

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

MARCEL MOURÃO ROSSI

**METODOLOGIA PARA A
CORREÇÃO DE DISTORÇÕES
ÓPTICAS EM ANÁLISES
CINEMÁTICAS
TRIDIMENSIONAIS DOS
MOVIMENTOS DA NATAÇÃO**

Campinas
2009

Marcel Mourão Rossi

**METODOLOGIA PARA A
CORREÇÃO DE DISTORÇÕES
ÓPTICAS EM ANÁLISES
CINEMÁTICAS
TRIDIMENSIONAIS DOS
MOVIMENTOS DA NATAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
(Graduação) apresentado à Faculdade de
Educação Física da Universidade
Estadual de Campinas para obtenção do
título de Bacharel em Educação Física.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros

Campinas
2009

Marcel Mourão Rossi

**Metodologia para a correção das distorções
ópticas em análises cinemáticas tridimensionais
dos movimentos da natação**

Este exemplar corresponde à redação final do Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) defendido por Marcel Mourão Rossi e aprovado pela Comissão julgadora em 22/06/2009.

Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros
Orientador

Prof^a. Dr^{nda}. Amanda Piaia Silvatti

Prof. Dr^{ndo}. Tiago Guedes Russomano

Campinas
2009

Dedicatória

Aos senhores Alberto Michelotti Rossi e Sônia Maria de Oliveira Mourão Rossi. Pai, mãe, ser seu filho é um privilégio, uma responsabilidade, uma honra! Quero que saibam que, em cada reflexão, em cada passo, em cada atitude minha, onde quer que eu esteja, tomo para mim, como juízo de valor, o exercício de imaginá-los ao meu lado, para saber se teriam orgulho de mim. Amo demais vocês...

Agradecimentos

Não menos espinhosa que a tarefa de conceber (finalmente!!) esse trabalho de conclusão de curso, é a tarefa de tecer os agradecimentos finais. Sim, eu poderia ser um pouco mais sucinto. Utilizaria, como muitos, meia dúzia de linhas e já estaria ótimo! Ótimo para muitos, mas não para mim. Talvez eu tenha sido influenciado demais por essa questão do homem ser “ao mesmo tempo e indissociavelmente natureza e cultura” (como disse o professor Jocimar no seu texto Educação Física e Cultura), me levando a concluir que é impossível dissociar a influência que tantas pessoas e momentos tiveram na formação do Marcel que escreve agora. E seguramente, se fosse eu diferente, essa obra e tudo mais que foi construído ao longo desses anos simplesmente não existiriam como tais. Portanto, tomei a liberdade de escrever “um pouco demais”, justamente para re-visitar lugares, pessoas e ocasiões que tanto me influenciaram. O que foi um delicioso exercício de nostalgia, nostálgico que sou.

*A começar pelo primeiro “bando” de pessoas com o qual interagimos, e talvez o único ao qual pertenceremos até o fim: a família! Saudades dos tempos em que eu achava que adulto eram só os meus pais, meus tios e minhas avós, de esperar com ansiedade por datas como o meu aniversário ou o Natal (no qual a Tia Ana me deu “olé” por muitos anos, e que fazia do dia 24 de dezembro especialmente divertido!!), de ir para Minas nas férias ou para a praia no fim do ano, dos doces da Vó Izabel... Muito obrigado Pai, Mãe, Déia, Vó Bruna, Vó Izabel, Tia Ana, Tio Antônio, Dudu (meu primeiro melhor amigo!) pelo amor absolutamente consolidado ao longo de todos esses anos e pelos valores adquiridos, os quais bastou eu sair de casa para perceber o quanto são raros... Obrigado também aos demais parentes, por simplesmente fazer parte da família e contribuir com suas próprias características. **OBRIGADO, MINHA FAMÍLIA!!!***

*Muitas saudades dos longos anos de Colégio Virgem Poderosa, o CVP, a sensacional Companhia Vendedora de Pipoca!!! Onze anos pra ser mais exato, dos 4 aos 14 anos, momento esse de tantas mudanças, descobertas, crescimento, abdições... Momento em que vivenciei com maior intensidade minha infância, e também quando comecei a ser menos criança e mais adulto. Não tem como esquecer das Tias Sandra, Lúcia, Ana e Marilu, do prof. Baltazar (que me deu aula de Ed. Física de 1989 até 1997!!!), de grandes amigos como Mariana, Cammys, Raquel, Heleno, Evaristo, Alex, Helton, Einstein, Luís, Zé Duda, de sempre ir e voltar da escola pela mesmíssima Anchieta, do 442-A e do 4672-31 (porque o 10 dava um monte de volta e eu chegava atrasado em casa pra almoçar e me aprontar pra treinar), das festas juninas, das feiras de ciências, das aulas no forro da escola, do Pai Preto, do Bazar Azul, dos lanchinhos da tia Vera na casa do Evaristo, prova feita em mimeógrafo a álcool, da lenda das 4 chaves em cruz, do medo de encontrar uma freira de camisola nas expedições noturnas na escola, das paixonites, dos primeiros beijos, do NR... **MUITÍSSIMO OBRIGADO, CVP!!!***

Aôôô, povo do Colégio Singular SBC!!! Como não falar de vocês??? Sou muito grato por ter conhecido professores como Chico Boca (“Cê é burrrrrro, Censon?? É com a esquerda!!!”), Frank (“Ei você!!!”), Raimundão, Cláudio (“Ô Vagabundo!!”), Marco Pólo, Niltinho, Lieb, Yuji, com os quais aprendi a ter um contato mais fidedigno com os reais acontecimentos do mundo... Também sou muito agradecido por ter conhecido a Camila nesse período, com quem o relacionamento me levou a aprender e amadurecer muito. Não ficamos juntos para sempre, como juramos de forma tipicamente adolescente, mas o carinho e a saudade daqueles dias se mantém, pode ter certeza. E graças a isso, quem diria, hoje a Flor faz parte da minha família!!!

Mas nada foi melhor do que fazer parte da fantástica e inesquecível turma 3\$1 2000!!! Faustinho, Pestana, Cammys (a mesma do CVP!! Estudamos juntos dos 4 aos 17 anos!!!), Larica, MariLHa, Skytter, Xiristian, Rrrrrroger, Marcelo, Falabela, Dyeguito, XL, Luzes, Azenha, Manda... Momentos sensacionais não faltaram na companhia de vocês: bi-campões invictos do futebons (24 gols pró, 3 contra...), dando uns pegas na Poko-Pano, admirando o canto do Rrrrrrrrouxinol (“uãããã”) enquanto sobrevivíamos “No Limite” de Camburí à base de bolachas Dunga, as sensacionais e ultra ovacionadas apresentações de “Faustinho & Alexandre feat. The Khêder’s Band”, (aliás, KHÊÊÊÊÊÊDERRRRR!!! NOSSO ILUSTRÍSSIMO MASCOTE!!!! Você nos odiava, mas nós te amávamos!!!!), nossas composições consagradas como o Eurodance do Chico Boca, “Pig on the Road”, “Jamanta’s Jazz”, “História do Fabião”, “América”... Cara, nós éramos muito felizes... É fantástico quando ainda nos encontramos e, unânimes, concordamos que foram nossos melhores anos (até então)... E VENCEMOS!!! O MUNDO É NOSSO!!! Filiais Nos EUA, Alemanha, Dinamarca, Espanha, e muito em breve, quem sabe, será aberta a filial da Oceania!!! **VALEU, SINGULAR!!!!**

Finalmente, o ensino superior. Como foram especiais esses 7 anos de Unicamp!!! Morar fora de casa, baladinhas, manguaças, “o lado negro da força” (não tão explorado, é verdade, dada a lollitise de quem escreve), dogões, Brix, competições máster (Vermelhinha!!!), churras, panquecadas, lasanhadas, Olimpíada, L.E.C.U., BANDEJÃO!!!! Mas talvez nada tenha marcado tanto quanto esses 5 anos de Faculdade de Educação Física. Período cujo aprendizado pode ser dividido em o que foi aprendido em sala e o que foi aprendido fora de sala. Nesse parágrafo, falarei sobre o aprendido em sala, dedicando-o a agradecer aos professores da FEF. Engraçado pensar que muitos desses professores são nacionalmente renomados, e mesmo assim me tornei mais próximos deles do que de todos os que tive anteriormente. E como é massa trocar figurinhas ou beber cerveja com esses caras, de forma bem descontraída, vendo-os como pessoas humanas além das titulações acadêmicas, e não mais como entidades intocáveis. Será que isso tem a ver com o fato de que, agora, eu também sou um professor? Pode ser. E é por isso que faço questão de homenageá-los aqui. Primeiramente, os professores Vera e Cesinha, os primeiros a me acolherem na FEF antes mesmo do início de minha graduação, e que por uma sensacional coincidência dos acontecimentos, foram também meus últimos professores na casa. Especialmente com você Cesinha, aprendi a ter uma opinião um pouco mais otimista das tantas coisas erradas (e acredite, vindo de mim, um pouco já é uma grande vitória!!), respeito e carinho com os alunos e funcionários e também a sentir um amor incondicional por nossa profissão e pela FEF. Agradeço também a você, prof. Orival, o mesmo que teve a pachorra de cornetar o meu nado na primeira vez em que nos falamos, mas que também foi um grande amigo, que meu abriu portas e sempre me ajudou quando precisei (chegou até a me substituir em uma aula do projeto, veja só)!!! Também sou muito grato pelo convívio com o meu orientador, prof. Ricardo, um senhor exemplo de profissionalismo e competência, daqueles para quem olhamos e pensamos “caramba, pra chegar aonde esse cara chegou, tem muito chão ainda!!”, ou, citando Scherer (1997), “Tem que comer muuuuuito Neston”. Obrigado também, prof. Ricardo, por ver o quão importante era essa apresentação de monografia para mim, merecendo um final um pouco menos, hummm, informal! Fica também um agradecimento muito especial aos professores Elaine, Mara Patrícia, Aguinaldo, Robertão, Gavião, Paulinho (“Aô guri!”), com quem muito aprendi além dos assuntos em pauta na matéria. Há outros dois professores da casa, de quem tive a grande infelicidade de não ser aluno, mas que me influenciaram muito quando suas idéias eram debatidas em sala, ou quando eu ficava fuçando em suas obras na biblioteca: professores João Batista Freire e Jocimar Daólio (esse último até foi meu aluno de natacão!!). Muito obrigado por mudarem minhas idéias!!! **OBRIGADO UNICAMP!!! OBRIGADO FEF!!!**

Muitas foram as lições aprendidas fora do horário de aula (ou matando aula!!), na cantina, na biblioteca, nas salinhas de estudo, no Bandeco, na piscina, no Cream Dog, no lanche do Tiozinho, madrugadas adentro... Melhor ainda se acompanhados dos grandes amigos que fiz nesses anos! Muito obrigado aos colegas da facu, especialmente à turma 05 noturno e aos vários veteranos, com quem sempre foi muito mais divertido conversar!! Valeu povo do LIB (embora eu tenho que admitir que eu não ando fazendo o meu social decentemente, heheh!!) pelas risadas e pela ajuda sempre muito bem vinda, especialmente à Amanda, que esteve junto o tempo inteiro nessa loucura com os números(!!!) e também ao Thiago, que topou fazer parte da banca quando o árbitro já tinha sinalizado o tempo de acréscimo!! E é claro, a minha querida Casazul Brasília!!!! Valeu Japa (um demônio de alma pura!!!), Caipira, Baiano e Lucão, pelas risadas, pelas conversas, pela sujeira compartilhada, pelos litros de Coca-Cola, pela “flaming-ball”, pelos vídeos da internet e da BlueHouse Company... **VALEU FEFIANOS!!! CASAZUL É BRASÍUUUUUU!!!!**

Bom, uma hora a gente ia ter que começar a ganhar dinheiro, né??? E mais do que isso, também por em prática um pouco do que aprendeu e acredita, pra ver se de fato dá certo, e também aprender aquilo que não se viu escrito nas lousas. Sim, os estágios!!! Muito obrigado a todos os amigos dos projetos de extensão da FEF: aos meus alunos de iniciação, aprimoramento e treino máster, ao Paulinho (Perigoso!!!), à Rita, ao Orival... Obrigado também ao povo da Fórmula Academia, em especial aos professores Guilherme (Frango!!), Juzinha e Ivan, com os quais mais convivi e aprendi, meu chefe Marcelo Floriano (uma das pessoas mais sérias, competentes, sistemáticas e justas que eu conheci!), meus alunos (quem diria que eu ia curtir tanto dar aula pras crianças!!) e aos amigos dos demais departamentos. E também, é claro, obrigado Esporte Clube Pinheiros!! Obrigado Albertinho, Ari, Marcão, Taba, Amen, Juma, Thiago e PC pela oportunidade, aprendizagem, convivência, dicas e confiança!! Valeu a todos os atletas com quem mais aprendi do que ensinei, especialmente à galera do Peitox!!! Valeu também aos “interinos” Caucau, Jara e Faustones!!! Mandamos muito bem!!! Sensacionais as fritas com Skol de segundas-feiras!! E só de pensar que eu finalmente coloquei as mãos em uma medalha olímpica dourada... **NÃO SERÁ A ÚLTIMA VEZ!!! VALEU EXTENSÃO!!! VALEU FÓRMULA!!!! VALEU PINHEIRÃO!!!**

Muito embora não seja uma instituição de ensino, foi a minha maior escola, aquela na qual mais aprendi, para a qual mais me dediquei, a que mais me trouxe alegrias e tristezas, e que deu as bases para que eu seguisse profissionalmente o meu futuro: A NATAÇÃO!!! E pensar que eu só comecei a nadar pra calar a boca da Cammys que ficava contando vantagem, porque sabia nadar e eu ainda não... Dezenove anos, 195 medalhas, 3 equipes, 3 técnicos, 10 paulistas, 3 brasileiros e outras tantas competições, viagens, hotéis e dormitórios (incluindo um mosteiro!), toucas, sungas (lembra-se delas?), óculos, chororôs de alegria ou tristeza, piscinas geladas, treinos de madrugada, e et cétera (é assim que se escreve???), me graduo pela Faculdade de Educação Física da Unicamp para virar um profissional da natacão!!! Afinal, isso é o meu melhor!!! Obrigado Binho, (quem me ensinou a nadar), Tem Esportes, meus técnicos Awdrey, Walter e Indiani, meus grandes amigos Fredy, Renato, Fausto, Caipira, Hudson, Gabriel, Carlão, Trivas, aos pais que se dedicaram à Pro-Record, aos adversários que se tornaram amigos... Claro que houve altos e baixos, e em um certo momento da minha vida, resolvi parar. Não dava mais os resultados esperados, as amizades e os interesses não eram mais os mesmos, o vestibular estava próximo, não tinha mais o mesmo tesão... Enfim, já não era tão feliz, e achava que a natacão tinha acabado em minha vida. Breve engano. Bastou entrar na Unicamp, num momento em que eu precisava novamente me reencontrar com o que havia de melhor em mim, para eu me tornar parte da Unicamp Swimming Society Reloaded!! Foi a minha família em Campinas! Graças a ela descobri a FEF, e com isso perceber que a Ed. Física era bem maior e mais bela do que eu achava!

Por fim, gostaria de agradecer a uma pessoa que, dada a enorme distância que hoje nos separa, talvez nunca venha a ler estas palavras. A vida é meio esquisita, não é? Algumas pessoas ficam por anos e acabam indo como tivessem ficado apenas durante uma tarde gostosa; já outras não precisam de muitos meses para causar um grande impacto, desproporcional a todos os demais, separando o antes e o depois como se fossem situações imiscíveis. E o que é pior, só nos damos conta disso depois, e não durante. Paulinha, minha doce mulher de Esparta!! Sei que muito do que deveria ter sido dito já o foi, embora da maneira errada; sei também que poderíamos ter ficado ainda mais tempo juntos, se eu não fosse tão tolo... Mas o fato é que é impossível não pensar em você nesse momento... Olho para tudo o que construí e conquistei ao longo dessa graduação, as portas que abri, as amizades e o respeito conquistado, o trabalho reconhecido, cada linha imortalizada nesse trabalho, o potencial que ainda há de ser explorado... Olho tudo isso, e sinto um baita orgulho de mim mesmo. E foi você, mais do que ninguém, que me ensinou a sentir orgulho da pessoa que eu sou, a valorizar e a investir nas qualidades que me tornam diferenciado e raro, ao invés daquelas que fariam de mim simplesmente comum; e que me motivou a ser, dia após dia, sempre melhor no meu melhor. Sem contar as suas demonstrações de quão simples pode ser a vida, muito embora eu talvez nunca consiga lidar com ela com a mesma maestria que você faz. Então, seguimos nossos próprios rumos, como em um rio de correnteza branda, no qual ainda temos certa autonomia para tomarmos nossa direção. Porém sabendo que, em muitas situações, é bobagem nadar contra a correnteza, para tentar voltar atrás. E muito em breve, ficaremos ainda mais distantes um do outro, fisicamente. Mas você sabe que sempre estarei “voando ao seu lado”. Porque eu te amo. E continuo sentindo a falta que você me faz... **OBRIGADO, MEU ANJO!!!**

“For thousands of audience and millions watching around the globe, ladies and gentleman....

T0000000000000000

[illegible]

Michael Buffer

ROSSI, Marcel Mourão. **Metodologia para a correção de distorções ópticas em análises cinemáticas tridimensionais dos movimentos da natação**. 2009. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

RESUMO

A análise tridimensional dos movimentos executados nas principais técnicas da natação através da videogrametria pode contribuir para uma melhor compreensão das variáveis físicas determinantes no desempenho de nadadores de alto nível. Entretanto, a literatura dispõe de poucos estudos através dessa metodologia que analisam mais de um ciclo de movimento ou os movimentos relativos às fases das saídas. Uma possível razão é a necessidade de se calibrar grandes volumes de análise dentro e fora d'água através de objetos de calibração muito grandes e de difícil manuseio, para assim minimizar os efeitos das distorções oriundas de propriedades ópticas das lentes e da água. As distorções em decorrência das lentes podem ser estimadas através de modelos e parâmetros matemáticos obtidos com a metodologia proposta por Bouguet (2002), e de acordo com os dados da literatura, as distorções ocorridas em ambiente aquático possuem as mesmas características que aquelas em função das lentes (porém com magnitudes diferentes), sendo possível inclusive a calibração de câmeras subaquáticas em ambiente aéreo. O presente estudo propõe a utilização desses parâmetros de distorção para a correção das coordenadas bidimensionais utilizadas na Transformação Linear Direta (DLT), minimizando a influência das distorções nos processos de calibração e reconstrução, permitindo assim o uso de objetos de calibração menores e uma maior flexibilidade no posicionamento das câmeras. Um objeto em forma de cruz com dimensões precisamente conhecidas movimentou-se fora d'água ao longo de volumes de análise com dimensões de 0.9m x 2.5m x 2.7m (Teste 1) e 2.0m x 2.5m x 5.0m (Teste 2), sendo avaliadas as influências de fatores como quantidade de pontos de calibração, quantidade e posição das câmeras, distância focal e extrapolação do volume de calibração (Teste 2), em situações com e sem correção das distorções. Os resultados de acurácia obtidos mostram a eficácia da metodologia proposta, em comparação com os valores encontrados em outros estudos com volumes de análise menores. Além disso, é possível a calibração de grandes volumes de análise a partir de objetos de calibração reduzidos e posicionamento de câmeras mais próximas, com ajuste de grande angular para uma maior abertura do ângulo de visão.

Palavras-Chaves: Distorções ópticas; natação; análise tridimensional; videogrametria

ROSSI, Marcel Mourão. **Methodology for optic distortion correction in three-dimensional kinematical analysis of the swimming movements**. 2007. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

ABSTRACT

The three-dimensional analysis of the movements performed in the main techniques of swimming through videogrammetry can contribute to a better understanding of the physical determinants in the performance of high-level swimmers. However, the literature has few studies using this methodology to analyze more than one cycle of movement and the movement for the swimming start phases. One possible reason is the need to calibrate large analysis volumes inside and outside water through very large and difficult to handle calibration objects, in order to minimize the effects of distortions from the optical properties of the lenses and water. The distortions due to lens can be estimated through mathematical models and parameters obtained with the methodology proposed by Bouguet (2002), and according to the literature, distortions occur in the aquatic environment have the same characteristics as those caused by the lenses (but with different magnitudes), and it's even possible the calibration of underwater cameras in aerial environment. The present study proposes the use of these distortion parameters for the correction of the two-dimensional coordinates used in the Direct Linear Transformation (DLT), minimizing the influence of distortions in the process of calibration and reconstruction, thus allowing the use of smaller calibration objects and more flexible camera position. A cross-shaped object with precisely known dimensions has been moved out of the water inside analysis volumes with dimensions of 0.9m x 2.5m x 2.7m (Test 1) and 2.0m x 2.5m x 5.0m (Test 2). The influences of factors such as number of calibration points, quantity and position of the cameras, focal distance and extrapolation of the volume of calibration (Test 2) have been evaluated in situations with and without distortion correction. The accuracy obtained on each situation show the effectiveness of the proposed methodology in comparison with the values found in other studies with smaller analysis volumes. Furthermore, it is possible to calibrate large analysis volumes with reduced calibration objects and with closer camera position, through small focal length setting for a higher opening angle of vision.

