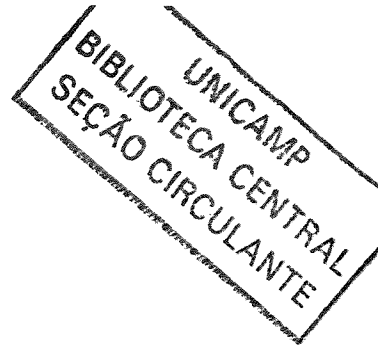


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA



200206514

**Desenvolvimento de uma Metodologia para Reconstrução
Tridimensional e Análise de Superfícies do Corpo Humano**

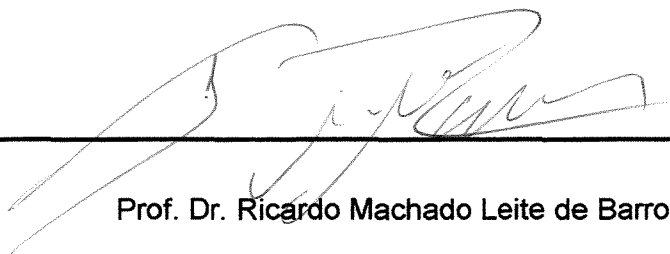
Autor: Paulo Ernesto Stipp Paterniani
Orientador: Ricardo Machado Leite de Barros

CAMPINAS, 2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA

**Desenvolvimento de uma Metodologia para Reconstrução
Tridimensional e Análise de Superfícies do Corpo Humano**

Este exemplar corresponde à redação final da dissertação de mestrado defendida por Paulo Ernesto Stipp Paterniani e aprovada pela Comissão Julgadora em 23/02/2001.



Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	P272d
V.	
TORÇ.	47552
PROC.	837/02
C	☐
D	☒
PREC.	R\$ 11,00
DATA	06-02-02
N.º CPD	

CM00163290-4

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL DA UNICAMP

P272d

Paterniani, Paulo Ernesto Stipp

Desenvolvimento de uma metodologia para reconstrução tridimensional e análise de superfícies do corpo humano / Paulo Ernesto Stipp Paterniani. -- Campinas, SP : [s.n.], 2001.

Orientador : Ricardo Machado Leite de Barros.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física.

1. Biomecânica – Metodologia. 2. Postura humana.
I. Barros, Ricardo Machado Leite de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Educação Física.
III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ricardo Machado Leite de Barros, pela dedicação e paciência na orientação deste trabalho.

Ao professor Euclides C. Lima Filho, pelos valiosos ensinamentos sobre matemática e estatística.

Ao professor René Brenzikofer, pelas observações sobre o texto e pelos conhecimentos transmitidos em aulas e seminários.

Ao professor Marcos Duarte, pela disposição em ler e sugerir correções ao trabalho.

Ao professor Sérgio Cunha, pelas correções sugeridas e pelo estímulo na realização desta dissertação.

Ao diretor e aos funcionários do Centro de Tecnologia (CT) da UNICAMP, pela elaboração de um modelo utilizado na avaliação da metodologia.

Aos professores e colegas da FEF – UNICAMP, pelos ensinamentos e pela amizade.

A meus pais e familiares, pelo apoio, carinho e compreensão.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia para reconstrução tridimensional e análise de superfícies do corpo humano. Este tipo de metodologia tem aplicações em análises posturais, estudos do movimento respiratório, entre outras.

A reconstrução tridimensional de superfícies do corpo é elaborada a partir da projeção estruturada de luz sobre a superfície a ser reconstruída, de modo a permitir a obtenção de um grande número de pontos de luz sobre a mesma. É efetuado o registro videográfico e estereoscópico da superfície sob esta projeção, digitalizando-se as imagens. Utilizando-se um *software* dedicado, faz-se a medição e a reconstrução tridimensional dos pontos sobre a superfície. É obtido então um plano de projeção conveniente sobre o qual os pontos reconstruídos são projetados ortogonalmente. Neste plano são obtidos o envoltório convexo e a triangulação dos pontos projetados. Para cada triângulo formado é determinado o triângulo correspondente no espaço tridimensional. Através da análise exploratória das medidas de área e perímetro deste último conjunto de triângulos, são identificadas as regiões entre o envoltório convexo e o contorno da superfície projetada. É então elaborada uma representação analítica da superfície na forma de uma função $w=f(u,v)$ avaliada apenas para pontos (u,v) localizados no interior do contorno da superfície projetada. Esta representação permite formas de análise da superfície tais como: a) estimativa de áreas, perímetros e distâncias sobre a superfície; b) obtenção de curvas de nível sobre a superfície; c) orientação da superfície pela determinação de vetores normais à mesma, entre outras.

Foram efetuadas três aplicações-teste da metodologia: 1) Foi reconstruída a superfície externa de um objeto cilíndrico. Os resultados desta aplicação indicaram uma acurácia satisfatória da metodologia na estimativa da área da superfície (erro percentual < 2%). 2) Foram reconstruídas as superfícies anterior e posterior de um modelo do tronco humano. A comparação das representações gráficas destas superfícies reconstruídas com o modelo indicou a potencialidade da metodologia na análise topológica e na orientação de superfícies do corpo humano. 3) Foi reconstruída a superfície posterior do tronco de um sujeito como uma avaliação da aplicação da metodologia em seres humanos. Utilizando-se as mesmas formas de análise da aplicação 2, foi confirmada a potencialidade da metodologia em análises posturais.

Conclui-se que a metodologia desenvolvida fornece uma representação fiel e detalhada de superfícies do corpo humano, possibilitando a obtenção de informações anatômicas e biomecânicas de interesse em estudos e análises do corpo humano.

Palavras Chave

Biomecânica , metodologia, superfícies, postura.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop a methodology for a three-dimensional reconstruction and an analysis of human body surfaces. This kind of methodology has application in studies of postural analyses and respiratory movements, among others.

A structured slide is projected onto the body surface. The surface under this projection is registered stereoscopically by video-cameras and this image is converted into an AVI (Audio / Visual Interleaved) file for computational processing. By using a dedicated software, the three-dimensional coordinates of a light points set on the surface are reconstructed. This set of points is then projected onto a convenient plane of projection. On this plane, the convex hull and the triangulation of the projected points are obtained. For each triangle formed on the plane, the corresponding triangle is determined on the three-dimensional space. Through an exploratory analysis of the area and the perimeter measures of this last set of triangles, the regions between the convex hull and the contour of the projected surface are identified. An analytical representation of the surface is prepared as a function $w=f(u,v)$, which is assessed just for the points (u,v) located in the contour of the projected surface. This representation allows kinds of surface analysis such as: a) an estimate of areas, perimeters and diameters on the surface; b) attainment of level curves on the surface; c) orientation of the surface by determining normal vectors at it.

Three application-tests of the methodology were conducted: 1) The external surface of a cylindrical object was reconstructed. The results of this application have indicated a satisfactory accuracy of the methodology in estimating the surface area (< 2% error). 2) Anterior and posterior surfaces of a human trunk model have been reconstructed. Matching the graphic representations of these reconstructed surfaces with

the model has indicated the potentiality of this methodology in the topological analysis and orientation of human body surfaces. 3) The posterior surface of a subject's trunk was reconstructed as an application assesment of this methodology in human beings. By using the same kinds of analysis as no. 2 application, the potentiality of this methodology in postural analysis was confirmed.

The results of this study show that the developed methodology provides a reliable and detailed representation of human body surfaces, enabling the obtainment of anatomical and biomechanical information for studies and analyses of the human body.

Key Words:

Biomechanics, methodology, surfaces, posture.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
OBJETIVO.....	6
ESTRUTURA DO TEXTO	6
CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
1.1 DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS ANALISADOS	9
1.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS TRABALHOS.....	12
CAPÍTULO 2: APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA.....	14
DIAGRAMA DE BLOCOS DA METODOLOGIA.....	16
2.1 SUPERFÍCIES COMO OBJETOS MATEMÁTICOS	17
2.1.1 CONCEITOS PRELIMINARES	17
2.1.2 ELEMENTOS DA TEORIA MATEMÁTICA DAS SUPERFÍCIES.....	18
2.2 O SISTEMA DE ANÁLISE 3D DE MOVIMENTOS.....	23
2.3 PROJEÇÃO ESTRUTURADA DE LUZ SOBRE A SUPERFÍCIE.....	24
2.4 REGISTRO DE IMAGENS	25
2.5 CAPTURA DE IMAGENS (CONVERSÃO ANALÓGICO - DIGITAL)	26
2.6 CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE	27
2.7 DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA ASSOCIADO À SUPERFÍCIE	29
2.8 REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE DO CORPO.....	32
2.8.1 REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE - INTERPOLAÇÃO SOBRE O ENVOLTÓRIO CONVEXO	33
2.8.2 REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DE SUPERFÍCIES COM REGIÕES CÔNCAVAS EM SUA PROJEÇÃO	34
2.9 FORMAS DE ANÁLISE DA SUPERFÍCIE	40
CAPÍTULO 3: RESULTADOS	41
3.1 APLICAÇÃO 1	42
3.1.1 PROJEÇÃO ESTRUTURADA DE LUZ SOBRE A SUPERFÍCIE.....	42
3.1.2 REGISTRO DE IMAGENS.....	43
3.1.3 CAPTURA DE IMAGENS.....	43

3.1.4	CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO 3D DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE.....	43
3.1.5	DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA ASSOCIADO À SUPERFÍCIE.....	44
3.1.6	REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE.....	45
3.1.7	ANÁLISE DA SUPERFÍCIE.....	47
3.1.7.1	CÁLCULO DA ÁREA DA SUPERFÍCIE.....	47
3.1.7.2	ESTIMATIVA DO RAIOS DO OBJETO CILÍNDRICO.....	48
3.2	APLICAÇÃO 2.....	52
3.2.1	PROJEÇÃO ESTRUTURADA DE LUZ SOBRE A SUPERFÍCIE.....	53
3.2.2	REGISTRO DE IMAGENS.....	53
3.2.3	CAPTURE DE IMAGENS.....	53
3.2.4	CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO 3D DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE.....	53
3.2.5	DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA ASSOCIADO À SUPERFÍCIE.....	54
3.2.6	REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE.....	54
3.2.7	ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES.....	58
3.3	APLICAÇÃO 3.....	61
3.3.1	PROJEÇÃO ESTRUTURADA DE LUZ SOBRE A SUPERFÍCIE.....	62
3.3.2	REGISTRO E CAPTURE DE IMAGENS.....	62
3.3.3	CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO 3D DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE.....	62
3.3.4	DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA ASSOCIADO À SUPERFÍCIE.....	62
3.3.5	REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE.....	62
3.3.6	ANÁLISE DA SUPERFÍCIE.....	63
CAPÍTULO 4: DISCUSSÃO		66
4.1	OBTENÇÃO DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE	67
4.2	REGISTRO DE IMAGENS.....	67
4.3	CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO 3D DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE.....	68
4.4	REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA E ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES.....	68
CONCLUSÕES		70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		73

INTRODUÇÃO

Na Biomecânica têm sido desenvolvidos e testados métodos para obtenção e tratamento de dados quantitativos para a descrição e análise de movimentos humanos. Estes métodos apresentam aplicações no contexto esportivo e em atividades artísticas, profissionais e cotidianas.

A metodologia apresentada nesta dissertação situa-se numa modalidade de análise quantitativa de movimentos humanos bastante difundida, a análise cinemática tridimensional de movimentos humanos baseada em videogrametria.

A abordagem do nosso problema principia com a caracterização da descrição cinemática do movimento de um corpo no espaço. A cinemática é a parte da Física que trata da “geometria” do movimento de um corpo, procurando obter relações entre as grandezas posição, velocidade e aceleração do corpo e o tempo em que ocorre o movimento (BEER e JOHNSTON, 1991).

Dentro da Biomecânica, a Cinemetria é a área de estudos metodológicos que trata da obtenção de variáveis cinemáticas com o objetivo de descrever e analisar o movimento humano. A fim de atingir este objetivo, é necessária a elaboração de um modelo do corpo humano. Destacamos a seguir dois modelos físicos bastante utilizados pela Cinemetria para a análise de movimentos humanos:

1- O modelo do ponto material:

Considera-se como ponto material, na Física, uma quantidade limitada de matéria cujas dimensões podem ser desprezadas. Isto não significa que o corpo considerado como ponto material tenha necessariamente dimensões muito pequenas em escala humana. Pode-se, por exemplo, analisar o movimento de foguetes ou aviões sem levar em consideração suas dimensões. Neste tipo de análise, interessa apenas o movimento do corpo como um todo, não sendo considerado o movimento relativo de suas partes.

Em análises biomecânicas, um exemplo de utilização deste tipo de modelo ocorre na análise de uma corrida de 100 metros rasos com o objetivo de obter-se a variação da velocidade de um atleta ao longo do percurso. Neste caso, pode ser

de interesse considerar o corpo do atleta como um ponto material. A localização deste ponto poderia ser estimada e medida através da colocação de sensores a intervalos determinados do percurso. Medindo-se o tempo da passagem do atleta pelo local de cada sensor é possível obter uma estimativa da velocidade média do atleta em cada intervalo considerado.

Há casos, porém, em que é de interesse levar em consideração as dimensões do corpo humano ou de partes do mesmo. Isto ocorre, por exemplo, quando se quer descrever variações de angulações e rotações de membros humanos em movimentos como a marcha. Aplica-se, então, um segundo modelo físico:

2- O modelo de corpos rígidos:

Pode-se definir um corpo rígido como um sistema formado por um conjunto de partículas cujas posições relativas permanecem fixas durante o movimento do corpo (SYMOM, 1986).

Os movimentos possíveis de um corpo rígido são:

- a) translação (retilínea ou curvilínea em relação ao referencial).
- b) rotação em torno de um eixo.
- c) diversas combinações de translações e rotações, denominadas *movimento geral*.

Na análise cinemática de movimentos humanos tais como a marcha e os saltos é freqüente a representação do corpo humano como um conjunto de segmentos articulados, onde cada segmento (um membro do corpo, por exemplo) é considerado como um corpo rígido.

Análises deste tipo são realizadas com sucesso por meio de sistemas videogramétricos de análise cinemática de movimentos humanos, através dos procedimentos gerais descritos a seguir.

A elaboração de um modelo de segmentação e representação do corpo humano como um sistema de corpos rígidos articulados é efetuada, em geral, a partir da fixação de marcadores a determinados acidentes anatômicos de cada

segmento a ser considerado. Estes marcadores devem ser identificáveis pelo sistema de análise cinemática, a fim de ser possível a reconstrução tridimensional de pontos correspondentes aos mesmos.

Efetua-se o registro videográfico estereoscópico do sujeito em movimento e de marcas com coordenadas conhecidas que permitam a determinação de um sistema de referência tridimensional nas imagens. A partir deste registro, é efetuada a calibração das câmeras e a medição e reconstrução tridimensional de pontos que representam os marcadores de interesse.

A calibração das câmeras consiste na obtenção dos parâmetros da matriz de transformação que relaciona as coordenadas do espaço objeto (tridimensional) com as coordenadas do espaço imagem (bidimensional) num dado sistema de referência.

A medição dos pontos que representam os marcadores de interesse consiste na obtenção das coordenadas bidimensionais (relativas ao referencial da imagem) dos mesmos em cada *frame* da seqüência de imagens registrada.

Através da matriz de transformação obtida com a calibração das câmeras pode-se relacionar as coordenadas do referencial do objeto (tridimensional) com as respectivas coordenadas nos referenciais-imagem (bidimensionais). Assim, efetua-se a reconstrução tridimensional das coordenadas dos pontos que representam os marcadores em cada *frame* da seqüência de imagens.

A partir deste conjunto de pontos pode ser construída uma representação analítica aproximada de cada segmento do modelo em cada *frame* da seqüência de imagens. Um dado segmento pode ser representado, por exemplo, pelo vetor-diferença entre dois pontos reconstruídos neste *frame*.

De posse desta representação, é possível a análise das posições e orientações relativas dos segmentos, além de suas variáveis derivadas (velocidade e aceleração), no movimento estudado. É possível também estimar a trajetória de pontos anatômicos durante o movimento, considerando-se que os marcadores estão fixados a estes pontos.

A análise cinemática de movimentos humanos baseada no modelo de segmentos rígidos articulados é uma metodologia consolidada na pesquisa em Cinemetria e em aplicações clínicas e esportivas.

Contudo, existem situações em que os pressupostos dessa forma de análise não são aplicáveis ou representam uma grande limitação na obtenção de informações. O modelo baseado em segmentos rígidos articulados não é aplicável, por exemplo, em situações onde o segmento de interesse deforma-se consideravelmente durante o movimento e é de interesse a análise desta deformação.

Há também determinadas situações em que, a fim de descrever-se detalhadamente as características de um dado segmento corporal, é necessária uma grande densidade de pontos reconstruídos tridimensionalmente sobre o mesmo.

Casos semelhantes a estes podem ser abordados a partir da utilização de um modelo de representação do corpo humano ou de um segmento do corpo como um corpo deformável. Esta deformação poderia ser estudada através de uma representação analítica da superfície exterior do segmento efetuada a intervalos determinados do movimento.

A análise cinemática ou a reconstrução tridimensional de segmentos do corpo humano considerados como corpos deformáveis podem também ser abordadas a partir de técnicas videogramétricas. Isto pode ser realizado, por exemplo, a partir da projeção, sobre a superfície a ser analisada, de uma imagem estruturada que permita a obtenção de uma grande densidade de pontos de luz sobre a superfície.

São efetuados a seguir os procedimentos necessários à reconstrução tridimensional de pontos associados a esses pontos de luz, de modo semelhante ao descrito para o modelo anterior.

