



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Escola Superior de Desenho Industrial

Denise Silva Batista

**Avaliação comparativa dos scanners 3D Artec MHT e Cyberware
WBX para aplicação em Antropometria e Ergonomia.**

Rio de Janeiro

2014

Denise Silva Batista

**Avaliação comparativa dos scanners 3D Artec MHT e Cyberware WBX para
aplicação em antropometria e ergonomia**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Design, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Reiszal Pereira

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/G

B333 Batista, Denise Silva.
Avaliação comparativa dos scanners 3D Artec MHT e Cyberware WBX para aplicação em antropometria e ergonomia / Denise Silva Batista. – 2014.
118 f.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Reiszal Pereira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Escola Superior de Desenho Industrial.
Bibliografia.

1. Sistemas de varredura - Teses. 2. Imagem tridimensional - Teses. 3. Antropometria - Teses. 4. Ergonomia - Teses. I. Pereira, Fernando Reiszal. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Escola Superior de Desenho Industrial. III. Título.

CDU 681.32

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Denise Silva Batista

**Avaliação comparativa dos scanners 3D Artec MHT e Cyberware WBX para
aplicação em antropometria e ergonomia**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Design, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 29 de janeiro de 2014.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Reizzel Pereira (Orientador)
Escola Superior de Desenho Industrial da UERJ

Prof. Dr. Sydney Fernandes de Freitas
Escola Superior de Desenho Industrial da UERJ

Prof.^a Dra. Carla Patrícia Guimarães
Ananguera Educacional

Rio de Janeiro

2014

DEDICATÓRIA

À minha avó, Maria Natália de Jesus, meu exemplo de coragem e determinação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer minha família. Meus pais, Ademir e Irene, e minha irmã, Daniele, são e sempre serão minha grande inspiração e apoio. Obrigada por estarem presentes em cada etapa de minha vida, amo vocês.

Aos amigos que leram meu trabalho, discutiram, deram conselhos, me acalmaram nos momentos de desânimo e trabalharam ao meu lado, em especial às amigas Raquel Mattar e Rebecca Galera;

Ao Instituto Nacional de Tecnologia, em possibilitar o meu crescimento intelectual e profissional ao longo de todos esses anos. Em especial ao Laboratório de Ergonomia, coordenado pelas incansáveis e brilhantes pesquisadoras Maria Cristina Zamberlan e Flávia Pastura. Agradeço também a toda a equipe do Laboratório, em especial Marcelo, José Luis e Glória por me ajudarem a realizar os testes aqui contidos;

Ao meu orientador, Fernando Reiszal, pela paciência e ajuda;

À Escola Superior de Desenho Industrial (ESDI) e a CAPES, por estimularem a elevação da qualidade do Design no Brasil;

Aos inúmeros autores das teses, dissertações, pesquisas e livros que consultei. A reunião de todo esse conhecimento foi uma grande aula;

À Ergon Projetos, por me ensinar o que é ergonomia e como projetar pensando no conforto dos trabalhadores. Minha trajetória profissional se iniciou ao lado de Venétia Santos, Roberta Cury e Rodrigo Cobbe.

Uma coisa é um buraco em uma coisa que não é.

Carl Andre

RESUMO

BATISTA, Denise Silva. *Avaliação Comparativa dos Scanners 3D Artec MHT e Cyberware WBX para aplicações em Antropometria e Ergonomia*. 2014. 118f. Dissertação. (Mestrado em Design) – Escola Superior de Desenho Industrial, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

A partir das dimensões dos indivíduos pode-se definir dimensionamentos adequados para os produtos e postos de trabalho, proporcionando segurança e conforto aos usuários. Com o avanço da tecnologia de digitalização de imagens (escaneamento) 3D, é possível tirar algumas medidas de maneira mais rápida e com a redução da presença do entrevistado durante o processo. No entanto, faltam estudos que avaliem estas tecnologias no Brasil, sendo necessária a realização de uma comparação das tecnologias e das respectivas precisões para que seu uso em pesquisas. Com o objetivo de oferecer métodos comparativos para escolha dos marcadores e equipamentos a serem utilizados em uma pesquisa antropométrica tridimensional da população brasileira, no presente estudo estão comparadas duas tecnologias de escaneamento: o sistema a laser WBX da empresa norte americana Cyberware e o sistema MHT da empresa russa Artec Group. O método para avaliação da precisão dimensional dos dados advindos desses equipamentos de digitalização de imagens 3D teve cinco etapas: Estudo dos processos de escaneamento; Escaneamento dos marcadores de pontos anatômicos; Escaneamento utilizando um corpo de prova cilíndrico; Escaneamento de um manequim; Escaneamento de um voluntário que teve seus pontos anatômicos marcados para a retirada de medidas. Foi feita uma comparação entre as medidas retiradas manualmente, por meio de antropômetro e virtualmente, com o auxílio do *software* de modelagem tridimensional Rhinoceros. Em relação aos resultados obtidos na avaliação do manequim e do voluntário, concluiu-se que a magnitude do erro absoluto é semelhante para ambos os scanners, e permanece constante independentemente das dimensões sob análise. As principais diferenças são em relação às funcionalidades dos equipamentos.

Palavras-chave: *Scanner* 3D. Antropometria. Ergonomia. Antropometria 3D.

ABSTRACT

BATISTA, Denise Silva. Comparative assessment of Artec MHT and Cyberware WBX 3D Scanners for applications in Anthropometry and Ergonomic Studies. 2014. 118f. Dissertation. (Masters in Design) – Escola Superior de Desenho Industrial, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Only from the dimensions of individuals it is possible to define appropriate sizing for products and workplaces, providing security and comfort to users. With the evolution of 3D digital imaging technology (3D scanning), it is possible to take some measurements faster and reduce the need of the interviewee during the process. However, there are few studies that evaluate these technologies in Brazil. It is necessary to compare these equipments in order to know their precision so they can be used in researches. In order to choose anatomical markers and equipments, this study compares two different equipments: Cyberware WBX laser scanner and Artec Group MHT white light scanner. The method for assessing the dimensional accuracy of the data obtained from those scanning 3D imaging equipment had five steps: Study of the scanning processes; Scanning using a cylindrical object; Scanning a mannequin; Scanning a volunteer who had his anatomical points marked for taking measurements. The comparison was made between the measurements taken manually with an anthropometer and virtually using the 3D modeling software Rhinoceros. Based on results obtained in the evaluation of the mannequin and volunteer, it was concluded that the absolute error is similar for both scanners and remains constant regardless of the size under consideration. The main differences are the features of each equipment.

Keywords: 3D scanner. Anthropometry. Ergonomics. 3D Anthropometry.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	JUSTIFICATIVA	18
1.1	Objetivos	18
1.1.1	<u>Objetivo geral</u>	20
1.1.2	<u>Objetivos específicos</u>	20
2	ANTROPOMETRIA	21
2.1	Histórico	23
2.2	Antropometria tradicional	28
2.3	Antropometria tridimensional	32
2.3.1	<u>Pesquisas antropométricas tridimensionais</u>	42
3	TAXONOMIA DAS TECNOLOGIAS DE CAPTURA DA FORMA 3D	45
3.1	Agrupamento de acordo com a técnica utilizada	47
3.1.1	<u>Métodos com contato</u>	48
3.1.2	<u>Métodos sem contato</u>	53
3.1.2.1	Métodos sem contato / transmissivos.....	55
3.1.2.2	Métodos sem contato / reflexivos.....	59
3.1.2.2.1	Métodos sem contato / reflexivos / não óticos.....	59
3.1.2.2.2	Métodos sem contato / reflexivos / óticos.....	62
3.1.2.2.2.1	Métodos sem contato / reflexivos / óticos / passivos.....	63
3.1.2.2.2.2	Métodos sem contato / reflexivo / óticos / ativos.....	68
4	ANÁLISE COMPARATIVA	78
4.1	Metodologia	78
4.2	Processo de escaneamento	80
4.2.1	<u>Scanner Cyberware WBX</u>	83
4.2.2	<u>Scanner Artec MHT</u>	85
4.3	Escaneamento de marcadores	87
4.4	Escaneamento do corpo de prova	89
4.4.1	<u>Avaliação da distorção da forma</u>	99
4.5	Escaneamento de um manequim	100
4.6	Escaneamento de um voluntário	104

CONCLUSÃO.....	110
REFERÊNCIAS	112

INTRODUÇÃO

A antropometria trata de medidas físicas do corpo humano. Aparentemente, medir as pessoas seria uma tarefa fácil, entretanto, isso não é tão simples quando se deseja obter medidas confiáveis de uma população que contém indivíduos dos mais variados tipos (IIDA, 2002). Muitas variáveis prejudicam a confiabilidade desses dados, como as habilidades e conhecimentos de quem tira essas medidas, a precisão dos instrumentos utilizados e a postura do indivíduo entrevistado.

Antropometria aplicada a projetos de design e engenharia obtém dados diferentes das outras formas de antropometria. A antropometria biológica, por exemplo, baseia-se em medições de restos de esqueletos e outros achados arqueológicos, para comentar sobre a evolução humana. Esses dados têm utilizações específicas, e não são particularmente relevantes para a concepção de equipamentos e locais de trabalho utilizados por sua população usuária contemporânea – ainda que em ambos os casos, o estudo de medições de partes do corpo humano seja chamado de antropometria (VEITCH; BLEWETT; CAPLE, 2012)

É de extrema importância reforçar que postos de trabalho e/ou produtos sejam suficientemente ajustáveis a fim de que uma gama maior de pessoas (em toda a sua variabilidade de dimensões e formatos corporais) possam adotar posturas que minimizem a possibilidade de lesões e fadiga. É necessário que sejam realizadas no Brasil pesquisas antropométricas que permitam, com os dados extraídos, o design de produtos que atendam a essas exigências.

Há ainda uma grande discussão sobre quais métodos possibilitam a medição precisa e rápida do corpo humano. *Scanners* tridimensionais de corpo humano permitem a extração automática de uma grande gama de medidas, no entanto especialistas divergem suas opiniões na consistência das técnicas de medição entre scanners diferentes, bem como entre a antropometria tradicional e a tridimensional (KOUCHI, *et al.*; 2012).

A acurácia dos dados antropométricos 3D obtidos em uma pesquisa depende do sistema de escaneamento nela empregado. No entanto, as especificações disponibilizadas pelos fornecedores desses sistemas muitas vezes não são

comparáveis entre si, como também se mostram inúteis para descrever a qualidade dos dados escaneados (KOUCHI; MOCHIMARU, 2011).

Alguns fatores que influenciam a confiabilidade das medições derivadas de sessões de escaneamento devem ser estudados antes da utilização desses equipamentos em pesquisas. Na antropometria 3D, os sistemas de escaneamento podem ser uma fonte significativa de desconfiança. Um método utilizando diferentes objetos a fim de estudar a riqueza de detalhes capturados, aspectos de precisão e forma serão aqui propostas.

Os métodos de avaliação comparativa das tecnologias de escaneamento 3D aplicadas em antropometria e ergonomia aqui apresentados se propõem a anteceder pesquisas antropométricas tridimensionais e ergonômicas a fim de validar a escolha do equipamento utilizado.

1 JUSTIFICATIVA

O tema proposto é o resultado de um estudo comparativo entre dois *scanners* tridimensionais utilizados em antropometria e ergonomia. Esse estudo pode ser aplicado no processo de *design* a fim de auxiliar na decisão da escolha da tecnologia utilizada, bem como contribuir para a redução do custo de desenvolvimento do projeto e para a redução do tempo de chegada do produto ao mercado.

É possível afirmar que, em função das transformações ocorridas na última década na área de Design e Tecnologia aplicada ao setor produtivo, há uma demanda para ferramentas que facilitem e disseminem o uso dos dados antropométricos da nossa população em projetos de produtos, postos e ambientes de trabalho (PASTURA, 2000).

No entanto, a correta construção de manequins antropométricos virtuais tridimensionais requer tecnologia de ponta para o levantamento das medidas da superfície corporal: o escaneamento tridimensional do corpo humano por meio de scanner 3D. A simulação humana sendo incorporada ao ciclo de vida do produto permite a visualização antecipada dos problemas de interface, assim como problemas de montagem e manutenção, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento.

Medidas antropométricas são dados de base, essenciais para a concepção ergonômica de produtos industriais, sejam de bens de capital ou de consumo. A partir das dimensões dos indivíduos são definidos dimensionamentos adequados para os produtos e postos de trabalho, proporcionando segurança e conforto aos usuários.

Tradicionalmente, as dimensões são retiradas manualmente utilizando antropômetros e fitas métricas. No entanto, esse procedimento consome tempo e requer a presença do entrevistado durante um processo que pode ser demorado. A evolução de novas técnicas de modelagem por computador tem sido acompanhada por um desenvolvimento paralelo de novas tecnologias de medição utilizando, por exemplo, sistemas de raio laser (*scanner* 3D), *vídeo-estereo*, imagem por ressonância magnética (MRI), tomografia assistida por computador (CAT), métodos

que utilizam raios-X, visualização por ultrassom, digitalização por som e métodos de medição do movimento (ZAMBERLAN *et al.*, 2009).

Com o avanço da tecnologia de digitalização de imagens (“escaneamento”) 3D, é possível tirar algumas medidas de maneira mais rápida e com a redução da presença do entrevistado durante o processo. No entanto, frente a toda essa gama de opções, um aspecto importante, para o uso científico dos mesmos, é avaliar a acurácia das medidas de distâncias e coordenadas fornecidas pelos equipamentos de escaneamento 3D. Esse tipo de levantamento é recente no Brasil e devido ao fato de ainda existirem poucos equipamentos de escaneamento 3D para uso em antropometria e ergonomia, verifica-se uma carência de métodos para avaliar a acurácia e a qualidade dos levantamentos.

Além disso, se mostra necessário testar os resultados fornecidos pelos componentes dos aparelhos quanto à resolução da varredura laser e a dispersão da nuvem de pontos, a fim de analisar e avaliar quais apresentam soluções específicas para a área da antropometria. Esta análise fornecerá subsídios para melhoria contínua da qualidade dos levantamentos de dados para trabalhos e estudos realizados com estes equipamentos. Assim, será possível verificar a acurácia rotineiramente a cada levantamento realizado ou sempre que se achar necessário e ratificar sua precisão.

O levantamento mais apurado de medidas antropométricas, facilitado por essas novas técnicas, possibilita a investigação mais detalhada dos corpos humanos e o projeto mais adequado de equipamentos de proteção individual, mobiliário de escritório, laboratório e outras estações de trabalho, design de equipamentos e outros produtos com os quais as pessoas interagirão.

Os parâmetros aplicados nos métodos de avaliação comparativa das tecnologias de escaneamento 3D aplicadas em antropometria e ergonomia aqui apresentados devem anteceder pesquisas antropométricas tridimensionais e ergonômicas a fim de validar a escolha do equipamento utilizado.

Nesse estudo foram utilizados dois *scanners* de diferentes constituições: WBX, um sistema a laser, enquanto MHT, de luz estruturada. Além a viabilidade de acesso, a escolha por esses dois sistema se dá pela possibilidade de comparação de dois equipamentos bem diferentes. Enquanto o *scanner* Cyberware WBX é um sistema robusto, de difícil montagem, largamente utilizado em pesquisas antropométricas, o *scanner* Artec MHT é um sistema compacto e portátil, podendo

se tornar uma alternativa mais barata para estudos ergonômicos e antropométricos em termos de logística.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

-Oferecer métodos comparativos para escolha dos marcadores e equipamentos a serem utilizados em uma pesquisa antropométrica tridimensional da população brasileira.

1.2.2 Objetivos específicos

-Aferir a precisão da forma e de variáveis 1D obtidas por duas tecnologias de escaneamento 3D para o uso em estudos antropométricos e ergonômicos para embasar a ação projetual;

-Levantar dados como deformação da forma e densidade da malha poligonal obtida através de duas tecnologias de escaneamento 3D.

2 ANTROPOMETRIA

Antropometria é uma palavra derivada do grego, no qual *anthropos* significa homem, e *metrikos*, relacionado ou pertencente à medição. É o ramo das ciências humanas que trata das medidas do corpo humano, estabelecendo a geometria física, propriedades de massa e capacidades em termos de força do corpo humano. Também lida com a aplicação dos dados levantados nessa medição (ROEBUCK Jr., 1995).

A antropometria ajuda a avaliar as posturas e as distâncias para alcançar controles, especificar distâncias que separam o corpo de riscos, tais como equipamentos circundantes e identificar objetos ou elementos que delimitam o movimento do usuário. Também lida com a quantificação relacionada com a análise biomecânica de forças e torques durante o manuseio de ferramentas manuais; ajuste do operador em veículos e outros equipamentos; com o conforto, acomodação e desempenho humano em geral (ROEBUCK Jr., 1995).

Dados antropométricos podem ser medidas estáticas e/ou medidas dinâmicas do corpo humano que fornecem a *designers* características físicas, funcionais e relacionais do usuário. São, portanto, parâmetros importantes do processo de desenvolvimento de *design*. O uso correto de dados antropométricos adequados tornam produtos e locais de trabalho ajustados a pessoas reais (e não o contrário). Com isso, as soluções de projeto passam a ser seguras e confortáveis (SIZING UP AUSTRALIA, 2009).

“A antropometria destina-se à aplicação de métodos científicos de medição dos seres humanos a fim de atender requisitos de projeto e auxiliar em seu desenvolvimento”. Com essa afirmação, Easterby *et al.* (1982, *apud* PASTURA, 2000) relaciona a antropometria à ergonomia, que estuda as características humanas para o projeto adequado do meio ambiente físico.

Por este motivo métodos antropométricos estão entre as ferramentas básicas de trabalho para execução de análise e desenvolvimento de projetos de *design*, engenharia e arquitetura, a fim de atender a requisitos de profissionais de ergonomia e fatores humanos (ROEBUCK Jr., 1995).

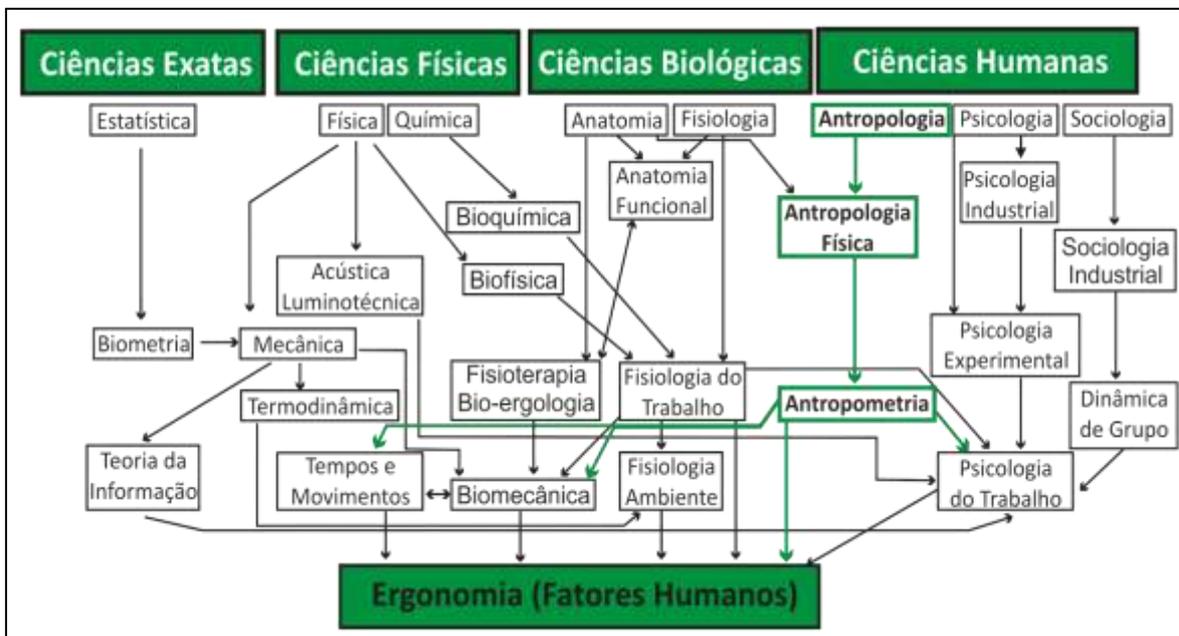
A antropometria tem ainda função multivariada na ergonomia, uma vez que pode influenciar a concepção de produtos, racionalização de ambientes e espaços,

elaboração e intervenção em postos de trabalho, estudos que tem como objetivo decifrar variações e diferenças físicas em grupos e populações distintas (FRANCO; SILVA, 2009).

Por meio da figura 01 é possível observar que os domínios da ergonomia de concepção e antropometria são sobrepostos, dependentes e intimamente ligados. A sobreposição entre a antropometria e o design, situada no ambiente de trabalho, faz com que o limite entre o dois seja indistinto (SIZING UP AUSTRALIA, 2009).

Por isso pode-se dizer que os dados antropométricos não se resumem ao tamanho e forma do corpo. Quando são recolhidos em várias posturas incluem informações adicionais como alcance máximo e, onde a posição dos olhos é demonstrada, pode ser relacionada com estudos de campo visual. Outros dados que definem as habilidades do usuário, tais como força, movimentação ou parâmetros psicológicos podem ser recolhidos para aplicações específicas e também são chamados de dados antropométricos (SIZING UP AUSTRALIA, 2009).

Figura 01 – Esquema gráfico sobre o posicionamento da antropometria dentro das ciências humanas.



Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia.

O dimensionamento incorreto da variável força, por exemplo, pode gerar limitação nas tarefas, tanto para usuários mais fortes, podendo provocar acionamentos acidentais, quanto para os mais fracos, que trabalharão com sobrecarga de seus sistemas ósteo-musculares, sob risco de lesão, ou

simplesmente de não conseguir realizar a atividade (PHEASANT, 1996; MITAL; KUMAR, 1998 *apud* RAZZA; PASCHOARELLI, 2009).

Desta forma, é possível perceber a importância da obtenção e aplicação de dados antropométricos aliados a dados biomecânicos: adequando produtos e postos de trabalho às características, não apenas, físicas de seus usuários. Dados biomecânicos suprem a necessidade em projetar produtos, embalagens e equipamentos tendo em mãos parâmetros da força muscular (como por exemplo, tração, compressão e torque) envolvida na ação. Para desempenhar muitas atividades da vida diária, a preensão é aliada à aplicação de força muscular, permitindo a manipulação de objetos e a realização de tarefas cotidianas (PASTURA, 2000; RAZZA; PASCHOARELLI, 2009).

Analisando toda a variedade de dados possíveis a serem obtidos e/ou combinados em pesquisas antropométricas, é possível afirmar que recolher dados antropométricos não é uma tarefa fácil, uma vez que não basta ter régua, trena e balança. Quando se objetiva a ter medidas confiáveis de uma população, as condições em que essas medidas são realizadas (com ou sem roupas, com ou sem calçados, ereto ou em postura relaxada) influem no resultado (IIDA, 1997 *apud* FRANCO; SILVA, 2009).

Para mostrar o estágio em que se encontra atualmente a pesquisa em antropometria, é preciso discorrer antes sobre sua trajetória evolutiva. A seguir, serão elucidadas questões contemporâneas acerca da antropometria, com pontos relativos à antropometria tradicional e finalmente, referentes à antropometria tridimensional, objeto de estudo desta dissertação.

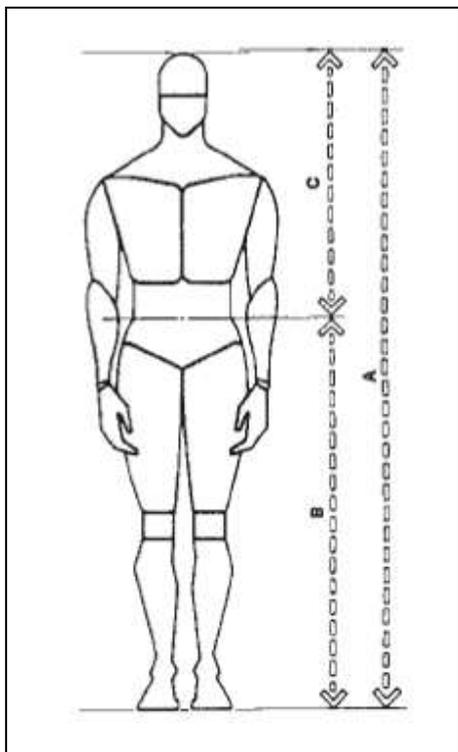
2.1 Histórico

O histórico apresentado a seguir tem como objetivo apresentar alguns dos fatores que contribuíram para o aperfeiçoamento da antropometria como hoje é conhecida. O interesse pela morfologia do corpo humano, suas medidas e proporções por filósofos, artistas, teóricos e arquitetos remonta muitos séculos.

Uma das primeiras tentativas de tratar as dimensões e proporções do corpo humano foi na Antiguidade, com a Seção Áurea, criada por Euclides, 300 a.C.. Nela

há observações envolvendo o corpo humano (figura 02), mais precisamente as distâncias do umbigo até a sola do pé, do umbigo até o ponto mais alto da cabeça e a altura total (BOUERI FILHO, 2008).

Figura 02 – Proporções do corpo humano definidas pela Seção Áurea.



Fonte: Boueri Filho, 2008.

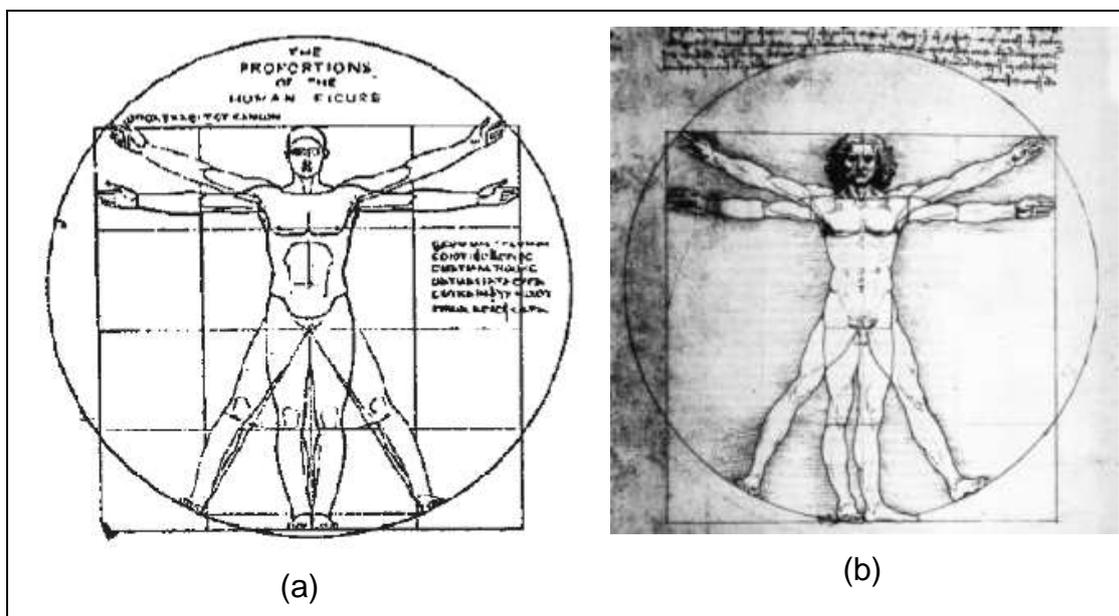
Vitruvio, que viveu em Roma, no século I a.C., escreveu um tratado de arquitetura no qual estudou e descreveu as proporções do corpo humano masculino (figura 03a). No entanto não estava interessado somente nas proporções do corpo, como também em suas implicações metrológicas (PANERO; ZELNIK, s/d).

Com a revelação de um grande número de diferentes grupos étnicos decorrentes das viagens de Marco Polo (1273-1295), estudos de registro foram iniciados na antropologia física e mais tarde, no séc. XVIII por Linné, Buffon e White, em estudos de antropologia racial, onde eram pesquisadas as diferenças nas proporções corporais de vários grupos étnicos (ROEBUCK, 1975 *apud* AÑEZ, 2000).

Leonardo da Vinci (1452-1519), por sua vez, baseou-se nos estudos de Vitruvio para desenhar seu Homem Vitruviano de 1487 (figura 03b): uma figura masculina disposta em duas posições simultaneamente, inscritas em um círculo e um quadrado. Esse desenho é um exemplo em como as proporções humanas

interessavam a objetivos não somente artísticos, mas também científicos (DISCOVERY, 2013).

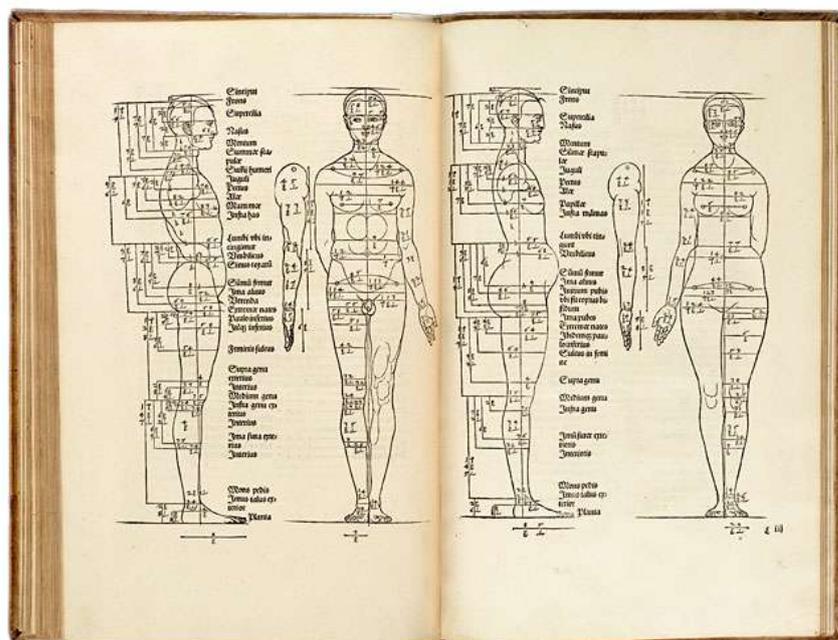
Figura 03 – (a) Reconstrução da figura humana desenhada por Vitruvius, feita no século XIX por Gibson e Bonini; (b) Homem Vitruviano de Leonardo da Vinci.



Fonte: Boueri Filho, 2008.

Outros artistas continuaram a ter um papel de liderança no início da antropometria, uma vez que passaram parte de suas carreiras estudando, medindo e catalogando a figura humana a fim de melhorar suas pinturas e esculturas. Albrecht Dürer (1471-1528) produziu os Quatro Livros da Proporção Humana (figura 04), o qual muitos pesquisadores em antropometria consideram como o ponto de partida da antropometria (SIZECHINA, s/d).

Figura 04 – Imagem contida em um exemplar de Os quatro livros da proporção humana, obra de Albrecht Dürer.



Fonte: The Morgan Library & Museum¹

A mais de 200 anos atrás, a antropologia física começou a ser utilizada numa tentativa de distinguir em grupos étnicos, indivíduos criminosos. Na época acreditava-se que havia uma relação entre criminalidade e anomalias anatômicas. A ideia de descrever os traços morfológicos que distinguem um determinado grupo de outro, através de mensurações detalhadas da cabeça e dos ossos, tornou-se uma possibilidade para compreender não só as origens do homem, mas o próprio homem. No final dos anos 1800, no entanto, esse pensamento era contestado no interior da comunidade científica. (MADUREIRA, 2003).

