

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA**

JOSÉ ALBERTO PROVENZANO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA
PARA RECONSTRUÇÃO DA SUPERFÍCIE DO PÉ
HUMANO POR VIDEOGRAMETRIA**

Campinas
2002

JOSÉ ALBERTO PROVENZANO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA
PARA RECONSTRUÇÃO DA SUPERFÍCIE DO PÉ
HUMANO POR VIDEOGRAMETRIA**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Pós-Graduação da Faculdade de
Educação Física da Universidade
Estadual de Campinas para obtenção do
título de Mestre em Educação Física.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros

Campinas
2002

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA
PELA BIBLIOTECA FEF - UNICAMP**

P949d Provenzano, José Alberto.
Desenvolvimento de uma metodologia para reconstrução da superfície do pé humano por videogrametria / José Alberto Provenzano. - Campinas, SP: [s.n], 2002.

Orientador: Ricardo Machado Leite de Barros.
Dissertação (mestrado) – Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas.

1. Biomecânica. 2. Superfície. 3. Metodologia. 4. Pé. I. Barros, Ricardo Machado Leite de. II. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física. III. Título.

(asm/fef)

Título em inglês: Development of a methodology for the reconstruction of the surface of the human foot by videogrammetry.

Palavras-chaves em inglês (Keywords): Biomechanics; Surface; Methodology; Foot.

Área de Concentração: Biodinâmica do movimento humano.

Títuloção: Mestrado em Educação Física

Banca Examinadora: Deyse Machado Borges. Sergio Augusto Cunha. René Brenzikofer. Ricardo Machado Leite de Barros.

Data da defesa: 26/02/2002.

JOSÉ ALBERTO PROVENZANO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
RECONSTRUÇÃO DA SUPERFÍCIE DO PÉ HUMANO
POR VIDEOGRAMETRIA**

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por José Alberto Provenzano e aprovada pela Comissão julgadora em: 26/02/2002.

Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros
Orientador

Campinas
2002

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros
Orientador

Deyse Machado Borges

Sergio Augusto Cunha

René Brenzikofer

Provenzano, Jospe Alberto. **Desenvolvimento de uma metodologia para reconstrução da superfície do pé humano por videogrametria**. 2002. 65f. Dissertação (Mestrado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RESUMO

O estudo das características do pé humano é área de grande interesse na Biomecânica, este trabalho tem como objetivo a reconstrução tridimensional de pontos na superfície do pé humano por meio de um procedimento metodológico baseado em videogrametria. A reconstrução tridimensional do pé humano neste trabalho é realizada a partir de uma projeção estruturada de luz sobre o pé obtendo-se uma grande densidade de pontos sobre a superfície. Utilizando câmeras digitais de vídeo é feito o registro das imagens do pé sob esta projeção. Cada ponto a ser reconstruído tem que ser registrado no mínimo por duas câmeras, essa uma exigência da reconstrução tridimensional. Para reconstrução tridimensional foi utilizado o software Dvideow, desenvolvido no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica – UNICAMP. Após o registro das imagens faz-se necessário conhecer as coordenadas de tela de todos os pontos de interesse, para isto realiza-se o tracking de marcadores em ambiente Dvideow. Este processo inicia-se pela definição de algoritmos de segmentação das imagens adquiridas. A seleção dos algoritmos dá-se de acordo com a necessidade do experimento e com o tamanho dos marcadores nas imagens, portanto, pode haver uma variação na seqüência de aplicação dos algoritmos nas imagens registradas. Os algoritmos operam em alterar níveis de intensidade de cor, detectar os contornos dos marcadores, determinar o número máximo de marcadores para o tracking, selecionar regiões de maior contraste de intensidade e selecionar os contornos por números máximos e mínimos de pixels. Realizado o tracking automático de marcadores, tem-se as coordenadas de tela (x,y) dos pontos nas imagens. Assim temos um par de imagens contendo as coordenadas bidimensionais dos pontos. No entanto, a ordem e a quantidade de pontos nos conjuntos de dados das duas imagens não são os mesmos. Usando rotinas matemáticas elaboradas no software Matlab realizam-se a rotulagem dos pontos resultantes do tracking, deixando assim os conjuntos de dados que contém as coordenadas bidimensionais com a mesma quantidade de pontos em ambos os conjuntos e também indexados numa mesma ordem. Em seguida em ambiente Dvideow realiza-se a reconstrução tridimensional de pontos sobre a superfície. Como resultados da reconstrução têm-se os pontos reconstruídos sobre a superfície do pé sendo possível a visualização através de gráficos. Foram feitas aplicações da metodologia em pés de três sujeitos e a um modelo de pé utilizado como parte integrante de prótese em amputados. Também foram realizadas sobre o modelo do pé, medições de distâncias entre pontos usando o método por videogrametria e medições diretas entre os pontos marcados sobre a superfície do modelo. Obteve-se como resultado para a metodologia proposta um valor para bias de 1,77 mm, para precisão do método de 0,31 mm e um erro padrão estimado em 1,80 mm. Conclui-se assim, que a metodologia desenvolvida neste trabalho permite uma forma de reconstrução tridimensional da superfície do pé humano baseado em videogrametria, através da qual se obtém informações analíticas e biomecânicas de interesse.

Palavras-Chaves: Biomecânica; superfície; metodologia; pé.

Provenzano, Jospe Alberto. **Development of a methodology for the reconstruction of the surface of the human foot by videogrammetry**. 2002. 65f. Dissertação (Mestrado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ABSTRACT

The study of the human foot characteristics is an area of great interest in the Biomechanics, the main goal of this study was to develop a methodology for the three-dimensional reconstruction of the points on the surface of the human foot based on videogrammetry. The three-dimensional reconstruction of the human foot, objective of this paper, is performed by starting from a structured projection of light on the foot obtaining great density of the points on the surface. Using digital video cameras, the register of the images of the foot is made on this projection. Each marker to be reconstructed was to be registered by at least two cameras, which is a requirement of the three-dimensional reconstruction. For the three-dimensional reconstruction was used the Dvideow software, that developed in the Laboratory of Instrumentation for Biomechanics – UNICAMP. After the image register, it is necessary to know the screen coordinates of all the points of interest, for this purpose one makes the tracking of the markers in the Dvideow environment. The process begins with the definition of algorithms of segmentation of the acquired images. The selection of the algorithms takes place according to the experiments needs end to the images markers size, therefore, may be a variation in the sequence of the algorithm application on the registered images. The algorithms operates in order to alter the intensity of colors, detect the outlines of the markers, determine the largest amount of markers for tracking, select the regions of largest contrast of color intensity and select the outlines for the maximum and minimum number of pixels. By executing the automatic tracking of the markers, we obtain the coordinates of the screen (x,y) corresponding to the points on the images. Therefore, we have a pair of images containing the bi-dimensional coordinates of the points. Nevertheless, the order and quantity of points in the sets of data of both images are not the same. Then the Matlab software is used to label the points resulting from the tracking, that is, in order to let the sets of data which contain the bi-dimensional coordinates have the same amount of points in both sets and also to index the points in the same order. Right after that, in the Dvideow environment, the three-dimensional reconstruction of the points is performed on the surface. As a result of the reconstruction, the reconstructed points on the surface of the foot were obtained, whereas, visualization was possible through graphs. Applications of the methodology were made on the feet of three individual and on a model of a foot used as an integrating part of the prosthesis of the amputee. Besides that, measurements were made on the model of the foot of distances between points by using the method of videogrammetry and direct measurements between points marked on the surface of the model. For the proposed methodology, the result obtained was: a value for bias of 1.77 mm, for precision of the method of 0.31 mm and an estimated standard error at 1.80 mm. Therefore, concluding that the methodology developed in this paper permits a form of three-dimensional reconstruction of the surface of the human foot based on videogrammetry, through which important analytical and biomechanical information is obtained.

Keywords: Biomechanics; surface; methodology; foot.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha de pontos a ser projetada sobre o pé	17
Figura 2 - Superfície do pé recoberta pela projeção estruturada de luz	18
Figura 3 - Posicionamento de duas câmeras e projetor de slide	19
Figura 4 - Imagem da superfície do pé do sujeito sob projeção estruturada de luz	20
Figura 5 - Imagem original antes de segmentação	21
Figura 6 - Imagem após seleção de algoritmos de inversão e erosão	21
Figura 7 - Imagem da câmera 1 com os pontos de interesse medidos após tracking semi-automático	22
Figura 8 - Imagem da câmera 2 com os pontos de interesse medidos após tracking semi-automático	23
Figura 9 - Imagem da câmera 1	25
Figura 10 - Imagem da câmera 2	25
Figura 11 - Critério 1 para rotulagem	26
Figura 12 - Critério 2 para rotulagem	27
Figura 13 - Critério 3 para rotulagem	28
Figura 14 - Ponto selecionado P_K	28
Figura 15 - Calibrador usado na aplicação da metodologia	31
Figura 16 - Prumos presos ao calibrador	31
Figura 17 - Vista lateral do modelo do pé usado na aplicação da metodologia	35
Figura 18 - Vista medial do modelo do pé usado na aplicação da metodologia com pontos marcados sobre a superfície	37
Figura 19 - Tracking automático da superfície medial e plantar do modelo do pé (câmera 1)	38
Figura 20 - Tracking automático da superfície medial e plantar do modelo do pé (câmera 2)	38
Figura 21 - Rotulagem dos pontos na superfície do modelo de pé na câmera 1	39
Figura 22 - Rotulagem dos pontos na superfície do modelo de pé na câmera 2	39
Figura 23 - Vista 1 dos pontos reconstruídos na superfície do modelo do pé	40
Figura 24 - Vista 2 dos pontos reconstruídos na superfície do modelo do pé	41

Figura 25 - Medição direta entre os pontos na superfície do modelo do pé	42
Figura 26 - Gráfico da relação entre as medidas diretas e por videogrametria	45
Figura 27 - Esquema da montagem experimental	47
Figura 28 - Tracking automático de área delimitada (câmera 1)	48
Figura 29 - Tracking automático de área delimitada (câmera 2)	48
Figura 30 - Rotulagem dos pontos na câmera 1	49
Figura 31 - Rotulagem dos pontos na câmera 2	49
Figura 32 - Plotagem 3d dos pontos reconstruídos	50
Figura 33 - Pontos reconstruídos sobre os pés do sujeito 1	51
Figura 34 - Pontos reconstruídos sobre os pés do sujeito 2	51
Figura 35 - Pontos reconstruídos sobre os pés do sujeito 3	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela das medições diretas e por videogrametria	42
Tabela 2 - Caracterização dos sujeitos	45

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - Questionário / Avaliação dos voluntários	64
ANEXO B - Ficha das medidas diretas sobre o modelo do pé humano	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	05
2.1. Trabalhos com métodos para caracterização do pé humano	06
2.2. Trabalhos com métodos para reconstrução de superfícies	09
3. OBJETIVOS	12
3.1. Objetivo Geral	13
3.2. Objetivos Específicos	13
4. METODOLOGIA	14
4.1. Registro das imagens	17
4.2. Tracking de marcadores	19
4.3. Medição, calibração das câmeras e reconstrução tridimensional	29
4.4. Materiais	33
5. RESULTADOS	34
5.1. Aplicação 1	35
5.1.1. Registro de imagens	35
5.1.2. Tracking de marcadores, calibração das câmeras e medição	37
5.1.3. Reconstrução tridimensional dos pontos sobre o modelo de pé	40
5.1.4. Procedimentos para medição direta e medição por videogrametria	41
5.2. Aplicação 2	45
5.2.1. Registro de imagens	46
5.2.2. Tracking de marcadores, calibração das câmeras e medição	47
5.2.3. Reconstrução 3D de pontos sobre a superfície	50
6. DISCUSSÃO	53
6.1. Registro de imagens	54
6.2. Procedimentos de tracking automático e rotulagem dos pontos	55

6.3. Calibração das câmeras, medição e reconstrução de pontos sobre a superfície	55
6.4. Medição direta e medição por videogrametria sobre a superfície do modelo de pé	55
7. CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS	63

1 INTRODUÇÃO

Considerando o pé como órgão fundamental para locomoção humana, assim como para a execução de tarefas independentes, o estudo de suas características é tema de grande interesse para os pesquisadores em Biomecânica na área clínica, esportiva, ergonômica e industrial.

O pé humano possui uma estrutura complexa com ossos, ligamentos, músculos, tendões e nervos, sujeitos aos esforços e tensões diárias. As deformidades, desordens na sustentação do peso corporal em situação estática ou dinâmica e a dor são os principais motivos que levam um indivíduo a procurar auxílio de um profissional da área de saúde. As deformidades que acometem o pé humano são congênitas ou adquiridas e podem agravar-se por fadiga, traumas, idade ou pressão inadequada dos calçados. Os sintomas de dor estão geralmente relacionados a patologias locais ou gerais que acometem secundariamente os sistemas ósteo-articular, vascular e nervoso.

A área médica e fisioterápica faz uso de exame clínico para detecção de possíveis desordens nos pés, esse exame compreende dois momentos, o primeiro com o pé sem carga e o segundo com carga. Com o pé sem sustentação de carga são observados: pele, suprimento sanguíneo, unhas, articulações e músculos. Na posição estática com sustentação de carga são observados os contornos da superfície do pé em situações como, por exemplo, a posição na ponta dos pés. Na situação dinâmica utiliza-se a marcha normal como referência para avaliação comparativa. A observação da superfície do pé no exame clínico é, portanto fator relevante no diagnóstico de alterações do pé e uma metodologia capaz de auxiliar no reconhecimento de detalhes da superfície do pé poderia contribuir com as referidas áreas.

A participação da indústria de calçados, na busca por aprimoramento dos modelos de calçados como o tênis esportivo, tem mostrado uma tendência de aumento das pesquisas na Biomecânica do calçado. O pé diariamente está submetido a situações onde muitas vezes fica sujeito a compressão dentro de calçados, em contato com superfícies rígidas ou irregulares sujeitas a pequenos traumas constantemente. PENEIREIRO e LOBO DA COSTA (2001) dizem que, quando inapropriado às características antropométricas dos pés e às necessidades específicas de movimento do indivíduo, o calçado pode produzir padrões de movimento inadequados que sobrecarregam as estruturas anatômicas, resultando em desconforto,

dores ou mesmo lesões crônicas.

Portanto, pelos estudos das características do pé humano pode-se chegar a critérios de conforto e segurança para confecção de calçados, os quais são objetos de interesse das indústrias calçadistas.

No entanto em nosso país alguns trabalhos sustentam a necessidade do aumento de pesquisa nesta área e pode-se destacar Manfio (1995), quando afirma que no Brasil existe uma carência muito grande de dados antropométricos e biomecânicos referentes à estrutura corporal dos brasileiros, tanto de adultos como de crianças. E ainda, Sá et al. (2001), em seus trabalhos, diz que o estudo das tendências desenvolvimentistas das características antropométricas dos pés desde a infância até a idade adulta tem recebido pouca atenção, apesar da importância dos pés em suas funções estáticas ou dinâmicas.

Outra área de interesse na caracterização do pé humano é a da indústria de próteses e órteses. Os materiais e componentes tem se mostrado cada vez mais adequados às condições de uso, assim como os critérios para construção, conformação e adaptação desses equipamentos tentam se manter fiel às características do segmento deficiente ou ausente. As órteses e próteses tentam reproduzir não só as funções do pé como órgão do corpo humano, mas também pelo fator estético se manter fiel à forma e a característica antropométrica do pé. Alguns estudos como de Lockard (1998) propõe uma discussão mais ampla acerca das metas de uso e tipos de órteses, assim também como sobre os materiais e métodos que podem ser usados na fabricação de órteses para o pé. Seu interesse é auxiliar os fisioterapeutas nas indicações para pacientes que podem ser beneficiar o uso deste dispositivo.

Na intenção em contribuir na caracterização do pé humano o interesse deste trabalho está em reconstruir a superfície do pé por meio do procedimento metodológico de reconstrução tridimensional baseado em videogrametria.

Em Biomecânica, a maioria dos trabalhos que envolvem videogrametria procura representar os segmentos de interesse por marcas externamente identificadas e selecionadas de forma a indicar da melhor maneira o eixo articular do movimento, o centro de gravidade do segmento ou determinados acidentes anatômicos. A seleção dos marcadores leva em consideração o modelo antropométrico biomecânico de corpos rígidos, ao fazer esta representação admite-se o segmento como uma estrutura rígida isenta de deformações, simplificando assim o sistema.

Neste trabalho decidiu-se pela pesquisa de uma metodologia que representasse a superfície do pé, sendo necessário para isso uma maior densidade de pontos reconstruídos tridimensionalmente sobre a superfície de interesse.

