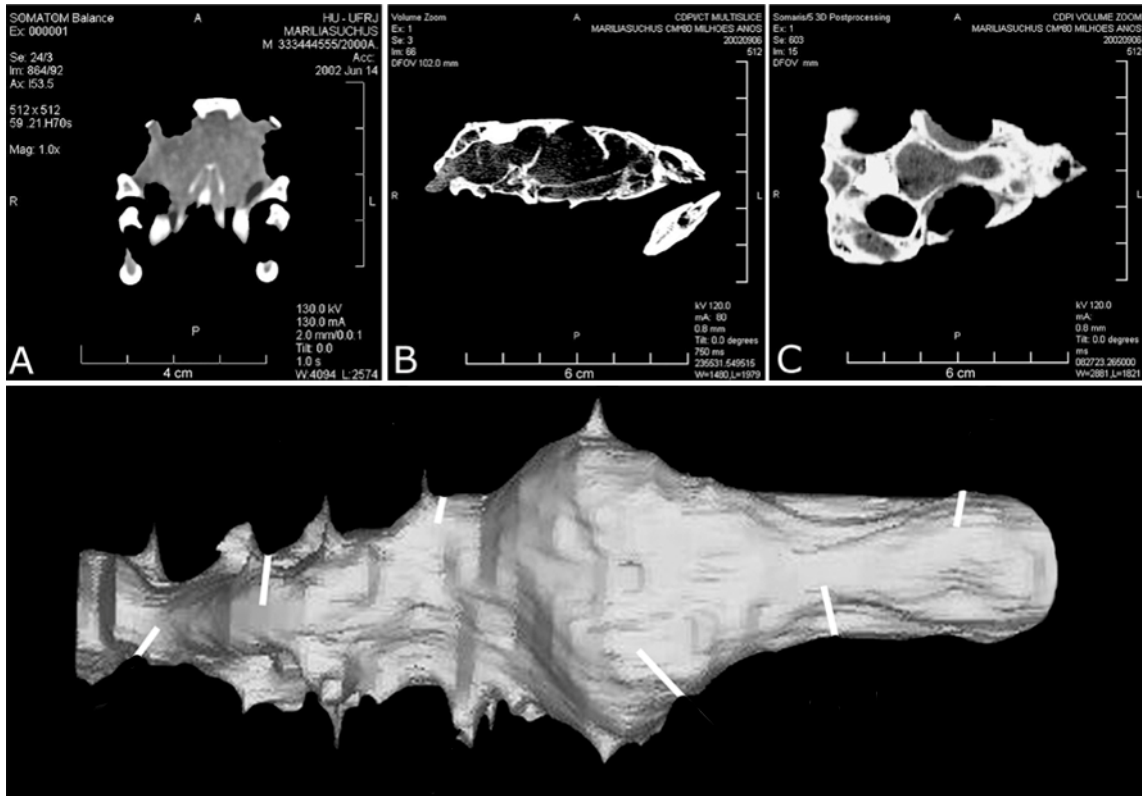


Figura 7. Cortes tomográficos do exemplar MN 6298-V do *Mariliasuchus amarali* (em cima) e reconstrução 3D da cavidade intracraniana encefálica (cavidade interna do crânio) do mesmo exemplar (em baixo).

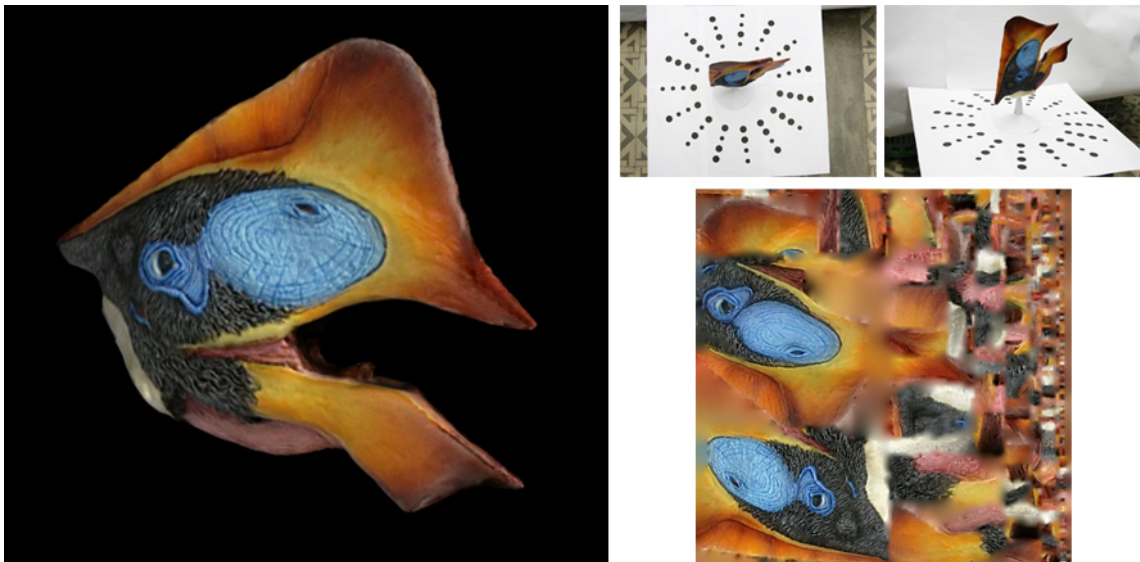


Figura 8. Imagem da reconstrução por SFS da escultura de um *Tapejara wellnhoferi* (esquerda), de imagens utilizadas para a reconstrução e para geração da textura do modelo 3D (direita em cima) e mapa de textura do modelo 3D (direita em baixo).

3.2 – Opção pelo uso da técnica *Shape-from-silhouette*

PAVLIDIS *et al.* (2007) propõe um quadro com nove critérios para serem levados em consideração no momento de escolher uma técnica de reconstrução 3D para um projeto na área da arqueologia. Esses critérios descritos nesse quadro também são considerados importantes para projetos de digitalização de acervos de paleontologia. São eles: custo; características do material a ser reconstruído; tamanho dos objetos; portabilidade dos equipamentos; precisão do sistema; aquisição de textura; produtividade da técnica; habilidades necessárias; conformidade dos dados produzidos com padrões estabelecidos. Desses nove critérios, os oito primeiros foram considerados na avaliação das técnicas de reconstrução tridimensional de objetos. O critério de conformidade dos dados produzidos com padrões estabelecidos não se aplica ao propósito dessa pesquisa pela inexistência desses padrões.

3.2.1. Custo

Foi utilizado o *software* 3D S.O.M para a reconstrução 3D dos fósseis e esculturas através da técnica SFS. Esse *software* foi adquirido com recursos do financiamento do CNPq para o projeto Dinosvirtuais por um valor inferior ao mais simples modelo comercial de *scanner* 3D à laser encontrado no mercado. Enquanto o *scanner* 3D à laser Next Engine, um dos mais baratos do mercado, é anunciado ao preço de US\$ 2.995,00 no website do fabricante (<https://www.nextengine.com>) o *software* 3D S.O.M tem preço anunciado de US\$ 1.499,00 no website do fabricante (<http://www.3dsom.com>). O MN-UFRJ adquiriu tanto o *software* 3D S.O.M quanto o *scanner* Next Engine através do financiamento do projeto Dinosvirtuais e de outros projetos de pesquisa e os custos foram US\$ 711,57 para o *software* (valor acadêmico) e US\$ 2.995,00 para o *scanner* à laser. Os custos para a aquisição e instalação de um tomógrafo estão em outra ordem de grandeza, superiores a US\$ 500.000,00, o que inviabiliza completamente a possibilidade do uso dessa técnica que não através de uma parceria com laboratórios como o CDPI.

3.2.2. Características do material a ser reconstruído

Os fósseis e esculturas paleoartísticas possuem formas orgânicas bastante irregulares e, no caso de alguns fósseis, com cavidades internas impossíveis de serem capturadas

pelas técnicas de escaneamento à laser ou de SFS, apresentando assim uma vantagem significativa para a técnica de tomografia computadorizada sob esse critério. As formas dos objetos possuem em alguns casos concavidades consideradas importantes, característica geométrica que não pode ser capturada através da técnica de SFS, o que representa uma desvantagem para essa técnica, que pode ser minimizada visualmente através da aquisição da textura do objeto que pode passar a ilusão dessa concavidade ou geométrica através da edição manual da geometria dos modelos em *softwares* de modelagem 3D como o 3D Max ou o Blender, mas sem nenhuma garantia de precisão. A superfície dos objetos são primordialmente opacas. Por isso, a dificuldade dos *scanners* à laser de capturar a geometria de objetos translúcidos e reflexivos, não representando uma desvantagem para essa técnica para o propósito desse trabalho.

3.2.3. Tamanho dos objetos

Nesse aspecto a técnica de SFS através do *software* 3D S.O.M apresentou vantagem em relação ao *scanner* Next Engine. Esse modelo de *scanner* tem um limite de tamanho de peça a ser digitalizada de 25,5 x 25,5 x 34,4 cm (largura x profundidade x altura) enquanto através da técnica de SFS com o 3D S.O.M é possível gerar modelos de peças consideravelmente maiores, dependendo apenas de um espaço adequado para que o fotógrafo possa passear em volta do objeto que será digitalizado. Outros modelos de *scanner* à laser que tem características que possam suprir essas desvantagens do modelo Next Engine, como o Polhemus FastScan ou o Creaform UNIScan, que são portáteis, sendo então capaz de digitalizar objetos maiores, por exemplo, tem seu custo na faixa de US\$ 25.000,00. Através da tomografia computadorizada também é possível reconstruir objetos consideravelmente maiores do que com o *scanner* Next Engine, já que os equipamentos utilizados são projetados para realizar exames de corpo inteiro em pessoas.