Foi por volta do final do século XIX que surgiu o termo 'antropometria'. É creditada ao estatístico belga Quetelet a fundação da ciência e a invenção do próprio termo com a publicação em 1870 da sua obra *Antropometrie* que constitui a primeira pesquisa antropométrica em grande escala (ROEBUCK, 1975 *apud* AÑEZ, 2000).

Entre o final do século XIX e o início do século XX houve um crescimento no interesse do estudo detalhado dos seres humanos e dos esqueletos dos

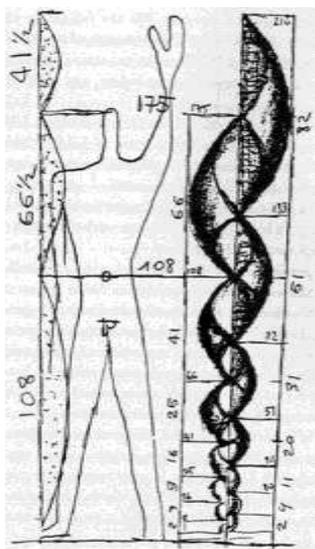
¹ Disponível em: <<http://www.themorgan.org/collections/collectionsEnlarge.asp?id=577>>. Acesso em 27 mar. 2013.

homens primitivos. Nessa época, nos Estados Unidos, as atividades em antropometria estavam dirigidas à comparação entre as muitas relíquias do homem antigo em relação às dimensões corporais do homem moderno e em relação às diferenças antropométricas observadas entre os cidadãos americanos de diversas origens raciais e étnicas (ROEBUCK *et al.*, 1975 *apud* PASTURA, 2000, p.07).

Na primeira metade do século XX, até a década de 40, as medidas antropométricas visavam determinar apenas as grandezas médias da população, como pesos e estaturas médias (IIDA, 2002). A partir de 1940, deu-se uma importância às medidas antropométricas, provocada, em parte, pela produção em massa, uma vez que um produto mal dimensionado pode gerar elevação dos custos: a preocupação então passou a ser os alcances dos movimentos funcionais e suas variações. Também havia uma preocupação crescente com o surgimento dos sistemas de trabalho complexos onde o desempenho humano é crítico e o desenvolvimento desses sistemas depende de dimensões antropométricas compatíveis com as de seus operadores (IIDA, 1990).

Le Corbusier, em sua busca por aprimorar forma e função na arquitetura, criou, no ano de 1948, um desenho de proporções humana denominado *modulor* (figura 05) – um sistema de proporcionamento do espaço arquitetônico baseado neste critério geométrico. Le Corbusier buscava uma criação de arquitetura com um pensamento lógico, racional e disciplinador, buscando um traçado orientador do projeto (POSSEBON, 2004).

Figura 05 – O *Modulor*, de Le Corbusier.



Fonte: Internet

Foi no início do século XX a antropometria se tornou um ramo importante da antropologia. Entretanto, não havia uma padronização quanto ao método de medição e às variáveis antropométricas propriamente ditas. Dessa forma, as comparações entre os resultados tornavam-se difíceis (PASTURA, 2000).

Em abril de 1906, no Congresso Internacional de Antropologistas, realizado em Mônaco, foram padronizadas as 38 variáveis antropométricas do crânio e as 19 variáveis antropométricas da cabeça e da face. Em 1912, no mesmo Congresso, ocorrido em Genebra, foi estabelecida uma segunda padronização, dessa vez relativa a medidas do corpo, principalmente do esqueleto, excluindo-se as da cabeça. O *Lehrbuch der Anthropologie*, publicado por Martin, estabeleceu uma unificação das técnicas de medição a um nível bastante abrangente (PASTURA, 2000, p.08).

No entanto a antropometria, como é entendida atualmente, não pesquisa as medidas humanas por questões meramente proporcionais. A ênfase pela busca por uma integração das ciências biológicas com as necessidades de projeto foi colocada em evidência na Segunda Guerra Mundial, com o surgimento de toda uma nova série de problemas relacionando o homem, a máquina e o meio ambiente. Somados a problemas tais como a definição de medidas de vestuário para tropas do Exército, um grande número de acidentes em aeronaves de treinamento e operação apontaram para a necessidade dos estudos ergonômicos (AÑEZ, 2000; PASTURA, 2000).

Estudos antropológicos relacionando medidas corporais e ocupação (antropologia ocupacional) foram realizados nos Estados Unidos durante a Guerra Civil e as Primeira e Segunda Guerras Mundiais (Gould, 1869, Baxter, 1875; Davenport e Love, 1921; Serviço de Alistamento dos Estados Unidos, 1943; Hooton *et al.*, 1948; Hooton, 1949; Randall, 1947-1949; Randall e Baer, 1951, *apud* Roebuck *et al.*, 1975). Em 1882, Bertillon idealizou um sistema de 11 medidas corporais para o estabelecimento da identidade visual de criminosos (ROEBUCK *et al.*, 1975 *apud* PASTURA, 2000, p.07).

Após a Segunda Guerra Mundial, empresas comerciais e as forças armadas prosseguiram seus estudos sobre as medidas do corpo humano e sobre os requisitos para o projeto de espaços de trabalho, bem como sobre os fatores fisiológicos e psicológicos nele envolvidos. Hooton pesquisou 3867 homens e mulheres em estações de trem de Boston e Chicago para obter medidas para o assento dos trens. Estudos similares foram realizados na *Harvard School of Public Health*, no final da década de 1940, de modo a melhorar a segurança no uso de equipamentos. Pesquisas antropométricas foram realizadas também com motoristas de caminhões, de ônibus e de automóveis. Nessas pesquisas mais de 300 motoristas de ônibus e de caminhões foram medidos de modo a estabelecer

relações entre medidas como altura do assento, altura do nível dos olhos, alcance do braço e comprimento da perna e as dimensões internas dos veículos (ROEBUCK *et al.*, 1975 *apud* PASTURA, 2000).

2.2 Antropometria Tradicional

Tradicionalmente, os dados são coletados manualmente, utilizando ferramentas como fitas métricas e antropômetros. Normalmente, estas medidas levam mais de uma hora para coletar por indivíduo, tornando a coleta e a construção de bancos de dados muito caros. E os dados coletados majoritariamente são de natureza unidimensional. (SIZING UP AUSTRALIA, 2009).

Além de ser uma ciência em desenvolvimento, alguns aspectos sobre as principais questões da antropometria podem qualificá-la como uma ciência histórica uma vez que indivíduos e grupos de pessoas estão constantemente sob mudança. Pesquisas antropométricas nunca devem ser repetidas exatamente da mesma forma, ou com as mesmas pessoas, porque estas terão mudado. Essas mudanças são causadas por variações fisiológicas ou processos de envelhecimento, por este motivo as populações são identificadas por ano de medição, ocupação ou grupo étnico (ROEBUCK Jr., 1995).

O tipo de medidas a serem retiradas depende do propósito da pesquisa, seja para o *design* de postos de trabalhos e equipamentos, vestuário ou estudos de medicina do esporte. No entanto, o ideal é que sejam levadas em contas as medidas e posturas de pesquisas antropométricas confiáveis, uma vez que possibilitam a comparação entre pesquisas e previsões de tendências (ROEBUCK Jr., 1995).

Além disso, existem fatores que influenciam diretamente a retirada de medidas, podendo ser fonte de numerosos erros, como a postura adotada no momento da medição, identificação de pontos anatômicos, posição e orientação dos instrumentos e a pressão exercida pelo instrumento de medição (FAN; YU; HUNTER, 2000). Para esses autores é preciso tomar especial cuidado com três fatores:

- *Erro humano*, uma vez que a acurácia depende do toque e do julgamento visual do pesquisador;

- *Variação nas definições:* Existem muitas definições conflitantes em relação a medidas corporais. As diferenças na terminologia e nos métodos impactam significativamente nas medições, como é o caso do posicionamento da cintura, que pode causar diferenças no comprimento;
- *Tempo:* A coleta de dados antropométricos é um processo extremamente complexo que consome muito tempo, é caro e demanda pessoal qualificado.

Por isso, a medição tradicional (bem como a medição tridimensional), demanda conhecimento de anatomia, como locais, nomes e formas de ossos e músculos; compreensão de como ler escalas de medição, pesos e medidas; conhecimento no manuseio dos instrumentos e noções básicas dos princípios estatísticos. Para o planejamento de pesquisas de medição, a fim de se obter redução e análise de dados, e para previsão e estimativa, o planejamento também requer alguma experiência em se lidar com a organização do tempo e processos de forma efetiva e eficiente (ROEBUCK Jr., 1995).

Além de todo esse conhecimento, a prática da antropometria também requer do pesquisador noções de geometria. Medições tradicionais são muitas vezes consideradas como feitas em um plano e, como resultado, muitos pesquisadores referem-se às medidas como bidimensionais, quando na verdade eles não contêm informações sobre o plano e não são bidimensionais (ROBINETTE; DAANEN; ZEHNER, 2004).

Mesmo aplicando dados antropométricos em estudos ergonômicos, muitos ergonomistas não estão atentos ao fato de que os dados que utilizam são 1D. O fato de serem unidimensionais não os desqualifica em importância. No entanto sua aplicabilidade será mais restrita do que no uso de dados 2D ou 3D uma vez que, o projeto para posições mais complexas de trabalho, como operações de montagem em um espaço reduzido, normalmente requer o uso de várias dimensões. (MOLENBROEK; BRUIN, s/d; BRADTMILLER *et al.*, 2004).

Dados 1D são atraentes para serem utilizados uma vez que médias, estatísticas resumidas e percentis são fáceis de usar, mesmo que o acesso a esses dados muitas vezes seja restrito. São particularmente úteis na comparação de amostras de diferentes populações para determinar diferenças de tamanho e variações. Além disso, quando a solução de *design* demanda um único parâmetro,

dados 1D podem ser adequados para o uso - como por exemplo, para determinar a altura de uma porta, a altura da população usuária mais uma folga pode solucionar o problema (SIZING UP AUSTRALIA, 2009).

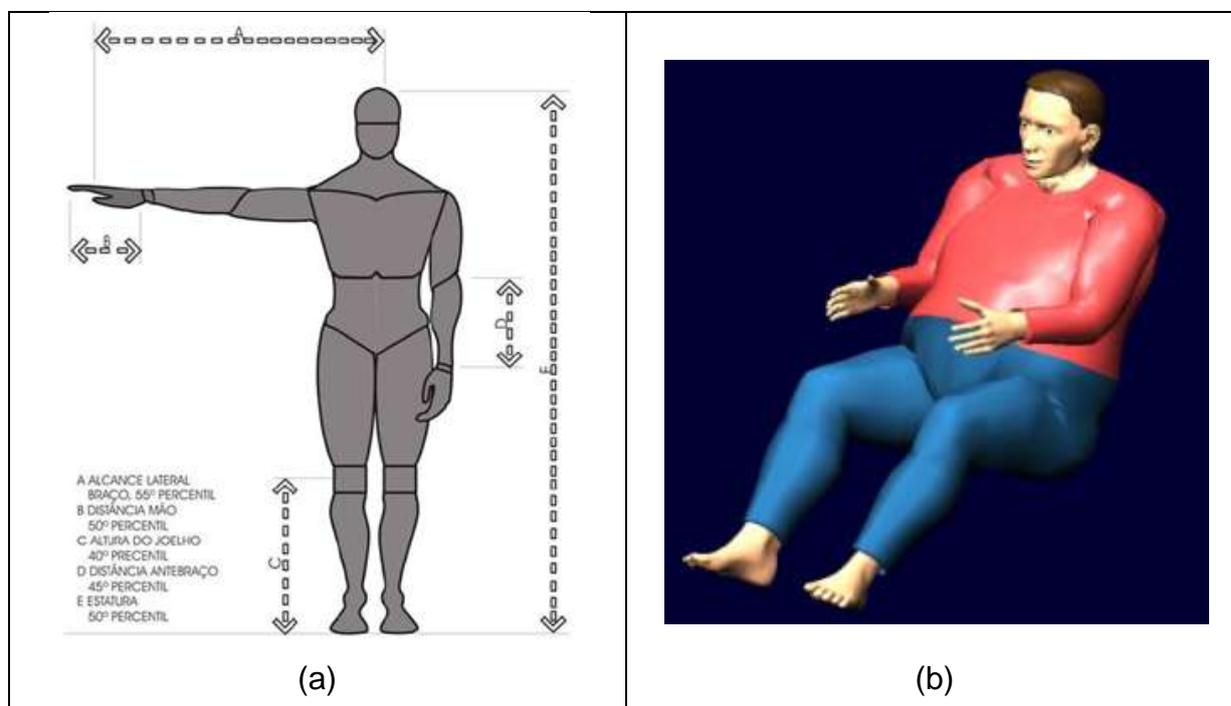
A aplicação deste tipo de dados normalmente é realizada em projetos de ajustabilidade: Por exemplo, para determinar a altura em que um painel de controle deva ser colocado de modo que 90% da população de usuários possa vê-lo e usá-lo facilmente e de forma segura, o *designer* procura tabelas antropométricas 1D e extrai as medidas estáticas de alcance do braço e altura dos olhos. As medidas dos percentis² 5% feminino e 95% masculino seriam inseridas no desenho do painel de controle. O *designer* então avalia se o painel pode ser visto e alcançado por esta porção da população adulta representada nos dados. No entanto, esta população presente nos dados antropométricos pode não representar a população de usuários do painel de controle avaliado no projeto (SIZING UP AUSTRALIA, 2009).

Esse tipo de design utiliza, como explicitado anteriormente, os percentis 5 feminino e 95 masculino. Em si essa já é uma designação incorreta, uma vez que ela implica o uso de uma mulher, da qual todas as dimensões pertinentes são de valores do percentil 5, bem como um homem, do qual todas as dimensões são do percentil 95 (BRADTMILLER, B. *et al.*, 2004).

De fato, os seres humanos não estão regularmente distribuídos no que se refere à dimensões do corpo (figura 06a). Por exemplo, uma pessoa com estatura de percentil 50 pode ter um alcance lateral do braço de percentil 55. Por esse motivo que atualmente as medidas 1D são utilizadas sem relações umas com as outras, contrariando como eram utilizadas nos percentis (PANERO *et al.*, 1983; MOLENBROEK; DE BRUIN, s/d).

² Medidas antropométricas geralmente seguem uma distribuição normal ou de Gauss. Essa distribuição é representada por dois parâmetros: a média e o desvio-padrão. Tradicionalmente, os limites antropométricos de um projeto eram apresentados em termos de percentis. Os percentis indicam a porcentagem de indivíduos da população que possuem uma medida antropométrica de um certo tamanho ou menor que este tamanho. Assim, em relação à qualquer uma das medidas antropométricas levantadas, a população é dividida em 100 categorias percentuais, que são posteriormente ordenadas, de menor para maior. Fonte: INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA. Ergokit – manual de aplicação dos dados antropométricos. Rio de Janeiro, v.01, p. 28. 1995.

Figura 06 – (a) Figura representando regiões do corpo com medidas de diferentes percentis; (b) Modelo 3D distorcido construído com dados 1D de um percentil 95 masculino.



Fonte Panero *et al.*, 1983; Robinette e McConville, 1982.

O erro na aplicação de dados 1D em percentis se repete em modelos humanos 3D. Modelos humanos digitais comercializados como Ramsis, Jack e Safework são construídos utilizando dados 1D, o que não os caracterizam como indivíduos com medidas reais (figura 06b). Isso significa que, mesmo que sejam divulgados como fonte de dados 3D, não o são. Esses modelos tentam caracterizar humanos utilizando uma variedade de dados agregados e simulam superfícies a partir desses dados (ROBINETTE; McCONVILLE, 1982 *apud* SIZING UP AUSTRALIA, 2009).

2.3 Antropometria Tridimensional

Nas últimas décadas tem ocorrido um desenvolvimento considerável na pesquisa e aplicação de dados antropométricos. Foram desenvolvidas técnicas compreendendo projeto assistido por computador (CAD – *computer aided design*) para auxílio ao projeto de produtos/postos de trabalho

utilizando dados antropométricos e biomecânicos e de simulação de padrões de movimento humano (PASTURA, 2000).

A evolução das técnicas de modelagem 3D foi acompanhada pela evolução paralela de novas tecnologias de medição. Algumas delas são lasers, luz estruturada, estereoscopia por vídeo, ressonância magnética, tomografia computadorizada, visualização ultrassônica e novos métodos de medição de movimento. Conceitos e objetivos da imagiologia estão mudando e em muitos casos estão se misturando com os da antropometria (ROEBUCK Jr., 1995).

Desde 1990 pesquisas antropométricas tem sido realizadas ao redor do mundo, a fim de arquivar as dimensões do corpo humano utilizando *scanners* 3D. A tecnologia de escaneamento 3D ofereceu pela primeira vez a oportunidade de construir imagens virtuais tridimensionais de pessoas sendo medidas e a possibilidade de arquivamento dessas imagens para uso subsequente. Esses dados representam um recurso básico de informações detalhadas da geometria humana, que podem ser utilizados para vários fins (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005).

Como foi dito anteriormente no capítulo sobre antropometria tradicional, o uso dos dados está restrito a objetivos específicos para os quais as medidas foram retiradas. Existem duas grandes áreas: medidas que são utilizadas para calcular tamanhos de roupas e modelos humanos virtuais que são utilizados para projetos com fins ergonômicos, como por exemplo, construção de veículos etc. No primeiro caso são utilizadas somente as medidas de interesse, enquanto no segundo, a prioridade é a utilização da geometria 3D do corpo humano (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005).

Há muitas razões para o uso da antropometria tridimensional. Em estudos ergonômicos envolvendo exposição a produtos químicos, o escaneamento 3D pode facilitar cálculos de exposição ou absorção de substâncias nocivas através da pele. Calcular a área de superfície dos trabalhadores individualmente e derivar médias estatísticas em termos de região, pessoa, gênero e idade é de grande importância (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005).

Outros dados como medições de circunferências, comprimento ou volume do corpo só podem fornecer informações indiretas, uma vez que os dados obtidos via pesquisas antropométricas possuem restrições quanto à área de superfície da cabeça e extremidades, como dedos dos pés. O cabelo ou a touca utilizada em algumas pesquisas afetam o cálculo da área, assim como a superfície 3D completa

de dedos dos pés e das mãos são difíceis, por causa de regiões oclusas. O cálculo dessas áreas só pode ser realizado aproximadamente (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005).

Embora os dados aumentem em complexidade de 1D para 3D, cada forma de dados tem seu uso em projeto e também cada uma contém vantagens e desvantagens. A necessidade de se estabelecer relações espaciais tridimensionais é uma característica da aplicação da antropometria ao projeto de produtos, postos e ambientes de trabalho. Os projetistas devem conhecer não somente o tamanho das partes do corpo, mas, também, como as pessoas se posicionam e atuam nas suas atividades de trabalho. No entanto ainda faltam ferramentas de projeto e modelos humanos tridimensionais disponíveis no mercado brasileiro para serem aplicados em projetos (SIZING UP AUSTRALIA, 2009; PASTURA, 2000, MOLENBROEK; DE BRUIN, s/d).

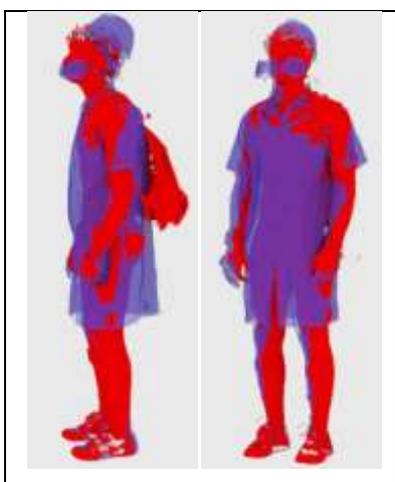
Além dessas aplicações há uma grande variabilidade na aplicação de dados antropométricos tridimensionais. Outra aplicação para os *scans* 3D envolvendo a morfologia do corpo é na área de perícia criminal, através da identificação de pegadas (figuras 07 e 08). A polícia da cidade de Zhoukou, localizada na província chinesa de Henan em parceria com a Universidade de Tecnologia de Beijing e a empresa Beijing Coase Instrument, criaram um sistema de reconhecimento de pegadas utilizando scanners 3D (ARTEC 3D, 2012).

O reconhecimento através do escaneamento funciona uma vez que as pegadas de cada pessoa são únicas, já que a pressão exercida por cada região dos pés contra o chão deixam uma topografia única na superfície. Assim, é possível comparar tanto as pegadas de pés descalços quanto aquelas deixadas utilizando sapatos (ARTEC 3D, 2012).

possível uma visualização completa sem a presença do indivíduo: a tecnologia de escaneamento 3D disponibiliza dados chamados de *digital twin* (gêmeo digital), no qual é possível retirar dados antropométricos sem a presença física do entrevistado (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005).

Além das informações 3D que podem ser derivadas a partir de um único *scan* 3D, a comparação de dois ou mais *scans* oferece informações sobre objetos com mobilidade, ajuste de vestuário e especificações de design durante o processo de concepção. A capacidade de sobrepor *scans* (figura 09) e calcular suas diferenças pode auxiliar o *designer* na simulação de equipamentos que poderão ser implantados no interior de indivíduos, em cirurgias médicas; como também avaliações de equipamentos e/ou vestuário utilizados por diferentes entre pessoas (ROBINETTE; DAANEN; ZEHNER, 2004).

Figura 09 – Comparação do volume ocupado por um scan sem equipamento de proteção individual (EPI - em vermelho) e um scan do mesmo indivíduo com EPI (em roxo).

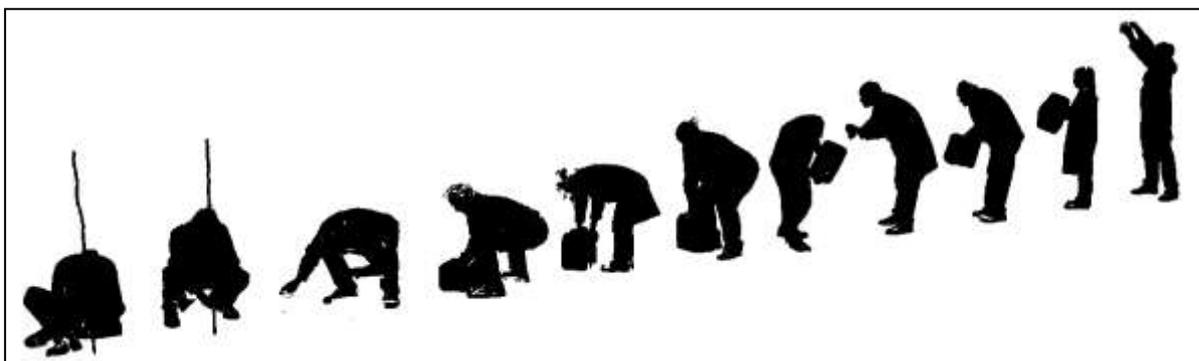


Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia.

Por meio dos *scans* em posturas funcionais é possível a visualização de parâmetros adicionais ao projeto como cálculo do volume, área de superfície e curvatura. Esses cálculos são relevantes para o *design* de postos de trabalho e produtos: o volume ocupado pelo funcionário ao realizar determinadas tarefas (figura 18) ou a modificação da postura para se adequar a alguma influência externa, como o realizado por usuários de transportes públicos, que abrem as pernas a fim de manter o equilíbrio, entre outros exemplos (SIZING UP AUSTRALIA, 2009).

Muitas dessas posturas não são previstas nos modelos humanos virtuais comercializados, uma vez que existe uma grande variabilidade de posturas adotadas para uma mesma ação. Cada indivíduo tem sua própria característica cinemática e postural, que lhes são inerentes. Além do que, cada medida do nosso corpo influencia a maneira com a qual nos movimentamos. Como os indivíduos não possuem todas as medidas corporais iguais (somente 7% da população é mediana em duas dimensões; 3% em três dimensões e menos de 2% em quatro dimensões), cada um terá uma marcha³ própria (GREEN; GUAN, 2003 *apud* CHAMBERLAIN, 2009)

Figura 18 – Exemplos de posturas funcionais adotadas em laboratório.



Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia.

A utilização de *scans* 3D da população usuária em projetos ergonômicos também mostra-se vantajosa para a análise ergonômica do trabalho (AET), uma vez que alguns problemas de adequação apontados em entrevista e observações em campo podem ser visualizados e corrigidos nas maquetes virtuais dos produtos/postos de trabalho analisados (BATISTA; PEREIRA, 2013).

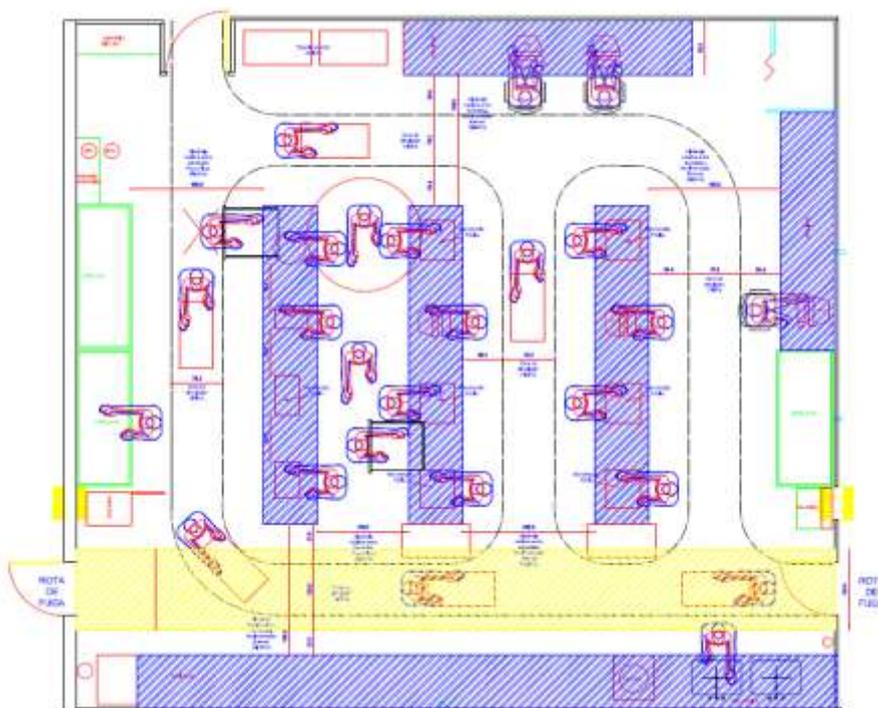
A presença de um corpo tridimensional em uma simulação de projeto dá um sentido mais visual e, ao mesmo, faz com que os dados sejam mais fáceis de serem interpretados pelos diferentes atores de projeto. Isso facilita a comunicação não só entre os designers e engenheiros, mas também com todos os envolvidos no projeto,

³ É o ato de deambular. Maneira ou estilo de andar (MARTINS, F. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABDTEAD/cinesiologia-biomecanica-ii-postura-marcha>>. Acesso em: 19 ago. 2013.

ainda que não tenham familiaridade com a visualização de plantas e desenhos técnicos (figuras 11, 12 e 13) (ROBINETTE; DAANEN; ZEHNER, 2004).

Uma planta baixa representada bidimensionalmente exclui profissionais que poderiam contribuir para a eficiência e efetividade do projeto. Muitas vezes as pessoas que trabalham, e/ou para quem o projeto está sendo adequado, não tem vivência na visualização de projetos arquitetônicos, o que pode dificultar a validação do estudo (ROBINETTE; DAANEN; ZEHNER, 2004; BATISTA; PEREIRA, 2013).

Figura 11 – Exemplo de planta baixa 2D de um laboratório químico, com modelos humanos 2D inseridos.



Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia.

Figura 12 – Exemplo de maquete virtual de um laboratório químico, com modelos humanos 3D inseridos.



Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia.

Figura 13 – Exemplo de maquete virtual de um laboratório químico, com modelos humanos 3D inseridos.



Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia.

No entanto, a evolução do uso dos *scans* 3D e da tecnologia (hardware e software) se mostra inevitável, a fim de adicionar ao projeto outras variáveis como dados biomecânicos e cinemáticos, possibilitando movimentação aos modelos humanos e conseqüentemente, simulações dinâmicas do trabalho. Com a união desses dados será possível estabelecer outras recomendações para o projeto

ergonômico como estudos de deslocamento de pessoas, rotas de fuga, etc. (BATISTA, PEREIRA, 2013).

O escaneamento tridimensional ou medição da superfície é capaz de capturar outros tipos de medidas que os equipamentos tradicionais não conseguem, como volume de segmento do corpo, área de superfície, centro de volume ou gravidade e momentos de inércia. Esses tipos de medidas são necessárias para avaliações biomecânicas e modelagem. (ROBINETTE; DAANEN; ZEHNER, 2004).

A antropometria 3D é também benéfica em estudos de postura e movimento. Esses estudos, por sua vez, são dependentes de informações sobre localização e forma, nos quais é importante determinar e obter o posicionamento relativo de pontos homólogos, chamados de *landmarks* (ou marcadores, ver figuras 14 e 15) A fim de obter informações precisas e confiáveis, é preciso tomar cuidado especial no posicionamento desses *landmarks*, uma vez que essa marcação envolve o reconhecimento palpatório de pontos anatômicos – o que exige operadores experientes. Tanto o posicionamento manual quanto o automático requerem atenção e treinamento da equipe responsável (JONES; RIOUX, 1997, *apud* ROBINETTE; DAANEN; ZEHNER, 2004).

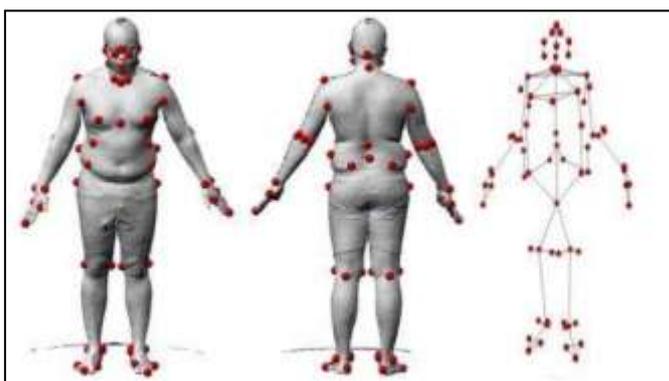
Muitas medições tradicionais por sua definição dão a impressão de que a localização dos *landmarks* ou forma da medição está identificada quando na verdade essa informação não está contida na medição. O que não é sempre explicitado na descrição da medição é que na ausência do indivíduo a localização do ponto original não pode ser vista ou determinada, tudo que é deixado é um número. Com a medição 3D a localização dos pontos em relação uns aos outros é inerente à medição no indivíduo (ROBINETTE; DAANEN; ZEHNER, 2004).

Dekker (*et al.*, 2001 *apud* CHANG; WUHRER; PENGCHENG, s/d) na tentativa de localizar *landmarks* automaticamente, definiu uma série de regras para o posicionamento de cada marcador baseando-se nas propriedades da superfície no local, como curvaturas ou distâncias para certos aspectos dos pontos. Localizar esses *landmarks*, então, torna-se um problema de classificação, uma vez que nessa abordagem as regras baseiam-se em observações intuitivas. Há variações de pessoa para pessoa e sempre há exceções – transformando as regras cada vez mais numerosas.