O uso de uma grande densidade de marcadores sem fixação direta ao segmento desperta o interesse em pesquisadores devido à ausência de marcadores presos ao corpo do sujeito e pelo detalhamento dos modelos resultantes. Assim também como abre a possibilidade de extrair informações antropométricas contribuindo com áreas descritas anteriormente.

No capítulo a seguir é feita uma revisão de literatura compreendendo trabalhos que possuem como objeto de interesse o pé humano ou a mesma abordagem metodológica deste trabalho (reconstrução de superfícies).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Trabalhos com métodos para caracterização do pé humano

O processo de revisão bibliográfica nesta dissertação está voltado a trabalhos com objetivo de caracterizar a superfície do pé humano. A maioria dos trabalhos voltados à caracterização da superfície do pé humano envolve de alguma maneira medições diretas ao pé com o uso de antropômetros.

Um dos estudos mais antigos que considera a antropometria do pé humano diz respeito ao trabalho de Hertzberg et al. (1954, apud MANFIO, 1995), em que se determinaram 132 medidas do corpo, em mais de 4.000 sujeitos acima de 18 anos, das quais 8 eram referentes ao pé. O trabalho traz como medidas antropométricas: comprimento do pé, comprimento do calcâneo até a cabeça do metatarso I, perímetro das cabeças dos metatarsos, larguras do pé, do calcanhar e bimaléolar e alturas do maléolo lateral e maléolo medial.

Uma pesquisa para caracterização do pé foi realizada por Rodriguez et al. (1997), na qual se buscava relacionar parâmetros antropométricos do pé em crianças de diferentes populações em função de suas características morfológicas e antropométricas, de forma a estabelecer algumas relações entre os grupos selecionados. As crianças foram agrupadas da seguinte maneira: crianças “obesas”, crianças “nativas” (as que não usam calçados em suas atividades diárias) e crianças “urbanas” (não obesas).

No mesmo trabalho foi estudado um grupo-controle de adultos para tentar reproduzir o método antropométrico de Cavanagh e Rodgers (1987) aplicado em adultos. Realizaram-se as seguintes medidas antropométricas diretas: comprimento do pé, largura do antepé e largura do calcanhar e como medida indireta o índice de arco plantar. Verificou-se, através dos valores médios do índice do arco longitudinal medial que os pés das crianças do grupo “nativas” (as descalças) possuíam um arco mais alto que o dos pés das crianças “urbanas” e das “obesas”; e, em comparação aos resultados obtidos no grupo-controle, que os pés das “nativas” possuíam um arco semelhante ao dos pés dos adultos. Rodríguez et al. (1997) concluíram que, apesar da literatura caracterizar a segunda infância como a fase em que não se observam diferenças anatômicas significativas nos pés das crianças, ao término deste referido trabalho foi encontrada uma população de crianças nesta faixa etária com características morfológicas e hábitos culturais (por exemplo, o uso ou não de calçados) diferentes que

determinam precocemente alterações nas estruturas anatômicas do pé.

Em outro estudo Sacco et al. (1997) também fizeram uso de medidas diretas objetivando características antropométricas do pé na posição estática em crianças obesas e não obesas de acordo com o índice de massa corporal. Assim como parâmetros biomecânicos dinâmicos relacionados à distribuição de pressão plantar e a força de reação do solo durante a marcha em crianças obesas. As medidas antropométricas diretas utilizadas foram: perímetros do calcâneo e antepé, larguras da articulação metatarso-falangeana e calcanhar e comprimento do pé. As medidas indiretas coletadas foram: área total do pé e índice de arco longitudinal medial. Foram observadas variações principalmente no declínio da força vertical e da pressão plantar, que poderiam ser atribuídas a alterações funcionais na marcha em virtude do sobrepeso suportado pelos pés, constatando-se entre as alterações antropométricas, aumentos na área total do pé e no índice do arco plantar em relação aos índices de massa corporal.

Manfio (1995), em seu trabalho, coletou medidas antropométricas do pé humano, objetivando melhorar a confecção de calçados e também estabelecer um banco de dados a partir das variáveis e características analisadas, que poderiam atender à fabricação de calçados conforme critérios de conforto, saúde e segurança.

As variáveis do pé analisadas foram: comprimentos, perímetros, larguras, alturas e ângulos. Nesse trabalho verificou-se uma grande variação do perímetro na região da cabeça dos metatarsos, o que indicaria a necessidade de confeccionar, para cada numeração, calçados com mais de um perfil.

Outra pesquisa direcionada à indústria de calçados foi realizada por Geib (1999). Seu objetivo era o de determinar os níveis de correlação entre os perímetros dos pés, medidos na região da articulação das cabeças dos metatarsos, com os perímetros correspondentes na fôrma e no calçado, cuja adequação implicaria, para uma mesma numeração de calçado, o conforto de pés com características diferentes. Geib (1999) concluiu que a relação entre o perímetro da fôrma e o perímetro do calçado é muito grande, pois, o calçado expressa a fôrma em 92%, isto é, as características da fôrma, sobre a qual o calçado foi montado, mantêm uma representatividade muito alta. O mesmo não se confirma quando se comparam os perímetros dos pés com os perímetros dos calçados e das fôrmas, os coeficientes de correlação foram bem

baixos.

Analisando as características das formas dos pés em homens e mulheres adultos, com interesse na aplicação destas na confecção dos calçados, Cavanagh et al.(2001) chegou a conclusão que o pé feminino não pode ser encarado como uma miniatura do pé masculino, pois se difere em características da forma. Particularmente no arco, na face lateral, no primeiro dedo e na região plantar que corresponde ao primeiro metatarso. Estas diferenças teriam que ser levadas em consideração no design e confecção dos calçados.

Dentre as metodologias que envolvem medição direta do pé, pode-se destacar o trabalho de Manna et al. (2001), que fizeram um estudo comparativo das dimensões do pé entre homens e mulheres adultos e a avaliação dos problemas do pé no uso de calçados. As medidas registradas foram comprimentos, larguras, alturas para as quais utilizaram-se antropômetros, e o volume do pé, determinado pelo método de deslocamento de água em um recipiente de vidro.

Não se observaram correlações significativas entre as medições feitas e os problemas decorrentes do uso de calçado. Mas foi observado que as deformações dos calçados avaliados ocorreram mais no lado direito do par de calçados que no esquerdo tanto em homens como em mulheres provavelmente decorrentes da pressão imposta ao pé durante o ato de movimentar-se (caminhada).

De acordo com Lafortune (2001), em sua pesquisa sobre calçado esportivo, deve-se levar em consideração informações colhidas das fontes: Mecânica (materiais e componentes) e da Biomecânica (cinemática, cinética e atividade muscular), assim como obter informações de ordem Sensorial (percepção sensorial e preferências) para alcançar melhores resultados.

Um outro método foi usado por Palma et al. (2001) para se caracterizar o pé humano com objetivo de se verificar a anatomia funcional do pé em situação estática com suporte do peso do corpo e em situação dinâmica na caminhada e corrida. Utilizaram-se como métodos, radiografias para se obter informações sobre o comportamento das formas dos ossos nestas condições. E para observar os ligamentos, tendões e arcos do pé usaram-se ultrassonografia, tomografia computadorizada e ressonância magnética.

2.2. Trabalhos com métodos para reconstrução de superfícies

Neste item são apresentados trabalhos em que se utilizaram procedimentos metodológicos envolvendo a reconstrução de superfície. Em virtude da escassez da aplicação dessas metodologias em estudos sobre o pé humano, decidiu-se incluir abordagens relativas a outros segmentos corporais.

Métodos mecânicos já foram utilizados para a reconstrução de superfícies faciais, como o pletismógrafo digital desenvolvido por Milles et al. (1985), no qual um braço sensor com uma roda percorriam a superfície facial num plano horizontal. Um transdutor elétrico-mecânico registrava a posição do braço sensor e os sinais elétricos resultantes permitiam a construção de curvas sobre a superfície facial e, conseqüentemente, o cálculo de volumes sob partes da face por integração numérica.

Utilizando o sistema de análise cinemática ELITE, Andreoni (1997), com o interesse na obtenção de parâmetros ergométricos para a confecção de assentos, chegou a uma representação da superfície posterior do tronco humano através de um escaneamento manual da superfície por um feixe de luz infravermelha. O sistema ELITE é um sistema onde as câmeras são receptoras de radiação infravermelha. Neste procedimento são projetados pontos de luz infravermelha na superfície, que são reconhecidos um por vez pelo sistema. Essa técnica exige a manutenção do objeto em situação estática durante todo o tempo. Sobre o conjunto de pontos reconstruídos é ajustada uma função que representa a superfície.

Em Dunn et al. (1989), foi apresentado um exemplo de aplicação de reconstrução tridimensional de superfícies do corpo humano com o qual se procurava medir as áreas de pele lesada por queimaduras em pacientes, o que ia ao encontro do interesse dos cirurgiões plásticos. Essa metodologia é semelhante à conhecida como estereografia por varredura. O slide usado continha um padrão de linhas e pontos que forneciam um conjunto de marcas sobre a superfície de interesse. A imagem era processada com ajuda de algoritmos para a detecção automática dos pontos projetados na superfície, obtendo-se assim as coordenadas tridimensionais para fazer a representação da superfície e o cálculo da área.

Um método semelhante foi utilizado por Liljenqvist et al. (1998), quando foram analisadas as radiografias de 95 pacientes com escoliose idiopática e 18 com hipercifose.

Realizaram-se medições, como o ângulo de Cobb, e observou-se sua confiabilidade como método de avaliação tridimensional em deformidades da coluna.

Kratky (1975) trabalhou em uma metodologia de pesquisa que envolvia os princípios da fotografia de silhueta, registro em vídeo, estéreo-fotogrametria analógica e técnica de Moiré para reconstrução e análise de superfícies de segmentos do corpo humano. Um par de fotografias era extraído com o auxílio de dois espelhos, os quais produziam uma completa e simultânea vista tripla do segmento do corpo escolhido. O par de fotografias era então digitalizado e as coordenadas dos pontos, medidas. A utilização dos dois espelhos nessa metodologia substitui o uso de duas câmeras.

A mesma metodologia também foi usada para medir a geometria da coluna e da pelve, calculando-se as inclinações e torções a que estão sujeitos (DRERUP et al. 2001) e para medir a superfície posterior do tronco humano com escoliose e comparar com radiografias (DRERUP, HIERHOLZER 1994).

Dos métodos de processamento de imagens em que se utiliza projeção de luz estruturada, podemos destacar Keefe e Riley (1986) que projetavam, com laser de baixa potência uma linha vertical de pontos sobre a face do sujeito promovendo uma varredura de superfície. Com um “par estéreo” de imagens obtidas da face iluminada era possível construir um perfil vertical da face.

Utilizando conceitos de geometria diferencial de superfícies, Frobin e Hierholzer (1982) propuseram um método de avaliação da forma de superfície posterior do tronco, através de videogrametria, para obter as medidas de suas curvaturas de superfícies. Eles usaram quatro tipos básicos de curvaturas sobre a superfície: plana, cilíndrica, esférica e arqueada (côncava). Tais curvaturas são medidas matemáticas que, calculadas num ponto qualquer da função que representa a superfície, indicam quanto uma região infinitesimal da superfície contendo o ponto dado se desvia da forma plana.

Um sistema de reconstrução e análise de superfície do pé humano chamado Scanner Óptico por Laser foi concebido por Bergmann (2000), onde um sistema óptico a laser faz uma varredura do pé gerando imagens tridimensionais, a partir de variadas angulações. Essas imagens podem ser utilizadas pela Biomecânica em pesquisas sobre superfície do pé, pela ortótica para se confeccionar órteses e próteses assim também como em diagnósticos de anormalidades do pé humano. O sistema requer a posição estática do pé durante o procedimento

de varredura e não permite variações de situações experimentais além daquela exigida pelo equipamento.

A metodologia utilizada em nosso trabalho foi apresentada inicialmente por Paterniani et al. (2001). No referido trabalho foram realizadas a reconstrução e análise de superfícies da face posterior do tronco humano em situação estática, utilizando o ambiente Dvideow. Pode-se analisar a superfície no espaço através de gráficos de curvas de nível, assim também como a metodologia abriu possibilidade para orientação da superfície, através de um referencial otimizado ou obtenção de vetores normais à superfície.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Definiu-se como objetivo geral deste trabalho de pesquisa o desenvolvimento de uma metodologia para reconstrução tridimensional da superfície do pé humano baseado em videogrametria.

3.2. Objetivos Específicos

Todo o procedimento de reconstrução tridimensional de pontos passa por etapas, as quais são destacadas como objetivos específicos que serão analisados no decorrer deste estudo.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Enquadramento e posicionamento dos equipamentos para registro das imagens;
- Seleção de algoritmos de segmentação de imagens para se trabalhar com a imagem do pé;
- Automatização do processo de rotulagem dos pontos na superfície através de rotinas matemáticas;
- Reconstrução tridimensional propriamente dita;
- Avaliar a precisão, o valor do erro padrão e bias do método proposto. Para tanto fez-se a medição direta de distâncias entre pontos sobre um modelo do pé e no método por videogrametria, posteriormente correlacionou-se os resultados.

4. METODOLOGIA

O procedimento metodológico desenvolvido neste trabalho inicia-se pelo registro das imagens estereoscópicas da superfície do pé humano coberto pela projeção estruturada de luz.

Para reconstruir a superfície do pé em três dimensões são necessários os seguintes procedimentos:

1. Definição de muitos pontos na superfície do pé;
2. Registrar os pontos com duas ou mais câmeras;
3. Identificar cada ponto no registro das diversas câmeras;
4. Calibração das câmeras;
5. Reconstrução tridimensional de coordenadas;

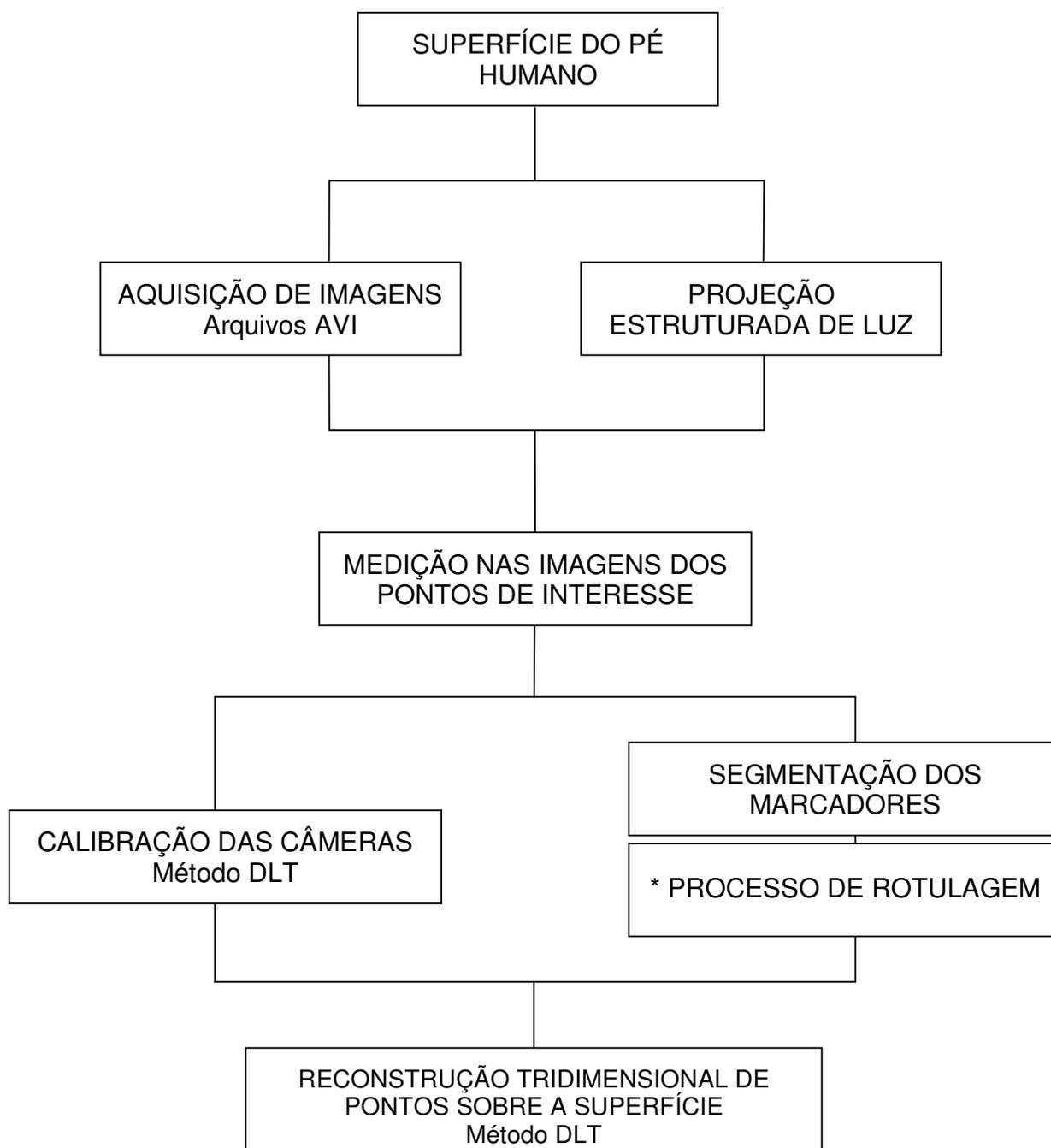
A calibração consiste em determinar posições e orientações das câmeras em relação a um sistema de referência estabelecido a partir da medição dos pontos da superfície do pé humano na imagem e aplicação do método DLT (Direct Linear Transformation) este método foi desenvolvido por Abdel-Aziz e Karara (1971).