Obtido este conjunto de pontos, pode-se então construir uma representação analítica da superfície em cada *frame* da seqüência de imagens. Esta representação pode ser elaborada, por exemplo, através do ajuste de uma função matemática sobre o conjunto de pontos reconstruídos neste *frame*. De posse

dessa representação é possível, então, analisar detalhadamente a forma da superfície bem como a sua deformação durante a movimentação do sujeito.

Considerando, portanto, que um modelo do corpo humano ou de partes do corpo como superfícies deformáveis possibilita a obtenção de informações anatômicas e biomecânicas de interesse, definimos o seguinte objetivo para este trabalho:

OBJETIVO:

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para reconstrução tridimensional e análise de superfícies do corpo humano e integrá-la ao sistema de análise cinemática tridimensional de movimentos humanos DVIDEOW, desenvolvido no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica (LIB) da Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas.

ESTRUTURA DO TEXTO:

Esta dissertação está estruturada da seguinte maneira:

Nesta introdução, apresentamos de maneira sucinta o tema da análise biomecânica de movimentos humanos e contextualizamos a pesquisa por nós realizada como uma contribuição a este tipo de análise.

No primeiro capítulo, apresentamos uma revisão bibliográfica, analisando trabalhos que apresentam proximidade com a presente pesquisa em termos de objetivos e metodologia.

No segundo capítulo, descrevemos detalhadamente a metodologia elaborada, especificando os procedimentos adotados em cada etapa da metodologia e efetuando uma relação entre estes e as bases teóricas que os sustentam.

No terceiro capítulo, apresentamos, como resultados desta dissertação, três aplicações da metodologia que nos possibilitaram a avaliação de sua aplicabilidade na reconstrução e análise de superfícies do corpo humano.

No quarto capítulo, apresentamos a discussão dos resultados, comentando as medições e avaliações realizadas e confrontando-as com resultados analisados na revisão bibliográfica.

Na última parte apresentamos as conclusões da dissertação, retomando o objetivo proposto e destacando as características mais importantes da metodologia desenvolvida.

CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nosso objetivo, neste capítulo, foi revisar artigos científicos que apresentassem metodologias para medição, representação ou análise de superfícies do corpo humano. Embora nosso interesse recaia especificamente em métodos que utilizam técnicas videogramétricas, é importante observar que outros tipos de procedimentos também podem ser utilizados com sucesso.

Como exemplo, citamos um método de análise da superfície facial humana desenvolvido por MILLES et al. (1985, apud DUNN et al., 1989). Neste método foi utilizado um instrumento eletromecânico denominado pletismógrafo facial, no qual um “braço sensor” percorre a superfície facial no sentido horizontal. A posição deste braço é registrada por transdutores eletro-mecânicos e os sinais elétricos resultantes são utilizados na obtenção de curvas sobre a superfície facial.

Descrevemos a seguir cinco artigos analisados que foram importantes para o planejamento e a avaliação da metodologia por nós desenvolvida:

1.1-DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS ANALISADOS:

FERRIGNO et al. (1994) apresentam uma metodologia para análise do movimento respiratório do tronco humano. No modelo utilizado pelos autores, o volume total do tronco é aproximado por um conjunto de poliedros cujos vértices são representados por marcadores fixados sobre a superfície anterior e posterior do tronco. Estes marcadores são reconstruídos tridimensionalmente através do sistema de análise cinemática de movimentos humanos ELITE, descrito em FERRIGNO et al. (1990).

Os autores filmaram diferentes manobras respiratórias de diversos sujeitos, calculando variações de volumes do tórax e do abdome. A acurácia do método na obtenção do volume do tronco humano é avaliada por diferentes formas, como por exemplo pela comparação de medidas de volume do tronco obtidas pela análise tridimensional com a medida do volume do ar inspirado obtida por espirometria.

Em ANDREONI et al. (1997), é descrita uma técnica de representação da superfície posterior do tronco humano. O interesse principal, aqui, é a obtenção da

forma tridimensional da superfície do tronco a fim de utilizá-la como parâmetro para a confecção de assentos.

A metodologia desenvolvida pelos autores utiliza-se do escaneamento da superfície por um feixe de laser infra-vermelho movimentado manualmente. Esse procedimento projeta pontos de luz infra-vermelha sobre a superfície que são reconhecidos pelo sistema ELITE de análise tridimensional de movimentos humanos. Sobre o conjunto dos pontos reconstruídos é ajustada uma função que representa aproximadamente a superfície posterior do tronco humano.

Em DUNN et al. (1989) são apresentados exemplos de aplicações da reconstrução tridimensional de superfícies humanas, como o interesse de cirurgiões plásticos por um método seguro e preciso de representação e análise de superfícies do rosto humano, a medição de áreas do corpo lesionadas por queimaduras, entre outros.

O método de análise de superfícies apresentado neste artigo é baseado numa técnica semelhante à videogrametria denominada "*rasterstereography*". Enquanto na videogrametria são necessárias pelo menos duas câmeras, na "*rasterstereography*" uma das câmeras é substituída por um projetor de *slides*, o qual deve ser calibrado de modo semelhante a uma câmera. O *slide* projetado utilizado pelos autores contém um padrão de linhas e pontos que fornece um conjunto de marcas sobre a superfície de interesse.

É elaborado um método de processamento da imagem registrada, com um algoritmo para a detecção automática das marcas projetadas sobre a superfície. As coordenadas tridimensionais dessas marcas são obtidas, permitindo a representação da superfície e o cálculo da área correspondente.

Com relação a métodos de análise de superfícies do corpo humano, um artigo importante é o de FROBIN & HIERHOLZER (1982), que propõe um método de avaliação da forma da superfície posterior do tronco humano (reconstruída e representada através de videogrametria) através da obtenção de medidas de suas curvaturas superficiais.

As curvaturas superficiais são medidas matemáticas que, calculadas num ponto qualquer de uma função que representa a superfície, indica o quanto uma

região infinitesimal da superfície contendo o ponto dado desvia-se da forma plana. Na figura 1 são descritos os quatro tipos de curvaturas superficiais. Os autores defendem que as curvaturas superficiais são convenientes à comparação entre diferentes superfícies devido ao fato de serem medidas independentes do posicionamento do sistema de referência utilizado na reconstrução videogramétrica de pontos da superfície.

SHAPE	EXAMPLE	CLASS
	PLANE	PLANAR
	CYLINDER	PARABOLIC
	SPHERE	ELLIP-TIC
	SADDLE	HYPER-BOLIC

Figura 1: Esquema dos 4 tipos de curvaturas superficiais.

O trabalho que consideramos mais próximo da metodologia por nós desenvolvida é o de LEITE *et al.* (1999). Neste trabalho, também desenvolvido no LIB, é desenvolvida uma metodologia para análise de padrões respiratórios baseada na reconstrução e na análise da superfície do tronco humano.

A superfície a ser analisada é reconstruída a partir da fixação de marcadores em referências anatômicas do tronco. A seguir, os movimentos respiratórios dos sujeitos são registrados por câmeras de vídeo e a posição espacial dos marcadores na seqüência de imagens é obtida através do sistema DVIDEOOW.

A superfície do tronco é então representada para cada sujeito e em cada quadro da seqüência de imagens através do método de interpolação descrito em AKIMA (1978).

Através de análises de áreas parciais e totais das superfícies interpoladas, a metodologia permite a identificação de padrões respiratórios dos sujeitos.

1.2- ANÁLISE COMPARATIVA DOS TRABALHOS:

Discutimos e comparamos, a seguir, os procedimentos envolvidos nestes métodos:

Observamos que um dos itens em que há uma maior diversidade de procedimentos e, conseqüentemente, uma maior discussão sobre vantagens e desvantagens das diferentes soluções, é o procedimento para a obtenção de pontos sobre a superfície de interesse. Numeramos a seguir as três principais maneiras observadas para a obtenção desses pontos e discutimos seus fatores vantajosos e suas limitações:

1. Uso de marcadores afixados à pele do sujeito:

Este procedimento permite uma representação da superfície de um segmento do corpo, como indicado no artigo de LEITE et al. (1999). Porém, há uma restrição no número de marcadores que pode ser utilizado, o que causa a perda de detalhes da forma das superfícies.

2. Varredura da superfície através de feixes de *laser*: permite elevado nível de nitidez de pontos iluminados, mas requer um alto grau de imobilidade da superfície a ser reconstruída.

3. Projeção estruturada de luz sobre a superfície: apresenta maior facilidade e rapidez de operação, pequeno risco de lesões e baixo custo; porém, os pontos de luz possuem menor qualidade de foco e nitidez em relação aos obtidos com a projeção de *laser*.

Quanto ao registro da imagem, observamos o uso de câmeras de vídeo comuns e o uso de câmeras especiais (por exemplo, no sistema ELITE, as câmeras são receptoras de radiação infravermelha). Destacamos que o uso de câmeras especiais permite a obtenção de imagens de melhor resolução espacial. Contudo, o alto custo desses equipamentos representa um fator que dificulta a difusão da metodologia. Além disso, este procedimento requer cuidados para evitar a interferência de outras fontes emissoras de radiação infravermelha e não permite a obtenção de uma imagem em luz visível do sujeito em movimento.

Os procedimentos de medição de pontos sobre as imagens das superfícies, nos artigos analisados, envolvem o processamento das imagens por *softwares* que visam, por exemplo, a detecção automática de pontos de luz sobre a superfície e a perseguição automática de marcadores em seqüências de imagens.

Quanto a procedimentos de calibração, encontramos em geral métodos para a calibração de câmeras e um método onde é efetuada a calibração de uma câmera e de uma fonte de luz estruturada. Os resultados dos trabalhos sugerem uma grande semelhança dos dois tipos de procedimentos quanto à acurácia e complexidade de implementação.

Na representação analítica da superfície, observamos basicamente métodos de ajuste de uma função bivariada sobre os pontos reconstruídos. Em relação à análise das superfícies, constatamos diferentes formas de análise topográfica de superfícies, como, por exemplo, estimativas de áreas parciais e totais das superfícies e sua evolução temporal (LEITE *et. al.*, 1999) e a obtenção de medidas de curvaturas de superfícies (FROBIN & HIERHOLZER, 1982). Observamos que somente um dos trabalhos analisados (LEITE *et. al.*, 1999) analisa a evolução temporal de uma característica (a área) de uma superfície do corpo.

Retomando agora o objetivo de nosso trabalho, consideramos que, através desta revisão bibliográfica, obtivemos indicações adicionais da potencialidade de aplicações da metodologia proposta, bem como de idéias que nos foram importantes para o planejamento, a implementação e a avaliação da mesma.

CAPÍTULO 2: APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste trabalho de pesquisa tem como dados de entrada o registro videográfico estereoscópico da superfície a ser representada recoberta por uma projeção estruturada de luz.

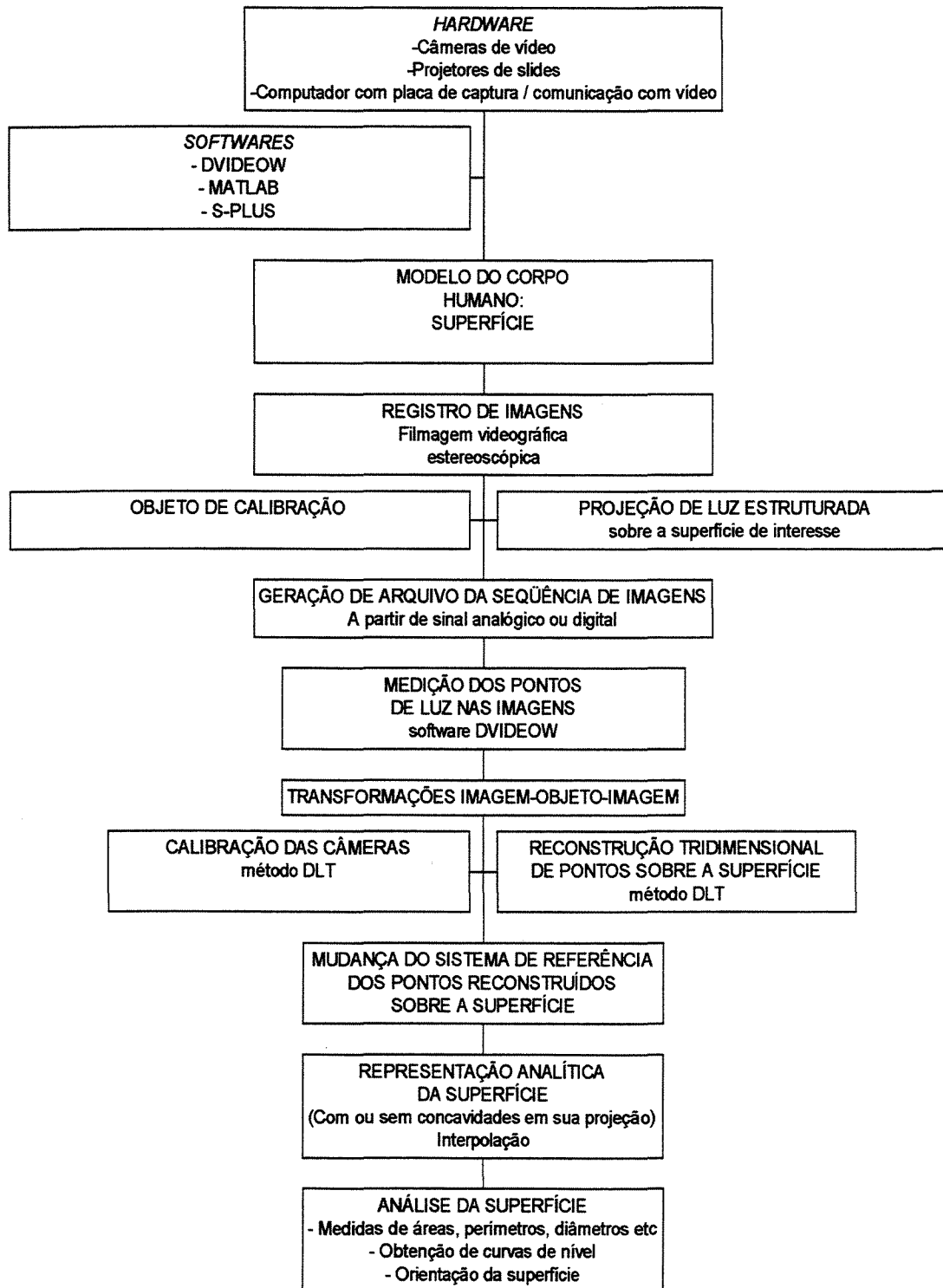
A imagem assim registrada é convertida em um sinal digital a fim de ser possível analisá-la e processá-la no *software* do sistema DVIDEOW. Através deste processamento, são efetuadas a calibração das câmeras e a medição e reconstrução tridimensional dos pontos de interesse na imagem.

A superfície é então representada analiticamente através de uma função ajustada sobre esses pontos. Como resultados (saídas) da metodologia, existem diversas formas possíveis de análise da superfície, como a estimativa de medidas de áreas, perímetros, distâncias entre pontos, a obtenção de curvas de nível, entre outras.

Os procedimentos adotados nesta metodologia estão sintetizados no esquema anexo (página 16) e são detalhados a seguir.

A fim de facilitar ao leitor a compreensão da metodologia, procuramos apresentar os procedimentos na mesma seqüência em que são executados em uma aplicação da mesma.

**METODOLOGIA PARA RECONSTRUÇÃO E ANÁLISE TRIDIMENSIONAL
DE SUPERFÍCIES DO CORPO HUMANO**



2.1- SUPERFÍCIES COMO OBJETOS MATEMÁTICOS:

Neste item, apresentamos alguns conceitos elementares sobre o objeto matemático denominado *superfície*, que é utilizado, na metodologia proposta, como uma representação analítica de superfícies do corpo humano.

2.1.1 – CONCEITOS PRELIMINARES:

Inicialmente abordaremos o conceito de produto vetorial, uma vez que a caracterização matemática de superfícies envolve este conceito. Este conceito pode ser abordado a partir de uma interpretação geométrica de determinantes de matrizes (COURANT & JOHN, 1974), como descrevemos a seguir.

Sejam os vetores $A = (a_1, a_2)$ e $B = (b_1, b_2)$ no $\mathbf{R}^2$. Tomando-se o determinante da matriz

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \quad (1)$$

obtemos como resultado o escalar $a_1b_2 - a_2b_1$. Pode-se demonstrar que o valor deste escalar corresponde ao valor da área do paralelograma gerado pelos vetores A e B.

Tomando-se três vetores $A = (a_1, a_2, a_3)$, $B = (b_1, b_2, b_3)$ e $C = (c_1, c_2, c_3)$ no $\mathbf{R}^3$, forma-se o determinante abaixo:

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} \quad (2)$$

Escrito em função do vetor C, este determinante é igual a

$$\det(A,B,C) = (a_2b_3 - a_3b_2)c_1 + (a_3b_1 - a_1b_3)c_2 + (a_1b_2 - a_2b_1)c_3$$

Esta soma representa o produto escalar entre os vetores **Z** e **C**, onde $Z = (z_1, z_2, z_3)$ é o vetor com coordenadas

$$\begin{aligned} z_1 &= a_2b_3 - a_3b_2 \\ z_2 &= a_3b_1 - a_1b_3 \\ z_3 &= a_1b_2 - a_2b_1 \end{aligned} \quad (3)$$

O vetor **Z** assim calculado é denominado o produto vetorial entre os vetores **A** e **B**. De modo semelhante ao determinante $a_1b_2 - a_2b_1$, de dois vetores no R^2 , pode-se demonstrar que o módulo do vetor **Z** corresponde ao valor da área do paralelograma gerado por **A** e **B** no espaço tridimensional. A direção do vetor **Z** é ortogonal aos vetores **A** e **B** e o seu sentido é dado pela convenção denominada “regra do saca-rolha” (positivo, se a rotação de **A** na direção de **B** pelo menor ângulo entre ambos for no sentido anti-horário e negativo, no caso contrário). Outra propriedade importante deste vetor **Z** é que o valor da coordenada $z_3 = a_1b_2 - a_2b_1$ do vetor **Z** corresponde ao valor da área deste paralelograma projetado no plano definido pelos vetores (a_1, a_2) e (b_1, b_2) .