Keywords: Optic Distortion; swimming; three-dimensional analysis; videogrammetry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Modelo exemplificando a condição de colinearidade, como em uma câmera “pinhole”. O ponto destacado internamente é o foco (Allard et al., 2005).	19
Figura 2 -	Representação analítica da transformação linear que dá ao ponto P as coordenadas de P_i no Sistema de Coordenadas do Plano de Imagem.	20
Figura 3 -	Relação entre a posição real do P e a sua imagem P' , como é visto por quem olha por cima d’água (mais próximo do observador e da superfície).	25
Figura 4 -	Efeitos das distorções radiais (A) e tangenciais (B). O quadrado azul é a imagem livre de distorção. As figuras em rosa mostram os efeitos quando $k_1 > 0$ (A1); $k_1 < 0$ (A2); $P_1 > 0$ e $P_2 = 0$ (B1); $P_1 = 0$ e $P_2 < 0$ (B2) (Wang et al., 2008).	30
Figura 5 -	Equação de reta L utilizada no modelo plumb-line de Brown (1971).	32
Figura 6 -	Representação analítica do deslocamento de um ponto contido no plano ideal para o plano real devido à distorção, segundo o modelo de Wang et al. (2008).	34
Figura 7 -	Objeto de calibração plano utilizado na metodologia proposta por Zhang (1999).	35
Figura 8 -	Fluxograma das etapas de calibração segundo o modelo proposto por Zhang (2000).	37
Figura 9 -	Toolbox desenvolvido para rodar em ambiente MATLAB® para correção de distorções (Bouguet, 2002).	38
Figura 10 -	Exemplo de estrutura plana e seus cantos extraídos automaticamente pelo <i>Toolbox</i> .	38
Figura 11 -	Figura 11: Matrizes intrínsecas da câmera segundo a notação de cada autor.	39
Figura 12 -	Exemplo de campo vetorial elaborado pelo <i>Toolbox</i> representando os deslocamentos na imagem devido à distorção radial.	40
Figura 13 -	Exemplo de campo vetorial elaborado pelo <i>Toolbox</i> representando os deslocamentos na imagem devido à distorção tangencial.	40
Figura 14 -	Exemplo de campo vetorial elaborado pelo <i>Toolbox</i> representando os deslocamentos na imagem devido ao efeito combinado das distorções radial e tangencial.	41
Figura 15 -	Exemplo de posicionamento das estruturas planas em cada frame analisado em relação à câmera (localizada na origem do Sistema de Coordenadas Global), obtido pelo <i>Toolbox</i> .	41
Figura 16 -	Curvas de distorção em meio aéreo e aquático (dir) e comparação entre curva de distorção encontrada em meio aquático e a predita através da distorção em meio aéreo (Lavest et al., 2000).	53
Figura 17 -	Imagens do Sistema Fixo de Calibração, através de câmeras com distância focal de 8mm (dir) e 4mm (esq).	58

Figura 18 -	Imagens das câmeras modelo BASLER® 602fc com a lente de policarbonato (esq) e detalhe do objeto deslocado ao longo do volume de análise (dir).	59
Figura 19 -	Comparação entre as imagens do chess de um mesmo frame, sem correção (esq) e corrigido (dir), para uma câmera com distância focal de 4mm.	60
Figura 20 -	Posição das 4 câmeras (azul) em relação ao Sistema Fixo de Coordenadas (vermelho). Vista do plano XZ.	61
Figura 21 -	Posição das 4 câmeras (azul) em relação ao Sistema Fixo de Coordenadas (vermelho). Vista do plano XZ.	61
Figura 22 -	Imagens a partir da câmera 1, com os conjuntos de PC utilizados para a sua calibração:	62
Figura 23 -	Posição das 4 câmeras (azul) em relação ao Sistema Fixo de Coordenadas (vermelho) e o volume de análise extrapolado (verde). Vista do plano XZ.	63
Figura 24 -	Posição das 4 câmeras (azul) em relação ao Sistema Fixo de Coordenadas (vermelho) e o volume de análise extrapolado (verde). Vista do plano YZ.	64
Figura 25 -	Imagem do Conjunto 5, a partir da câmera 1.	65
Figura 26 -	Imagem do Conjunto 6, a partir da câmera 1.	65
Figura 27 -	Média das duas distâncias da cruz em cada frame, para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 1 sem correção.	70
Figura 28 -	Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 2 sem correção.	70
Figura 29 -	Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 3 sem correção.	71
Figura 30 -	Posição das câmeras em relação ao objeto de calibração (Plano XZ), obtidas quando calibradas com os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto).	71
Figura 31 -	Representação da influência da distância da câmera para o objeto e como as dimensões desse objeto são interpretadas, segundo sua visualização em tela.	72
Figura 32 -	Campo de visão das câmeras em função da distância focal.	73
Figura 33 -	Efeitos nas imagens com o aumento da distância focal ou da distância do objeto para a câmera (da esquerda para a direita).	75
Figura 34 -	Comparação entre as digitalizações dos pontos de calibração do Conjunto 1 não corrigidos (esq) e as corrigidas (dir), para as câmeras com $f=4mm$ (linha de cima) e $f=8mm$ (linha de baixo). Apesar de alguns pontos não serem mais visualizados em tela, suas coordenadas (negativas) ainda são conhecidas e utilizadas nos cálculos.	77
Figura 35 -	Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 1 corrigido (linha contínua).	78
Figura 36 -	Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 2 corrigido (linha contínua).	79

Figura 37 -	Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 3 corrigido (linha contínua).	79
Figura 38 -	Posição das câmeras 1 a 4 após a correção de distorção em relação ao objeto de calibração (Plano XZ) .	80
Figura 39 -	Imagem da cruz digitalizada sem correção do frame 68 (Câmera 2), região de mínimo local nos gráficos.	82
Figura 40 -	Imagem da cruz digitalizada e corrigida do frame 68 (Câmera 2), região de mínimo local nos gráficos.	82
Figura 41 -	Comparação da posição entre as câmeras 1, 2, 3 e 4 corrigidas (circundadas) e não corrigidas, para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto).	84
Figura 42 -	Reconstruções dos 6 Conjuntos de pontos de controle: 1 (preto), 2 (verde), 3 (vermelho), 4 (azul escuro), 5 (lilás) e 6 (azul turquesa).	86
Figura 43 -	Posição das câmeras 1 a 4 a partir dos 6 Conjuntos de pontos de controle: 1 (preto), 2 (verde), 3 (vermelho), 4 (azul escuro), 5 (lilás) e 6 (azul turquesa), plano XZ.	87
Figura 44 -	Gráficos das reconstruções utilizando 18 PC, com 4 câmeras (preto), 3 câmeras (vermelho), par de câmeras 1 e 2 (verde) e par de câmeras 1 e 3 (azul).	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz (em mm). Grupo 1 (2 câmeras, $f=8\text{mm}$) sem correção.	69
Tabela 2 -	Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz (em mm). Grupo 2 (2 câmeras, $f=4\text{mm}$) sem correção.	69
Tabela 3 -	Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz (em mm). Grupo 3 (4 câmeras) sem correção.	69
Tabela 4 -	Relação entre os valores dos ângulos (em graus e em radianos) e seus respectivos valores de seno e tangente.	73
Tabela 5 -	Valores de parâmetros intrínsecos e de distorção obtidos com o Toolbox desenvolvido por Bouguet (2002) para as câmeras utilizadas.	76
Tabela 6 -	Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz. Grupo 1 (2 câmeras, $f=8\text{mm}$) corrigido.	77
Tabela 7 -	Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz. Grupo 2 (2 câmeras, $f=4\text{mm}$) corrigido.	78
Tabela 8 -	Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz. Grupo 3 (4 câmeras) corrigido.	78
Tabela 9 -	Valores de parâmetros intrínsecos e de distorção obtidos com o Toolbox desenvolvido por Bouguet (2002) para as câmeras utilizadas.	85
Tabela 10 -	Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz no Teste 2.	86
Tabela 11 -	Valores para as reconstruções utilizando as câmeras com $f=4\text{mm}$ e o conjunto de 18 PC, realizadas nos Testes 1 e 2.	88

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

b	Bias (diferença entre o valor real e a média das amostras)
CCD	Sensor óptico da câmera (Charge-Coupled Device)
DLT	Transformação Linear Direta (Direct Linear Transformation)
dP1P2	Distância entre os pontos de validação 1 e 2
dP3P4	Distância entre os pontos de validação 3 e 4
E_{abs}	Erro absoluto
E_{max}	Erro máximo
E_{min}	Erro mínimo
<i>f</i>	Distância focal
FEF	Faculdade de Educação Física
LIB	Laboratório de Instrumentação para Biomecânica
PC	Ponto de calibração
PV	Ponto de validação
RMS	Erro médio quadrático (Root Mean Square) em milímetros
RMS %	Erro médio quadrático (Root Mean Square) percentual
RMS %	Erro médio quadrático (Root Mean Square) percentual
SCC	Sistema de Coordenadas da Câmera
SCG	Sistema de Coordenadas Global
SCPI	Sistema de Coordenadas do Plano de Imagem
SCPT	Sistema de Coordenadas do Plano de Tela
SD	Desvio Padrão (Standard Deviation)
SD²	Variância
SFC	Sistema Fixo de Calibração
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

SUMÁRIO

1 Introdução	17
1.1 Apresentação	17
1.2 Métodos Lineares (Câmera Pin Hole)	18
1.3 Direct Linear Transformation (DLT)	21
1.4 Erros randômicos e efeitos de distorção durante a medição	23
1.5 Procedimentos para minimização de erros no DLT	26
1.6 Métodos não lineares e Parâmetros de distorção	28
1.7 Metodologia de calibração de câmeras proposto por Zhang (1999)	34
1.8 Calibração não-linear de câmeras em ambiente MATLAB®	37
1.9 Utilização dos parâmetros intrínsecos e de distorção no DLT	42
1.10 Análise tridimensional de movimentos na natação através do DLT	43
1.11 Efeitos das distorções em análises subaquáticas	47
1.12 Relação entre índice de refração da água e parâmetros intrínsecos da câmera	52
2 Justificativa	54
3 Objetivos	56
3.1 Geral	56
3.2 Específicos	56
4 Metodologia	57
4.1 Materiais	57
4.2 Métodos	60
4.2.1 Teste 1	60
4.2.2 Teste 2	63
4.2.3 Calibração e Reconstrução	66
5 Resultados e Discussão	68
5.1 Teste 1	68
5.1.1 Teste 1 sem correção	68
5.1.2 Teste 1 corrigido	76
5.2 Teste 2	85
Conclusões	90
Referências Bibliográficas	92

1 Introdução

1.1 - Apresentação

A natação é uma modalidade esportiva cuja principal variável determinante no desempenho é a velocidade de deslocamento (vence aquele que cumprir uma pré-estabelecida metragem no menor tempo possível). Essa velocidade, por sua vez, deve-se a uma complexa relação entre o corpo do atleta e o ambiente aquático, no qual esse corpo se desloca. Sendo a água um fluido líquido, uma série de propriedades como densidade, escoamento, diferenças de pressão hidrostática, entre outras, irão determinar se certos movimentos e posicionamentos corporais são responsáveis por gerar propulsão (aumento da velocidade) ou resistência (diminuição da velocidade). De fato, forças propulsivas e resistivas ocorrem simultaneamente durante o nado, e o melhor equilíbrio entre ambas as naturezas de forças resultará no melhor desempenho esportivo.

A complexidade dos movimentos corporais na natação e sua relação com o desempenho esportivo, bem como a evolução constante da performance esportiva na natação em competições internacionais, como campeonatos mundiais e jogos olímpicos, exigem que métodos cada vez mais sofisticados de análise do movimento sejam desenvolvidos, para uma melhor compreensão dessa relação entre corpo e água, sendo, portanto, fonte para uma grande variedade de artigos na área de biomecânica. Essa complexidade se deve à natureza dos movimentos, que ocorrerem tanto em meio aéreo quanto em meio aquático, em um volume de grande extensão (Yanai et al., 1996) e com a utilização de várias articulações simultaneamente, em movimentos tridimensionais (Yanai et al., 1996; Gourgoulis et al., 2008). Portanto, para uma análise mais acurada dos movimentos, é necessária uma metodologia de análise em três dimensões (Psycharakis et al., 2005).

A maior parte das pesquisas realizadas em natação para análise do movimento humano em 3 dimensões é feita através de câmeras de vídeo (Sanders et al., 1995; Cappaert et al., 1995; Payton & Bartlett, 1995; Lauder et al., 2001; Lauder & Dabnichki, 2005; Psycharakis et al., 2005; Psycharakis et al., 2007; Psycharakis et al., 2008; Suito et al. 2008; Vezos et al., 2007; Hay &

Gerot, 1991; Yanai, 1996; Yanai et al., 2000; Yanai & Hay, 2000; Yanai, 2002; Yanai, 2004; Gourgoulis et al., 2008). As informações obtidas com as câmeras são cruzadas entre si através de uma metodologia chamada Direct Linear Transformation (DLT). Essa metodologia, porém, está sujeita a erros de acurácia, em decorrência de propriedades físicas dos meios ópticos que a luz atravessa, quando se desloca desde o objeto visualizado até os sensores ópticos das câmeras (CCD), responsáveis por reproduzir a imagem em tela. A compreensão dos fenômenos que influenciam a acurácia das análises tridimensionais, bem como as limitações a elas impostas e as técnicas desenvolvidas como forma de se minimizar esses erros serão discutidas em capítulos mais adiante.

1.2 - Métodos Lineares (Câmera Pin Hole)

São conhecidas diversas metodologias para a análise tridimensional a partir de câmeras fotográficas (fotogrametria) ou de vídeo fixas (videogrametria). As coordenadas bidimensionais (na tela ou na foto) do objeto a ser estudado são utilizadas para se encontrar as coordenadas tridimensionais desse objeto no espaço. Entretanto, é necessário que as câmeras sejam calibradas de forma correta, ou seja, deve-se conhecer com precisão: (i) a posição e a orientação das câmeras – parâmetros extrínsecos; (ii) as características ópticas e geométricas internas das câmeras – parâmetros intrínsecos. Existe um conjunto de métodos de calibração que utiliza as dimensões precisamente conhecidas de um objeto filmado e as compara com os dados obtidos na tela. Essa calibração é chamada linear, uma vez que os parâmetros matemáticos a serem calculados se encontram elevados à primeira potência.

Tanto os processos de calibração linear quanto o de reconstrução tridimensional são baseados na condição de colinearidade, ou seja, um raio de luz que parte do referencial a ser analisado incide nos sensores ópticos (CCD) da câmera após uma trajetória retilínea, sem sofrer qualquer desvio. Além disso, existe um ponto específico que está contido em todos os segmentos de reta determinados por raios de luz que partem dos vários referenciais analisados e incidem no CCD. Esse ponto é denominado *foco*. O exemplo mais simples é a câmera do tipo estenopeica ou “*pinhole*” (do inglês *pin hole*, buraco de alfinete), na qual o foco é um orifício bastante reduzido.

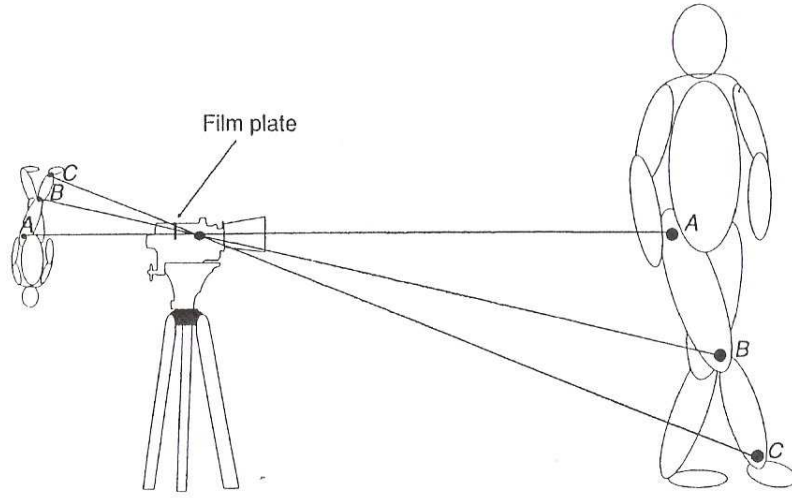


Figura 1: Modelo exemplificando a condição de colinearidade, como em uma câmera “pinhole”. O ponto destacado internamente é o foco (Allard et al., 1995).

Baseando-se no conceito da câmera *pin-hole*, a transformação linear de um ponto P em relação ao espaço (tridimensional) para as coordenadas em tela (bidimensional) é feita da seguinte maneira: seja $P = [X \ Y \ Z]$ as coordenadas tridimensionais de um ponto em relação ao Sistema de Coordenadas Global $OXYZ$. A primeira etapa consiste em localizar esse mesmo ponto a partir do Sistema de Coordenadas da Câmera (SCC) $OX_cY_cZ_c$. Esse sistema de coordenadas é idealizado de forma que sua origem seja o foco da câmera e o eixo Z_c seja paralelo ao eixo óptico da câmera. Isso é obtido através da equação:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = [R | T] \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde R é a matriz de rotação (3x3) e T é o vetor de translação. Essa matriz contém os parâmetros extrínsecos da câmera.

Em seguida, as coordenadas desse ponto em relação à câmera ($P_c = [X_c \ Y_c \ Z_c]$) são então projetadas homograficamente no Sistema de Coordenadas do Plano de Imagem (SCPI) $o_i x_i y_i$. Isso significa que essas coordenadas tridimensionais são projetadas em um plano

perpendicular ao eixo Z_c da câmera, no local onde uma reta determinada pela origem do SCC (foco) e pelo ponto P_c atravessa esse plano de imagem. O local onde Z_c atravessa o Plano de Imagem chama-se ponto principal; a distância da origem do sistema (foco) para o ponto principal é a distância focal (f). Segundo a equação:

$$\tilde{p}_i = [x_i \ y_i \ f]^T = \frac{f}{Z_c} [X_c \ Y_c \ Z_c]^T \quad (2)$$

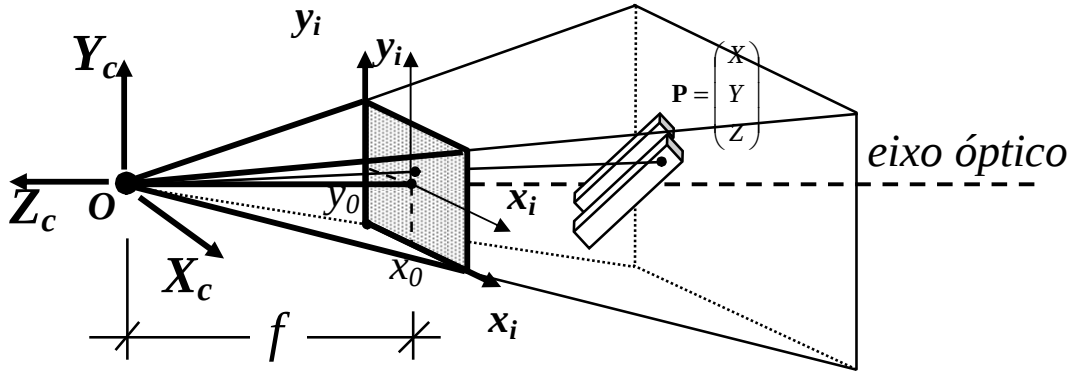


Figura 2: Representação analítica da transformação linear que dá ao ponto P as coordenadas de P_i no Sistema de Coordenadas do Plano de Imagem.

Alguns autores, como os referenciados nesse estudo para a correção de distorção óptica, convencionaram utilizar a equação $\tilde{p}_i = [x_i \ y_i \ 1]^T = \frac{1}{Z_c} [X_c \ Y_c \ Z_c]^T$, para utilizar o valor de f na matriz intrínseca da câmera (Bouguet, 2002). Essa matriz contém os parâmetros intrínsecos da câmera e é utilizada na etapa de transformação do ponto $p_i = [x_i \ y_i]$ para o ponto $p = [x \ y]$ do Sistema de Coordenadas do Plano da Tela (SCPT) oxy . Nessa etapa há o ajuste dos valores do sistema métrico para a unidade *pixel*. Há também uma translação em relação ao plano de imagem, já que a origem do sistema passa a ser o canto superior esquerdo, e não mais o centro. Logo, a equação dessa transformação é:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot s_x & f \cdot \tau & x_0 \\ 0 & f \cdot s_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde f é a distância focal, s_x e s_y são os fatores de escala (transformação do sistema métrico para *pixels*; (caso os dois valores não sejam iguais, isso significa que o *pixel* não tem formato de um quadrado), τ é um parâmetro que descreve o defasagem entre os dois eixos da imagem (caso os eixos formem entre si um ângulo de 90° , o fator τ será igual a 0) e $[x_0 \ y_0 \ 1]^T$ é o vetor de translação, cujas coordenadas x_0 e y_0 determinam a posição do centro óptico (em *pixel*) na horizontal e vertical. Evidentemente, essa matriz é específica de câmeras com CCD, devido à complexidade das dimensões e disposições dos *pixels* no sensor. Em câmeras que utilizam filmes, essa etapa é substituída pela multiplicação de um fator de escala, além da translação.

1.3 - Direct Linear Transformation (DLT)

Existem métodos de calibração linear e reconstrução tridimensional que necessitam o conhecimento prévio e com grande precisão do posicionamento das câmeras, utilizando esses dados como parâmetros explícitos. Abdel-Aziz & Karara (1971) reagruparam o algoritmo de reconstrução, obtendo assim 11 parâmetros implícitos (sem significado físico). Esse método é conhecido como Direct Linear Transformation (DLT), amplamente utilizado em análises tridimensionais do movimento humano (Allard et al., 1995). Segundo Challis & Kerwin (1992), as principais vantagens do DLT são: (i) o eixo óptico das câmeras não precisam se interceptar; (ii) a posição das câmeras é arbitrária e não precisa ser medida; (iii) apenas duas câmeras para produzir as imagens de um objeto são necessárias; (iv) câmeras adicionais podem ser utilizadas.

As equações do DLT são as seguintes:

$$x_t = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (4a)$$

$$y_t = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (4b)$$

As coordenadas bidimensionais em tela de um ponto referencial (x_t, y_t) são obtidas na tela através do processo de medição (obtenção manual ou automática das coordenadas através de software de análise de imagens). Seus valores são dados em *pixels* (para câmeras que utilizam CCD), X , Y e Z são as coordenadas tridimensionais desse mesmo ponto em relação a um Sistema de Coordenadas Global (SCG) $OXYZ$ e $L_1 \rightarrow L_{11}$ são os parâmetros de transformação a partir dos quais podem ser obtidas a posição e orientação da câmera em relação ao SCG (parâmetros extrínsecos), além das características ópticas e geométricas internas da câmera (parâmetros intrínsecos). Logo, cada câmera possui seu próprio conjunto de 11 parâmetros de transformação.

A primeira etapa desse método é a calibração, que consiste em se obter os 11 parâmetros de transformação para cada câmera. Para tanto, um objeto, com dimensões perfeitamente conhecidas, posicionado estaticamente no espaço onde ocorrerão as análises, é filmado pelas câmeras. Esse objeto contém pontos (ou marcadores) cujas coordenadas espaciais em relação ao SCG são conhecidas previamente e precisamente por medições em laboratório. Esses pontos são chamados de Pontos de Controle (PC). As coordenadas bidimensionais em tela desses PC são obtidas no processo de medição, através do software de análise utilizado. Considerando-se que cada um desses pontos geram as duas equações apresentadas, e que para a obtenção dos 11 parâmetros de transformação são necessárias pelo menos 11 equações, então deve ser utilizados no mínimo 6 PC, que gerarão 12 equações. Um maior número de PC gerará um maior número de equações.

A etapa seguinte é a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos que se deseja analisar ao longo do movimento avaliado, através das coordenadas em tela dos mesmos. Com isso, as distâncias entre dois pontos quaisquer no espaço serão determinadas no sistema de medição escolhido pelo pesquisador (a maioria utiliza o sistema métrico). Os 11 parâmetros encontrados para cada câmera são inseridos nas equações de cada um dos pontos avaliados e o objeto de calibração é removido. Cada ponto em cada câmera produz apenas duas equações, sendo que as variáveis a serem encontradas são três (as coordenadas X , Y e Z). Para isso, são adicionadas mais duas equações, oriundas das coordenadas de tela do mesmo ponto, porém de uma câmera diferente. A introdução de mais câmeras na análise de movimento do dado ponto gerará um maior número de equações.