Essa área ainda necessita de pesquisas a fim de criar algoritmos mais robustos e eficientes. O processamento da antropometria tridimensional requer

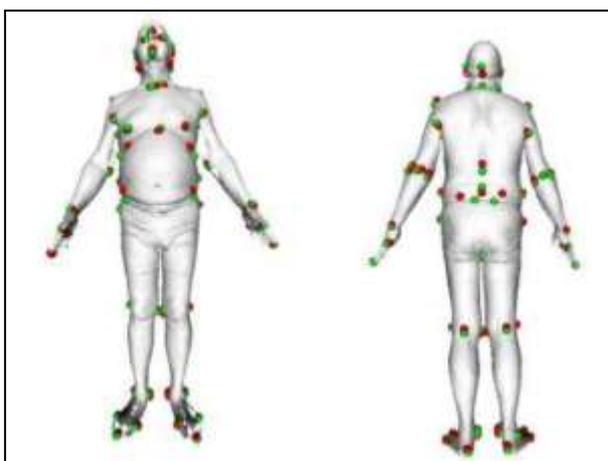
técnicas especiais para o processamento de geometria da malha já que as mudanças na forma humana dificultam o reconhecimento automatizado de pontos anatômicos, gerando erros e falta de acurácia para a retirada de medidas (CHANG; WUHRER; PENGCHENG, s/d).

Figura 14 – Marcadores representados por esferas vermelhas sobre o scan 3D e um gráfico de marcadores.



Fonte: Chang Shu, Stefanie Wuhrrer e Pencheng Xi.

Figura 15 – Resultado de posicionamento automático de marcadores. As esferas verdes indicam marcadores automatizados e as esferas vermelhas, marcadores posicionados por operadores.

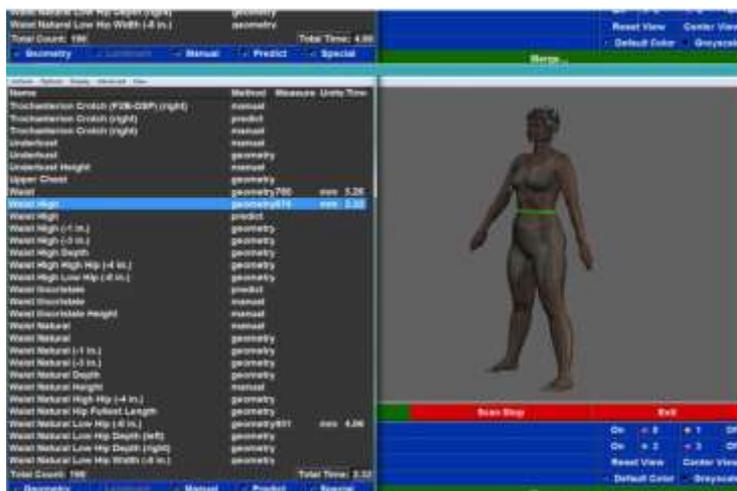


Fonte: Chang Shu. Stefanie Wuhrrer e Pencheng Xi.

Outro problema recorrente na retirada virtual de medidas é a impossibilidade de reconhecer algumas medidas. Mesmo podendo calcular uma gama de medidas adicionais, na antropometria tridimensional há a necessidade de obtenção de algumas medidas através de equipamentos tradicionais. *Softwares* de localização

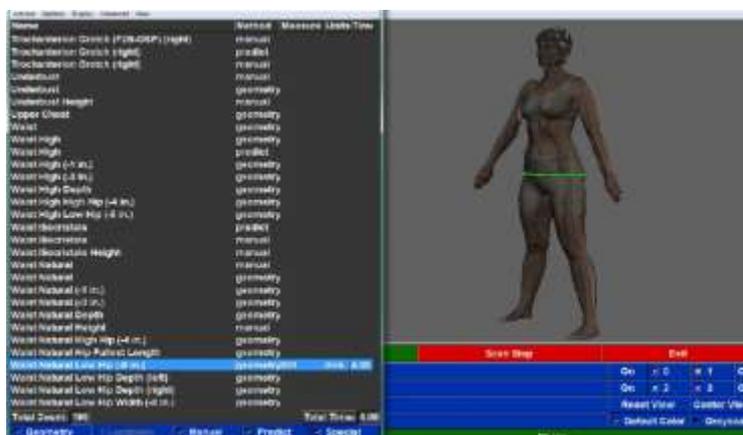
automática para fazer medidas como as realizadas por fitas métricas que seguem o contorno do corpo (como circunferências e arcos – figuras 16 e 17) foram apontadas diversas vezes como não confiáveis (ROBINETTE; DAANEN, 2003).

Figura 16 – Exemplo de extração automática de medida da cintura alta.



Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia.

Figura 17 – Exemplo de extração automática de medida da cintura baixa.



Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia.

Os algoritmos até então desenvolvidos para emular uma fita métrica e a maneira como se comportam na superfície do corpo escaneado não é precisa. Somente medidas de distância diretas tiradas entre pontos anatômicos, como também entre pontos e superfícies rígidas (como o chão ou uma cadeira) foram determinadas como serem equivalentes ou melhor do que a acurácia de medições tradicionais (PERKINS *et al.*, 2000 *apud* ROBINETTE; DAANEN, 2003).

O trabalho com dados tridimensionais ainda se mostra desafiador, uma vez que requer novas habilidades e conhecimentos, bem como novas pesquisas para minimizar os erros. Pesquisas antropométricas tridimensionais e a mensuração virtual normalmente demandam que o usuário tenha conhecimento em *softwares* específicos (SIZING UP AUSTRALIA, 2009).

É importante para a equipe entender e minimizar todos os possíveis erros, tanto humano quanto das ferramentas utilizadas. De acordo com Suzuki (2000) além do posicionamento dos marcadores, outros itens (ver tabela 01) devem ser considerados na busca de minimizar erros na antropometria tridimensional, sendo os mais comuns:

- Movimentação do corpo e respiração durante o processo de escaneamento;
- Indicação dos marcadores;
- Reflexo do *laser* na superfície do corpo, preocupando-se com áreas oclusas e regiões de reflexo, como cabelo.

Tabela 01 - Possíveis erros em antropometria

Fator		Dado	Mensuração Tradicional 1D	Mensuração derivada de escaneamento		
				Mensuração 1D	Marcadores	Superfície
Ferramenta	Acurácia do <i>hardware</i>	Acurácia do instrumento				
			Acurácia do <i>hardware</i> do <i>scanner</i>			
	Desempenho do <i>software</i>		Software de aplicar marcadores			
			Software de cálculo de medidas			
Humano	Habilidades do mensurador	Habilidades em posicionar os marcadores				
		Habilidade na medição				
	Habilidades do operador		Software de aplicar marcadores			
			Software de cálculo de medidas			
	Voluntário escaneado	Repetição da postura				
		Oscilação do corpo				

Fonte: Suzuki, 2000.

Por este motivo, os métodos de avaliação comparativa das tecnologias de escaneamento 3D aplicadas em antropometria e ergonomia aqui apresentados avaliam a acurácia do hardware dos *scanners* e devem anteceder pesquisas antropométricas tridimensionais e ergonômicas a fim de validar a escolha do equipamento utilizado e minimizar possíveis erros.

2.3.1 Pesquisas antropométricas tridimensionais

A ideia do escaneamento de um corpo para o computador foi considerada um grande avanço uma vez que iria economizar tempo. Parte das medidas do corpo poderiam ser retiradas automaticamente, por meio de *softwares* específicos. Qualquer medida que não fosse tirada no momento da digitalização poderia ser analisada retrospectivamente interrogando o banco de dados. Além disso, possibilitou estudos de variação de tamanho e forma corporal através de mapas de polígonos ou contornos (SIZING UP AUSTRALIA, 2009; YU, 2004).

Mesmo podendo calcular uma gama de medidas adicionais, na antropometria tridimensional há a necessidade de obtenção de algumas medidas através de equipamentos tradicionais. Por este motivo, a pesquisa CAESAR incluiu 40 medidas tiradas com antropômetros e fita métrica, e 59 medidas por ponto a ponto ou ponto a superfície que eram calculadas a partir de pontos nos *scans* 3D obtidos. Isso demonstra que a utilização de tecnologias tridimensionais não exclui a utilização da antropometria tradicional em pesquisas antropométricas contemporâneas. Na verdade, uma técnica complementa as falhas da outra – e a utilização de ambas disponibiliza dados menos suscetíveis a erros (ROBINETTE; DAANEN, 2003).

Até 2005 havia pelo menos 40 mil registros de dados de sete pesquisas antropométricas 3D que haviam sido divulgadas mundialmente (tabela 02). Mesmo que três *scanners* diferentes tenham sido utilizados, todos os dados escaneados se baseavam em nuvem de pontos 3D, diferindo entre si somente na densidade de pontos e na formatação dos dados (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005).

Tabela 02 – Lista de pesquisas antropométricas 3D realizadas ao redor do mundo.

	País	Projeto	Ano de término	Scanner	Tipo de dado disponível
1	Alemanha	Bra Project	1999	Vitus Pro	Corpo inteiro
2	Estados Unidos	CAESAR	2000	Cyberware WB4	Corpo inteiro
3	Holanda	CAESAR	2000	Vitus Pro	Corpo inteiro
4	Itália	CAESAR	2002	Cyberware WB4	Corpo inteiro
5	Inglaterra	Size UK ⁴	2002	TC ²	Corpo, excluindo pés, mãos e cabeça
6	Alemanha	Project Elderly Women	2002	Vitus Smart	Corpo inteiro
7	Alemanha	E-Taylor	2001	Vitus Smart	Corpo inteiro
8	França	Sizing Survey	2006	Vitus Smart	Corpo inteiro
9	Estados Unidos	Size USA	2003	TC ²	Corpo, excluindo pés, mãos e cabeça
10	Suécia	Sizing Survey	2005	Vitus Smart	Corpo inteiro
11	China	Size China	2006	Cyberware 3030	Cabeça
12	Austrália	SHARP Dummies National Size and Shape Survey	2004	Hamamatsu Bodyline Scanner	-
13	Coréia	Size Korea	2004	-	Corpo inteiro
14	Japão ⁵	Japanese Body Size Data	1994	Voxelan laser 3D body scanner	-
15	África do Sul	African body dimensions (ABD)	2004	-	-

⁴ Website: <http://www.sizemic.eu/products-and-services/size-survey-data.html>

⁵ Website: <http://www.hql.jp/project/size1992>

16	Taiwan (China)	-	2000	Faroarm	-
17	Espanha	Size Spain	2008	Vitus	Corpo Inteiro
18	China	Women's Size Survey	2004	TC ² e Voxelan 3D laser scanner	Busto
	País	Projeto	Ano de término	Scanner	Tipo de dado disponível

3 TAXONOMIA DAS TECNOLOGIAS DE CAPTURA DA FORMA 3D

Tanto a evolução tecnológica quanto a melhoria da qualidade das imagens tridimensionais causaram um recente aumento do consumo de produtos eletrônicos 3D, como televisões, monitores de vídeo, máquinas filmadoras, entre outros. Muitas pesquisas nas áreas Médica, de Design ou Engenharia eram constantemente inviabilizadas devido a limitações tecnológicas e computacionais, como capacidade de memória ou velocidade de processamento (CARVALHO *et al.*, 2005).

Hoje, a aquisição de computadores pessoais com placas de vídeo de alto desempenho, mais de um núcleo de processamento e memória infinitamente maior é muito mais acessível do que no passado. Isso possibilita avanços nos estudos que demandam grande carga de processamento, como análises com dados 3D. Assim como a tecnologia de processamento, a captura (escaneamento) de formas 3D está muito mais ágil, havendo várias maneiras para obtê-la, a preços cada vez mais acessíveis (BELLOCCHIO; FERRARI, 2012).

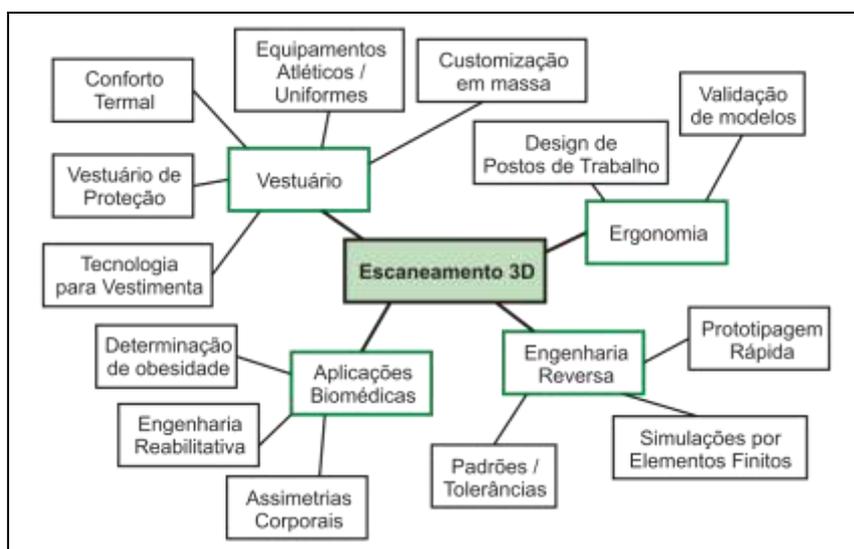
O escaneamento 3D possibilita uma gama infinita de aplicações (figura 19), sendo que cada tipo de tecnologia tem sua aplicação mais apropriada. Muitas empresas utilizam tecnologias de captura 3D para criar rapidamente modelos virtuais de peças que não possuem arquivos digitais; escanear grandes áreas a céu aberto como prédios ou topografia; praticar a engenharia reversa; inspecionar a qualidade de produtos ao comparar peças prontas com seus respectivos arquivos CAD; auxiliar a construção de próteses e órteses; avaliar produtos destinados a portadores de necessidades especiais.

A indústria de entretenimento se utiliza de modelos reais para construção dos personagens digitais, que são utilizados em filmes, jogos e em pesquisas de realidade virtual. A arqueologia, que atualmente carece de modelos digitais 3D para melhor detalhamento do objeto real estudado:

A visualização das peças em três dimensões e em diferentes posições, aliada à possibilidade de observar cortes em diferentes planos ao longo da estrutura óssea, trouxe mudanças significativas nos estudos em bioarqueologia humana, os quais passaram a explorar virtualmente o interior dos ossos e de estruturas (RODRIGUES-CARVALHO, 2009, p. 35).

Além da capacidade do modelo digital ser disponibilizado em museus digitais, ele poderia ser replicável por meio de prototipagem rápida e disponibilizado em diversos centros de estudos.

Figura 19 – Esquema com possíveis usos dos *scanners* 3D.



Fonte: Terry Lerch, Maureen McGillivray e Tanya Domina.

Associado a esta vasta área de atuação há uma grande variedade de equipamentos que pode ser designada de scanners tridimensionais, uma vez que possibilitam capturar a forma espacial de um objeto ou indivíduo, gerando uma malha poligonal (*poligonal meshes*) ou nuvem de pontos (*point cloud*).

Dentre todas as técnicas mostradas a seguir, a escolha de uma delas envolve uma análise das qualidades e limitações de cada uma, tais como resolução e precisão do dado adquirido. É de fundamental importância conhecer a aplicação dada ao produto gerado para decidir o *software* e o *hardware* mais adequados (CARVALHO et al., 2005).

Além do fato da existência de diferentes processos de escaneamento tridimensional, baseados em distintas formas de obtenção da imagem, há também o detalhe de que algumas tecnologias são ideais para curto alcance, enquanto outras se saem melhor com distâncias focais maiores. Seu uso vai depender quais objetivos se pretende alcançar.

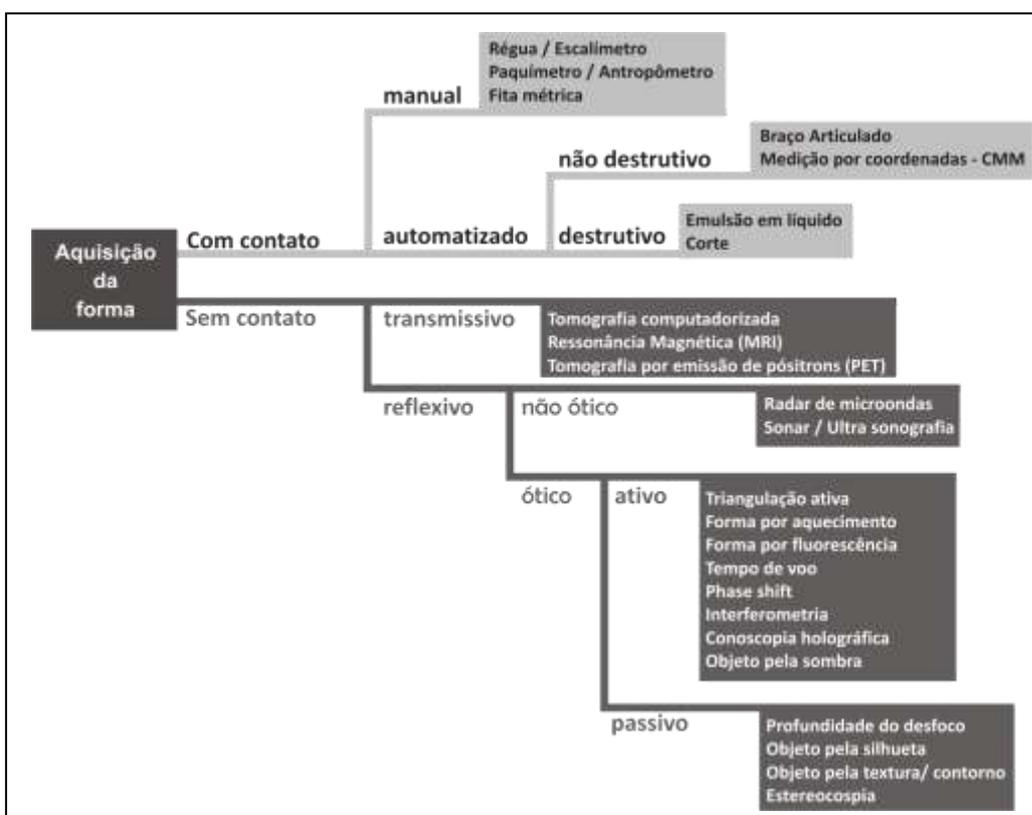
Os processos de digitalização 3D podem ser categorizados de duas formas distintas, de acordo com a técnica utilizada ou de acordo com sua distância de ação.

No que se refere à distância de ação, podem ser grupadas em distâncias curtas, médias, longas e muito longas. Nesse trabalho será abordada a classificação de acordo com a técnica utilizada pelo equipamento, apresentada anteriormente por Bellocchio e Ferrari (2012) no capítulo '3D Scanner, State of the Art', com uma técnica adicional e versões atualizadas de equipamentos citados.

3.1 Agrupamento de acordo com a técnica utilizada

Uma classificação das técnicas de aquisição da geometria física de objetos é sumarizada na figura 20, na qual as técnicas de aquisição da geometria de um objeto são divididas inicialmente em dois grandes grupos, de scanners com contato ou sem contato.

Figura 20 – Taxonomia proposta das tecnologias de digitalização 3D.



Métodos com contato recuperam a forma 3D do objeto a partir do toque físico em cada coordenada do mesmo. São métodos normalmente lentos, que podem modificar ou destruir o artefato original, mas que possuem grande acurácia e resultados bem precisos (BELLOCCHIO, 2010).

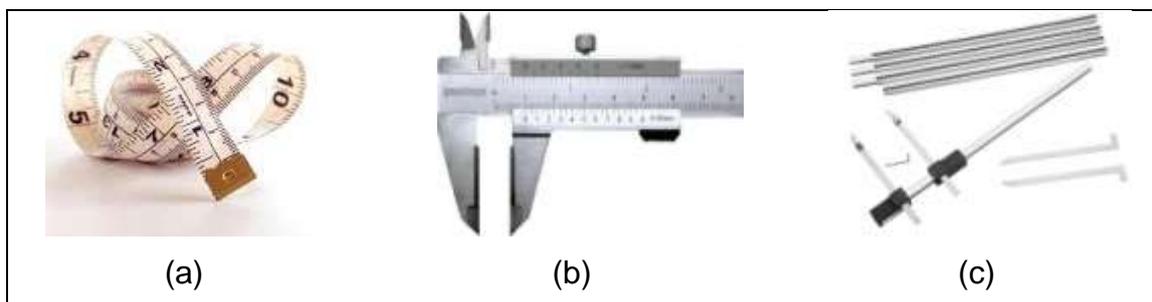
As técnicas sem contato, como o nome já diz, não precisam tocar o objeto para obter sua forma espacial. Esses métodos são os mais utilizados, pois existem na forma de uma extensa gama de equipamentos, cujo funcionamento varia de acordo com a forma de irradiação emitida, que pode variar entre laser, luz branca ou ondas de radiofrequência (BELLOCCHIO, 2010).

3.1.1 Métodos com contato

Os aparelhos que necessitam de contato com o objeto pesquisado são subdivididos em dois tipos: manuais ou automatizados. Os equipamentos que fazem parte do método com contato manual são os mais acessíveis de todos os que serão citados a seguir, com exceção talvez dos antropômetros. Esses equipamentos são bem precisos e exigem pouco conhecimento para retirar medidas, no entanto requerem muita habilidade de modelagem 3D já que todas as medidas retiradas através do equipamento devem ser inseridas no modelo virtual gerado (BATISTA; STREIT; FREITAS, 2013).

Equipamentos como réguas, paquímetros (figura 21b) e fitas métricas (figura 21a) dispensam uma definição, dada sua popularidade. O menos conhecido desse grupo é o antropômetro (figura 21c), largamente utilizado em pesquisas antropométricas, para retirar medidas do corpo humano. O antropômetro é um equipamento muito semelhante a um paquímetro, ambos retiram medidas de forma semelhante, sendo que o antropômetro pode retirar medidas maiores.

Figura 21 – Exemplos de equipamentos tradicionais para construir a forma 3D; (a) fita métrica, (b) paquímetro, (c) antropômetro



Fonte: Internet

Os métodos automatizados, por sua vez, são divididos em técnicas destrutivas ou não destrutivas. Como exemplo de equipamentos não-destrutivos pode-se citar os braços articulados (figura 22) e máquinas de medição por coordenadas - CMM (figura 21). Os braços articulados são modelos de scanners utilizam sondas mecânicas para capturar dados físicos do objeto e possuem braços que captam as coordenadas X, Y e Z.

São equipamentos compostos por uma cadeia de juntas articuladas com uma sonda como terminal. As coordenadas 3D originárias da sonda resultam das rotações e translações operadas por cada junta. Assim como nas CMM, as coordenadas são computadas através da posição de componentes mecânicos, que são normalmente sensíveis a variações de temperatura e umidade (BELLOCCHIO; FERRARI, 2012).

Figura 22 – Exemplo de captura a partir de braço articulado.



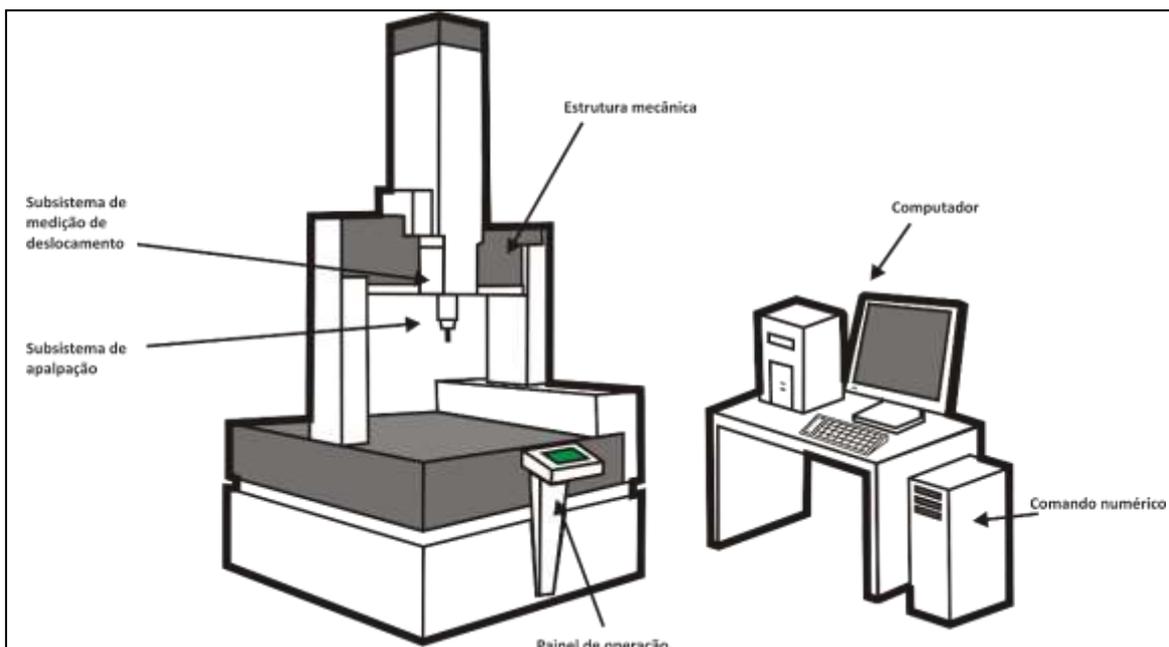
Fonte: Internet

Nas máquinas de medição por coordenadas (CMM), a posição da sonda é controlada por vários codificadores presentes ao longo de cada eixo da máquina. Cada um desses eixos coordenados contém um sistema de medição de deslocamento. Tais equipamentos baseiam-se no princípio da metrologia por coordenadas, que é a medição ponto-a-ponto de uma peça através de apalpação de superfícies relevantes e a avaliação numérica das coordenadas medidas pelo equipamento de processamento de dados para formar uma geometria espacial completa da peça (WÄLDELE; TRAPET, 1993, *apud* KLEN, 2000).

De acordo com Klen (2000, p. 5), os principais componentes de uma CMM são:

- A estrutura mecânica: guias, mancais, eixos coordenados (cada um com sistema de medição de deslocamentos - escalas);
- O Subsistema de apalpação: cabeçote apalpador, apalpadores (com o apalpador para medir nos eixos coordenados X, Y e Z);
- Painel de operação: teclado de funções, manches (*joystick*) - para atuação direta do operador da CMM;
- A unidade de controle: que comanda os movimentos da CMM em seus comandos de posicionamento dentro de seu volume de trabalho;
- Equipamentos periféricos: impressora, plotadora - para representar os resultados de medição;
- Computador e Software: para calcular as dimensões da peça pelas coordenadas dos pontos apalpados.

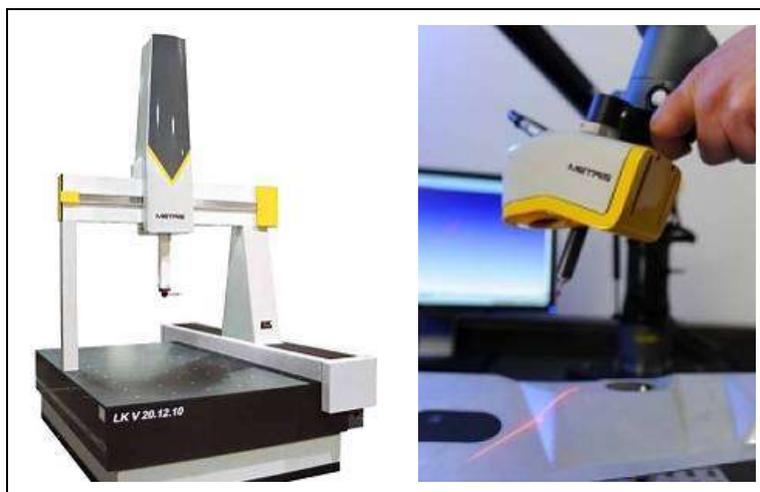
Figura 23 – Componentes principais de uma CMM.



Fonte: Klen, 2000.

Atualmente, estão disponíveis no mercado Máquinas de CMM sem contato, que contêm componentes mais modernos do que as máquinas descritas por Klen, citado anteriormente. Um exemplo é a CMM LK da Nikon Metrology NV (figura 24), que mede as coordenadas por meio de escaneamento a laser.

Figura 24 – Exemplo de máquina de medição por coordenadas (CMM),



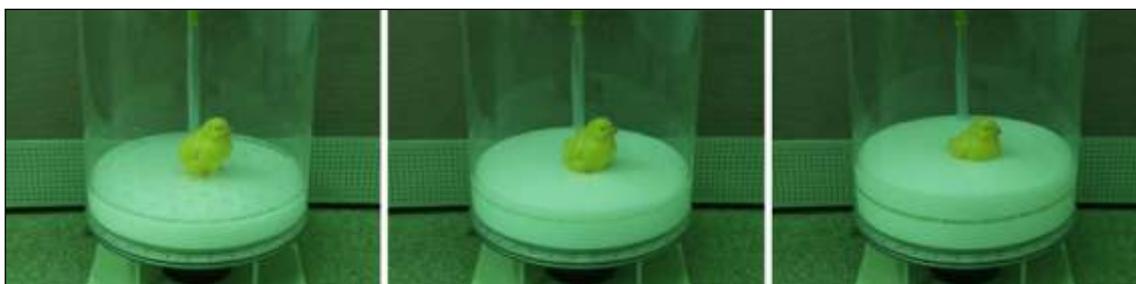
Fonte: Nikon Metrology NV.

Já a técnica destrutiva de corte, mais conhecida como *slicing* (ou fatiamento, em português), é um processo no qual uma sequência de fotos de um objeto são retiradas de um ponto fixo. Finas camadas do objeto são removidas entre cada imagem. A distância ao objeto é controlada precisamente, portanto a escala de cada imagem é conhecida. Após cortar em camadas todo o objeto, as imagens são processadas resultando em um modelo 3D do objeto (3DSCANCO, 2012).

Outra forma de fatiar um objeto é conhecida como escaneamento por imersão em líquido, mostrada nas figuras 06 e 08. É uma técnica muito experimental, com resultados de malha poligonal sem muitos detalhes e é inspirada em métodos correlativos de escaneamento por camadas. Captura o modelo 3D baseando-se na digitalização da seção transversal da superfície do objeto (figura 25). São utilizadas múltiplas projeções 2D de curvas 3D paralelas a fim de recuperar as curvas de níveis do objeto, como visto na figura 26. A superfície 3D é obtida combinando as diversas curvas ou contornos 3D (WANG; LIANG; LIN, 2007).

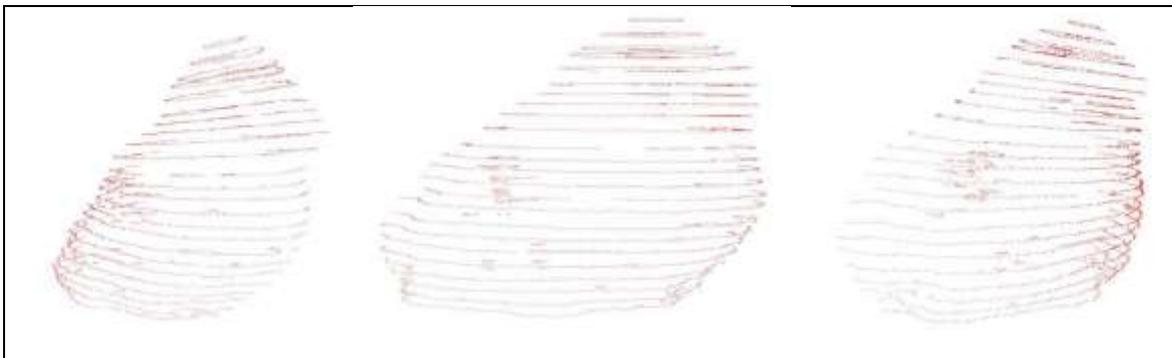
Percebe-se que a reconstrução com imersão em líquidos apresenta certa semelhança com a técnica de aquisição de contornos ou silhuetas das imagens. Trata-se de um conceito baseado num misto entre as técnicas de modelagem artesanal e o fatiamento com base em ultrassom. Neste procedimento, o objeto real a ser reconstruído é inserido em um recipiente o qual é ocupado lentamente por um líquido de coloração diferente do objeto, suficiente para gerar um contraste visual identificável por equipamentos de aquisição fotográfica. Em diversos testes estudados, o líquido mais comum utilizado é o leite (CAMARGO, 2008).