3.2.4. Portabilidade dos equipamentos

Com relação a portabilidade dos equipamentos a desvantagem da técnica de tomografia computadorizada é evidente. As instalações necessárias para a utilização dessa técnica são fixas, sendo necessário que se leve os objetos a serem reconstruídos até elas, o que é um problema para o caso de fósseis que, muitas vezes, são sensíveis ao manuseio. O *scanner* Next Engine possui dimensões aproximadas de 10 x 25 x 40 cm, ou seja, é possível de ser transportado para ser utilizado em diferentes lugares, mas não pode ser considerado um equipamento portátil. Os outros modelos de *scanner* à laser

apresentados no item 3.2.3 são portáteis e podem ser levados com relativa facilidade para diferentes ambientes. A técnica de SFS com o 3D S.O.M apresenta uma vantagem significativa nesse critério pois o único equipamento que precisa ser carregado é uma câmera fotográfica convencional.

3.2.5. Precisão do sistema

Segundo especificações do fabricante o *scanner* Next Engine possui uma precisão de 0,127 mm (ou 157,480 pontos por centímetro) gerando modelos com centenas de milhares de polígonos. Além disso o *scanner* tem a capacidade de identificar as concavidades do objeto. O escaneamento por tomografia computadorizada produz imagens sequenciais com intervalos de até 0,001 mm podendo gerar modelos 3D com precisão bastante superior até mesmo ao *scanner* Next Engine, além de ser capaz de identificar concavidades e cavidades internas do objeto. CARVALHO (2007), em seu doutorado, gerou modelos tridimensionais de cinco exemplares do *Mariliasuchus amarali* com os tomógrafos Siemens Volume Zoom/Solaris/5 e Siemens Sensation 64 com imagens seqüenciais com intervalos de 0,3 e 0,37mm. O 3D S.O.M apresenta uma limitação de 300 mil polígonos para o modelo 3D final do objeto, independente do tamanho desse objeto e a técnica de SFS não é capaz de identificar concavidades na forma dos objetos, já que não é possível se identificar através de fotografias essa característica geométrica de alguns objetos.

3.2.6. Aquisição de textura

A técnica de SFS com o 3D S.O.M apresenta vantagem em relação ao *scanner* Next Engine na geração do mapa de textura do objeto. Enquanto o 3D S.O.M gera um arquivo de imagem em formato JPEG contendo o mapa de textura do modelo final do objeto, o *scanner* Next Engine gera uma série de imagens que são usadas no mapeamento da textura do objeto, tornando o pacote final de arquivos (arquivo 3D mais arquivos de texturas) mais complexo e pesado. A técnica de tomografia computadorizada não possibilita a aquisição da textura dos objetos o que é uma desvantagem considerável especialmente para o caso das esculturas paleoartísticas.

3.2.7. Produtividade da técnica

A facilidade logística de obtenção dos modelos 3D através do 3D S.O.M é o fator primordial para que essa técnica apresentar produtividade maior do que as outras duas.

A técnica de tomografia computadorizada depende do transporte dos fósseis e esculturas para o laboratório (no caso do projeto Dinosvirtuais, o CDPI) e da agenda dessa instituição e dos profissionais envolvidos no processo de digitalização das peças e, com isso, demanda um esforço de tempo muito maior para se obter os modelos que, apesar de serem obtidos com maior resolução e precisão geométrica, teriam que ser otimizados para visualização pela internet, perdendo assim grande parte da vantagem dessa técnica e demandando ainda mais tempo nesse processo de otimização dos modelos 3D. O *scanner* Next Engine pode ser utilizado no próprio MN-UFRJ, local onde se encontram os fósseis e as esculturas paleoartísticas utilizados no projeto Dinosvirtuais o que representa uma vantagem na produtividade em relação à técnica de tomografia computadorizada. Os fatores que podem reduzir a produtividade dessa técnica são relacionados com as dimensões dos objetos e com a necessidade de processamento posterior para redução de polígonos adequando os modelos finais as características necessárias para visualização em tempo real na internet. O uso do 3D S.O.M pode ser feito no próprio MN-UFRJ, utilizando câmeras fotográficas convencionais sem a necessidade de uma estrutura de estúdio fotográfico para obter resultados satisfatórios para os modelos finais. Após a transferência dessas imagens para o 3D S.O.M, não é necessário também uma grande capacidade de processamento para realizar as etapas no *software* para a obtenção do modelo final que já possui resolução compatível com a visualização em tempo real na internet. O fator que pode prejudicar a produtividade da técnica de SFS é a qualidade das fotografias, que podem dificultar a identificação do ponto de vista das imagens e a silhueta dos objetos nessas imagens.

3.2.8. Habilidades necessárias

Com o 3D S.O.M a obtenção do modelo 3D a partir de fotografias é bastante simples e não necessita de nenhum conhecimento especial relativo à modelagem 3D ou mesmo às técnicas de fotografia. Depois de identificados os procedimentos de cada etapa do processo de reconstrução 3D, a realização da tarefa torna-se quase que mecânica podendo ser realizada por qualquer pessoa com pouco tempo de treinamento. Com poucas horas de treinamento já é possível se obter modelos com qualidade satisfatória para visualização na internet. O *scanner* Next Engine também possui um processo de trabalho bastante simples e automatizado, não necessitando de muito tempo de treinamento para que se possa realizar a digitalização dos objetos com qualidade satisfatória além de possuir no próprio *software* que acompanha o produto um sistema

de redução de polígonos, evitando a necessidade de se transportar o modelo 3D escaneado para outro *software* para realizar essa tarefa. Nesse aspecto a tomografia computadorizada apresenta desvantagem considerável pois exige a participação de profissionais especializados para realizar a captura das imagens tomográficas que irão gerar o modelo 3D do objeto a ser reconstruído.

O **quadro 3**, adaptado do quadro de PAVLIDIS *et al.* (2007) apresenta os oito critérios propostos colocados em ordem de importância de acordo com os objetivos do projeto Dinosvirtuais destacando dentre as três técnicas de reconstrução que se apresentaram possíveis de serem usadas, qual delas (ou quais delas) seria a mais adequada para cada critério.

Quadro 3. Critérios para escolha de técnicas de reconstrução 3D para o projeto Dinosvirtuais

	<i>Shape-from-silhouette</i>	Escaneamento à laser	Escaneamento por tomografia computadorizada
Custo	X		
Produtividade da técnica	X		
Habilidades necessárias	X	X	
Características do material a ser reconstruído		X (esculturas)	X (fósseis)
Tamanho dos objetos	X		X
Aquisição de textura	X	X	
Portabilidade dos equipamentos	X		
Precisão do sistema		X	X

A técnica de SFS se mostrou mais vantajosa em seis dos oito critérios considerados na avaliação das possibilidades inclusive nos critérios considerados mais relevantes para o projeto Dinosvirtuais, que são custo, produtividade da técnica e habilidades necessárias.

3.3 – Etapas da reconstrução tridimensional

Como já foi dito no item 2.3 deste trabalho, independente da forma utilizada para se gerar o modelo 3D representativo do *visual hull*, a técnica SFS de reconstrução 3D de objetos deve passar pelas seguintes etapas: geração de imagens do objeto por vários ângulos; determinação dos pontos de vista de cada imagem; identificação das silhuetas do objeto em cada imagem; geração dos cones de silhueta de cada imagem; geração da malha poligonal representativa do *visual hull*; e mapeamento e geração da textura do modelo 3D.

No caso específico da digitalização de fósseis e esculturas do MN-UFRJ para o projeto Dinosvirtuais, deve ser acrescentada uma etapa anterior a essas que é a de seleção dos objetos a serem reconstruídos, ou seja, a escolha do acervo da exposição virtual.

3.3.1. Seleção dos objetos a serem reconstruídos

O acervo exposto no cenário virtual foi selecionado segundo critérios de relevância, interesse histórico científico, apelo popular (i.e.: provável interesse do público leigo), e facilidade de reconstrução 3D. Apenas algumas das espécies listadas no Quadro 4 foram selecionadas para a versão beta da exposição virtual (Figura 6). Esculturas dos dinossauros *Gondwanatitan faustoi* e *Giganotosaurus carolinii*, ambas feitas pelo paleoartista Maurílio Oliveira, foram reconstruídas digitalmente com o programa 3D S.O.M, através do procedimento descrito em ROMANO *et al.* (2006). Além dessas esculturas, também foram reconstruídos através do 3D S.O.M, fósseis das espécies *Mariliasuchus amarali* (crocodilo), *Tapejara wellnhoferi* (pterossauro), *Araripemys barretoii*, *Cearachelys placidoi*, *Bauruemys elegans* (tartarugas), *Equus vandoni* (mamífero), *Plateosaurus engelhardti* (dinossauro sauropodomorpho) e *Velociraptor mongoliensis* (dinossauro theropodo). O esqueleto do dinossauro *Staurikosaurus pricei* foi completamente modelado no *software* 3D Studio Max em um estudo anterior do paleontólogo Orlando Grillo do MN-UFRJ em sua pesquisa de mestrado (GRILLO, 2007). Outros exemplares, incluindo alguns previamente digitalizados (REHEM *et al.*, 2007), serão selecionados posteriormente para aumentar o acervo digital da exposição virtual. A reconstrução tridimensional dos exemplares do MN-UFRJ é um trabalho contínuo que utiliza diversas técnicas de reconstrução como a reconstrução por fotografias, por escaneamento à laser, por tomografia ou modelagem convencional.

Quadro 4. Espécies selecionadas para digitalização para o projeto Dinosvirtuais.