A reconstrução tridimensional de coordenadas baseia-se em conhecer as coordenadas espaciais dos pontos de interesse usando as coordenadas bidimensionais dos pontos nas imagens e os dados da calibração das câmeras.

Nesta pesquisa, o sistema de análise usado foi o Dvideow (BARROS *et al*, 1997), desenvolvido no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica com a participação do Instituto de Computação da UNICAMP, o qual tem como característica a concentração de recursos computacionais em ambiente estruturado, flexível e aberto.

Na seqüência apresenta-se um diagrama de blocos com as etapas da metodologia, cujo detalhamento será mostrado mais adiante. O processo de rotulagem (*) no diagrama de blocos será descrito no item 4.2. *Tracking de marcadores*.

METODOLOGIA PARA RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DA SUPERFÍCIE DO PÉ HUMANO



4.1. Registro das imagens

Para projeção estruturada de luz foram utilizados projetores de slide e confeccionados slides. O slide a ser projetado sobre a superfície deve ser tal que as seguintes características sejam obtidas:

- Matriz com grande quantidade de pontos;
- Forte contraste entre o ponto a ser projetado e o fundo de imagem;
- Pontos diferenciados pelo tamanho ou cor, de maneira a permitir a identificação das suas posições na matriz (malhas), quando apenas parte desta estiver projetada sobre a superfície de interesse.

Na figura 1, observa-se um exemplo de slide, para ser projetado sobre o pé humano.

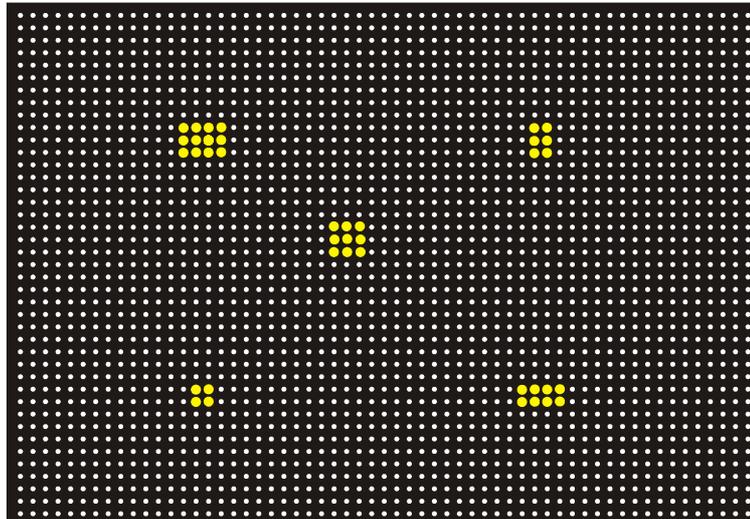


Figura 1 – Malha de pontos a ser projetada sobre o pé.

Para visualização de toda superfície do pé, é necessário a captura de imagens da face medial, lateral, dorsal e plantar do pé humano, as faces podem ser registradas por um número de quatro a seis câmeras dependendo do enquadramento de interesse.

O posicionamento das câmeras, projetores e demais equipamentos deve atender às seguintes exigências:

1. Toda a superfície do pé deve receber projeção estruturada de luz (figura 2). As regiões em que isso não ocorrer ou em que o número de pontos projetados for muito pequeno, não poderão ser reconstruídas.
2. Cada ponto projetado deve ser visível por no mínimo duas câmeras, para reconstrução tridimensional (figuras 2 e 3).

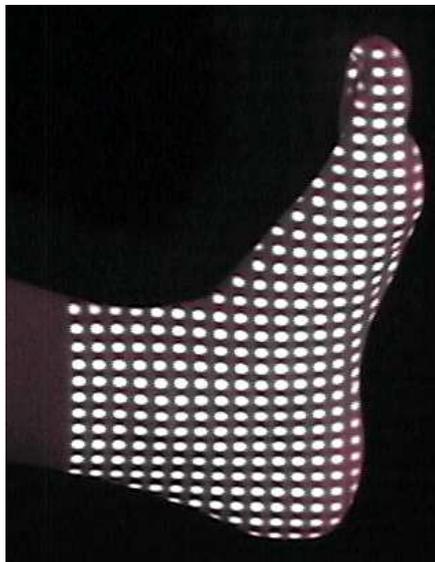


Figura 2 – Superfície do pé recoberta pela projeção estruturada de luz.

3. Câmeras fixadas em tripés. Para que se possa modificar a altura e os ângulos das câmeras entre si, a fim de procurar um melhor enquadramento e posicionamento (figura 3).
4. Colocação de algum fundo escuro nas imagens, caso o segundo plano dos registros seja de cor clara, para não haver reflexões e também para não capturar a imagem de outro objeto que não seja o de interesse.
5. Enquadramento que permita uma resolução espacial suficiente para que não ocorra perda de marcadores. Entende-se por resolução espacial a propriedade do instrumento ou sistema de distinguir espacialmente dois objetos, neste caso os pontos sobre a superfície.

Depende, portanto, da relação entre o campo de visão da câmera no “plano” objeto espaço e do número de linhas e colunas de vídeo para registro disponível.

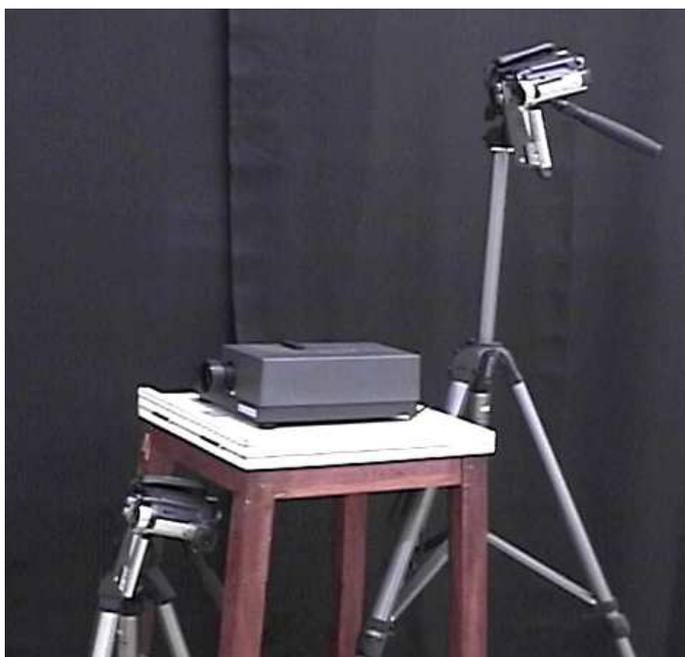


Figura 3 – Posicionamento de duas câmeras e projetor de slide.

4.2. Tracking de marcadores

Como resultado dos registros das imagens de cada câmera usada, obtém-se a imagem de uma face do pé com número grande de pontos advindos da projeção estruturada de luz, no caso a figura 4 contém 630 pontos projetados sobre o pé. A reconstrução tridimensional de pontos sobre o pé exige entre outros que se disponha de coordenadas de tela de todos os pontos registrados.

Em ambiente Dvideow, foi realizado o procedimento de tracking de marcadores, esse podendo ser realizado de modo semi-automático que consiste na identificação dos pontos na tela pelo pesquisador ou por algoritmos de rastreamento e ainda de modo automático durante todo processo de tracking.

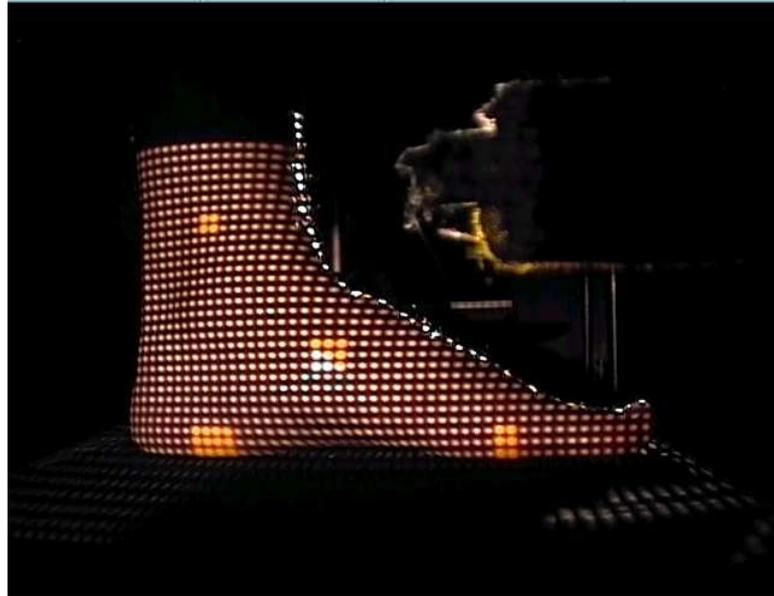


Figura 4 – Imagem da superfície do pé do sujeito sob projeção estruturada de luz.

Foi definida uma seqüência de algoritmos (figura 5) para segmentação das imagens do pé, com as seguintes características:

- *Inverse* - converte a imagem para escala de 256 níveis de cinza, fazendo a inversão da intensidade de escala, como a escala de níveis de cor varia de zero para a preta até 255 para a branca. O que era de escala zero ou próximo a esse valor foi para 255 ou um valor mais próximo (figura 6). Isto foi necessário porque os algoritmos implementados rastreiam marcas com níveis de intensidade baixa, ou seja, próximas à cor preta, e as marcas na malha de pontos são de intensidade alta próximas à cor branca.
- *Erosion* - é uma operação básica em morfologia matemática. Foi usado após a inversão das escalas de intensidade nas imagens, esse algoritmo erode as marcas com baixa intensidade, ou seja, as próximas da cor branca. Assim as marcas com intensidades altas, próximas a cor preta se expandem tornando-as mais facilmente detectáveis (figura 6).
- *Get Markers* - este algoritmo faz a detecção de contornos das marcas, que consiste basicamente em localizar descontinuidade de intensidade na imagem. E também selecionar as regiões de maior contraste de intensidade. É dado um número máximo de marcas a rastrear, que neste trabalho variou de 300 a 650 marcas para cada imagem.

- *Select contour* - faz a seleção dos contornos das marcas por valores dos seus perímetros. O perímetro é calculado como o número de pixels que compõe o seu contorno. Utiliza-se critério de valores maiores ou menores que os valores definidos. Foram admitidos contornos formados por um número mínimo de 22 pixels e máximo de 48 pixels.

A seleção desses algoritmos se dá de acordo com a necessidade do experimento e com o tamanho dos marcadores nas imagens, portanto, pode haver uma variação na seqüência de aplicação dos algoritmos nas imagens registradas.



Figura 5 – Imagem original antes de segmentação.

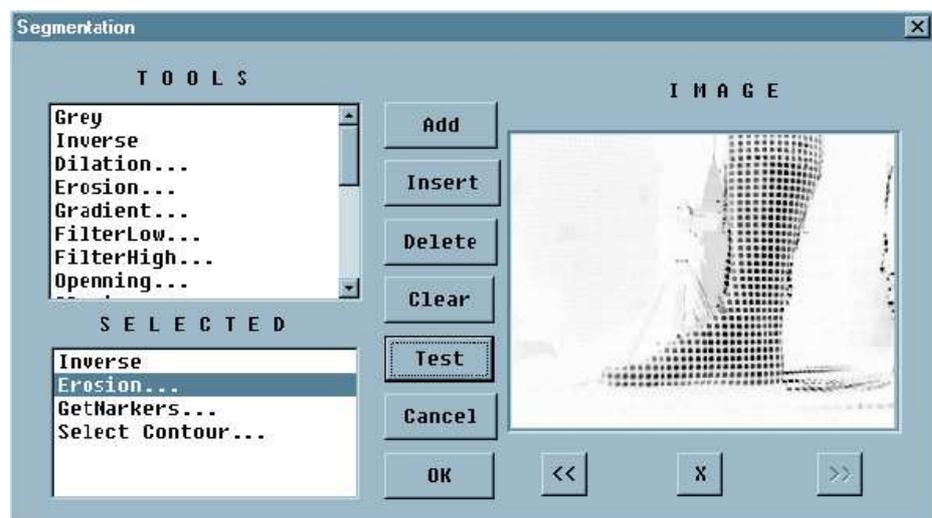


Figura 6 – Imagem após seleção de algoritmos de inversão e erosão.

Como resultado do tracking de marcadores nas imagens de cada câmera obteve-se um conjunto de dados (medições) com as coordenadas bidimensionais (x, y) de tela na câmera 1 (figura 7), os quais são identificados com uma numeração de 1 até M , sendo M o número de objetos segmentados na imagem. O mesmo procedimento é repetido para a outra câmera 2 que visualiza a região (figura 8). Encontra-se, assim, um novo conjunto de dados rotulados de 1 a N .

Contudo, o número de pontos encontrados em cada um dos dois conjuntos não é necessariamente igual, e também o número de indexação do mesmo ponto costuma diferir nas duas imagens.

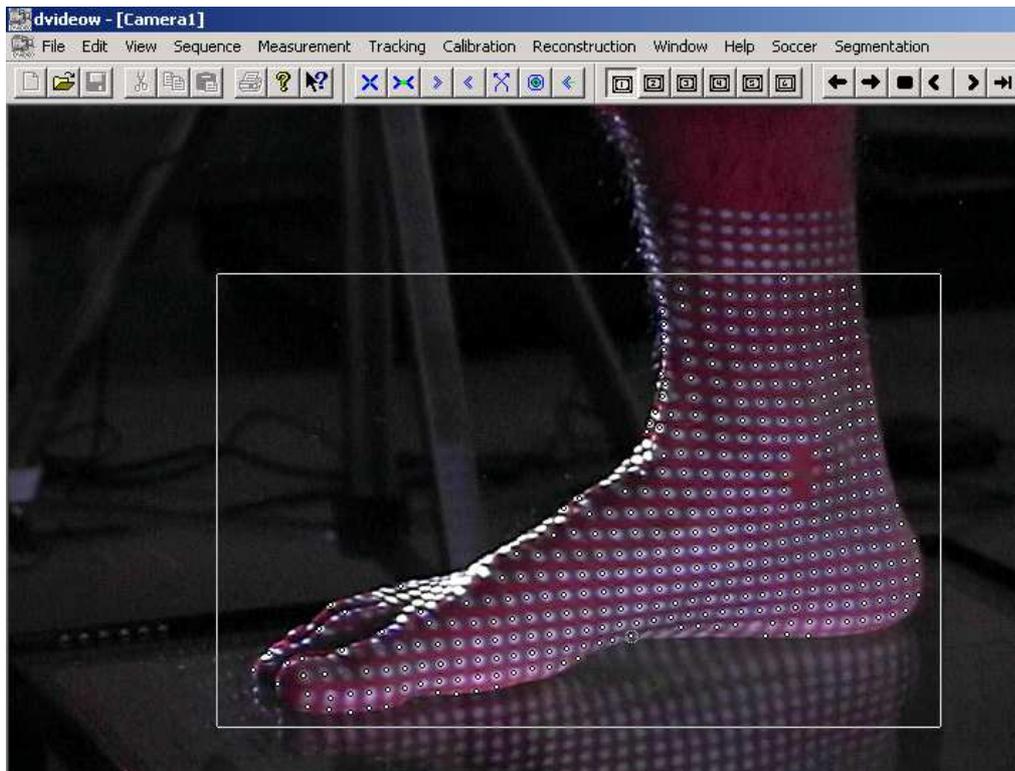


Figura 7 – Imagem da câmera 1 com os pontos de interesse medidos após tracking semi-automático.