Em uma análise de movimento, para cada ponto essa operação será repetida quadro a quadro no vídeo. A variação entre o posicionamento de um ponto para o posicionamento do mesmo nos quadros adjacentes resultará na descrição cinemática desse ponto. Isso remete a importância de se realizar a aquisição com sincronização de captura de imagem entre as câmeras utilizadas, garantindo que cada quadro seja capturado no exato instante em que uma outra câmera realize uma captura.

1.4 - Erros randômicos e efeitos de distorção durante a medição

Durante o processo de medição, são dadas as coordenadas (x_t, y_t) no SCPT para o ponto P . Levando-se em consideração a equação (4), em teoria teríamos:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

Caso essa condição pudesse ser garantida, a utilização de mais pontos na calibração ou mais câmeras na reconstrução seria irrelevante, e as equações poderiam ser solucionadas como em um sistema linear.

Porém, essa situação não ocorre na prática. Em primeiro lugar, é impossível garantir que não existam erros randômicos durante a medição, por maior que seja a precisão do software utilizado, a destreza do operador ou a resolução da imagem em tela. Esses erros randômicos também podem ser causados por mau funcionamento do CCD da câmera.

Em segundo lugar, as câmeras de vídeo, por utilizarem lentes, estão sujeitas à quebra da condição de colinearidade, uma vez que a luz sofre desvios cada vez que atravessa um meio óptico diferente (ar/lentes). Essa quebra de linearidade é intencional, uma vez que o objetivo das lentes é potencializar a quantidade de luz congruente em um foco virtual e incidente no CCD, aumentando a qualidade da imagem obtida e diminuindo o tempo necessário de exposição do CCD (abertura do obturador, ou *shutter*) para processar essa luminosidade. As câmeras *pin-hole* têm a vantagem de não quebrarem a linearidade da trajetória da luz, porém o tempo necessário de exposição do filme (ou um CCD) à luz é muito alto, podendo variar entre 5 segundos a 1 hora (em função da distância focal e do diâmetro do orifício), tornando inviável sua utilização para obtenção de vídeos (é, portanto, utilizada exclusivamente em fotografia). As câmeras de vídeo comerciais permitem um tempo bastante reduzido de exposição do CCD à luz, da ordem de

1/1000 de segundo.

Esses desvios na trajetória da luz ocorrem, entretanto, de maneira bastante complexa, pois não há uma relação linear na geometria desses desvios ao longo das superfícies das lentes. Esse fenômeno é denominado refração.

De acordo com Halliday et al. (1996), a refração ocorre quando a luz incide em um outro meio óptico e o atravessa, segundo a Lei de Snell:

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2 \quad (6)$$

Onde n_1 e n_2 são os índices de refração do primeiro meio e do segundo meio atravessado, respectivamente (proporcionais à velocidade da luz nesses meios), e θ_1 e θ_2 são os ângulos formados pelos raios de luz com a reta normal no ponto de incidência, no primeiro meio e no segundo meio, respectivamente. Os raios de luz no primeiro e segundo meio e a reta normal são coplanares.

Esse fenômeno tem, como consequência, não apenas deformações nas imagens obtidas em cada uma das câmeras, como também uma errônea localização do referencial na tela (a imagem visualizada em tela é virtual; o objeto, real, não está naquela posição).

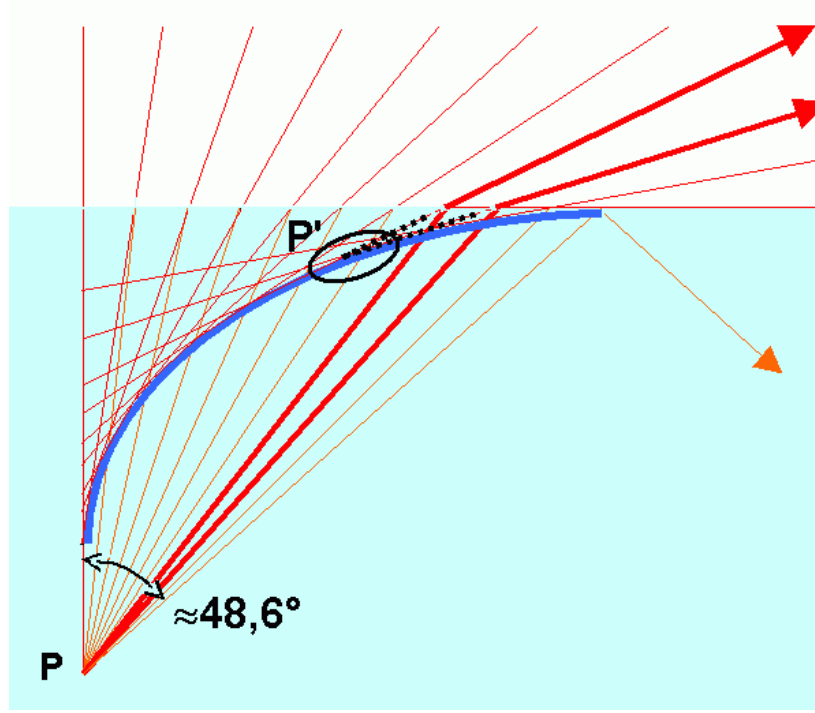


Figura 3: Relação entre a posição real do P e a sua imagem P', como é visto por quem olha por cima d'água (mais próximo do observador e da superfície).

Portanto, a equação (4) deve ser reescrita (Wood & Marshall, 1986):

$$x_t = x + \delta x + \xi x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (7a)$$

$$y_t = y + \delta y + \xi y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (7b)$$

Nas quais as coordenadas medidas de um ponto (x_t, y_t) são representadas pelas somatórias dos parâmetros imperceptíveis $x + \delta x + \xi x$ e $y + \delta y + \xi y$, onde x e y são as coordenadas livre de erros (modelo *pinhole*), δx e δy são os erros randômicos ou aleatórios (durante o próprio processo de medição), ξx e ξy são os erros sistemáticos não lineares (ocorrência de distorções). Esses últimos diferem-se dos randômicos (δx e δy) por não se apresentarem de forma aleatória, e sim por possuírem certa padronização, porém comportando-se de forma distinta ao longo do volume estudado.

Challis & Kerwin (1992) caracterizaram as distorções como sendo radiais (deslocamentos do posicionamento radialmente do ou para o centro da tela) ou tangenciais (deslocamentos em uma direção normal às linhas radiais do centro da tela). Essa classificação é baseada nos estudos de Brown (1971), que definiu um modelo matemático para a quantificação de ambas as naturezas de distorção (as características e parâmetros serão descritos mais adiante). Essas distorções fazem com que a imagem na tela adquira certa convexidade, como se a imagem adquirisse o formato de uma cabeça de alfinete (*pin-cushion*). Em muitas situações usuais, as distorções são consideradas imperceptíveis ou irrelevantes, porém em situações de mensuração, onde exige-se grande precisão, essas distorções devem ser determinadas e minimizadas ao máximo.

É de se supor que os erros de medição oriundos das distorções das lentes levarão a erros na reconstrução tridimensional. Chen et al. (1994), ao reconstruir um volume de calibração com 2.10m x 1.35m x 1.00m e aumentar os erros da reconstrução em 15 vezes, constataram que o volume sofreu dilatações nos meios das arestas e encolheu nos cantos, tomando a forma de um tambor. Concluíram que as distorções pareciam ser aproximadamente simétricas e proporcionais à distância dos pontos analisados ao centro do volume.

1.5 - Procedimentos para minimização de erros no DLT

A influência desses erros faz com que a resolução das equações geradas nos processos de calibração e reconstrução tridimensional através do DLT não possa ser efetuada como em um sistema linear, portanto são resolvidas através do método de mínimos quadrados. Além disso, a quantidade e a distribuição dos pontos de controle e até mesmo a quantidade de câmeras utilizadas deixam de ser fatores irrelevantes no processo. Inúmeras pesquisas foram realizadas com o intuito de entender como esses fatores influenciam no aparecimento de erros randômicos e sistemáticos não-lineares. Evidências foram encontradas, porém a influência desses fatores simultaneamente na magnitude de ambos os tipos de erros faz com que em cada situação seja difícil determiná-los individualmente.

Wood & Marshall (1986) estudaram a influência do número e da distribuição dos pontos de controle em uma estrutura de calibração em forma de prisma triangular, variando também o posicionamento das duas câmeras utilizadas (variação no ângulo formado pelos eixos ópticos de ambas) e utilizaram em cada uma das variações o DLT normal e o DLT modificado, com 12

parâmetros. Como pontos de validação (PV – pontos cujas coordenadas no SCG são precisamente conhecidas e através da reconstrução dos mesmos se faz a análise de acurácia) foram utilizados tanto pontos de calibração como pontos não utilizados na calibração. Verificou que um maior ângulo entre os eixos ópticos das câmeras produz melhores resultados, assim como pontos distribuídos ao longo do volume em relação àqueles localizados no centro do mesmo. Verificou também que não há muitos benefícios no DLT com 12 parâmetros, especialmente na configuração com menos pontos de controle. Constatou também que os erros eram menores nos eixos verticais, atribuindo a isso a maior quantidade de informação nessa direção e menor quantidade de distorção radial das lentes próximo ao centro da tela (as margens laterais estão mais afastadas do centro que as margens superior e inferior).

Challis & Kerwin (1992) examinaram de forma mais aprofundada a influência da configuração dos pontos de controle na acurácia. Elaborou um objeto de controle com 1.0m x 0.6m x 1.0m cujas configurações dos PC foram agrupadas em 5 grupos: 3 nos quais os PC são distribuídos ao redor do volume e 2 nos quais os PC estão distribuídos partindo-se do centro do volume. Verificou que ao se utilizar os pontos de controle como pontos de validação, primeiramente com o objeto de controle na mesma posição e depois ao ser rodado em 180°, a acurácia sofria grande queda da primeira situação (onde tinha grande precisão) para a segunda, concluindo que a utilização de PC como PV não reflete na acurácia do sistema empregado, quando se deseja encontrar as coordenadas de pontos desconhecidos. Além disso, ao utilizar cada uma das 5 configurações de PC para encontrar as coordenadas das demais configurações como PV, descobriu que PC distribuídos nas bordas do objeto tem maior acurácia para determinar a localização dos pontos mais próximos do centro, porém o contrário era inverso.

Ainda sobre a influência do número e posicionamento dos pontos de controle, Chen et al. (1994) buscou mais detalhes, utilizando um volume de 2.10m x 1.35m x 1.00m com 32 PC. Testou 6 diferentes posições para cada grupo de 8, 12, 16, 20 e 24 pontos de controle (30 configurações totais), inclusive na determinação de outros 22 pontos de validação fora do volume. Entre suas descobertas, viu que um menor número de PC localizados em um único canto do volume produzia os maiores erros; um maior número de pontos dentro de uma mesma região produzia melhores resultados; o eixo Z (direção paralela à distância do centro do calibrador à semi-reta determinada pelo posicionamento das duas câmeras utilizadas) teve erros maiores, por ser a direção com menor resolução nas imagens das câmeras e, portanto, mais suscetível a erros

de medição; os pontos de validação fora do volume aumentavam seus erros de reconstrução, com exceção daqueles que se distanciavam ao longo do eixo Z.

A partir de algumas dessas descobertas pode-se tirar algumas conclusões. Sabe-se que o DLT não incorpora dados acerca das distorções das lentes, ou seja, não é possível, a partir dos 11 parâmetros, se obter os valores dos erros devido às distorções ópticas, tampouco dos erros aleatórios. Portanto, para se obter os melhores resultados na reconstrução através do DLT, alguns procedimentos devem ser tomados como forma de minimizar a influência de ambas as naturezas de erros. Os erros sistemáticos não lineares apresentam características particulares e relativas à cada região dentro do volume analisado. Isso encontra embasamento na Lei de Snell, uma vez que um raio de luz que parte de uma determinada região do volume sofrerá refração com características diferentes de outro raio partindo de uma outra região. Logo, parece coerente a idéia de que, ao se utilizar uma concentração de PC oriundos de uma região afastada daquela onde se realiza o movimento a ser analisado, a reconstrução terá baixa acurácia. Isso explica os melhores resultados obtidos pelas configurações de PC que envolvem o volume onde ocorre o movimento a ser reconstruído, ao invés de estarem internos a esse volume. Quanto maior a quantidade desses pontos e mais homogeneamente se distribuírem, melhores serão os resultados, até um determinado mínimo local. As câmeras devem estar dispostas de tal forma que proporcionem boa resolução nas três direções cartesianas do volume de calibração. Quanto mais próximo de 90° estiverem os ângulos formados pelos eixos ópticos das câmeras utilizadas, melhores serão os resultados.

1.6 - Métodos não lineares e Parâmetros de distorção

Como relatado anteriormente, a refração sofrida pelos raios de luz, cada vez que atravessam um meio óptico diferente, possui características não lineares. Analiticamente, esses erros acontecem no Plano de Imagem, e podem ser descritos como um deslocamento do ponto p_i para o ponto $p_d = [x_d \quad y_d]^T$ segundo a fórmula:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma x(x_i, y_i) \\ \sigma y(x_i, y_i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sendo $\sigma x(x_i, y_i)$ e $\sigma y(x_i, y_i)$ as distorções em x_i e y_i , respectivamente (em função delas próprias).

A versão original do DLT com 11 parâmetros (Abdel-Aziz & Karara 1971) não permite a obtenção desses valores de distorção, por se tratar de um conjunto de equações lineares (a refração, como discutido anteriormente, não se manifesta segundo essa característica). Com isso, o que ocorre durante a transformação das coordenadas do SCPI para o SCPT pode ser descrito explicitamente como (desprezando os efeitos dos erros randômicos):

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} x + \xi x \\ y + \xi y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot s_x & f \cdot \tau & x_0 \\ 0 & f \cdot s_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Os primeiros estudos acerca de distorção de lentes se iniciaram com os avanços no mapeamento fotogramétrico aéreo, logo após a I Guerra Mundial. Em 1919, Conrady primeiramente introduziu o modelo de distorção por descentralização. Brown (apud Wang et al., 2008) apresentou o modelo conhecido como modelo Brown-Conrady, resgatando a pesquisa de Conrady à respeito da distorção por descentralização e classificando as distorções em:

- Distorção radial: deslocamentos do posicionamento radialmente do ou para o centro da tela.

$$\sigma x_{Rad}(x_i, y_i) = x_i (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6 + \dots) \quad (10a)$$

$$\sigma y_{Rad}(x_i, y_i) = y_i (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6 + \dots) \quad (10b)$$

No qual $(k_1, k_2, k_3, \dots, k_n)$ formam um série infinita de parâmetros para distorção radial, sendo usualmente usados até k_2 ou k_3 ; $r = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$.

- Distorção tangencial: deslocamentos em uma direção normal às linhas radiais do centro da tela. Resultado de descentralizações das lentes e outros componentes ópticos.

$$\sigma_{x_{Dist}}(x_i, y_i) = p_1(3x_i^2 + y_i^2) + 2p_2 \cdot x_i \cdot y_i \quad (11a)$$

$$\sigma_{y_{Dist}}(x_i, y_i) = p_2(3y_i^2 + x_i^2) + 2p_1 \cdot x_i \cdot y_i \quad (11b)$$

No qual (p_1, p_2) são os parâmetros para a distorção tangencial.

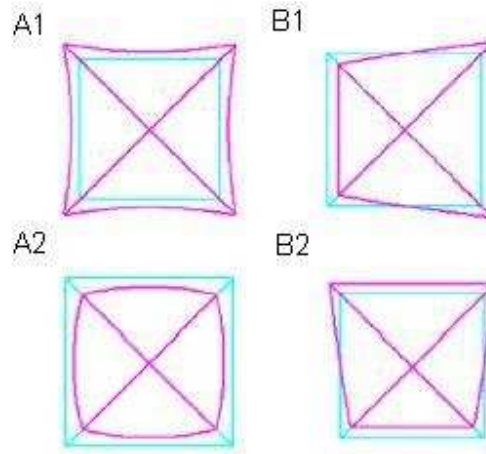


Figura 4: Efeitos das distorções radiais (A) e tangenciais (B). O quadrado azul é a imagem livre de distorção. As figuras em rosa mostram os efeitos quando $k_1 > 0$ (A1); $k_1 < 0$ (A2); $P_1 > 0$ e $P_2 = 0$ (B1); $P_1 = 0$ e $P_2 < 0$ (B2) (Wang et al., 2008).

Dentre as metodologias encontradas para a obtenção dos parâmetros de distorção das lentes, estão desde a utilização de equipamentos como goniômetros em conjunto com colimadores à utilização do posicionamento de estrelas (Clarke & Fryer, 1998). Brown (1971) desenvolveu uma técnica para a obtenção dos parâmetros de distorção baseando-se na idéia de que uma linha reta é uma projeção invariável, ou seja, sempre se mantém reta em projeções e perspectivas. Essa condição é violada se, e apenas se, houver distorções. Desvios de retidão na imagem podem ser relacionados diretamente com distorção radial e descentralização, e com isso, descreveu um modelo matemático para determinar os parâmetros de distorção das lentes baseados em imagens de linhas originalmente retas. Trata-se de um método não métrico (não é necessário saber o comprimento da linha no mundo real). Essa técnica foi utilizada em diversas

situações, em retas variando de tamanhos microscópicos a 10 quilômetros - uma estrada reta na Austrália, para a calibração local de câmeras aéreas (Fryer & Goodin apud Clarke & Fryer, 1998). As vantagens dessa técnica é que a fórmula é razoavelmente simples de se programar em um computador, e o método prático não precisa elaborar equipamentos de laboratório ou para o campo. É fácil de se obter um grande número de dados e portanto obter uma solução confiável para os parâmetros. Aproximadamente 30 a 50 pontos por linha, com 6 a 10 linhas horizontais e verticais visíveis são suficientes para uma boa obtenção dos parâmetros, porém bons resultados foram encontrados com duas linhas, quando se localizavam na fronteira da imagem onde as distorções estão mais presentes. Para tanto, deve-se considerar a equação de reta (em um plano $o'u'v'$) do tipo:

$$u' \sin \theta + v' \cos \theta = \rho$$

Na qual ρ denota a distância da linha à origem e θ o ângulo entre o eixo v' e a normal à reta passando pela origem. Portanto sendo u e v as coordenadas de um ponto em uma linha reta distorcida pelos efeitos das lentes, as coordenadas corrigidas podem ser expressas como:

$$u' = u + \bar{u}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \dots) + [p_1(r^2 + 2\bar{u}^2) + 2p_2 \bar{u}\bar{v}][1 + p_3 r^2 + \dots] \quad (12a)$$

$$v' = v + \bar{v}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \dots) + [p_2(r^2 + 2\bar{v}^2) + 2p_1 \bar{u}\bar{v}][1 + p_3 r^2 + \dots] \quad (12b)$$

Sendo:

$$\bar{u} = u - u_\rho$$

$$\bar{v} = v - v_\rho$$

$$r = \left[(u - u_\rho)^2 + (v - v_\rho)^2 \right]^{1/2}$$

Com u_ρ e v_ρ representando as coordenadas do ponto onde a normal toca a reta.

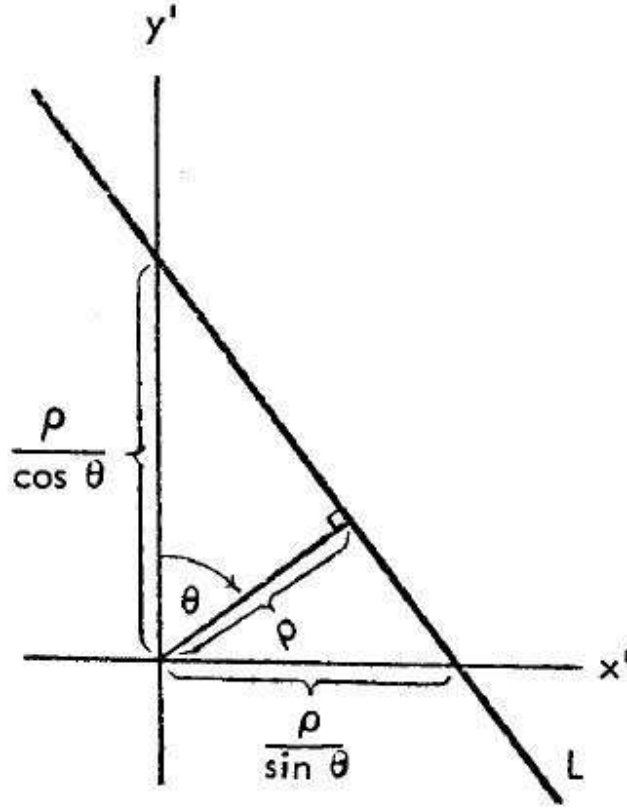


Figura 5: Equação de reta L utilizada no modelo plumb-line de Brown (1971).

A componente radial é a predominante nos efeitos da distorção, tanto que muitas metodologias de calibração das câmeras sequer utilizam os parâmetros de distorção tangencial (Zhang, 1999). Entretanto, a utilização dos dados acerca da distorção tangencial acarreta em resultados mais precisos para a calibração de câmeras (Wang et al., 2008).

Essa classificação leva em consideração a natureza das distorções, ou seja, como se dá o deslocamento da posição correta do ponto p_i para a posição p_d . O modelo mais aceito atualmente leva em consideração os fatores que acarretam na distorção, passando a denominar a distorção tangencial como descentralização e acrescentando mais um fator de distorção, em decorrência de imperfeições nas lentes durante o processo de fabricação. A essa nova componente foi dado o nome de prisma fino, cuja fórmula é:

$$\sigma x_{Prism}(x_i, y_i) = s_1(x_i^2 + y_i^2) \quad (13a)$$

$$\sigma y_{Prism}(x_i, y_i) = s_2(x_i^2 + y_i^2) \quad (13b)$$

Sendo (s_1, s_2) os coeficientes da distorção do tipo prisma fino.

Logo, podemos reescrever a fórmula (8) como:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma x(x_i, y_i) \\ \sigma y(x_i, y_i) \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma x_r(x_i, y_i) + \sigma x_d(x_i, y_i) + \sigma x_p(x_i, y_i) \\ \sigma y_r(x_i, y_i) + \sigma y_d(x_i, y_i) + \sigma y_p(x_i, y_i) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Nesse novo modelo, a distorção tangencial passa a ser chamada de descentralização, pois se considera que tanto a descentralização quanto o prisma fino possuem componentes tangenciais e radiais. Esses parâmetros são matematicamente independentes entre si, porém não o são fisicamente. Quando o eixo óptico de uma lente é descentralizado, a simetria da distorção radial é violada. Ou seja, a componente tangencial da distorção é na realidade a distorção da componente radial.