Espécie	Clado	Período	Exemplar	Tipo
<i>Anurognathus ammoni</i>	Pterosauria	Jurássico	s/nº	Reconstrução
<i>Araripemys barretoii</i>	Testudines	Cretáceo	MN 6946-V	Fóssil
<i>Asmithwoodwardia scotti</i>	Mammalia	Paleoceno	s/nº	Reconstrução
<i>Bauruemys elegans</i>	Testudines	Cretáceo	MN 4322-V; MN 6674-V; MN 6782-V	Fóssil
<i>Cearachelys placidoi</i>	Testudines	Cretáceo	s/nº	Fóssil
<i>Ceratosaurus nasicornis</i>	Dinosauria	Jurássico	s/nº	Reconstrução
<i>Dastilbe crandalli</i>	Euteleostei	Cretáceo	MN 5865-V	Fóssil
<i>Eoraptor lunensis</i>	Dinosauria	Triássico	s/nº	Reconstrução
<i>Equus vandonii</i>	Mammalia	Quaternário	MN 3784-V	Fóssil
<i>Giganotosaurus carolinii</i>	Dinosauria	Cretáceo	s/nº	Reconstrução
<i>Gondwanatitan faustoi</i>	Dinosauria	Cretáceo	s/nº	Reconstrução
<i>Mariliasuchus amarali</i>	Crocodyliformes	Cretáceo	MN 6298-V	Fóssil
<i>Nothrotherium maquinense</i>	Mammalia	Quaternário	MN 2115-V	Fóssil
<i>Piatnitzkysaurus floresi</i>	Dinosauria	Jurássico	s/nº	Reconstrução
<i>Plateosaurus engelhardti</i>	Dinosauria	Triássico	444-R	Réplica
<i>Pycnonemosaurus nevesi</i>	Dinosauria	Cretáceo	s/nº; DGM 859-R	Reconstrução; Fóssil
<i>Smilodon populator</i>	Mammalia	Quaternário	MN 2748-V	Fóssil
<i>Spinosauroidea indeterminado</i>	Dinosauria	Cretáceo	MN 4743-V	Fóssil
<i>Staurikosaurus pricei</i>	Dinosauria	Triássico	MCZ 1669	Fóssil
<i>Stereosternum tumidum</i>	Mesosauridae	Permiano	s/nº	Fóssil
<i>Tapejara wellnhoferi</i>	Pterosauria	Cretáceo	s/nº	Réplica; Reconstrução
<i>Velociraptor mongoliensis</i>	Dinosauria	Cretáceo	MN 4973-V	Réplica
<i>Vinctifer comptoni</i>	Teleosteoromorpha	Cretáceo	MN 5963-V	Fóssil

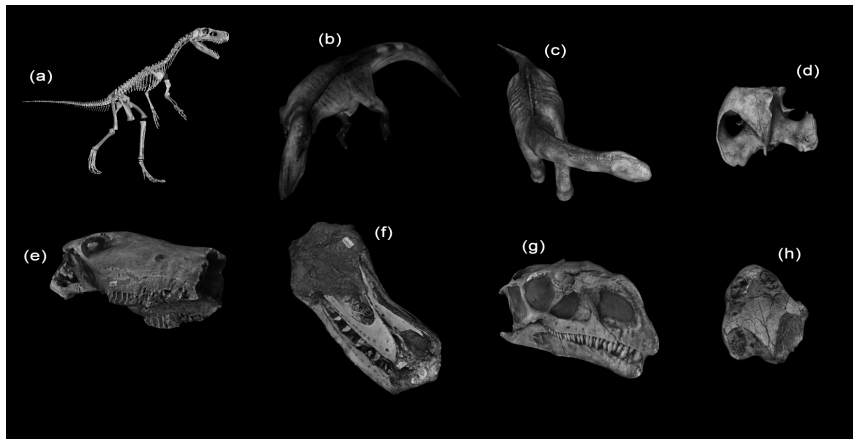


Figura 9. Imagens dos modelos 3D digitalizados a partir de fotografias com o programa 3D S.O.M, com a exceção do dinossauro *Staurikosaurus pricei*, modelado no 3D Max: Modelo do esqueleto do dinossauro *Staurikosaurus pricei* (a), escultura dos dinossauros *Giganotosaurus carolinii* (b) e *Gondwanatitan faustoi* (c), crânio da tartaruga *Cearachelys placidoi* (d), crânio do cavalo *Equus vandoni* (e), crânio do dinossauro theropodo *Velociraptor mongoliensis* (f), crânio do dinossauro sauropodomorpho *Plateosaurus engelhardti* (g), e crânio da tartaruga *Bauruemys elegans* (h).

3.3.2. Geração de imagens do objeto por vários ângulos

A captura das imagens do objeto a ser digitalizado através do *software* 3D S.O.M, em uma primeira análise, apresenta apenas duas exigências, que o objeto inteiro esteja na imagem final, ou seja, que ele não seja cortado na foto, e que também seja enquadrado na foto uma malha de pontos específica do *software* (*calibration mat*) que será determinante para que seja possível identificar o *viewpoint* em cada imagem do objeto. A Figura 7 abaixo mostra a imagem da base de pontos do 3D S.O.M e alguns exemplos de imagens que cumprem as duas exigências para que o *software* consiga gerar o modelo 3D a partir das fotos.

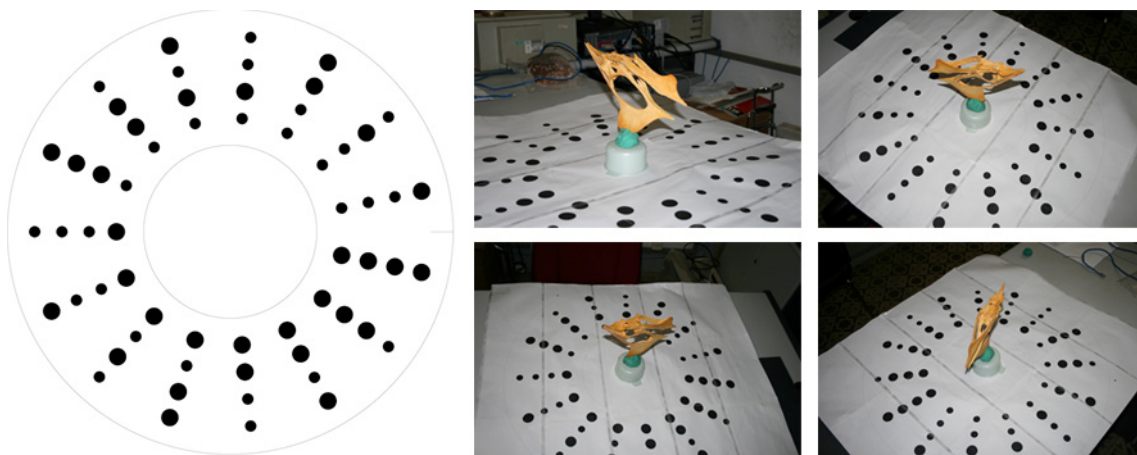


Figura 10. Imagem do print mat (esquerda) e exemplos de fotos (espécie Tapejara willhoferi) que cumprem as exigências mínimas do software 3D S.O.M para que seja possível gerar o modelo 3D da reconstrução desse objeto.

Melhorias consideráveis podem ser feitas nas fotografias, em comparação com as apresentadas na Figura 7 para se obter resultados mais satisfatórios e com menor tempo de processamento dessas imagens no *software*: melhor qualidade de impressão do *calibration mat* para melhorar a precisão na identificação dos *viewpoints* de cada imagem; o uso de um fundo mais simples, com apenas uma cor contrastante com a cor do objeto para melhorar a identificação das silhuetas do objeto em cada imagem; o controle maior da iluminação da peça, evitando sombras fortes que possam prejudicar a identificação da silhueta das imagens; e a calibração da lente da câmera para eliminação da distorção da imagem para aumentar a precisão da geometria final do modelo 3D reconstruído.

As três primeiras melhorias citadas são relativamente simples de se obter e não demandam nenhuma explicação mais detalhada. A quarta melhoria, de calibração da lente da câmera, também é simples de se obter e não demanda muito trabalho. O 3D S.O.M possui um sistema próprio de calibração de lentes. Também existem diversos *softwares* gratuitos que podem ser usados para realizar a calibração da lente da câmera fotográfica e eliminar as distorções das imagens obtidas como o MS Easy Calib (<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/Calib/>) e o GML C++ Camera Calibration Toolbox (<http://graphics.cs.msu.ru/en/science/research/calibration/cpp/>), que foi utilizado neste trabalho. Nesse caso, as imagens já são inseridas no 3D S.O.M com as distorções corrigidas, não necessitando cumprir essa etapa dentro do *software*.

Para os propósitos do projeto Dinosvirtuais foi considerado desnecessário o uso de *softwares* de calibração de lentes e eliminação de distorções nas imagens. Os resultados finais das reconstruções 3D a partir das imagens sem as correções de distorções foi considerado satisfatório para os objetivos do projeto e por esse motivo essa etapa foi suprimida a fim de acelerar o processo de obtenção dos modelos.

A Figura 8 apresenta fotos obtidas com as melhorias apresentadas, com exceção da eliminação da distorção das imagens.



Figura 11. Fotos de uma vértebra usadas na reconstrução 3D da espécie *Pynonemosaurus* com fundo simplificado e melhor qualidade no *calibration mat*.

3.3.3. Determinação dos pontos de vista (*viewpoints*) de cada imagem

A identificação do *viewpoint* das imagens que serão utilizadas na reconstrução 3D do objeto no *software* 3D S.O.M é automática na maioria absoluta das imagens. Segundo BAUMBERG *et al.* (2005) “como o *calibration mat* e o objeto são movidos juntos, é possível estimar os parâmetros da câmera (intrínsecos e extrínsecos) em uma coordenada global centrada no objeto para cada imagem”. O *calibration mat* consiste de 15 grupos formados por quatro pontos pretos alinhados radialmente em volta de uma circunferência. O algoritmo de detecção dos *viewpoints* primeiro identifica na imagem quais *pixels* são escuros ou claros separando quais possuem mais de 50% de intensidade de vermelho (R), verde (G) e azul (B), claros, e quais possuem menos de 50% de intensidade de RGB, escuros. Depois de separados os *pixels* claros dos escuros, o algoritmo deve identificar quais dos pixels escuros fazem parte dos pontos do *calibration mat*. Para isso são identificados e isolados apenas os grupos de quatro pontos alinhados que apresentem a razão cruzada determinada pelo algoritmo e apresentada na Figura 9.