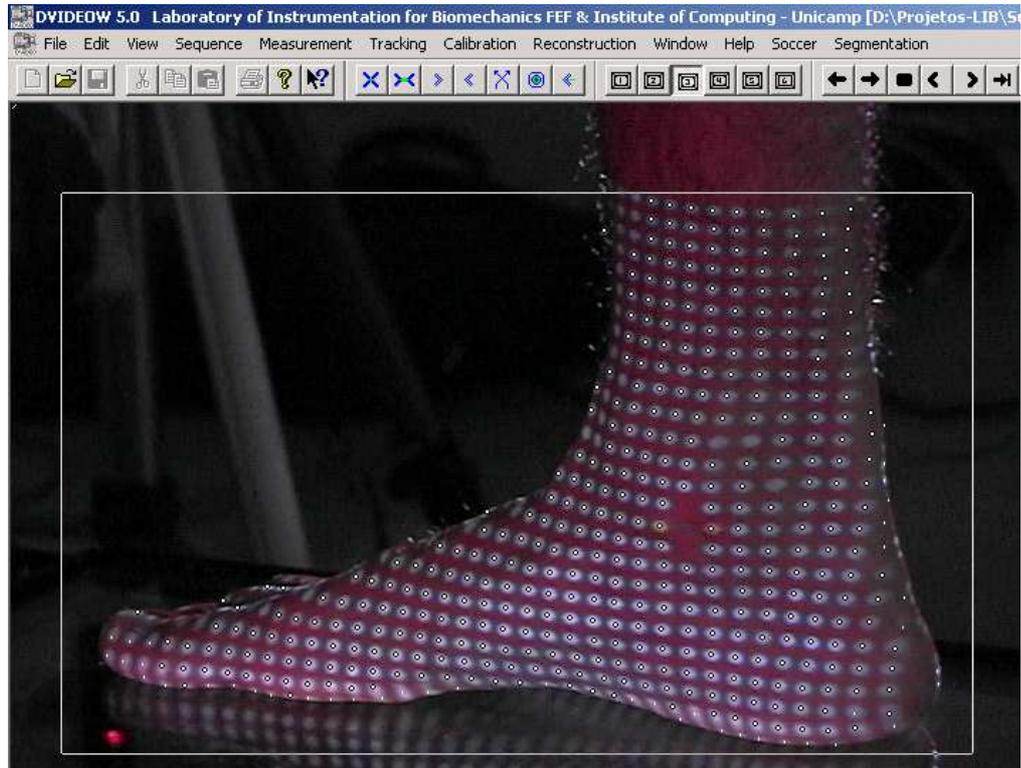


Figura 8 – Imagem da câmera 2 com os pontos de interesse medidos após tracking semi-automático.

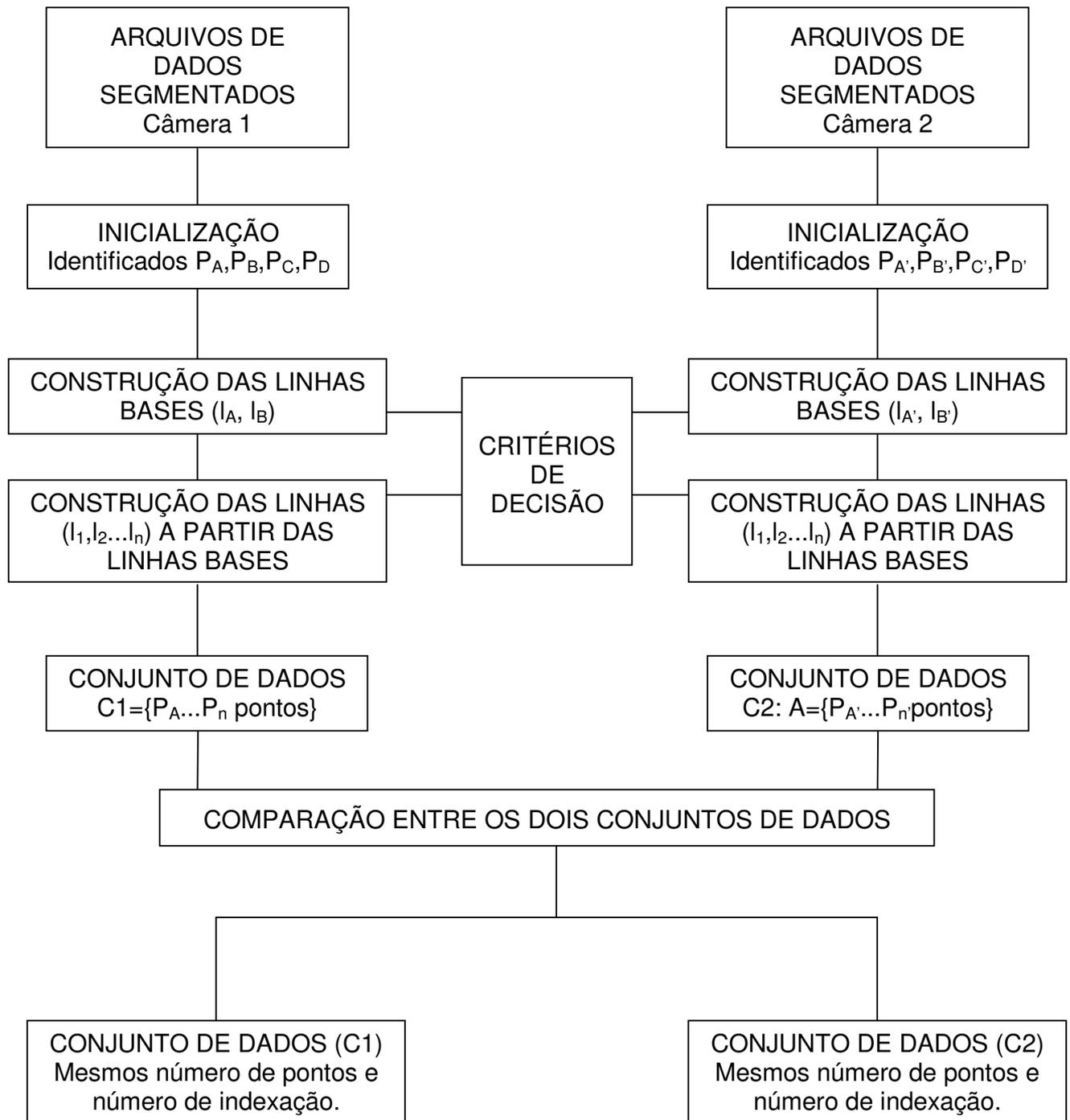
Impossibilitando assim a reconstrução tridimensional de coordenadas, a qual necessita de correspondência entre os conjuntos de dados.

Para tanto, foram definidos e aplicados procedimentos aos pares de conjuntos de dados com interesse em chegar a uma mesma quantidade de pontos em ambos os conjuntos que correspondem à face do pé registrada e também indexar os pontos numa mesma ordem.

A esse processo deu-se o nome de rotulagem dos índices, o que permitiu a reconstrução tridimensional.

Apresenta-se a seguir um diagrama de blocos das etapas do processo de rotulagem. Na seqüência será mostrado um detalhamento do processo.

PROCESSO DE ROTULAGEM



Também para o processamento de rotulagem foi utilizado o software matemático Matlab.

O processamento de rotulagem passa pelas seguintes etapas:

1. **Inicialização.** Em cada par de imagens que representam uma determinada face do pé, são identificados pelo operador quatro marcadores a partir dos quais a rotulagem irá se iniciar. Como exemplo, observam-se duas imagens da face medial do pé, onde é possível identificar a correspondência dos pontos nas duas imagens. Tem-se dois conjuntos de pontos: $C1 = \{P_A, P_B, P_C, P_D\}$ da câmera 1 (figura 9) e $C2 = \{P_{A'}, P_{B'}, P_{C'}, P_{D'}\}$ da câmera 2 (figura 10), ambos pertencentes ao conjunto de pontos da projeção estruturada de luz sobre o pé.

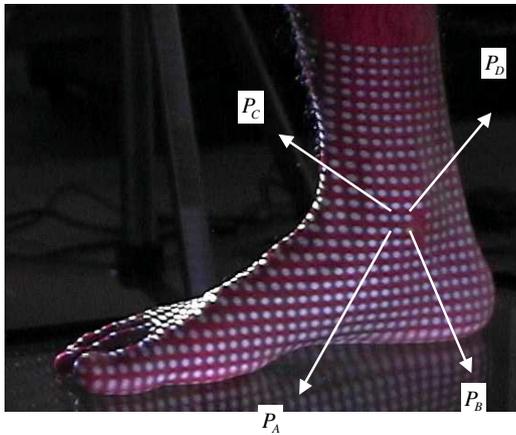


Figura 9 – Imagem da câmera 1.

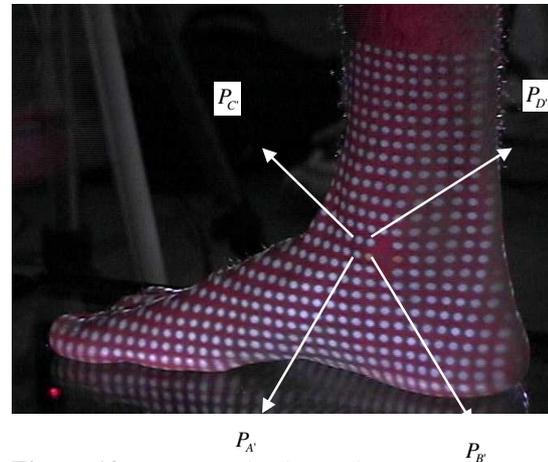


Figura 10 – Imagem da câmera 2.

2. **Construção da linha A (I_A).** Para que o processo de rotulagem seja aplicado a toda superfície do pé, em cada imagem, é necessária a construção de duas linhas. Essas linhas são formadas a partir dos quatro marcadores iniciais (item 1), na ordem dada pela inicialização. Por exemplo, dados os marcadores P_A e P_C (figura 9), uma linha será construída no sentido de P_A para P_C . Ao término da seqüência de marcadores, inverte-se o sentido, passando de P_C para P_A , para que toda linha seja percorrida. A abrangência da rotulagem deverá acontecer onde houver a presença dessas linhas, denominadas linhas-base. Os critérios utilizados para suas construções são descritos a seguir:

- *Critério 1:* identificados os pontos P_A e P_C (figura 11), obtém-se um vetor (\vec{v}) com direção e orientação de P_A para P_C . Partindo do ponto P_A são obtidos os vetores possíveis

deste em relação a todos os pontos passíveis de serem selecionados, por exemplo, P_Q e P_K . Calcula-se a norma dos vetores gerados a partir do ponto inicial até cada um desses pontos. Uma norma limite é estabelecida para que os pontos sejam selecionados para a rotulagem. O cálculo da norma dos vetores é dado pela equação:

$$|\vec{q}| = \sqrt{(x_A - x_P)^2 + (y_A - y_P)^2}$$

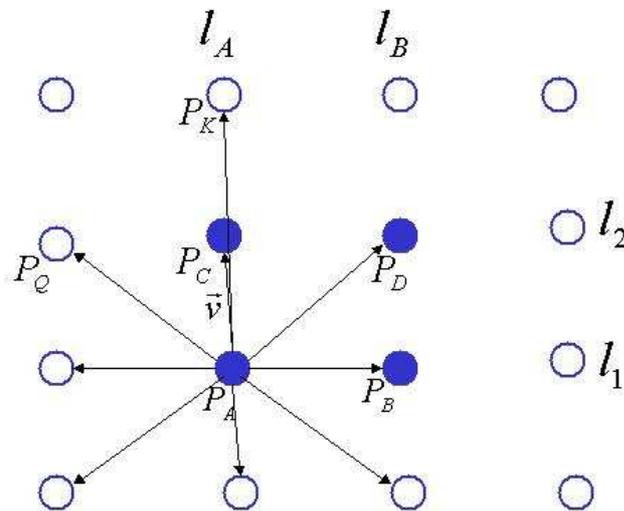


Figura 11 – Critério 1 para rotulagem.

- *Critério 2*: calculam-se as distâncias ortogonais entre todos os pontos selecionados e a reta formada pelos pontos P_A e P_C (figura 12). Adota-se também um vetor limite para a distância. Os pontos que localizam-se a uma distância menor a reta P_AP_C (r) que o valor limite, são ordenados em função de sua proximidade à reta. Tem-se, para o cálculo da distância, a seguinte equação:

$$d(P, r) = \frac{|\vec{q} \times \overrightarrow{P_A P_C}|}{|\overrightarrow{P_A P_C}|}$$

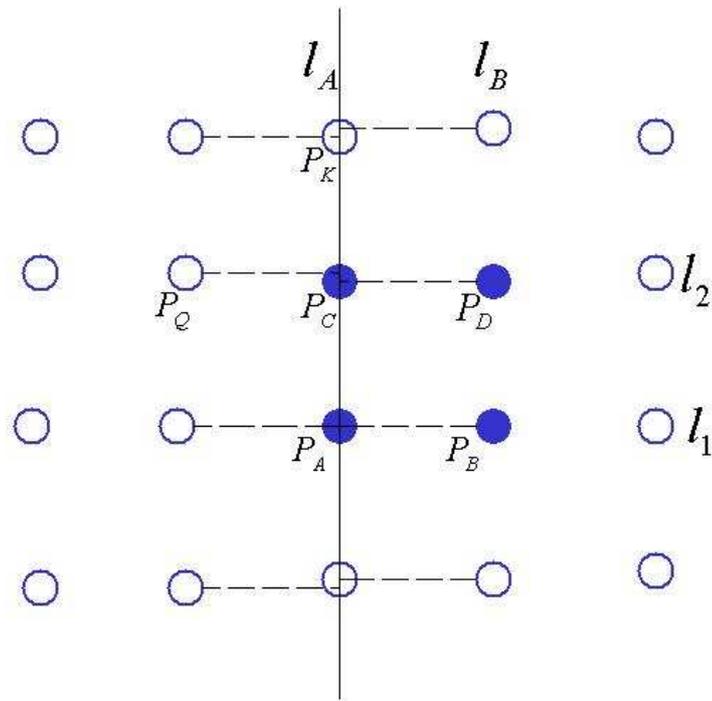


Figura 12 - Critério 2 para rotulagem.

- Critério 3*: o sentido da rotulagem se dá de acordo com os vetores formados no critério 1, ou seja os vetores com origem em P_A e extremidade na projeção de $P_Q \dots P_n$ na reta suporte $P_A P_C$, deverá ter o mesmo sentido do vetor (\vec{v}) (figura 13). Dentre os pontos que atendem aos critérios 1 e 3 seleciona-se aquele que produzir menor distância no critério 2. Na figura 13, foi suprimida a reta suporte $P_A P_C$ para visualização dos vetores formados pela projeção dos n pontos na reta suporte $P_A P_C$, no caso do exemplo mostrado o ponto rotulado foi o P_K (figura 14).

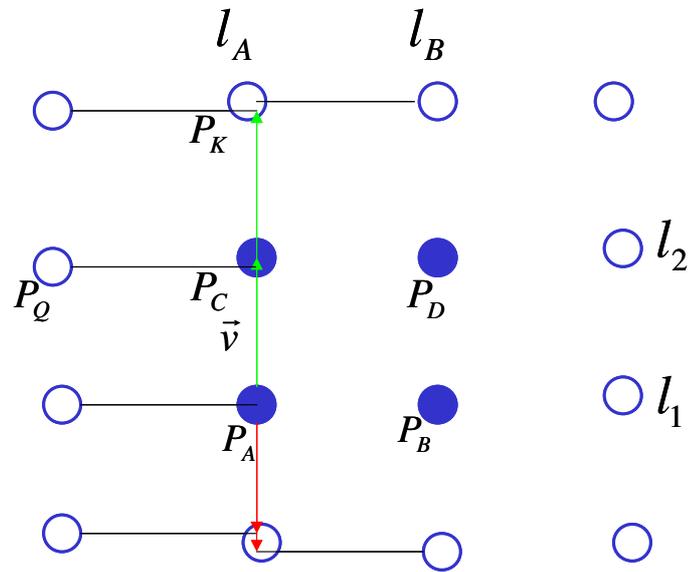


Figura 13 – Critério 3 para rotulagem.

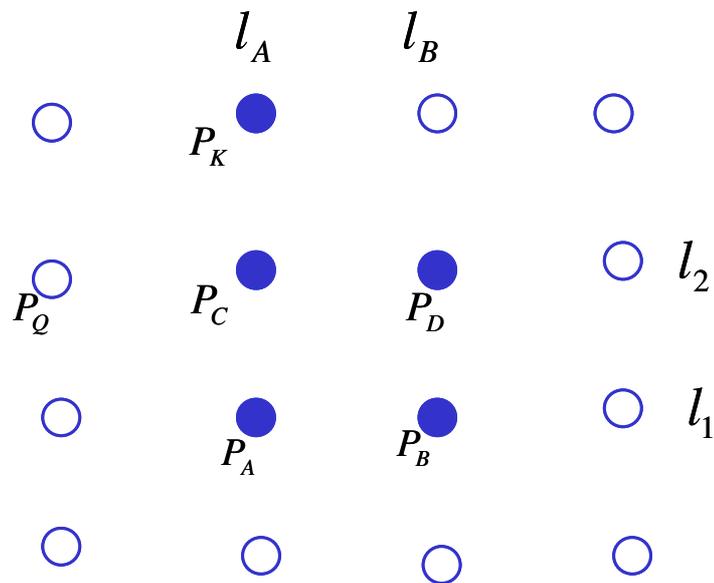


Figura 14 – Ponto selecionado P_K

Na seqüência, uma reta é formada pelos pontos P_C e P_K , onde novamente irão se aplicar os critérios acima descritos para indexar o próximo ponto.