2.1.2 – ELEMENTOS DA TEORIA MATEMÁTICA DAS SUPERFÍCIES:

A definição matemática geral de uma superfície **S** é a de um mapeamento no espaço R^3 de uma região **G** de um plano (u,v) . Como um exemplo, citamos a projeção estereográfica da esfera (figura 2), onde cada ponto **P** da esfera (com exceção do pólo norte, **N**) é associado a um único ponto do plano (u,v) através de uma linha reta passando por **N** e **P**. Reciprocamente, a cada ponto (u,v) do plano corresponde um único ponto sobre a superfície da esfera, caracterizando-se o mapeamento desta superfície.

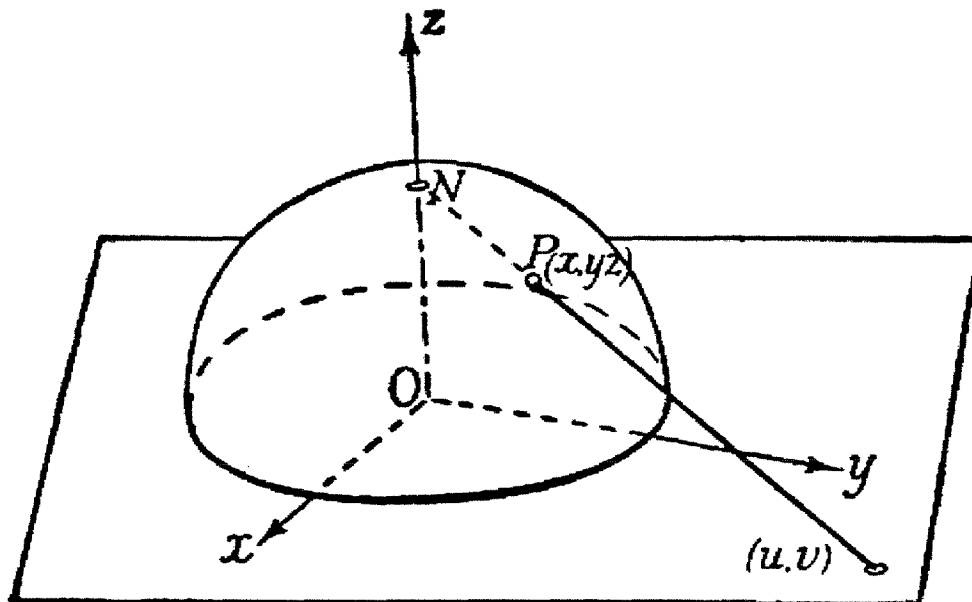


Figura 2: Projeção estereográfica da esfera.

O mapeamento de uma superfície sobre um plano (u,v) fornece a *representação paramétrica da superfície*, que pode ser explicada pelo seguinte raciocínio:

- 1- A cada ponto da região G do plano (u,v) corresponde um único ponto sobre a superfície.
- 2- Do mesmo modo, a cada curva $u(t)$ ou $v(t)$ sobre o plano (u,v) corresponde uma única curva sobre a superfície.
- 3- Pode ser obtida então uma *rede de curvas* sobre a superfície, denominadas *curvas paramétricas* sobre a superfície (figura 2).

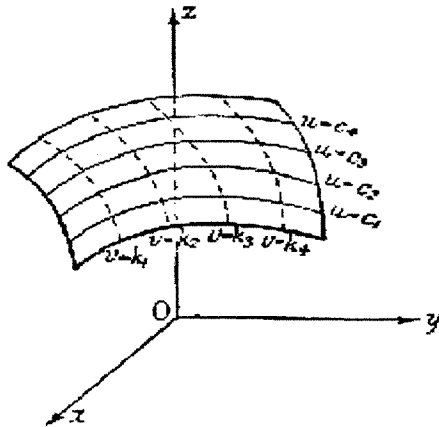


Figura 3: Curvas paramétricas $u = \text{constante}$ e $v = \text{constante}$.

- 4- Finalmente, a partir destas curvas construímos a representação paramétrica da superfície, dada pelo conjunto de equações abaixo:

$$\begin{aligned} x &= \phi(u, v) \\ y &= \psi(u, v) \\ z &= \chi(u, v) \end{aligned} \quad (4)$$

As três equações acima podem ser agrupadas numa única equação

$$S = H(u, v) \quad (5)$$

Onde $S = (x, y, z)$ é o vetor posição de um ponto sobre a superfície e H é o vetor

$$H(u, v) = (\phi(u, v), \psi(u, v), \chi(u, v)) \quad (6)$$

Um caso particular da representação paramétrica de superfícies ocorre quando o plano (u,v) corresponde ao plano X - Y . Esta situação é associada à representação da superfície em sua *forma implícita*, através das fórmulas $F(X,Y,Z)=0$ ou $Z=f(X,Y)$.

Para que as equações da representação paramétrica de superfícies realmente representem uma superfície e não uma curva no R^3 , impõe-se a seguinte restrição: tomando-se dois vetores representados pelas derivadas parciais dH/du e dH/dv em qualquer ponto P pertencente a S (ou seja, dois vetores de módulos arbitrariamente pequenos tangentes às curvas $H(u)$ e $H(v)$ em qualquer ponto P pertencente a S), o produto vetorial $dH/du \times dH/dv$ deve ser diferente de zero para todos os pontos sobre a superfície.

Sabemos que o produto vetorial entre os vetores dH/du e dH/dv é um vetor $\mathbf{O}$ partindo do ponto P cujo módulo é igual à área do paralelograma gerada por dH/du e dH/dv (figura 5). Uma vez que este paralelograma representa um ajuste local à superfície, podemos considerar a soma das áreas de cada uma destas figuras como uma aproximação da área total da superfície. Além disso, o vetor $\mathbf{O}$ é ortogonal aos vetores dH/du e dH/dv e, portanto, ao paralelograma gerado por ambos. Assim, podemos considerar o vetor $\mathbf{O}$ como um vetor ortogonal à superfície S no ponto P , o que fornece uma possibilidade de orientação da superfície.

Uma outra aplicação da definição de produto vetorial é a estimativa da área da superfície através da soma das áreas dos paralelogramas gerados por dH/du e dH/dv .

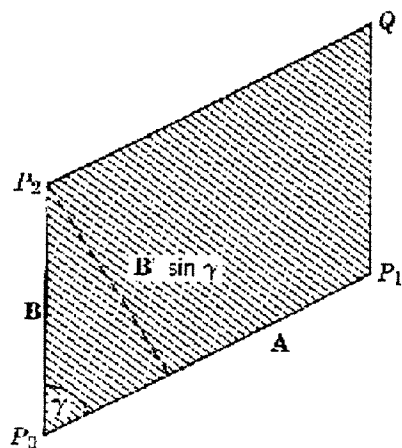


Figura 4: Área ($A \times B$) do paralelograma gerado por A e B.

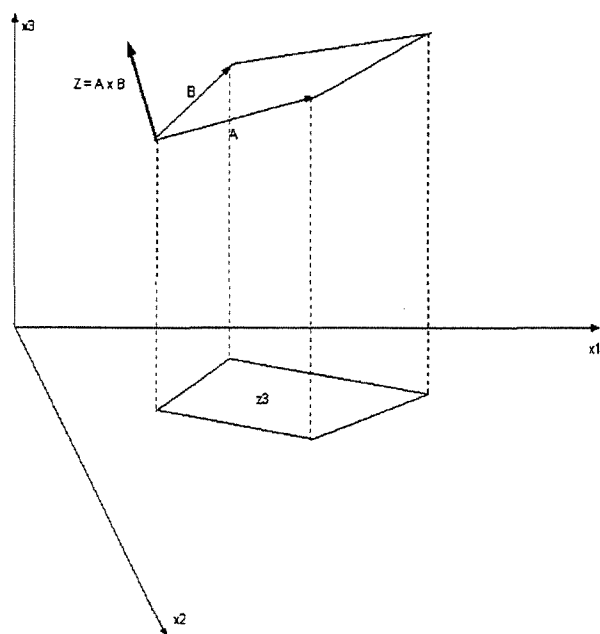


Figura 5: Produto vetorial $Z = A \times B$ como a área do paralelograma gerado por A e B. Podemos considerar, por exemplo, $A = dH/du$ e $B = dH/dv$.

2.2- O SISTEMA DE ANÁLISE 3D DE MOVIMENTOS:

Uma vez que o objetivo da metodologia desenvolvida envolve a sua integração ao sistema DVIDEOW, consideramos pertinente descrever aqui suas características básicas.

O sistema DVIDEOW é um sistema de análise cinemática tridimensional de movimentos humanos baseado no registro videogramétrico de imagens através de câmeras de vídeo analógicas ou digitais.

O sistema contém um *software*, também denominado DVIDEOW, no qual estão implementados os seguintes procedimentos:

1-Captura ou aquisição de imagens de vídeo.

Caso o registro de imagens tenha sido efetuado através de câmeras analógicas, é necessário efetuar a conversão analógico-digital das imagens. Isto é efetuado através de uma placa de captura de sinais analógicos de vídeo, com a geração de arquivos digitais correspondentes às seqüências de imagens. Caso as imagens tenham sido registradas por câmeras digitais, utiliza-se uma placa de comunicação de vídeo para a aquisição do sinal digital de vídeo gerado pela câmera, formando-se também arquivos digitais correspondentes às imagens.

2-Medição de pontos nas seqüências de imagens.

Efetuada através de métodos de processamento de imagens, em especial, os que utilizam morfologia matemática; permite a detecção e perseguição automáticas de pontos de interesse nas seqüências de imagens. Maiores detalhes sobre esses procedimentos podem ser encontrados em FIGUEROA et al. (1999).

3-Calibração de câmeras e reconstrução tridimensional dos pontos de interesse medidos no procedimento anterior.

Baseadas no método DLT (*Direct Linear Transformation*), desenvolvido por ABDEL-AZIZ e KARARA (1971).

A análise dos segmentos (em movimento ou não) representados a partir dos pontos reconstruídos é realizada através de rotinas desenvolvidas no LIB com o uso dos softwares S-PLUS e MATLAB.

O sistema DVIDEOW vem sendo continuamente utilizado e desenvolvido por um grupo de pesquisadores do LIB, constituindo-se, assim, tanto num instrumento como num objeto de pesquisa. A metodologia aqui apresentada também contribuiu para o desenvolvimento do sistema, propiciando o desenvolvimento de um novo tipo de detecção e designação automática de marcadores.

Em BARROS *et al.* (1999) são descritos maiores detalhes e exemplos de aplicações do sistema.

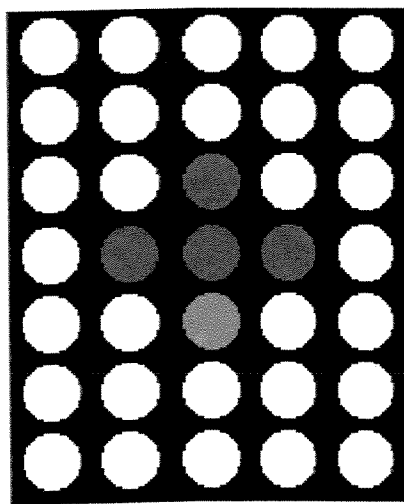
2.3 - PROJEÇÃO ESTRUTURADA DE LUZ SOBRE A SUPERFÍCIE:

A fim de realizar-se a representação tridimensional e a análise detalhada de uma superfície do corpo humano é necessária a obtenção de um grande número de pontos sobre a mesma. Para isto, utilizamos uma técnica de projeção de imagem estruturada que consiste na projeção, sobre a superfície de interesse, de um *slide* contendo um padrão de pontos brancos sobre um fundo preto (figura 6).

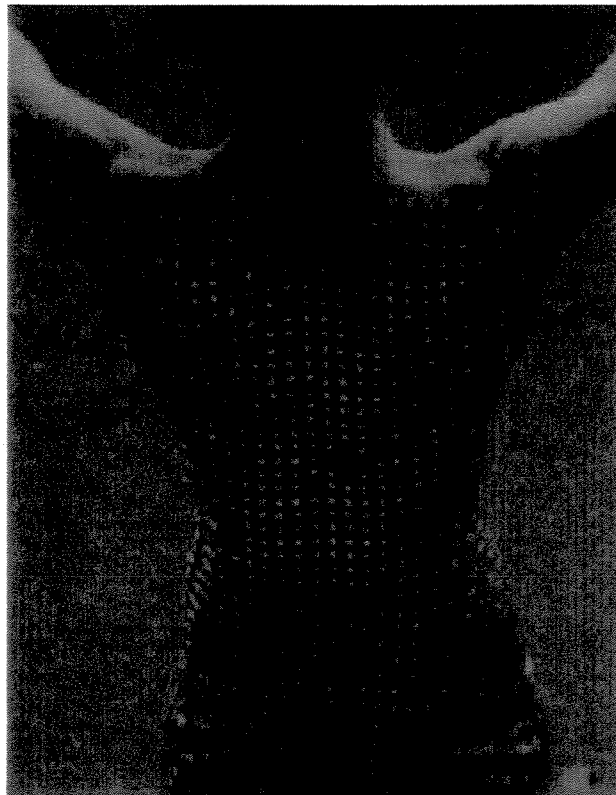
Deste modo, é possível obter uma grande densidade de pontos sobre a superfície (desde que esta não possua inflexões muito grandes), o que permitirá a descrição detalhada da mesma.

O planejamento do slide utilizado leva em consideração, além da obtenção de um grande número de pontos, a necessidade de identificação das marcas projetadas numa mesma sequência nas imagens de cada câmera; isto é necessário para o processo de reconstrução tridimensional de pontos utilizado.

A fim de possibilitar esta identificação utiliza-se, por exemplo, um código de cores no conjunto total de marcas, como pode ser observado na figura 6.



a)



b)

Figura 6: a) Exemplo de trecho de *slide* utilizado na metodologia desenvolvida. O tamanho dos pontos foi aumentado a fim de facilitar a visualização gráfica dos mesmos. b) Superfície posterior do tronco de um sujeito sob a projeção do mesmo *slide*.

2.4 - REGISTRO DE IMAGENS:

A preparação da filmagem da superfície a ser representada inclui a escolha e posicionamento de um objeto de calibração (cuja definição e função são dadas no item 2.6), das câmeras e dos projetores de slides.

O número de câmeras e projetores necessários e seu posicionamento é definido considerando-se que cada ponto a ser reconstruído precisa estar visível

por no mínimo duas câmeras. O enquadramento da superfície deve permitir uma resolução espacial suficiente para que os pontos projetados não se sobreponham.

A resolução espacial vertical de uma câmera pode ser estimada pela relação entre a altura do campo de visão da câmera, ajustável pelo enquadramento, e o número de linhas de registro da câmera (BARROS, 2000). Por exemplo, se uma região de interesse de 1 metro de comprimento vertical é enquadrada por uma câmera analógica S-VHS (400 linhas de resolução vertical), a resolução espacial vertical esperada será de 2,5 mm, ou genericamente 1/400. Isto significa que a menor distância vertical entre dois elementos de interesse, para aquele enquadramento, não deverá ser menor que esse valor.

Como a resolução espacial das câmeras é maior na direção horizontal do que na vertical, as câmeras devem ser alinhadas com a direção longitudinal do objeto. Devem ser ajustados o tempo de abertura da câmera e o foco deve ser fixado para a distância entre a câmera e o objeto durante o movimento de interesse. Em determinadas condições pode ser necessário efetuar ajustes como o controle de branco, a fim de obter um melhor registro de cores na imagem.

2.5 -CAPTURA DE IMAGENS (CONVERSÃO ANALÓGICO-DIGITAL):

A fim de ser possível o processamento das imagens no *software* do sistema DVIDEOW, as mesmas devem estar em formato digital. Caso a filmagem do objeto de calibração e do objeto de interesse tenha sido efetuada através de câmeras com registro analógico, é necessário proceder a uma conversão analógico-digital destas imagens. Isto é realizado através de uma placa de captura de sinais de vídeo, com a geração de arquivos digitais correspondentes às imagens.

A quantidade de dados que será armazenada neste arquivo digital depende de fatores como tamanho e nível de detalhes presentes na imagem. No processo de digitalização, é efetuada também uma compressão destes dados, ou seja, uma redução do tamanho do arquivo formado. A compressão pode ocorrer com ou sem

perda de informações e depende de determinados parâmetros do computador utilizado, como a velocidade de transmissão e de armazenamento de dados.

A qualidade da placa de captura e do computador utilizado influem, portanto, na qualidade final da imagem. Também por esta razão, é importante a utilização do menor enquadramento possível que englobe o objeto de calibração e a área de interesse, pois deste modo o espaço entre *pixels* da imagem digitalizada (que representa uma informação perdida no processo de digitalização) corresponde a uma menor distância no objeto ou no ambiente.

No caso de serem utilizadas câmeras digitais, o processo de conversão analógico – digital ocorre na própria câmera, através de um conversor A/D que, a partir de uma amostragem dos sinais de luminância e de cor, gera um sinal digital, o qual passa por um processo de compressão e gravação em fita magnética. Através de uma placa de comunicação de vídeo, os dados digitais são transmitidos da fita para um arquivo digital no computador.

As imagens digitalizadas e arquivadas são processadas no software DVIDEOW para a execução dos procedimentos de calibração das câmeras, medição e reconstrução tridimensional de pontos sobre a superfície.

2.6 - CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE:

Calibrar uma câmera significa obter os parâmetros da matriz de transformação que relaciona as coordenadas do espaço objeto (tridimensional) com as coordenadas do espaço imagem (bidimensional) num dado sistema de referência.