Assim, Wang et al. (2008) propõem um novo modelo para as distorções, dando um significado mais físico à questão e utilizando um menor número de parâmetros a serem calculados. Propõem a continuidade da utilização dos parâmetros de distorção radial, porém para os efeitos tangenciais, utiliza como parâmetros os ângulos θ e ψ , referentes às rotações do Plano de Imagem em torno dos eixos x_i e y_i , respectivamente. Esse modelo apresentou resultados tão satisfatórios quanto o modelo de distorções radial, descentralização e prisma fino. Porém, a menor quantidade de parâmetros pode não apenas simplificar o processo de calibração, como também reduzir a possibilidade de se encontrar um mínimo local. Além disso, o significado físico explícito desse modelo pode indicar a origem da distorção.

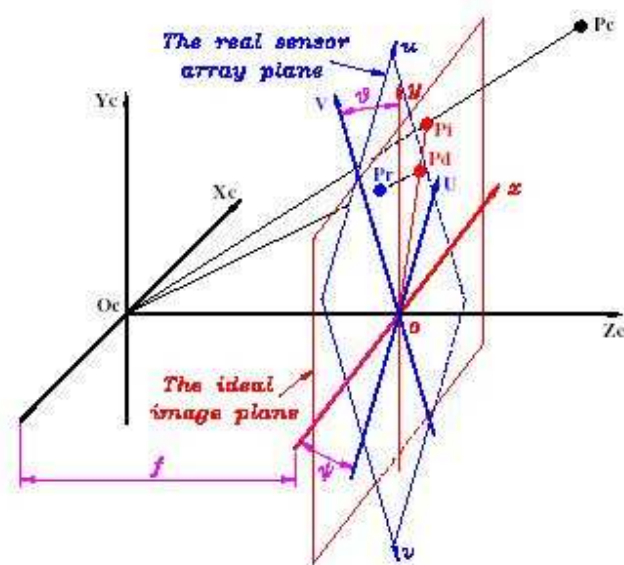


Figura 6: Representação analítica do deslocamento de um ponto contido no plano ideal para o plano real devido à distorção, segundo o modelo de Wang et al. (2008).

1.7 - Metodologia de calibração de câmeras proposto por Zhang (1999)

As metodologias de calibração de câmeras podem ser divididas em:

- **Tradicional:** associam pontos da imagem 2D com pontos 3D bem conhecidos no mundo, requerendo assim a aquisição de imagens de um objeto de calibração que consiste em dois ou três plano ortogonais entre si e cuja geometria 3D é perfeitamente conhecida. O DLT enquadra-se no método tradicional, e como já relatado, sua versão original não permite a obtenção dos parâmetros de distorção.
- **Autocalibração (self calibration):** ao movimentar a câmera em uma cena estática, associam, entre imagens sucessivas, características da cena ou do objeto a ser reconstruído, de tal forma que não requerem a utilização de objetos de calibração. Se as imagens forem obtidas pela mesma câmera com parâmetros intrínsecos fixos, correspondências entre três imagens são suficientes para se obter tanto os parâmetros extrínsecos quanto os intrínsecos, permitindo reconstruir a estrutura 3D por similaridade. Porém, como há muitos parâmetros para serem estimados, nem sempre é possível obter

resultados confiáveis (Zhang, 1999).

Zhang (1999) elaborou uma metodologia flexível de calibração de câmeras, que faz uso de um objeto de calibração com padrões coplanares, cuja estrutura geométrica é conhecida de forma bastante acurada. Esse objeto é filmado em pelo menos duas posições distintas, sem que se faça necessário o conhecimento a posição desse objeto. Através dela, são obtidos os parâmetros de distorção juntamente com os parâmetros extrínsecos (localização espacial do plano de calibração em relação à posição da câmera) e intrínsecos da câmera. Segundo o autor, essa metodologia relaciona-se tanto com a calibração tradicional quanto com a auto-calibração, porque usa informação métrica 2D ao invés de 3D ou puramente implícitas.

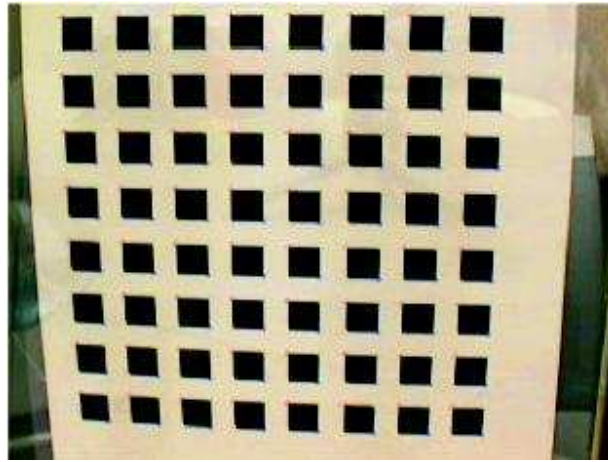


Figura 7: Objeto de calibração plano utilizado na metodologia proposta por Zhang (1999).

Considerando-se que os pontos 3D do padrão de calibração são coplanares, o mapeamento entre os pontos 3D e 2D simplificam-se, obtendo-se:

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = A_z \cdot [R | T] \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{Z=0} s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = A_z \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Onde s é um fator de escala arbitrário, pois nas equações de Zhang não foi relacionado o fator de

escala f/z_c durante a transformação do Sistema de Coordenadas da Câmera para o Sistema de Coordenadas do Plano de Imagem. Logo, nesse caso:

$$A_z = \begin{bmatrix} \alpha & c & x_0 \\ 0 & \beta & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Com α e β sendo os fatores de escala em x e y respectivamente, e c descrevendo a defasagem dos eixos. Trata-se, portanto, de uma transformação projetiva, ou homografia, entre o plano do objeto de calibração e o plano da imagem. Assim, as coordenadas bidimensionais em tela e as coordenadas tridimensionais dos pontos (cantos) estão relacionadas segundo:

$$s(x, y, 1) = H(X, Y, 1).$$

A partir da homografia H , são obtidos os parâmetros intrínsecos da matriz A_z e os parâmetros extrínsecos da matriz $[R|T]$. Através da determinação de uma solução analítica (*closed-form solution*), obtêm-se uma aproximação inicial desses parâmetros, seguida de um refinamento não linear baseado no critério de máxima verossimilhança (*maximum likelihood estimation*), solucionada com o algoritmo de Levenberg-Marquadt (Moré apud Zhang, 1999).

Em seguida, são determinados os valores de k_1 e k_2 para a distorção radial (seu método não inclui os parâmetros de distorção tangencial). Para tanto, considera-se as equações:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i + \sigma_{x_{Rad}}(x_i, y_i) \\ y_i + \sigma_{y_{Rad}}(x_i, y_i) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \alpha \cdot x_d + c \cdot y_d \\ y_0 + \beta \cdot y_d \end{bmatrix} \quad (17)$$

Com isso, tem-se duas equações para cada ponto:

$$\begin{bmatrix} x_t - x \\ y_t - y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x - x_0)(x_i^2 + y_i^2) & (x - x_0)(x_i^2 + y_i^2)^2 \\ (y - y_0)(x_i^2 + y_i^2) & (y - y_0)(x_i^2 + y_i^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow d = Dk \quad (18)$$

Dados n pontos e m imagens, constrói-se a matriz D com $2nm$ linhas. A solução linear com mínimos quadrados é dada por:

$$k = (D^T D)^{-1} D^T d \quad (19)$$

Por fim, ocorre a otimização não-linear de todos os parâmetros utilizados segundo o critério de máxima verossimilhança e através do algoritmo de Levenberg-Marquadt (Moré apud Zhang, 1998).

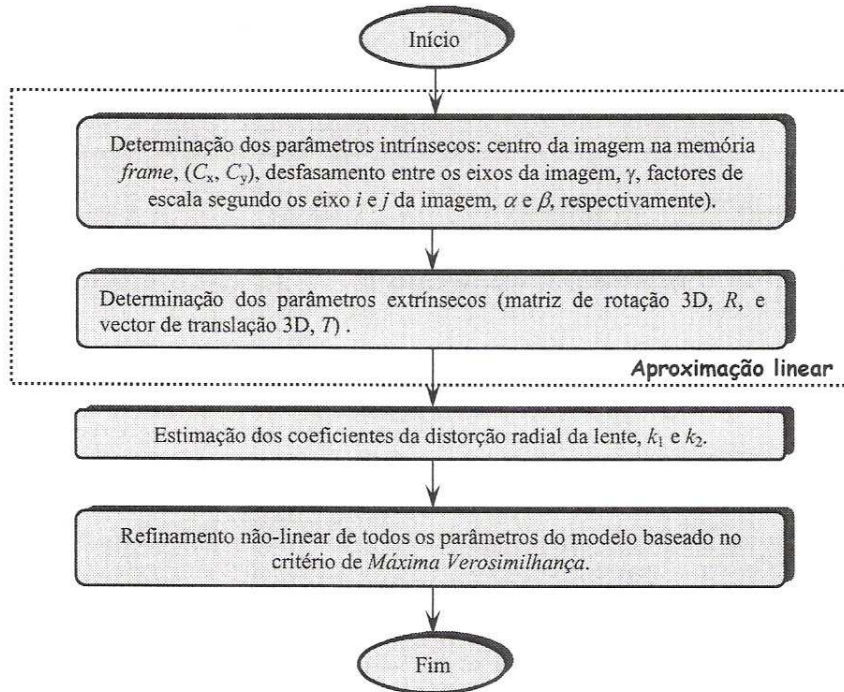


Figura 8: Fluxograma das etapas de calibração segundo o modelo proposto por Zhang (2000).

1.8 - Calibração não-linear de câmeras em ambiente MATLAB®

Bouguet (2002) desenvolveu um *Toolbox* (conjunto de funções interligadas para serem

rodadas em ambiente MATLAB[®] atuando como um programa específico) baseado no software de Zhang (1999) e nos estudos de outros autores para obtenção dos parâmetros intrínsecos e de distorção óptica. Sua estrutura plana difere-se da de Zhang (1999) por ser um tabuleiro de xadrez (*chess*), no qual também os cantos de cada quadrado correspondem aos pontos a serem analisados.



Figura 9: Toolbox desenvolvido para rodar em ambiente MATLAB[®] para correção de distorções (Bouguet, 2002).

A primeira etapa é a extração dos cantos dos quadrados para cada imagem do *chess*. Essa extração é semi-automática, ou seja, delimitam-se as fronteiras do tabuleiro, e a partir disso o programa encontra todos os cantos. Esses dados passam a ser armazenados no arquivo *calib_data.mat*.

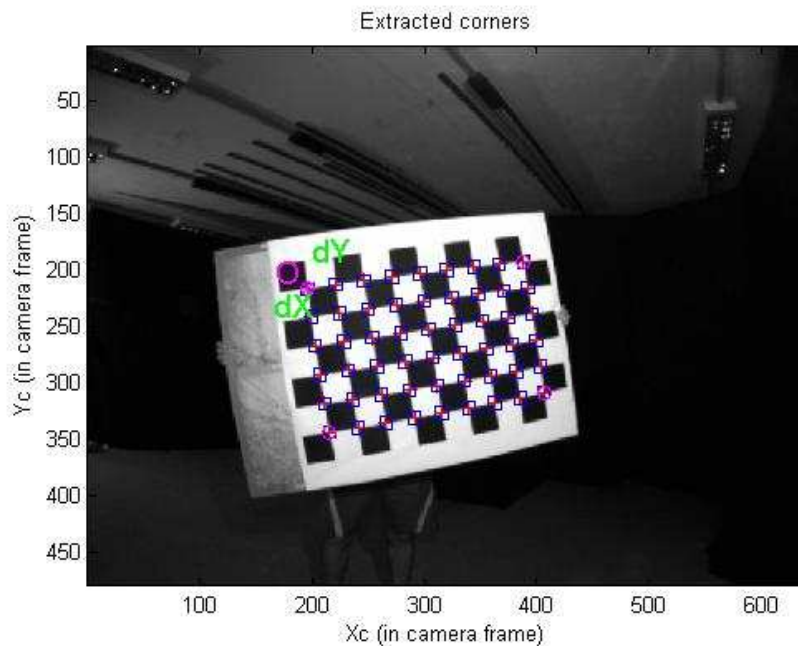


Figura 10: Exemplo de estrutura plana e seus cantos extraídos automaticamente pelo *Toolbox*

A próxima etapa é a obtenção dos parâmetros desejados. Metodologicamente, difere-se de Zhang (1999) pela quantidade de parâmetros de distorção calculados (seu programa permite que sejam obtidos também os parâmetros p_1 e p_2 de distorção tangencial, além de k_3 , caso seja necessário) e pela conformação da matriz intrínseca da câmera, cujos parâmetros intrínsecos se apresentam equivalentes aos apresentados no estudo de Heikkilä & Silvén (1997).

$\begin{bmatrix} f \cdot s_x & f \cdot \tau & x_0 \\ 0 & f \cdot s_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} fc_1 & fc_1 \cdot \alpha_c & cc_1 \\ 0 & fc_2 & cc_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} f \cdot D_u \cdot s_u & 0 & u_0 \\ 0 & f \cdot D_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Notação do presente trabalho	Notação de Bouguet (2002)	Notação de Heikkilä & Silvén (1997)

Figura 11: Matrizes intrínsecas da câmera segundo a notação de cada autor

Todas as matrizes apresentam o valor da distância focal internamente, ao contrário da matriz de Zhang (1999). Essa configuração, segundo o autor, se faz necessária dada impossibilidade de se separar a distância focal dos fatores de escala e defasagem dos eixos durante o cálculo dos parâmetros intrínsecos. Heikkilä & Silvén (1997) consideram o parâmetro τ como sendo igual a 0 (consideram que não há defasagem entre os eixos) e dão a conotação *ouv* ao SCPT. Ao final dessa etapa, todos esses parâmetros e a matriz intrínseca da câmera segundo a notação de Bouguet (2002) são armazenados no arquivo *Calib_Results.mat*. Dentro desse arquivo, a matriz é armazenada na variável matricial *KK*, e os parâmetros de distorção são armazenados na variável vetorial *kc*, na qual kc_1 , kc_2 e kc_5 são os parâmetros de distorção radial k_1 , k_2 e k_3 ; kc_3 e kc_4 são os parâmetros de distorção tangencial p_1 e p_2 .

O *Toolbox* é bastante simples de ser utilizado e além da obtenção de todos esses parâmetros (intrínsecos/distorção), possui uma série de ferramentas, como visualização de erros, correção de imagens, visualização de parâmetros extrínsecos (posição da câmera em relação à estrutura plana), entre outros (maiores detalhes entrar em www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/ref.html). Entretanto, em sua versão original, processa apenas um conjunto de imagens (em formato *.bpm*, *.jpeg*, *.tif*, entre outros) do *chess*. Foi feita uma adaptação desse *Toolbox* no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica (LIB-FEF) para que se pudesse processar o vídeo do *chess* se deslocando ao longo do volume de análise de movimento (em formato *.avi*). A adaptação também possibilitou a aquisição automática de todos os cantos em cada um dos quadros do vídeo.

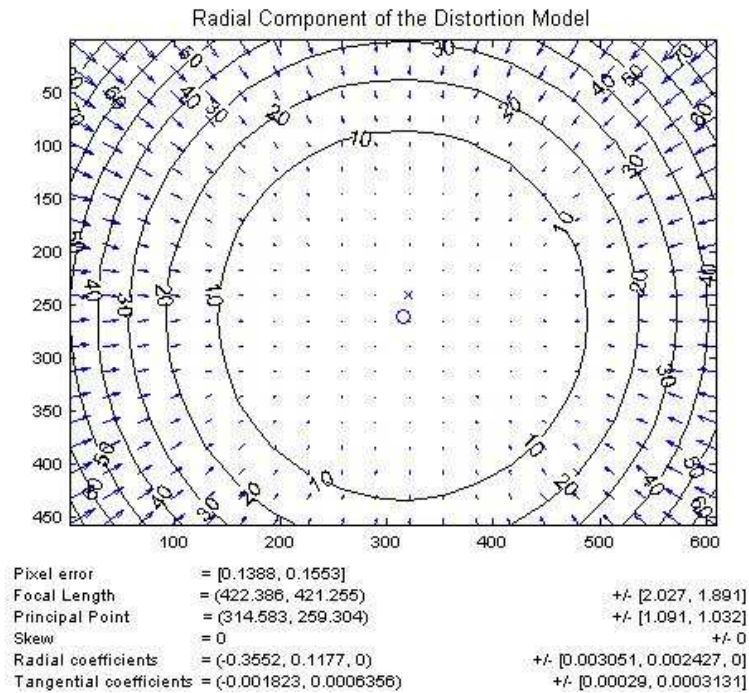


Figura 12: Exemplo de campo vetorial elaborado pelo *Toolbox* representando os deslocamentos na imagem devido à distorção radial

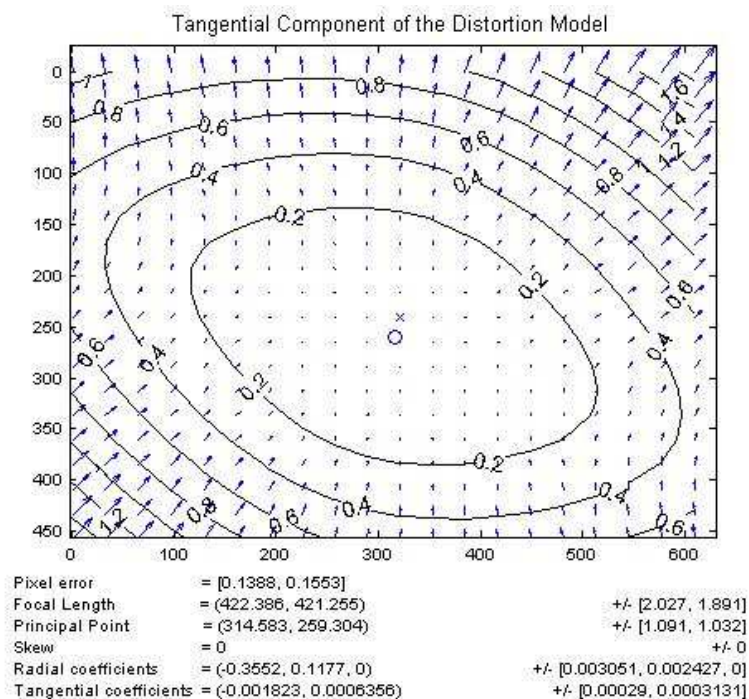


Figura 13: Exemplo de campo vetorial elaborado pelo *Toolbox* representando os deslocamentos na imagem devido à distorção tangencial.

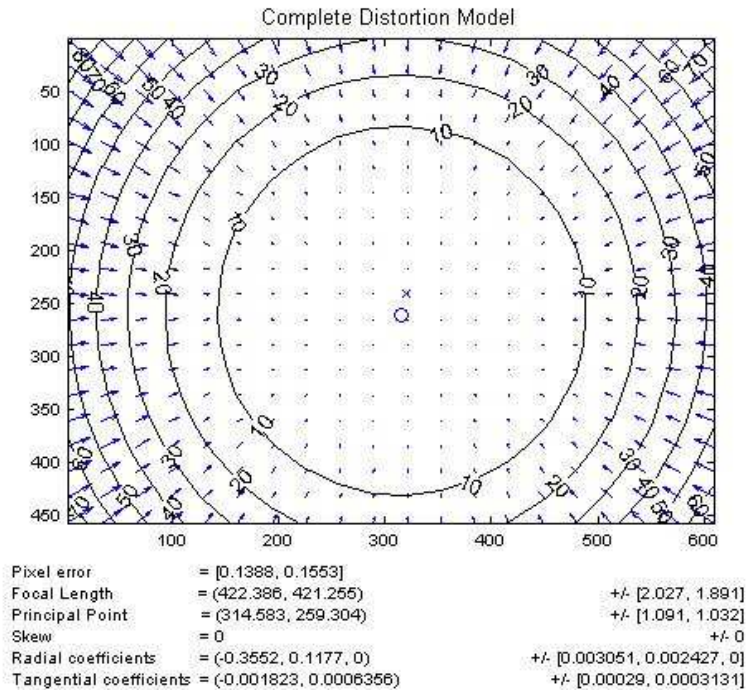


Figura 14: Exemplo de campo vetorial elaborado pelo *Toolbox* representando os deslocamentos na imagem devido ao efeito combinado das distorções radial e tangencial

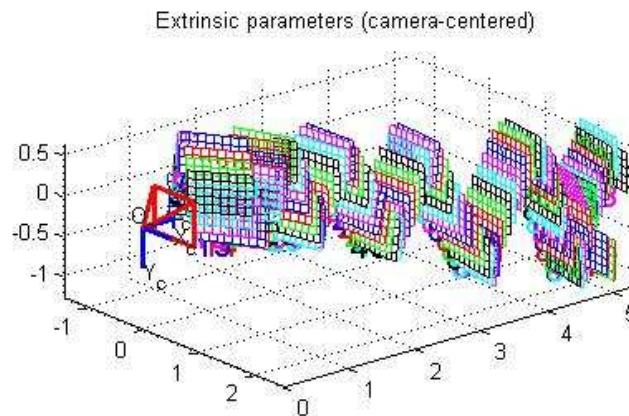


Figura 15: Exemplo de posicionamento das estruturas planas em cada frame analisado em relação à câmera (localizada na origem do Sistema de Coordenadas Global), obtido pelo *Toolbox*.

1.9 - Utilização dos parâmetros intrínsecos e de distorção no DLT

Uma vez obtidos os parâmetros intrínsecos e de distorção de cada câmera, esses dados podem ser incorporados à metodologia DLT, como forma de se aumentar a acurácia da reconstrução tridimensional. Ao se desprezar os efeitos dos erros randômicos, sabe-se que um ponto P do espaço tem suas coordenadas medidas desviadas do ponto (x, y) para o ponto (x_t, y_t) por conta dos efeitos da distorção, que no SCPI desviam o ponto (x_i, y_i) para a posição (x_d, y_d) . Sendo assim, um possível caminho para a correção da distorção é partir das coordenadas medidas (x_t, y_t) , para se obter as coordenadas (x_i, y_i) . Esse processo é chamado de normalização. Com isso, ao se fazer a multiplicação da matriz que contém os valores (x_i, y_i) pela matriz intrínseca da câmera, obtém-se (x, y) (eq. (4)).