3. **Construção da linha B (l_B).** Para a formação da linha B (l_B), seguem-se os mesmos critérios descritos, porém utiliza-se para inicialização os pontos P_B e P_D .

4. **Construção das linhas $l_1, l_2 \dots l_n$.** Após a construção das linhas-base l_A e l_B , a rotulagem deverá ser estendida a todos os outros marcadores selecionados e assim cobrir o máximo possível da superfície do pé. Segue-se então a construção das linhas l_1, l_2, \dots, l_n , segundo os mesmos critérios adotados nas outras etapas.

Os pontos que não se adequaram aos parâmetros dados, não serão rotulados. Este processo é estendido a todos os pares de imagens de acordo com as faces correspondentes resultantes das filmagens.

Alcançado o objetivo mencionado, os conjuntos de dados resultantes são dispostos em matrizes com as duas coordenadas (x, y) de tela, o que permite realizar a reconstrução tridimensional das coordenadas dos marcadores na superfície do pé humano.

4.3. Medição, calibração das câmeras e reconstrução tridimensional

Com os conjuntos de dados obtidos, têm-se as coordenadas (x,y) de tela dos pontos da projeção estruturada de luz na superfície do pé.

Em seqüência, faz-se a calibração das câmeras, que é um procedimento básico para a reconstrução tridimensional de coordenadas de um ponto, pois a posição de um ponto no espaço tridimensional é dada com o auxílio de três coordenadas independentes: X, Y e Z.

Os procedimentos utilizados para calibração das câmeras e reconstrução tridimensional em Biomecânica implementados no Dvideow são provenientes da área da fotogrametria e foram desenvolvidos por Abdel-Aziz e Karara (1971), sendo conhecidos como DLT (Direct Linear Transformation).

Os princípios do DLT obedecem aos fundamentos da Geometria Projetiva, portanto suas propriedades matemáticas, a partir do modelo projetivo, podem ser representadas por meios de equações algébricas.

As equações básicas do método são:

$$(n_{1}^k - n_{3}^k x_i) X_i + (n_{4}^k - n_{6}^k x_i) Y_i + (n_{7}^k - n_{9}^k x_i) Z_i + n_{10}^k - x_i = 0 \quad [1]$$

$$(n_{2}^k - n_{3}^k y_i) X_i + (n_{5}^k - n_{6}^k y_i) Y_i + (n_{8}^k - n_{9}^k y_i) Z_i + n_{11}^k - y_i = 0 \quad [2]$$

Onde:

- x_i e y_i são as coordenadas de tela do i -ésimo ponto de um sistema de referências conhecido para cada câmera k ;
- X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais de i -ésimo ponto de referência;
- n_h^k ($h=1, \dots, 11$) são os onze parâmetros de transformação para a k -ésima câmera a serem quantificados na calibração.

O objetivo do DLT é realizar uma transformação linear direta das coordenadas do sistema de referência de calibração para as coordenadas no espaço-objeto.

São necessários onze parâmetros (n_h) para a calibração de cada câmera e precisamos das coordenadas de tela (x, y) e das espaciais (X, Y e Z) de no mínimo seis pontos referenciais, resultando em um sistema de doze equações lineares independentes e onze incógnitas.

O número de equações independentes é maior que o de incógnitas, portanto há mais de uma solução. Para solução desse problema é realizada uma otimização por quadrados mínimos das soluções possíveis. Produz-se assim uma matriz de transformação linear projetiva apresentando uma solução aproximada, no sentido da menor distância obtida entre o parâmetro e seu estimador.

Cada câmera deverá ser calibrada de maneira independente.

O sistema de referência para essa calibração foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica, a seguir passamos à sua descrição:

- Trilhos presos ao teto do Laboratório, pelos quais são pendurados prumos, formados de cabos metálicos com marcadores (pequenas esferas) de oito milímetros de diâmetro fixado num espaçamento conhecido (figura 15). O recurso dos trilhos visa ao trabalho com volumes variados de situações experimentais tratadas no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica.

- Preso a esse cabo em sua parte mais baixa está pendurado um lastro para o alinhamento vertical e estabilização do prumo (figura 16).

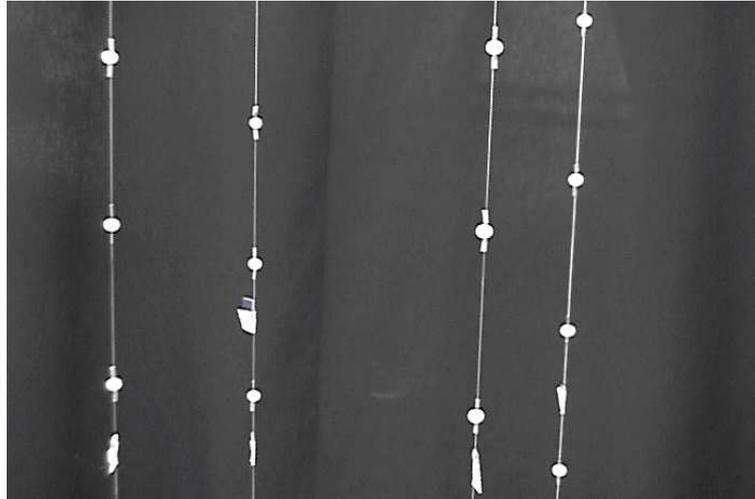


Figura 15 – Calibrador usado na aplicação da metodologia.



Figura 16 – Prumos presos ao calibrador.

Uma vez obtido os onze parâmetros da calibração das câmeras, juntamente com as coordenadas do plano da imagem, pode-se reconstruir as coordenadas tridimensionais do objeto de interesse, no caso os pontos sobre a superfície.

Considerando então:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} n_h^k = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Onde:

- X, Y e Z são as coordenadas a serem determinadas.

Levando em consideração as equações [1] e [2], para cada par de câmeras temos:

$$k=1 \begin{cases} (n_{11}^k - n_{31}^k x_i) X_i + (n_{41}^k - n_{61}^k x_i) Y_i + (n_{71}^k - n_{91}^k x_i) Z_i + n_{101}^k - x_i = 0 & [3] \\ (n_{21}^k - n_{31}^k y_i) X_i + (n_{51}^k - n_{61}^k y_i) Y_i + (n_{81}^k - n_{91}^k y_i) Z_i + n_{111}^k - y_i = 0 & [4] \end{cases}$$

$$k=2 \begin{cases} (n_{11}^k - n_{31}^k x_i) X_i + (n_{41}^k - n_{61}^k x_i) Y_i + (n_{71}^k - n_{91}^k x_i) Z_i + n_{101}^k - x_i = 0 & [5] \\ (n_{21}^k - n_{31}^k y_i) X_i + (n_{51}^k - n_{61}^k y_i) Y_i + (n_{81}^k - n_{91}^k y_i) Z_i + n_{111}^k - y_i = 0 & [6] \end{cases}$$

- x_i^k e y_i^k são as coordenadas de tela do ponto de interesse na i -ésima imagem da k -ésima câmera.
- n_h^k são os coeficientes de calibração para a k -ésima câmera.
- X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais do ponto de interesse na i -ésima imagem a serem determinadas.
- $k \geq 2$.

Para a determinação de cada ponto de interesse no espaço, deve-se ter então no mínimo duas câmeras.

Assim como na calibração, o sistema de equações na reconstrução de coordenadas também é superdimensionado com quatro equações para três incógnitas, utiliza-se então a otimização por quadrados mínimos das soluções possíveis, obtendo-se assim as coordenadas espaciais dos pontos de interesse.

O resultado das etapas descritas é um conjunto de dados com as coordenadas X, Y e Z dos pontos sobre a superfície do pé em relação ao sistema de referência (0, 0, 0) do Laboratório de acordo com as coordenadas medidas do calibrador.

4.4. Materiais

Os materiais utilizados para aplicação da metodologia continham as seguintes especificações:

- Seis câmeras de vídeo digital modelo GR-DVL 9500 de marca JVC.
- Placa de comunicação entre as câmeras e o computador padrão IEEE1394 modelo Studio DV da marca Pinnacle Systems.
- Tripés e suportes metálicos.
- Três projetores de slide modelo LH 1500 de marca IEC.
- Três slides com malhas de pontos.
- Microcomputadores Pentium III, HD 40 Gb, 128 Mb RAM.
- Modelo de pé humano.

5. RESULTADOS

5.1. Aplicação 1

Apresenta-se a seguir a aplicação da metodologia proposta em um modelo do pé humano utilizado como prótese em amputados (figura 17).



Figura 17 – Vista lateral do modelo do pé usado na aplicação da metodologia.

5.1.1. Registro de imagens

Os slides que continham a malha de pontos foram projetados sobre o modelo do pé simultaneamente por dois projetores de slides e tinham as seguintes características:

- Aproximadamente 2419 pontos em sua malha.
- Pontos de cores branca e amarelo em um fundo de cor escura. Os pontos amarelos tinham tamanho em escala 2:1 em relação aos brancos, objetivando dar referência à região avaliada.

A montagem experimental para o registro de imagens do modelo do pé tinha a

seguinte característica:

- Ambiente com baixa luminosidade.
- Quatro câmeras de vídeo digital posicionadas da seguinte maneira: duas voltadas para as faces plantar e medial e duas voltadas para as faces dorsal e lateral do modelo do pé.
- Shutter fixado em 1/60.
- Controle de foco fixado manualmente.
- Câmeras fixadas em tripés, com angulação entre si de aproximadamente 90 graus.
- Dois projetores de slides assim posicionados: um em posição intermediária as câmeras que registrariam as faces medial e plantar e outro em posição intermediária as câmeras que registrariam as faces dorsal e lateral do modelo do pé.
- Modelo do pé posicionado no centro do espaço a ser calibrado fixado em um pedestal metálico.
- Colocação de panos pretos no chão e posteriormente as câmeras para se evitar a captura de imagem de outros objetos que não fossem de interesse ou reflexões do chão.
- As câmeras digitais usadas possuíam 500 linhas de resolução horizontal e a região de interesse aproximadamente 20 cm de comprimento vertical. Portanto a resolução espacial vertical esperada foi de 0,4 milímetros. Assim, a menor distância entre dois elementos de interesse, para o enquadramento não deveria ser menor que esse valor.

Quando o modelo do pé estava coberto pela projeção de luz estruturada, foram marcados os pontos diretamente na superfície do modelo com auxílio de um marcador de retro-projetor. Esse procedimento foi feito, para posteriormente aos registros das imagens realizarmos uma medição direta entre alguns pontos escolhidos com interesse em se verificar a precisão e o erro padrão do método (figura 18).



Figura 18 – Vista medial do modelo do pé usado na aplicação da metodologia com pontos marcados sobre a superfície.

5.1.2. Tracking de marcadores, calibração das câmeras e medição

Todos os procedimentos desta etapa foram apresentados no capítulo 4 - Metodologia, mas torna-se relevante apresentar alguns detalhes no caso desta aplicação.

Nesta aplicação, para a segmentação das imagens foram usados os seguintes algoritmos: *inverse e get markers*.

Em relação ao tracking de marcadores, foi utilizado em toda etapa o procedimento automático. O número de quatro câmeras e o posicionamento adotado permitiram um melhor enquadramento, assim também como os marcadores sobre a superfície do modelo ficaram mais alinhados.

Para o procedimento de tracking automático foi delimitada uma região que compreendia todo o modelo do pé (figuras 19 e 20). O processo foi estendido aos pares de imagens resultantes do registro estereoscópico.

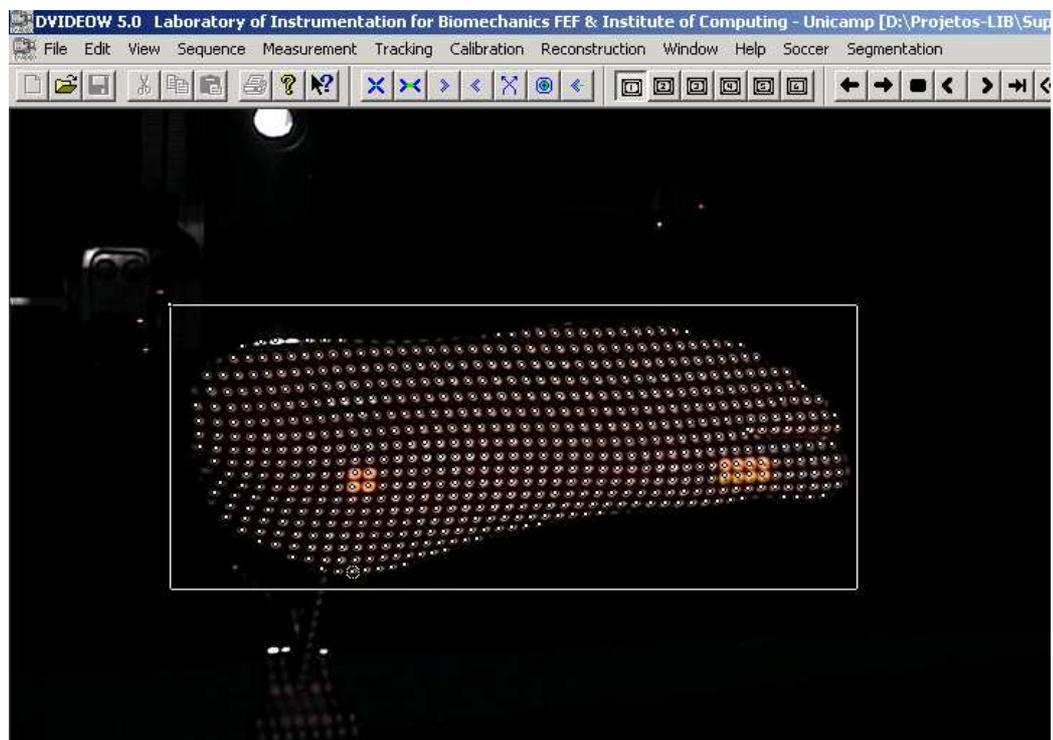


Figura 19 – Tracking automático da superfície medial e plantar do modelo do pé (câmera 1).

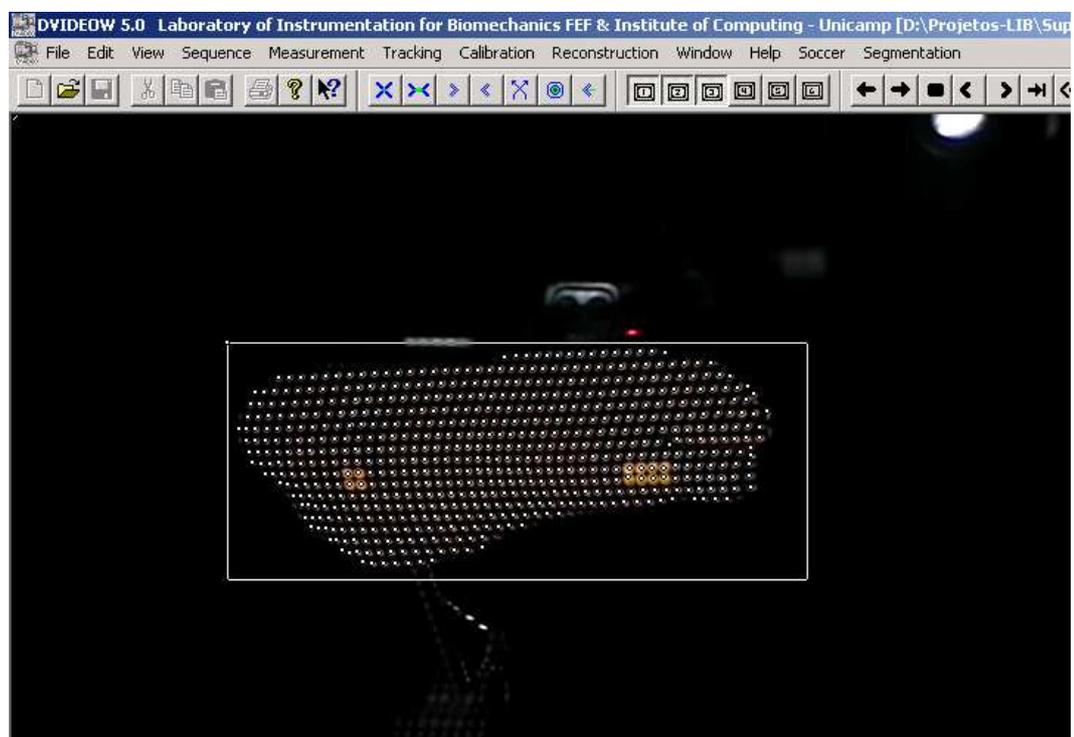


Figura 20 – Tracking automático da superfície medial e plantar do modelo do pé (câmera 2).