Em nossa metodologia, a calibração de câmeras é efetuada através do *software* do sistema DVIDEOW e é baseada no método DLT (Direct Linear Transformation), elaborado por ABDEL-AZIZ & KARARA (1971). O DLT é um dos métodos de calibração de câmeras mais utilizados em Biomecânica devido à sua acurácia e facilidade de implementação em *softwares*.

O método DLT enquadra-se nos métodos de calibração de câmeras que utilizam pontos de apoio, que são um conjunto de marcas representando pontos com coordenadas tridimensionais conhecidas. Estas marcas podem estar localizadas numa estrutura tridimensional denominada objeto de calibração. O conjunto de pontos de apoio determina um sistema de referência tridimensional, o qual será denominado aqui de sistema de referência do laboratório.

O primeiro passo para o procedimento de calibração de uma câmera pelo método DLT é a obtenção das coordenadas (x,y) de cada ponto de apoio no espaço imagem (bidimensional), o que é efetuado através do procedimento de medição destes pontos em um *frame* com a imagem dos pontos de apoio.

No método DLT, as coordenadas de um ponto no espaço imagem são relacionadas com as respectivas coordenadas tridimensionais através de duas equações com onze incógnitas (denominadas parâmetros de calibração). Portanto, são necessários no mínimo seis pontos para a calibração de uma câmera. Deste modo, temos um número maior de equações (12 ou mais) do que de incógnitas (11), o que fornece mais de uma solução para o conjunto de parâmetros. Efetua-se então uma otimização das soluções obtidas minimizando-se os resíduos através do método de quadrados mínimos.

Obtidos os parâmetros de calibração, pode-se fazer a reconstrução tridimensional de pontos projetados sobre a superfície de interesse através dos seguintes procedimentos:

Medem-se, em cada câmera, as coordenadas (x,y) de cada ponto projetado. Como são conhecidos os parâmetros de calibração da câmera, podem-se utilizar novamente as duas equações do método que relacionam as coordenadas de um ponto no espaço imagem com suas respectivas coordenadas tridimensionais. Desta vez, as incógnitas são as coordenadas X , Y e Z do ponto a ser reconstruído.

A fim de obtermos soluções para este novo sistema seria necessária no mínimo mais uma equação. Portanto, cada ponto a ser reconstruído deve ser medido nas imagens projetadas de, no mínimo, duas câmeras. Deste modo é obtido um sistema com duas incógnitas e, no mínimo, quatro equações, o que

fornece, novamente, mais de uma solução para o problema. Uma otimização das soluções possíveis deve então ser efetuada, como no procedimento de calibração.

A saída final desses procedimentos é um vetor de dados com as coordenadas X, Y e Z de pontos sobre a superfície em análise em relação ao sistema de referência baseado nas coordenadas medidas dos pontos de apoio. Este sistema de referência é denominado *referencial do laboratório*.

2.7 - DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA ASSOCIADO À SUPERFÍCIE:

Através dos procedimentos do item anterior é obtido um conjunto de pontos sobre a superfície do corpo, o que permite a elaboração de uma representação analítica aproximada desta superfície. Na metodologia aqui desenvolvida, esta representação é feita através da utilização de superfícies como objetos matemáticos, representadas na forma implícita por funções do tipo $Z=f(X,Y)$.

O cálculo desta função, que será detalhado no próximo item, é baseado na projeção dos pontos reconstruídos sobre o plano X – Y. Em vista disso, foi implementada à metodologia um procedimento de mudança do sistema de referência dos pontos reconstruídos de maneira a determinar o plano X – Y que maximiza o espalhamento dessa projeção. Este procedimento é importante para minimizar a deformação das distâncias e dos ângulos entre os vetores associados aos pontos, quando estes são projetados ortogonalmente sobre o plano.

Esta mudança de referencial, representada esquematicamente na figura 7, é obtida através da determinação dos eixos principais do conjunto de pontos reconstruídos e foi sistematizada numa rotina desenvolvida no LIB.

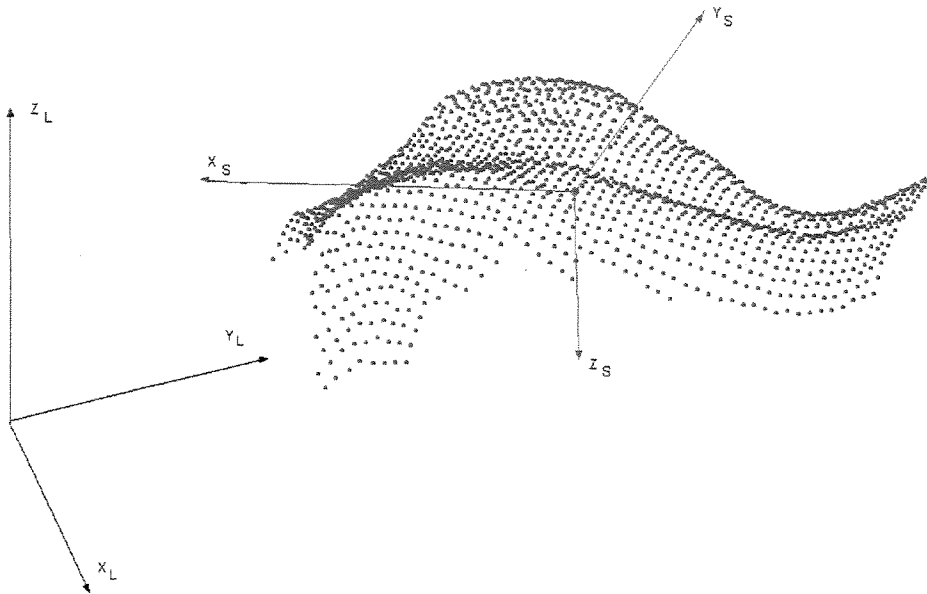


Figura 7: Esquema da mudança de referencial do laboratório (eixos X_L, Y_L, Z_L) para o referencial associado ao conjunto de pontos reconstruídos sobre a superfície (eixos X_S, Y_S, Z_S). Observa-se que esta mudança requer uma translação e uma rotação do referencial.

Descrevemos a seguir os procedimentos necessários para esta mudança de referencial:

O sistema L está referenciado na *base canônica* do $\mathbf{R}^3$, formada pelos vetores $\mathbf{i} = (1,0,0)$, $\mathbf{j} = (0,1,0)$ e $\mathbf{k} = (0,0,1)$.

Tomamos a matriz $\mathbf{P}_L$ ($n \times 3$) dos n pontos medidos em relação ao sistema de referência do laboratório. Nesta matriz, cada linha representa um ponto $\mathbf{P}$ da superfície; a primeira coluna representa os valores das coordenadas $\mathbf{X}_L$ dos

pontos, a segunda coluna, os valores das coordenadas Y_L dos pontos e a terceira coluna os valores das coordenadas Z_L .

Definimos, então, o novo sistema de referência associado ao conjunto de pontos (sistema S) da seguinte maneira:

1. Determinação da origem O_s do sistema S. O procedimento de mudança de origem representa uma translação do sistema de referência e é efetuado através do cálculo $P_L - M_o = P_o$. A matriz M_o ($n \times 3$) contém as coordenadas do ponto O_s (referenciados no sistema L) em todas as suas n linhas e a matriz P_o contém os n pontos medidos relacionados ao referencial com a origem em O_s .
2. Efetua-se então a operação $P_o' \times P_o = Q$, onde P_o' é a transposta da matriz P_o . A matriz Q (3×3) obtida é a matriz de variância e covariância das coordenadas dos n pontos medidos relacionados ao referencial com a origem em O_s .
3. A matriz Q é uma matriz simétrica real; portanto, é possível obter uma base ortogonal do R^3 a partir de seus autovetores (HOFFMANN e KUNZE, *op. cit.*). Uma importante característica desta base é o fato dela diagonalizar a matriz Q . Isto significa que os vetores desta base estão orientados nas três direções ortogonais de maior variação de cada coordenada. Calculamos então os três autovalores de Q através de seu polinômio característico e os dispomos em ordem decrescente. Calculam-se a seguir os três autovetores de módulo igual a um correspondentes aos três autovalores de Q na ordenação decrescente.
4. A matriz M_v (3×3) dos três autovetores (e_1, e_2, e_3) encontrados representa a base para o novo referencial buscado. A rotina desenvolvida contém também um procedimento para assegurar a orientação dextrógira desta base, expressa pela condição $e_1 \times e_2 = e_3$ (o produto vetorial entre e_1 e e_2 deve ser igual a e_3).
5. Os eixos (X_s, Y_s, Z_s) do referencial S são então definidos a partir dos vetores da base (e_1, e_2, e_3). Pode-se demonstrar, pelo “teorema min-max” de Courant &

Fischer (BELLMAN, 1997), que o plano $X_s - Y_s$ assim obtido proporciona a deformação mínima das distâncias e dos ângulos entre os vetores associados aos pontos, quando estes são projetados ortogonalmente sobre ele. A obtenção deste plano é extremamente útil para a reconstrução e análise da superfície, como será explanado mais adiante.

Finalmente, é obtida a matriz P_s ($n_p \times 3$) com as coordenadas dos pontos no referencial S multiplicando-se a matriz P_o pela matriz Mv , que é a matriz de mudança de base da base L para a base S . Este último procedimento representa uma rotação do sistema de referência, pois a matriz Mv é também uma matriz de rotação.

2.8 - REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE DO CORPO:

Neste procedimento, a entrada é uma matriz P ($n \times 3$) de pontos reconstruídos tridimensionalmente, como a matriz P_s obtida no item anterior. O resultado obtido é uma *superfície* no sentido matemático, representada na forma implícita por uma função do tipo $Z = f(X, Y)$. Esta função é avaliada para um conjunto de coordenadas (X, Y) que pode ser definido pelo usuário.

A fim de obtermos uma representação analítica aproximada da superfície na forma de uma função $Z = f(X, Y)$, devemos inicialmente definir um plano de projeção $X-Y$ sobre o qual serão projetados os pontos reconstruídos tridimensionalmente sobre a superfície do corpo. A seleção deste plano deve considerar que a cada ponto do plano de projeção deve corresponder um único ponto sobre a superfície. Pode-se, por exemplo, definir este plano analiticamente a partir do procedimento de mudança de base descrito anteriormente, tomando-se o plano formado pelos dois maiores autovetores obtidos. Quando possível, orientam-se as câmeras na filmagem de maneira a que um dos planos formados pelo sistema de referência do laboratório ou um plano anatômico do segmento do corpo (plano frontal, p. ex.) possa ser adotado como plano de projeção.

2.8.1 - REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE – INTERPOLAÇÃO SOBRE O ENVOLTÓRIO CONVEXO:

Utilizamos inicialmente um método de interpolação para o ajuste de uma superfície sobre dados irregularmente distribuídos, implementado no software S-PLUS e descrito em AKIMA (1978).

O primeiro procedimento deste método é a projeção dos pontos sobre o plano X-Y ; em seguida, é efetuada uma triangulação dos pontos, formando-se uma figura plana convexa que engloba todos os pontos. Esta figura é denominada *envoltório convexo* do conjunto de pontos, ou seja, é a figura convexa que envolve o total de pontos projetados e cujas arestas são segmentos de reta unindo dois dos pontos projetados. No processo de triangulação, para cada quatro pontos são formados dois triângulos de modo a maximizar a soma dos ângulos internos de cada triângulo. É então calculado um polinômio de quinto grau em X e Y para cada região triangular e que interpola os pontos dados. A função geral $Z(X,Y)$ é entendida como o conjunto dos polinômios ajustados em cada triângulo.

A fórmula deste polinômio é dada por:

$$Z_i(X, Y) = \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^{5-j} q_{jk} X^j Y^k \quad 7$$

Há, portanto, 21 coeficientes q a serem determinados. Para isso, o método leva em consideração as seguintes restrições:

- 1- Os valores da função $Z(X,Y)$ e de suas derivadas parciais de primeira e segunda ordem devem existir em cada vértice de cada triângulo. Esta restrição fornece 18 condições independentes.

2- A derivada parcial da função $Z(X,Y)$ calculada na direção perpendicular a cada lado do triângulo deve ser um polinômio de grau três, no máximo, na variável medida na direção do lado do triângulo.

A função $Z(X,Y)$, que representa aproximadamente a superfície registrada, pode ser construída com diferentes graus de suavidade (medida através do número de derivadas contínuas que podem ser obtidas em cada ponto da função). O método permite também a opção por uma interpolação linear (não suavizada). Deve-se observar aqui que o conceito de *suavidade* empregado pelo autor corresponde à característica de *continuidade* da função, e não à idéia de uma filtragem dos dados.

A função $Z(X,Y)$ é avaliada num *grid* de pontos (X,Y) eqüispaçados localizados no interior do envoltório convexo do conjunto de pontos fornecidos. A densidade de pontos neste *grid* pode ser definida pelo usuário.

Este método de interpolação, assim como outros analisados no software MATLAB, reconstrói uma superfície sobre o envoltório convexo do conjunto de pontos. Foi observado que esta representação da superfície não é fidedigna, o que motivou a elaboração de um método alternativo para a obtenção de uma representação analítica de superfícies, o qual descrevemos a seguir.

2.8.2 – REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DE SUPERFÍCIES COM REGIÕES CÔNCAVAS EM SUA PROJEÇÃO:

O desenvolvimento deste método para representação analítica de superfícies que apresentam regiões côncavas em sua projeção foi motivado pelo fato de que um conjunto de pontos reconstruídos tridimensionalmente sobre uma superfície do corpo humano, quando projetado sobre um plano, pode formar um contorno não necessariamente convexo. Neste caso, uma função $Z=f(X,Y)$ avaliada sobre um conjunto de coordenadas (X,Y) no interior do envoltório convexo obtido sobre os pontos projetados não representará adequadamente a superfície do corpo em análise.

Assim, a fim de obtermos uma representação adequada da superfície de interesse, é necessário avaliarmos a função $Z(X,Y)$ somente para coordenadas (X,Y) localizadas no interior do contorno da superfície projetada.

A figura 8 ilustra uma situação deste tipo: a linha verde representa o envoltório convexo dos pontos, que será denominada *região C*; a linha preta representa o contorno da superfície projetada, que denominaremos *região S*; as regiões hachuradas em azul (que serão denominadas *regiões E*) representam áreas localizadas entre a região C e a região S, que não devem ter pontos correspondentes numa função $Z(X,Y)$ que represente a superfície em análise. É necessária, portanto, a identificação analítica das regiões E.

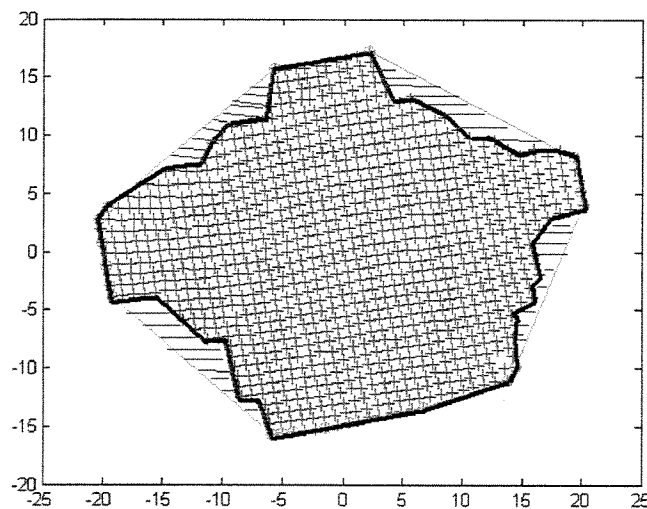


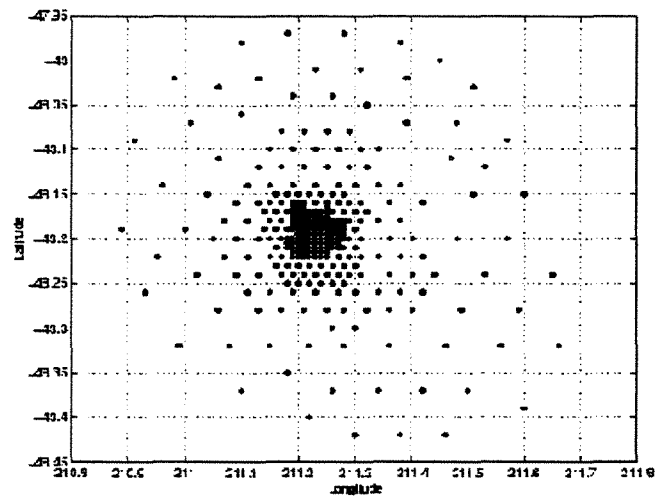
Figura 8: Conjunto de pontos de uma superfície projetados sobre um plano, formando um contorno da superfície projetada, e o envoltório convexo dos mesmos.

O primeiro procedimento deste método é a projeção de todos os pontos reconstruídos sobre o plano de projeção definido. Com esta projeção é obtido o conjunto de pontos (X,Y) no plano, onde X e Y são as coordenadas de cada ponto projetado em relação ao sistema de referência adotado.

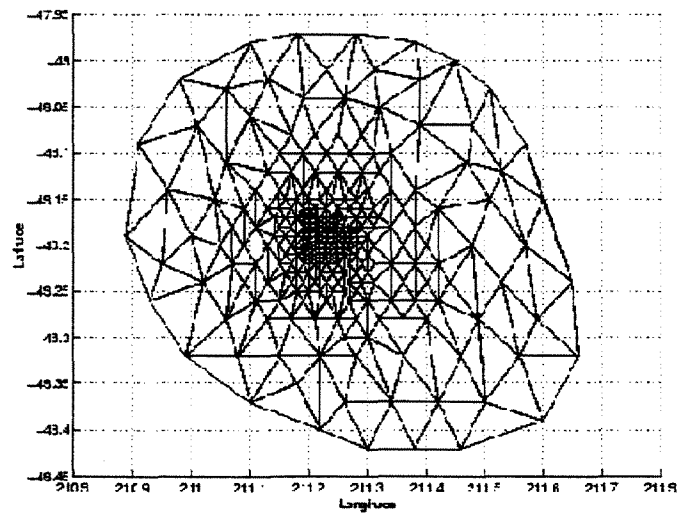
É então obtido o envoltório convexo do conjunto de pontos sobre o plano de projeção.