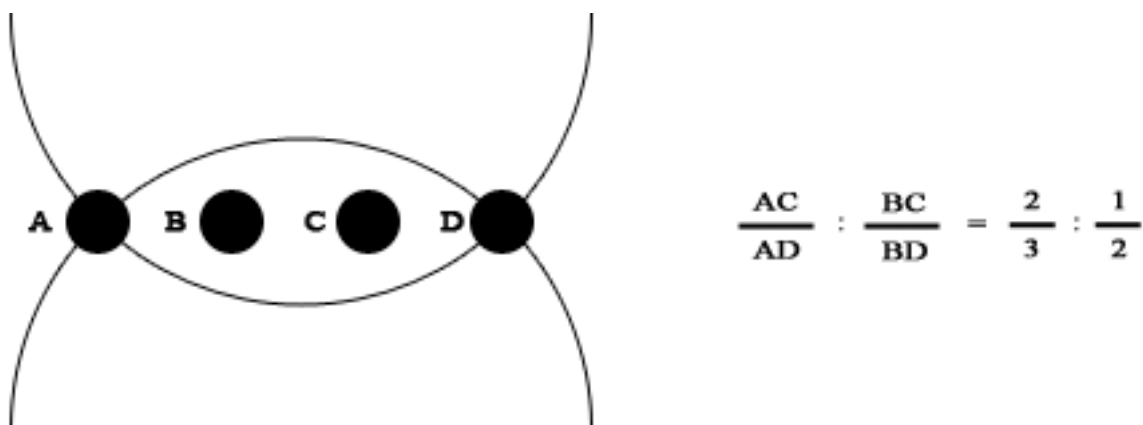


Figura 12. Grupo de quatro pontos alinhados do *calibration mat* e razão cruzada que determina a identificação dos pontos pelo algoritmo de detecção dos *viewpoints*. Reprodução de imagem de BAUMBERG *et al.* (2005).

Depois de identificados os vários grupos de quatro pontos, esses grupos são inseridos em um sistema de identificação de câmera baseado no algoritmo RANSAC. O algoritmo RANSAC, publicado pela primeira vez por FISCHLER e BOLLES (1981), é capaz de identificar grupos de pontos consistentes em uma imagem para capturar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera (WAN e XU, 1996). A Figura 10 mostra uma fotografia com os grupos de pontos identificados pelo algoritmo de detecção dos *viewpoints*.



Figura 13. Identificação dos grupos de pontos com discriminação de pontos grandes e pequenos.

O *software* 3D S.O.M também permite o alinhamento manual de imagens que não puderam ser alinhadas automaticamente pelo algoritmo de detecção dos *viewpoints*. Depois de gerado no *software* um modelo 3D preliminar, é possível posicionar esse modelo relativamente à silhueta da imagem que não pode ser alinhada automaticamente. Depois disso é possível reprocessar o modelo 3D utilizando as imagens alinhadas manualmente aumentando a precisão da geometria do modelo e também a captura da textura do modelo.

3.3.4. Identificação das silhuetas do objeto em cada imagem

A identificação das silhuetas do objeto em cada fotografia é feita através do uso da técnica de *color-key* (ou *chroma-key*, como foi descrito no item 2.3 deste trabalho) bastante conhecida e largamente utilizada segundo BAUMBERG *et al.* (2005). O algoritmo transforma cada fotografia em uma imagem binária, identificando cada *pixel* da imagem como sendo fundo (0) ou objeto (1). O *software* 3D S.O.M permite algumas interferências do usuário no processo de identificação das silhuetas das imagens para possibilitar maior precisão para o caso de imagens em que o fundo e o objeto se confundem nas cores, prejudicando o trabalho do algoritmo de identificação das silhuetas. Duas diferentes formas de identificação da silhueta de uma imagem são possíveis através do 3D S.O.M. A primeira é chamada de *auto mask* e consiste na aplicação da técnica de *chroma-key*. A figura 11 apresenta a sequência de procedimentos de identificação da silhueta de uma imagem utilizando o *auto mask* do *software*.

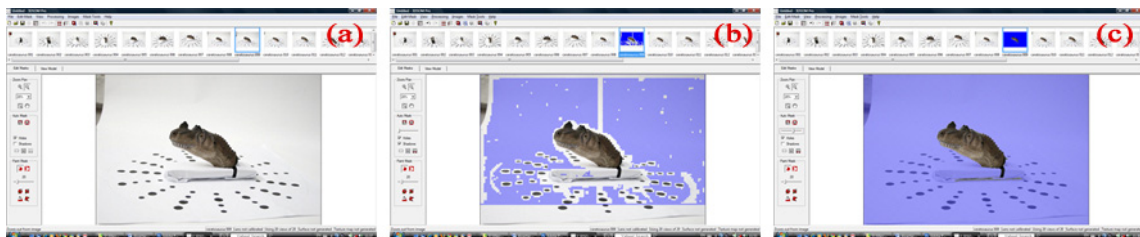


Figura 14. Sequência de procedimentos para identificação da silhueta de uma imagem. A imagem original (a); a imagem com a separação inicial de fundo/objeto; e a imagem com a identificação final de fundo/objeto (c).

A primeira imagem (a) representa a fotografia importada para o 3D S.O.M antes de qualquer processo de mascaramento. Em (b) temos o resultado do primeiro processamento da imagem, gerando uma separação inicial de fundo/objeto. Depois desse primeiro resultado é preciso ajustar o que o *software* chama de *background detection threshold* (identificação dos limites do fundo da imagem) para aumentar a precisão da identificação fundo/objeto. Em (c) temos o resultado da identificação fundo/objeto depois do ajuste dos limites do fundo da imagem. Após esse ajuste deve ser feito o mascaramento de todas as outras fotografias utilizando os mesmos parâmetros de ajuste de fundo da imagem para se obter as silhuetas de todas as imagens. Como nem sempre é possível obter resultados ideais utilizando as ferramentas do *auto mask*, é necessário fazer um ajuste manual na identificação das silhuetas nas fotografias, e o *software* 3D S.O.M apresenta algumas ferramentas para

esses ajustes, chamadas de *paint mask*. São ferramentas básicas de pintura encontradas em muitos *softwares* de edição de imagens como pincel redondo e quadrado, balde de tinta e seleção. Em todos os modelos gerados para o projeto Dinosvirtuais foi necessário realizar ajustes nos mascaramentos das imagens para se obter resultados satisfatórios, mas é importante frisar que, se não foi totalmente satisfatório o mascaramento automático das imagens, certamente economizou bastante o tempo de mascaramento manual de cada imagem. A preparação do cenário das fotografias também é fundamental para se obter uma melhor qualidade de mascaramento automático como pode ser identificado na Figura 12 que mostra duas fotografias de objetos diferentes, uma com melhor preparação do cenário e outra com pior preparação e os resultados comparados do mascaramento automático.

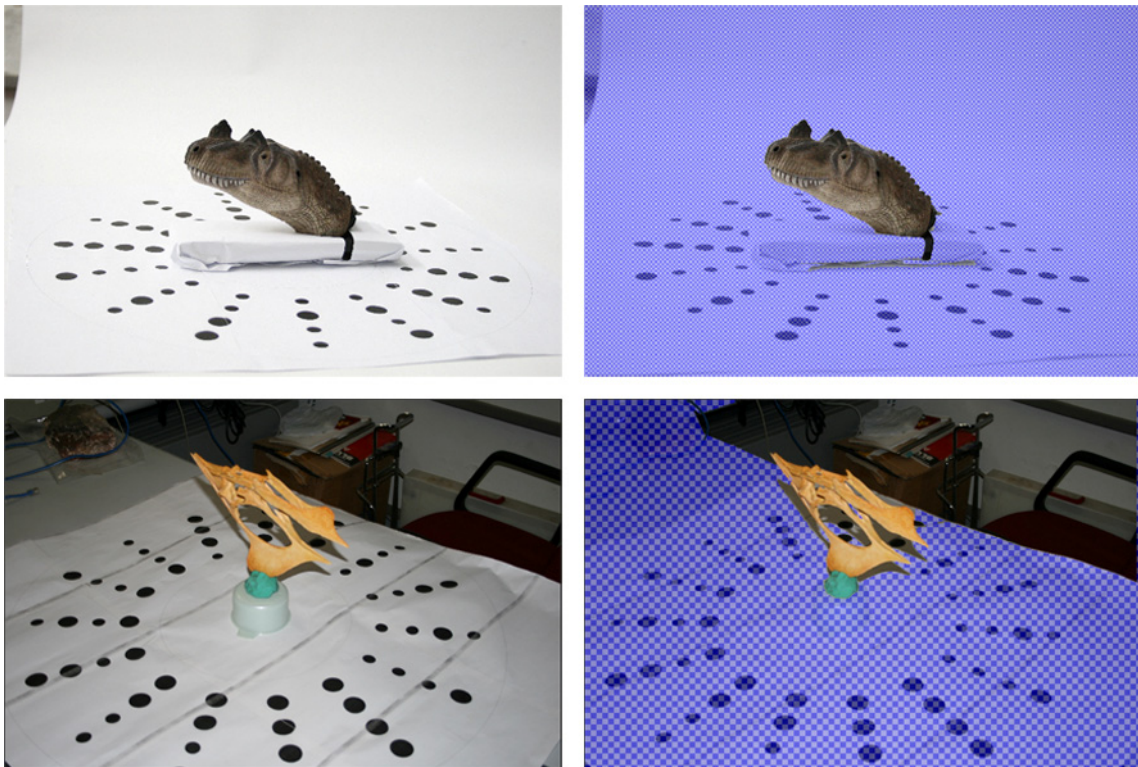


Figura 15. Acima fotos da escultura da cabeça de um Ceratosaurus nasicornis com cenário melhor preparado para a separação fundo/objeto; abaixo, fotos do crânio de um Tapejara wellnhoferi sem preparação do cenário, prejudicando o resultado do mascaramento da imagem.