Figura 25 - Escaneamento através do aumento do nível de água.



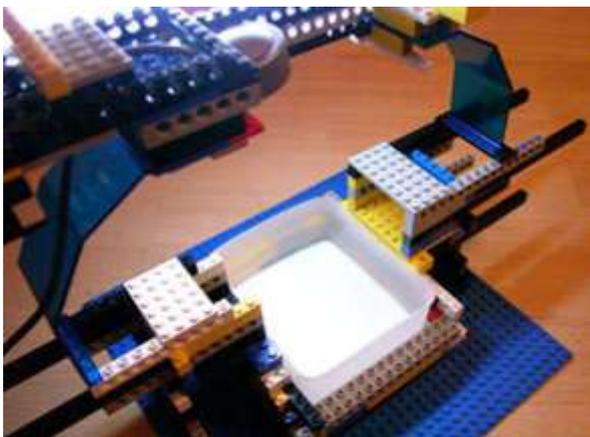
Fonte: Wang; Liang; Lin, 2007.

Figura 26 – Resultado do escaneamento por imersão em líquido.



Fonte: Wang; Liang; Lin, 2007.

Figura 27 – Protótipo de *scanner* por emulsão em líquido.



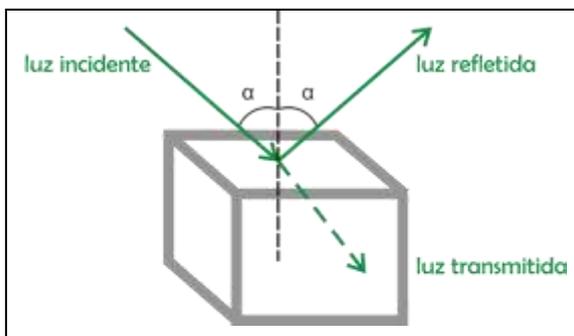
Fonte: Camargo, 2008.

3.1.2 Métodos sem contato

Já os equipamentos sem contato se subdividem de acordo com o comportamento do espectro emitido (laser, luz branca ou rádio frequência) que pode ser transmissivo ou reflexivo (figura 28). De acordo com a Lei da Reflexão, uma onda refletida sempre sai da superfície de um material num ângulo igual ao da onda incidente que atingiu a superfície, ou seja, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. No processo de transmissão a energia de uma onda de luz incidente corresponde à frequência natural de vibração dos elétrons em um material. A onda de luz penetra profundamente no material e provoca pequenas

vibrações nos elétrons, que as transmitem para os átomos do material (FREUDENRICH, 2012).

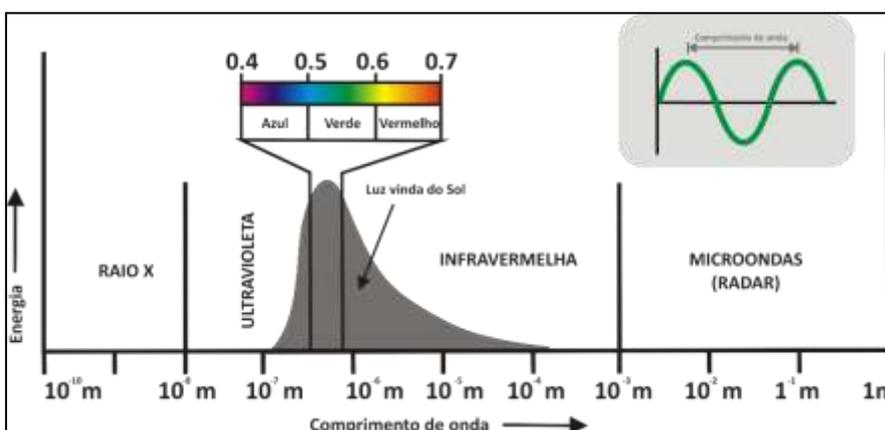
Figura 28 - Desenho ilustrando a reflexão de um raio de luz, ao atingir uma superfície lisa.



É importante esclarecer que a luz visível é somente uma pequena parte do espectro eletromagnético, uma escala que varia desde a alta energia, com raios gama de comprimento de ondas curtos, até a baixa energia, com ondas de rádio com comprimento de onda longo (figura 29). Outras frações substanciais de energia solar incidente são sob a forma de ultravioleta invisível e radiação infravermelha (SMITH, 2012).

Além da luz branca, outros tipos de espectro eletromagnético são utilizados em técnicas para obtenção da forma tridimensional, como o laser, luz infravermelha, entre outros. Essa variabilidade de técnicas será comentada a seguir.

Figura 29 – Representação gráfica das faixas de frequências do espectro eletromagnético.



Adaptado de Smith, 2012.

3.1.2.1 Métodos sem contato / transmissivo

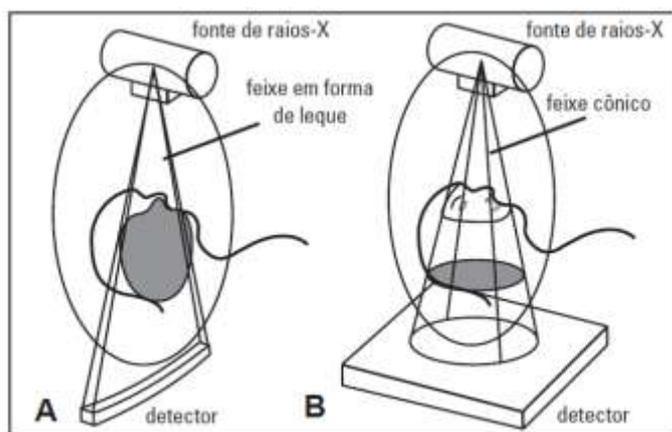
Métodos sem contato transmissivos são muito populares na área médica, e são utilizados também em testes de reconstrução 3D de metais, minerais, polímeros, etc. Quatro equipamentos servem como exemplo desse método, como Tomografia computadorizada (Computed Tomography – CT), Ressonância Magnética (Magnetic Resonance Imaging – MRI), Tomografia por Emissão de Pósitrons (Positron Emission Tomography - PET) e, mais recentemente, Ultrassonografia Tridimensional.

A tomografia computadorizada (CT) que, na paleontologia permite a visualização de estruturas inseridas nos ossos, a qual, pelos métodos tradicionais, implicaria na parcial destruição do material fóssil, produz imagens bidimensionais e tridimensionais virtuais (WERNER; SANTOS; FONTES, 2009). Ao contrário das radiografias convencionais que disponibilizam imagens achatadas em um único plano, a CT mostra imagens em fatias do corpo humano, através de cortes tomográficos (figura12).

Exibe imagens tomográficas finas de tecidos e conteúdo corporal, representando reconstruções matemáticas assistidas por computador, constituindo-se em um aparelho de raios X muito mais complexo que o convencional. Seus princípios físicos baseiam-se na quantidade de radiação absorvida por cada parte do corpo, ou seja, tecidos de diferentes composições absorvem a radiação X de forma distinta (WERNER; SANTOS; FONTES, 2009).

A CT mostra imagens em fatias do corpo humano nas três dimensões (figura 31), ao contrário das radiografias convencionais que disponibilizam imagens bidimensionais. Atualmente existem dois tipos: a tomografia computadorizada tradicional e a tomografia computadorizada de feixe cônico, que tem em comum somente o fato de utilizarem raios x (figura 30).

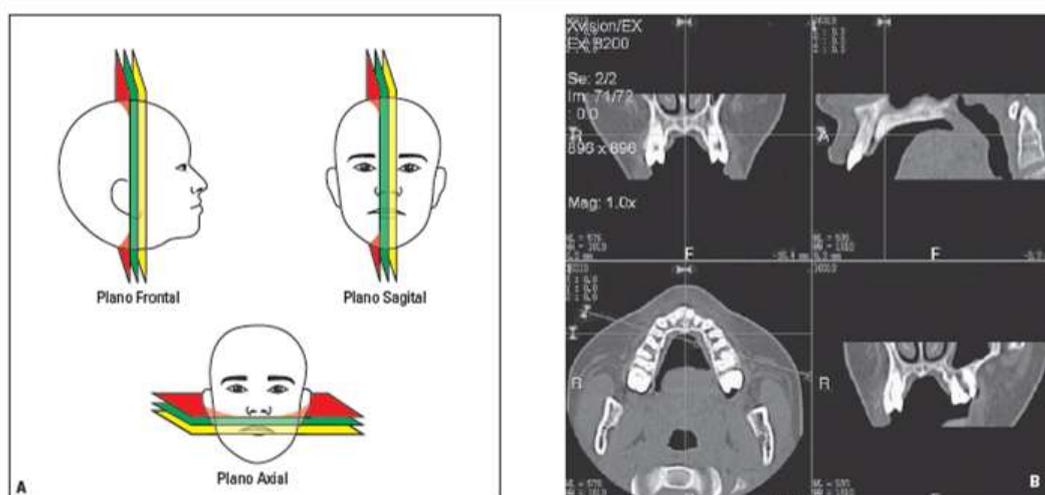
Figura 30 – Comparação gráfica do tomógrafo tradicional (A) e do tomógrafo de feixe cônico (B) com a fonte e o detector de raios x.



Fonte: Garib *et al.*, 2007.

Na CT tradicional, a fonte de raios X emite um feixe estreito (colimado) em forma de leque, direcionado a um anel com diversos detectores. Durante o exame, no interior do *gantry* (interior no qual se localizam o tubo de raios X e um anel de detectores de radiação), o tubo de raios X gira dentro do anel estacionário de receptores. Os sinais recebidos pelos detectores dependem da absorção dos tecidos atravessados pelo feixe radiográfico e são registrados e processados matematicamente no computador (GARIB *et al.*, 2007).

Figura 31 – Reconstrução multiplanar: A) Desenho Esquemático de cortes nos três planos do espaço; B) Exemplo de reconstrução multiplanar em TC tradicional.

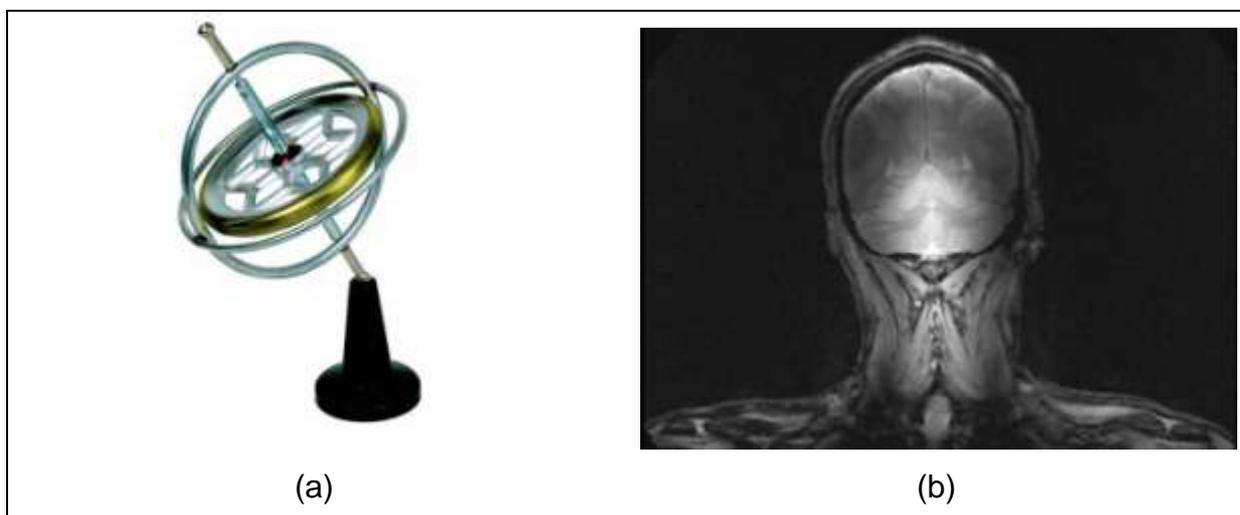


Fonte: Garib *et al.*, 2007.

A Ressonância magnética (em inglês, *Magnetic Resonance Imaging* – MRI), também chamada de Tomografia computadorizada 3D, obtém os scans através da agitação de átomos de hidrogênio presentes na água, que compõe o corpo. São emitidas ondas de rádio e o campo magnético criado pelo aparelho provoca essa movimentação do hidrogênio, que liberam sinais para um detector.

Na ressonância magnética, basicamente o que é observado são os prótons de água, já que são as espécies químicas dominantes que podem ser observadas. Para explicar o conceito da MRI convencional, será utilizado como analogia um giroscópio (figura 32). Num experimento com MRI, primeiramente os prótons da água são agitados com a imposição de um campo magnético forte. Isso é similar a iniciar a rotação de milhões de giroscópios simultaneamente, que começarão a mudar seus eixos de rotação (precessão). Esse fenômeno de precessão dos prótons da água produz sinais elétricos na MRI. Em uma imagem padrão de densidade de prótons, o contraste visual é determinado pela concentração de água, ou o número de giroscópios na analogia dada. Portanto, quanto mais água presente em uma região, mais clara ela irá aparecer (MORI; BARKER, 1999).

Figura 32 – (a) Giroscópio; (b) Imagem de ressonância obtida de cabeça e torso.



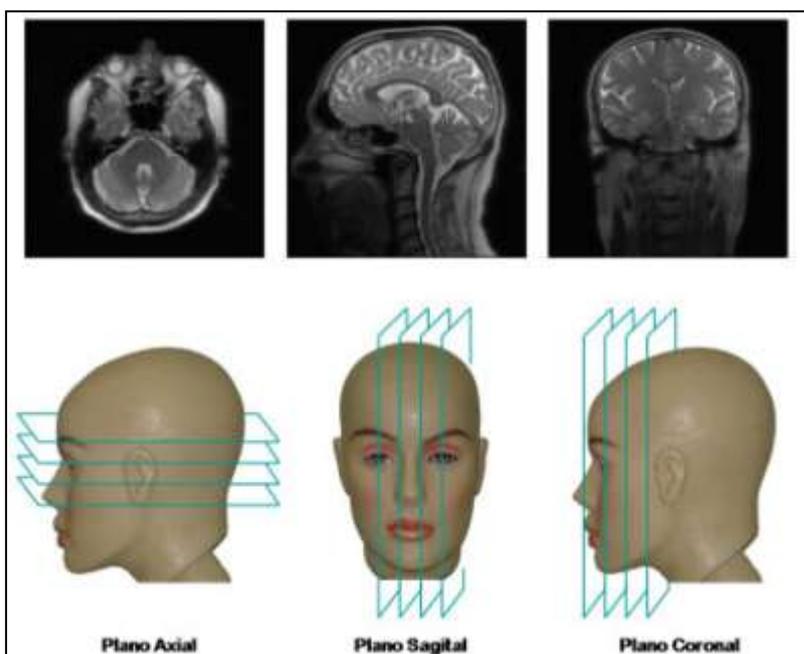
Fonte: David Brunner e Klaas Pruessmann

Um dos componentes mais importantes em um sistema de MRI é o sistema responsável por gerar o campo magnético estático. Além do campo estático, utilizam-se campos com intensidade variável de intensidade bem inferior, são os chamados gradientes magnéticos. Existem várias bobinas que, em conjunto, geram

gradientes magnéticos que variam linearmente ao longo dos eixos X, Y e Z. O gradiente X altera a intensidade do campo magnético ao longo do eixo X do magneto (eixo horizontal à superfície do objeto). O gradiente Y altera a intensidade do campo magnético ao longo do eixo Y (eixo vertical em relação ao objeto). O gradiente Z altera linearmente a intensidade do campo magnético ao longo do eixo Z do magneto (paralelo ao eixo longitudinal do objeto). Os eixos formam entre si um ângulo de 90 graus (planos ortogonais) (SANCHES, 2009).

A alteração dos três gradientes magnéticos permite a escolha do plano tomográfico e a orientação das fatias. O gradiente altera a intensidade do campo e, por conseguinte, a frequência de precessão ao longo do seu eixo. O gradiente Z é o responsável pela seleção dos cortes axiais, o gradiente X pela seleção dos cortes sagitais e o gradiente Y pela seleção dos cortes coronais (figura 33) (SANCHES, 2009).

Figura 33 – Exemplos de imagens de MRI da cabeça nos planos axial, sagital e coronal, e representações dos planos em um manequim.



Fonte: Sanches, 2009.

A tomografia por emissão de pósitrons (PET), por sua vez, demonstra a função biológica de órgãos do corpo, enquanto a CT fornece informação sobre a anatomia do corpo, tais como, o tamanho, a forma e a posição. Hoje em dia, é

frequente a combinação de exames envolvendo PET e CT do mesmo órgão (SANCHES, 2009).

A PET produz imagens tridimensionais e tomográficas da distribuição no organismo de radioisótopos emissores de pósitrons. O diferencial da PET, em relação aos outros métodos utilizados em medicina nuclear, é a possibilidade de usar marcadores radioativos que fazem parte dos compostos orgânicos (como glicose, por exemplo), permitindo, assim, estudos metabólicos do organismo (BOMBARDA, 2002).

3.1.2.2 Métodos sem contato / reflexivos

O processo sem contato/reflexivo, por sua vez, tem um campo de atuação muito vasto, sendo utilizado por serviços de resgate, médicos, ambientalistas, etc. Esse método se desmembra em tecnologias não óticas ou óticas, referindo-se ao uso ou não de lentes. Ao contrário dos métodos transmissivos, no qual as partículas emitidas atravessam o objeto a fim de reproduzir tridimensionalmente seu interior, as técnicas reflexivas somente reconstroem virtualmente a estrutura geométrica externa do objeto.

3.1.2.2.1 Métodos sem contato / reflexivos / não óticos

Aparelhos que fazem uso de microondas e sonares para capturar a forma, não precisam de lentes para isso, portanto são classificados como não óticos. De acordo com Smith (2012), os radares de microondas “irradiam a superfície escaneada com microondas, para depois medir a energia refletida difusamente de volta ao sensor”.

Os radares fazem uso de microondas eletromagnéticas e, tanto eles quanto os aparelhos de ultrassom, baseiam-se no princípio de medir o tempo de voo da radiação emitida: a partir do tempo requerido pela onda para alcançar o objeto e

retornar ao sistema, sendo conhecida a velocidade da radiação utilizada, é possível estimar a distância percorrida pela radiação (BELLOCCHIO; FERRARI, 2012).

Os radares de microondas são muito utilizados de maneira remota, o que significa que a forma de captar as informações é à longa distância (figura 34), utilizando sensores que não fazem contato físico com o objeto estudado. Esses *scanners* tem uma grande profundidade de campo, acima de 400 Km, e podem realizar reconstruções através de penetração no solo (figura 35). São sistemas caros e com baixa acurácia. São utilizados em métodos que detectam e medem energia eletromagnética, incluindo a luz visível, sendo muito utilizados em mapas planimétricos, previsões meteorológicas e na coleta de informações de inteligência militar (SMITH, 2012; BELLOCCHIO, 2010).

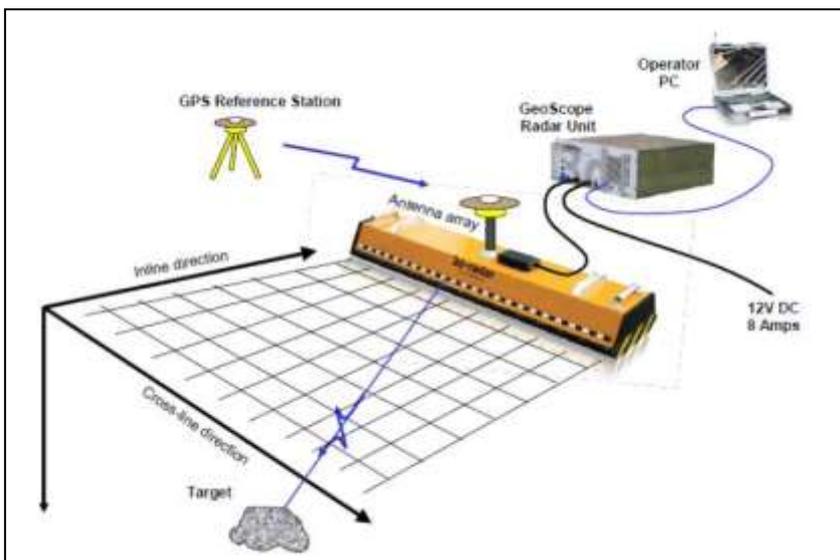
O sistema de radar de imagem utiliza uma antena para transmitir energia de microondas para baixo e para o lado da trajetória de voo. Quando o feixe de energia liberada atinge o solo, a energia é espalhada em várias direções, e a antena do radar recebe e mede a intensidade da energia que é dispersa de volta para os sensores. Uma superfície que é lisa e plana (um lago ou como estrada) irá refletir quase toda a energia incidente, por isso aparecem escuras em uma imagem de radar. Uma superfície desregular, com saliências, dispersa mais a energia de volta ao sensor, por isso aparecem claras (SMITH, 2012).

Figura 34 – Um radar dirige o feixe de energia para baixo e para os lados, construindo uma imagem linha por linha.



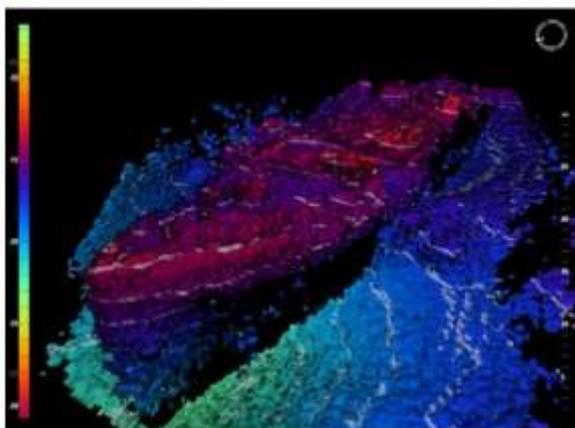
Adaptado de Smith, 2012.

Figura 35 – Sistema de radar de penetração no solo.



Fonte: Francesco Bellocchio, 2010

Figura 36 – Imagem adquirida por um sistema de sonar.



Fonte: Francesco Bellocchio, 2010.

A forma de processamento de um sonar ou ultrassonografia, no entanto, é realizada através de geração de imagens por meio da emissão de ondas sonoras de alta frequência e seu retorno (eco). A máquina calcula a distância através da velocidade do som emitido e o tempo de retorno de cada pulso sonoro, formando a representação 3D do objeto. A ultrassonografia é um método de imagem amplamente empregado nos dias atuais. O método baseia-se na utilização de ondas sonoras com frequências acima das audíveis pelo ser humano (WERNER; SANTOS; FONTES, 2009).

O ultrassom é definido como qualquer onda sonora com frequência maior que 20 kHz, que é o limite audível pelo ser humano. Abaixo desta frequência os sinais são denominados por infra-sons e acima desta gama por ultrassons. Os ultrassons são uma forma de energia cinética, sem transmissão de matéria associada, que se propaga no meio com o formato de uma vibração mecânica (KALACHE, 2007).

Os ultrassons são produzidos, transmitidos e recebidos por transdutores, que é um sistema que transforma uma forma de energia em outra forma, para fins de medidas. O transdutor utilizado na ultrassonografia é o transdutor piezoelétrico, elaborado a partir de cristais naturais denominados cristais piezoelétricos. Os cristais piezoelétricos têm a capacidade de converter energia elétrica em energia mecânica e vice-versa, atuando como receptores, ou como emissores de ultrassons. De uma forma resumida, quando é aplicado um sinal elétrico ao quartzo, o cristal vibra e conseqüentemente envia uma onda acústica. (KALACHE, 2007).

Como o ultrassom se dispersa facilmente quando está em contato com o ar, durante a realização do exame clínico é sempre utilizado um gel entre o transdutor e a pele, a fim de conduzir a elevada transmissão do sinal. O scanner processa os pulsos elétricos emitidos por cada estrutura do corpo (que propagam as ondas de ultrassom recebidas de forma distinta) transformando-os numa imagem digital (BELLOCCHIO, 2010).

3.1.2.2.2 Métodos sem contato / reflexivos / óticos

Os processos de digitalização 3D sem contato/reflexivo/ótico atualmente são divididos em outros dois grupos: sensores ativos ou passivos. Métodos ativos usam luz, textura e padrões projetados no artefato original a fim de obter sua forma geométrica. Processos óticos passivos não emitem nenhum tipo de energia ou espectro no objeto, e usam fotografias ou vídeos para construir a malha poligonal.

3.1.2.2.2.1 Métodos sem contato / reflexivos / óticos / passivos

Esses métodos utilizam parâmetros como foco, textura, movimento, estereoscopia ou sombras para obter dados 3D de profundidade. São bem populares, pois utilizam ambientes de escaneamento relativamente simples, com equipamentos comuns do dia a dia, como câmeras fotográficas. Para extrair as informações 3D são utilizadas um grupo de imagens calibradas previamente. Inclui técnicas de fotogrametria (figura 37) como profundidade do desfoco, forma pela textura, objeto pela silhueta e estereoscopia (estéreo).

A fotogrametria trata da análise quantitativa de medidas a partir de fotogramas (fotografias, vídeos, imagens digitais, etc.). Com tais dados tecnicamente registrados em celuloze e/ou em infografias, se pode trabalhar em campo utilizando programas computacionais, sem a necessidade de retorno ao local de origem. O processo fotográfico fornece informações em várias escalas do objeto de trabalho (SILVA *et al.*, 2007, p. 05).

Figura 37 – Exemplo de uma captura por fotogrametria.



Fonte: Ricardo Taraboulous⁶

Para que seja possível gerar um modelo 3D a partir de imagens 2D, as mesmas devem ser obtidas de forma que se possa assumir algumas premissas. Assim, em fotografias, assume-se que a câmera produz uma projeção central perfeita, que não há desvio de raios de luz passando através da lente da câmera, e que a imagem no plano focal da câmera é uma superfície planar rígida. Considera-se que a relação matemática entre o objeto e a imagem é conhecida com o princípio

⁶ Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/61374210/Escaneamento-a-Laser>>. Acesso em: 04 jan. 2013.

da colinearidade: o centro de perspectiva da imagem, um dado ponto da imagem e o ponto correspondente do *objeto* são colineares (SILVA *et al.*, 2007).

O princípio da colinearidade abarca os seis graus de liberdade da câmera: 3 translações e 3 rotações. Desvios da projeção central podem ser modelados como erros sistemáticos na condição de colinearidade. Dizem respeito às distorções causadas pela lente e podem ser calculados conhecendo-se este parâmetro da câmera utilizada. A partir destes fundamentos e de cálculos geométricos baseados em triangulação, se estabelece a posição dos pontos na imagem 2D em um sistema de coordenadas 3D que descreve o mundo correspondente (SILVA *et al.*, 2007).

A forma de atuação desses tipos de tecnologias de digitalização é semelhante ao processamento de imagens realizado pelo cérebro humano. Enquanto a visão monocular percebe a posição, forma e textura de um objeto dentro do campo de visão, a binocular possibilita a percepção de profundidade.

A técnica de obter a forma pela sua silhueta, por exemplo, tenta criar uma representação 3D através de fotografias de duas silhuetas tiradas de diferentes pontos. Normalmente esse tipo de scanner possui uma mesa giratória, na qual o objeto é apoiado e um fundo para simplificar o procedimento de extração do contorno. Enquanto o objeto é rotacionado, a câmera captura imagens de onde serão extraídos os contornos (BELLOCCHIO; FERRARI, 2012). No entanto, nem toda informação referente ao objeto 3D pode ser retirada através de suas silhuetas. Portanto para obter um objeto virtual mais fiel, é necessário realizar o que Laurentini (1994, apud SONG; WU, 2012) chama de *visual hull* (envoltório visual).

A representação chamada de *visual hull* é criada pela interseção dos cones visuais formados pela projeção das silhuetas captadas com sua imagem correspondente. Já que as regiões côncavas não podem ser distinguidas (figura 38) usando somente as informações da silhueta, a capa visual é somente uma aproximação da forma do objeto, especialmente se há um número limitado de câmeras (SONG; WU, 2012).

Figura 38 – Objeto e sua envoltória visual.



Fonte: Song; Wu, 2012.

A técnica mais disseminada dos métodos passivos, por sua vez, é a estereoscopia ou estéreo, que funciona pela construção de objetos 3D a partir da união de múltiplas imagens. O que significa que várias imagens calibradas são tiradas do objeto real e são processadas por correspondência estérea. A fim de gerar um modelo virtual por esse método, as câmeras digitais são usadas para capturar variadas vistas de determinado objeto e capturar toda a sua geometria física, a partir de informações contidas em sua textura.

Os sistemas estereoscópicos são baseados na análise de duas ou mais imagens da mesma cena, observada de diferentes pontos de vista. Os pontos 3D da cena são capturados através de cada câmera, já que suas projeções 2D estão presentes em cada imagem. A primeira etapa na reconstrução algorítmica consiste na identificação dos pares dos pontos 3D em cada imagem, que correspondem ao mesmo ponto 3D na cena. Caso os pontos 2D correspondentes forem achados, seus raios projetados podem ser estimados e as posições 3D dos pontos podem ser descobertas através da interseção dos raios de projeções (figura 39) (BELLOCCHIO, 2010).

Figura 39 - Exemplo de um par de imagens onde pontos das cenas estão projetados.



Fonte: Francesco Bellocchio, 2010

Esse método requer o conhecimento profundo dos parâmetros da câmera utilizada, como sua posição e orientação, mas também seus parâmetros internos (distância focal, centro ótico, tamanho do CCD e parâmetros de distorções). Todo esse detalhamento deve ser cuidado no momento de calibração, que é realizada antes da sessão de escaneamento, utilizando uma cena conhecida, como um fundo quadriculado (BELLOCCHIO, 2010).

Outra técnica incluída nos métodos sem contato / reflexivo / ótico / passivos é a de profundidade do desfoco, que gera alguns impasses em sua nomenclatura. Essa técnica é identificada por Mahmood e Choi (2012) como profundidade do foco (SFF ou *shape from focus*), porém com a mesma descrição de Bellocchio e Ferrari (2012) para profundidade do desfoco.

Mahmood e Choi (2012), as descrevem como técnicas que recuperam informação espacial de várias imagens da mesma cena, tiradas em diferentes níveis de foco. Na SFF, o objetivo é descobrir a profundidade através da medição da distância posição bem focada de cada ponto objeto através da lente da câmera. Assim que as distâncias de todos os pontos são encontradas, a forma 3D pode ser facilmente descoberta.

Já Bellocchio e Ferrari (2012) a definem como scanner no qual uma câmera convencional captura diversas imagens da mesma cena com diferentes distâncias focais. O conteúdo de frequência da mesma região em diferentes imagens é usada para identificar em qual imagem a região considerada está em foco. Uma vez que a

partir da distância focal, a distância do plano do foco do centro ótico é determinada, conhecer a região em foco para um dado comprimento focal dá a distância da região a partir da câmara também. Ainda segundo o autor, essa técnica só pode ser aplicada em objetos texturizados.