O procedimento seguinte é a triangulação dos pontos projetados, efetuada através do algoritmo *Delaunay* implementado no software MATLAB. Esta triangulação é definida, neste software, como um conjunto de linhas conectando cada ponto aos seus vizinhos naturais de tal modo que o círculo circunscrito a cada triângulo não envolva nenhum dos pontos projetados.

A figura 9 fornece uma visualização deste procedimento, representando um conjunto de pontos sobre uma elevação projetados num plano transversal à mesma. Sobre os pontos projetados é efetuada a triangulação Delaunay.



a



b

Figura 9: (a) Conjunto de pontos projetados sobre um plano e (b) triangulação *Delaunay* efetuada sobre os mesmos.

Observa-se que o envoltório convexo de um conjunto de pontos projetados engloba os triângulos formados na triangulação *Delaunay*. Portanto, as regiões *E* em uma superfície projetada são também preenchidas por um conjunto de triângulos formados na triangulação *Delaunay*.

A triangulação *Delaunay* fornece uma matriz T ($v \times 3$) onde cada linha contém os índices das coordenadas *X* e *Y* dos vértices de cada triângulo.

Devemos notar que, como os índices da matriz T formada pela triangulação *Delaunay* correspondem a linhas da matriz $n \times 3$ dos pontos reconstruídos no R^3 , pode-se tomar a coordenada *Z* dos pontos correspondentes aos vértices dos triângulos, obtendo-se assim a identificação de cada triângulo no espaço tridimensional (R^3) cuja projeção corresponde a um triângulo formado sobre o plano *X - Y*.

Fazemos agora as seguintes observações sobre estes triângulos no R^3 . Devido à densidade aproximadamente uniforme de pontos projetados em cada região da superfície, a distribuição estatística das medidas de área e perímetro dos triângulos formados sobre a região *S* deve ser aproximadamente uniforme. Além disso, espera-se que todo triângulo formado nas regiões *E* tenha área e perímetro maiores que qualquer dos triângulos formados na região *S*, pois não será formado por pontos tão próximos como na região *S*.

Deste modo, a partir da análise exploratória da distribuição das variáveis área e perímetro do total de triângulos formados sobre a região *C*, podem-se estabelecer *valores de eliminação* para o conjunto de valores de área (V_A) e para o conjunto de valores de perímetro (V_P) dos triângulos a fim de possibilitar a identificação dos índices da matriz T que correspondem aos triângulos localizados nas regiões *E*; os triângulos com área ou perímetro maiores que os respectivos valores de eliminação corresponderão aos triângulos localizados na região entre o envoltório convexo e a projeção da superfície.

Estes valores de eliminação são definidos através das fórmulas abaixo, utilizadas em análises estatísticas para a determinação de *outliers* de distribuições de pontos.

$$V_A = M_a + fI_a \quad 8$$

$$V_P = M_p + fI_p \quad 9$$

Na equação 8, V_A é o valor de eliminação para áreas, M_a é o valor da mediana do conjunto de valores de área e I_a é o valor interquartil do conjunto de valores de área.

Na equação 9, V_P é o valor de eliminação para perímetros, M_p é a mediana do conjunto de valores de perímetro e I_p é o valor interquartil do conjunto de valores de perímetro.

O fator f destas equações deve ser estimado a partir da análise gráfica da triangulação dos pontos e da distribuição dos valores de área e perímetro dos triângulos formados. São necessários alguns testes para obter-se um valor adequado.

Finalmente, utiliza-se um procedimento de interpolação bivariada a fim de obtermos uma função $Z=f(X,Y)$ que represente aproximadamente a superfície. Esta função é avaliada para um *grid* de pontos (X,Y) eqüispaçados localizados apenas no interior dos triângulos que formam o contorno da superfície projetada. A densidade de pontos neste *grid* pode ser definida pelo usuário.

2.9- FORMAS DE ANÁLISE DA SUPERFÍCIE:

Uma vez obtida a representação analítica da superfície, pode-se efetuar a sua análise através da obtenção de medidas e características da superfície matemática formada. Alguns exemplos de análises deste tipo são:

1. O valor aproximado da área da superfície pode ser obtido através da somatória das áreas das os triângulos ajustados sobre a superfície, utilizando-se o conceito de produto vetorial.
2. Através da intersecção de planos paralelos ao plano X-Y com a superfície, são obtidas curvas de nível que permitem a análise topográfica da mesma. Destacamos que, em nossa metodologia, as curvas de nível são referenciadas ao plano otimizado obtido pela decomposição por eixos principais do conjunto de pontos reconstruídos tridimensionalmente.
3. Conforme destacamos no item 2.1.2, é possível ajustar um plano localmente sobre cada região da superfície; o cálculo do vetor normal a este plano fornece a possibilidade de orientação da superfície.
4. Outra possibilidade de orientação da superfície é possível pela utilização do sistema de referência tridimensional obtido no procedimento descrito no item 2.7; uma vez que este referencial indica as direções de maior variação da distribuição das coordenadas dos pontos reconstruídos sobre a superfície.
5. As derivadas parciais dZ/dX e dZ/dY da função $Z = f(X,Y)$ fornecem a análise de curvas sobre a mesma, o que permite a análise morfológica da superfície.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

Dado o caráter de desenvolvimento metodológico da presente pesquisa, apresentamos inicialmente a aplicação da metodologia em dois objetos inanimados. Isto possibilitou avaliações e comparações de resultados da aplicação que não são possíveis na aplicação da metodologia diretamente ao corpo humano. Em seguida apresentamos um exemplo de aplicação da metodologia na reconstrução e análise da superfície posterior do tronco de um sujeito.

3.1- APLICAÇÃO 1:

A fim de efetuarmos um teste da acurácia da metodologia no cálculo da área de superfícies e uma avaliação da metodologia na reconstrução de superfícies fechadas, foi aplicada a metodologia proposta na análise da superfície externa de um objeto cilíndrico oco, cujas dimensões foram medidas diretamente com um paquímetro. Este objeto foi elaborado pelo Centro de Tecnologia (CT) da UNICAMP visando uma precisão da ordem de décimos de milímetro nas medidas de raio e altura do cilindro. As medidas diretas do objeto foram:

- Diâmetro = $300,4 \pm 0,8$ mm.
- Altura = $501,1 \pm 0,5$ mm.

3.1.1- PROJEÇÃO ESTRUTURADA DE LUZ SOBRE A SUPERFÍCIE:

O objeto foi posicionado sobre sua base circular, sendo utilizado um nível para a obtenção de um alinhamento vertical preciso. Foram utilizados três projetores de *slides* de modo a recobrir totalmente a superfície externa do objeto com a projeção de *slides* contendo o padrão de marcas mostrado na figura 1 (a). Deste modo, cada *slide* projetado recobriu pouco mais de um terço da superfície a ser analisada.

3.1.2- REGISTRO DE IMAGENS:

Para o registro de imagens deste objeto foram utilizadas 6 câmeras analógicas. As câmeras foram posicionadas acima e abaixo de cada projetor de *slides*, alinhadas verticalmente com os mesmos. Assim, cada par de câmeras registrou os pontos projetados em aproximadamente um terço da superfície externa do cilindro.

A aquisição das imagens foi realizada em ambiente com baixa luminosidade, controlando-se manualmente o *shutter* e o foco de cada câmera para o registro de imagens com qualidade e resolução adequadas.

3.1.3- CAPTURA DE IMAGENS:

Efetuada com uma placa de captura *miroVIDEO DC 30 plus*. Esta placa de captura permite o ajuste da taxa de compressão e de outros parâmetros a fim de permitir uma resolução adequada para a análise das imagens.

3.1.4- CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO 3D DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE:

A calibração das câmeras utilizou-se do método DLT, implementado no software do sistema DVIDEOW, conforme descrito no capítulo anterior.

O objeto de calibração utilizado foi suspenso por um cabo preso ao teto do laboratório, a fim de permitir a obtenção de um alinhamento vertical do referencial L. Este objeto de calibração, construído com dimensões próximas ao do objeto cilíndrico, possui 20 pontos de apoio (figura 10).

Foram medidos manualmente e reconstruídos tridimensionalmente em torno de 600 pontos em cada terça parte da superfície.

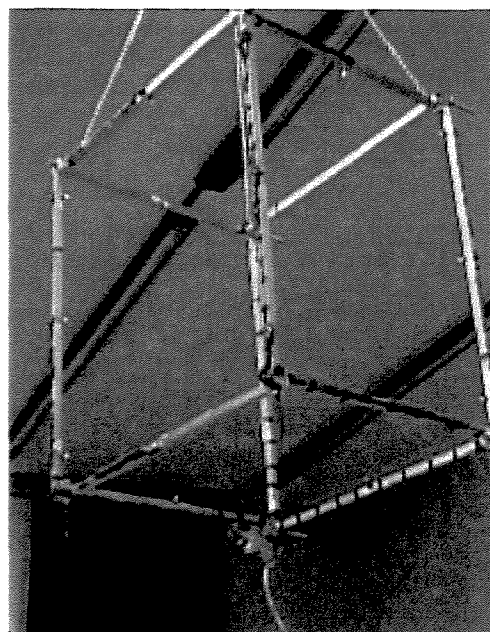


Figura 10: Objeto de calibração utilizado na primeira aplicação da metodologia.

3.1.5- DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA ASSOCIADO À SUPERFÍCIE:

Os pontos reconstruídos tridimensionalmente de cada terça parte da superfície foram agrupados em uma única matriz N para o procedimento de mudança de sistema de referência.

Cabe observar aqui que, embora a densidade de marcas circulares seja constante em qualquer região do slide utilizado, a projeção do *slide* sobre o objeto cilíndrico não gera uma densidade de marcas uniforme, devido à deformação da figura ao ser projetada. Assim, caso fosse efetuada a mudança de referencial baseada na distribuição dos pontos reconstruídos, seria perdido o alinhamento vertical do referencial L . Uma vez que este alinhamento era propício à análise desta superfície, foi efetuado apenas o procedimento de translação do referencial de laboratório.

Uma vez obtida a matriz dos pontos no novo referencial, os pontos foram separados em duas matrizes N1 e N2, cada uma contendo os pontos localizados sobre metade da superfície total do cilindro, num corte longitudinal do mesmo, efetuado sobre o plano X-Y.

3.1.6- REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE:

A representação analítica da superfície externa do cilindro foi elaborada através do método para representação de superfícies que apresentam concavidades quando projetadas sobre o plano de análise.

Os procedimentos para a representação da superfície foram efetuados separadamente para as matrizes N1 e N2 e em seguida as duas superfícies resultantes foram sobrepostas, possibilitando a visualização total da superfície do cilindro (figura 12). Como a separação das duas superfícies ocorre entre duas linhas de pontos projetados, as regiões entre estas linhas não são representadas pela função $Z = f(X,Y)$.

O contorno da superfície formada pelos pontos de cada uma das matrizes N1 e N2, quando projetada no plano, resultou em uma figura com pequenas concavidades, oriundas de erros de medição. Foi verificado que, nestas regiões, ocorrem alguns triângulos formados por pontos distantes entre si, no espaço tridimensional, que originam, pela sua inclinação, triângulos projetados que não correspondem ao contorno da superfície projetada, como pode ser verificado na figura 11. Como é notório nesta figura, estes triângulos devem ser eliminados da representação da superfície, o que justifica a utilização do método para representação de superfícies que apresentam concavidades quando projetadas.

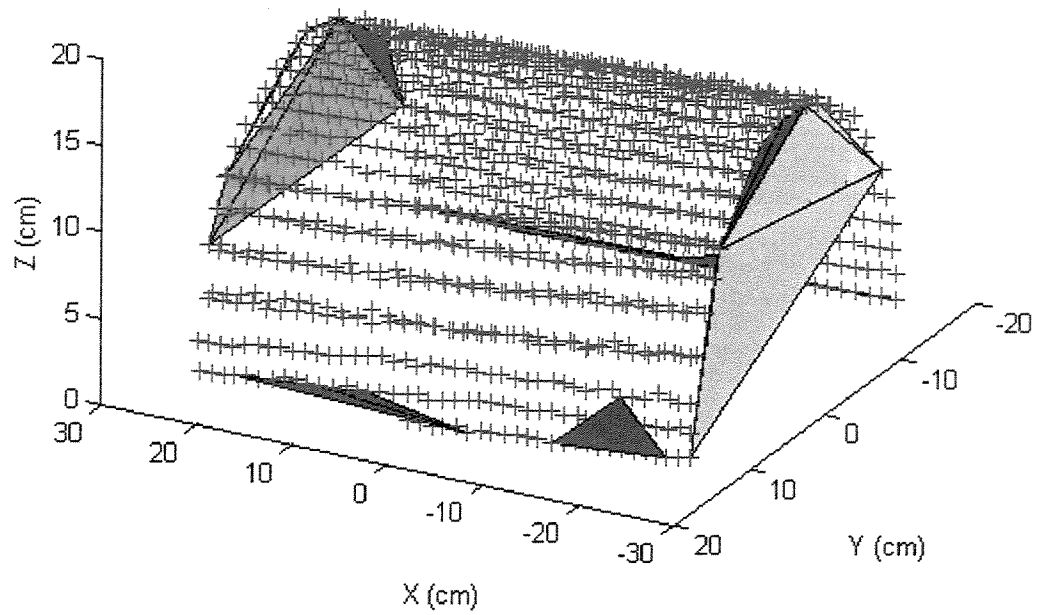


Figura 11: Pontos reconstruídos sobre uma das metades da superfície do objeto cilíndrico. Os triângulos representam regiões a serem excluídas da representação da superfície.

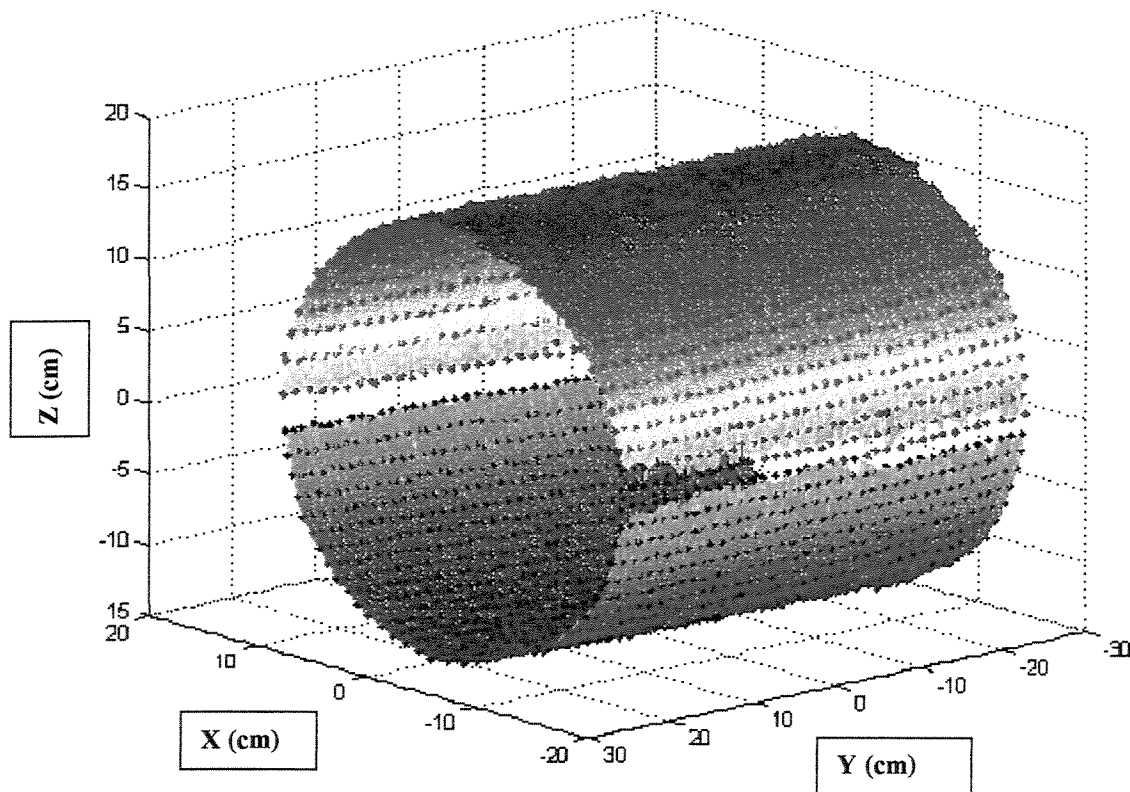


Figura 12: Representação analítica da superfície do objeto cilíndrico, juntamente com o total de pontos reconstruídos.

3.1.7- ANÁLISE DA SUPERFÍCIE:

3.1.7.1-CÁLCULO DA ÁREA DA SUPERFÍCIE:

Foi estimada a área total da superfície externa do objeto cilíndrico através da soma das áreas dos triângulos no espaço R3 que, projetados, correspondem à triangulação Delaunay. O valor obtido foi de 4748 cm^2 . O valor da mesma área foi calculado pela fórmula da área de uma superfície retangular, ou seja, multiplicando-se o valor do perímetro da base do objeto (considerada como

circular) pelo valor da altura do mesmo. O valor obtido neste cálculo foi de $4823 \pm 110 \text{ cm}^2$. O erro percentual foi, portanto, de 1,5 %.

A diferença entre os dois valores de área pode ser explicada em pequena parte pelo fato de que, no procedimento de representação das superfícies por interpolação, há uma região da superfície não representada, como pode ser observado na figura 12 (acima).