Na seqüência do tracking automático foi realizado o procedimento de rotulagem dos pontos.

Pelas figuras 21 e 22 pode-se observar que as rotulagens da superfície medial e plantar percorreram todos os pontos da superfície do modelo.

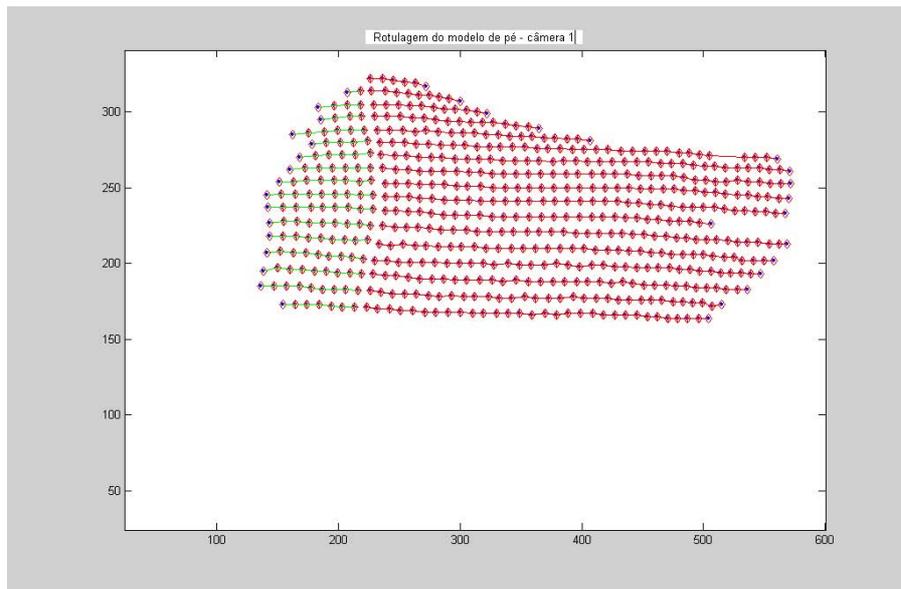


Figura 21 – Rotulagem dos pontos na superfície do modelo de pé na câmera 1.

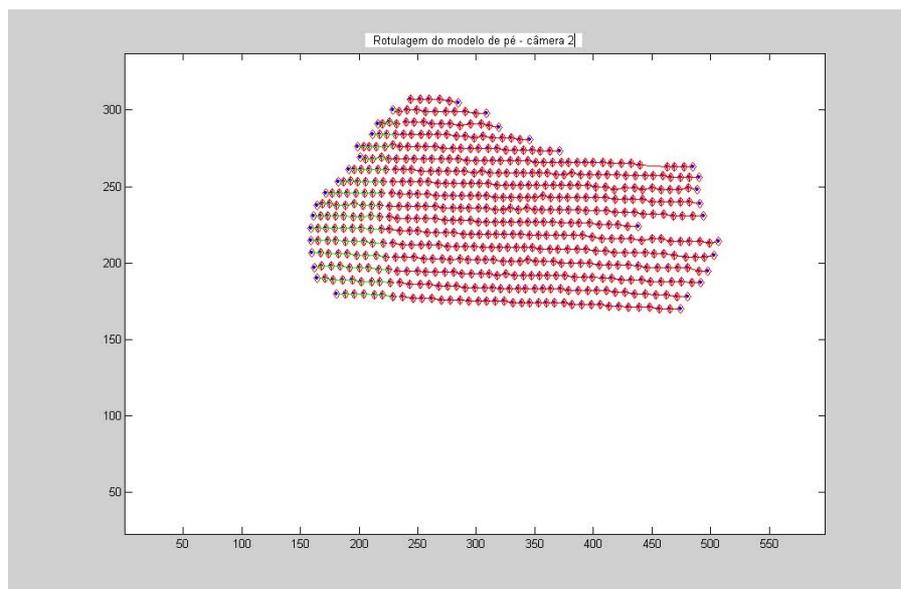


Figura 22 – Rotulagem dos pontos na superfície do modelo de pé na câmera 2.

Após a rotulagem, foram realizados os procedimentos de comparação em ambiente Matlab para deixar os dois arquivos correspondentes as faces do modelo registradas com o mesmo número de pontos.

Ao final foram rotulados um total de aproximadamente 630 pontos em cada imagem das câmeras, portanto, as faces medial e plantar registradas por duas câmeras totalizaram aproximadamente 1260 pontos. E para toda superfície do modelo, rotulados aproximadamente 2520 pontos.

Para calibração foi utilizado o sistema de referência descrito no capítulo 4 – item 4.3.

Como resultado da etapa descrita se obteve os conjuntos de dados com as coordenadas de tela (x , y) de cada ponto registrado.

5.1.3. Reconstrução tridimensional dos pontos sobre o modelo de pé

A partir dos conjuntos gerados na etapa anterior, foram reconstruídos 1260 pontos em toda superfície do modelo. A cor azul indica as faces medial e plantar e a vermelha as faces lateral e dorsal. Observa-se nos gráficos abaixo (figuras 23 e 24) duas vistas dos pontos reconstruídos.

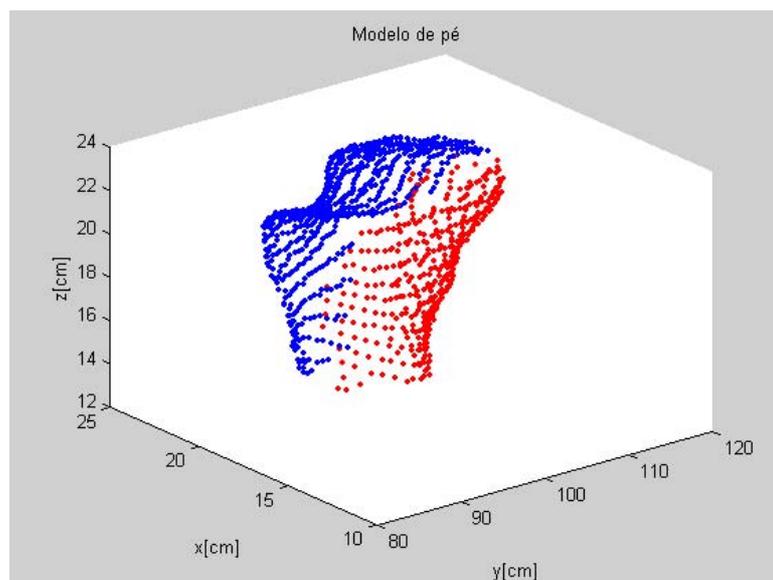


Figura 23 – Vista 1 dos pontos reconstruídos na superfície do modelo do pé.

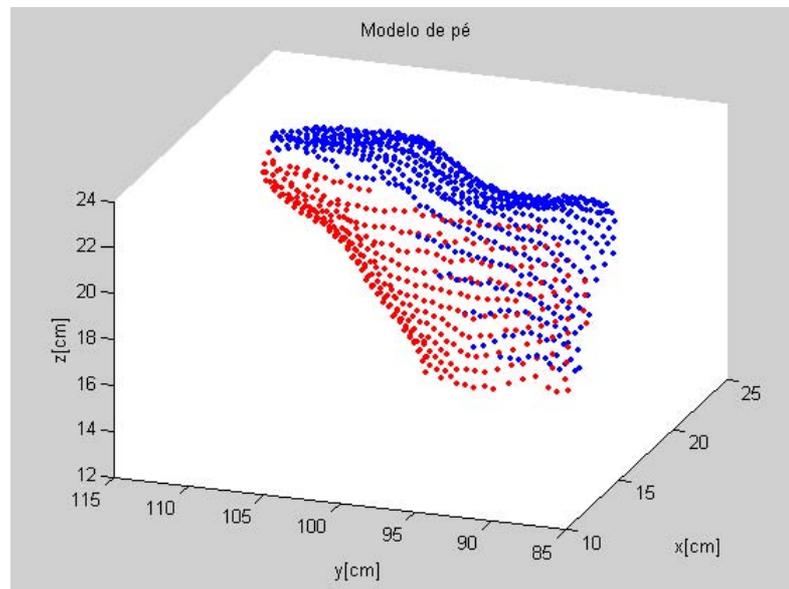


Figura 24 – Vista 2 dos pontos reconstruídos na superfície do modelo do pé.

5.1.4. Procedimentos para medição direta e medição por videogrametria

Para a medição direta sobre o modelo do pé, como descrito anteriormente, foram marcados todos os pontos na superfície correspondentes aos pontos da projeção estruturada de luz. Os pontos marcados totalizaram aproximadamente 1260 em toda superfície do modelo.

Dentre esses 1260 pontos selecionou-se 17 pontos, sendo 8 na face medial, 4 na face lateral, 2 na face dorsal e 3 na face plantar. Entre os quais mediram-se 22 distâncias nos dois métodos.

Elaborou-se uma metodologia de medição direta, de forma a garantir, a uniformização e padronização na tomada das medidas.

Para se tentar evitar o erro de leitura muito comum nesse tipo de medida, foi utilizado um paquímetro digital da marca Mitutoyo. O modelo do pé estava posicionado em uma bancada de granito e as medidas foram feitas procurando-se manter o paquímetro paralelo à bancada. A medição foi realizada três vezes para minimizar o erro de posicionamento ou pressão do paquímetro na superfície do modelo (figura 25).

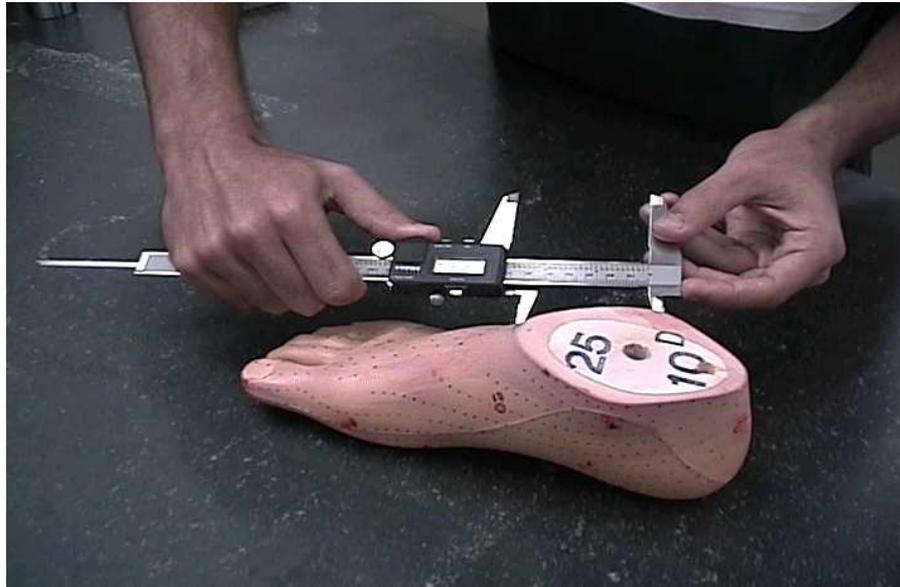


Figura 25 – Medição direta entre os pontos na superfície do modelo do pé.

Em relação à medição por videogrametria foi realizado todo procedimento de medição com três calibrações diferentes. Posteriormente fez-se mais duas medições utilizando-se a segunda e terceira calibração respectivamente.

Na tabela 1, têm-se as medidas de acordo com o método utilizado:

Tabela 1 - Tabela das medições diretas e por videogrametria.

Distâncias [mm]	1ª. MD	2ª. MD	3ª. MD	1ª. MV com 1ª. calib.	1ª. MV com 2ª. calib.	1ª. MV com 3ª. calib.	2ª. MV com 2ª. calib.	3ª. MV com 3ª. calib.
1	72,40	72,21	72,35	73,85	74,76	73,09	74,68	74,73
2	93,30	93,41	93,74	95,10	94,03	95,97	94,03	94,97
3	86,70	87,51	87,27	90,42	91,60	91,81	90,95	91,81
4	166,47	166,35	166,61	165,47	165,48	165,39	165,48	165,39
5	137,90	138,07	138,09	136,50	136,51	139,56	139,68	139,56
6	134,10	133,65	134,34	135,41	135,34	135,48	135,39	135,48
7	113,06	113,38	113,41	116,06	116,02	115,97	116,02	115,97
8	180,20	180,21	180,48	184,26	184,12	183,99	184,11	183,99
9	104,54	104,50	104,41	107,65	107,54	107,47	107,54	107,47
10	57,78	57,58	57,50	59,52	59,46	59,48	59,46	59,48
11	42,10	41,95	42,14	43,47	43,40	43,40	43,40	43,40
12	50,75	50,20	50,24	51,52	51,42	51,39	51,42	51,39
13	130,56	130,28	130,72	134,55	134,45	134,38	134,54	134,38

14	69,10	69,25	68,96	69,57	69,56	69,50	69,56	69,50
15	125,25	125,55	125,43	124,86	124,84	124,77	124,84	124,77
16	49,04	48,67	48,63	51,55	51,52	51,38	51,52	51,38
17	66,49	66,81	66,70	66,09	66,04	66,02	66,04	66,02
18	56,71	56,62	56,79	57,39	58,78	59,12	58,78	59,12
19	49,49	49,33	49,40	49,97	51,33	51,57	51,33	51,57
20	86,93	86,28	86,96	86,17	86,36	86,57	86,36	86,57
21	68,26	68,03	68,15	69,20	70,17	70,27	70,17	70,27
22	130,43	129,89	130,63	132,01	131,97	131,96	131,97	131,96

1ª. MD: Primeira medição direta.

2ª. MD: Segunda medição direta.

3ª. MD: Terceira medição direta.

1ª. MV com 1ª. calib.: Primeira medição por videogrametria com primeira calibração.

1ª. MV com 2ª. calib.: Primeira medição por videogrametria com segunda calibração.

1ª. MV com 3ª. calib.: Primeira medição por videogrametria com terceira calibração.

2ª. MV com 2ª. calib.: Segunda medição por videogrametria com segunda calibração.

3ª. MV com 3ª. calib.: Terceira medição por videogrametria com terceira calibração.

De acordo com as medições diretas e por videogrametria foram estimados os valores do erro padrão, de *bias*, e da precisão para estimativa das 22 distâncias.

O valor *bias B* representa o desvio entre o valor médio do conjunto de dados e o valor esperado, foi encontrado para *bias* um valor de 1,77 milímetros. Sendo calculado de acordo com a fórmula:

$$B = (\bar{x} - \mu)^2 \quad [7]$$

Onde:

- μ : valor esperado.

- \bar{x} : valor médio do conjunto de dados.

A precisão *P* representa a dispersão de um conjunto de dados em relação ao seu valor médio, ou seja, a variância (flutuação) dos dados, que foi de 0,31 milímetros. A fórmula para seu cálculo é a seguinte:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad [8]$$

Onde:

- n : número total de dados.
- \bar{x} : valor médio do conjunto de dados.
- x_i : valor do i -ésimo dado.

O erro padrão de um conjunto de dados representa a dispersão dos dados em relação a um valor esperado, seu valor foi de 1,8070 milímetros. Portanto, o método proposto pode variar neste valor em relação a um valor esperado. Abaixo a fórmula para cálculo:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} + (\bar{x} - \mu)^2 \quad [9]$$

Onde:

- n : número total de dados.
- x_i : valor do i -ésimo dado.
- \bar{x} : valor médio do conjunto de dados.
- μ : valor esperado.

Os valores obtidos sugerem, portanto, uma boa qualidade das estimativas das medidas entre os pontos e indicam uma precisão do método proposto melhor que a estimativa de erro padrão.

Na seqüência observa-se um gráfico (figura 26) onde relaciona-se as medidas diretas realizadas na superfície do modelo pela média das medidas por videogrametria.

O nível de relação entre os dois métodos é dado pelo coeficiente de correlação, o qual foi estimado em 0,9994.