3.3.5. Geração dos cones de silhueta de cada imagem

Os cones de silhueta de cada imagem são determinados pelo *viewpoint* da imagem (identificado previamente, ver item 3.3.3 deste trabalho), que é a origem do cone de silhueta dessa imagem e pela silhueta do objeto nessa imagem (também já

identificado, ver item 3.3.4 deste trabalho). Para ser possível gerar esse cone de silhueta é necessário que a silhueta do objeto na imagem seja convertida em um polígono, para que sejam determinados os vértices dessa silhueta que formarão, junto com o ponto de origem o cone de silhueta representativo da imagem. Além disso, é necessário que se determine um volume máximo para o objeto final antes mesmo de se encontrar o *visual hull* para que os cones de silhueta não sejam infinitos, inviabilizando o processamento deles. Segundo BAUMBERG *et al.* (2005) a equipe de desenvolvimento do *software* 3D S.O.M implementou um algoritmo que chamaram SAVANT (*silhouette approximation, vertex analysis and triangulation* ou aproximação de silhueta, análise de vértices e triangulação). Esse algoritmo em sua primeira etapa de processamento, analisa a silhueta da imagem e converte ela em um polígono 2D cujos vértices formarão as arestas do cone de silhueta dando a cada uma das arestas um valor de identificação único que serão utilizadas na formação do *visual hull*. Então, é determinado um volume inicial para o objeto, um cubo que engloba todo o *visual hull*. Esse cubo funciona inicialmente como um limitador dos cones de silhueta.

3.3.6. Geração da malha poligonal representativa do *visual hull*

A primeira fase dessa etapa é determinar o volume aproximado do objeto. Seguindo o processamento do algoritmo SAVANT, o cubo inicial será processado e subdividido. Os cubos resultantes dessa subdivisão serão também processados e serão: (1) descartados, quando não houver nenhum cone de silhueta cortando ele; (2) subdivididos novamente, quando houverem cones de silhueta cortando ele ou; (3) tem os vértices dentro dele calculados para formarem a nuvem de pontos da geometria do objeto final. Os vértices são determinados por duas condições: que existam exatamente três arestas cortando a projeção do cubo e; que não existam imagens em que a projeção desse cubo esteja completamente fora da silhueta da imagem. Os cubos vão sendo subdivididos e processados até que haja apenas um candidato a vértice dentro dele. Caso contrário ele é subdividido novamente, se houver mais de um candidato a vértice, ou descartado, caso não haja possíveis vértices dentro dele. Depois de processados todos os cubos e encontrados todos os vértices, está formada a nuvem de pontos representativa do *visual hull*. Essa nuvem de pontos passa então por um processo de triangulação para formar a malha poligonal representativa do objeto reconstruído.

3.3.7. Mapeamento e geração da textura do modelo 3D

O mapeamento e a geração da textura do modelo 3D do objeto reconstruído é feito a partir de uma abordagem desenvolvida a partir da técnica chamada *2D image splining* descrita por BURT *et al.* (1983). O algoritmo utiliza as seis vistas ortográficas do objeto (frontal, traseira, lateral esquerda, lateral direita, topo e fundo) mais algumas partes de outras vistas para representar os triângulos que não são completamente visíveis através das vistas ortográficas. Para cada triângulo da malha são geradas três coordenadas 2D de texturas. O objetivo é ter ao mesmo tempo a qualidade da imagem que melhor é projetada sobre cada triângulo sem perder a variação de luz e sombra apresentada pelas outras imagens secundárias aplicadas a esse triângulo. Essas imagens são determinadas através de uma função que determina pesos para as imagens utilizadas na reconstrução do objeto para cada triângulo da malha. As imagens que não são projetadas em um determinado triângulo recebem valor 0, enquanto as imagens que são projetadas nesse triângulo recebem valores em escala de cinza que são então aplicadas à superfície do triângulo através de um mapeamento de textura. Ao final do processo essa imagem aplicada à superfície é suavizada para evitar mudanças grosseiras de tonalidade de uma face para outra da malha poligonal. Todas as imagens projetadas em cada triângulo são então misturadas em uma única imagem seguindo um processo de adição que leva em conta o peso determinado para cada uma das imagens, considerando separadamente as imagens de peso baixo e as imagens de peso alto. Esse método é representado na equação apresentada por BAUMBERG *et al.* (2005):

$$J(u, v) = \frac{\sum_k \lambda^k(u, v) I_{low}^k(u, v)}{\sum_k \lambda^k(u, v)} + \sum_k \mu^k(u, v) I_{high}^k(u, v)$$

Onde $J(u, v)$ é a imagem final da textura; I_{low}^k é “késima” imagem de peso baixo projetada sobre o triângulo; I_{high}^k é a imagem de peso alto projetada sobre o triângulo; $\lambda^k(u, v)$ é a função do peso da suavização da “késima” imagem projetado sobre o triângulo; e μ^k , o filtro de alto peso da imagem, é definido por:

$$\mu^k = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda^k > \lambda^i \forall i \neq k, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

3.4 – Resultados finais

Na Tabela 1 são apresentados dados técnicos sobre todos os modelos reconstruídos com a técnica SFS para o projeto Dinosvirtuais incluindo: número de fotos, número de polígonos do modelo final, tamanho do arquivo de trabalho do *software*, tamanho do arquivo X3D/VRML exportado pelo *software* e o tamanho do arquivo de textura do modelo final.

Tabela 1. Os modelos 3D dos objetos reconstruídos.

Espécie	Nº de fotos	Nº de polígonos	Tamanho do arquivo 3D S.O.M.	Tamanho do arquivo X3D/VRML	Tamanho do arquivo de textura
<i>Anurognathus ammoni</i>	50	3.970	3.346 Kb	368 Kb	140 Kb
<i>Araripemys barretoii</i>	42	4.000	3.195 Kb	350 Kb	144 Kb
<i>Asmithwoodwardia scotti</i>	29	5.240	3.346 Kb	453 Kb	113 Kb
<i>Bauruemys elegans</i> (crânio)	25	3.352	1.989 Kb	301 Kb	129 Kb
<i>Bauruemys elegans</i> (casco)	25	1.968	3.270 Kb	171 Kb	172 Kb
<i>Bauruemys elegans</i> (fêmur)	22	1.896	1.832 Kb	147 Kb	108 Kb
<i>Cearachelys placidoi</i>	34	4.000	3.983 Kb	380 Kb	159 Kb
<i>Ceratosaurus nasicornis</i>	34	5.000	3.259 Kb	434 Kb	175 Kb
<i>Eoraptor lunensis</i>	52	3.626	3.370 Kb	315 Kb	231 Kb
<i>Equus vandonii</i> (crânio)	47	4.850	2.064 Kb	483 Kb *	188 Kb
<i>Equus vandonii</i> (mandíbula)	34	700	Arquivo perdido	483 Kb *	196 Kb

* O arquivo X3D/VRML é o mesmo para os dois modelos.

Tabela 1. Os modelos 3D dos objetos reconstruídos. (continuação)

Espécie	Nº de fotos	Nº de polígonos	Tamanho do arquivo 3D S.O.M.	Tamanho do arquivo X3D/VRML	Tamanho do arquivo de textura
<i>Giganotosaurus carolinii</i>	37	16.000	3.419 Kb	1.344 Kb	141 Kb
<i>Gondwanatitan faustoi</i>	36	4.756	3.396 Kb	407 Kb	192 Kb
<i>Mariliasuchus amarali</i>	39	2.620	2.134 Kb	237 Kb	207 Kb
<i>Nothrotherium maquinense</i>	42	1.822	1.991 Kb	166 Kb	198 Kb
<i>Piatnitzkysaurus floresi</i>	34	1.900	1.892 Kb	195 Kb	197 Kb
<i>Plateosaurus engelhardti</i>	32	2.128	3.283 Kb	190 Kb	225 Kb
<i>Pycnonemosaurus nevesi</i>	37	3.912	2.349 Kb	320 Kb	165 Kb
<i>Smilodon populator</i>	43	3.350	1.990 Kb	225 Kb	71 Kb
<i>Spinosauroida indeterminado</i>	69	4.250	2.171 Kb	392 Kb	157 Kb
<i>Tapejara wellnhoferi</i> (cabeça)	64	3.804	2.089 Kb	631 Kb	160 Kb
<i>Tapejara wellnhoferi</i> (crânio)	58	5.768	2.190 Kb	964 Kb	140 Kb
<i>Velociraptor mongoliensis</i>	38	3.994	3.331 Kb	664 Kb	203 Kb
<i>Vinctifer comptoni</i>	15	3.200	3.165 Kb	285 Kb	153 Kb

Os objetos reconstruídos usaram em média 39 fotografias e geraram modelos 3D com 4.000 polígonos, em média. É preciso levar em consideração nesses resultados que o objetivo do projeto Dinosvirtuais foi reconstruir tridimensionalmente os fósseis e esculturas do MN-UFRJ e disponibilizá-los para visualização na internet. Portanto, os modelos não possuem a

resolução máxima que o *software* 3D S.O.M. é capaz de gerar e sim a menor resolução que mantivesse a qualidade visual da geometria do objeto. Da mesma forma, as texturas geradas, que ocupam, em média, 165 Kb de memória foram otimizadas para visualização na internet, não representando a melhor qualidade possível de ser gerada com o 3D S.O.M. O *software* inicialmente limita em 300.000 polígonos a resolução máxima do modelo reconstruído final. Por exemplo, o fóssil *Vinctifer comptoni*, reconstruído a partir de 15 fotografias, na melhor qualidade possível, gerou um modelo 3D com 209.568 polígonos (foram 3.200 polígonos na versão otimizada) e um arquivo de textura com 6.289 Kb (153 Kb na versão otimizada). A Tabela 2 mostra a comparação dos dados dos arquivos do fóssil *Vinctifer comptoni* em melhor resolução em comparação com os arquivos otimizados. A Figura 13 apresenta imagens das versões otimizada e de melhor qualidade para comparação dos resultados finais.

Tabela 2. Os modelos 3D dos objetos reconstruídos.