Heikkilä & Silvén (1997) apresentam um conjunto de equações para cada ponto digitalizado:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \frac{1}{G} \begin{bmatrix} \bar{x} + \bar{x}(a_1 r_i^2 + a_2 r_i^4) + 2a_3 \bar{x}\bar{y} + a_4(r_i^2 + 2\bar{x}^2) \\ \bar{y} + \bar{y}(a_1 r_i^2 + a_2 r_i^4) + 2a_4 \bar{x}\bar{y} + a_3(r_i^2 + 2\bar{y}^2) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$G = (a_5 r_i^2 + a_6 \bar{x} + a_7 \bar{y} + a_8) r_i^2 + 1$$

$$\bar{x} = (x_t - x_0/s_x), \quad \bar{y} = (y_t - y_0/s_y), \quad r_i = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}, \quad (a_1, \dots, a_4) = (k_1, k_2, p_1, p_2)$$

Os parâmetros $(a_1, \dots, a_8)$ são obtidos através do método de mínimos quadrados, quanto maior o número de pontos, mais acurados são os resultados. Uma ressalva quanto a essa técnica é com relação à utilização dos fatores de escala s_x e s_y , visto que esses valores são calculados juntamente com a distância focal (Bouguet, 2002).

Outra possibilidade é, em uma primeira etapa, obter os valores de (x_d, y_d) a partir de (x_t, y_t) . Essa etapa é realizada através de um mapeamento inverso, ou seja:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f \cdot s_x)^{-1} & -\tau \cdot (f \cdot s_x \cdot s_y)^{-1} & (f \cdot s_x)^{-1}[(\tau \cdot y_0 \cdot s_y^{-1}) - x_0] \\ 0 & (f \cdot s_y)^{-1} & -y_0 \cdot (f \cdot s_y)^{-1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

A segunda etapa é a obtenção de (x_i, y_i) a partir de (x_d, y_d) e dos parâmetros de distorção calculados. Porém, quando as componentes radial e tangencial são consideradas, não há uma solução analítica para o mapeamento inverso, pois a equação que relaciona (x_i, y_i) e (x_d, y_d) é um polinômio de 5ª ordem. Uma alternativa então é uma aproximação para o mapeamento inverso. Existem poucas soluções para o problema de se adquirir as coordenadas do plano de imagem sem distorção a partir das coordenadas sob o efeito da distorção, embora o problema seja evidente em várias aplicações. Melen (apud Heikkilä & Silvén, 1997) usou uma aproximação iterativa para estimar as coordenadas sem distorção da imagem. Ele propôs o seguinte processo duplo de interação:

$$p_i = p_d - \sigma(p_d - \sigma(p_d)) \quad (22)$$

Onde a função $\sigma(p)$ representa a distorção do ponto p . Nos testes de Heikkilä & Silvén (1997) este método de um erro máximo residual de 0,1 pixel para parâmetros típicos de distorção de lentes. Deve ser o suficiente para algumas aplicações, mas se uma acurácia maior é necessária, então mais interações devem ser realizadas. O *Toolbox* de Bouguet (2002) contém uma função chamada *comp_distortion_oulu.m*, que realiza esse processo de interação vinte vezes.

1.10 - Análise tridimensional de movimentos na natação através do DLT

Até então, foram discutidos os efeitos das distorções pelo uso de lentes, sua influência no DLT e uma proposta de correção desses efeitos. Será levantada agora a questão das análises tridimensionais subaquáticas através do DLT, pois como discutido inicialmente, a maioria das análises subaquáticas da natação é realizada através da metodologia de DLT. Deve-se levar em consideração, além dos efeitos de distorção das lentes (uma vez que as câmeras utilizadas nesses procedimentos são as mesmas), o fato de que a água é um terceiro meio óptico com diferente índice de refração, exercendo influência significativa nas distorções das imagens, como será

verificado a seguir.

Cappaert et al. (1995) filmaram 12 nadadores da prova de 100m livres nos Jogos Olímpicos de Barcelona 1992, com o objetivo de descobrir as características biomecânicas de nadadores de elite e sub-elite (classificação baseada na velocidade que esses nadadores atingiram). Utilizaram duas câmeras subaquáticas (em caixas estanques) e duas acima do nível d'água para filmar um ciclo de nado, na altura dos 40 metros. Foi verificado que os nadadores de elite aplicavam menos força com as mãos, porém com maior eficiência, além de uma posição corporal mais favorável à minimização da ação de forças resistivas.

Payton & Bartlett (1995) quantificaram o erro de medição em forças propulsivas, calculadas através de dados cinemáticos obtidos pelo método proposto por Schleihau (apud Payton & Bartlett, 1995). Foram usadas duas câmeras dentro de caixas estanques, com frequência de aquisição de 50 Hz. Verificaram que erros de medição tanto da velocidade da mão quanto dos ângulos de varredura e apoio da mão podem produzir um erro de cálculo das forças hidrodinâmicas atuantes da ordem de 26%.

Ainda com relação ao método proposto por Schleihau (apud Lauder et al., 2001) Lauder et al. (2001) procurou estabelecer a acurácia e a confiabilidade dos procedimentos usuais e o seu procedimento proposto para a reconstrução da velocidade e dos ângulos de varredura e apoio da mão em análises subaquáticas tridimensionais com câmeras de vídeo, a partir de diferentes referenciais anatômicos na mão e no antebraço. Foram usadas duas câmeras com frequência de 25 Hz, uma dentro de uma caixa estanque e outra atrás de uma janela na parede da piscina. O uso de quatro referenciais anatômicos na reconstrução da orientação da mão mostrou ser menos sensível a erros no procedimento de medição. O método proposto neste estudo reduziu também a sensibilidade aos erros durante a medição. Usando a mesma configuração de câmeras e posicionamento, Lauder & Dabnichki (2005) investigaram a validade da estimação da força hidrodinâmica a partir da velocidade e dos ângulos da mão obtidos no estudo anterior, comparando o valor da força encontrado indiretamente com o encontrado diretamente em um braço mecânico. O estudo mostrou que há diferenças significativas entre os valores das forças hidrodinâmicas obtidas em ambas as situações, sugerindo que o método de Schleihau (apud Lauder & Dabnichki, 2005) não reflete de forma acurada a força gerada pelo movimento dos braços, que a contribuição da mão para gerar as forças propulsivas tenha sido superestimada e que os mecanismos de propulsão na natação devem ser melhor avaliados.

Yanai et al. (2000) e Yanai & Hay (2000) desenvolveram um método não invasivo para identificar instantes nos quais existe o impacto do úmero com as porções sub-acromiais do ombro no nado de crawl, a partir do qual se determinou a influência de fatores como velocidade de nado, uso de palmares e padrão de respiração no surgimento desses impactos. Foram feitas medições de referenciais anatômicos em imagens obtidas dentro e fora d'água de nadadores realizando o nado crawl, através de duas câmeras em sistemas de periscópios. Descobriu-se que o impacto ocorre em cerca de 24% do tempo total de cada ciclo de braçada, independentemente da velocidade de nado ou do uso de palmares, e que a técnica de nado é o que torna o nadador mais suscetível a desenvolver esse tipo de problema, e não diferenças anatômicas. Os nadadores com maiores riscos de sofrer com essa síndrome de impacto são aqueles que realizam movimentos com grande quantidade de rotação interna do ombro durante a fase de propulsão (relativa ao posicionamento alto do cotovelo no início da propulsão), início tardio de rotação externa do ombro durante a fase de recuperação e pequenos ângulos de báscula lateral da escápula e flexão lateral do tronco.

Yanai, em três estudos publicados em anos distintos (Yanai, 2001; Yanai, 2003; Yanai, 2004) buscou descrever a cinemática do giro de corpo no nado crawl e o quanto esse movimento seria influenciado pelas forças externas (peso e empuxo) ou pelas acelerações dos membros superiores e inferiores. As performances de 11 nadadores competitivos foram gravadas com duas câmeras adaptadas a sistemas de periscópios. Seus movimentos foram digitalizados e reconstruídos ao longo de uma distância de aproximadamente 8 metros. Os estudos mostraram que os ângulos de rotação das cinturas pélvica e escapular variam de forma sincronizada com a frequência de braçada, mas suas amplitudes diferem entre si, mostrando que o giro de corpo consiste no giro de todo o tronco e também na torção do tronco. As forças externas contribuem para a aceleração do giro de corpo, enquanto que as acelerações dos membros contribuem principalmente para desacelerar o giro. É possível também prever a amplitude do giro de corpo a partir da frequência de braçada, sendo que a amplitude de giro diminuía e a torção do tronco aumentava com o aumento na frequência de braçada. Em Yanai (2004) verificou-se o máximo valor do torque exercido pelo empuxo, além da constatação de que nadadores de alto nível utilizam o empuxo com maior eficiência para a realização do giro de corpo.

Ainda em relação ao giro de corpo em nadadores de nado crawl, Psycharakis et al. (2007) buscaram determinar a magnitude do rolamento dos ombros e dos quadris no nado de crawl e se havia alguma diferença significativa entre esses parâmetros, além de examinar o quanto estas

variáveis estão relacionadas com a velocidade do nado. Foi filmado um ciclo de nado em máxima velocidade e sem respiração de 6 nadadores de nível nacional e internacional, através de 6 câmeras de vídeo (2 acima e 4 embaixo d'água). O estudo mostrou que a magnitude do rolamento da cintura escapular é significativamente maior que o da cintura pélvica. As mais altas velocidades de nado se relacionam com menores amplitudes de giro dos ombros, porém não foram encontradas correlações entre o giro dos quadris com a velocidade.

Por sua vez, Vezos et al. (2007) investigaram os efeitos da respiração na cinemática subaquática da braçada de crawl em nadadoras. Os movimentos subaquáticos do braço direito de dez nadadoras, ao longo de um ciclo de movimento e em situações de respiração e sem respiração, foram filmados com duas câmeras com frequência de aquisição de 60 HZ e posicionadas atrás de janelas na parede da piscina. Os resultados mostraram que a respiração aumenta significativamente o tempo de execução da braçada, o deslocamento da mão para trás na fase final da propulsão e para o lado durante a varredura para baixo, mostrando que os movimentos para a realização da respiração alteram significativamente o padrão de movimento submerso da mão.

Psycharakis & Sanders (2008) buscaram determinar se o padrão cinemático do quadril representa de forma acurada o movimento do centro de massa durante um ciclo de nado, quantificando as diferenças entre as velocidades instantâneas do referencial do quadril e do centro de massa, a amplitude de variação intra-cíclica das velocidades, a magnitude e o instante em que se manifestaram as velocidades máxima e mínima de cada referencial. Os resultados mostram que há grandes diferenças entre todas as variáveis. O uso de um ponto referencial do quadril superestima a velocidade máxima e subestima a amplitude de variação e a velocidade mínima do centro de massa, mostrando que seu comportamento cinemático não deve ser usado como um indicador do movimento intra-cíclico do centro de massa.

Suito et al. (2008) investigou os efeitos da fadiga nos movimentos subaquáticos da braçada numa prova de 100m crawl através dos movimentos angulares e das contribuições relativas dos segmentos dos braços. Duas câmeras contidas dentro de caixas estanques, com frequência de aquisição de 60 Hz foram utilizadas. Foram realizadas as reconstruções tridimensionais do movimento dos braços de 8 nadadores de nível competitivo a partir de referenciais anatômicos na mão, cotovelo e ombros, em dois ciclos de movimento que ocorreram na altura dos 15 e dos 65 metros. A partir dessas reconstruções foram obtidos os valores da

velocidade da mão, a velocidade angular do braço e sua respectiva contribuição na velocidade da mão. Encontraram uma queda significativa na velocidade da mão e na máxima velocidade de adução do ombro no segundo ciclo em relação ao primeiro. Com o efeito da fadiga, no segundo ciclo a contribuição da adução do ombro na velocidade da mão tende a diminuir, enquanto que a contribuição da rotação interna tende a aumentar.

1.11 - Efeitos das distorções em análises subaquáticas

Visto que a água representa um problema para a integridade das câmeras utilizadas nas pesquisas, já que a maioria delas não pode ser diretamente submersa, alguns procedimentos para aquisição de imagens subaquáticas precisaram ser desenvolvidos. Nas pesquisas aqui referenciadas, as três formas principais de aquisição são: (i) câmeras contidas em caixas estanques (Sanders et al., 1995; Cappaert et al., 1995; Payton & Bartlett, 1995; Lauder et al., 2001; Lauder & Dabnichki, 2005; Psycharakis et al., 2005; Psycharakis et al., 2007; Psycharakis et al., 2008; Suito et al. 2008); (ii) sistemas de periscópios (Hay & Gerot, 1991; Yanai, 1996; Yanai et al., 2000; Yanai & Hay, 2000; Yanai, 2002; Yanai, 2004; Gourgoulis et al., 2008); e (iii) câmeras posicionadas atrás de janelas nas paredes da piscina (Lauder et al., 2001; Lauder & Dabnichki, 2005; Vezos et al., 2007).

A água é também mais um meio óptico com características distintas daquelas encontradas no ar e no material das lentes. Isso torna a questão da distorção ainda mais crítica em reconstruções de movimento embaixo d'água. Em cada uma das três metodologias de aquisição de imagens subaquáticas apresentadas, a relação entre os três meios ópticos é relativamente complexa. Num sistema de periscópio simples, por exemplo, os meios atravessados pela luz são água/espelho/água/ar/espelho/ar/lente/ar (esse último par repete-se quantas vezes for a quantidade de lentes da câmera), até a incidência no CCD. Há também a questão do não paralelismo entre os vários planos de incidência (cada um relativo a um par de meios ópticos) atravessados por um mesmo feixe de luz, tornando ainda mais difícil se estabelecer relações trigonométricas entre os desvios sofridos por esses feixes, a fim de se minimizar os efeitos da distorção matematicamente. É de se esperar, portanto, uma maior complexidade dos efeitos da refração nos erros da reconstrução tridimensional.

Desconsiderando os efeitos de distorção das imagens por conta das lentes, as análises

tridimensionais subaquáticos estão sujeitas a erros de mensuração, independentemente do tipo de equipamento utilizado (Kwon, 1999), e com isso alguns artigos foram publicados como forma de compreender e minimizar esses efeitos.

Kwon (1999) investigou os efeitos de cinco fatores experimentais na magnitude de deformação de um objeto plano submerso, reconstruído através da 2D-DLT (Walton apud Kwon, 1999), devido à refração. São eles: distância entre interface (água e ar) e câmera, distância entre a interface e o objeto, distância entre objeto e eixo principal (reta perpendicular ao plano da interface passando pela câmera), ângulo da câmera (eixo óptico em relação ao eixo principal) e ângulo do objeto (reta perpendicular no centro do objeto plano em relação ao eixo óptico). Entre as principais conclusões, destaca que os principais fatores que afetam a magnitude de deformação da imagem são os dois primeiros: quanto mais próxima a interface estiver da câmera e/ou do objeto, maior a deformação. Pouca relevância tiveram os demais fatores. Sugere, portanto, que as caixas estanques, apesar de maior flexibilidade em termos de posicionamento, devem apresentar os maiores erros, exatamente por terem menores distâncias da câmera e do objeto para a interface; e que uma maior distância do objeto para a interface pode compensar os efeitos da proximidade entre a câmera e a interface (mas os efeitos combinados desses dois fatores não foram estudados). Atesta também que é possível diminuir os efeitos da distorção que ocorrem nas fronteiras do objeto de controle redistribuindo os pontos de controle para mais próximos das fronteiras, pois embora o erro médio quadrático (RMS) erro de reconstrução aumente, o erro máximo de reconstrução diminui.

Partindo para uma análise da acurácia na reconstrução de um volume submerso, Psycharakis et al. (2005) testou a acurácia de um objeto de calibração com 4,5m de comprimento, 1,5m de altura e 1m de largura. O objeto possui 92 marcadores, com todas as suas coordenadas conhecidas, sendo metade localizada dentro e a outra metade fora d'água (apenas a porção submersa foi analisada na presente pesquisa). Foram utilizadas 4 câmeras para a filmagem subaquática, contidas em caixas estanque. Utilizou 10 desses pontos localizados embaixo d'água para como pontos de validação, sendo que para a calibração usou 5 grupos de pontos de controle, contendo 10, 15, 20, 25 e 30 pontos, respectivamente (não coincidentes com os 10 PV). Concluiu que a utilização de 20 PC aumentava a acurácia das medições, com erros relativamente menores que os encontrados na literatura para um volume de dimensões próximas (Coleman & Rankin apud Psycharakis et al., 2005) e outro menor, de $1,1\text{m}^3$ (Payton apud Psycharakis et al., 2005).

Além disso, verificou a influência das lentes utilizadas nas caixas estanques, concluindo que o aumento dos erros não era significativo.

Gourgoulis et al. (2008) testaram a acurácia em dois objetos de calibração: o primeiro um paralelepípedo com 1m x 3m x 1m (eixos X, Y e Z, respectivamente) e o segundo um cubo de aresta 1m. Foram filmados primeiramente fora e depois submersos em água, com dois sistemas de câmeras com periscópios. Ambos possuem 32 pontos de controle, sendo que 8 deles foram usados como pontos de validação para o teste de acurácia estática, obtendo-se os valores do RMS total e de cada uma das três coordenadas desses pontos. Os demais foram utilizados como pontos de calibração. Foi também realizado um teste dinâmico dentro e fora d'água, que consistiu na movimentação de um eixo de 30cm de comprimento internamente aos volumes, para a obtenção da porcentagem do RMS do comprimento do eixo medido em cada quadro em relação ao comprimento obtido em laboratório com instrumentação de alta precisão. Ao comparar os resultados obtidos com ambos os calibradores dentro e fora d'água, verificaram que na água geralmente o erro é maior. Os erros do teste dinâmico foram menores com o calibrador menor, uma vez que ambos os calibradores ocupavam totalmente as dimensões da tela (maior resolução das três direções do menor calibrador em relação ao maior, além de tornar a imagem do objeto em movimento maior). Mencionam também a possibilidade de diferentes versões do algoritmo DLT terem diferentes propriedades em análises 3D em ar e água. Verificaram que as deformações da imagem ocorrem de forma mais acentuada na borda do calibrador por conta da distorção não linear, como preconiza Kwon & Lindley (apud Gourgoulis et al., 2008). Quando o eixo se movia no meio do volume, o erro de reconstrução era menor. Com relação ao teste estático, mencionam Chen et al. (1994) para explicar que no eixo longitudinal (maior dimensão) o RMS foi maior devido ao posicionamento das câmeras, pois quando o ângulo entre ambas é pequeno (no caso, 41°), a resolução desse eixo no plano da imagem é relativamente menor que a dos outros eixos. Os erros de reconstrução no teste dinâmico mostraram-se pequenos em comparação com o estático. Considerando o fato dos pontos de validação se encontrarem no limite do volume do teste estático, onde os erros decorrentes de refração são maiores quando o mesmo ocupa o máximo tamanho em tela (Kwon, 1999; Chen et al., 1994, Challis & Kerwin, 1992; Wood & Marshall, 1986) atesta que provavelmente os menores erros no teste dinâmico devem-se à movimentação mais interna do eixo no volume.

Tanto Psycharakis et al. (2005) quanto Gourgoulis et al. (2008) levaram em consideração

a questão da distância entre objeto de calibração e a interface água/lente para o posicionamento de suas câmeras, visto que ambos se valeram de uma distância mínima de 12m das câmeras para o centro do objeto. Em sua pesquisa para estabelecer a acurácia dos procedimentos usuais e um novo proposto pelo autor para a reconstrução da velocidade da mão, ângulo de varredura (*sweepback angle*) e ângulo de apoio (*pitch angle*) através do DLT, Lauder et al. (2001) utilizaram um objeto de calibração com 16 pontos de controle e 1m x 0,5m x 0,8m (0,4 m³) de dimensão, dentro do qual um braço mecânico com dimensões próximas a de um braço humano realizou movimentos de rotação de ombro. Foram utilizadas 2 câmeras, uma dentro de uma caixa estanque (distante 3,8m do braço) e outra atrás de uma janela na parede da piscina (a janela se encontrava a 1,25m da câmera e 1,8m do braço), encontrando erros absolutos médios de reconstrução do comprimento das dimensões X, Y e Z do objeto de calibração de 0,15%, 0,4% e 0,11% (1,5mm, 2,0mm e 0,9mm), respectivamente. Apesar de relativamente menores as distâncias das câmeras para o objeto, os resultados aparentam ser compatíveis com os dados das pesquisas anteriormente citadas. Uma provável explicação seria a relação entre a dimensão do volume analisado e a distância a ele dado. Nas três pesquisas aqui citadas, a razão entre a maior dimensão do volume e a distância variou entre 1:3 e 1:4.

Silvatti (2009) realizou testes estáticos e dinâmicos de acurácia para um sistema de análise cinemática tridimensional (DvideoSub) com o objetivo de avaliar os movimentos do tronco durante a respiração de nadadores dentro e fora d'água. O teste estático consistiu na reconstrução tridimensional de pontos do próprio objeto de calibração, e o teste dinâmico consistiu na reconstrução das dimensões de um objeto rígido em forma de cruz contendo 4 pontos de validação, que se deslocou dentro do volume determinado pelo objeto de calibração. Utilizou-se 5 câmeras, as quais foram inseridas em caixas estanques nos movimentos subaquáticos. Para a calibração, foram utilizados dois objetos distintos. O primeiro, denominado sistema fixo, possuía dimensões de 2,7m de comprimento, 2,7m de altura e 0,9m de largura, contendo 162 PC dispostos em 6 prumos presos ao teto do Laboratório de Instrumentação para Biomecânica da Faculdade de Educação Física (LIB-FEF) da Unicamp (logo, esse objeto foi utilizado apenas para as reconstruções fora d'água). O segundo, denominado sistema móvel, tinha como dimensões 2,6m de comprimento, 0,5m de largura e 0,9m de altura, contendo 24 pontos de calibração esféricos de 25mm de diâmetros e foi utilizado na reconstrução dos movimentos dentro e fora d'água. Foi testada também a eficácia de uma ferramenta elaborada em ambiente MATLAB®

para a correção dos efeitos das distorções ópticas a partir dos parâmetros de distorção (radial, descentralização e prisma fino), obtidos a partir das coordenadas reais e em tela dos objetos de calibração. Quando o sistema fixo de calibração foi utilizado, houve uma melhora significativa na acurácia para a reconstrução das dimensões do objeto rígido e de pontos contidos no próprio sistema fixo, quando os efeitos das distorções foram minimizados a partir dos parâmetros de distorção. Entretanto, com a utilização do sistema móvel, tanto dentro quanto fora d'água não houve melhora significativa na acurácia das reconstruções nos testes estáticos e dinâmicos com o uso dessa ferramenta, atribuindo-se isso a pequena quantidade de pontos de controle utilizados no objeto de calibração. Os resultados obtidos em comparação com outros dados na literatura demonstram a confiabilidade do sistema DvideoSub para as análises do movimento humano embaixo d'água propostas.