Por sua vez, as técnicas de captura da forma pela textura ou contorno, não capturam as coordenadas dos pontos 3D do objeto, mas sim a curvatura da superfície e sua orientação. Por meio da análise da distorção da textura, é possível calcular a curvatura da superfície (ALOIMONOS, 1986 *apud* BELLOCCHIO; FERRARI, 2012).

Essa técnica faz esse levantamento da superfície por meio de uma única imagem e utiliza a distorção observada na textura criada no processo de estruturação da imagem, quando um ponto 3D no espaço é projetado em um plano 2D. O método seleciona um esquema de representação adequada para as características apresentadas pela textura na imagem, calcula os parâmetros de distorção em um esquema de representação e combina a distorção com os gradientes da textura, a fim de estimar a orientação local da superfície em cada pixel (WITKIN, 1981 *apud* SUKUMAR; KOSCHAN; ABIDI, 2012).

Um cuidado a ser tomado ao se utilizar a captura da forma pela textura é referente à iluminação utilizada, já que sombras podem influenciar na visualização da textura. Esses métodos são úteis quando a reconstrução 3D da forma só pode ser feita através de uma fotografia, no entanto não são adequados quando há a necessidade de precisão (WITKIN, 1981 *apud* SUKUMAR; KOSCHAN; ABIDI, 2012; BELLOCCHIO, 2010).

A técnica de forma pelo contorno é bem similar à captura pela textura. Nesse caso, a orientação da superfície é calculada a partir da análise da distorção de um objeto planar (BELLOCCHIO; FERRARI, 2012). No entanto, não só a forma 3D dos contornos é infinitamente ambígua, como também os contornos só dão informação da forma nas regiões próximas a ele – o formato da superfície pode variar sem, no entanto, produzir um novo contorno (ULUPINAR; NEVATIA, 1995).

3.1.2.2.2 Métodos sem contato / reflexivos / óticos / ativos

Os equipamentos sem contato ativos são aqueles munidos de um agente emissor de feixes (*laser* ou luz estruturada) e um receptor (câmera). O feixe emitido percorre o objeto a ser digitalizado e por meio do receptor capta a forma no espaço e a converte em pontos nos eixos XYZ. Inclui os scanners de triangulação (luz estruturada e *laser*), tempo de voo, *phase shift*, interferometria e conoscopia holográfica.

Tanto os scanners a *laser* quanto os de luz estruturada realizam o cálculo das coordenadas XYZ através de triangulação, o que varia é o tipo de luz emitida pelo sensor e a forma com que é capturada, de acordo com as propriedades de cada uma. A luz do *laser*, por exemplo, é muito diferente da luz branca e tem três propriedades próprias: é monocromática, pois contém somente um comprimento de onda específico; a luz liberada é colimada, já que cada fóton (partícula de luz) se move na mesma direção que os outros; a luz é direcionada, pois seu feixe é estreito, com a luz forte e concentrada (WESCHELER, 2012).

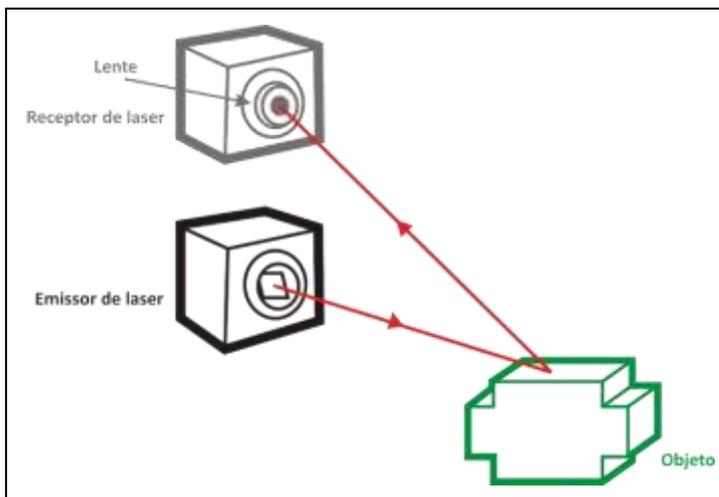
Já a luz comum é composta por vários comprimentos de onda, que partem de forma desordenada em várias direções. Na emissão de luz branca, há a sobreposição de ondas, o que faz com que os fótons colidam, ocasionando perda de energia (WESCHELER, 2012).

Os scanners a *laser* tem como princípio básico a triangulação trigonométrica. Um emissor lança um feixe de *laser* no objeto a ser digitalizado e por meio de um receptor que captura sua forma em 3D. A liberação do feixe de luz do *laser* pode variar de duas formas, e ambas são utilizadas em scanners: pontual (figura 17) ou por varredura (figura 18).

Em outras palavras, se a interação entre a radiação com a superfície do objeto produzir um ponto, este pode ser facilmente detectado por um sensor (normalmente um CCD - *charge-coupled device* ou dispositivo de carga acoplada). A orientação e a posição do emissor e do sensor são previamente conhecidas. A partir da localização do ponto no sensor, a linha entre o ponto captado e o ponto central da câmera são computados. Como a linha do *laser* é conhecida, o ponto 3D resultará da interseção entre a linha da câmera e a linha do *laser*. Portanto, se a orientação e posição do *laser* são conhecidas, é possível calcular as coordenadas

por triangulação (figura 40). O sistema irá capturar um ponto por quadro (BELLOCCHIO, 2010).

Figura 40 – Ilustração do princípio de triangulação do *laser* por feixe pontual.



A triangulação ocorre da mesma forma quando a liberação do feixe for por varredura (figura 41), o que difere é que mais pontos são capturados a cada quadro. Como o feixe de *laser* ilumina um plano no espaço, a câmera captura o contorno resultante da interseção desse plano com a superfície do objeto. Desta forma, para cada *pixel* da imagem no contorno, o ponto 3D correspondente da superfície do objeto é encontrado pela interseção do raio passando através do *pixel* e da equação do plano de *laser* 3D (BELLOCCHIO; FERRARI, 2012). Um exemplo desse tipo de varredura é demonstrado na figura 42(a).

Figura 41 – Ilustração do princípio de triangulação do laser por feixe por varredura.

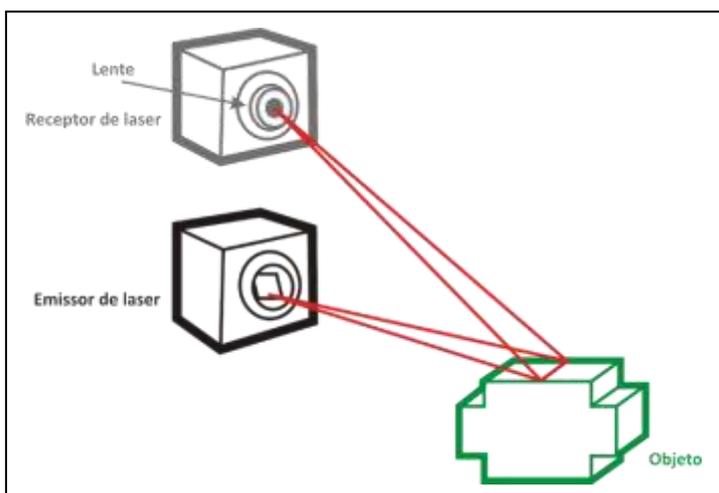
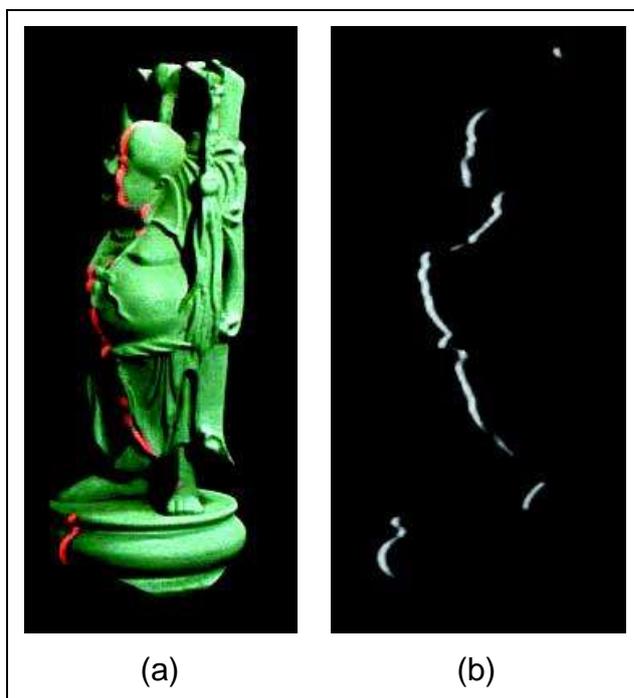


Figura 42 – (a) Foto mostrando objeto sendo escaneado com *laser* com feixe de linha; (b) seção do objeto capturada pelo *laser*.



Fonte: Brian Curless.

Os *scanners* a laser estão disponíveis em várias formas como *scanners* de área ou portáteis e são menos sensíveis à luz ambiente. No entanto, são mais sensíveis a ruídos e movimentos - é necessário preparar a superfície a ser escaneada, já que superfícies polidas podem refletir o *laser*, como também, no caso de escanear pessoas, evitar movimentos durante o escaneamento, o que causa falhas na malha poligonal gerada (3DSCANCO, 2012).

Já a triangulação por luz estruturada é a captura com luz branca exposta com um padrão geométrico conhecido e calibrado pelo aparelho que, por meio do padrão, consegue capturar o desenho 3D do objeto. Essencialmente, em vez da câmera capturar uma linha de *laser*, ela capta a borda do padrão projetado, e calcula a distância (3DSCANCO, 2012).

Há diferentes técnicas baseadas na projeção de padrão estruturado, e geralmente fazem uso de câmera e projetor calibrados. O objetivo dessas técnicas é caracterizar cada ponto através da projeção de um padrão de luz para uma direção diferente. Desta forma a iluminação é utilizada como um código, permitindo a correta identificação de cada direção (BELLOCCHIO; FERRARI, 2012).

Existem dois tipos diferentes de captura por luz estruturada, utilizando listras coloridas ou linhas codificadas pelo tempo de aparição (figuras 43 e 44). A codificação por cor apresenta um importante problema: tanto a cor da superfície do objeto quanto à luz ambiente influenciam na cor da luz refletida. Por essa razão, para reconstruir um objeto colorido ou texturizado, é melhor utilizar o sistema de codificação por tempo de aparição Bellocchio e Ferrari (2012).

Figura 43 – Ilustração do princípio de triangulação de padrões por luz estruturada.

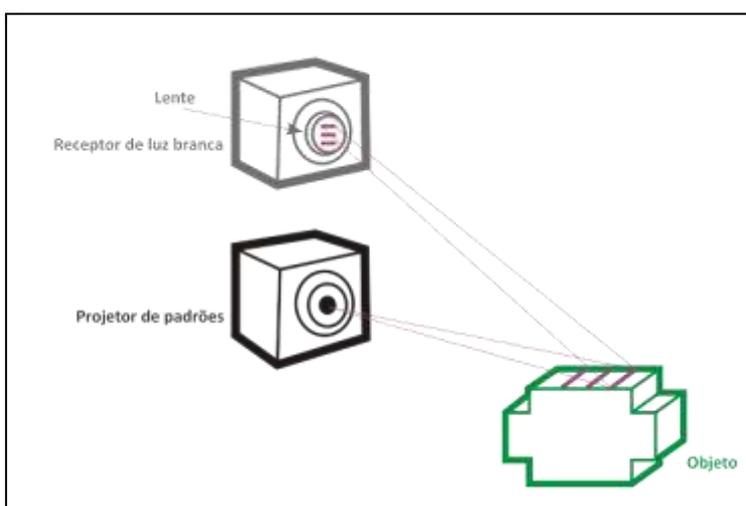
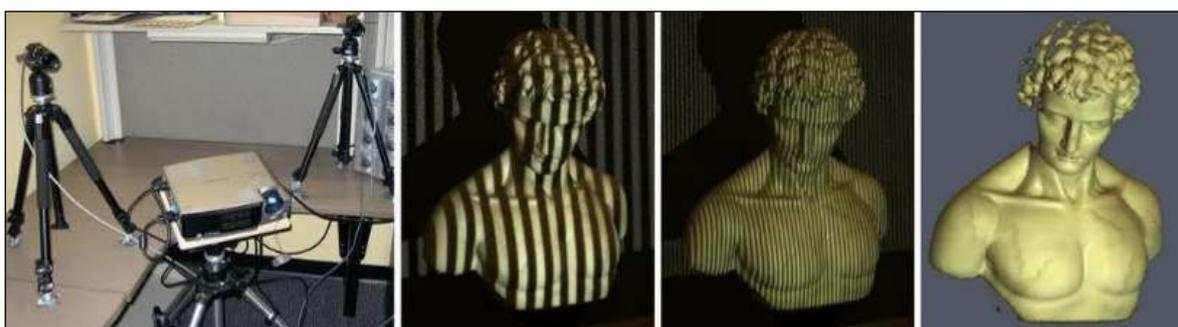


Figura 44 - Exemplo de captura da forma 3D por luz estruturada.



Fonte: Gabriel Taubin e Douglas Lanman⁷.

Anteriormente esses *scanners* eram limitados a scanners de área, mas atualmente diversas empresas estão produzindo versões portáteis, como o Grupo Artec, empresa que produz quatro diferentes tipos de *scanners* de luz branca

⁷ Disponível em: <<http://mesh.brown.edu/3DPGP-2009/homework/hw2/hw2.html>>. Acesso em: 30 dez. 2012.

estruturada de pequeno porte. A vantagem desse tipo de equipamento é que a superfície de textura gerada tem melhor aparência em comparação à gerada pelo equipamento a *laser*. Uma desvantagem é que a luz ambiente atrapalha a captura de dados, já que entra em conflito com a luz emitida pelo *scanner* (ARTEC, 2012).

Os *scanners* de triangulação, tanto os de laser quanto os de luz branca estruturada, são de curto alcance, o que quer dizer que sua distância focal é menor que 1 metro. Outro fato comum a *scanners* de luz branca estruturada e laser é a dificuldade em capturar a forma de objetos compostos por materiais reflexivos ou transparentes (3DSCANCO, 2012; BELLOCCHIO, 2010).

A fim de burlar esse problema, muitas vezes é aplicado talco sobre a superfície. De acordo com Mériaudeau *et al.* (2012), “essa etapa suplementar é problemática, uma vez que o objeto precisa ser limpo após o escaneamento e a precisão das medidas vai depender da espessura e homogeneidade do pó aplicado”. Como alternativa a esse problema apresentado por *scanners* de triangulação por *laser* ou luz branca, foram criadas duas propostas de escaneamento 3D: por aquecimento e por fluorescência.

O escaneamento por aquecimento (*Scanning from Heating* – SFH) baseia-se num padrão de luz infravermelha projetado sobre o objeto. O calor liberado por esse objeto (o qual é aquecido pela radiação infravermelha) é fotografado por um sensor calibrado de luz infravermelha – a técnica se baseia na observação do padrão emitido para formar a malha poligonal do objeto (figura 45) (MÉRIAUDEAU *et al.*, 2012).

Figura 45 – Da esquerda para direita: Recipiente de vidro e sua representação 3D e taça de vidro com sua representação 3D, ambas obtidas através do escaneamento por aquecimento.



Fonte: Mériaudeau *et al.*, 2012.

Já o escaneamento por fluorescência baseia-se no cálculo de triangulação (figura 18) utilizando um laser de luz ultravioleta (UV) para estimar a forma de objetos transparentes. A escolha desse espectro foi motivada pelos materiais a serem escaneados, vidros e plásticos, que exibem fluorescência quando irradiados com UV. São utilizadas duas câmeras associadas a uma fonte de laser UV. Sob o efeito da radiação ultravioleta, a fluorescência gerada na superfície do objeto é emitida de forma difusa e capturada pelo sistema de câmeras (MÉRIAUDEAU *et al.*, 2012).

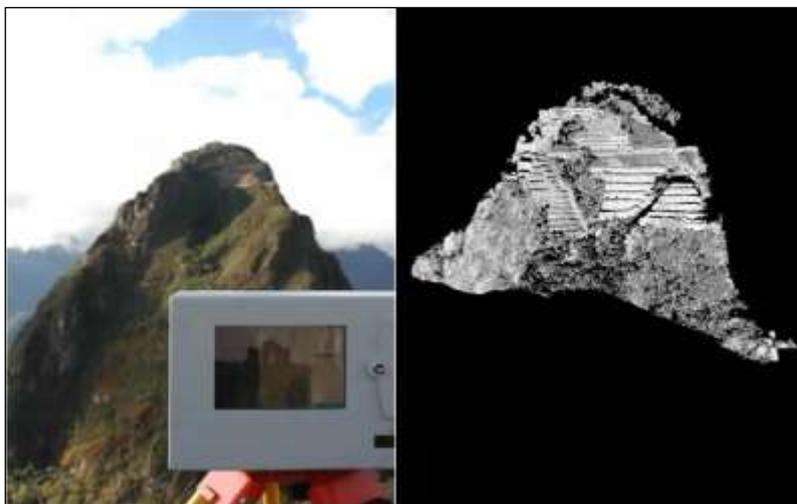
Outro exemplo de técnica sem contato / reflexiva / ótica / ativa é a chamada reconstrução tridimensional pelo tempo de voo (TOF). Os sonares e radares de microondas utilizam o princípio básico do tempo de voo que, como já foi abordado anteriormente, calculam o tempo gasto para a radiação emitida atingir o objeto e retornar ao sistema, sendo conhecida a velocidade da radiação emitida.

O sistema de tempo de voo aqui abordado utilizam sistemas óticos, devido ao tipo de ondas que utilizam. São sistemas muitas vezes chamados de LIDAR (*Light detection and ranging*) ou LADAR (*Laser detection and ranging*) e são caracterizados por uma velocidade relativamente elevada de aquisição (10.000 – 100.000 pontos por segundo), bem como uma profundidade de campo que pode alcançar quilômetros (BELLOCCHIO; FERRARI, 2012).

As duas das principais vantagens do TOF são: os feixes do transmissor e receptor são coaxiais; e a precisão da medição não depende da distância, como acontece nos *scanners* de triangulação. A estrutura comum de um scanner TOF (figura 46) se constitui por um laser semiconductor, um ou dois canais receptores, discriminadores de tempo e uma unidade de medição de tempo. Um sistema ótico e algum método de controle para ganho de sinal, seja ótico ou elétrico, também são necessários (KILPELÄ, 2004).

Ainda que a faixa de operação típica desses sistemas fica entre 5 e 300m, alguns equipamentos podem capturar objetos a 1Km de distância, o que faz com que a aquisição se torne mais lenta. A taxa de acurácia típica gira em torno de 4 a 10 mm (PAYNE; NIVEN, 2012).

Figura 46 – Exemplo de captura com *scanner* TOF.

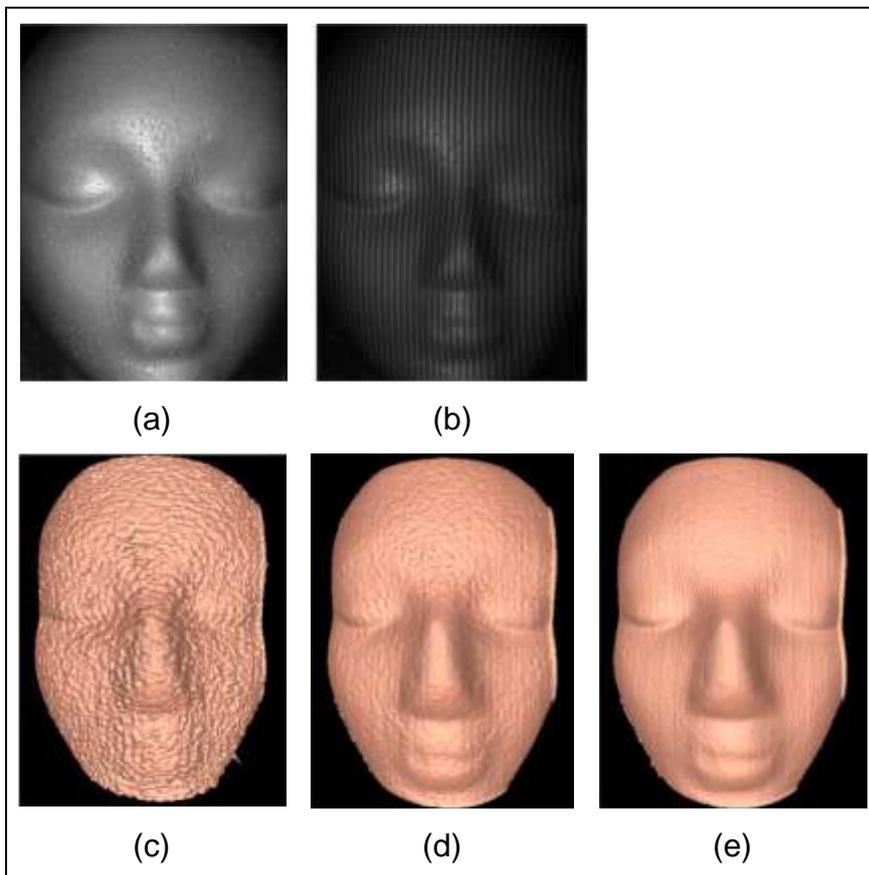


Fonte: Payne; Niven, 2012.

Outro scanner pertencente ao grupo sem contato / reflexivo / ótico / ativo é conhecido como *phase shift*, que em seu processo de escaneamento emite pulsos de *laser* com frequências alternadas e mede a diferença entre os sinais emitidos e recebidos para determinar a distância do objeto (PAYNE; NIVEN, 2012).

A fonte, normalmente um projetor digital, projeta sobre a cena uma série de padrões de franjas sinusoidais (figura 47b) por alternância de fases, e uma câmera registra as imagens resultantes. A partir de uma sequência de padrões alternados pode-se detectar para cada pixel da câmera, a fase de um período do padrão de iluminação sinusoidal. Para determinar a posição absoluta dentro do padrão de iluminação, o período deve ser localizado – esse processo é denominado *phase-unwrapping*. Assim, é feita a correspondência entre a imagem e a projeção, possibilitando o cálculo das coordenadas 3D do objeto por triangulação (CHEN, SEIDEL; LENSCH, 2008).

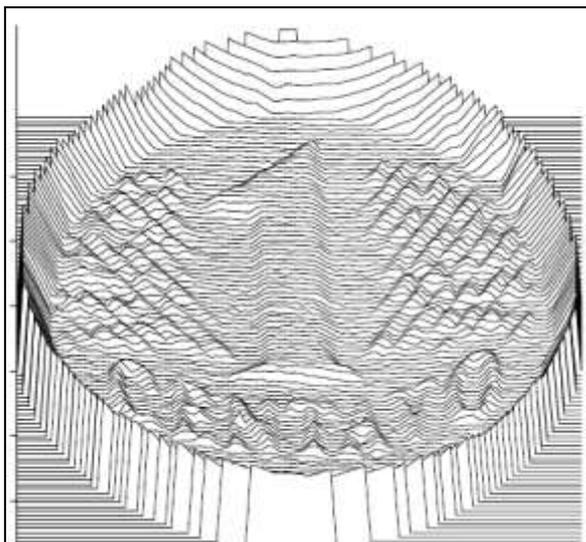
Figura 47 - (a) Fotografia do objeto; (b) Imagem com a projeção de um padrão de franja sinusoidal; (c) Forma 3D reconstruída de um escaneamento por phase-shift utilizando um único padrão; (d) Forma 3D reconstruída de um escaneamento por phase-shift utilizando dois padrões sinusoidais; (e) Forma 3D reconstruída de um escaneamento por phase-shift utilizando três padrões sinusoidais.



Fonte: Karpinsky; Zhang, 2010.

A interferometria, por sua vez, é um método no qual a medição e a captura 3D da forma são feitas por meio da combinação de duas frentes de onda: uma proveniente da reflexão do objeto e a outra, uma onda de referência. A combinação dessas duas ondas gera uma imagem de interferência, que permite a reconstrução da superfície. Descontinuidades e rugosidades na superfície do objeto interferem na captura da forma. O princípio de medição é extremamente sensível à interferências, o que faz com que essa técnica seja mais utilizada em um ambiente laboratorial. Essa técnica inclusive que permite o escaneamento de peças pequenas (de aproximadamente 125 cm^3 - figura 48), baixo custo e baixa incerteza (ROTHERNEVES, 2001).

Figura 48 - Vista isométrica de uma moeda de 1 centavo obtida por interferometria.



Fonte: Rothe-Neves

Outra técnica inserida nos métodos ativos é a conosopia holográfica, que atua por meio da aplicação de um processo de interferência de luz polarizada e baseia-se na ótica de cristal. Na configuração básica da interferência, um ponto de luz é projetado em um objeto difuso. Esse ponto cria um ponto luminoso que difunde a luz em todas as direções. Em um sistema conosópico, o ângulo completo e sólido da luz difusa é analisado pelo sistema. E o processo de medição corresponde à recuperação da distância do ponto de luz a partir de um plano de referência fixo (Y SIRAT *et al.*, s/d).

Esses sistemas de medição tridimensional estão ganhando visibilidade diante de técnicas mais antigas. Sistemas de conosopia holográfica evoluíram de solução exótica para uma escolha atraente a fim de solucionar os problemas de medição não abrangidos por técnicas de triangulação (Y SIRAT *et al.*, s/d).

Existem ainda algumas técnicas sem contato / reflexiva / ótica / ativas que não são indicadas no diagrama geral (figura 18), uma vez que são métodos ativos derivados de métodos passivos. O estéreo ativo, por exemplo, tem sua origem na técnica passiva mas utiliza um par câmera / projetor, que permite iluminar a cena com um padrão de luz estruturada, que facilita a correspondência entre os pontos. E o sistema ótico do projetor tem um papel semelhante ao da segunda câmera nas medições estereoscópicas (CARVALHO *et al.*, 2005).

Há ainda outra técnica que não foi citada chamada de forma por polarização, desenvolvida por Daisuke Miyasaki e sua equipe de pesquisadores. Em seus estudos, divulgaram três técnicas para escanear objetos transparentes: O primeiro método determina a forma da superfície utilizando a termodinâmica, o segundo utiliza conhecimentos estabelecidos no campo da pesquisa de geometria diferencial (que é o estudo da geometria utilizando cálculos matemáticos) e o terceiro método provê um valor inicial do formato da superfície e depois determina a superfície real através de computação interativa (MIYAZAKI; IKEUCHI, 2006).

4. ANÁLISE COMPARATIVA

4.1 Metodologia

A precisão dimensional será avaliada para equipamentos de diferentes fabricantes e tecnologias. No presente estudo estão comparadas duas tecnologias de escaneamento, o sistema a laser WBX da empresa norte americana Cyberware e o sistema MHT da empresa russa Artec Group. O método para avaliação da precisão dimensional dos dados advindos desses equipamentos de digitalização de imagens 3D teve cinco etapas:

1. Estudo dos processos de escaneamento a fim de otimizar o tempo nas etapas seguintes;
2. Escaneamento dos marcadores e serem utilizados nas etapas subsequentes;
3. Escaneamento utilizando um corpo de prova cilíndrico e análise das malhas poligonais obtidas;
4. Escaneamento de um manequim, já com os marcadores posicionados sobre pontos anatômicos. Nessa etapa foram retiradas medidas manualmente e virtualmente da mesma forma como foi feita na etapa final, com o voluntário;
5. Escaneamento de um voluntário que teve seus pontos anatômicos marcados para a retirada de medidas. Foi feita uma comparação entre as medidas retiradas manualmente, por meio de antropômetro e virtualmente, com o auxílio do *software* de modelagem tridimensional Rhinoceros.

Os primeiros escaneamentos levaram em consideração o processo de trabalho de cada equipamento, bem como as particularidades geométricas dos corpos de prova a serem utilizados nas etapas subsequentes. Foi levado em conta a geometria cilíndrica do primeiro corpo de prova, a necessidade de captura de detalhes para capturar os marcadores e o escaneamento da geometria corporal humana.

A segunda etapa, com o escaneamento dos marcadores, foi considerada a captura de objetos menores. Os marcadores selecionados variam em forma, tamanho e cor, sendo dois marcadores esféricos de isopor com diâmetros de 14,30

mm e 24,60 mm; três marcadores trapezoidais de mesma dimensão de 12,60 x 12,60 x 6,00 mm e diferentes cores, preto, branco e azul; um marcador cilíndrico de feltro de 16,50 x 4,50 mm.

O terceiro teste teve como objeto um corpo de prova cilíndrico de material plástico opaco na cor cinza. Sua textura evita a reflexão do *laser* e/ou luz estruturada, o que evita desconformidades na malha poligonal obtida. Sua dimensão é de 116,06 mm de diâmetro e 401,8 mm de altura.

O escaneamento de um manequim, por sua vez, buscou anteceder o escaneamento do voluntário a fim de garantir o sucesso da captura nas duas tecnologias comparadas. A escolha preliminar por objetos inanimados baseou-se em estimativas de precisão e acurácia. Com indivíduos vivos, é inevitável uma quantidade de erros de mensuração ao realizar o escaneamento, uma vez que os dois *scanners* precisam de diferentes tempos de postura estática. A tentativa de redução de erros no escaneamento do voluntário, por sua vez, baseou-se na escolha de pontos anatômicos ósseos, que pouco se modificam na postura de escaneamento adotada.

A postura de escaneamento adotada foi com o voluntário de pé, com os braços esticados próximos à lateral do corpo, com as palmas da mão viradas para o tronco. A distância entre as palmas das mãos foi medida com um objeto espaçador com 250 mm de comprimento.

Foram utilizados métodos estatísticos como análise de variâncias e erro quadrático médio para a estimativa da acurácia. Assim, ao final do trabalho será obtido um retrato da precisão de equipamentos de digitalização de imagens 3D que podem ser empregados em antropometria e ergonomia no Brasil.

Os métodos de avaliação comparativa das tecnologias de escaneamento 3D aplicadas em antropometria e ergonomia aqui apresentados devem anteceder pesquisas antropométricas tridimensionais e ergonômicas a fim de validar a escolha do equipamento utilizado.

4.2 Processo de escaneamento

Os primeiros testes nos *scanners* tiveram como objetivo estudar o processo de escaneamento e as etapas necessárias para a obtenção da malha poligonal dos objetos de teste. A visualização da malha em diferentes formatos no momento do escaneamento também é importante, por isso, para a apuração inicial da qualidade do *scan* a malha foi visualizada como nuvem de pontos, *wireframe* e sombreada. Para a comparação de malha poligonal, foi levado em conta os seguintes fatores:

- Deformações de detalhes;
- Número de polígonos;
- Captura de detalhes.

Inúmeros fatores podem prejudicar ou dificultar o escaneamento, os primeiros problemas são referentes ao tipo de superfície do objeto e ao material que o compõe. Superfícies reflexivas podem dificultar a localização por triangulação do *laser* ou luz branca, levando assim à descaracterização na uniformidade da malha poligonal. A figura 49 exemplifica esse fenômeno, onde as setas verdes indicam os fragmentos originados pela reflexão do *laser* refletido na lente dos óculos de proteção, produzido com material reflexivo. As setas vermelhas indicam as falhas produzidas pela impossibilidade do *laser* varrer toda a área devido à oclusão, fenômeno este que veremos posteriormente.

Figura 49 – Exemplo de *scan* sombreado (*shaded*) com setas verdes indicando a reflexão de material e setas vermelhas indicando oclusão.