Modelo 3D <i>Vinctifer comptoni</i>	Nº de fotos	Nº de polígonos	Tamanho do arquivo 3D S.O.M.	Tamanho do arquivo de textura
Otimizado	15	3.200	3.165 Kb	153 Kb
Melhor qualidade	15	209.568	47.222 Kb	6.289 Kb



Figura 16. No alto o modelo 3D otimizado (3.200 polígonos) com a textura (à esquerda) e mostrando apenas a malha poligonal (à direita). Em baixo o modelo 3D em qualidade máxima (209.568 polígonos) com a textura (à esquerda) e mostrando apenas a malha poligonal (à direita).

Considerando as imagens dos modelos com as texturas é muito difícil perceber alguma diferença entre as versões otimizadas e de melhor qualidade enquanto que, observando apenas a malha poligonal, fica evidente a diferença de resolução entre as duas versões.

Foi realizado também um teste de desempenho do processamento do software para se verificar o tempo gasto para se gerar o modelo final a partir das fotografias. O teste foi realizado com duas espécies diferentes escolhidas de acordo com a qualidade das fotografias utilizadas com o objetivo de se verificar a capacidade do software de processar imagens de qualidades diferentes e qual o impacto que isso teria no tempo total gasto para se chegar ao modelo final. Além disso também foi realizado um teste com imagens sintéticas geradas a partir de um modelo de um *Tiranosaurus rex* obtido gratuitamente na internet no website Turbo Squid 3D Marketplace (<http://www.turbosquid.com/3d-models/free-3ds-model-tyrannosaurus/393704>) que disponibiliza para downloads modelos 3D de diversos usuários. Esse modelo 3D do *Tiranosaurus rex* não teve nenhuma verificação científica de qualidade feita por paleontólogos e não foi utilizado no projeto Dinosvirtuais. Foi utilizado apenas para a realização do teste de desempenho do 3D S.O.M para essa pesquisa. Foi utilizado um Notebook HP Pavillon dv6000 com processador Intel Core 2 CPU T5300 com 1.73 GHz de processamento em cada um dos dois núcleos, 2 Gb de memória RAM, placa gráfica Mobile Intel(R) 945 Express Chipset Family com 256 Mb de memória compartilhada funcionando com o sistema operacional Windows Vista Home Premium SP2. A Tabela 3 apresenta os resultados comparados entre os três modelos gerados a partir das esculturas das espécies *Asmithwoodwardia scotti*, *Ceratosaurus nasicornis* e *Tiranosaurus rex*. A Figura 14 apresenta exemplos de fotografias utilizadas para gerar os modelos 3D das duas espécies e uma imagem sintética da espécie *Tiranosaurus rex* para se ter uma comparação da qualidade das imagens de cada espécie.

Tabela 3. Teste de desempenho na reconstrução 3D de objetos com o 3D S.O.M.

Espécies	<i>Asmithwoodwardia scotti</i>	<i>Ceratosaurus nasicornis</i>	<i>Tiranosaurus rex</i>
Nº de fotografias	29	34	46
Fotografias não alinhadas automaticamente	7	1	0
Tempo de carregamento das imagens (hh:mm:ss)	00:03:20	00:04:24	00:02:00
Tempo de mascaramento das imagens (hh:mm:ss)	00:43:30	00:55:54	00:47:58
Tempo de geração da geometria (hh:mm:ss)	01:00:50	00:23:42	00:06:01
Tempo de geração da textura (hh:mm:ss)	00:04:50	00:07:40	00:05:43
Tempo de exportação do modelo final para X3D/VRML (hh:mm:ss)	00:00:40	00:00:40	00:00:08
Tempo total (hh:mm:ss)	01:53:10	01:32:20	01:00:23



Figura 17. Imagens utilizadas na reconstrução tridimensional de esculturas das espécies (à esquerda), *Ceratosaurus nasicornis* (ao meio) e *Tiranosaurus rex* (à direita).

A diferença de qualidade na preparação das fotografias é evidente e a diferença no tempo de processamento de cada etapa do processo de reconstrução tridimensional

com o *software* 3D S.O.M. reflete a importância de se realizar uma preparação cuidadosa do ambiente onde serão feitas as fotografias. Isso pode ser percebido claramente comparando as duas fotografias da Figura 14 com a imagem sintética do *Tiranosaurus rex*. Quanto mais intervenções manuais tiverem que ser feitas no mascaramento das imagens e no alinhamento manual delas, maior será o tempo gasto em cada imagem e, conseqüentemente, em cada etapa do processamento. Foi observado que em praticamente todas as imagens foi necessário uma intervenção manual no mascaramento, inclusive nas imagens sintéticas, mas mesmo sendo necessário, o tempo gasto nesse mascaramento em imagens de melhor qualidade é consideravelmente menor do que em imagens de qualidade pior. É importante destacar também que o mascaramento e o alinhamento manual das imagens, nesse teste, foi feito com o uso de uma mesa digitalizadora Wacom Bamboo, que agiliza bastante essa intervenção em comparação a um *mouse* convencional. No Quadro 5 é apresentado o tempo de cada etapa proporcional à quantidade de imagens obtidas para cada uma das esculturas.

Quadro 5. Desempenho proporcional de cada etapa da reconstrução 3D dos objetos.

Espécies	<i>Asmithwoodwardia scotti</i>	<i>Ceratosaurus nasicornis</i>	<i>Tiranosaurus rex</i>	Observações
Tempo de carregamento das imagens (em segundos)	6,89	7,76	2,60	Diferença pouco significativa entre os dois primeiros modelos. As imagens sintéticas carregaram consideravelmente mais rapidamente.
Tempo de mascaramento das imagens (em segundos)	118,63	101,63	62,54	O mascaramento automático das melhores imagens minimiza a necessidade de intervenção manual, diminuindo o tempo de processamento.

Quadro 5. Desempenho proporcional de cada etapa da reconstrução 3D dos objetos.
(continuação)

Espécies	<i>Asmithwoodwardia scotti</i>	<i>Ceratosaurus nasicornis</i>	<i>Tiranosaurus rex</i>	Observações
Tempo de geração da geometria (em segundos)	125,86	41,82	7,84	A necessidade de se alinhar manualmente nesta etapa mais imagens por conta de fotografias piores aumenta consideravelmente o tempo gasto para a geração da geometria do objeto.
Tempo de geração da textura (em segundos)	10,00	13,52	5,58	Diferença pouco significativa entre os dois primeiros modelos. A geração da textura da reconstrução a partir das imagens sintéticas ocorreu consideravelmente mais rapidamente.
Tempo de exportação do modelo final para X3D/VRML (em segundos)	1,37	1,17	0,17	Diferença pouco significativa de um objeto para o outro.
Tempo total (em segundos)	234,13	162,94	78,76	Diferença considerável de tempo entre um objeto e outro justifica uma melhor preparação do cenário no momento de se obter as fotografias do objeto a ser reconstruído.

A diferença de tempo na obtenção dos modelos testados foi expressiva, o que reforça a importância de uma boa preparação do cenário para a realização das fotografias, especialmente no controle de iluminação do cenário, reduzindo a quantidade de sombras que possam prejudicar o mascaramento das imagens. Outra observação importante com relação à qualidade das imagens geradas é com relação ao tamanho das imagens em

quilobytes. As imagens da espécie *Asmithwoodwardia scotti* possuem, em média, 4 Mb de tamanho e resolução de 3072 x 2304 pixels (7,07 megapixels), as da espécie *Ceratosaurus nasicornis*, 3,4 Mb de tamanho e resolução de 3888 x 2592 pixels (10,07 megapixels) e as imagens sintéticas geradas para a reconstrução do *Tiranosaurus rex*, 0,9 Mb de tamanho e 3800 x 2850 pixels (10,83 megapixels). Ou seja, a complexidade das imagens geradas com pouco cuidado faz com que o tamanho dos arquivos seja consideravelmente maior e isso certamente é um dos fatores que mais influencia o tempo de processamento de cada etapa do processo de reconstrução 3D de objetos.

Os resultados obtidos no processo de reconstrução 3D dos fósseis e esculturas do MN-UFRJ através da técnica de SFS com uso do *software* 3D S.O.M, com o objetivo de disponibilizar o acervo para visualização na internet foram considerados bastante satisfatórios. Além dos dados objetivos sobre os resultados das reconstruções dos fósseis e das esculturas também foi realizado durante todas as etapas do processo de reconstrução uma avaliação da qualidade dos modelos 3D feita por especialistas do MN-UFRJ que aprovaram cada modelo e solicitaram, em alguns casos, edições manuais na geometria desses modelos para que eles, visualmente, representassem adequadamente o objeto reconstruído, especialmente nos casos em que partes côncavas do objeto não foram identificadas pelo 3D S.O.M e representavam características importantes daqueles exemplares.

Capítulo 4 – Considerações finais

4.1 – Resultados parciais

Os resultados parciais do projeto Dinosvirtuais que envolveu a reconstrução tridimensional de fósseis e esculturas de paleovertebrados do MN-UFRJ, a construção de uma exposição virtual 3D para visualização na internet e a construção de um catálogo virtual de fósseis foram publicados e apresentados em congressos nacionais e internacionais de diferentes áreas de conhecimento. ROMANO *et al.* (2006) publicou resumo sobre o processo de reconstrução tridimensional de fósseis da espécie *Bauruemys elegans* no *Society of Vertebrate Paleontology Meeting* em Ottawa, no Canadá. ROMANO *et al.* (2007) publicou um resumo sobre o uso de técnicas de RV para a construção de uma coleção digital de vertebrados fósseis baseada na internet no XX Congresso Brasileiro de Paleontologia, em Búzios onde também foi realizado um mini-curso de reconstrução 3D através de fotografias com uso da técnica SFS pelo *software* 3D S.O.M. MONNERAT *et al.* (2008) apresentou um artigo completo no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, em São Paulo, sobre a exposição virtual de vertebrados fósseis do MN-UFRJ baseado na reconstrução 3D de fósseis e esculturas através da técnica de SFS e na construção de um cenário virtual utilizando uma *engine* de *game* chamada *Unreal Engine 2*. MONNERAT *et al.* (2009) apresentou um artigo completo no *IADIS International Conference Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing*, em Portugal, apresentando os resultados finais da construção do projeto Dinosvirtuais, mostrando o processo de reconstrução tridimensional de fósseis e esculturas de paleovertebrados com o uso da técnica de SFS, a construção do cenário virtual da exposição com modelagem 3D no Blender e exportação para o X3D/VRML com uso do *software* Vivaty Studio e a construção do catálogo virtual de fósseis onde são apresentados os modelos reconstruídos com o 3D S.O.M em X3D/VRML. Esse trabalho conquistou o *Outstanding Paper Award at the IADIS International Conference Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2009 Special Session Web Virtual Reality and Three-Dimensional World, IADIS*. Esses resultados mostram

empiricamente que os modelos 3D dos fósseis e esculturas reconstruídos obtiveram resultados satisfatórios para visualização na internet em qualidade visual e em desempenho tanto nas áreas de tecnologia quanto na área da paleontologia.