3.1.7.2- ESTIMATIVA DO RAI DO OBJETO CILÍNDRICO:

O raio do objeto cilíndrico foi estimado através de uma transformação de coordenadas dos pontos reconstruídos sobre a superfície (de coordenadas cartesianas para coordenadas cilíndricas). Em coordenadas cilíndricas, cada ponto é referenciado em relação a um ângulo *theta*, um raio *R* e uma altura *h*.

Com o procedimento de translação do referencial *L* efetuado, a altura *h* corresponde aproximadamente à geratriz do objeto cilíndrico. Deste modo, os valores do raio *R* de todos os pontos reconstruídos (em coordenadas cilíndricas) correspondem ao valor aproximado do raio do objeto. Foi encontrado um valor médio de 14.94 cm (desvio padrão de 0,2 cm) para o raio, o que corresponde a um erro percentual de aproximadamente 0.5% em relação ao valor esperado, igual a 15,02 cm.

Foram calculados os valores de *bias*, acurácia e precisão para esta estimativa do valor do raio do cilindro. A acurácia **A** de um conjunto de dados representa a dispersão dos dados em relação a um valor esperado, enquanto que a precisão **P** representa a dispersão de um conjunto de dados em relação ao seu valor médio, ou seja, a variância dos dados. O valor do *bias* (**B**) representa o desvio entre o valor médio do conjunto de dados e o valor esperado. Os valores de **A**, **P** e **B** foram calculados pelas fórmulas abaixo:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad 10$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad 11$$

$$B = (\bar{x} - \mu)^2 \quad 12$$

Nas equações 10, 11 e 12, n é o número total de dados, x_i é o valor do i -ésimo dado, μ é o valor esperado e $\bar{x}$ (*barra*) é o valor médio do conjunto de dados.

Os valores de **A**, **P** e **B** obtidos para esta estimativa do valor do raio do cilindro foram os seguintes:

- *bias* = 0,0056 cm².
- *acurácia* = 0,0467 cm².
- *precisão* = 0,0410 cm².

Estes valores sugerem, portanto, que a qualidade desta estimativa do valor do raio é suficiente para avaliações biomecânicas, indicando uma precisão ligeiramente melhor que a acurácia. As figuras 13 e 14 abaixo atestam também a validade desta afirmação.

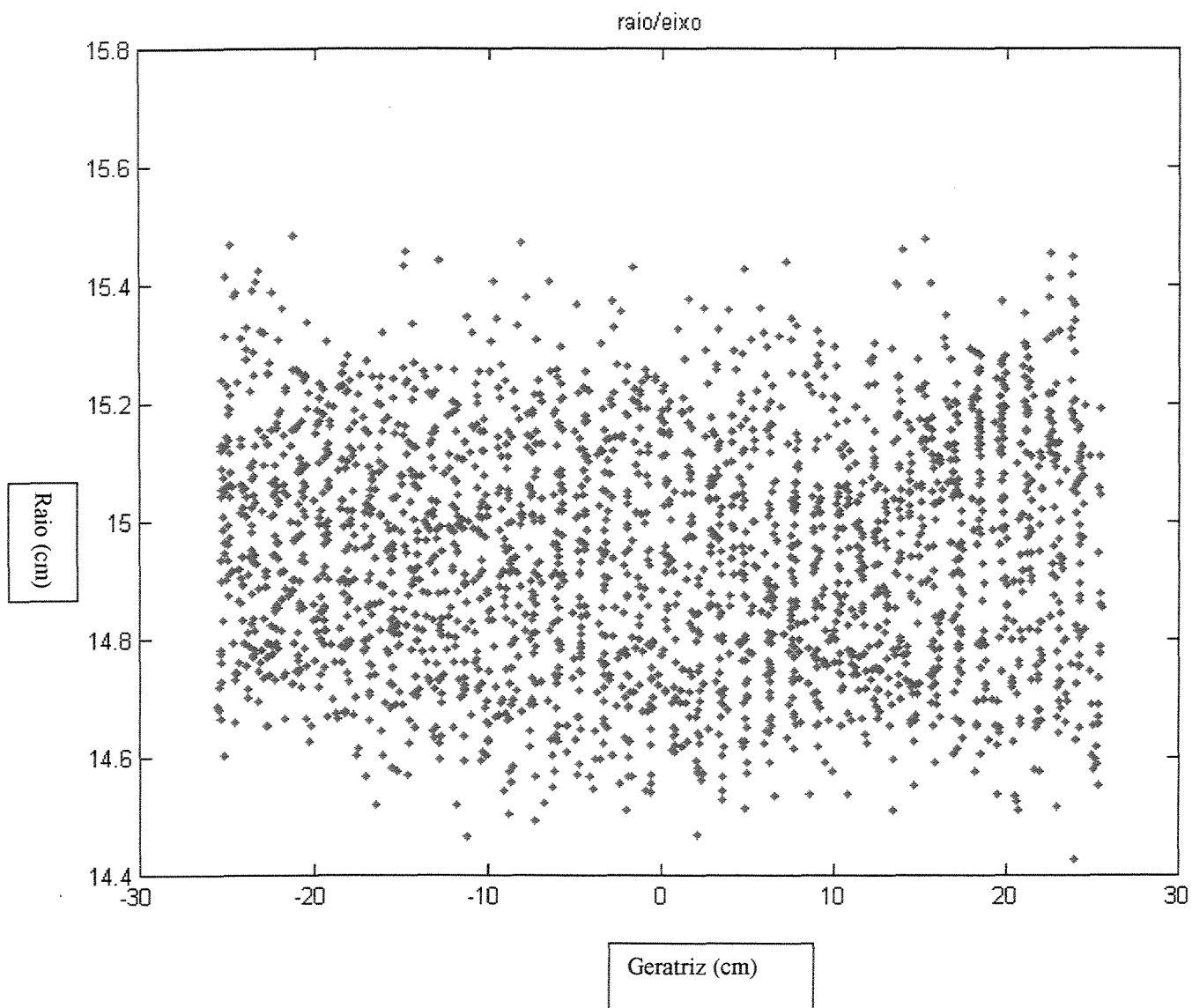


Figura 13: *Scatter – plot* dos 2322 valores do raio estimado do objeto cilíndrico em função da geratriz do cilindro. O gráfico sugere uma distribuição uniforme dos valores de raio entre 14,8 cm e 15,2 cm.

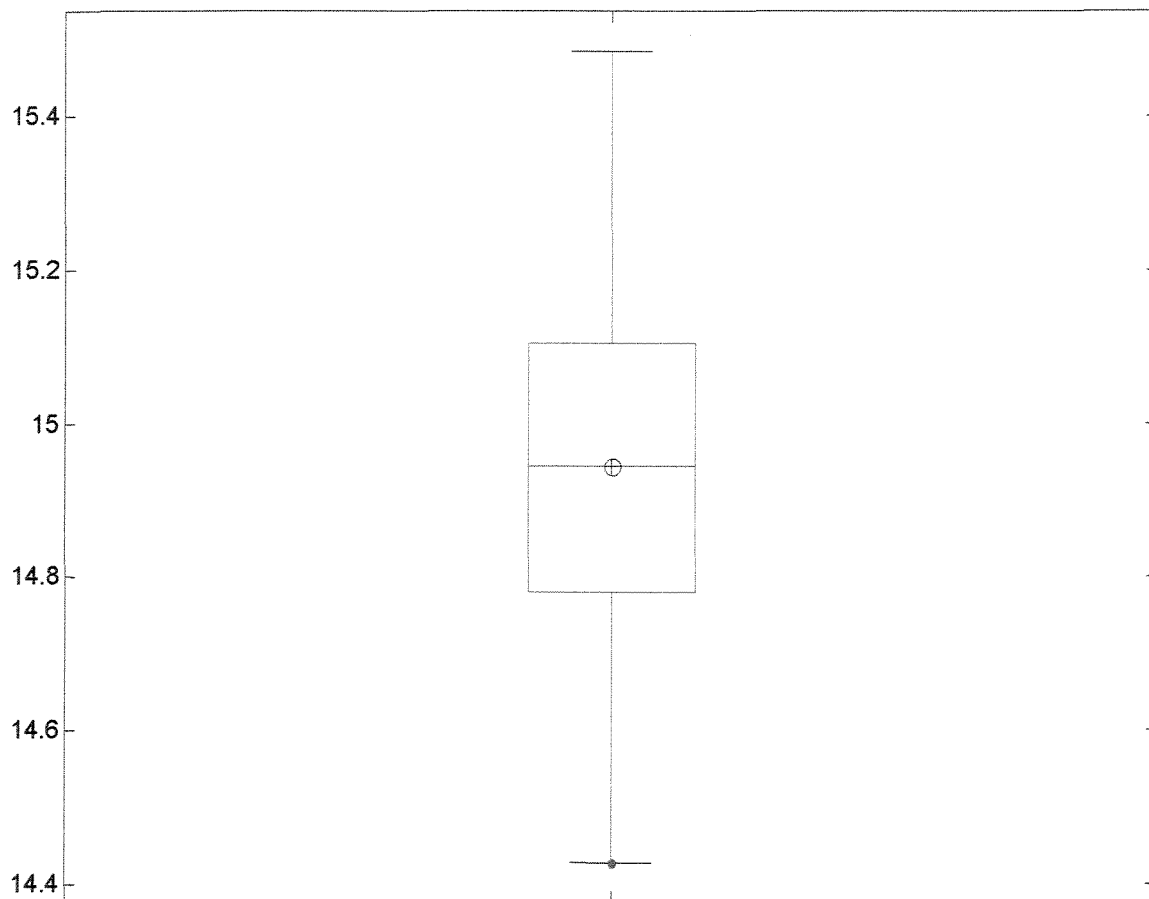


Figura 14: Box-plot dos valores do raio estimado do objeto cilíndrico obtido através da transformação das coordenadas dos pontos reconstruídos de cartesianas para cilíndricas. O número de pontos reconstruídos é 2322. Os valores da média e da mediana deste conjunto de valores são ambas iguais a 14,94 cm.

3.2- APLICAÇÃO 2:

Apresentamos a seguir a aplicação da metodologia proposta na reconstrução e análise das superfícies anterior e posterior de um modelo do tronco humano (manequim), posicionado conforme mostra a figura 15 de a) a d).

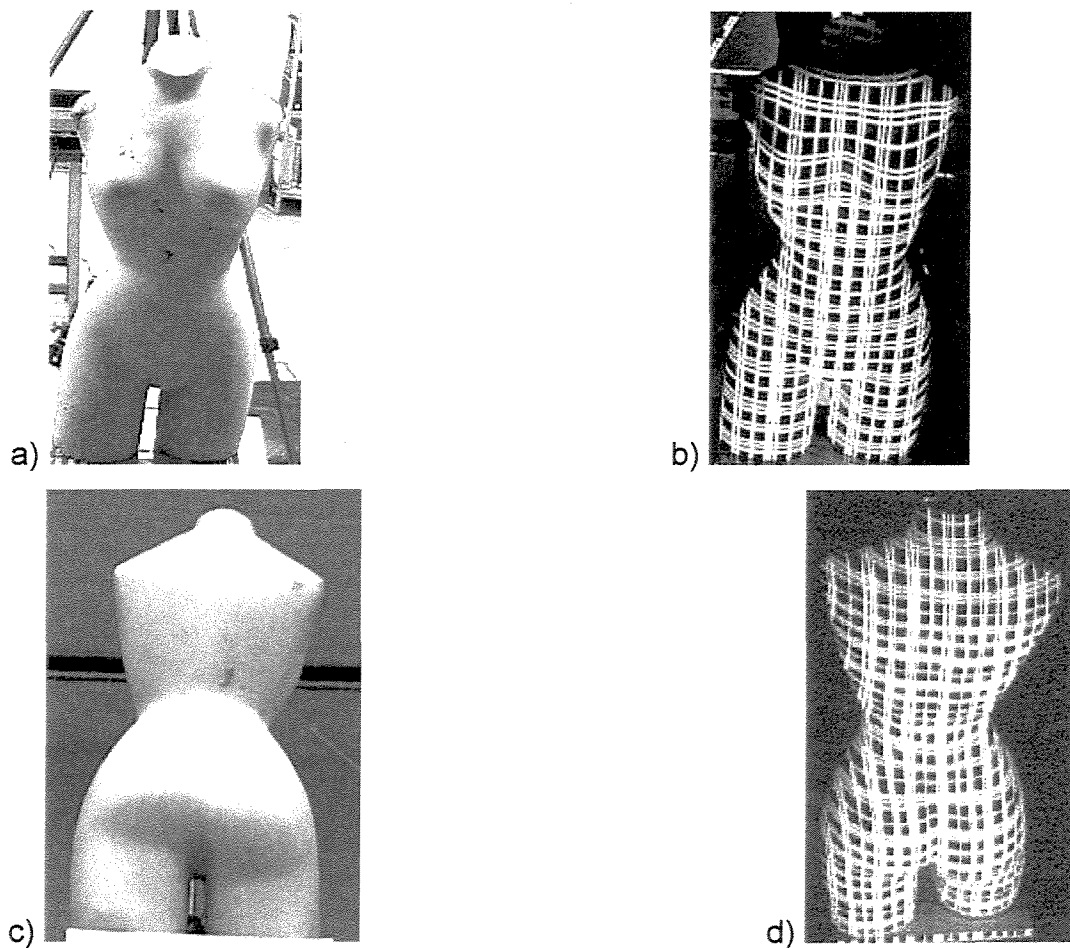


Figura 15: a) Vista anterior do modelo, câmera superior, b) vista anterior com a luz do slide projetada, c) vista posterior, câmera inferior e d) vista posterior com o slide projetado.

3.2.1- PROJEÇÃO ESTRUTURADA DE LUZ SOBRE A SUPERFÍCIE:

Cada superfície a ser reconstruída foi recoberta com a projeção de um *slide* contendo um padrão de linhas verticais e horizontais, elaborado de modo a permitir a fácil identificação de cada ponto a ser reconstruído em todas as câmeras utilizadas. Os pontos reconstruídos foram marcados em cruzamentos de linhas verticais e horizontais.

3.2.2- REGISTRO DE IMAGENS:

Para o registro de imagens de cada superfície foram utilizadas 2 câmeras analógicas, posicionadas acima e abaixo de cada projetor de *slides* e alinhadas verticalmente com os mesmos. A aquisição das imagens foi realizada em ambiente com baixa luminosidade, controlando-se manualmente o *shutter* e o foco de cada câmera para o registro de imagens com qualidade e resolução adequadas.

3.2.3- CAPTURA DE IMAGENS:

Efetuada com uma placa de captura similar à utilizada para a primeira aplicação. A captura foi efetuada com a mesma frequência utilizada no registro de imagens.

3.2.4- CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO 3D DE PONTOS SOBRE AS SUPERFÍCIES:

A calibração das câmeras utilizou-se do método DLT, implementado no software do sistema DVIDEOW, conforme descrito no capítulo anterior. O objeto de calibração utilizado foi o mesmo da aplicação anterior.

Foram medidos manualmente e reconstruídos tridimensionalmente 166 pontos para cada superfície.

3.2.5- DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA ASSOCIADO À SUPERFÍCIE:

Este procedimento foi efetuado separadamente para os pontos reconstruídos de cada superfície. Foram obtidas, portanto, duas matrizes N1 (166x3) e N2 (166x3), cada uma contendo os pontos de uma das superfícies. Nesta mudança de sistema de referência foi considerado como eixo X a direção aproximada do eixo transversal do corpo humano e, como eixo Y, a direção aproximada do eixo longitudinal do corpo humano.

3.2.6- REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE:

Foi efetuada, primeiramente, uma interpolação bivariada sobre o envoltório convexo do conjunto de pontos reconstruídos, para ambas as superfícies.

Uma visualização desta representação pode ser observada na figura 16. Observa-se que foram representadas regiões que não pertencem à superfície, pelo fato de o método efetuar a interpolação sobre o envoltório convexo dos pontos.

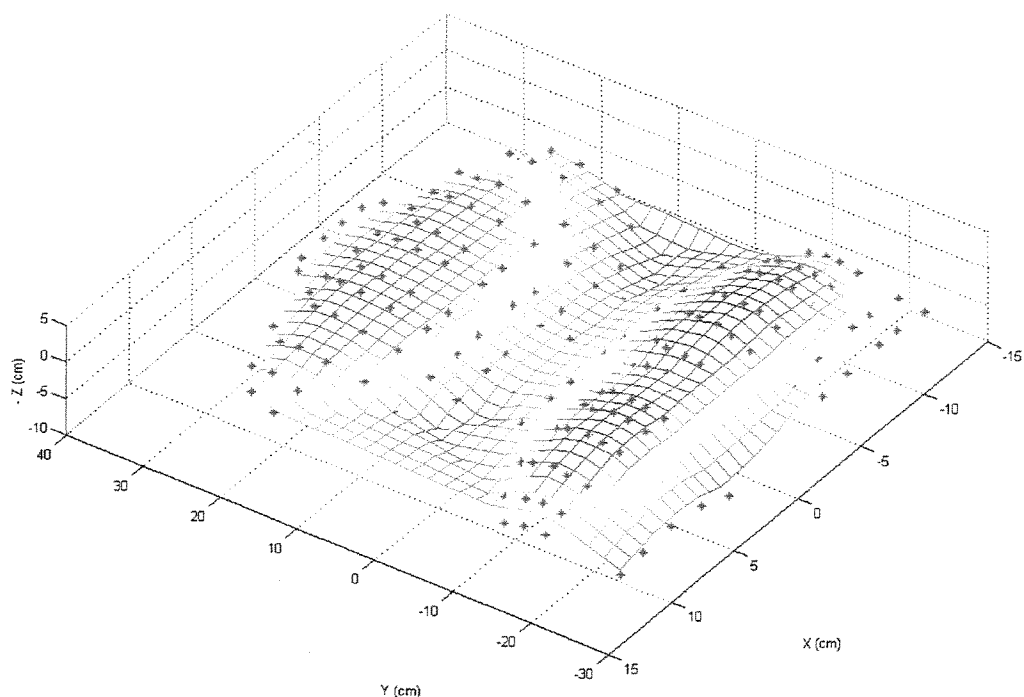


Figura 16: Gráfico mostrando os pontos reconstruídos sobre a superfície posterior do modelo (manequim) e a função interpolada. O eixo Z foi invertido a fim de facilitar a visualização.