Yanai et al. (1996), ciente da importância de se estudar a cinemática dos movimentos da natação em duplo meio e em um grande volume, porém sem perder a qualidade de aquisição das imagens do atleta, propôs um método que utiliza periscópios capazes de girar em movimento panorâmico para filmar toda a extensão do volume, mantendo-se assim a imagem do nadador relativamente grande na tela. Foram utilizados dois periscópios, cada um com uma câmera. A distribuição interna dos espelhos faz com que a câmera capture, na parte superior da tela, os movimentos no meio aéreo e, na parte inferior da tela, os movimentos subaquáticos. Um sub-volume de 1,3m x 1,0m x 2,0m foi posicionado em 7 localizações adjacentes para a formação de um volume maior (8,4m de extensão), enquanto era feito o movimento panorâmico dos periscópios. Contava também com um sistema referencial externo, para que se pudesse determinar o posicionamento da câmera. Foi realizado um teste estático, com a reconstrução de pontos de validação escolhidos aleatoriamente em cada sub-volume. Um eixo de 2,5m de comprimento contendo faixas intercaladas pretas e brancas (cada uma com 0.5m de largura) foi utilizada no teste dinâmico, deslocando-se metade dentro e metade fora d'água. As distâncias entre as fronteiras das faixas foram determinadas. A metodologia se mostra questionável em alguns aspectos, como por exemplo, a utilização de uma mesma câmera para capturar as fases aéreas e aquáticas do nadador (acarretando problemas de diferença de intensidade luminosa). Com relação à calibração, era utilizado um sub-volume de cada vez, responsável por um determinado trecho do deslocamento do nadador (foram obtidas 8 equações de DLT para cada sub-volume, cada uma para uma determinada posição da câmera dentro da área de varredura,

relacionadas entre si através de *cubic spline*). Embora essa metodologia considera que o nadador sempre será filmado o mais centralizado possível na tela, há determinados instantes em que marcadores superficiais do sujeito extrapolam a dimensão desse sub-volume. De acordo com o autor, os resultados do teste dinâmico mostraram que essa extrapolação não parece ter efeitos negativos na acurácia da reconstrução do eixo. Segundo Kwon (1999) a questão da descontinuidade (quando passa-se a usar outro sub-volume como objeto de calibração) foi negligenciada, e merece maior aprofundamento. Todas as pesquisas realizadas pelo autor e colaboradores (Yanai & Hay, 2000; Yanai et al., 2000; Yanai, 2001; Yanai, 2003; Yanai, 2004) se valeram desta metodologia, e foram as únicas referências encontradas que estudaram o movimento da natação além de um único ciclo de movimento, porém a acurácia de sua metodologia foi mais baixa que as demais. Yanai (2003) revela que os periscópios se posicionaram aproximadamente 20m distantes do volume no qual o nadador se deslocou, considerando mínimos os efeitos da distorção.

Através dos referenciais teóricos aqui citados, percebe-se que os mesmos cuidados preconizados na literatura para um aumento na precisão de reconstrução tridimensional em meio aéreo através do DLT foram tomados para as análises em meio aquático. Isso porque embora essas distorções sejam potencializadas embaixo d'água, suas características mantêm-se iguais àquelas verificadas em distorções devido às lentes. Além disso, tomou-se o cuidado de se manter uma distância grande entre as câmeras (independentemente da instrumentação utilizada para a aquisição) e o volume de movimentação.

1.12 - Relação entre índice de refração da água e parâmetros intrínsecos da câmera

Lavest et al. (2000) testou a reprodutibilidade de um modelo teórico, que estabelecia uma relação entre os parâmetros intrínsecos e de distorção de uma câmera, obtidos quando a mesma era calibrada fora d'água e posteriormente dentro d'água (sem qualquer alteração interna na câmera). De acordo com esse modelo, tanto a distância focal quanto os efeitos da distorção em uma câmera subaquática podem ser preditas por uma relação entre os mesmos valores encontrados fora d'água e o índice de refração da água, segundo as equações:

$$f_{\text{água}} = n_{\text{água}} \times f_{\text{ar}} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} x_{dagua} \\ y_{dagua} \end{bmatrix} = n_{agua} \times \begin{bmatrix} x_{dar} \\ y_{dar} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Foi feito um processo de auto-calibração semelhante ao descrito por Zhang (1999), em ambiente aéreo e em seguida aquático, utilizando uma estrutura planar contendo 5 linhas e 5 colunas de pontos. Os dados obtidos mostram que há grande reprodutibilidade com o modelo teórico. As razões $f_{agua}s_x/f_{ar}s_x$ e $f_{agua}s_y/f_{ar}s_y$ foram respectivamente de 1.329 e 1.336, compatíveis com o índice de refração da água, de aproximadamente 1.33. A curva de distorção na água encontrada foi comparada com a predita através da curva de distorção no ar, mostrando que a aproximação é muito boa. O modelo teórico considera a distorção como puramente radial, sendo a defasagem encontrada entre ambas as curvas possivelmente em decorrência da distorção tangencial. Além disso, as coordenadas do ponto principal em tela não sofreram grandes alterações, da ordem de 1 *pixel*.

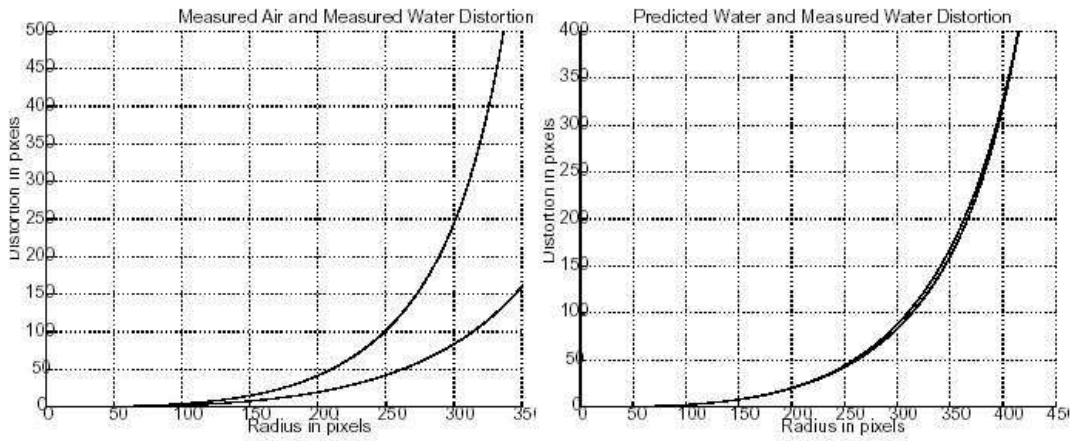


Figura 16: Curvas de distorção em meio aéreo e aquático (dir) e comparação entre curva de distorção encontrada em meio aquático e a predita através da distorção em meio aéreo (Lavest et al., 2000).

2 Justificativa

A revisão bibliográfica acerca do DLT utilizado em reconstruções tridimensionais tanto fora quanto dentro d'água possibilitou identificar as limitações dessa metodologia, bem como procedimentos necessários para uma boa acurácia. Ainda assim, o DLT possui desvantagens consideráveis, como a necessidade de se construir um objeto de calibração rígido e de dimensões compatíveis com o volume analisado. No caso das análises subaquáticas, as câmeras devem ser posicionadas ainda mais longe do movimento analisado. Com base nisso, a maioria das pesquisas aqui relacionadas de reconstrução 3D de movimentos da natação analisou apenas um ciclo de nado, com objetos de calibração com extensão de até 4,5m, fazendo com que os mesmos sejam de difícil manuseio e transporte.

Os estudos para a compreensão dos efeitos das distorções dentro e fora d'água permitiram observar que, embora potencializadas em movimentos submersos, essas distorções tem as mesmas características, inclusive sendo possível relacionar as características ópticas e geométricas de uma mesma câmera em situações de análise aérea e subaquática (Lavest et al., 2000). O que faz sentido, já que o responsável pelas distorções em ambos os meios ópticos é um mesmo fenômeno físico, a refração. É de se esperar, portanto, que possam ser calculados os parâmetros de distorção em análises subaquáticas segundo os mesmos procedimentos feitos em meio aéreo, e com isso diminuir significativamente a participação de erros sistemáticos no processo de medição. Esses parâmetros, por sua vez, podem ser obtidos através do *Toolbox* desenvolvido por Bouguet (2002), cujo procedimento é muito simples e prático, e rodado em ambiente MATLAB[®], que por sua vez é um programa difundido no mundo inteiro.

Minimizando-se os efeitos das distorções, é possível que não se faça mais necessária a utilização de grandes objetos de calibração. Sendo menores, tornam-se mais práticos para as coletas. Além disso, possibilitam a análise de movimento em volumes maiores, como é o caso das saídas e suas respectivas fases submersas (a filipina, por exemplo, é um movimento submerso sem características cíclicas e ao longo de um grande volume). É possível também que a metodologia permita uma maior flexibilidade no posicionamento das câmeras para as análises,

vantagem até então oferecida em parte pelas caixas estanques, que embora possam ser posicionadas em qualquer local na piscina, é preconizada uma distância considerável para o movimento analisado, como forma de se garantir uma boa acurácia (Kwon, 1999).

3 Objetivos

3.1 - Geral:

Desenvolver uma metodologia de reconstrução dos movimentos de natação de alto rendimento com base no DLT que minimize os efeitos de distorções ópticas e que permita análises em volumes de grandes dimensões sem que se faça necessária a construção de grandes objetos de calibração.

3.2 - Específicos:

- Verificar as diferenças na acurácia entre as metodologias usuais sem correção e a metodologia de calibração proposta;
- Verificar a possibilidade de se utilizar uma menor quantidade de pontos de calibração;
- Verificar a influência do posicionamento e das distâncias focais de cada câmera;
- Verificar possibilidade de obter resultados precisos em movimentos que extrapolem o volume do objeto de calibração;
- Determinar, e se possível quantificar, as limitações que essa metodologia apresenta;

4 Metodologia

No presente estudo, os testes para a validação da metodologia de correção dos efeitos das distorções ópticas na reconstrução tridimensional por videogrametria foram realizados em meio aéreo, no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica (LIB). Nessa situação, os efeitos das distorções são semelhantes aos encontrados em meio aquático, como já verificado. Além disso, a realização dos testes em laboratório torna-se mais simplificada do que em ambiente externo, onde há a preocupação com fatores como logística para transporte e montagem dos equipamentos utilizados, luminosidade, intempéries, entre outros, que podem comprometer a qualidade da coleta e a integridade dos equipamentos. Portanto, priorizou-se a determinação da eficácia da metodologia proposta, para que posteriormente seja verificada sua eficácia também em meio aquático. Em um primeiro momento (Teste 1), um objeto rígido de dimensões conhecidas se deslocou dentro de um volume delimitado pelo objeto de calibração utilizado, como preconiza a literatura, para que se verificasse a influência da quantidade de pontos de calibração e a disposição das câmeras na reconstrução com e sem a utilização dos parâmetros de distorção. Em um novo teste (Teste 2), o mesmo objeto foi filmado enquanto se deslocava ao longo de um volume extrapolado em relação ao objeto de calibração. As distâncias entre os pontos de validação contidos nesse objeto mensuradas através da metodologia serão comparadas com as distâncias obtidas em laboratório através de um instrumento de alta precisão.

4.1 - Materiais

Para a determinação das coordenadas globais, foi utilizado o sistema fixo de calibração (SFC) do Laboratório de Instrumentação para Biomecânica (LIB). Esse sistema consiste em 6 prumos verticais contendo cada cerca de 28 pontos de calibração, espaçados por aproximadamente 10cm, num total de 162 pontos. Esses prumos estão dispostos em duas linhas e três colunas, fixados em localizações específicas para cada um dos prumos no teto do laboratório, garantindo-se assim que as coordenadas espaciais de cada ponto não se alterem cada vez que o

sistema fixo do laboratório é montado. Forma-se então o sistema de coordenadas, onde a coordenada X é representada pela direção das colunas (largura), a coordenada Y representa a altura, e a coordenada Z é a direção das linhas (comprimento). As dimensões totais são 0.9m em X, 2.7m em Y e 2.7m em Z. Cada um dos pontos de calibração tem formato esférico, com cerca de 10mm de diâmetro e envolto em material retro-refletivo, de forma que, ao ser iluminado, sua imagem fica destacada nas filmagens. Para aumentar o destaque desses pontos, cortinas pretas foram dispostas atrás do sistema de calibração.

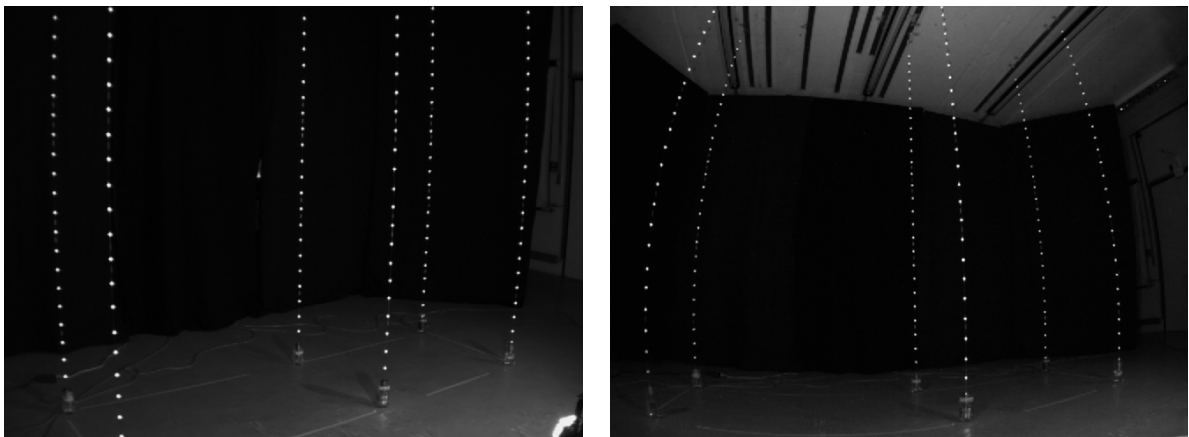


Figura 17: Imagens do Sistema Fixo de Calibração, através de câmeras com distância focal de 8mm (dir) e 4mm (esq).

Foram utilizadas câmeras digitais modelo BASLER® 602fc, com frequência de aquisição de 50 Hz e abertura de *shutter* (tempo de exposição do CCD à luz) de 1/1000s. A resolução dessa imagem em tela é de 656x490 *pixels*. Essas câmeras permitem ajuste na distância focal de 4mm (maior campo de visão) à 12mm (menor campo de visão). Nos testes apresentados foram utilizadas as distâncias focais de 4mm e 8mm. Esses valores são aproximados, pois trata-se de ajuste manual e realizado na própria câmera. Verifica-se pela figura X um aumento nas distorções das imagens dos prumos quando $f=4mm$, em relação à $f=8mm$.

Em frente a cada uma das câmeras foi colocada uma lente de policarbonato com 10mm de espessura, a mesma lente a ser utilizada nas caixas-estanques nas quais futuramente serão inseridas as câmeras. Foi também utilizado, para cada uma, um iluminador de 300W de potência direcionando sua luz paralelamente ao eixo óptico da câmera, de forma a aumentar o destaque dos pontos a serem medidos.

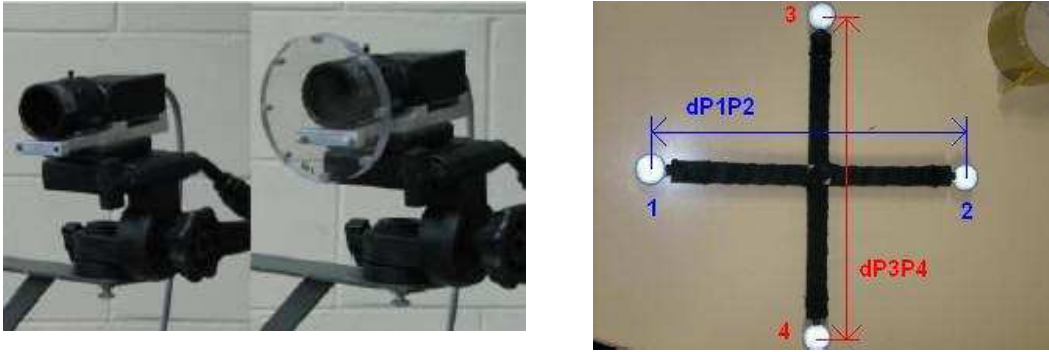


Figura 18: Imagens das câmeras modelo BASLER® 602fc com a lente de policarbonato (esq) e detalhe do objeto deslocado ao longo do volume de análise (dir).

Um objeto em forma de cruz preta foi movimentado aleatoriamente dentro de um volume aquisição. Em cada uma das pontas dessa cruz foi inserida uma esfera retro-refletiva de 2,5cm de diâmetro, funcionando como os pontos de validação (PV): pontos P1, P2, P3 e P4. As distâncias entre os centros de P1 a P2 ($dP1P2$) e de P3 a P4 ($dP3P4$) foram calculada em laboratório com o auxílio de um paquímetro, com precisão de 0.01mm. Foram realizadas 10 medições para cada distância, cujos valores médios e desvios-padrão são, respectivamente, de:

$$dP1P2 = 285,7707 \pm 0,0092mm ;$$

$$dP3P4 = 285,0245 \pm 0,0107mm ;$$

$$\left(\frac{dP1P2 + dP3P4}{2} \right) = 285,40 \pm 0,01mm$$

Para cada quadro de vídeo (*frame*) foi feita a reconstrução tridimensional da cruz a partir dos pontos de validação, e as distâncias $dP1P2$, $dP3P4$ e a média de ambas foram calculadas e comparadas com as obtidas através do paquímetro em laboratório.

Uma estrutura plana (*chess*), contendo 7 linhas e 10 colunas de quadrados, cada um com 100mm de aresta, foi utilizada na metodologia de correção de distorção. Cada quadrado era inteiramente branco ou preto, como em um tabuleiro de xadrez. Essa sequência possibilita uma identificação precisa dos cantos de cada quadrado, que serão utilizados na metodologia de correção das distorções, descrita a seguir.

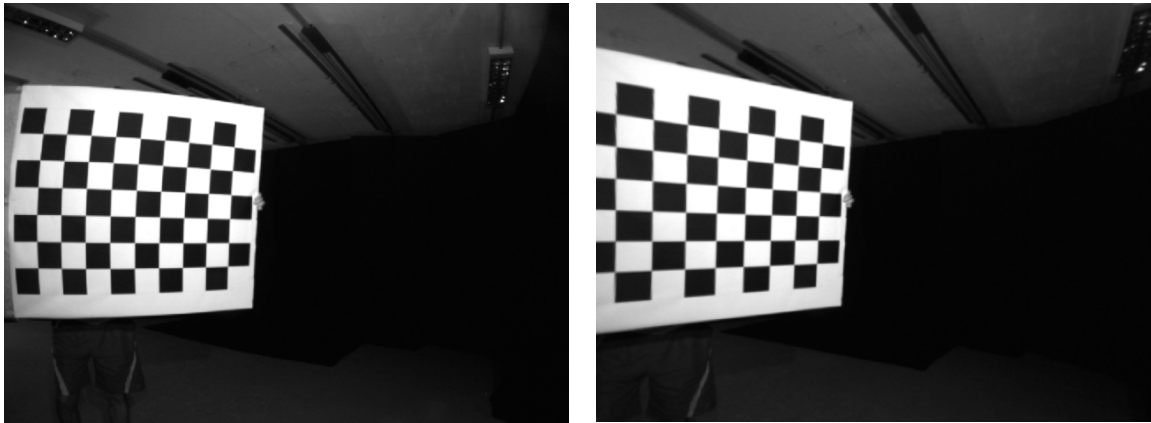


Figura 19: Comparação entre as imagens do chess de um mesmo frame, sem correção (esq) e corrigido (dir), para uma câmera com distância focal de 4mm.

A aquisição das imagens das câmeras foi realizada pelo programa BCAMVIEW[®], que as salva em formato *avi*. Um *trigger* foi conectado às 4 câmeras, garantindo que as imagens eram capturadas simultaneamente por todas. Para efeito de comparação, o próprio BCAMVIEW[®], após a captura, cria um arquivo *aquisitiontimes.txt*, no qual se registra o tempo, em relação ao *clock* do computador, em que as imagens foram capturadas por cada câmera.

No programa DVIDEO[®] (Barros, 1997), foram feitas as digitalizações dos pontos de calibração e de validação, a obtenção dos 11 parâmetros da DLT e a reconstrução tridimensional desses pontos. Em ambiente MATLAB[®], foi utilizado o *Toolbox* criado por Bouguet (2002) para a obtenção dos parâmetros intrínsecos e de distorção óptica e rotinas de cálculos para a correção das coordenadas medidas a partir desses parâmetros, determinação das distâncias entre os pontos reconstruídos e a obtenção dos valores referentes à precisão e exatidão dos métodos utilizados.

4.2 - Métodos

4.2.1 - Teste 1:

No primeiro teste, o volume ao longo do qual o objeto se deslocou foi determinado pelas dimensões do SFC, ou seja, 0.9m em X, 2.7m em Y e 2.7m em Z. As câmeras foram posicionadas de tal forma que o SFC ocupasse ao máximo as dimensões da tela. Duas câmeras (2 e 3) foram ajustadas para uma distância focal de 8mm, e as outras duas (1 e 4) para 4mm.

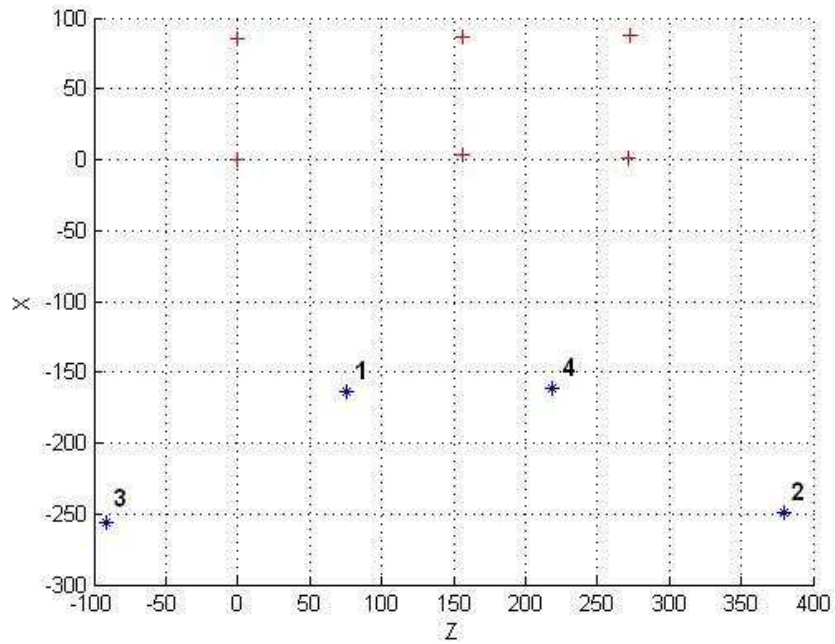


Figura 20: Posição das 4 câmeras (azul) em relação ao Sistema Fixo de Coordenadas (vermelho).
Vista do plano XZ.