4.2 – O projeto Dinosvirtuais

O projeto Dinosvirtuais foi lançado oficialmente na exposição Dinos in Rio, de paleoarte do MN-UFRJ em 25 de agosto de 2009 que atraiu o interesse da mídia impressa e televisiva. A partir do dia 26 de agosto o site obteve índices de acesso bastante consideráveis tendo alcançado uma média de mais de 1.000 visitas semanais no primeiro mês de lançamento e quase 10.000 visitas até janeiro de 2010 mantendo uma média de 115 visitas por semana entre 6 de dezembro de 2009 e 2 de janeiro de 2010.

A relação entre a engenharia e a ciência básica, no caso a Paleontologia, através da parceria no projeto entre o MN-UFRJ, o LATEC-UFRJ e o GRVA-LAMCE-COPPE-UFRJ propiciou ao projeto Dinosvirtuais uma característica de interdisciplinaridade que foi bastante enriquecedora para as três instituições e deu condições para que o resultado final do projeto fosse bastante satisfatório.

4.3 – Aplicação das técnicas de engenharia reversa

Para o campo das engenharias, o projeto Dinosvirtuais deixou o legado de mostrar a possibilidade de aplicação de técnicas de engenharia reversa para outras esferas de conhecimento, ampliando o leque de possibilidades de atuação para essas técnicas, mostrando a importância da interdisciplinaridade e do intercâmbio de conhecimento entre diferentes áreas. A aplicação da técnica de reconstrução 3D SFS aliada a pesquisa sobre outras possibilidades de técnicas de reconstrução 3D como o escaneamento à laser e o escaneamento por tomografia computadorizada, entre outros, realizadas nessa pesquisa também pode ser útil não só para a área da paleontologia, como para outras áreas, na medida em que apresenta resultados do uso de técnicas de reconstrução 3D em objetos com geometrias bastante irregulares. Característica que pode ser observada em

diversas outras áreas como as artes plásticas, a arqueologia e a medicina como mostram os exemplos de projetos citados no item 1.4 deste trabalho.

4.4 – A técnica *Shape-from-silhouette*

A opção pelo uso da técnica SFS em detrimento de outras técnicas de reconstrução 3D foi considerada acertada. Os objetos reconstruídos obtiveram resultados satisfatórios tanto visualmente quanto de desempenho. Por ter optado pelo SFS a equipe do projeto Dinosvirtuais teve a possibilidade de trabalhar autonomamente na reconstrução 3D dos fósseis e esculturas sem a dependência de outras instituições parceiras do MN-UFRJ o que permitiu que uma quantidade maior de modelos 3D pudesse ser obtida, dando mais corpo tanto para a exposição virtual como para o catálogo de vertebrados fósseis disponibilizados na internet.

4.5 – Trabalhos futuros

O catálogo de fósseis em 3D desenvolvido no projeto Dinosvirtuais formou uma base de dados acessível a qualquer usuário (especialistas na área de paleontologia e zoologia ou leigos) interessado em conhecer determinadas espécies. Tal base de dados poderá ser incorporada ao Sistema de Gerenciamento de Coleções (SGC) Harpia (ROMANO *et al.*, 2007) largamente utilizado por pesquisadores da área. O uso do SGC proporciona eficiência e precisão nas tarefas rotineiras relacionadas à curadoria de coleções e uma das opções do programa é disponibilizar em sua base de dados arquivos de imagem dos exemplares. Isso permite que, além das informações técnicas, o usuário também possa ver o exemplar que está pesquisando. Os modelos 3D dos fósseis reconstruídos podem ser compartilhados por pesquisadores de diferentes partes do Brasil e do mundo ampliando o intercâmbio de informações entre os pesquisadores e ampliando as possibilidades de parcerias entre instituições de lugares diferentes.

A partir dos resultados apresentados pelo projeto Dinosvirtuais e da incorporação do conhecimento desenvolvido e adquirido pela equipe de paleovertebrados do MN-UFRJ,

as técnicas de reconstrução 3D de objetos, em especial a SFS, podem ser utilizadas para dar continuidade no processo de digitalização da sua coleção e expandindo sua atuação para outras áreas do MN-UFRJ.

A técnica de SFS, que apresentou resultados satisfatórios na geração de modelos para disponibilização para visualização na internet com objetivos principalmente publicitários e educacionais deve ser testada para aplicações em pesquisa na área de biologia comparada (como a paleontologia). Pretende-se comparar diferentes espécies (inicialmente fósseis) ou mesmo diferentes espécimes de uma mesma espécie a partir de modelos 3d gerados. Através da análise comparativa de marcos anatômicos (i.e.: pontos cuja homologia biológica pode ser identificada em diferentes espécies ou espécimes) diversas conclusões sobre a(s) espécie(s) ou espécimes podem ser alcançadas e permitem inferências sobre a evolução das espécies em estudo. Inicialmente, pretende-se avaliar a aplicabilidade do uso de modelos 3D gerados a partir do 3D S.O.M para este fim a partir da comparação entre diferentes modelos de um mesmo espécime gerados a partir de diferentes técnicas utilizando as mesmas técnicas aplicadas em estudos de marcos anatômicos. Por tratar-se do mesmo indivíduo, quaisquer diferenças identificadas terão sido causadas pela técnica de modelagem 3D aplicada e as diferenças entre os modelos poderão ser avaliadas estatisticamente.

A técnica de SFS, que apresentou resultados satisfatórios na geração de modelos para disponibilização para visualização na internet com objetivos principalmente publicitários e educacionais deve ser testada para aplicações outras possibilidades de pesquisas em paleontologia, como na comparação de diferentes fósseis de mesma espécie ou de espécies diferentes para auxiliar na determinação dos graus de parentesco entre as diferentes espécies extintas ou mesmo entre espécies extintas e viventes.

Essas técnicas de reconstrução 3D de objetos e outras técnicas de RV também podem ser utilizadas no desenvolvimento de aplicativos interativos como materiais de aprendizagem para estudantes de segundo grau e de graduação que não tenham fácil acesso aos museus, tornado o estudo mais interessante e divertido, *games* que podem ajudar a atrair o interesse de crianças e jovens para os museus de ciências básicas, sistemas de treinamento que podem auxiliar no desenvolvimento das habilidades dos paleontólogos nas atividades práticas inerentes à sua profissão como a preparação de

fósseis, por exemplo. Esses exemplos de aplicativos relativos à área da paleontologia também podem ser desenvolvidos para diversas outras áreas já citadas neste trabalho.

O uso de ferramentas como as *game engines*, por exemplo a *Unreal Engine 2* utilizada no projeto Dinosvirtuais em sua fase inicial (MONNERAT *et al.*, 2008), o X3D/VRML utilizado no projeto tanto no catálogo de fósseis como na exposição virtual (MONNERAT *et al.*, 2009) e os sistemas de realidade virtual e aumentada, além de equipamentos como os HUDs (*Head-Up-Displays*) e luvas de RV, entre outros, podem auxiliar no desenvolvimento e utilização desses aplicativos.

A pesquisa acerca das diferentes técnicas de reconstrução 3D de objetos realizadas neste trabalho mostrou deficiências e qualidades dessas técnicas. Uma possibilidade interessante de estudo para se obter um avanço na qualidade dos modelos reconstruídos seria o desenvolvimento de um sistema híbrido de reconstrução 3D que se aproveitasse dos pontos fortes de cada técnica. A associação das técnicas SFS e escaneamento à laser por *structured light* pode possibilitar a obtenção da geometria de objetos com a maior simplicidade e velocidade da SFS sem perder as formas côncavas de alguns objetos que seriam obtidas através do escaneamento à laser. Com isso, não seria necessário o escaneamento à laser de toda a superfície do objeto, que aumenta consideravelmente o tempo de reconstrução do objeto.

Considerando ainda um dos objetivos do projeto Dinosvirtuais, que foi a utilização de uma técnica de baixo custo para obtenção de modelos 3D para visualização na internet, deixando a alta precisão geométrica em segundo plano, pode ser pesquisada a associação da técnica SFS com a técnica de *shape-from-shadows* que utiliza o mesmo princípio da técnica de *structured light* substituindo a projeção de feixes de laser sobre o objeto a ser reconstruído pela projeção de sombras de um objeto conhecido sobre o objeto a ser reconstruído. Ou ainda com a técnica de fotogrametria que, assim como a SFS, não requer equipamentos específicos para a reconstrução 3D de objetos, mas de maneira mais custosa em termos de tempo, é capaz de identificar as formas côncavas dos objetos.

Referências bibliográfica

AZEVEDO, S. A. K., CARVALHO, L. B., SANTOS, D. D., 2004, “Metodologias digitais aplicadas ao estudo de vertebrados”. In: Carvalho, I. S. (ed), *Paleontologia Volume 2*, 2 ed., capítulo 5, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora Interciência.