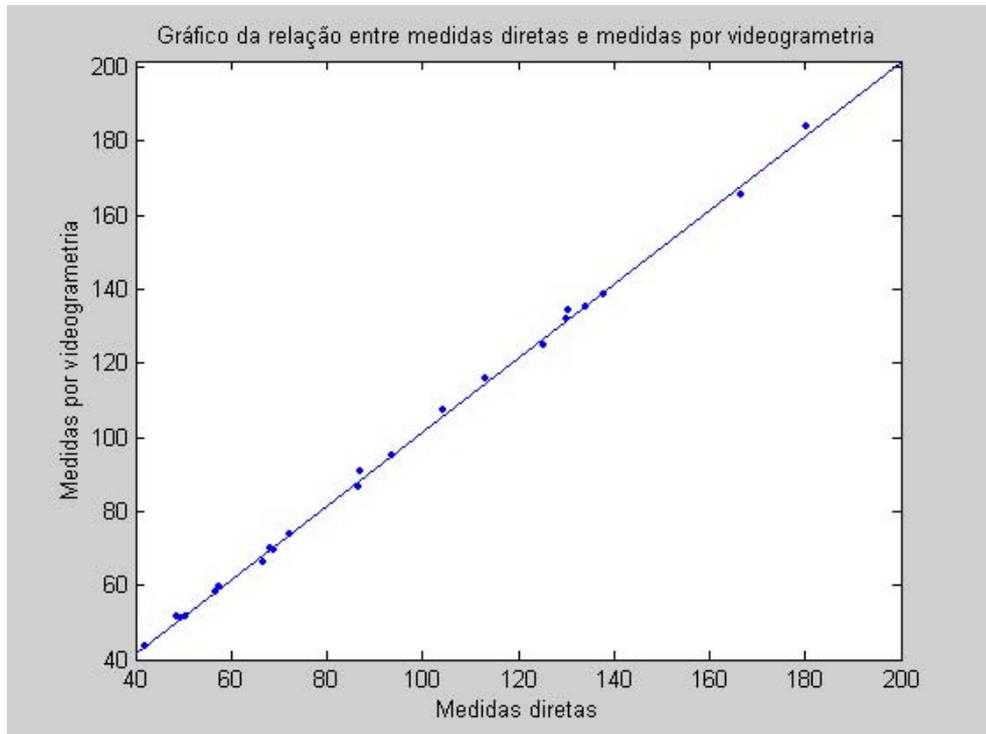


Figura 26 – Gráfico da relação entre as medidas diretas e por videogrametria.

5.2. Aplicação 2

A seguir é apresentado a aplicação da metodologia na reconstrução da superfície do pé humano em suas faces medial, lateral e plantar de três sujeitos. Os sujeitos tinham a seguinte caracterização:

Tabela 2 – Caracterização dos sujeitos

Sujeito	Sexo	Idade	Massa Corporal	Estatura
1	Masculino	23 anos	62,5 Kg	173 cm
2	Masculino	22 anos	69 Kg	179 cm
3	Feminino	21 anos	60 Kg	157 cm

Previamente informados dos procedimentos a que seriam submetidos, ambos os sujeitos consentiram na realização do experimento.

5.2.1. Registro de imagens

Os slides usados continham as mesmas especificações que na aplicação 1.

Após alguns testes, para este experimento foi definida uma montagem experimental com as seguintes características (figura 27):

- Seis câmeras digitais; sendo cada face do pé coberto por duas câmeras dispostas superior e inferiormente. Esta disposição foi usada, pois a disposição lado a lado ocultava marcadores para uma das câmeras em regiões com irregularidades como, por exemplo, a dos maléolos, impossibilitando a sua reconstrução tridimensional.
- Shutter das câmeras fixados em 1/60.
- Controle de foco fixado manualmente.
- Câmeras fixadas em tripés; com angulação entre elas de aproximadamente 90 graus.
- Três projetores de slides; cada um cobrindo a face do pé correspondente, dispostos com angulação de aproximadamente 120 graus entre si. Esta disposição diminuiu consideravelmente as regiões de sobreposição das malhas de pontos que criam deformação nos marcadores, assim também como evitou o posicionamento do projetor em frente à câmera de vídeo.
- Ambiente com baixa luminosidade.
- Posição do pé: sem apoio na região central da montagem experimental. Em alguns testes onde não foi reconstruída a superfície plantar, utilizou-se um equipamento usado em avaliações do pé chamado podoscópio, que consiste em uma plataforma de vidro com armação metálica para o apoio do pé.
- As características técnicas das câmeras, dos slides e da colocação de panos pretos obedeciam aos mesmos critérios adotados na aplicação 1.

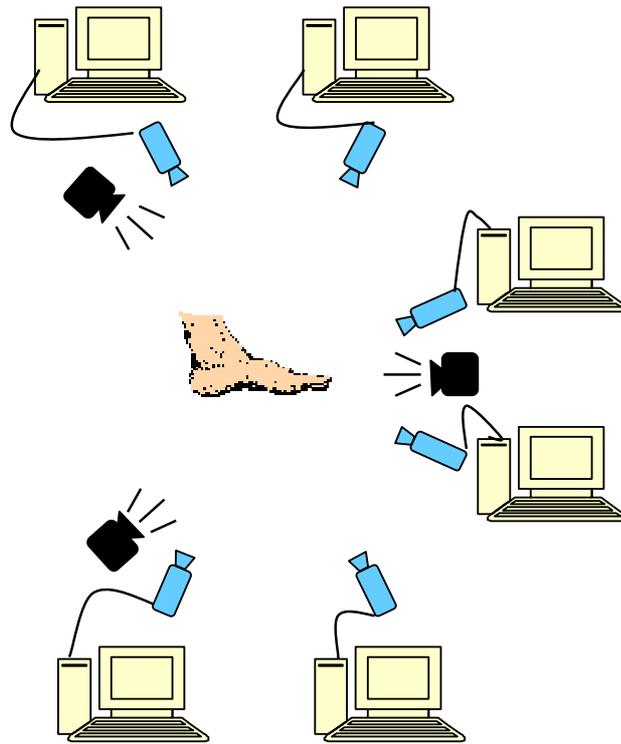


Figura 27 – Esquema da montagem experimental.

5.2.2. Tracking de marcadores, calibração das câmeras e medição

No tracking de marcadores sobre a superfície do pé foi usado o procedimento semi-automático.

Durante o modo automático, nas duas imagens de cada face do pé procurou-se delimitar regiões mais centrais de cada face do pé para o tracking, onde os marcadores estivessem mais visíveis e alinhados (figuras 28 e 29), assim era possível rastrear toda área delimitada de modo a não perder os marcadores a ela pertencentes. Nos marcadores das regiões mais periféricas como as transições das faces do pé e a dos dedos onde se observam pontos sem alinhamento foi realizado o tracking manual, porque são áreas que muitas vezes os marcadores estavam escondidos entre os dedos ou tinham sobreposição pela projeção estruturada de luz que era emitida por três projetores de slide. Dessa maneira pode-se rastrear todos os marcadores que estavam visíveis por duas câmeras em cada face do pé.

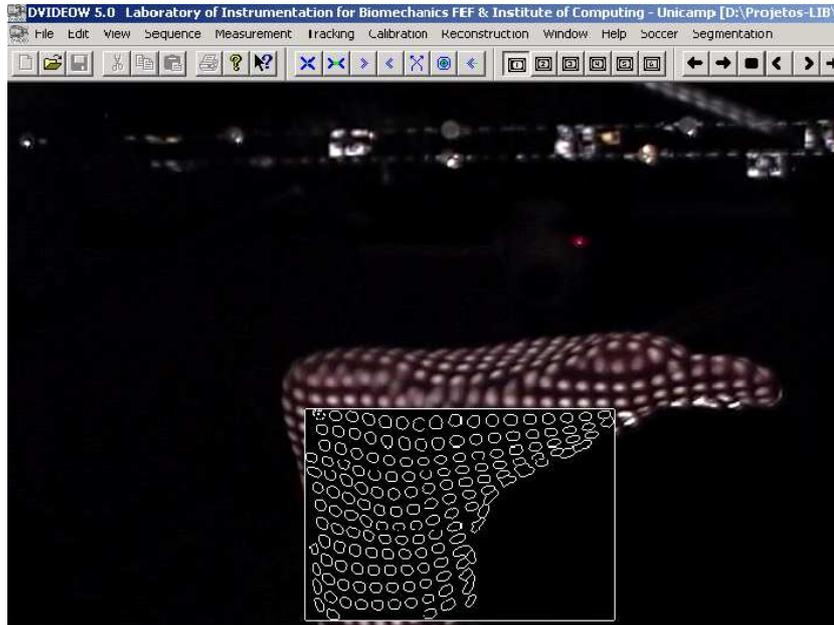


Figura 28 - Tracking automático de área delimitada (câmera 1)

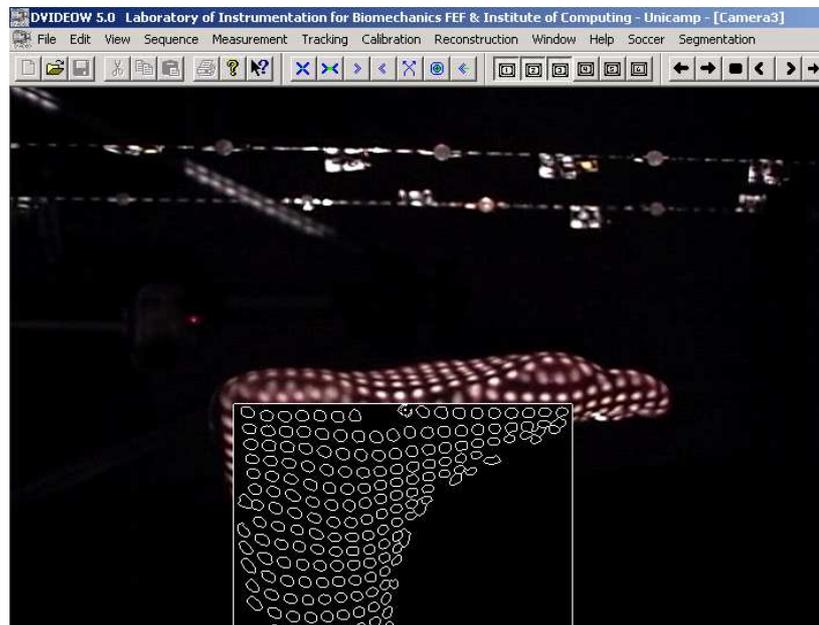


Figura 29 - Tracking automático de área delimitada (câmera 2).

Após o tracking automático de marcadores utilizou-se o procedimento de rotulagem dos pontos medidos na área delimitada. Observando as figuras 30 e 31 é possível verificar a rotulagem dos pontos a partir de uma mesma origem nas duas imagens.

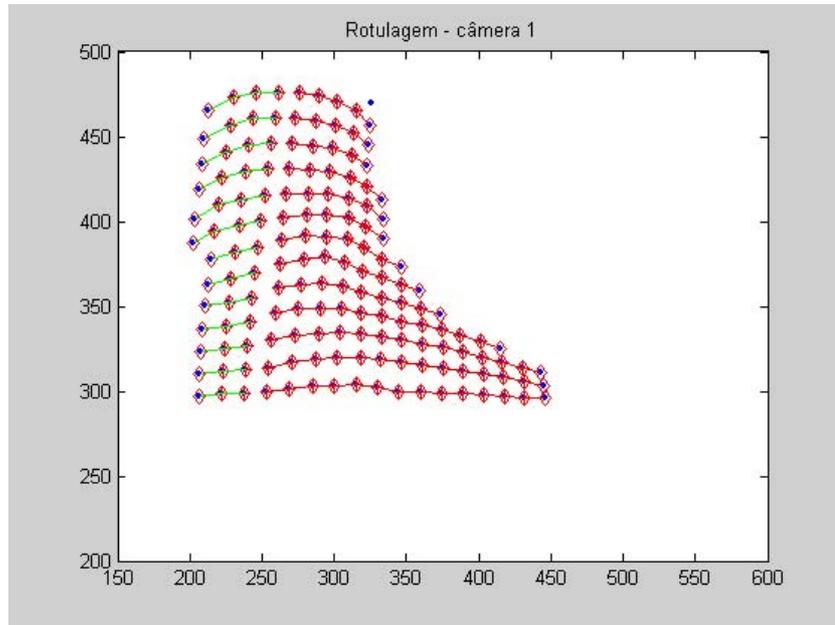


Figura 30 – Rotulagem dos pontos na câmera 1.

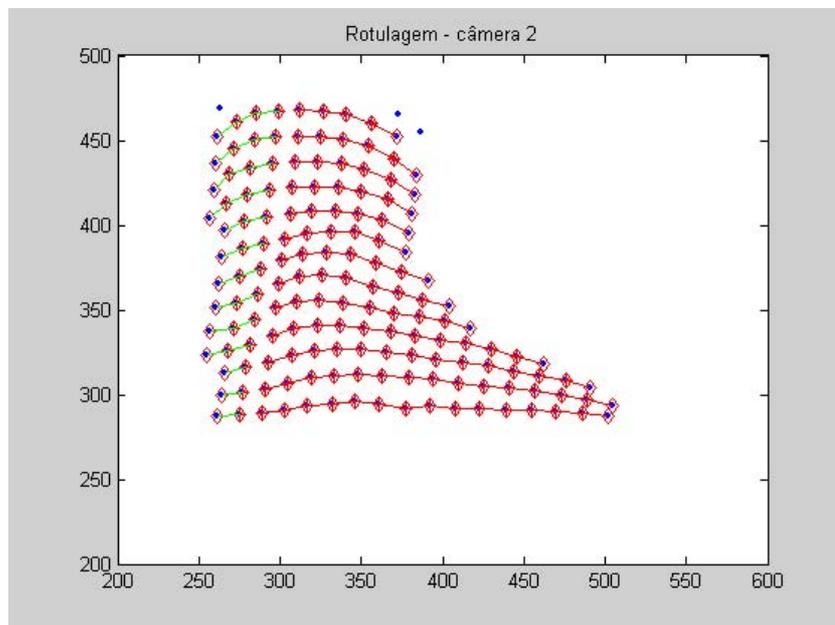


Figura 31 – Rotulagem dos pontos na câmera 2.

No centro estão duas linhas bases de onde parte a rotulagem para todos os pontos medidos. Foram rotulados um total de 150 pontos em cada imagem das câmeras, para uma face do pé um total de 300 e para o pé todo 600 pontos.

Com o conjunto de pontos rotulados, voltou-se ao ambiente Dvideow e completou-se o tracking de marcadores com o modo manual de maneira a cobrir toda a superfície do pé. No final do tracking foram rotulados um total de aproximadamente 250 pontos em cada imagem, 500 para cada face do pé e 1500 para todo o pé.

A rotulagem dos pontos permitiu a reconstrução tridimensional das coordenadas dos pontos sobre a superfície do pé.

5.2.3. Reconstrução 3D de pontos sobre a superfície

Para cada face do pé obteve-se um conjunto de dados contendo as três coordenadas espaciais (X, Y e Z) advindo da reconstrução tridimensional em ambiente Dvideow.

A partir da união desses três arquivos foi gerado um único arquivo contendo todos pontos sobre a superfície do pé.

Na figura 32 observa-se a plotagem tridimensional dos pontos reconstruídos na superfície do pé esquerdo de um sujeito do sexo masculino com 22 anos. A cor identifica os planos da filmagem original, plantar (verde), lateral (vermelha) e medial (azul).

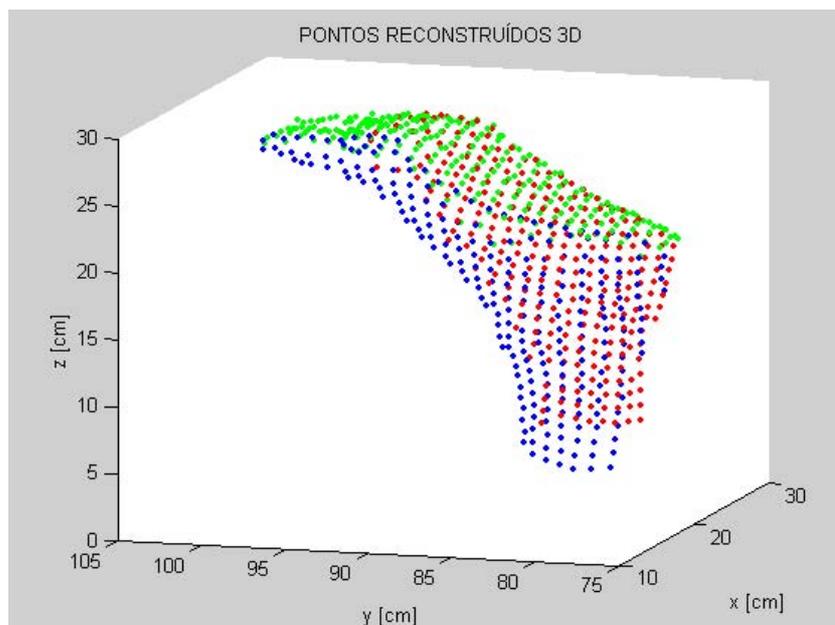


Figura 32 – Plotagem 3d dos pontos reconstruídos

A reconstrução tridimensional foi estendida a todos os pés dos três sujeitos. As figuras 33, 34 e 35 abaixo mostram as plotagens dos pés alinhados para cada sujeito, sendo possível observar uma simetria de contornos entre ambos os pés de um mesmo sujeito. Foi realizada a translação do pé esquerdo para plotagem em dupla.