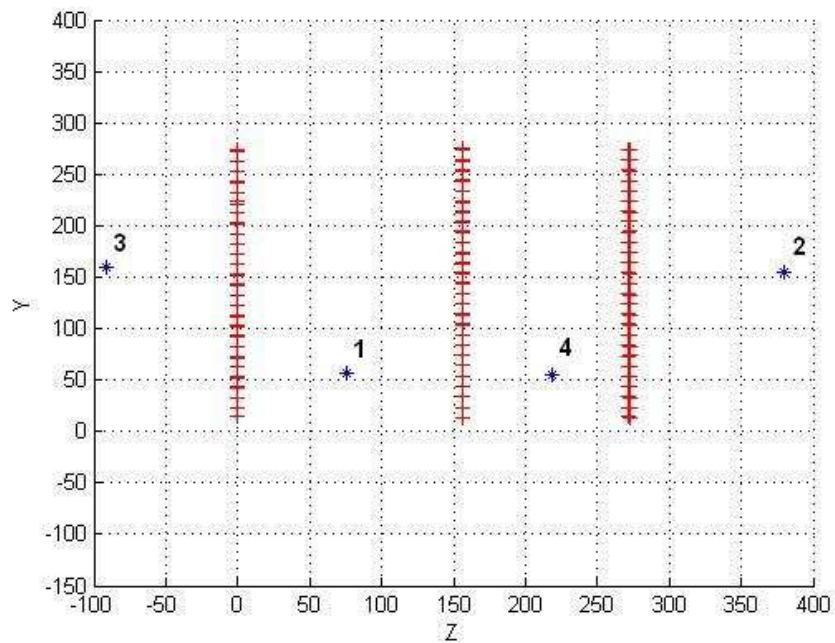


Figura 21: Posição das 4 câmeras (azul) em relação ao Sistema Fixo de Coordenadas (vermelho).
Vista do plano YZ.

Um mesmo movimento da cruz foi reconstruído com e sem a rotina de correção das distorções. Em ambas as situações, as reconstruções foram divididas em 3 grupos: no primeiro, apenas o par de câmeras com $f = 8mm$; no segundo, o par de câmeras com $f = 4mm$ e finalmente o terceiro grupo, com as 4 câmeras. Cada grupo, por sua vez, continha 4 conjuntos de pontos de controle utilizados na etapa de calibração:

- Conjunto 1: todos os pontos do SFC (entre 155 e 159 pontos);
- Conjunto 2: apenas o primeiro, o último e o ponto do meio de cada prumo do SFC (18 pontos);
- Conjunto 3: apenas o primeiro e o último ponto de cada prumo do SFC (12 pontos);
- Conjunto 4: apenas os pontos que representam os cantos do paralelepípedo formado pelo SFC (8 pontos);

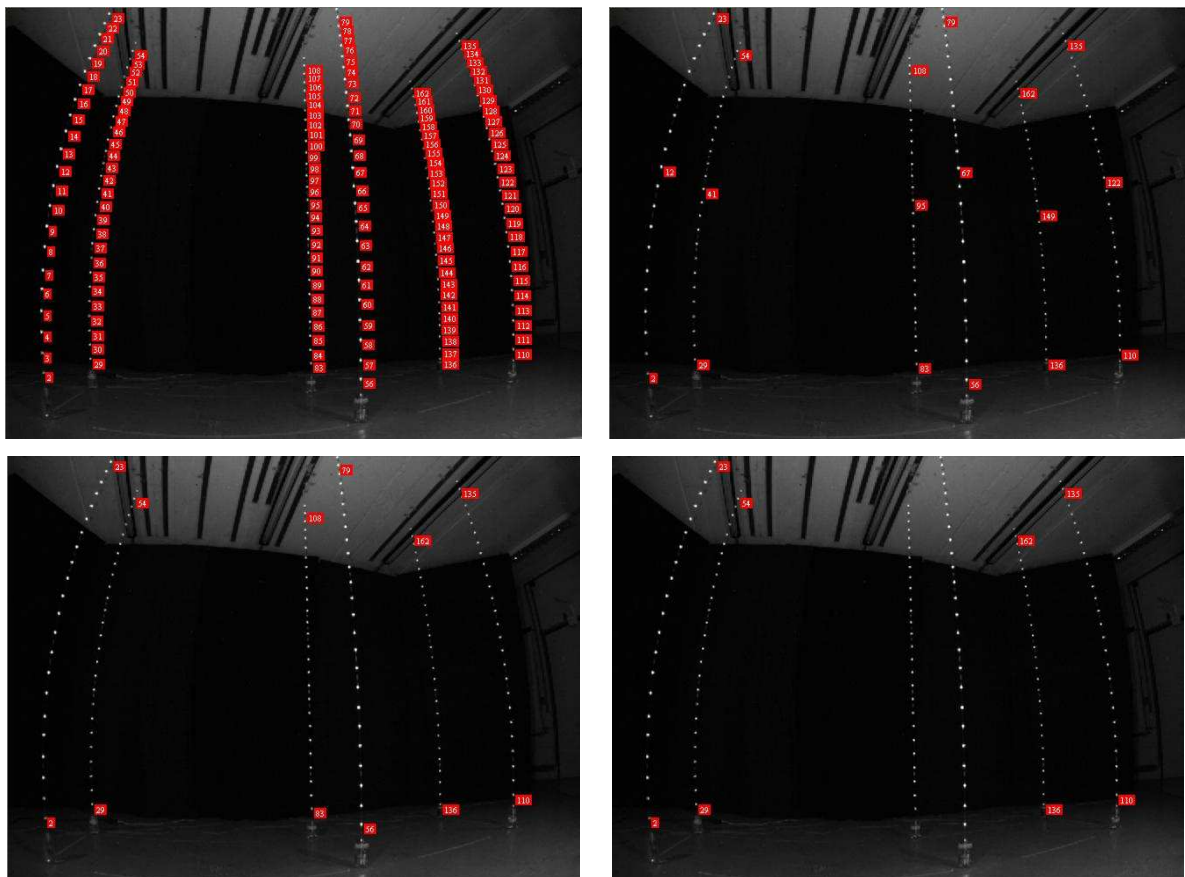


Figura 22: Imagens a partir da câmera 1, com os conjuntos de PC utilizados para a sua calibração:

No total, foram realizadas 24 reconstruções de um mesmo movimento da cruz. Uma das

situações avaliadas diz respeito à influência da distância focal na acurácia total. Uma distância focal de apenas 4mm pode elevar os efeitos de distorção (Wang et al., 2008), entretanto, sua utilização permite um campo de visão mais amplo, possibilitando à câmera uma maior captação de informações. Uma significativa correção das distorções em câmeras com distância focal de 4mm pode ser bastante vantajosa em análises de movimentos ao longo de volumes extensos.

4.2.2 - Teste 2:

No segundo teste, diferentemente do referenciado na literatura, esse objeto deslocou-se extrapolando as dimensões do SFC. Esse sistema, portanto, está contido no volume total de deslocamento, e não mais determinando as fronteiras desse volume (não ocupa toda a dimensão da tela).

A movimentação da cruz estendeu-se por um volume de aquisição de aproximadamente 5m de comprimento (Z), 2m de largura (X) e 2,5m de altura (Y), dentro do qual estava inserido o SFC. O tempo de movimentação foi de aproximadamente 20s, gerando 1140 quadros para cada câmera.

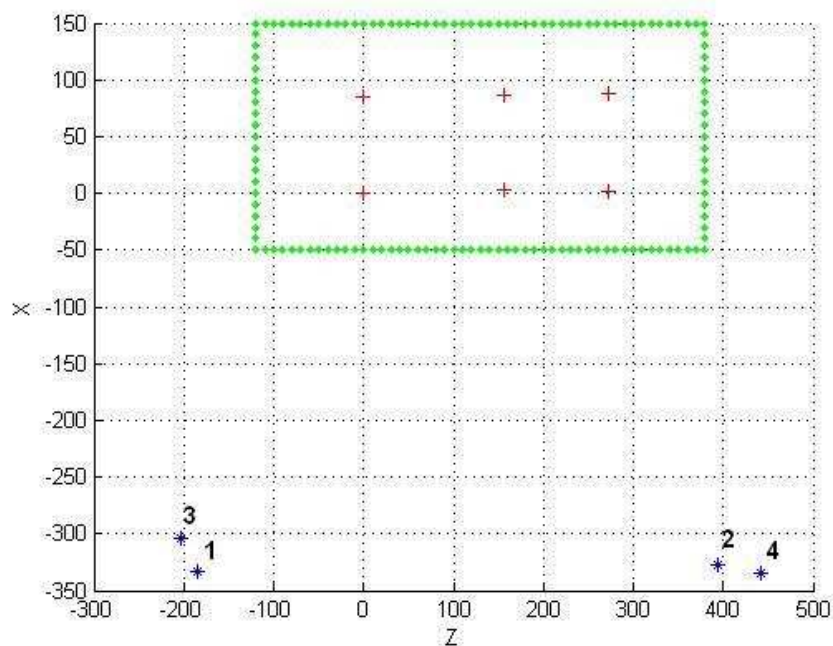


Figura 23: Posição das 4 câmeras (azul) em relação ao Sistema Fixo de Coordenadas (vermelho) e o volume de análise extrapolado (verde). Vista do plano XZ

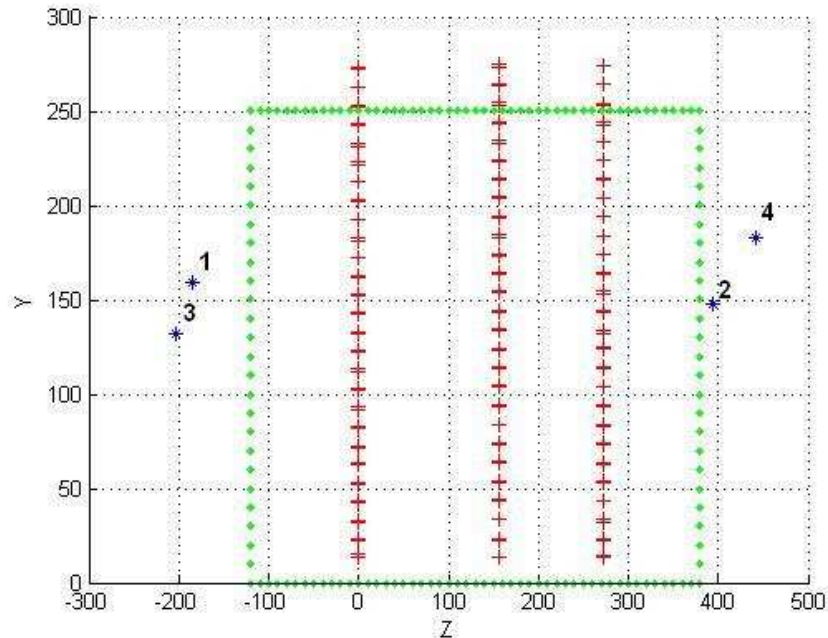


Figura 24: Posição das 4 câmeras (azul) em relação ao Sistema Fixo de Coordenadas (vermelho) e o volume de análise extrapolado (verde). Vista do plano YZ

O mesmo movimento da cruz será reconstruído 6 vezes. Cada reconstrução será realizada baseada em um conjunto de pontos de calibração do SFC.

- Conjunto 1: todos os pontos de calibração visíveis do SFC (entre 155 e 159 pontos);
- Conjunto 2: apenas o primeiro, o último e o ponto do meio de cada prumo do SFC (18 pontos);
- Conjunto 3: apenas o primeiro e o último ponto de cada prumo do SFC (12 pontos);
- Conjunto 4: apenas os pontos que representam os cantos do paralelepípedo formado pelo SFC (8 pontos);
- Conjunto 5: apenas o 9º e o 18º ponto de cada prumo do SFC (12 pontos);
- Conjunto 6: apenas o 9º e o 18º ponto de dois pares de prumos (par da esquerda e par do meio) do SFC (8 pontos).

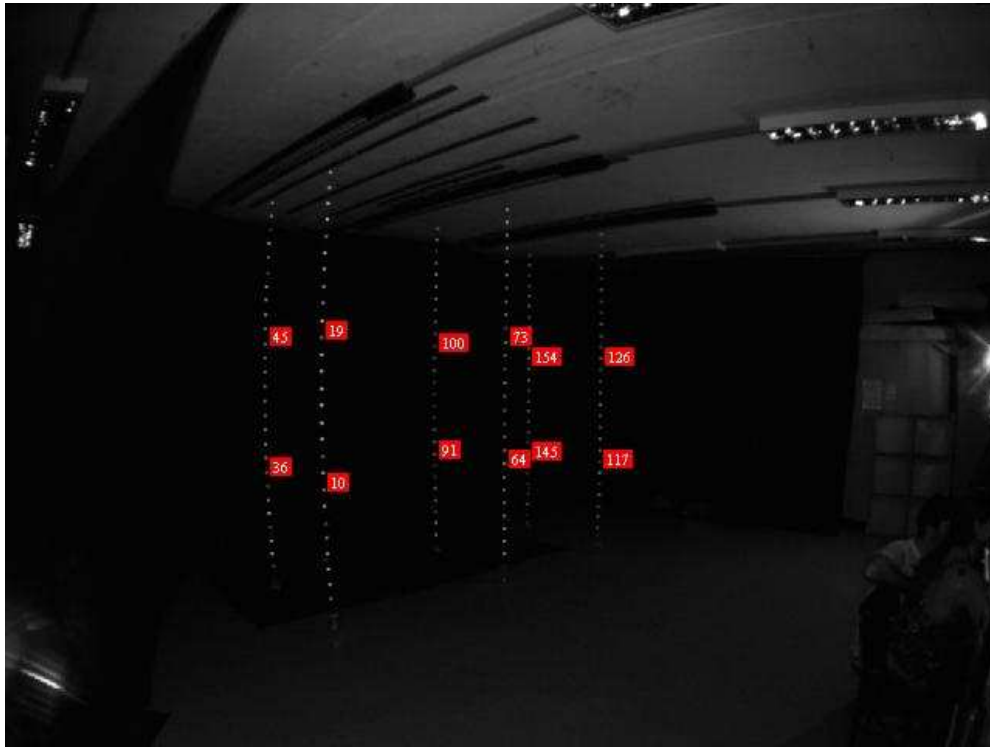


Figura 25: Imagem do Conjunto 5, a partir da câmera 1

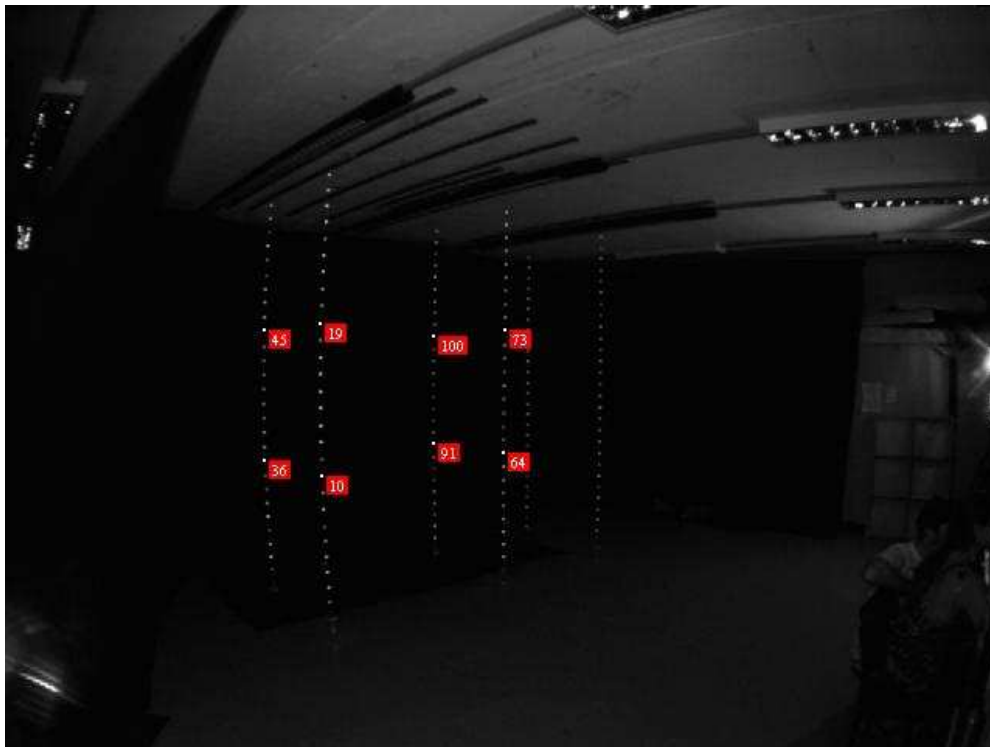


Figura 26: Imagem do Conjunto 6, a partir da câmera 1

O Conjunto 1 é o único no qual não foram utilizados os parâmetros de distorção para correção da calibração e dos PV da cruz. As condições estabelecidas na literatura para uma melhor acurácia na reconstrução foram violadas, considerando-se os valores da distância focal e a extrapolação do volume de movimentação em relação ao volume descrito pelo SFC.

Todos os demais conjuntos utilizaram os parâmetros de distorção para a correção nos processos de medição dos PC dos prumos e dos PV da cruz. Os conjuntos 5 e 6 diferem-se dos anteriores por representarem volumes reduzidos, em relação ao sistema de calibração e em relação ao volume total de deslocamento da cruz. O Conjunto 5 possuíam dimensões de 0,9m (X), 0,9m (Y) e 2,7m (Z); já as dimensões do Conjunto 6 eram de 0,9m (X), 0,9m (Y) e 1,5m (Z). Em circunstâncias de reconstrução sem a rotina de correção óptica, seria de se esperar erros de acurácia muito grandes, embora os Conjuntos 3 e 4 também possuísem uma quantidade de PC abaixo do preconizado para uma boa acurácia (Chen et al. 1994).

4.2.3 - Calibração e Reconstrução

Na metodologia sem correção, todas as etapas até a obtenção das coordenadas tridimensionais dos pontos da cruz foram realizadas em ambiente DVIDEO®. Na etapa de calibração, os pontos de controle dos 3 Grupos sem correção do Teste 1 e do Conjunto 1 do Teste 2 foram medidos, obtendo-se assim as coordenadas bidimensionais dos mesmos, armazenadas em arquivos de extensão *dat* (um para cada câmera). Essas coordenadas foram utilizadas nas equações da DLT juntamente com as coordenadas tridimensionais (reais) desses pontos, para a obtenção dos 11 parâmetros de transformação para cada câmera, armazenadas em arquivos de extensão *cal*. Em seguida, foi feita a medição dos pontos de validação da cruz, também salvo em arquivo *dat*. As coordenadas bidimensionais dos pontos da cruz foram então carregadas em conjunto com os arquivos *cal*, em cada uma das câmeras, nas equações do DLT, para a obtenção das coordenadas tridimensionais dos 4 pontos da cruz, salvos em arquivos de extensão *3d*.

Na metodologia com correção, a primeira etapa da calibração foi a medição dos PC dos conjuntos de 2 a 5, armazenados em arquivo *dat*. Em seguida, foram obtidos os parâmetros de correção da distorção óptica, através do *Toolbox* criado por Bouguet (2002) para rodar em ambiente MATLAB®, adaptado para a análise de vídeo (formato *avi*) e extração automática dos pontos (cantos dos quadrados) do *chess*, que se movimentou ao longo do volume de aquisição.

Foram utilizadas cerca de 600 imagens do chess para a obtenção dos parâmetros intrínsecos e de distorção. Os arquivos *dat* de cada conjunto e da cruz foram computados juntamente com as variáveis *KK* e *kc* de suas respectivas câmeras no MATLAB® através da função *normalize.m*, que realiza a normalização das coordenadas medidas. Essa função primeiramente multiplica as coordenadas bidimensionais de cada ponto pela inversa da matriz intrínseca de cada câmera (KK^{-1}), para em seguida utilizar os parâmetros de distorção óptica (*kc*) numa aproximação iterativa para o mapeamento inverso, segundo Melen (apud Heikillä & Silvén, 1997). Nessa etapa, são realizadas 20 interações. Os dados obtidos são novamente multiplicados pela matriz intrínseca da câmera (*KK*), tendo-se com isso os arquivos *dat* corrigidos dos pontos de calibração. A partir das coordenadas bidimensionais corrigidas de cada conjunto de PC foram calculados os 11 parâmetros do DLT e salvos em arquivo *cal*. Para a etapa de reconstrução, a correção das digitalizações dos pontos de validação da cruz seguiu exatamente o mesmo procedimento da correção das digitalizações dos pontos de calibração. Em seguida, as coordenadas bidimensionais corrigidas dos PV foram inseridas nas equações do DLT juntamente com os 11 parâmetros de calibração corrigidos, tal qual nas reconstruções sem correção, para a reconstrução tridimensional desses PV. As reconstruções foram salvas em arquivo *3d*.

Todos os arquivos *3d* da cruz reconstruída foram migrados para o MATLAB®. Através da função *distcruz.m*, foram calculados os valores de dP1P2, dP3P4 e a média de ambos em cada frame, a partir do qual foram obtidos os valores de média, mediana, desvio padrão (SD) e variância (SD^2), em milímetros. Comparando-se os valores obtidos na reconstrução da cruz com o valor real (média de ambas as distâncias obtida com o paquímetro), foram calculados os erros máximo ($E_{\max}$) e mínimo ($E_{\min}$), erro médio absoluto (E_{abs}) e o erro médio quadrático (RMS), também em milímetros. Também foi calculado o RMS percentual (RMS%), cujo valor corresponde à porcentagem do valor real, para ser comparada com os dados obtidos na literatura (Gourgoulis et al., 2008; Yanai, 1996). A acurácia, também em milímetros, foi definida como segundo a expressão:

$$\text{Acurácia} = \sqrt{b^2 + SD^2} \quad (25)$$

Na qual *b* é a diferença entre o valor médio observado e o valor esperado (bias) e SD^2 é a variância, dada pelo desvio padrão das medidas elevado ao quadrado.