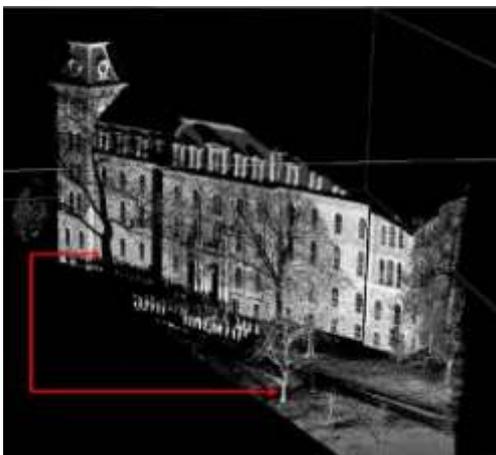
Cabelos também costumam provocar o fenômeno reflexivo. Quanto mais ondulados e claros, maior a dispersão produzida na malha poligonal obtida. Outro problema comum é efeito de oclusão, falhas resultantes da incapacidade do laser de varrer algumas áreas. Superfícies horizontais, com inclinação de 0° , costumam impossibilitar a varredura do *laser*. Ao escanear pessoas, esse problema é visualizado com a formação de interrupções na malha no topo da cabeça e ombros. (figura 50).

Figura 50 – Seta branca indicando a impossibilidade do *laser* de capturar superfícies horizontais.



O efeito de oclusão, no qual o *laser* é impossibilitado de capturar toda a superfície gerando uma sombra (figura 51), pode ser minimizado com a aquisição de múltiplos *scans* tirados de diferentes ângulos.

Figura 51 – Exemplo de sombra ou oclusão do *laser*



Fonte: Archeology Data Service e Digital Antiquity.

Esse é um problema comum a todos os tipos de *scanners* que, devido ao formato do corpo humano, ficam impossibilitados de capturar a superfície em algumas áreas de forma apropriada. Algumas partes do corpo são de difícil captura e visibilidade, independente da tecnologia utilizada (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005).

A varredura da superfície é largamente influenciada por dois fatores: 1) o número e a disposição das cabeças/câmeras de captura são cruciais para garantir que 360° da cobertura da superfície do corpo seja finalizada; 2) a postura adotada e a maneira com a qual as extremidades do corpo são posicionadas afetam os efeitos de oclusão, o que pode resultar em uma superfície incompleta (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005).

Como foi apresentado anteriormente no capítulo 3, os diversos procedimentos de captura da forma tridimensional baseiam-se no mesmo princípio: a estimativa das coordenadas tridimensionais de pontos pertinentes à forma. Uma característica que difere os métodos a *laser* e luz estruturada é a densidade dos pontos 3D que são obtidos.

No caso de *scanners* a *laser*, a densidade é afetada por alguns fatores como: taxa de deslocamento das cabeças de digitalização; número de imagens capturadas, que é dependente do *hardware* e do *software* utilizado, e a disposição e número de câmeras utilizadas. A densidade máxima dos pontos 3D para esta tecnologia de *scanners* implica em uma distância entre pontos que varia de 1 a 5 mm (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005; BELLOCCHIO, 2010).

Já nos *scanners* de luz estruturada, a densidade dos pontos 3D é afetada pelas dimensões geométricas e a forma da estrutura de luz usada para a projeção (Figura 52). Quanto mais fino o padrão projetado sobre o objeto, maior será o número de pontos 3D calculados. Se, por exemplo, padrões horizontais em forma de listras são projetados, é possível obter matematicamente pontos 3D em intervalos extremamente curtos na direção horizontal ao longo da projeção da faixa de luz. Na direção vertical, a densidade de pontos de dados em 3D calculáveis dependerá da largura das listras (KIRCHDÖRFER; RUPP, 2005).

Figura 52 – Imagens dos padrões sinusoidais de dois tipos: listras finas e grossas.



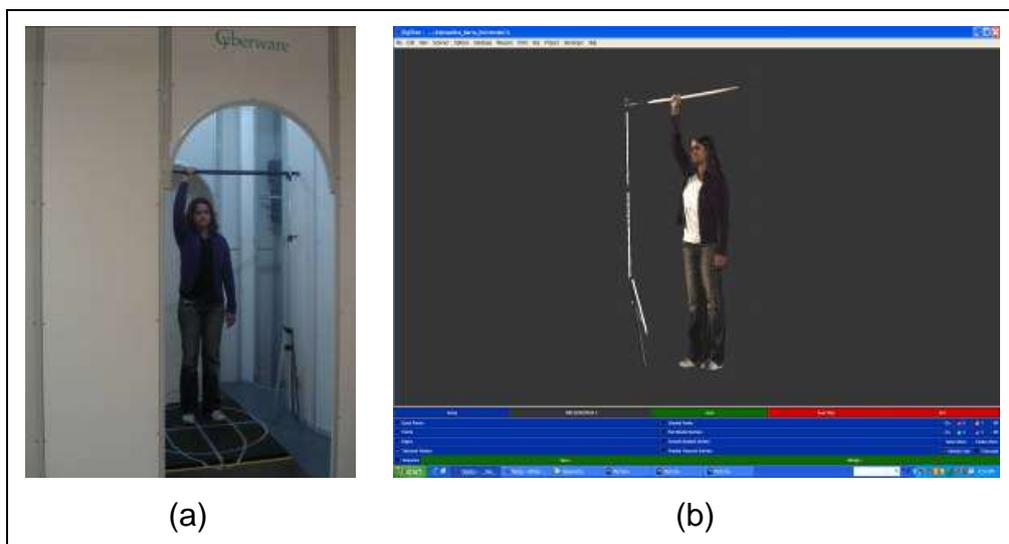
Fonte: Kirchdörfer e Rupp, 2005.

4.2.1 Scanner Cyberware WBX

O processo de escaneamento é iniciado com a pessoa ou objeto posicionado sobre a plataforma-base do *scanner* WBX (figura 53a) e com o programa DigiSize aberto no computador (figura 53b). Os quatro conjuntos câmeras/cabeças de *laser* são acionados e correm ao longo das colunas de sustentação verticalmente, de cima para baixo, no sentido da plataforma-base. O processo se inicia à altura da cabeça da pessoa em direção aos pés, de modo à escanear todo o corpo.

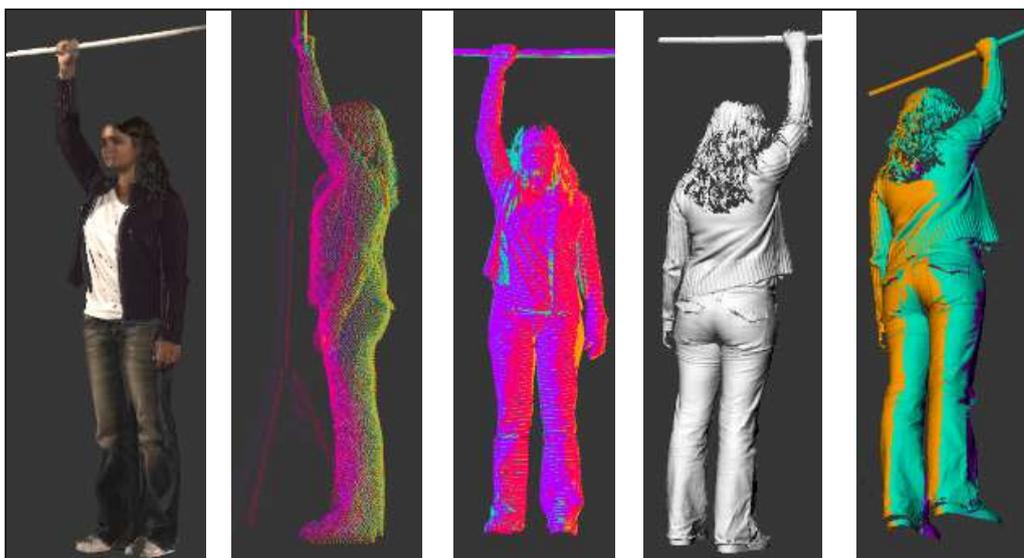
O sistema incorpora a possibilidade de visualização da malha poligonal em 3D da pessoa imediatamente após o término do processo de escaneamento (que leva cerca de 20 segundos). Desta forma é possível que se possa verificar a qualidade da imagem obtida e proceder a um novo escaneamento, caso a qualidade da malha obtida não seja satisfatória.

Figura 53 – (a) Modelo posicionada sobre a plataforma-base do *scanner* WBX; (b) tela do programa DigiSize.



O uso do *scanner* WBX só é possível com o *software* DigiSize que o acompanha. Esse programa possibilita cinco tipos de visualização: texturizada, nuvem de pontos, *wireframe*, sombreada (*shaded*) e vista sombreada colorida representando a captura realizada por cada cabeça de *laser* (figura 54).

Figura 54 - Diferentes modos de visualização da malha poligonal em 3D obtida a partir do escaneamento (*scanner* WBX). Imagens obtidas de um estudo ergonômico para o *design* do Trem de Levitação Magnética Maglev Cobra, desenvolvido em uma parceria entre a Coppe/UFRJ, LASUP (Laboratório de Aplicações de Supercondutores) e o Instituto Nacional de Tecnologia.



4.2.2 Scanner Artec MHT

Com a pessoa ou objeto posicionado (figura 55) e com o programa Artec Studio aberto no computador, inicia-se o processo de escaneamento (figura 56), no qual o *scanner* libera *flashes* de luz projetando um padrão sobre a pessoa/objeto. O processo é livre e pode ser iniciado em qualquer direção, contanto que o *scanner* esteja na distância correta em relação ao objeto. Essa distância é acompanhada na tela do computador, conforme mostrado na figura 54. Quando o objeto se encontra fora do alcance do escâner, a barra lateral fica vermelha.

O sistema incorpora a possibilidade de visualização da malha poligonal em 3D da pessoa durante o processo de escaneamento, para que se possa verificar a qualidade da imagem obtida e proceder a um novo escaneamento, caso essa qualidade não seja satisfatória. Ao final do processo é necessário submeter a malha poligonal obtida a alguns algoritmos de processamento (figura 55), a saber: *Rough serial registration* (registro serial bruto), *Fine serial registration* (registro serial fino), *Global registration* (registro global) e *Fusion* (fusão).

Figura 55 – Scanner Artec MHT posicionado próximo ao cilindro a ser escaneado.



Figura 56 – Tela do software Artec Studio durante o processo de escaneamento.

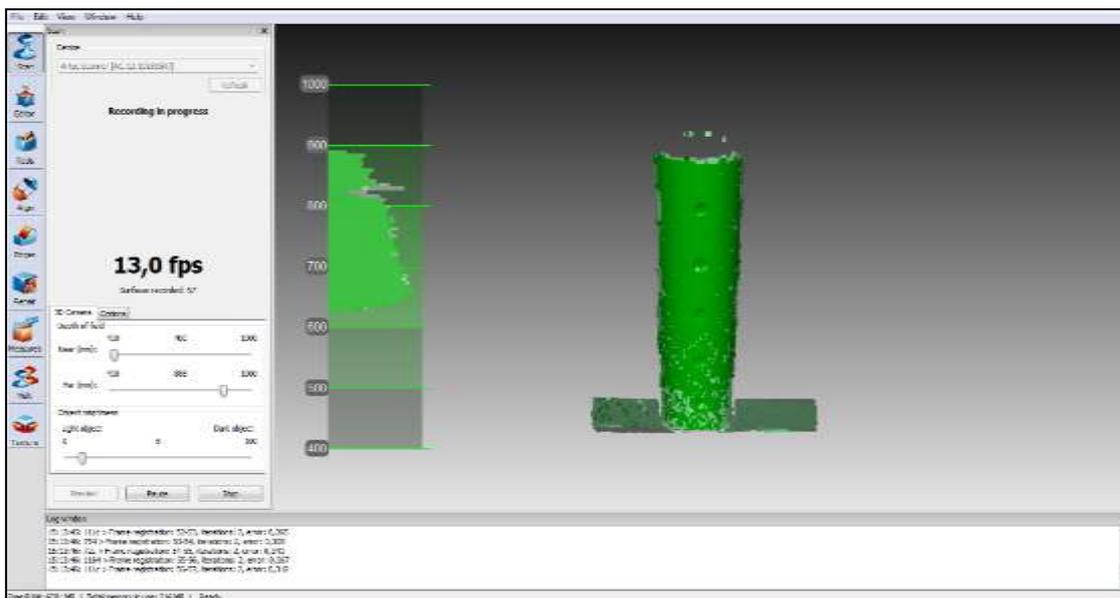
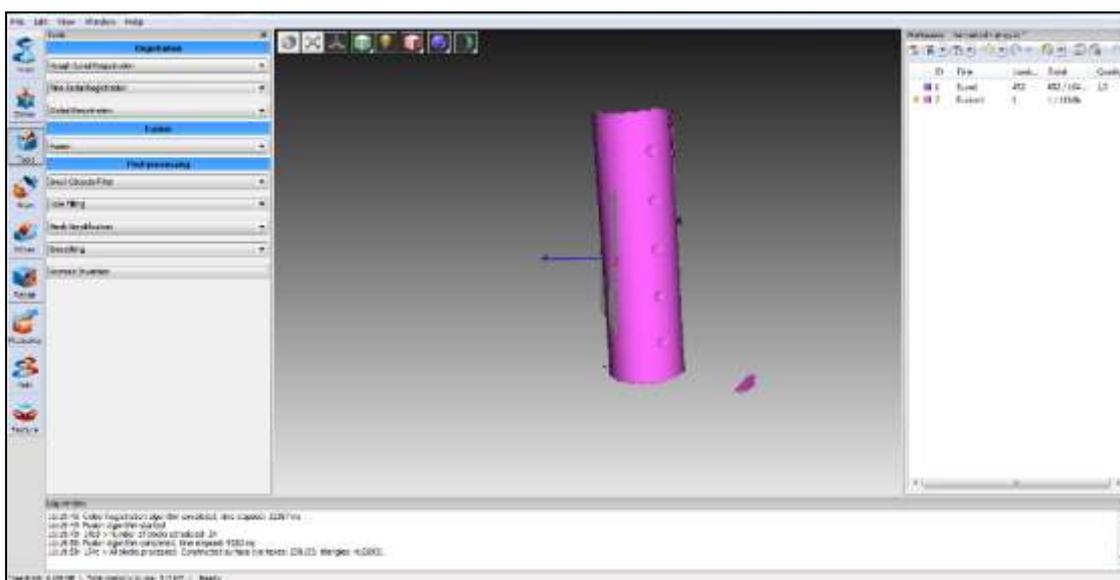
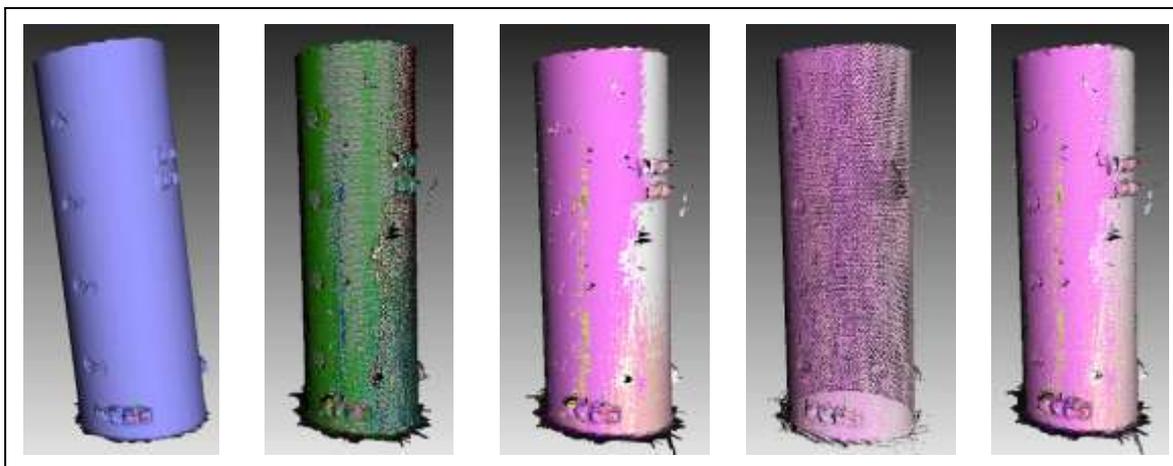


Figura 57 – Tela do software Artec Studio de finalização da malha poligonal.



O scanner Artec possibilita cinco tipos de visualização da malha poligonal obtida: texturizada, *wireframe* com sombreado, sombreado, nuvem de pontos e *wireframe* (figura 58).

Figura 58 - Diferentes modos de visualização da malha poligonal em 3D obtida a partir do escaneamento (*scanner Artec*).



4.3 Escaneamento de marcadores

Terminado o estudo dos processos de escaneamento de cada scanner, foi iniciada a segunda etapa de testes que consistiu na comparação da malha poligonal gerada com diferentes tipos de marcadores. Esses marcadores são necessários para a visualização de pontos anatômicos e, posteriormente, auxiliar no cálculo de medidas antropométricas. Foram escolhidos três diferentes modelos, atendendo aos seguintes requisitos (figura 59):

- Diferentes tamanhos;
- Diferentes formatos;
- Cores variadas.

Figura 59 – Modelos de marcadores usados em testes de escaneamento.



Os requisitos mencionados anteriormente tinham como objetivo comparar os resultados da captura para determinar se poderia haver alguma diferença na qualidade da malha. Os *scans* realizados no WBX mostraram que marcadores em forma de esfera não são capturados de forma satisfatória (independente do tamanho), o que possivelmente dificultaria sua localização em um *scan* humano. A impossibilidade de capturá-los se deve ao problema de oclusão mencionado anteriormente. Em relação ao marcador cilíndrico, a captura gerou uma malha deformada e irregular.

Em relação aos marcadores de forma trapezoidal, foi notada uma melhoria da captura da forma de acordo com a cor do mesmo. O *scanner* WBX teve dificuldade em escanear o marcador preto, capturando o topo do trapézio e deixando uma descontinuidade na malha em algumas laterais. O mesmo fenômeno acontece com o marcador trapezoidal branco, que apresentou pouca melhoria na captura. O melhor resultado, por fim, foi com o marcador azul, que teve toda a sua superfície capturada com êxito.

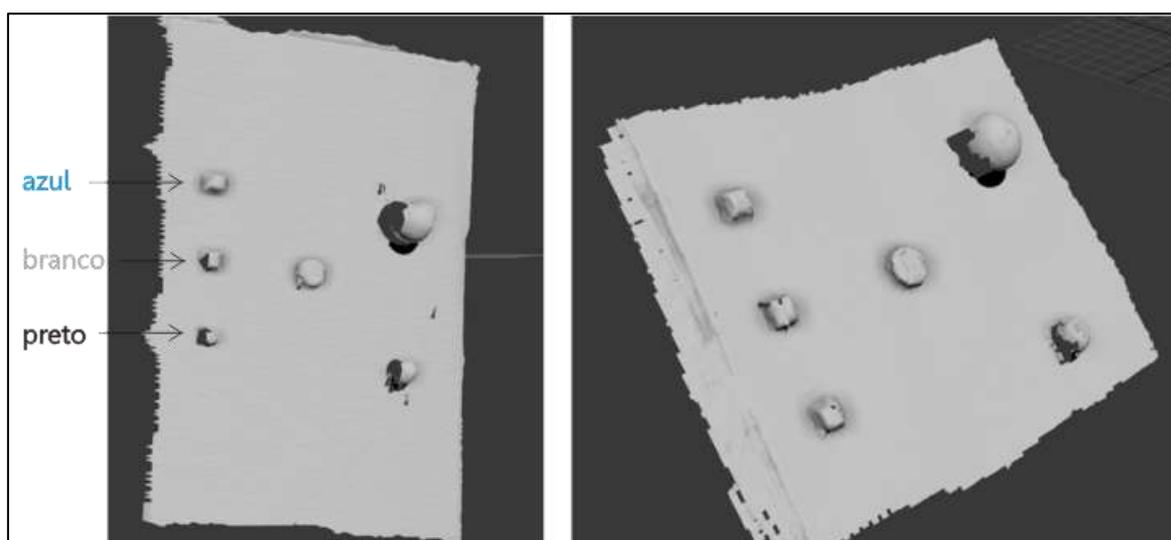
O *scanner* MHT também apresentou dificuldades em capturar a maioria dos marcadores. Os marcadores em forma de esfera não são capturados de forma satisfatória, assim como apresentado no *scanner* WBX. O marcador cilíndrico foi capturado gerando uma malha irregular.

Já com os marcadores trapezoidais, também houve uma diferença de captura em relação à cor: o marcador azul foi escaneado de forma satisfatória, ainda que apresentasse uma pequena desconformidade na malha. Os marcadores de cor branca e preta apresentaram pequenas falhas na malha. Na figura 60 é possível visualizar os diferentes tipos de marcadores testados e o resultado dos escaneamentos.

Tabela 02 – Resultados do escaneamento dos marcadores

Tipo de marcador	WBX	MHT
Esfera pequena	Muitas falhas	Muitas falhas
Esfera grande	Muitas falhas	Muitas falhas
Cilindro	Pequenas falhas	Pequenas falhas
Trapézio azul	Aceitável	Aceitável
Trapézio branco	Pequenas falhas	Pequenas falhas
Trapézio preto	Muitas falhas	Aceitável

Figura 60 – Scans dos marcadores obtidos pelos scanners WBX e MHT, respectivamente.



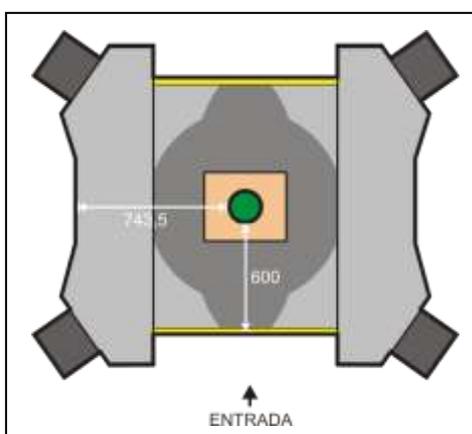
4.4 Escaneamento do corpo de prova

O terceiro teste de comparação entre os dois *scanners* utilizou como objeto de estudo um cilindro de material não reflexivo. O objetivo desse estudo inicial seria a comparação de malha poligonal gerada pelos *scanners* WBX e Artec, levando em conta o número de polígonos, a captura de detalhes, a fidelidade à forma e precisão dimensional. Os resultados dessa etapa determinarão os valores mínimos de densidade, polígonos e detalhes para que a qualidade da malha seja prejudicada, de

maneira a obter dados da maneira mais rápida possível e minimizar o tempo de escaneamento sequencial de pessoas.

O corpo de prova foi colocado sobre a mesa giratória com 474 mm de altura no centro da plataforma de escaneamento do scanner WBX, conforme mostra a figura 61:

Figura 61: Ilustração mostrando o posicionamento do cilindro (representado por um círculo verde) dentro da área de escaneamento do *scanner* WBX – vista superior (cotas em mm).



Primeiramente foram realizados cinco escaneamentos sucessivos no WBX. Depois de obtidos os *scans*, para a aferição de medidas (Figura 63) foram realizados dois cortes horizontais (Figura 61) na malha poligonal, a fim de verificar se as medidas do cilindro estavam uniformes.

Figura 61 – Malhas poligonais dos cinco *scans* sucessivos com planos perpendiculares à sua superfície: corte superior indicado pelo plano preto e corte inferior indicado pelo plano cinza.

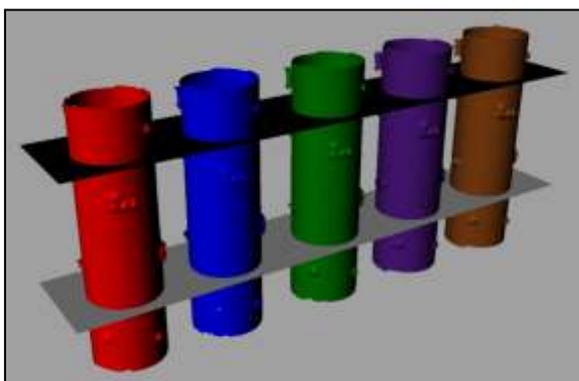
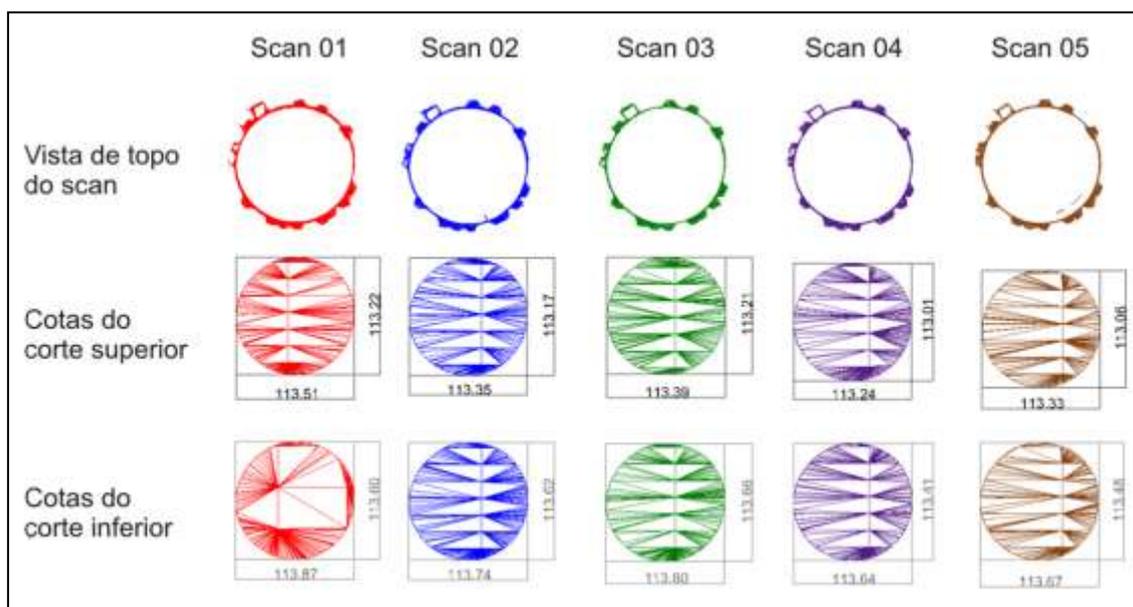


Figura 62 – Vista de topo das malhas poligonais com as cotas dos cortes realizados nos scans obtidos pelos scanner WBX.



As linhas que aparecem nos círculos gerados pela interseção entre o plano de corte e os scans (que possibilitam a mensuração da malha poligonal) são adicionadas automaticamente pelo software Rhinoceros, utilizado para visualização e processamento das malhas obtidas.

Tabela 03 – Detalhes do corte superior realizado na malha poligonal do cilindro obtida pelo scanner WBX

Nº do scan	Nº de polígonos	Tamanho (mm)
Scan 01	84.098	113,51 x 113,22
Scan 02	84.282	113,35 x 113,17
Scan 03	84.332	113,39 x 113,21
Scan 04	83.953	113,24 x 113,01
Scan 05	84.090	113,33 x 113,06
Média dos resultados	84.151	113,36 x 113,13

Tabela 04 - Detalhes do corte inferior realizado na malha poligonal do cilindro obtida pelo *scanner* WBX.

Nº do scan	Nº de polígonos	Tamanho (mm)
Scan 01	84.098	113,87 x 113,60
Scan 02	84.282	113,74 x 113,82
Scan 03	84.332	113,80 x 113,80
Scan 04	83.953	113,64 x 113,41
Scan 05	84.090	113,67 x 113,48
Média dos resultados	84.151	113,74 x 113,62

Após a aferição de medidas (tabelas 03 e 04) foi calculada a média dos resultados obtidos nos cortes superiores e inferiores. A média das medidas do corte superior foi 113,36 x 113,13, enquanto a média para o corte inferior foi 113,74 x 113,62. O desvio padrão, por sua vez foi 0,16 x 0,08 e 0,08 x 0,17 respectivamente.

Os resultados apresentados nas tabelas 02 e 03 foram obtidos com a configuração padrão do *scanner* WBX. Este scanner permite o uso de quatro velocidades para varredura e realizou-se uma captura à parte, a fim de verificar o número de polígonos obtidos para o cilindro na varredura mais detalhada possível. O processo de escaneamento detalhado durou 70 segundos (figura 64) e disponibilizou uma malha com 253.384 polígonos.

Figura 63 – Resultado do escaneamento com velocidade padrão.

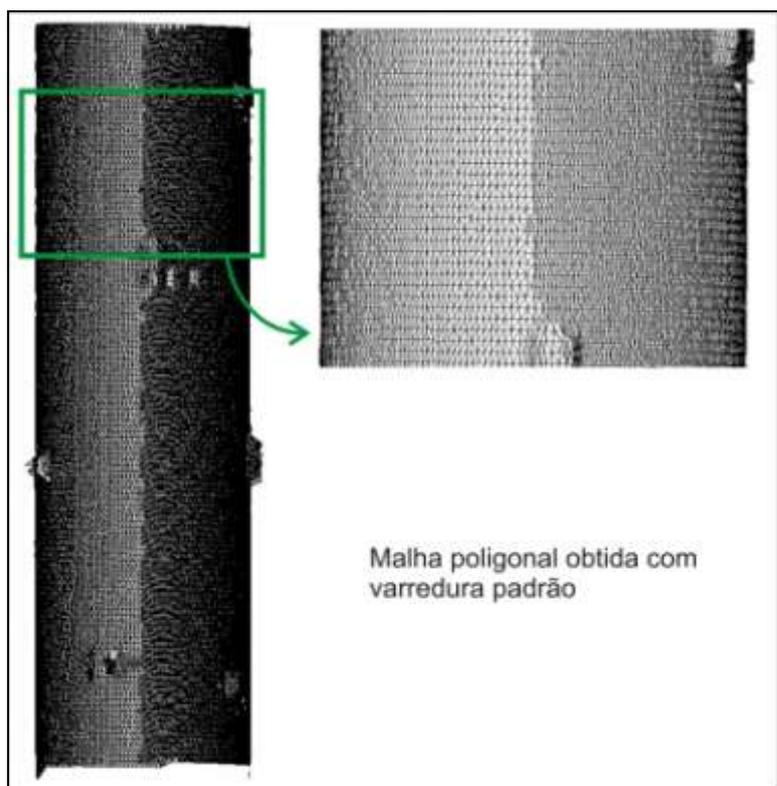
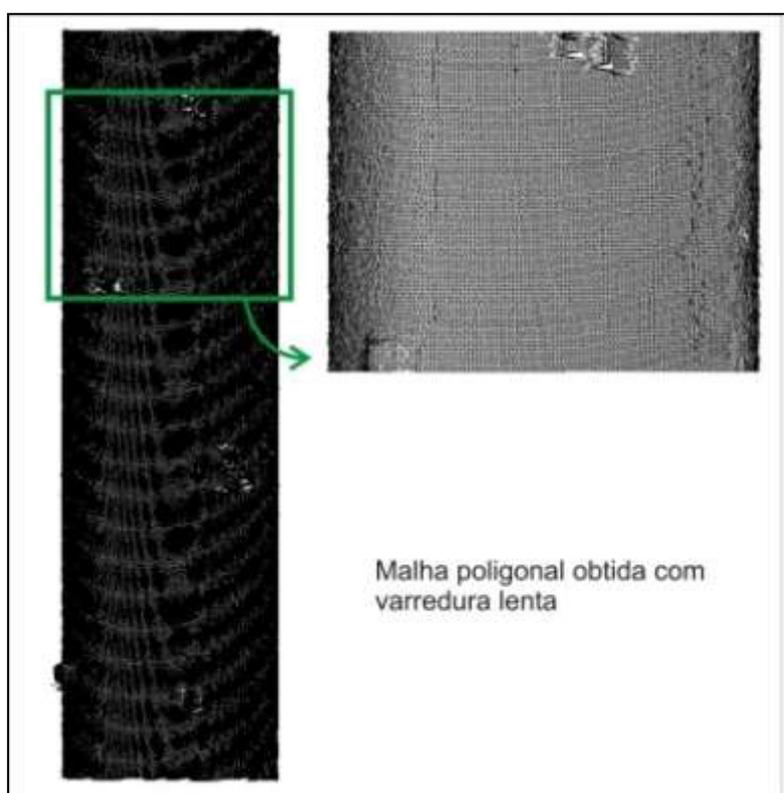


Figura 64 - Resultado do escaneamento com velocidade lenta.