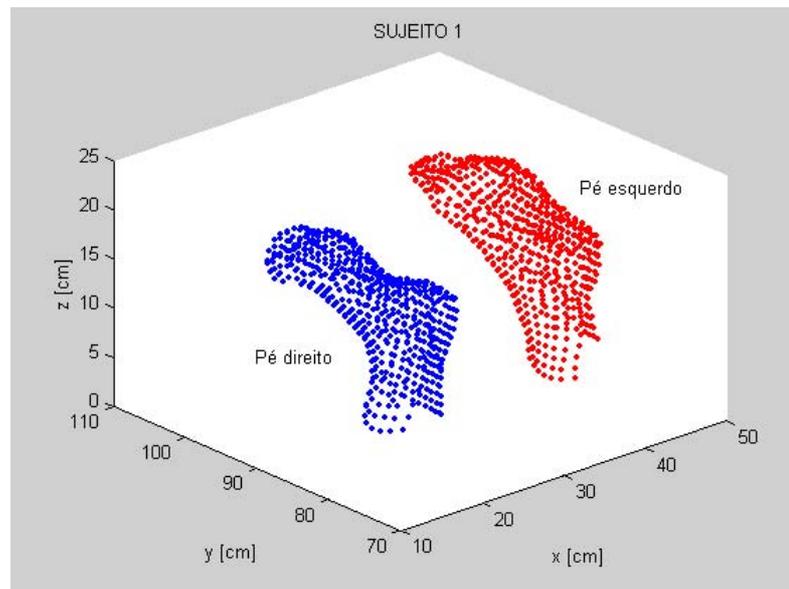


Figura 33 – Pontos reconstruídos sobre os pés do sujeito 1.

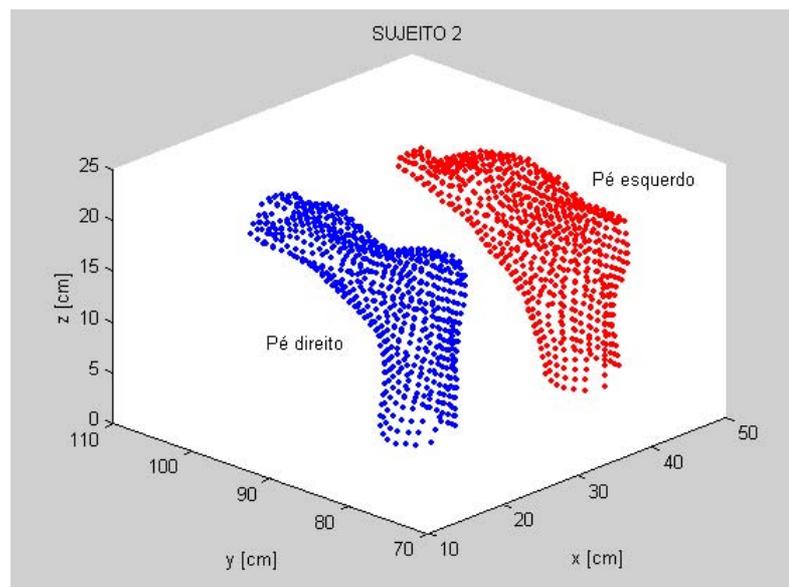


Figura 34 – Pontos reconstruídos sobre os pés do sujeito 2.

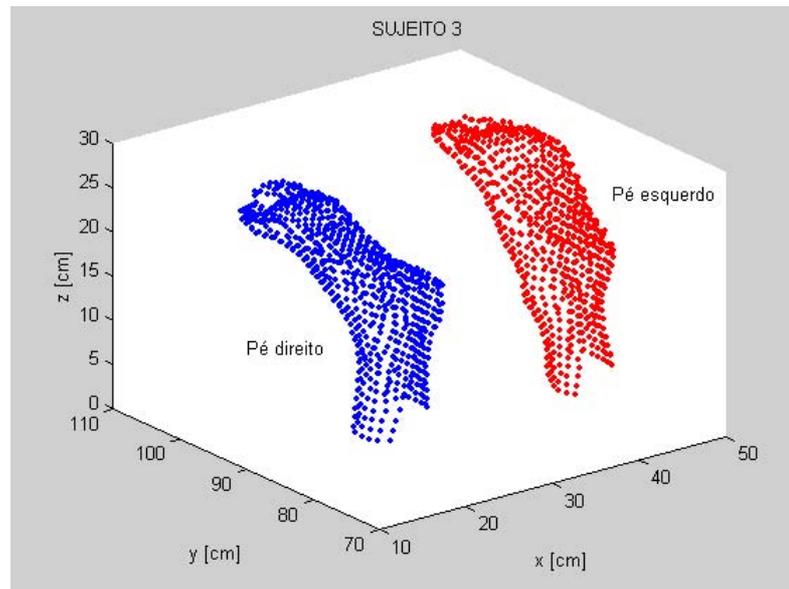


Figura 35 – Pontos reconstruídos sobre os pés do sujeito 3.

6. DISCUSSÃO

Neste capítulo objetiva-se avaliar os procedimentos que compõem a metodologia proposta. Destacando-se pontos relevantes em relação a sua aplicabilidade.

6.1. Registro de imagens

Os slides confeccionados contendo uma matriz com forte contraste entre os pontos e o fundo da imagem e assim também como os pontos de outra cor e tamanho, mostraram-se adequar satisfatoriamente a necessidade da metodologia. Sendo essas características fundamentais para o reconhecimento de determinado ponto ao iniciar-se o processo de rotulagem. A diferença na escala de intensidade entre os pontos e o fundo também ajudou na qualidade das imagens.

Para se capturar imagens de toda superfície do pé, o número de câmeras pode variar de quatro a seis, bastando para isso à mudança no posicionamento entre elas. No entanto, quando analisadas as várias montagens testadas, aquela que se mostrou mais adequada para o trabalho de implementação do tracking automático e rotulagem dos pontos continham as seguintes características:

- Posicionamento de quatro câmeras, duas voltadas para as faces medial e plantar e duas voltadas para as faces lateral e dorsal.
- Dois projetores de slide em posições opostas entre si e intermediárias em relação às câmeras de vídeo.

Com isso, os pontos se mostraram mais “alinhados” nas imagens, permitindo com isso o rastreamento de toda superfície registrada, sem a necessidade de procedimento manual.

Deve-se ter atenção às regiões limítrofes do segmento para que não se apresentem espaços significativos entre os pontos e com isso perda de representação da região.

6.2. Procedimentos de tracking automático e rotulagem dos pontos

Em relação aos algoritmos utilizados foi possível estabelecer uma seqüência de escolha (Capítulo 4, pág. 20-21). Contudo, destaca-se a importância da montagem experimental em relação ao registro das imagens. Pois dependendo da qualidade da mesma pode haver mudanças no tamanho dos pontos ou mesmo no alinhamento entre eles. Sendo assim, essa ordem de escolha pode ser alterada, por exemplo, com a retirada de algum algoritmo.

Considerando todas as aplicações, o tracking automático dos pontos foi realizado nas superfícies de interesse com variações entre os modos automático e semi-automático.

As rotinas elaboradas para solução dos problemas de rotulagem dos pontos, ou seja, deixar os conjuntos de dados resultantes da medição com o mesmo número de pontos e número de indexação resolveu essa problemática com sucesso.

6.3. Calibração das câmeras, medição e reconstrução de pontos sobre a superfície

Os resultados observados indicam que os procedimentos metodológicos de calibração, medição e reconstrução tridimensional de pontos permitem a obtenção de um grande número de pontos sobre a superfície do pé. Assim como também possibilita as medições de variáveis de interesse como, por exemplo, distâncias entre pontos.

6.4. Medição direta e medição por videogrametria sobre a superfície do modelo de pé

A superfície de interesse contendo grande densidade de pontos projetados e marcados permite uma quantidade satisfatória de opções em relação tanto a medições diretas quanto às por videogrametria. No entanto, para se fazer qualquer relação entre os dois métodos como a realizada é preciso assegurar a marcação dos pontos sobre a superfície em correspondência com o local da projeção.

7. CONCLUSÕES

Analisando, os resultados obtidos, considera-se que a metodologia desenvolvida neste trabalho possibilitou uma forma de reconstrução tridimensional de pontos sobre a superfície do pé humano baseado em videogrametria. Através da qual se obtém grande quantidade de dados processados que podem ser usados para fornecer informações analíticas e biomecânicas de interesse.

A metodologia possui características que podem ser destacadas:

- O uso de projeção estruturada de luz sobre a superfície do pé, permite a obtenção de uma grande densidade de pontos sobre a mesma sem a necessidade da colocação de marcadores e pouco constrangimento ao sujeito.
- Diferente de métodos como os de varredura, em que os pontos são registrados um por vez, a metodologia permite o registro simultâneo de muitos pontos.
- A automatização de todo processo a partir do tracking, passando pela rotulagem dos pontos foi fundamental para otimização da metodologia. Com isto, diminuiu consideravelmente o tempo de obtenção dos dados permitindo o aumento de sujeitos avaliados.
- Apesar de se tratar de um segmento corporal com superfície irregular como as regiões dos maléolos ou o arco longitudinal medial, a metodologia conseguiu representar toda região de interesse sem perdas significativas das mesmas.
- Por meio do coeficiente de correlação, verificou-se um nível de relação entre os dois métodos aplicados. Assim também como um bom nível de precisão e baixo erro padrão.
- Embora não seja objetivo deste trabalho, mas de acordo com os progressos realizados, a metodologia permite a sua aplicabilidade nas áreas clínicas de estudo do pé humano.
- Por sua simplicidade de operação, baixo custo e flexibilidade, a metodologia possibilita a extensão de estudos a outros segmentos do corpo humano de interesse.

Apesar da metodologia tratar o pé humano em situação estática, a utilização do registro em vídeo permite um avanço para experimentos com a presença de movimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-AZIZ, Y.I.; KARARA, H.M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. **Proc. ASP/UI Symp. On Close-Range Photogrammetry**. Urbana, Illinois, 1971.

ANDREONI, G. et al. 3-D back surfaces as an ergometric tool. ISB TOKYO CONGRESS, XVIth, 1997. **Book of Abstracts**. Tokyo: Organizing & Program Committee, 1997, p. 30.

BARROS, R.M.L., et al. A flexible computational environment to track markers and reconstruct trajectories em biomechanics. ISB TOKYO CONGRESS, XVIth, 1997. **Book of Abstracts**. Tokyo: Organizing & Program Committee, 1997, p. 28.

BERGMANN, J.N. **Optical Laser Scanner**. Disponível em: <www.bergmannlab.com.br>. Acesso em: maio de 2000.

CAVANAGH, P.R.; WUNDERLICH, R.E. Gender differences in adult foot shape: implications for shoe design. In: **Med. Science Sports Exercise**, v. 4, n. 33, p. 605-611, apr., 2001.

DUNN, S.M.; KEIZER, R.L.; YU, J. Measuring the area and volume of the human body with structured light. In: **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 19, n. 6, p. 1350-1364, nov/dec., 1989.

DRERUP B. et al. Funcional examinations with rasterstereography. A new method for the biomechanical analysis of skeletal geometry. In: **Orthopade**, v. 30, n.4, p. 242-250. apr., 2001.

DRERUP, B.; HIERHOLZER, E. Back shape measurement using video rasterstereography and 3-dimensional reconstruction of spinal shape. In: **Clinical Biomechanics**, v. 9, n.1, p. 28-36, jan., 1994.

FROBIN, W.; HIERHOLZER, E. Analysis of human back shape using surface curvatures. **Journal of Biomechanics**, v.15, n.5, p. 379-390, 1982.

GEIB, F.O. **Relação dos perímetros dos pés com a forma e o calçado, segundo critérios de conforto**. 1999. Dissertação (Mestrado em Ciências do Movimento Humano)-Centro de Educação Física, Fisioterapia e Desportos, Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

HERTZBERG, H.T.E.; DANIELS, G.S.; CHURCHIL, E. Anthropometry of flying personnel—1950. **WADC Technical Report**, Wright Air Development Center, Wright Patterson Air Force Base. Ohio, 1954.

KEEFE, M.; RILEY, D.R. Capturing facial surface information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, p. 1539-1548, 1986.

KRATKY, V. Digital Modeling of limbs in Orthopaedics. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, p. 741- 752, 1975.

LAFORTUNE, M.A. Measurement and interpretation of Biomechanical, Perceptual and mechanical variables. Simpósio Brasileiro de Biomecânica do Calçado, 1, 2001. Gramado. **Anais...** Gramado, 2001. p. 17-19.

LILJENQVIST, U.et al. Three-dimensional surface measurement of spinal deformidades using video rasterstereography. **Zeitschrift fur Orthopadie und Ihre Grenzgebiete**, v.136, n.1, p. 57-64, jan/feb., 1998.

LOCKARD, M.A. Foot Orthoses. **Journal of Physical Therapy**. v. 12, n. 68, p. 166-173, dec., 1988.

MANNA, I. et al. A comparative study of foot dimension between adult male and female and evaluation of foot hazards due using of footwear. **Journal of physiological anthropology and applied human science**. v. 20, n.4, p. 241-246, july, 2001.

MANFIO, E. F. **Estudo de Parâmetros Antropométricos e Biomecânicos do Pé Humano para a Fabricação de Calçados segundo Critérios de Conforto, Saúde e Segurança**. 1995. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1995, pp.39-40.

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

PALMA, A.; RIDOLA, C. Functional anatomy and imaging of the foot. **Journal of Anat. Embryology**. v. 2, n. 196, p. 85-98, apr./june, 2001.

PATERNIANI, P.E.S. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Reconstrução Tridimensional e Análise de Superfície do Corpo Humano**. 2001. 75f. Dissertação (Mestrado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

PENEIREIRO, G.; LOBO DA COSTA, P.H. Estudo ergonômico dos carteiros pedestres: percepção de conforto e adequação à atividade profissional. Simpósio Brasileiro de Biomecânica do Calçado, 1, 2001. Gramado. **Anais...** Gramado, 2001. p. 53-58.

RODRIGUEZ, M.D.; SACCO, I.C.N.; AMADIO, A.C. Estudo biomecânico do índice do arco longitudinal plantar em crianças de diferentes grupos experimentais. Congresso Brasileiro de Biomecânica, 7, 1997. **Anais...** Campinas, 1997, pp. 394-400.

SÁ, M.R. et al. Estudo descritivo de parâmetros antropométricos dos pés de crianças de 3 a 10 anos de idade. Simpósio Brasileiro de Biomecânica do Calçado, 1, 2001. Gramado. **Anais...** Gramado, 2001. p 43-47.

SACCO, I.C.N. et al. Avaliação Biomecânica de parâmetros antropométricos e dinâmicos durante a marcha em crianças obesas. Congresso Brasileiro de Biomecânica, 7, 1997. **Anais...** Campinas, 1997, p. 447-452.

ANEXOS

ANEXO A - QUESTIONÁRIO / AVALIAÇÃO DOS VOLUNTÁRIOS

“RECONSTRUÇÃO 3D DA SUPERFÍCIE DO PÉ HUMANO”

Nome:	Sexo:	
Endereço:	Cidade:	
Fone:	Data nasci/o:	Idade:
Peso:	Altura:	
Data da coleta:	Código:	
Questionário		
Sente atualmente alguma dor ou desconforto em alguma(s) região(ões) do pé?		
<input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Região anterior do pé <input type="checkbox"/> dedos <input type="checkbox"/> Região do meio do pé <input type="checkbox"/> articulação <input type="checkbox"/> Região posterior do pé <input type="checkbox"/> dorso <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> arco do pé <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> calcanhar – inferior <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> calcanhar – superior		
Você é? <input type="checkbox"/> destro <input type="checkbox"/> sinistro		
Já teve lesão grave em algum dos pés? <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Sim Qual?		
Inspeção. Pé normal <input type="checkbox"/> Alteração no pé <input type="checkbox"/> Qual?		

ANEXO B - FICHA DAS MEDIDAS DIRETAS SOBRE O MODELO DO PÉ HUMANO

Distâncias	Pontos selecionados	1 ^a . medição	2 ^a . medição	3 ^a . medição
1	1-2			
2	4-5			
3	2-3			
4	7-8			
5	2-10			
6	1-3			
7	6-8			
8	13-14			
9	1-4			
10	1-5			
11	1-6			
12	1-17			
13	1-8			
14	2-16			
15	2-7			
16	3-7			
17	7-16			
18	17-16			
19	3-8			
20	3-17			
21	7-15			
22	6-13			