AZEVEDO, S. A. K., HENRIQUES, D. D. R., ROMANO, P. S. R., *et al.*, 2006, “Tomografia Computadorizada – o avanço da técnica e das pesquisas do Setor de Paleovertebrados do Museu Nacional/UFRJ”, *Revista Ciência e Natura*, Edição especial com os resumos do IV Simpósio Brasileiro de Paleontologia de Vertebrados, pp. 27.

AZEVEDO, S. A. K., CARVALHO, L. B., 2009, “O uso da tomografia computadorizada no estudo de vertebrados fósseis no Museu Nacional/UFRJ”. In: Werner Junior, H., Lopes, J. (eds), *Tecnologias 3D*, 1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Livraria e Editora Revinter Ltda..

BAUMBERG, A., LYONS, A., TAYLOR, R., 2005, “3D S.O.M.: a commercial *software* solution to 3D scanning”, *Graph. Models*, v. 67, n. 6, pp. 476-495.

BLAIS, F., 2004, “Review of 20 years of range sensor development”, *Journal of Electronic Imaging*, v.13, n.1, pp. 231-243.

BURT, P. J., ADELSON, E. H., 1983, “A Multiresolution Spline With Application to Image Mosaics”, *ACM Transactions on Graphics*, v.2, n.4, pp. 217-236.

CHEUNG, K. M., BAKER, S., KANADE, T., 2003, “Visual Hull Alignment and Refinement Across Time: A 3D Reconstruction Algorithm Combining Shape-From-Silhouette with Stereo”, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, v. 2, pp. 375-382, Madison, Wisconsin, USA, Jun.

- CHIARI, Y., WANG, B., RUSHMEIER, H. *et al.*, 2008, “Using digital images to reconstruct three-dimensional biological forms: a new tool for morphological studies”, *Biological Journal of the Linnean Society*, v. 95, n. 2, pp. 425–436.
- CHO, J., SONG, S. M., 2003, “Three-dimensional shape reconstruction from images by shape-from-silhouette technique and iterative triangulation”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 17, n. 11, pp. 1665-1673.
- CHIKOFSKY, E. J., CROSS, J. H., 1990, “Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy”, *IEEE Software*, v. 7, n. 1, pp. 13-17.
- COPPE., 2010, “Áreas Interdisciplinares”. Disponível em: <http://www.coppe.ufrj.br/ensino/cursos/interdisciplinares/index_novo.htm>, acessado em 30 de março de 2010.
- CORCORAN, F., DEMAINE, J., DICAIRE, L. G., *et al.*, 2002, *Inuit3D: An Interactive Virtual 3D Web Exhibition*, in: Proceedings of the Conference on Museums and the Web 2002, Boston, Massachusetts, USA, Abr.
- CRUZ, M. P., GRILLO, O. N., ROMANO, P. S. R., *et al.*, 2002, Utilização de ferramentas computacionais avançados para obtenção de arquivos digitais e análise de vertebrados fósseis, *Boletim da Sociedade Brasileira de Paleontologia*, n. 49, pp. 64.
- DI BLAS, N., PAOLINI, P., HAZAN, S., 2003, *The SEE Experience: Edutainment in 3D Virtual Worlds*, in: Proceedings of the Conference on Museums and the Web 2003, Charlotte, North Carolina, USA, Mar.
- FISCHLER, M. A., BOLLES, R. C., 1981, “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography”, *Communications of the ACM*, v. 24, n.6, pp 381-395.

- GRILLO, O. N., 2004, Reconstrução do esqueleto de *Staurikosaurus pricei* (Dinosauria, Theropoda): Uso de scanner laser 3D e modelagem virtual tridimensional para reconstruir vertebrados fósseis. Monografia de B.el. em Biologia, Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GRILLO, O. N., 2007, *Miologia e biomecânica do membro posterior de Staurikosaurus pricei Colbert, 1970 (Dinosauria, Saurischia)*, Dissertação de M.Sc., Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- JOHNSTON, R. A., BARNES, K., LOVELL-SMITH, T., *et al.*, 2004, *Use of a Hand-held Laser Scanner in Palaeontology: A 3D Model of a Plesiosaur Fossil*, in: Proceedings of the Image and Vision Computing '04, pp. 233-237, Akarua, New Zealand, Nov.
- KETCHAM, R. A., CARLSON, W., 2001, "Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences", *Computers & Geosciences*, v. 27, n. 4, pp. 381-400.
- LACERDA, I. M. F., 2009, *Adaptação eletrônica de um leitor mecânico de coto, Investigação e desenvolvimento de interface CAD*, Dissertação de M.Ss., Univesidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- LAURENTINI, A., 1994, "The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 16, n. 2, pp. 150-162.
- LEVOY, M., PULLI, K., CURLESS, B., *et al.*, 2000, *The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues*, in: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2000, pp. 131-144, New Orleans, Louisiana, USA, Jul.
- Li, X., Feng, J., Zha, Z., 2003. *3D Modelling of Geological Fossils and Ores by Combining High-resolution Textures with 3D Scanning Data*, in: proceedings of the Ninth International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, pp. 686-693, Montreal, Quebec, Canada, Out.

- LIMA, C. B., 2003, *Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida - Estudos de Casos*, dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- LORENSEN, W. E., CLINE, H. E., 1987, *Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm*. In: Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques, pp. 163-169, New York, New York, USA, Jul.
- MATUSIK, W., BUEHLER, C., MCMILLAN, L., 2001, *Polyhedral visual hulls for real-time rendering*, in: Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, pp. 115–126, Londres, Reino Unido, Jun.
- MONNERAT, M. C., HAGUENAUER, C., ROMANO, P. S. R., *et al.*, 2009, *Dinosvirtuais: Internet Virtual Exhibition of Fossil Vertebrates*, in: Proceedings of the IADIS International Conference Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2009, pp. 106-113, Carvoeiro, Algarve, Portugal, Jul.
- MONNERAT, M. C., ROMANO, P. S. R., GRILLO, O. N., *et al.*, 2008, *Exposição virtual de vertebrados fósseis do Museu Nacional da UFRJ*, in: 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, pp. 2271-2280, São Paulo, SP, Brasil, Out.
- NIEM, W., 1999, “Automatic reconstruction of 3D objects using a mobile camera”, *Image and Vision Computing*, v.17, n. 2, pp. 125-134.
- PATEL, M., WHITE, M., WALCZAK, K., *et al.*, 2003, *Digitisation to Presentation – Building Virtual Museum Exhibitions*, in: Proceedings of International Conference on Vision, Video and Graphics, pp. 189-196, Bath, Reino Unido, Jul.
- PATEL, M., WALCZAK, K., GIORGINI, F., *et al.*, 2004. *A Cultural Heritage Repository as Source for Learning Materials*, in: Proceedings of VAST 2004: The 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, pp. 213-222, Oudenaarde, Bélgica, Dez.

- PAVLIDIS, G., KOUTSOUDIS, A., ARNAOUTOGLU, F. et al., 2007, "Methods for 3D digitization of Cultural Heritage", *Journal of Cultural Heritage*, v. 8, n. 1, pp. 93-98.
- PETRIDIS, P., WHITE, M., MOURKOUSIS, N., et al., 2005, *Exploring and Interacting with Virtual Museums*, In: Proceedings of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Tomar, Portugal, Mar.
- REHEM, C., SOBRAL, G., ROMANO, P. S. R., 2007, "Inventário de Exemplos das Coleções de Paleovertebrados do Museu Nacional/UFRJ e do Museu de Ciências da Terra/DNPM Submetidos às Técnicas de Análise Digital", *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ)*, v. 30, n., p. 216.
- ROMANO, P. S. R., MONNERAT, M. C., GRILLO, O. N., et al., 2007, *Use of virtual reality to construct a web based digital collection and exhibition of vertebrate paleontology*, in: Proceedings of XX Congresso Brasileiro de Paleontologia, pp. 301, Armação de Búzios, RJ, Brasil, Out.
- ROMANO, P. S. R., MONNERAT, M. C., HAGUENAUER, C., et al., 2006, *Usage of image-based 3d modeling process for reconstruction of Upper Cretaceous Brazilian side-necked turtle Bauruemys elegans (Suárez, 1969) (Pleurodira: Podocnemididae): a preliminary study*, in: Proceedings of 66th Annual Meeting of the Society of Vertebrate Paleontology, v. 26, pp.116A, Ottawa, Ontario, Canadá, Set.
- SABLATNIG, R., TOSOVIC, S., KAMPEL, M., 2003. *A Next View Planning Technique for Shape from Silhouette and Shape from Structured Light*, in: Proceedings of the 27th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition (OAGM/AAPR), v. 168, pp. 65-72, Laxenburg, Austria, Jun.
- SANSONI, G., TREBESCHI, M., DOCCHIO, F., 2009, "State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation", *Sensors*, v. 9, n. 1, p. 568-601.

- SILVA, I. N. L., SILVA L. L., BECK J. C. P., *et al.*, 2008, “Tridimensional reconstruction of a human vertebra from computerized tomography images: reverse engineering to obtain biomodels”, *Coluna*, v. 7, n. 4, pp. 367-370.
- WALCZAK, K., 2006, “Virtual museum exhibitions”, *IEEE Computer*, v. 39, n.3, pp. 93-95.
- WAN, X., XU, G., 1996, “Camera Parameters Estimation and Evaluation in Active Vision System”, *Pattern Recognition*, v. 29, n. 3, pp. 439-447.
- WIKIPEDIA CONTRIBUTORS, 2009, “Reverse engineering”, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, disponível em: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Reverse_engineering&oldid=321056406>, acessado em 28 de outubro de 2009.
- WIKIPEDIA CONTRIBUTORS, 2009, “Chroma key. Wikipedia, The Free Encyclopedia”, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, disponível em: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chroma_key&oldid=327931523>, acessado em 27 de novembro de 2009.
- ZHANG, L., CURLESS, B., SEITZ, S. M., 2002, *Rapid Shape Acquisition Using Color Structured Light and Multi-pass Dynamic Programming*, in: Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission (3DPVT'02), pp. 24, Padova, Itália, Jun.