Já em relação ao *scanner* MHT, a dificuldade inicial é sua impossibilidade de ficar trabalhando por longos períodos, uma vez que a fonte de luz nele embutida precisa de intervalos entre operações. Com o objeto cilíndrico posicionado sobre uma mesa giratória a uma distância de 727 mm e o scanner MHT, a uma altura de 621 mm (Figura 65), a primeira tentativa de escaneamento foi através de um único *scan*, produzido através da movimentação em 360° da mesa. No entanto o resultado não foi satisfatório, uma vez que o *scanner* perde a referência e não é capaz de fechar a malha poligonal.

Figura 65: Posicionamento do corpo de prova em relação ao *scanner* MHT.



A seguir foi realizada outra sessão de escaneamento repetindo a movimentação da mesa giratória, dessa vez posicionando outros objetos menores na mesma. Esse procedimento buscava verificar se o *scanner* manteria a referência de localização da peça cilíndrica, o que se mostrou ineficaz.

Uma terceira tentativa foi adicionar os marcadores trapezoidais (Figura 59) na peça cilíndrica e proceder com o escaneamento girando novamente a mesa. Esse procedimento se mostrou mais eficiente do que os anteriores, no entanto o resultado final da malha poligonal ainda apresentava alguns problemas de fechamento – o ponto inicial de escaneamento que deveria se encontrar com o ponto final não se encontravam, gerando uma malha em espiral, e não cilíndrica. A mesa giratória não

apresentava qualquer desnível e o objeto encontrava-se posicionado no centro da mesma.

A solução encontrada foi o escaneamento por etapas, com o alinhamento semi-automatizado (no qual o operador une os *scans* pelo programa de computador tendo como referência visual os marcadores e depois o *software*, após análise das referências inseridas, realiza a união das faces escaneadas) das malhas obtidas. Essa divisão por etapas evitou o surgimento de malhas espiraladas, no entanto aumentou a possibilidade de erros uma vez que o alinhamento semi-automatizado pode ser tornar impreciso.

Depois de encontrada a melhor forma para escanear o objeto cilíndrico foram realizados cinco *scans* sequenciais, sendo que para cada scan a peça foi rotacionada a um ângulo de aproximadamente 40°. O resultado final da malha poligonal obtida de um desses cinco *scans* recebeu os mesmos cortes dos realizados na malha obtida pelo WBX, ilustrado na figura 61, onde são mostrados dois planos perpendiculares à superfície da malha poligonal obtida. Em cada um desses planos foram realizadas medições (Figura 66).

Figura 66 – Vista de topo das malhas poligonais com as cotas dos cortes realizados nos *scans* obtidos pelo *scanner* MHT

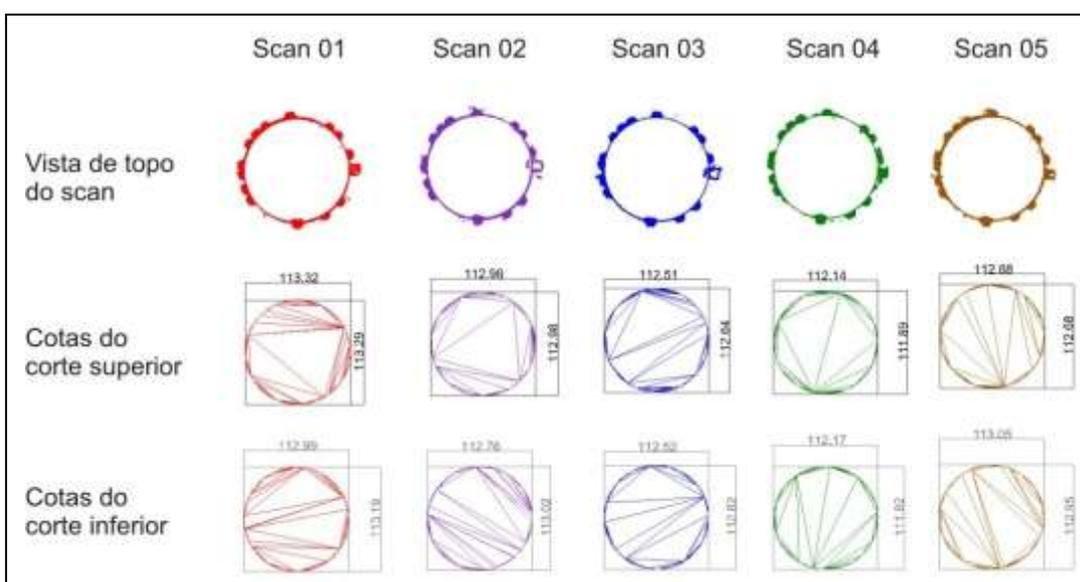


Tabela 05 – Detalhes do corte superior realizado na malha poligonal do cilindro obtida pelo *scanner* MHT

Nº do scan	Nº de polígonos	Tamanho (mm)
Scan 01	400.539	113,32 x 113,29
Scan 02	400.627	112,98 x 112,98
Scan 03	396.773	112,51 x 112,64
Scan 04	426.773	112,14 x 111,89
Scan 05	500.501	112,88 x 112,68
Média dos resultados	425.042	112,77 x 113,29

Tabela 06 - Detalhes do corte inferior realizado na malha poligonal do cilindro obtida pelo *scanner* MHT

Nº do scan	Nº de polígonos	Tamanho (mm)
Scan 01	400.539	112,99 x 113,19
Scan 02	400.627	112,75 x 113,02
Scan 03	396.773	112,52 x 112,82
Scan 04	426.773	112,17 x 111,82
Scan 05	500.501	113,05 x 112,95
Média dos resultados	425.042	112,99 x 113,19

Após a aferição de medidas (tabelas 05 e 06) foi calculada a média dos resultados obtidos nos cortes superiores e inferiores. A média das medidas do corte superior foi 112,77 x 113,29, enquanto a média para o corte inferior foi 112,99 x 113,19. O desvio padrão, por sua vez foi 0,40 x 0,47 e 0,32 x 0,48 respectivamente.

Cada tecnologia demonstrou ter limitações específicas. Uma vez que o MHT necessita de um processo de escaneamento dividido por etapas, o que demanda mais tempo. O WBX, por sua vez, realiza um processo mais prático e rápido, menos

suscetível a erros por movimentação do voluntário escaneado. Em relação aos resultados encontrados, foi encontrada uma variação da forma, além da variação de escala mostrada nos resultados de aferição de medidas, já que o valor do diâmetro escaneado é convencionalmente verdadeiro de 113,06mm.

Em relação à qualidade das malhas poligonais obtidas (figuras 67 e 68), uma vez que podem ser utilizadas para uma infinidade de propósitos, e para cada utilização diferentes parâmetros devem ser estudados como forma, rugosidade, planaridade, ondulação ou outros aspectos referentes à superfície.

No presente estudo, dada a aplicação dessa malha para fins antropométricos e ergonômicos, nos quais a importância da precisão métrica é o aspecto mais importante, também há a importância no nível de detalhes capturados.

Figura 67– Visualização renderizada dos cinco scans obtidos pelo WBX.

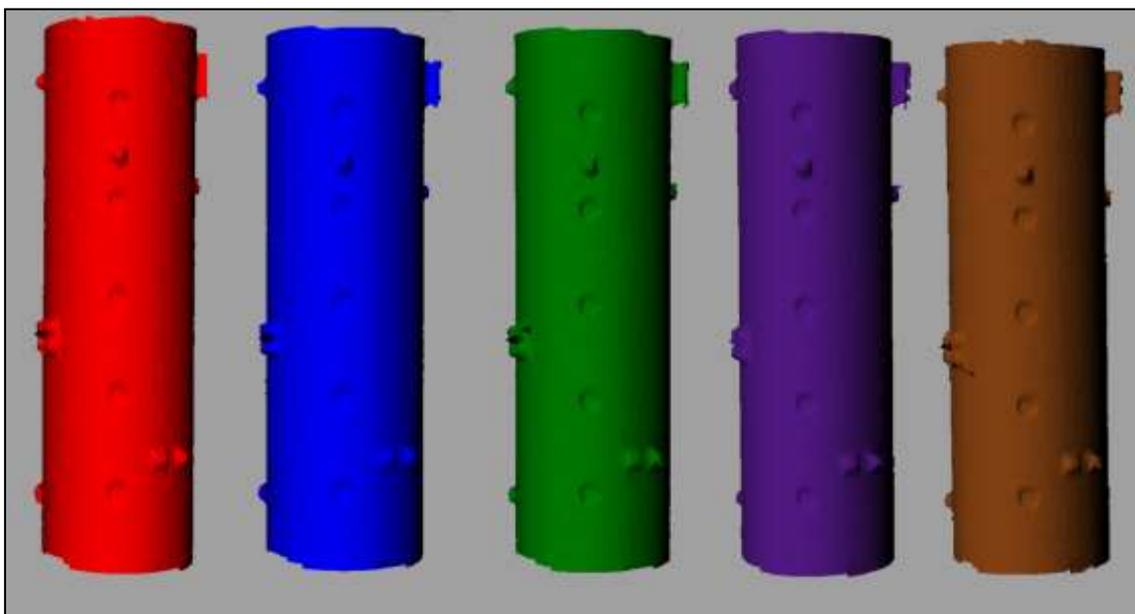
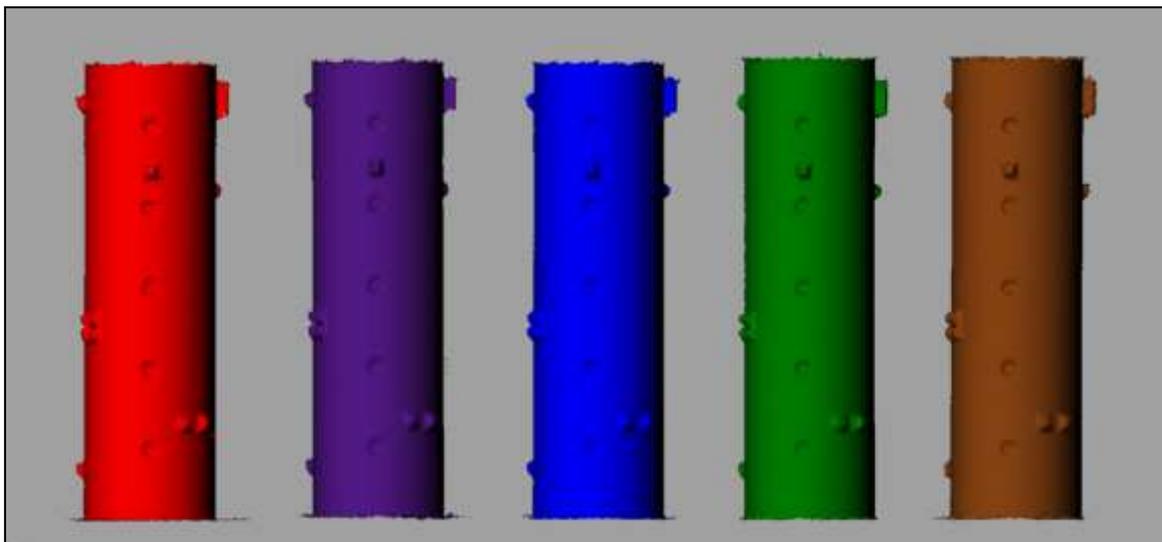


Figura 68– Visualização renderizada dos cinco scans obtidos pelo MHT.



A malha obtida pelo WBX, apesar do seu menor número de polígonos em comparação a gerada pelo MHT, possui uma rugosidade mais acentuada nas áreas lisas. No entanto, as regiões do objeto caracterizadas por depressões em baixo relevo foram mais bem capturadas do que na malha gerada no MHT (figuras 69 e 70).

Figura 69– Zoom nas malhas poligonais obtidas pelos scanners WBX (em cinza) e MHT (em amarelo) – visualização renderizada.

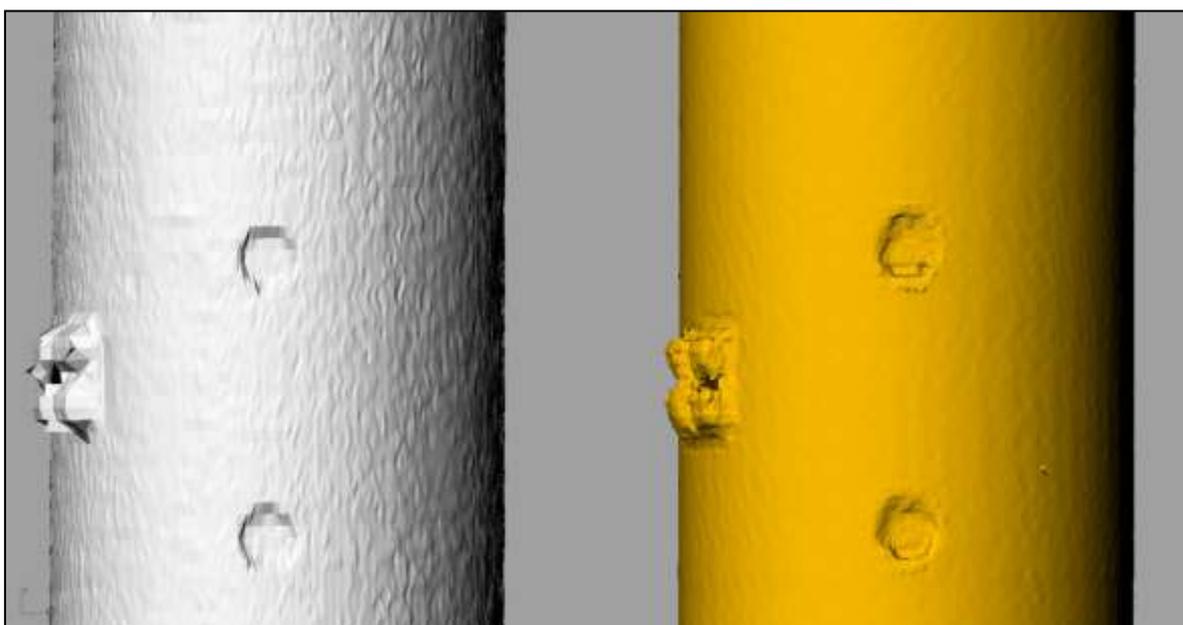
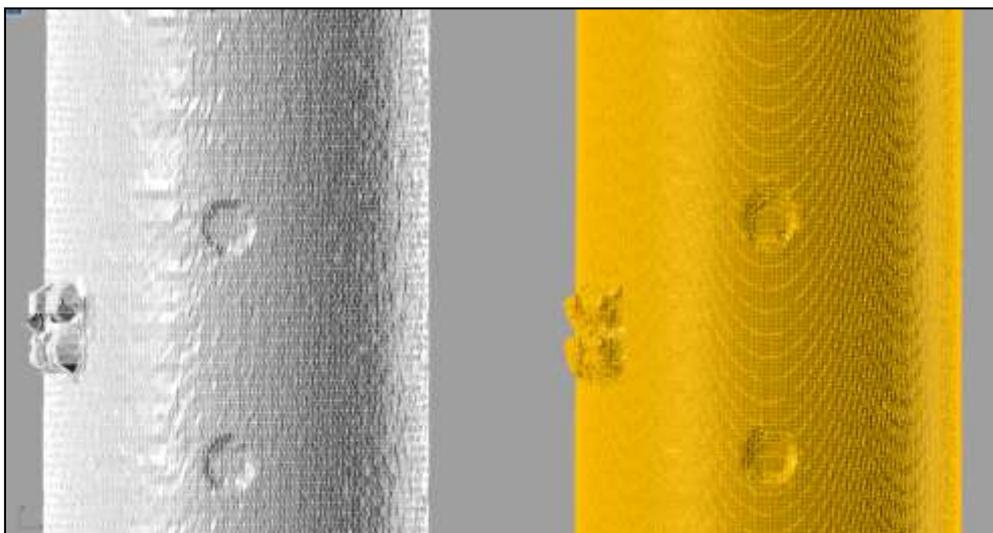


Figura 70– Zoom nas malhas poligonais obtidas pelos scanners WBX (em cinza) e MHT (em amarelo) – visualização em wireframe



Já os marcadores em ambos os resultados apresentaram ruídos e desconformidade na malha, assim como testado anteriormente. Nas áreas onde foram posicionados mais de dois marcadores próximos houve uma pequena distorção da forma original, gerando uma malha com desconformidade e ruídos. Isso qualifica, em ambos os casos, uma dificuldade em capturar objetos com maior nível de complexidade de forma (ver tabela 07).

Tabela 07 – Resultados observados nas malhas poligonais obtidas

	WBX	MHT
Captura de depressões	Aceitável	Pequenas falhas
Captura de vários marcadores juntos	Muitas falhas	Muitas falhas
Aparência da malha	Rugosa	Uniforme
Distorção da forma	Baixa	Baixa
Malha resultante	Satisfatória	Satisfatória

4.4.1 Avaliação da distorção da forma

Um resultado notável dos resultados gerados pelos dois scanners é a baixa distorção da forma cilíndrica do objeto. Considerando-se que as distorções tendem a apresentar uma seção circular como uma seção elíptica, uma medida quantitativa da distorção seria a excentricidade desta elipse. A excentricidade e de uma elipse é dada pela equação:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

Onde a é o semi-eixo maior da elipse e b é o semi-eixo menor. Uma circunferência possui excentricidade 0 . Uma elipse com excentricidade 1 é um segmento de reta. Com os valores das tabelas 03 a 06 pode-se gerar a tabela 08, representativa da distorção da forma.

Tabela 08 – Avaliação da distorção (excentricidade e)

	e
WBX corte superior	0,064
WBX corte inferior	0,046
MHT corte superior	0,096
MHT corte inferior	0,059

As excentricidades mostradas na tabela 08 representam elipses cujas excentricidades são visualmente imperceptíveis e podem ser consideradas circunferências na prática. Portanto, ambos os scanners avaliados forneceram resultados plenamente satisfatórios no que diz respeito à distorção.

4.5 Escaneamento de um manequim

Antes de iniciar o escaneamento do voluntário foi realizado um teste com um manequim a fim de verificar a possíveis erros e problemas nas sessões de escaneamento subsequente. O manequim disponível impossibilitou a marcação de alguns pontos anatômicos pela falta de fidelidade antropomórfica. Foi possível a marcação dos seguintes pontos anatômicos: clavícula esterno-costal, 10ª costela, thelion, espinha íliaca ântero-superior e 10ª costela posterior (figuras 71 e 72).

Figura 71: Pontos anatômicos anteriores marcados no manequim.

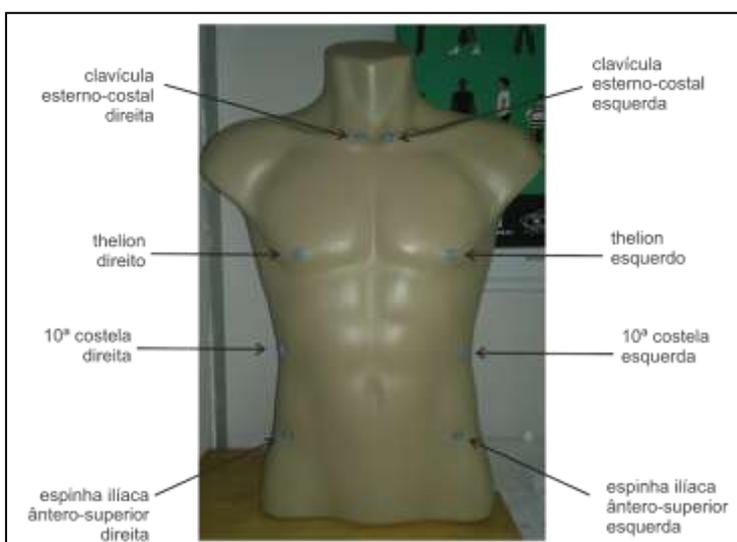


Figura 72: Pontos anatômicos posteriores marcados no manequim.



Na sessão de escaneamento do manequim no WBX, o objeto foi posicionado no centro da plataforma de escaneamento. Foi realizado um escaneamento padrão, com duração de 17 segundos. Terminado o escaneamento, o manequim foi posicionado na mesa giratória, com altura de 474 mm e a uma distância de 720 mm do *scanner* MHT. Foi realizado o escaneamento em nove etapas, rotacionando o manequim a aproximadamente 40°.

Após terminadas as sessões de escaneamento, foram retiradas medidas manualmente, com um antropômetro. O equipamento utilizado para a medição manual foi o modelo 101 de marca suíça GPM, com 2100 mm de comprimento. Após a medição manual, foram realizadas medições dos *scans* do manequim (figuras 73 e 74) obtidos por cada *scanner* por meio do *software* Rhinoceros. Os resultados podem ser analisados na tabela 09 a seguir.

Figura 73: *Scan* do manequim realizado no *scanner* WBX.

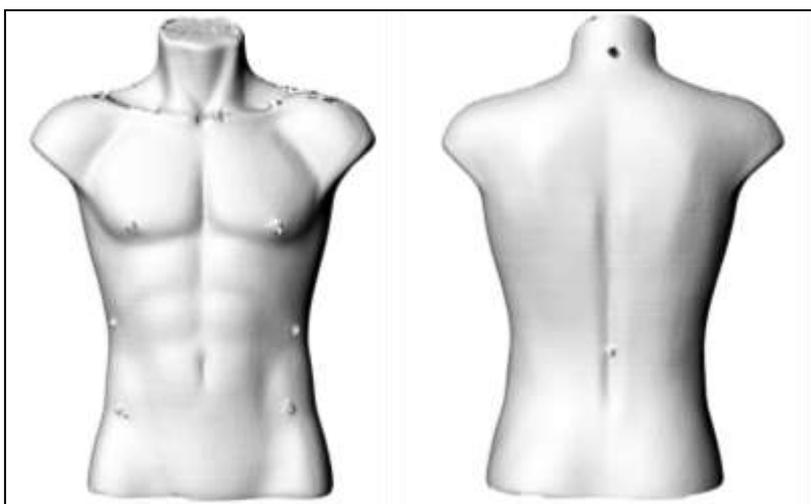


Figura 74: *Scan* do manequim realizado no *scanner* MHT.

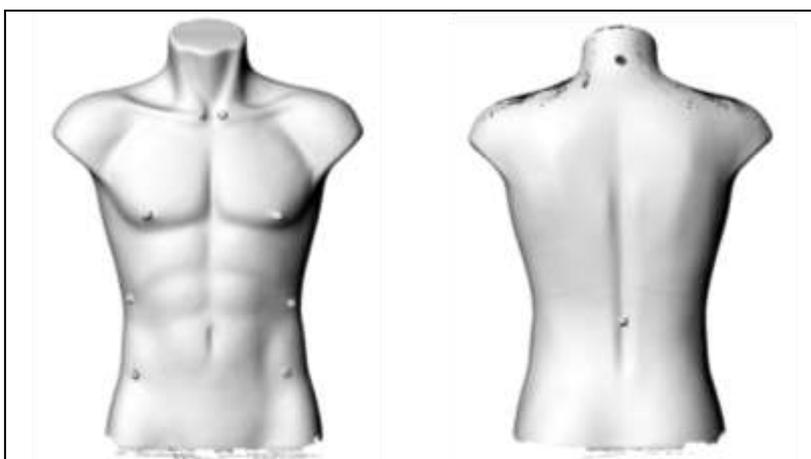


Tabela 09 – Resultados das medições realizadas em um manequim com antropômetro, WBX e MHT

Medida	Antropômetro (mm)	Scanner Cyberware WBX (mm)	Scanner Artec MHT (mm)
Bi-clavicular medial	27,00	30,71	32,00
Bi-thelion	195,00	197,00	196,94
Bi-décima costela torácica	249,00	254,70	255,00
Bi-espinha ilíaca anterior	234,00	232,62	232,75

Pelas tabelas 08 e 09 percebe-se que apesar da pequena distorção de forma apresentada por ambos os scanners, os erros em relação a um antropômetro não são desprezíveis. A tabela 10 sumariza estes erros para os pontos anatômicos em questão:

Tabela 10 – erros percentuais relativos de pontos anatômicos.

Medida	Scanner Cyberware WBX	Scanner Artec MHT
Bi-clavicular medial	13,7	18,5
Bi-thelion	1,0	1,0
Bi-décima costela torácica	1,7	1,6
Bi-espinha ilíaca anterior	0,7	0,5

Pela tabela 09 observa-se uma tendência de aumento do erro relativo para medidas anatômicas menores. O resultado sugere que para ambos os scanners há um erro absoluto que se superpõe ao valor medido. A variância deste erro (3,5 mm) é um indicador da precisão esperada para os scanners avaliados.

4.6 Escaneamento de um voluntário

Para avaliação posterior, foram selecionadas para a medição pontas ósseas do corpo do voluntário, uma vez que não se alteram com a movimentação do corpo entre as sessões de escaneamento. Esses pontos anatômicos garantem uma menor variação de posicionamento entre as sessões de captura, uma vez que não se alteram em diferentes posturas. Foram adicionados marcadores trapezoidais nos seguintes pontos anatômicos (direitos e esquerdos): acrômio, espinha íliaca, 10ª costela torácica, porção esterno-costal da clavícula e crista íliaca (figuras 73 e 74).

Após a marcação dos pontos, foi realizada uma sessão de escaneamento primeiramente no WBX. O entrevistado foi posicionado no centro da plataforma de escaneamento, com os pés afastados conforme indicação da figura 75. Os braços foram afastados com o auxílio de um bastão cilíndrico (afastador de punho) de 250mm de comprimento, a fim de manter um padrão de afastamento.

Figura 73: Pontos anatômicos anteriores marcados no voluntário.

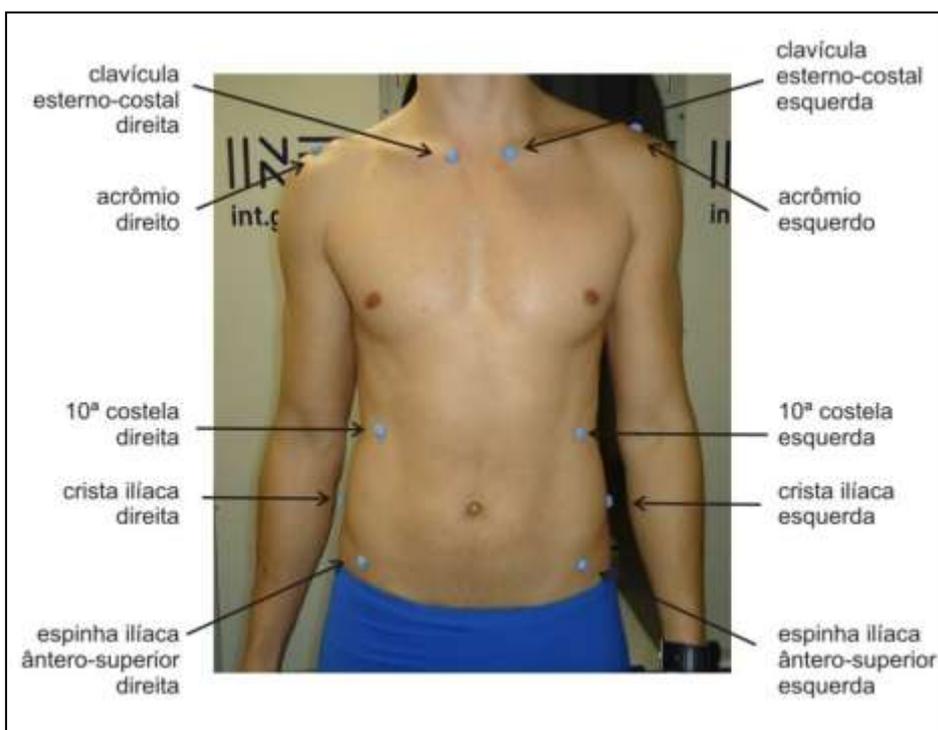


Figura 74: Pontos anatômicos posteriores marcados no voluntário.

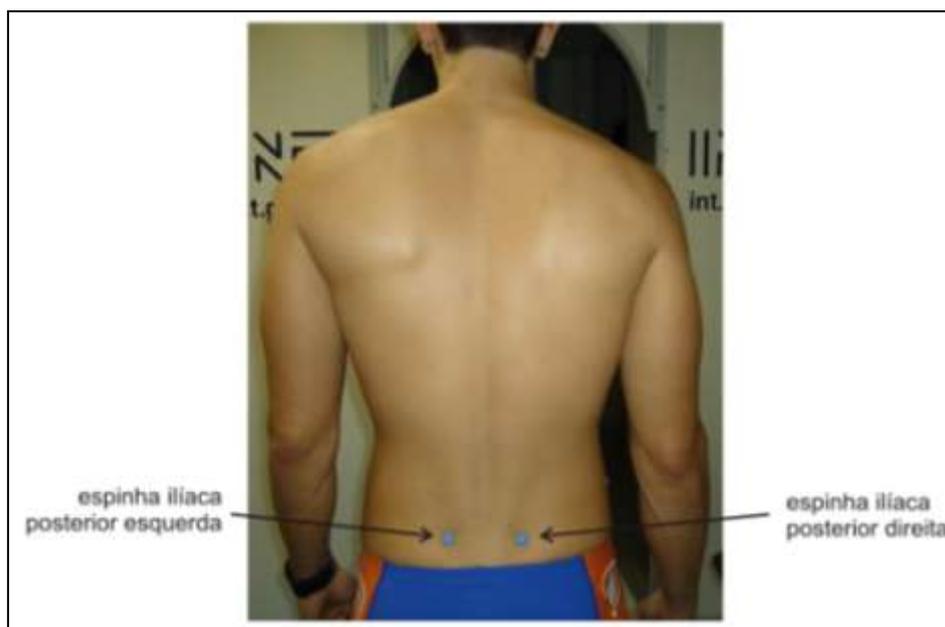
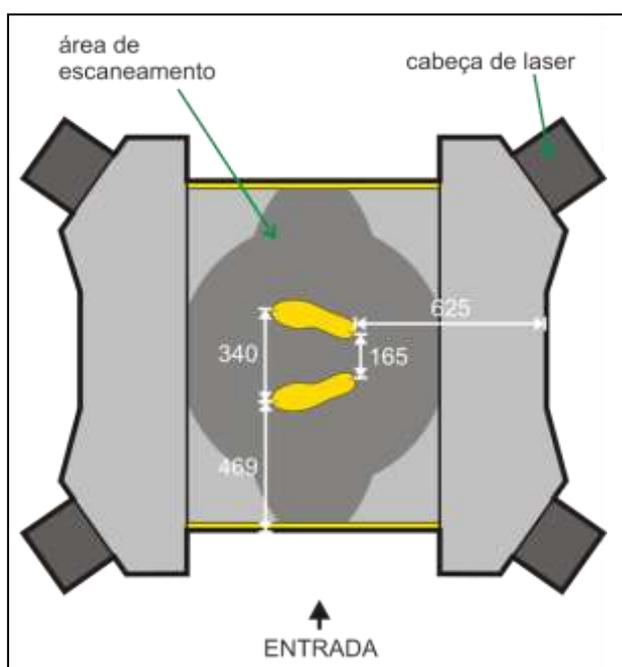


Figura 75: Posicionamento dos pés do voluntário (em amarelo) na plataforma de escaneamento do WBX (cotas em mm).