Foi aplicado, em seguida, para cada superfície reconstruída, o método de representação matemática de superfícies que apresentam regiões côncavas quando projetadas no plano X – Y.

Como descrevemos no capítulo anterior, o primeiro procedimento deste método é a projeção de todos os pontos reconstruídos tridimensionalmente sobre o plano X – Y.

Em seguida é obtido o envoltório convexo do conjunto de pontos. Através da figura 17 observa-se que o envoltório convexo não corresponde ao contorno da superfície posterior do manequim projetada no plano X-Y, devido ao fato de que este contorno apresenta regiões côncavas.

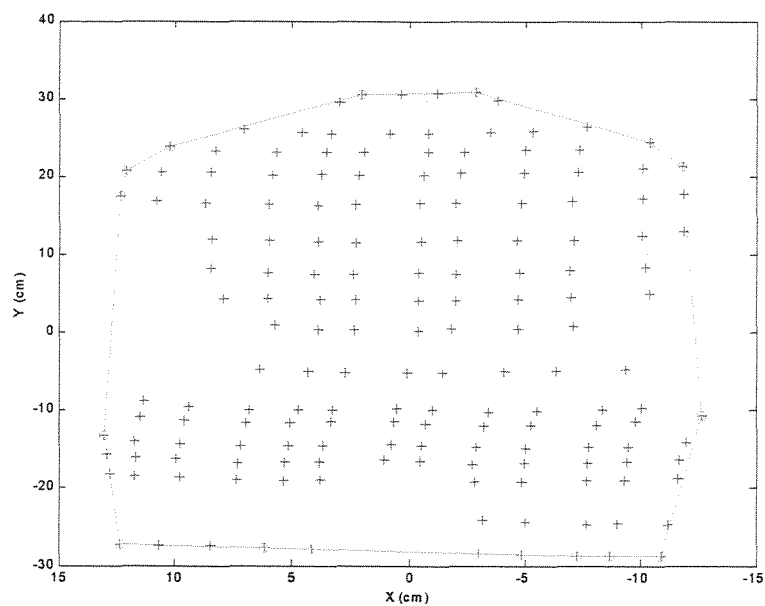


Figura 17: Pontos reconstruídos sobre a superfície posterior do modelo, projetados no plano $X - Y$; a linha verde representa o envoltório convexo dos mesmos.

É efetuada então uma triangulação dos pontos projetados, através do algoritmo *Delaunay*. Em seguida, efetuamos os procedimentos para identificação dos triângulos correspondentes às regiões entre o envoltório convexo formado e o contorno da superfície projetada. Foi estimado o valor f que define o valor de eliminação de triângulos. Para a superfície posterior, a melhor representação ocorreu para um fator $f = 3,5$. Na figura abaixo visualizamos os triângulos a serem eliminados.:

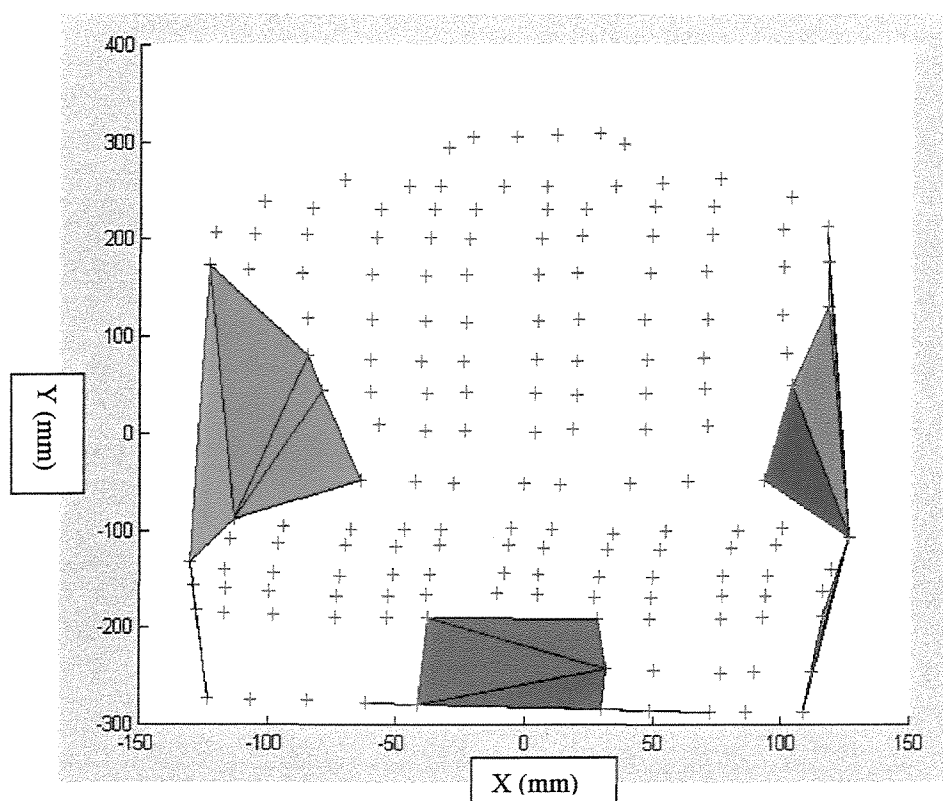


Figura 18: Pontos medidos sobre a superfície posterior do modelo. Os triângulos coloridos representam as áreas excluídas.

Foi então construída a função $Z = f(X, Y)$ através de uma interpolação linear que representa a superfície. A função foi avaliada em um *grid* de coordenadas

(X,Y) localizadas no interior dos triângulos correspondentes ao contorno da superfície projetada.

3.2.7- ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES:

Apresentamos a seguir exemplos de formas gráficas de visualização que proporcionam a análise morfológica e topográfica das superfícies.

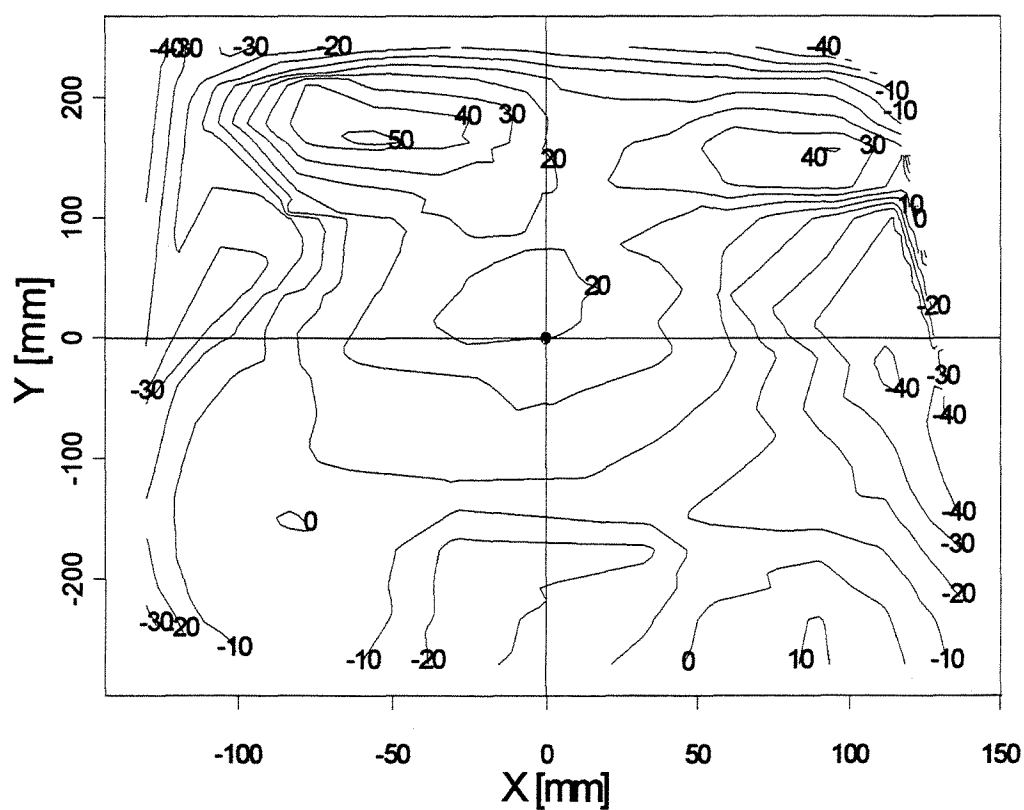


Figura 19: Curvas de nível sobre o envoltório convexo da superfície anterior do tronco do modelo.

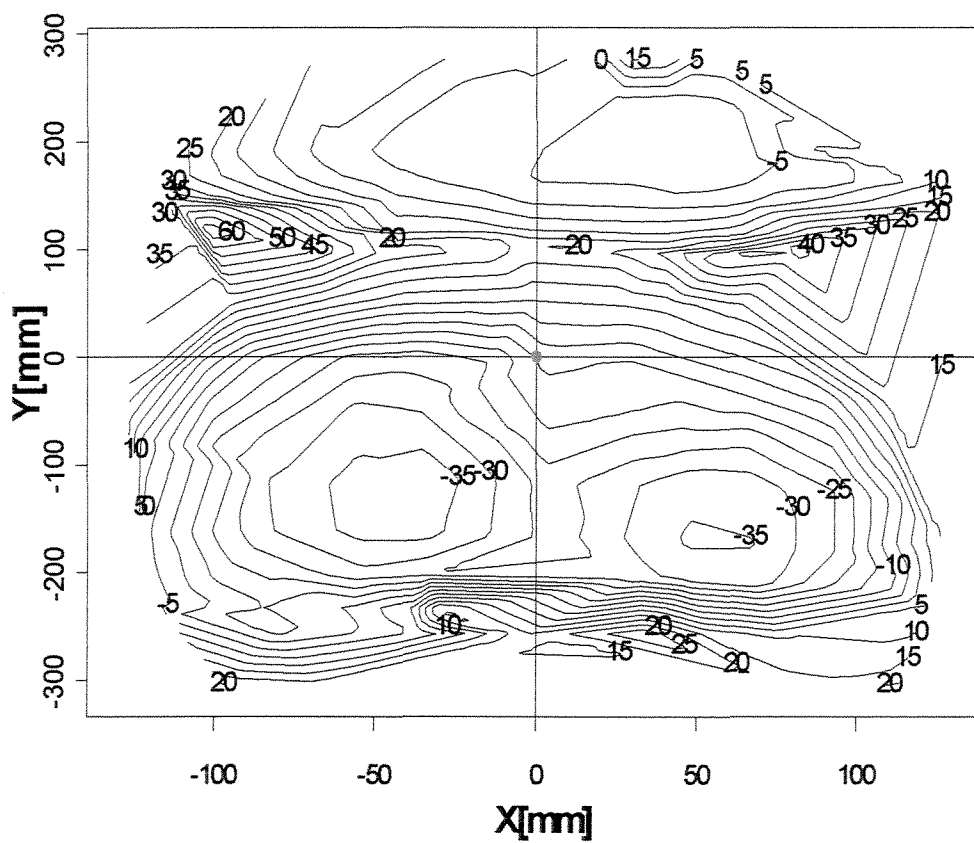


Figura 20: Curvas de nível sobre o envoltório convexo da superfície posterior do tronco do modelo.

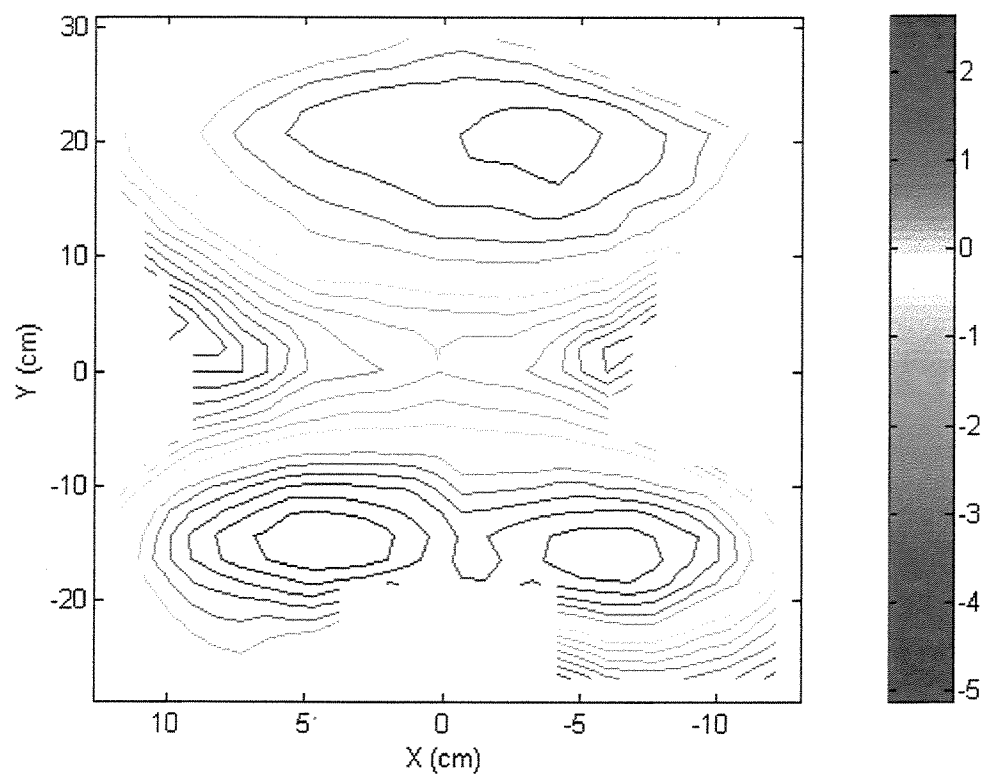


Figura 21: Curvas de nível da superfície posterior do tronco do modelo, após a aplicação do método de representação de superfícies com regiões côncavas em sua projeção.

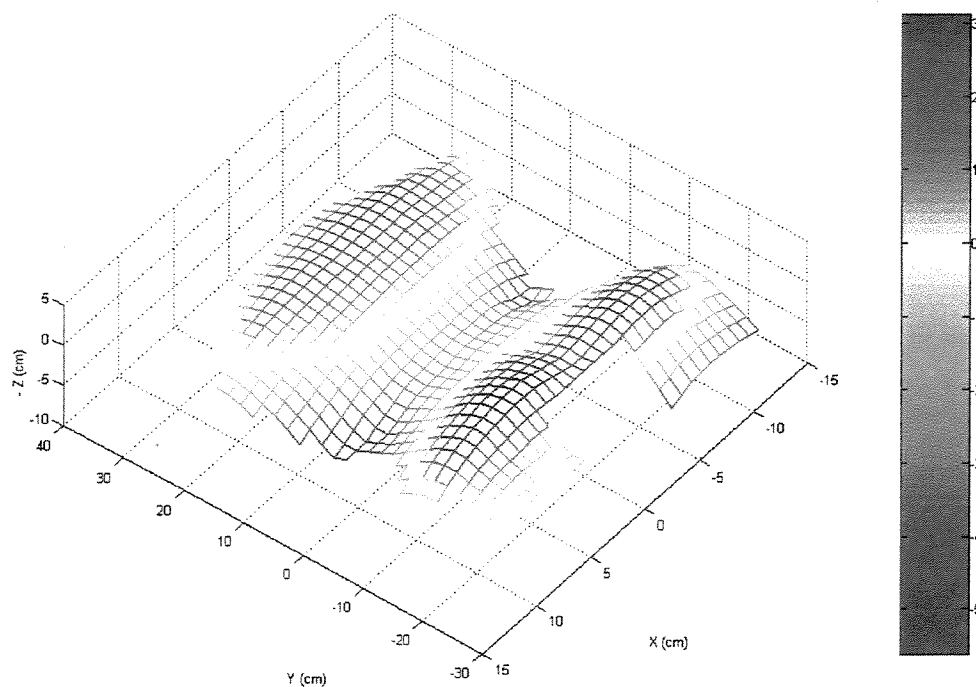


Figura 22: Representação da superfície posterior do modelo por interpolação, após a aplicação do método de representação de superfícies desenvolvido no LIB. O sentido do eixo Z foi invertido a fim de auxiliar a visualização.

A possibilidade da análise morfológica da superfície é aqui evidenciada, por exemplo, quando observamos que as representações gráficas (principalmente os gráficos de curvas de nível) indicam uma maior elevação em relação ao eixo Y e uma maior proeminência da nádega esquerda do manequim, o que é condizente com o formato real do mesmo.

3.3 – APLICAÇÃO 3:

É apresentada a seguir uma aplicação da metodologia na reconstrução e análise da superfície posterior do tronco de um sujeito de 33 anos, do sexo masculino, o qual, sendo previamente informado dos procedimentos a que seria submetido, consentiu na realização do experimento.

3.3.1 - PROJEÇÃO ESTRUTURADA DE LUZ SOBRE A SUPERFÍCIE DO CORPO:

O sujeito posicionou-se na posição ortostática. Foi projetado o mesmo slide utilizado na aplicação 1 sobre a superfície posterior do tronco do sujeito.

3.3.2 – REGISTRO E CAPTURA DE IMAGENS:

A superfície posterior do tronco do sujeito sob a projeção do slide foi registrada por duas câmeras digitais JVC (500 linhas de resolução vertical) em ambiente com baixa luminosidade.

3.3.3 – CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO 3D DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE:

Para a calibração das câmeras nesta aplicação, foram utilizados 8 pontos de apoio em fios suspensos por prumos. Foram medidos manualmente e reconstruídos tridimensionalmente 1420 pontos sobre a superfície.