Logo após o escaneamento no WBX, foram realizadas 12 sessões no MHT, a fim de capturar toda a superfície do tronco, movimentando o *scanner* em torno do voluntário. A cada intervalo, o espaçador de punho era reposicionado para manter a mesma posição do braço. Os pés foram afastados conforme a marcação da figura

75. Nessa etapa o escaneamento foi realizado com o scanner fora do tripé, com a distância sendo medida pelo software do scanner (figura 56) – normalmente entre 600 e 800 mm.

Terminadas as sessões de escaneamento, foram realizadas seis medições no voluntário com um antropômetro que posteriormente seriam comparadas com medidas retiradas virtualmente nos *scans* por meio do *software* Rhinoceros. A medida bi-crista íliaca, como se encontra nas extremidades externas do tronco, foi a única realizada subtraindo a altura dos dois marcadores (figura 76). As medidas retiradas e seus resultados são mostrados na tabela 11 a seguir.

Figura 76: Desenho com a vista lateral do marcador trapezoidal e suas medidas em mm.

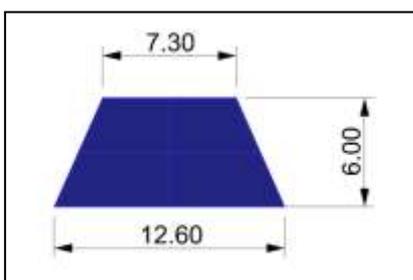


Figura 77: Resultado do *scan* do voluntário realizado pelo scanner WBX, com seta indicando o marcador ausente na malha poligonal.

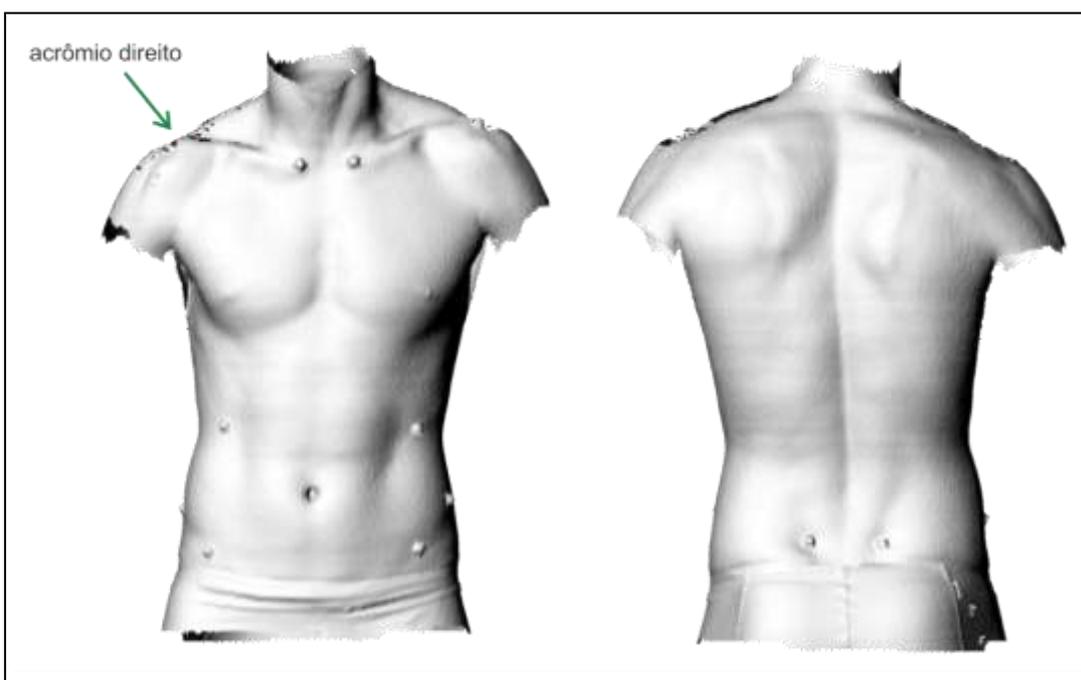


Figura 78: Resultado do *scan* do voluntário realizado pelo scanner MHT, com setas indicando os marcadores ausentes na malha poligonal.

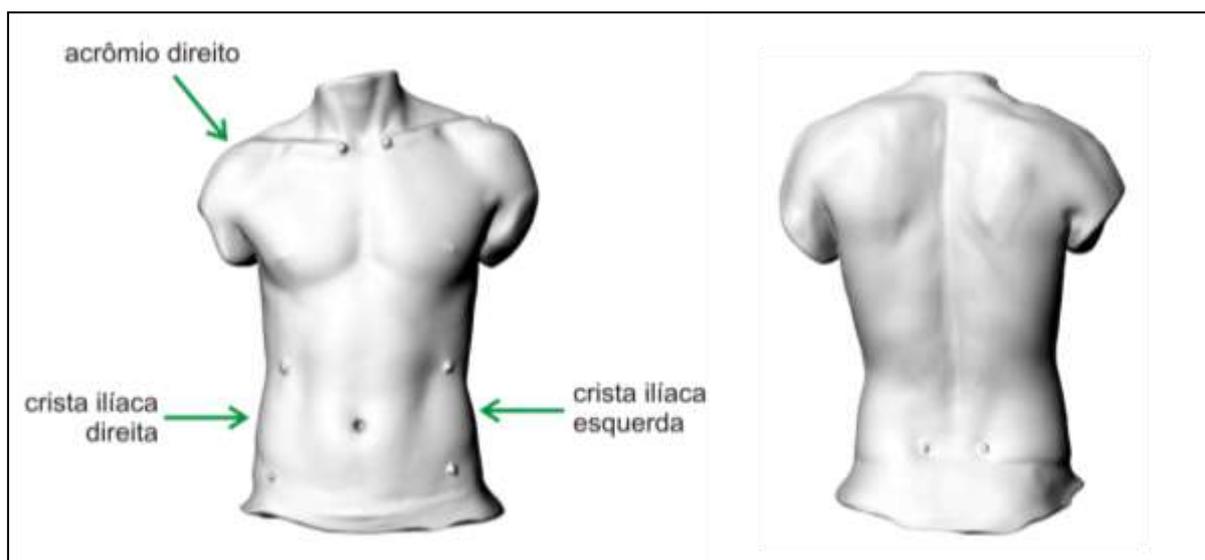


Tabela 11 – Resultados das medições realizadas em um voluntário com antropômetro, WBX e MHT.

Medida	Antropômetro (mm)	Scanner Cyberware WBX (mm)	Scanner Artec MHT (mm)
Bi-acromial	355,00	-	354,05
Bi-clavicular medial	51,00	61,12	60,36
Bi-décima costela torácica	220,00	223,40	224,26
Bi-crista ilíaca	295,00	302,26	-
Bi-espinha ilíaca	234,00	244,08	243,08
Bi-espinha ilíaca posterior	75,00	84,79	84,13

A medida bi-acromial no WBX foi impossibilitada, pois a malha dos dois marcadores não foi gerada. Já no MHT, a mesma medida foi tirada com incerteza, devido a uma deformação na malha poligonal do marcador direito. Outro problema de captura da forma ocorreu no MHT com os marcadores indicativos das cristas ilíacas esquerda e direita, a malha dos dois marcadores não foi gerada – impossibilitando a retirada de medidas. O valor encontrado da bi-crista ilíaca no

WBX foi 314,26 mm, subtraindo-se 6 mm de altura dos marcadores direito e esquerdo, chegou-se ao valor de 302,26 mm.

Assim como no caso do scan do manequim, observa-se um erro absoluto para os dois tipos de scanners, sumarizado na tabela 12 a seguir:

Tabela 12 – erro absoluto das medições realizadas em um voluntário

Medida	Scanner Cyberware WBX (mm)	Scanner Artec MHT (mm)
Bi-acromial	-	0,95
Bi-clavicular medial	10,12	9,56
Bi-décima costela torácica	3,4	4,26
Bi-crista ilíaca	7,26	-
Bi-espinha ilíaca	10,08	9,08
Bi-espinha ilíaca posterior	9,79	9,13

A variância dos erros absolutos da tabela 10 é de 23,8 mm, o que sugere uma faixa de incerteza maior para os valores obtidos. Pode-se atribuir este aumento do erro a movimentos executados pelo voluntário durante o processo de escaneamento, mas de qualquer maneira os resultados são semelhantes para ambos os scanners.

Portanto, não há diferença significativa entre o desempenho dos scanners no que diz respeito à precisão. As principais diferenças ainda são em relação a funcionalidades dos equipamentos, como mostrado na tabela 13, a seguir.

Tabela 13 – Resultados das comparações em relação às malhas poligonais obtidas nos testes comparativos

Scanner Cyberware WBX	Scanner Cyberware MHT
Processo de escaneamento rápido	Processo de escaneamento dividido em etapas
Merge ⁸ automático	Merge semi-automatizado
Malha rugosa em relação à gerada pelo MHT	Malha mais lisa em relação à gerada pelo WBX
Diferentes velocidades de escaneamento	Velocidade de escaneamento única
Sistema fixo	Sistema portátil
Menor deformação na captura de depressões	Maior deformação na captura de depressões

⁸ União das faces capturadas em um único scan.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos na avaliação do manequim e do voluntário, concluiu-se que a magnitude do erro absoluto é semelhante para ambos os scanners, e permanece constante independentemente das dimensões sob análise. Isto leva a erros relativos maiores para estruturas anatômicas de pequenas dimensões. Para testes com manequim a variância do erro absoluto foi de 3,5 mm, e para testes com voluntários foi de 23,8 mm.

Essa diferença pode ser atribuída à movimentação do voluntário, mesmo durante o escaneamento no WBX, que permitia um escaneamento em 17 segundos. A princípio, intervalos de escaneamento menores sugerem uma malha menos suscetível a movimentações do objeto. No entanto, intervalos menores podem sacrificar a resolução da malha devido à influência de ruído não-determinístico no processo de aquisição.

O voluntário escaneado é um atleta com baixo índice de gordura corporal e, devido ao seu treinamento físico, possui maior coordenação muscular e nervosa para permanecer em posição estática durante períodos longos. A partir dessa informação, duas possibilidades de estudos futuros são propostas: com idosos, que na maioria dos casos tem menor estabilidade postural e pessoas obesas, com mais regiões de áreas oclusas no corpo.

Faz-se necessária a realização de testes para analisar essa diferença de valores de erro absoluto registrado, principalmente em indivíduos idosos, que costumam ter menor estabilidade em postura estática. Indo mais além, em relação ao escaneamento de pessoas obesas ou idosas, no qual a conformação corporal seja de pele flácida e/ou com alto percentual de gordura, espera-se que a dificuldade na captura dos marcadores e na retirada de algumas medidas aumente ainda mais a margem de erro.

Além disso, nos testes realizados, os dois sistemas apresentaram resultados semelhantes em relação à extração de medidas, no entanto são equipamentos bem diferentes entre si. O escaneamento com um grande número de pessoas, como em pesquisas antropométricas com um único *scanner* Artec MHT não é recomendado, uma vez que a captura de toda a superfície do corpo demora alguns minutos – o que demanda muito tempo se for levado em consideração um maior número de

indivíduos. Recomenda-se o estudo da captura com mais de uma unidade do *scanner* Artec MHT ou similar.

Sessões com múltiplos scanners evitam a captura de partes do corpo a cada escaneamento, conforme foi realizado nos estudos aqui contidos. Posicionar quatro equipamentos ou mais, diminuiria significativamente o tempo de captura e resultaria em uma malha poligonal mais densa do que a malha obtida no *scanner* Cyberware WBX, mesmo em sua configuração de escaneamento mais lenta.

O MHT, por ser um sistema portátil, possibilita sua aproximação às áreas do corpo com regiões de difícil captura tornando-o particularmente interessante para capturar partes do corpo como mãos, dedos e pés, que dificilmente são capturados em sistemas robustos como o scanner WBX.

No Brasil, as únicas pesquisas antropométricas disponíveis são tradicionais. É recomendável, portanto, a realização de novas pesquisas antropométricas 3D da população brasileira. Idealmente, pesquisas antropométricas devem ser realizadas a cada 10 anos para verificar mudanças no perfil antropométrico da população. (ROEBUCK Jr., 1995). Para tanto, é necessário frisar que só é possível comparar dados de igual natureza. Pesquisas antropométricas 3D com dados 1D extraídos automaticamente não devem ser comparados com dados 1D de pesquisas tradicionais. Portanto, seria recomendável que novas pesquisas antropométricas coletassem dados 1D retirados manualmente, com equipamentos tradicionais e dados 3D, retirados através de *scanners*.

Desta forma os dados obtidos possibilitarão a oportunidade de pesquisar a variabilidade da forma brasileira, já que enquanto dados unidimensionais disponibilizam informação sobre o tamanho, dados tridimensionais disponibilizam informações sobre a forma humana como: volumes, posicionamentos, contornos e posturas.

A aplicação desses dados possibilitaria a produção de artigos industriais mais adequados às características da população brasileira: melhores produtos, roupas, equipamentos de proteção individual, bem como melhores cadeiras e postos de trabalho. Esse estudo antropométrico fornecerá parâmetros para a construção de equipamentos e sistemas customizados em curto prazo de tempo, bem como reduzirá significativamente o custo do seu *design* e manufatura. Principalmente no caso de produtos para o Mercado interno.

Além disso, pontos específicos devem ser considerados no caso de produtos para exportação, fazendo com que sejam mais competitivos no mercado internacional. Essa base de dados pode ser entendida como uma base fundamental para o sistema normativo, já que caracteriza a variabilidade das pessoas e o que isso significa em relação ao custo efetivo do *design* de todos os produtos com os quais as pessoas interagem.

REFERÊNCIAS

3DSCANCO. Disponível em: <<http://www.3dscanco.com/about/3d-scanning/index.cfm>>. Acesso em: 22 de ago. de 2012.

ARTEC 3D. **Scanner Artec MHT**. Disponível em: <<http://www.artec3d.com/>>. Acesso em: 22 de ago. de 2012.

AÑEZ, Ciro Romelio Rodriguez. **Antropometria na ergonomia**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2000. Disponível em: <<http://www.profala.com/artto20.pdf>>. Acesso em: 07 de out. de 2012.

BATISTA, Denise Silva; PEREIRA, Fernando Reizel. **Métodos de captura da forma 3D e vantagens no uso dos modelos humanos 3D em estudos ergonômicos**. In: International Symposium on Occupational Safety and Hygiene, 2013, Guimarães. Occupational Safety and Hygiene – SHO2013. Vila Nova de Gaia: Sociedade Portuguesa de Segurança e Higiene Ocupacionais, 2013. p. 46-47.

BATISTA, Denise Silva; STREIT, Priscilla; FREITAS, Sydney. **The introduction of new Technologies in design – a Brazilian perspective**. In: International Conference for Design Education Researches, II, 2013, Oslo. Booklet of the 2nd International Conference for Design Education Researches. Oslo: Hogskolen I Oslo og Akershus, 2013. p. 57.

BELLOCCHIO, Francesco. **Online hierarchical models for surface reconstruction**. 2010. 185f. Tese de doutorado - Università Degli Studi di Milano, Milão, 2010. Disponível em: <<http://air.unimi.it/handle/2434/155492>>. Acesso em: 04 de mar. de 2012.

BELLOCCHIO, Francesco; FERRARI, Stefano. **3D Scanner, State of the Art**. In: MALIK, A. S.; CHOI, T. S.; NISAR, H. (Org.). Depth Map and 3D Imaging Applications: Algorithms and Technologies. Hershey: IGI Global, 2012. p.451-470.

BOMBARDA, Sidney; SOARES JR, José; TERRA FILHO, Mário. **Estudo do metabolismo da glicose na tuberculose pulmonar ativa utilizando a tomografia por emissão de pósitrons (18F-FDG PET)**. 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jpneu/v28n5/a05v28n5.pdf>>. Acesso em: 05 de Nov. de 2012.

BOMBARDA, Sidney; Figueiredo Claudia Maria; Funari, Marcelo Buarque de Gusmão; SOARES JR, José; Seiscento, Márcia; Terra Filho, Mário. **Imagem em tuberculose pulmonar**. 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jpneu/v27n6/a07v27n6.pdf>>. Acesso em: 16 de out. de 2012.

BRADTMILLER, Bruce; GORDON, Claire C.; KOUCHI, Makiko; JÜRGENS, Hans W.; LEE, Young-Suk. **Traditional Anthropometry**. In: Delleman, Nico J.; Haslegrave, Christine M.; Chaffin, Don B. Working Postures and Movements – Tools for evaluation and engineering. Florida: Ed. CRC Press, 2004.

CAMARGO, Marcelo Antônio Ribeiro. **Geração de objetos virtuais a partir de imagens**. 2008. 66f. Dissertação de mestrado - Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, 2008. Disponível em:

<<https://www.unimep.br/phpg/bibdig/pdfs/2006/SYNYLYRJSQGY.pdf>>. Acesso em: 21 de ago. de 2012.

CARVALHO, Paulo Cezar; VELHO, Luiz; SÁ, Asla; MEDEIROS, Esdras; MONTENEGRO, Anselmo Antunes; PEIXOTO, Adailson; ESCRIBA, Luis Antonio Rivera. **Fotografia 3D**. Rio de Janeiro: 25º Colóquio Brasileiro de Matemática, 2005. Disponível em: <http://www.visgrafimpa.br/Data/RefBib/PS_PDF/f3d05/book-f3d-16mai05.pdf>. Acesso em: 03 de out. 2012.

CARD LAB; FORÇA AÉREA AMERICANA. **Projeto CAESAR**. Disponível em: <<http://store.sae.org/caesar/>>. Acesso em: 22 de ago. de 2012.

CELANI, gabriela; CANCHERINI, laura. **Digitalização tridimensional de objetos: um estudo de caso**. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~lapac/papers/celani-cancehrini-2009.pdf>>. Acesso em: 06 de out. de 2013.

CHAFFIN, Don B. **Digital Human Modeling for vehicle and workplace design**. Warrendale: Society of automotive Engineers, 2001.

CHANG, Shu.; WUHRER, Stefanie; PENCHENG, Xi. **Geometric and statistical methods for processing 3D anthropometric data**. Disponível em: <nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?action=rtdoc&na=18150450&Lang=em>. Acesso em 08 de abr. de 2013.

CHEN, Tongbo; SEIDEL, Hans-Peter; LENSCH, Hendrik P. A. **Modulated phase-shifting for 3D scanning**. 2008. Disponível em: <http://www.cis.rit.edu/~txcpci/cvpr08_modulation/cvpr08_modulation.pdf>. Acesso em: 15 de jul. de 2012.

CHENGALUR, Somadeepti N.; RODGERS, Suzanne. H.; BERNARD, Thomas E. **Kodak's Ergonomic Design for People at Work**. 2 ed. Somerset: Ed. John Wiley & Sons, 2004.

CYBERWARE. **Scanner WBX**. Disponível em: <<http://www.cyberware.com>>. Acesso em: 22 de ago. de 2012.

DAS, B.; SENGUPTA, A. K. **Computer-Aided Human Modelling Programs for Workstation Design**. Halifax: Technical University of Nova Scotia; 1995.

DELLEMAN, Nico J.; HASLEGRAVE, Christine M.; CHAFFIN, Don B. **Working Postures and Movements - Tools for evaluation and engineering**. Florida: Ed. CRC Press, 2004.

DISCOVERY. **Da Vinci na prática**. Disponível em:
<<http://discoverybrasil.uol.com.br/web/davinci/historia/Homem-Vitruviano/?cc=BR>>. Acesso em 20 de out. de 2013.

FRANCO, Adelton Napoleão; SILVA, José Carlos Plácido. **Antropometria estática de indivíduos da terceira idade**. In: PASCOARELLI, Luis Carlos; MENEZES, Marizilda dos Santos (Org.). Design e Ergonomia – aspectos tecnológicos. São Paulo: Editora Unesp, 2009. p. 55-72.

FREUDENRICH, Craig. **Como funciona a luz**. Disponível em
<ciencia.hsw.uol.com.br/luz12.htm>. Acesso em: 07 de jul. de 2012.

FUN, J.; YU, W.; HUNTER, L.; **Clothing appearance and fit: Science and technology**. Florida: Ed. CRC Press, 2000.

GARIB, Daniela Gamba; RAYMUNDO JR. Rubens; RAYMUNDO, Melissa Vasconcelos; RAYMUNDO, Denys Vasconcelos; FERREIRA, Sandrina Niza. **Tomografia computadorizada de feixe cônico (Cone beam)**: entendendo este novo método de diagnóstico por imagem com promissora aplicabilidade na Ortodontia. Maringá, 2007. Disponível em:
<<http://www.scielo.br/pdf/dpress/v12n2/18.pdf>>. Acesso em: 06 de jan. de 2013.

IIDA, Itiro. **Ergonomia – Projeto e Produção**. 8 ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1990.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA (INT). **ERGOKIT** - banco de dados antropométricos e biomecânicos da população brasileira. Rio de Janeiro: INT, 1995.

JUN-MING, Lu; MAO-JIUN, J. Wang. **Automated Anthropometric Data Collection Using 3D Whole Body Scanners**. Elsevier, 2007. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741740700259X>>. Acesso em: 12 jan. de 2013.

KALACHE, Lucas. **Sistema de medição da espessura da camada muscular e adiposa visa ultrassom**. 2007. 75f. Monografia - Centro Universitário Positivo, UNICENP/NCET, Curitiba, 2007. Disponível em:
<<http://www.leandrohsouza.com.br/engcomp/attachments/article/92/SISTEMA%20E%20MEDI%C3%87%C3%83O%20DA%20ESPESSURA%20DA%20CAMADA%20MUSCULAR%20E%20ADIPOSA%20VIA%20ULTRA-SOM.pdf>>. Acesso em: 26 de abr. de 2012.

KARPINSKY, Nicolaus; ZHANG, Song. **High-resolution, real time 3D imaging with fringe analysis**. 2010. Disponível em:
<<http://hanquier.m.free.fr/Worcester/references/Others%20papers/fringe%20projection/High-resolution,%20real-time%203D%20imaging%20with%20fringe%20analysis.pdf>>. Acesso em: 26 de fev. de 2013.

KILPELÄ, A. **Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications**. 2004. 96f. Dissertação de mestrado –

University of Oulu, Oulu, 2004. Disponível em:
<<http://herkules.oulu.fi/isbn9514272625/isbn9514272625.pdf>>. Acesso em: 21 de ago. de 2012.

KIRCHDÖRFER, E. RUPP, M. **Possibilities and capabilities of 3D body scanning systems for the purpose of risk assessment**. 2005. Disponível em: <
http://www.cefic-lri.org/uploads/modulextender/mclibrary/1202807741/documents/hetra_rfpc1.6_report.pdf>. Acesso em: 11 de set. de 2013.

KLEN, E. R. **Calibração de máquinas de medir por coordenadas utilizando placas de esferas** – uma técnica econômica, rápida e metrologicamente eficiente. 2000. 103f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

MADUREIRA, N. L. **A estatística do corpo – antropologia física e antropometria na alvorada do século XX**. Revista Etnográfica, vol. VII, 2003. Disponível em:
<http://ceas.iscte.pt/etnografica/docs/vol_07/N2/Vol_vii_N2_283-304.pdf>. Acesso em: 05 de dez. de 2012.

MAHMOOD, Muhammad Tariq; CHOI, Tae-Sun. **Combining focus measures for three dimensional shape estimation using genetic programming**. In: MALIK, Aamir Saeed; CHOI, Tae Sun; NISAR, Humaira. Depth Map and 3D Imaging Applications: Algorithms and Technologies. Hershey, IGI Global, 2012. p. 209-228.

MÉRIAUDEAU, Fabrice; FOFI, D.; RANTOSON, R.; MOHAMMED, I.; EREN, G.; MOREL, O.; SANCHEZ-SÉCADES, L.; STOLZ, C.; AUBRETON, O.; TRUSHETET, F.; BAJARD, A. **“Scanning from heating” and “Shape from fluorescence”**: two non-conventional imaging systems for 3D digitalization of transparent objects. In: MALIK, A. S.; CHOI, T. S.; NISAR, H. (Org.). Depth Map and 3D Imaging Applications: Algorithms and Technologies. Hershey: IGI Global, 2012. p. 229-243.

MOLENBROEK, J.; DE BRUIN, R. **Enhancing the use of anthropometric data**. S/d. Disponível em:
<http://www.io.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/IO/Over_de_Faculteit/Afdelingen/Industriële_Design/Sectie_Applied_Ergonomics_and_Design/Applied_Ergonomics_and_Design/Dynamic_Anthropometry/people/molenbroek/publications/doc/enhancing_anthropometry.pdf>. Acesso em: 10 de jan. de 2013.

MORI, S.; BARKER, P. B. **Diffusion Magnetic Resonance Imaging: It's Principle and Applications**. The anatomical Record, 257:102-109, 1999. Disponível em:
<http://www.nrc-iol.org/cores/mialab/fijc/files/2003/073003_susumu_anatomical_record_1999.pdf>. Acesso em: 08 de nov. de 2012.

NIKON METROLOGY NV. Disponível em:
<[http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Coordinate-Measuring-hines/LK-CMM-Technology/\(key_features\)>](http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Coordinate-Measuring-hines/LK-CMM-Technology/(key_features)>) . Acesso em: 27 de ago. de 2012.

PANERO, J. ZELNIK, M. **Las dimensiones humanas en los espacios interiores**.

s/d. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/63630168/Las-Dimensiones-Humanas-en-Los-Espacios-Interiores-Panero-Juan-Y-Zelnik>>. Acesso em: 26 de jan. de 2013.

PASTURA, Flávia C. Hofstetter. **Avaliação do uso do banco de dados antropométricos e biomecânicos ERGOKIT – DOS no desenvolvimento de produtos/postos de trabalho**. 2000. 103f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

PAYNE, A.; NIVEN, K. **Laser Scanning for archaeology – a guide to good practice**. Disponível em: <http://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/LaserScan_Toc>. Acesso em 11 de set. de 2012.

POSSEBON, E. **O modutor de Le Corbusier: forma, proporção e medida na arquitetura**. São Paulo, 2004. Disponível em:< <http://fmu.br/pdf/p68a76.pdf>>. Acesso em: 13 de set. de 2013.

RAZZA, B. M.; PASCHOARELLI, L. C. **Avaliação de forças de preensão digital: parâmetros para o design ergonômico de produtos**. PASCOARELLI, Luis Carlos; MENEZES, Marizilda dos Santos (Org.). Design e Ergonomia – aspectos tecnológicos. São Paulo: Editora Unesp, 2009. p. 73-96.

ROBINETTE, K. M.; DAANEN, H. **Lessons learned from CAESAR: a 3D Anthropometric Survey**. 2003. Disponível em: <<http://www.humanics-es.com/ASC031101.pdf>>. Acesso em: 27 de dez. de 2012.

RODRIGUES-CARVALHO, Claudia. **Os ossos não são o limite – Técnicas não-invasivas e remanescentes esqueléticos de populações pretéritas**. In: WERNER JR., Heron; SANTOS, Jorge Lopes (org.). Tecnologia 3D – paleontologia, arqueologia, fetologia. Rio de Janeiro: Ed. Revinter, 2009. p. 33-48.

ROEBUCK Jr., John A. **Anthropometric Methods: Designing to Fit the Human Body**. California: Human Factors and Ergonomics Society, 1995.

ROTHER-NEVES, M. **Técnica opto-eletrônica de medição de geometria 3D com interferometria de luz não-coerente**. 2001. 69f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em:<<http://www.posmci.ufsc.br/teses/mrn.pdf>>. Acesso em: 11 de set. de 2013.

SANCHES, I. J. **Sobreposição de imagens de termografia e ressonância magnética: uma nova modalidade de imagem médica tridimensional**. 2009. 168f. Tese de doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/125/1/CT_CPGEI_D_Sanches,%20Ioldo%20Jos%C3%A9_2009%20.pdf>. Acesso em: 11 de set. de 2012.

SANTOS, Venézia; ZAMBERLAN, Maria Cristina P. L.; PAVARD, Bernard. **Confiabilidade humana e projeto ergonômico de centros de controle de processos de alto risco**. Rio de Janeiro: Ed. Synergia, 2009.

SILVA, M. V. G.; TRANJAN, C. G.; SANCHOTENE, I. S.; NOGUEIRA, A. A. M.; **Estudo de soluções para visualização e simulações de projetos em virtual heritage**. Curitiba: Graphica, 2007. Disponível em: <http://www.degraf.ufpr.br/artigos_graphica/ESTUDODESOLUCOES.pdf>. Acesso em 11 de set. de 2012.

SMITH, R. B. **Introduction to Remote Sensing of Environment (RSE)**. Microlmages Inc., 2012. Disponível em: <<http://www.microimages.com/documentation/Tutorials/introrse.pdf>>. Acesso em: 11 de set. de 2013.

SIZECHINA. **A 3D Anthropometric Survey of the Chinese Head. 2011**. Disponível em: <<http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:2d038418-8923-4605-92e8-ca3df57ea731/ContentThesis.pdf>>. Acesso em: 18 de mar. de 2013.

SIZING UP AUSTRALIA. **How contemporary is the anthropometric data Australian designers use?** Austrália, 2009. Disponível em: <<http://www.safeworkaustralia.gov.au/sites/swa/about/publications/pages/PublicationsGroupedByAlpha?PublicationChar=S>>. Acesso em: 27 de dez. de 2012.

SONG, Peng; WU, Xiaojun. **Multi-view stereo reconstruction technique**. In: MALIK, A. S.; CHOI, T. S.; NISAR, H. (Org.). *Depth Map and 3D Imaging Applications: Algorithms and Technologies*. Hershey: IGI Global, 2012. p. 10-26.

SUKUMAR, S. R.; KOSCHAN, A. F.; ABIDI, M. A. **3D Imaging for mapping and inspection applications in outdoor environments**. In: MALIK, A. S.; CHOI, T. S.; NISAR, H. (Org.). *Depth Map and 3D Imaging Applications: Algorithms and Technologies*. Hershey: IGI Global, 2012. p. 121-140.

ULUPINAR, F.; NEVATIA, R. **Shape from contour: straight homogeneous generalized cylinders and constant cross section generalized cylinders**. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1995. Disponível em: <<http://iris.usc.edu/outlines/papers/1995/pami-ulupinar-95.pdf>>. Acesso em 11 de set. de 2013.

WANG, Min-Liang; LIANG, Sung-Chun; LIN, Huei-Yung. **3D Surface Reconstruction with an Image-Based Slicing Technique**. In: *Annual Conference of the IEEE, XXXIII, 2007, Taipei*. Taipei: Industrial Electronics, 2007. p. 2465 – 2469.

WERNER Jr., Heron; SANTOS, Jorge Lopes; FONTES, Ricardo C. **Tecnologias 3D virtuais e físicas aplicadas à medicina fetal**. In: WERNER Jr., Heron; SANTOS, Jorge Lopes (Org.). *Tecnologia 3D – paleontologia, arqueologia, fetologia*. Rio de Janeiro: Ed. Revinter, 2009. p. 113-121.

WESCHLER, M. **Como funciona o laser**. Disponível em <ciencia.hsw.uol.com.br/laser4.htm>. Acesso em: 07 de jul. de 2012.