3.3.4- DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA ASSOCIADO À SUPERFÍCIE:

Efetuada como na aplicação 2. O ângulo entre o plano $X_s - Y_s$ otimizado e o plano $X - Y$ do referencial do laboratório foi de 2.9 graus.

3.3.5 – REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DA SUPERFÍCIE:

Foi utilizado o método para representação de superfícies que apresentam concavidades quando projetadas no plano de análise.

3.3.6 – ANÁLISE DA SUPERFÍCIE:

Apresentamos a seguir, como exemplos de análise da superfície reconstruída, a obtenção de curvas de nível sobre a mesma, a obtenção de um conjunto de vetores normais à superfície, que possibilitam uma orientação da mesma, e a visualização da superfície reconstruída.

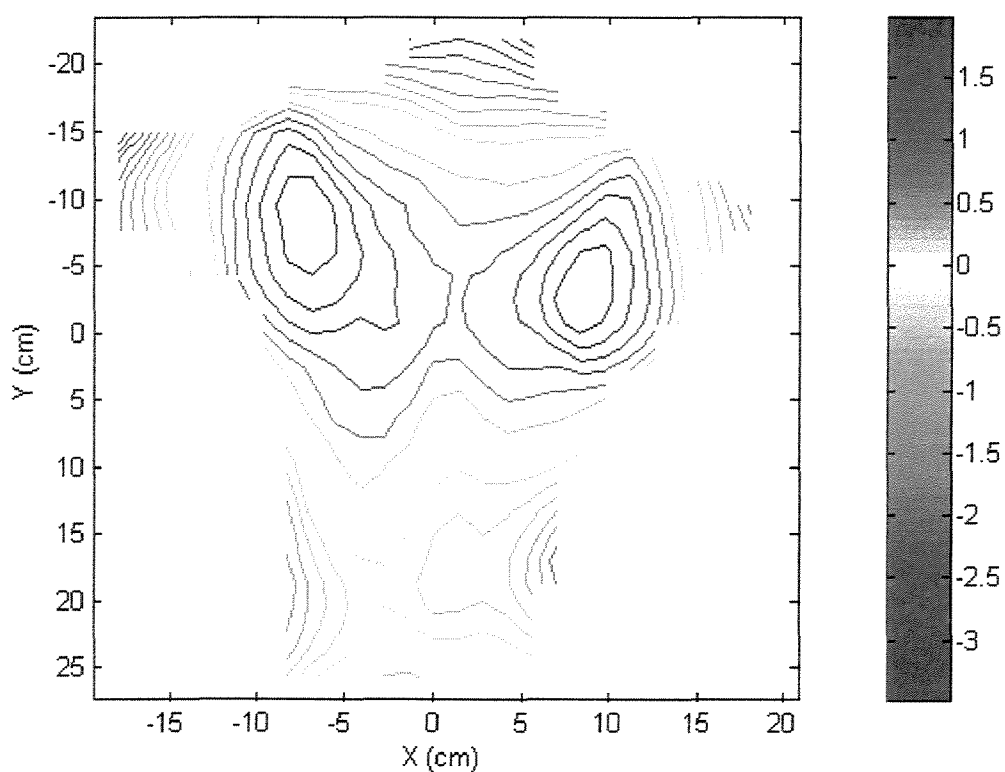


Figura 23: Curvas de nível da superfície posterior do tronco do sujeito, após a aplicação do método de representação de superfícies côncavas.

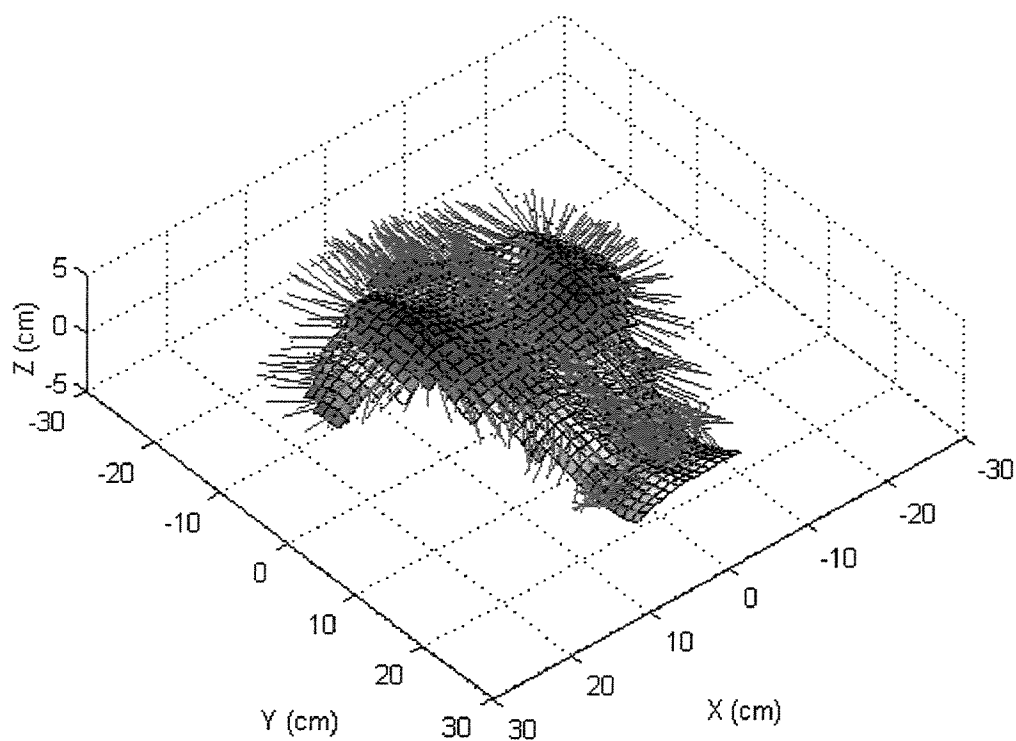


Figura 24: Superfície posterior do sujeito com segmentos de reta (em vermelho) representando os vetores normais à superfície nos pontos em que a função $Z=f(X,Y)$ é avaliada.

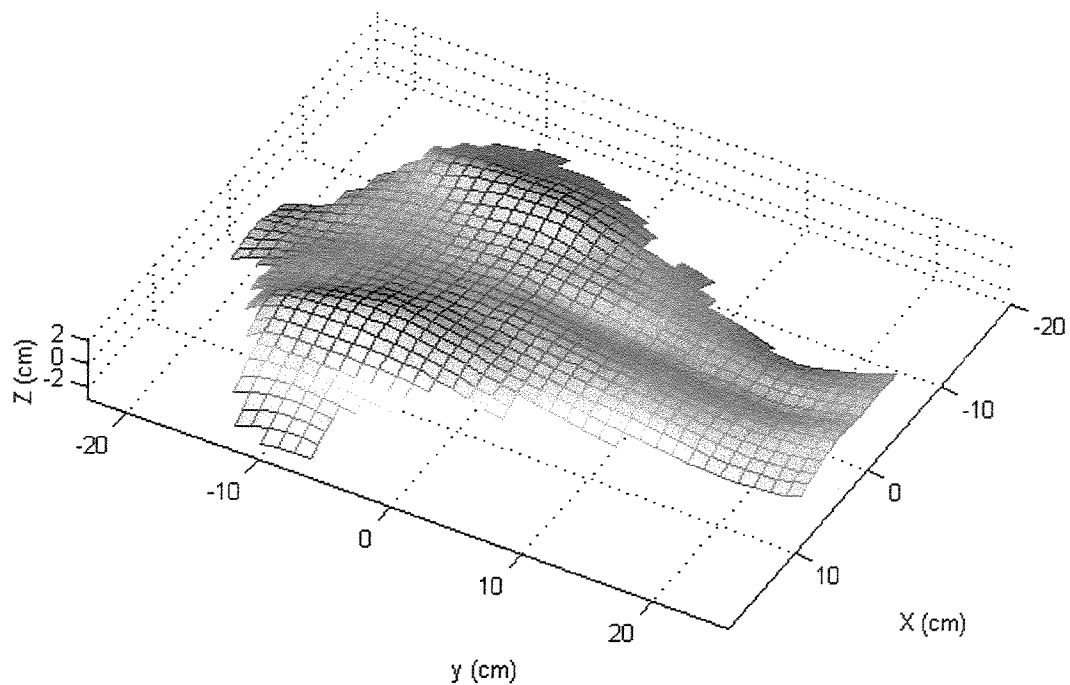


Figura 25: Representação da superfície posterior do sujeito por interpolação através da aplicação do método de representação de superfícies com regiões côncavas em sua projeção.

CAPÍTULO 4: DISCUSSÃO:

O objetivo deste capítulo é efetuar uma avaliação dos procedimentos que compõem a metodologia desenvolvida. Para isto, comentamos e analisamos os resultados obtidos, relacionando-os com a análise dos artigos descritos na revisão bibliográfica.

4.1- OBTENÇÃO DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE:

Os *slides* elaborados mostraram-se adequados à obtenção de um grande número de pontos sobre as superfícies. Devemos observar que o uso da projeção estruturada de luz sobre a superfície a ser representada pode não ser adequada à descrição e à análise da trajetória de pontos anatômicos durante o movimento, posto que não há necessariamente uma correspondência biunívoca entre um ponto de luz e um ponto anatômico.

Em situações em que a localização de pontos anatômicos seja requerida, poder-se-ia estimar a localização de acidentes anatômicos através da análise da representação analítica da superfície (por exemplo, pela correspondência com pontos de máximo ou mínimo valor).

Outra possibilidade seria optar pela utilização combinada da projeção de luz estruturada e da fixação de marcadores.

4.2- REGISTRO DE IMAGENS:

A utilização de câmeras analógicas, mesmo com diferentes sistemas de registro, proporcionou uma qualidade de registro das imagens suficiente para a identificação e medição das marcas. Com as câmeras digitais utilizadas na aplicação 3 da metodologia, foi obtida uma melhor qualidade de imagem, o que possibilitou estudos para a implementação da medição automática dos pontos.

4.3- CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS, MEDIÇÃO E RECONSTRUÇÃO 3D DE PONTOS SOBRE A SUPERFÍCIE:

Os resultados observados indicam que os procedimentos de calibração, medição e reconstrução tridimensional de pontos permitem a obtenção de um grande número de pontos sobre a superfície e a sua medição com grande acurácia e precisão.

Deve-se destacar que, com a superfície do corpo em movimento, pode ocorrer uma pequena alteração no número de pontos obtidos com a projeção da imagem estruturada; entretanto, é esperado que este efeito não influencie significativamente na obtenção das características da superfície, uma vez que a densidade dos pontos seja bastante grande em todas as regiões de interesse e em qualquer instante analisado.

O procedimento de calibração de projetores, indicado em DUNN et al. (1989), seria também um desenvolvimento de interesse para o sistema DVIDEOW devido a requerer menor número de câmeras.

4.4- REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA E ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES:

Verifica-se, nas aplicações 2 e 3 da metodologia, que a utilização do sistema de referência associado ao conjunto de pontos reconstruídos tridimensionalmente permitiu a obtenção de uma representação analítica de superfícies a partir da qual foi possível efetuar uma análise morfológica das mesmas. Destaca-se que este sistema de referência, obtido através da decomposição por eixos principais da matriz de variância e covariância das coordenadas dos pontos reconstruídos tridimensionalmente, é independente do posicionamento do sujeito em relação ao referencial do laboratório.

O método para representação de superfícies que apresentam concavidades quando projetadas sobre o plano de análise mostrou-se eficiente para a representação adequada das superfícies reconstruídas. Não foi encontrada na bibliografia analisada nenhuma referência a um método semelhante.

A acurácia da metodologia no cálculo do valor da área de superfícies pode ser considerada satisfatória para aplicações em Biomecânica, dado o pequeno erro percentual da estimativa da área do objeto cilíndrico.

Devemos destacar também que a metodologia aqui desenvolvida fornece a possibilidade de orientação da superfície, através da utilização do referencial tridimensional otimizado (eixos principais) ou pela obtenção de um conjunto de vetores normais à superfície.

Outro desenvolvimento futuro de interesse é a utilização de métodos de suavização das coordenadas dos pontos reconstruídos.

CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados, consideramos que a metodologia desenvolvida neste trabalho possibilita uma forma de reconstrução tridimensional de superfícies do corpo humano baseada em videogrametria que permite que estas sejam analisadas de modo a obter informações anatômicas e biomecânicas de interesse.

O processo de reconstrução de superfícies, nesta metodologia, possui características que devem ser destacadas:

1. Sendo efetuada a partir de uma projeção estruturada de luz sobre a superfície, possibilita a obtenção de uma grande densidade de pontos sobre a mesma sem a necessidade da colocação de marcadores.
2. Com a reconstrução tridimensional destes pontos, é obtida uma representação aproximada da superfície através da interpolação de uma função do tipo $Z=f(X,Y)$ aos pontos medidos. Esta função é avaliada apenas para um conjunto de coordenadas (X,Y) no interior do contorno da superfície projetada num plano. Isto fornece uma reconstrução mais fidedigna da superfície do corpo em relação à avaliação da função sobre o envoltório convexo dos pontos da superfície projetada, como é encontrado em outros métodos de interpolação.
3. Esta reconstrução permite formas de análise topográfica da correspondente superfície do corpo, tais como:
 1. Estimativa da área da superfície.
 2. Obtenção de curvas de nível sobre a superfície.
 3. Orientação da superfície.

Os contextos potenciais de aplicação da metodologia localizam-se, por exemplo, na Antropometria, em estudos do movimento respiratório, em análises posturais e ortopédicas, entre outras.

A análise da superfície de um segmento do corpo humano pode também ser de interesse para a obtenção de parâmetros inerciais do mesmo. Por exemplo, a partir do perímetro ou do volume sobre a superfície de um membro do corpo pode ser estimada a sua massa.

Deve-se considerar ainda a possibilidade de aplicação da metodologia fora do contexto da Biomecânica. Por exemplo, poder-se-ia reconstruir a superfície de peças mecânicas e analisar suas deformações em função das forças a que são submetidas.

Concluímos, portanto, que este trabalho fornece indicações de que a metodologia desenvolvida representa uma ferramenta importante para análises e avaliações biomecânicas de movimentos humanos, tanto no contexto da pesquisa como em aplicações em situações do treinamento esportivo, da reabilitação e da aprendizagem motora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-AZIZ, Y. I. & KARARA, H. M. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. In: *Proc. ASP/UI Symp. on Close Range Photogrammetry*. Urbana, Illinois.
- AKIMA, H. (1978) A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 4, p. 148-164.
- ANDREONI, G., RABUFFETTI, M., TARZIA, A. & PEDOTTI, A. (1997) 3-D back surfaces as an ergonomic tool. In: *XVIth ISB TokyoCongress - Book of Abstracts*. Tokyo, Japan, Organizing & Program Committee, p. 30.
- BARROS, Ricardo M. L. (1999), BRENZIKOFER, René, LEITE, Neucimar e FIGUEROA, Pascual J. "Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema para Análise Cinemática Tridimensional De Movimentos Humanos". *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica / Brazilian Journal of Biomedical Engineering*, vol. 15, n. 1-2, Janeiro a agosto de 1999. Editada pela Sociedade Brasileira de Engenharia Biomédica.
- BARROS, R. M. L. (2000) *Cinemetria*. Apostila para o III Workshop Biomecânica: Fundamentos e Metodologia. LIB - FEF - UNICAMP.

- BEER, F. P. and JOHNSTON, Jr., E. R. (1991) *Mecânica Vetorial para Engenheiros*. São Paulo: Makron, Mcgraw-Hill.
- BELLMAN, R. *Introduction to Matrix Analysis*. Philadelphia, SIAM, 1997.
- BERME, N., CAPPOZZO, A. (1990) *Biomechanics of Human Moviment: Application in Rehabilitation, Sport and Ergonomics*. Bertec Corporation, USA.
- COURANT, R. & JOHN, F. (1974) *Introduction to Calculus & Analysis*. New York, Wiley – Interscience.
- DUNN, S. M., KEIZER, R. L. & YU, J. (1989) Measuring the area and volume of the human body with structured light. *IEEE transactions on systems, man and cybernetics*, 19, (6), p. 1350-1364, november / december 1989.
- FERRIGNO, G., BORGHESE, N. A. & PEDOTTI, A. (1990) Pattern recognition in 3-d human motion analysis. *ISPRS J. photogramm. remote sens.* vol. 45, p. 227-246.
- FROBIN, W. and HIERHOLZER, E. (1982) Analysis of Human Back Shape using Surface Curvatures. *Journal of Biomechanics*, 15 (5), 379-390.
- FERRIGNO, G. et alli. (1994) Three-dimensional optical analysis of chest wall motion. *Journal of Applied Physiology*. 77 (3): 1224-1231.
- FIGUEROA, P. J. R., LEITE, N. J., BRENZIKOFER, R. e BARROS, R. M. L. (1999) Algoritmo para rastreamento automático de marcadores em seqüências de imagens de movimentos humanos. In: *ANAIS DO VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE BIOMECÂNICA*. Florianópolis, maio de 1999.
- HOFFMANN, K. e KUNZE, R. *Álgebra Linear*. São Paulo, Polígono, 1971

LEITE, M. R. R., BREZIKOFER, R., LIMA FILHO, E. C., IWANOWICZ, J. B. e BARROS, R. M. L. (1999) Metodologia para análise de padrões respiratórios baseada nos movimentos da superfície do tronco. In: *ANAIS DO VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE BIOMECÂNICA*. Florianópolis, maio de 1999.

MILLES, M., DESJARDINS, P. J. & PAWEL, H. E. (1985) The facial plethysmograph: a new instrument to measuring facial swelling volumetrically. *Journal of oral and maxillofacial surgery*, vol. 43, p. 346-352.

SYMON, K. *Mecânica*. Rio de Janeiro: Campus, 1986.