5 Resultados e Discussão

5.1 - Teste 1:

5.1.1 - Teste 1 sem correção:

Analisando-se primeiramente os resultados apresentados sem a introdução dos parâmetros de distorção óptica, é possível perceber erros de reconstrução consideravelmente altos. A acurácia variou de 6,91mm (Grupo 1, Conjunto 1) à 37,77mm (Grupo 2, Conjunto 4), influenciada tanto pelo erro absoluto quanto pela variância. O RMS percentual variou consideravelmente, entre 2,42% à 13,23% do comprimento do objeto em movimento. Gourgoulis et al. (2008) encontrou para um objeto de dimensões próximas ao aqui estudado (300 mm) deslocando-se ao longo de um volume aproximadamente 2 vezes menor (1m x 1m x 3m) um valor de RMS percentual de 0,44%. Yanai (1996) para um teste semelhante com um objeto de 500mm de comprimento, encontrou para essa variável o valor de 1,16%. Foi possível verificar, como nos estudos anteriores (Wood & Marshall, 1986; Challis & Kerwin, 1992; Chen et al., 1994; Psycharakis et al., 2005) a influência da quantidade de pontos de controle utilizados. Em cada um dos três grupos, quanto menor a quantidade, piores eram os resultados na acurácia. Apesar da utilização de 4 câmeras, os resultados do Grupo 3 foram inferiores aos obtidos no Grupo 1, por conta da influência dos erros inseridos na calibração das câmeras do Grupo 2. Isso demonstra que para o DLT sem correção da distorção óptica, a inclusão de mais câmeras não significa necessariamente uma melhora nos resultados da reconstrução, pois em situações críticas de posicionamento e geometria interna das câmeras adicionadas os resultados podem ser ainda piores.

Tabela 1: Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz (em mm). Grupo 1 (2 câmeras, f=8mm) sem correção.

Conjuntos	Média	Mediana	$E_{\max}$	$E_{\min}$	SD	SD^2	RMS	RMS (%)	E_{abs}	Acurácia
Todos PC (1)	290,34	291,05	0,12	12,67	4,80	22,99	6,88	2,41	5,99	6,88
18 PC (2)	292,21	292,80	0,60	14,38	4,58	20,99	8,20	2,87	7,45	8,21
12 PC (3)	293,11	293,63	0,99	15,28	4,59	21,06	8,97	3,14	8,23	8,98
8 PC (4)	294,28	294,84	0,75	16,32	4,48	20,08	9,95	3,49	9,24	9,95

Tabela 2: Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz (em mm). Grupo 2 (2 câmeras, f=4mm) sem correção.

Conjuntos	Média	Mediana	$E_{\max}$	$E_{\min}$	SD	SD^2	RMS	RMS (%)	E_{abs}	Acurácia
Todos PC (1)	304,53	310,67	2,07	45,51	18,36	336,96	26,49	9,28	23,13	26,51
18 PC (2)	310,90	316,94	0,51	51,57	18,12	328,26	31,26	10,95	27,75	31,28
12 PC (3)	314,97	320,71	0,67	56,01	18,55	344,26	34,89	12,23	31,45	34,91
8 PC (4)	318,10	325,32	0,55	57,77	18,90	357,27	37,75	13,23	33,82	37,77

Tabela 3: Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz (em mm). Grupo 3 (4 câmeras) sem correção.

Conjuntos	Média	Mediana	$E_{\min}$	$E_{\max}$	SD	SD^2	RMS	RMS (%)	E_{abs}	Acurácia
Todos PC (1)	296,45	298,47	1,66	30,94	11,67	136,10	16,05	5,62	13,76	16,07
18 PC (2)	300,51	302,09	0,78	35,11	11,60	134,57	19,04	6,67	16,81	19,05
12 PC (3)	302,59	304,15	0,82	37,58	12,04	144,99	20,98	7,35	18,79	20,99
8 PC (4)	305,09	306,84	1,27	40,35	12,14	147,39	23,13	8,10	20,87	23,14

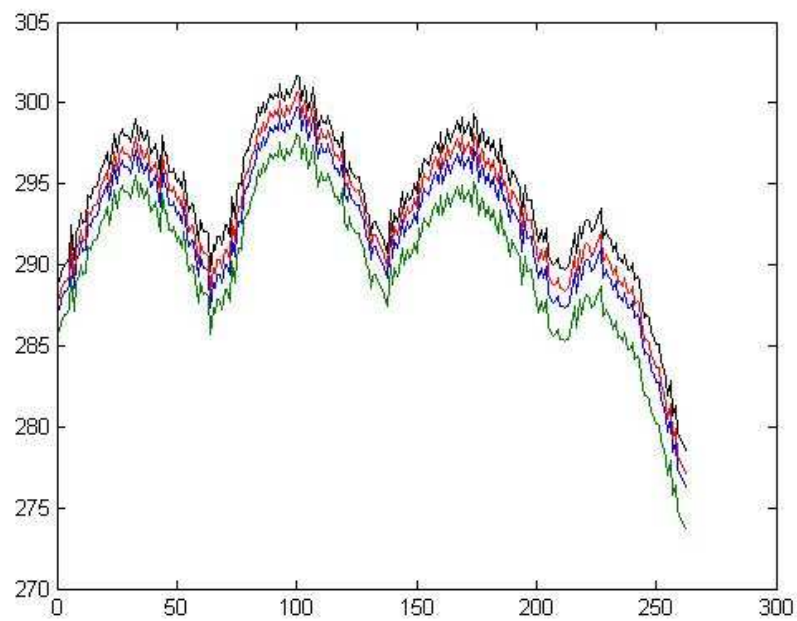


Figura 27: Média das duas distâncias da cruz em cada frame, para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 1 sem correção.

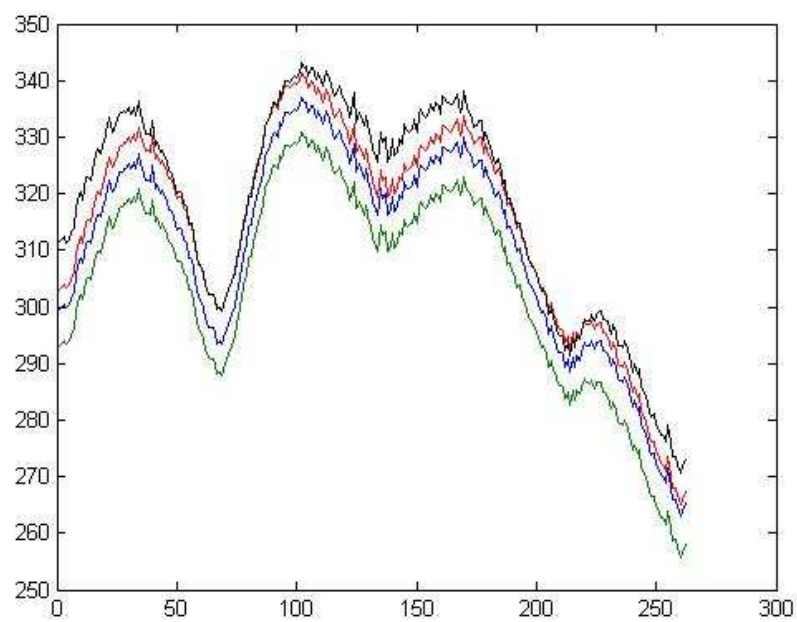


Figura 28: Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 2 sem correção.

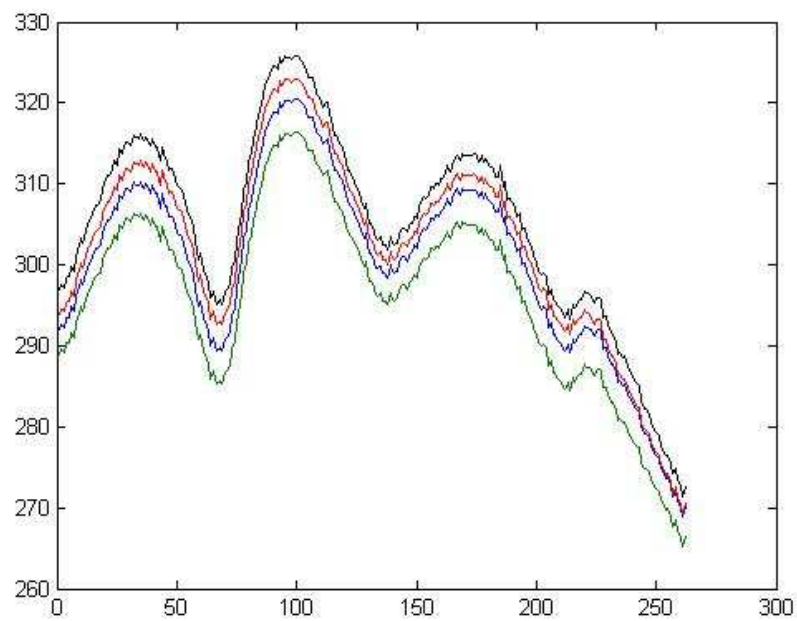


Figura 29: Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 3 sem correção.

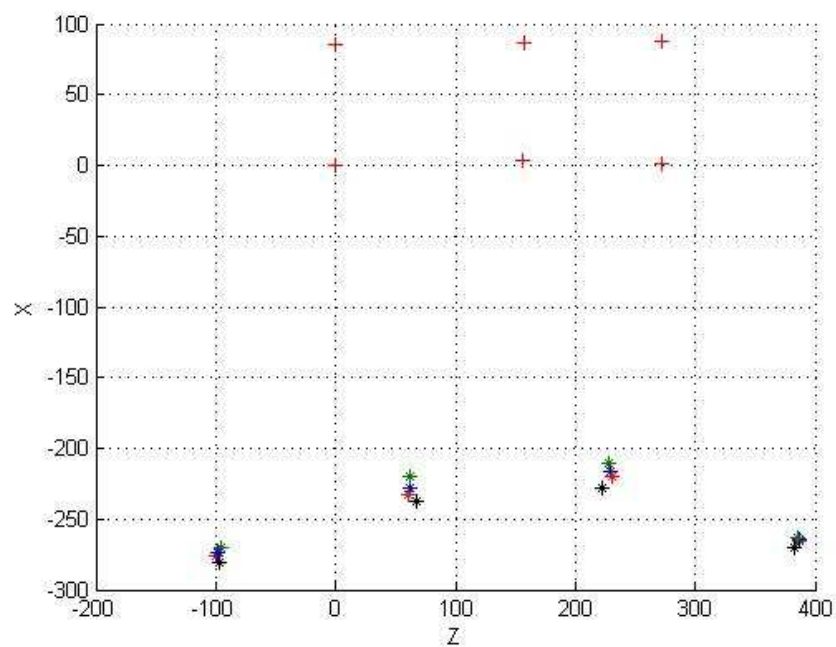


Figura 30: Posição das câmeras em relação ao objeto de calibração (Plano XZ), obtidas quando calibradas com os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto).

Nos gráficos referentes às reconstruções sem correção para cada grupo, é possível perceber certa uniformidade entre as curvas de cada conjunto de pontos de controle, diferenciando-se entre si por deslocamentos verticais no plano cartesiano (quanto menor a quantidade de PC, mais afastada a curva fica da abscissa. Essa tendência é verificada na tabela de valores calculados, onde nota-se diferenças entre os valores de média e mediana, enquanto que os valores de desvio padrão mostram-se praticamente iguais. Com a obtenção dos parâmetros extrínsecos através dos 11 parâmetros do DLT, é possível perceber que quanto menor a quantidade de pontos de controle utilizados, mais distante a câmera estará do objeto, e portanto, o objeto filmado será percebido como maior do que deveria. É provável, portanto, que a quantidade de pontos de controle utilizados na calibração interfira na determinação do posicionamento das câmeras com maior magnitude que nos demais parâmetros extrínsecos e intrínsecos. A figura abaixo demonstra essa relação entre dimensão do objeto e sua distância para a câmera:

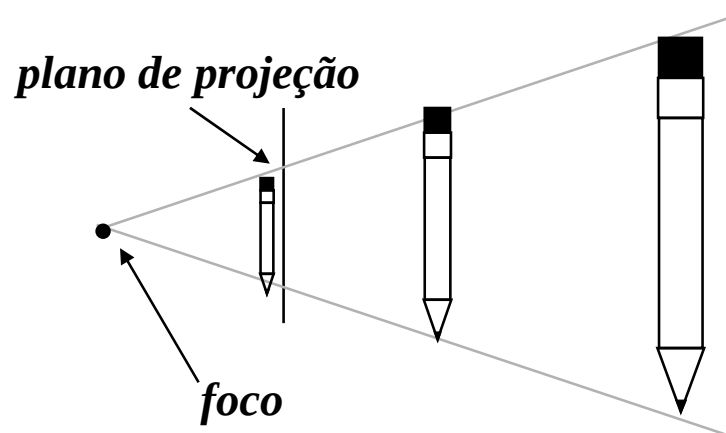


Figura 31: Representação da influência da distância da câmera para o objeto e como as dimensões desse objeto são interpretadas, segundo sua visualização em tela.

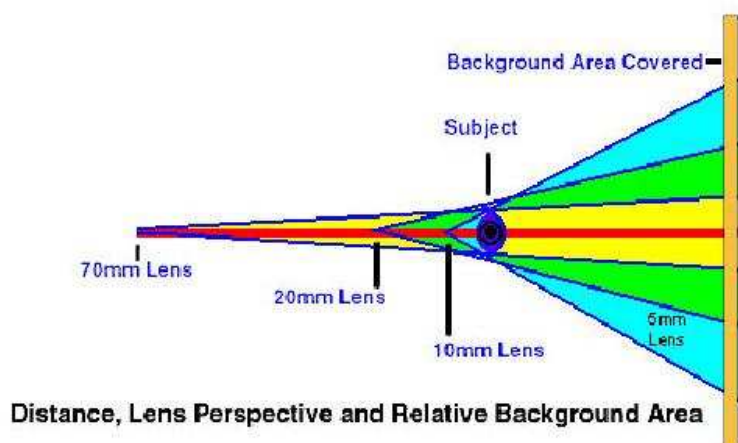
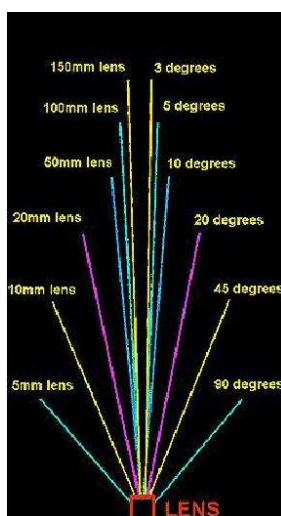
Entretanto, devem ser considerados alguns cuidados tomados pelos autores supracitados e aqui propositalmente negligenciados. Em primeiro lugar, deve-se considerar as direções dos raios de luz incidentes em cada câmera: quanto menor for a variação angular dessas direções entre si, menor será a influência das distorções. Apesar de a refração estabelecer relações não lineares entre os ângulos de incidência e refração, quando os ângulos de incidência variam entre si por

aproximadamente 10° , a relação com os ângulos de refração torna-se muito próxima de linear.

Tabela 4: Relação entre os valores dos ângulos (em graus e em radianos) e seus respectivos valores de seno e tangente.

Ângulo (graus)	Ângulo (radianos)	Seno	Tangente
0	0	0	0
2	0,035	0,035	0,035
4	0,07	0,07	0,07
6	0,105	0,104	0,105
8	0,14	0,139	0,14
10	0,174	0,174	0,176

Dois fatores relacionam-se diretamente e mutuamente com essa questão. A distância focal é um deles. Como dito anteriormente, uma distância focal de 4mm para esse modelo de câmera amplia o seu campo de visão $\left(\cong 2 \tan^{-1} \left(\frac{x_0}{f \cdot s_x} \right) \right)$, permitindo a incidência de raios de luz com uma variação de aproximadamente 75° , muito superior, portanto, aos 10° nos quais as relações são muito próximas de lineares. Esse ajuste é chamado de grande angular, uma vez que a razão entre a distância focal e a diagonal do CCD é inferior a 1. Logo, para o modelo de câmera em questão, uma distância focal de 8mm também é considerado ajuste para grande angular, com um campo de visão próximo de 45° .



Figuras 32: Campo de visão das câmeras em função da distância focal.

O outro fator é a distância entre as câmeras de vídeo e o centro do volume analisado. Quanto maior a proporção entre a distância das câmeras ao volume de análise e a largura relativa (distância entre as extremidades visualizadas em tela) desse volume, menor é a variação entre as direções dos raios de luz que partem dessa região e incidem nas câmeras. Como relatado anteriormente, nas pesquisas sobre análise tridimensional em movimentos da natação, essa proporção variou de 1:3 à 1:4. O estudo de Kwon (1999) também traz embasamento a essa questão, pois o aumento das distâncias entre câmera e interface ou entre interface e objeto, preconizadas para o aumento da acurácia, significam o aumento da distância entre câmera e objeto. Porém, caso não haja um ajuste na distância focal, a resolução do volume analisado torna-se muito pequena em tela, potencializando possíveis erros randômicos. Logo, as câmeras posicionadas distantes são ajustadas para a posição de teleobjetiva (razão entre distância focal e diagonal do CCD superior a 1) juntamente com o auxílio de lentes de zoom, para que as dimensões do volume ocupem ao máximo a tela.

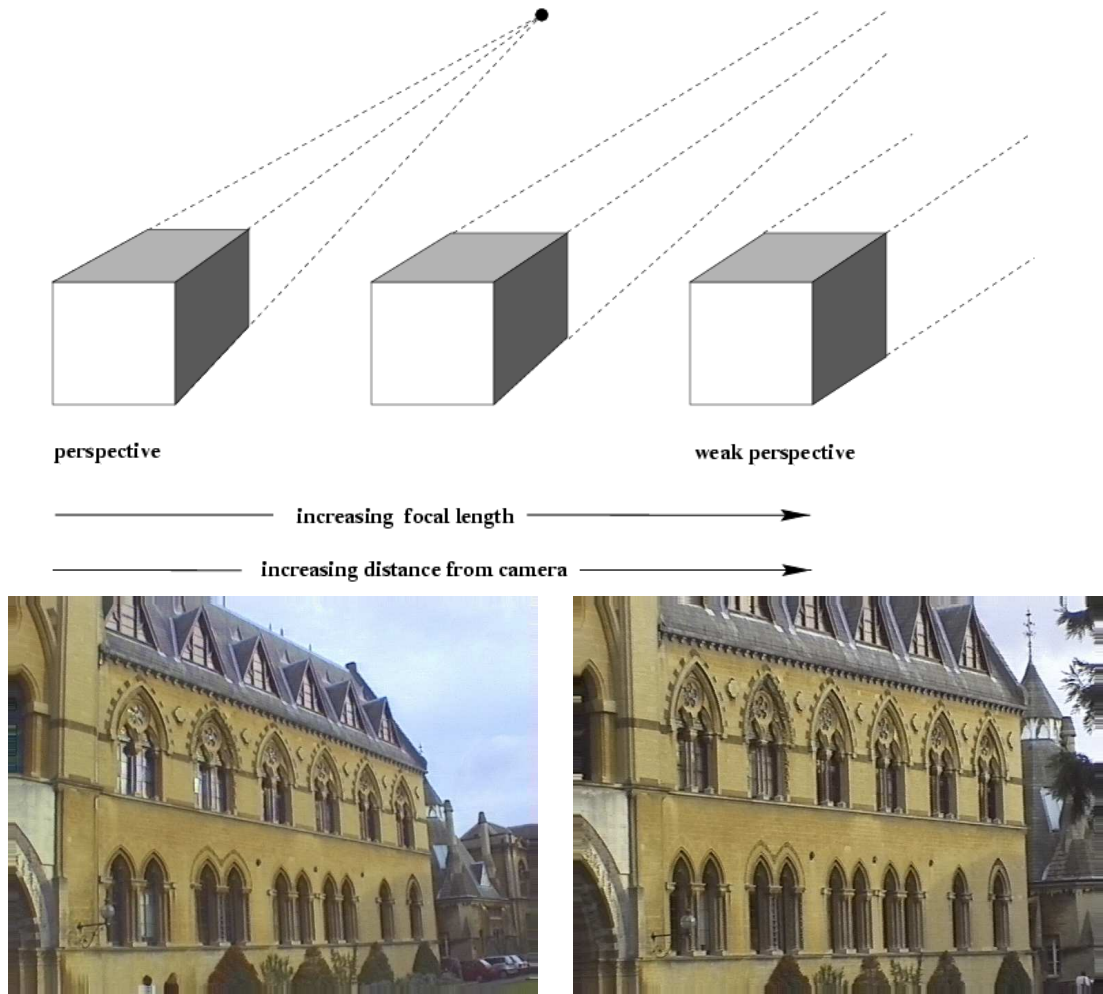


Figura 33: Efeitos nas imagens com o aumento da distância focal ou da distância do objeto para a câmera (da esquerda para a direita).

Os estudos que realizam reconstruções tridimensionais a partir do DLT sem correção de distorções utilizam configurações de câmeras com grandes distâncias focais e distâncias da câmera para o volume de análise com o intuito de garantir um campo de visão de aproximadamente 10° e máxima resolução do movimento em tela. No presente estudo, a preocupação em manter a máxima resolução do volume em tela foi solucionada posicionando-se as câmeras com um maior ângulo de visão mais próximas desse volume, o que potencializou os efeitos das distorções. O intuito é demonstrar que, uma vez corrigidas as distorções através do método proposto, é possível uma maior liberdade no posicionamento das câmeras para as análises tridimensionais. Posicionar as câmeras o mais próximo possível do movimento analisado pode ser vantajoso, dependendo das características do local de coleta.

5.1.2 - Teste 1 corrigido:

A tabela a seguir apresenta os valores dos parâmetros intrínsecos e de distorção calculados através do *Toolbox* desenvolvido por Bouguet (2002):

Tabela 5: Valores de parâmetros intrínsecos e de distorção obtidos com o Toolbox desenvolvido por Bouguet (2002) para as câmeras utilizadas.

Câmeras	$f \cdot s_x$	$f \cdot s_y$	$f \cdot \tau$	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
Câmera 1 (f=8mm)	773,31	776,73	0	329,56	276,34	-0,3571	0,1562	0,0000	-0,00180	-0,00277
Câmera 2 (f=4mm)	408,61	409,17	0	334,08	248,91	-0,3332	0,0995	0,0000	0,00017	-0,00026
Câmera 3 (f=4mm)	418,55	419,24	0	325,53	251,28	-0,3986	0,1763	0,0000	0,00147	-0,00130
Câmera 4 (f=8mm)	800,79	802,65	0	339,05	272,27	-0,3571	0,1520	0,0000	-0,00264	-0,00192

A partir dos dados apresentados, é possível deduzir que não existe relação entre os parâmetros de distorção calculados e a distância focal. Ou seja, os primeiros relacionam-se apenas com as propriedades das lentes e com os mecanismos que as posicionam e as deslocam quando os ajustes são feitos.

Nas digitalizações corrigidas dos pontos de controle, verifica-se o deslocamento desses pontos em relação às coordenadas sem correção, de forma que cada prumo passa a ser visto como uma linha reta na imagem. Além disso, verifica-se um maior deslocamento desses pontos quanto mais próximos estiverem das bordas da tela, especialmente nas câmeras com distância focal de 4mm. Essa constatação não só vai de encontro com os autores que verificaram as distorções das imagens mais acentuadamente nas bordas (Challis & Kerwin, 1992; Chen et al., 1994; Yanai, 1996; Kwon, 1999; Gourgoulis et al., 2008), como também a eficácia da metodologia em apresentar as imagens corrigidas dos prumos como linhas retas, tal qual na realidade.

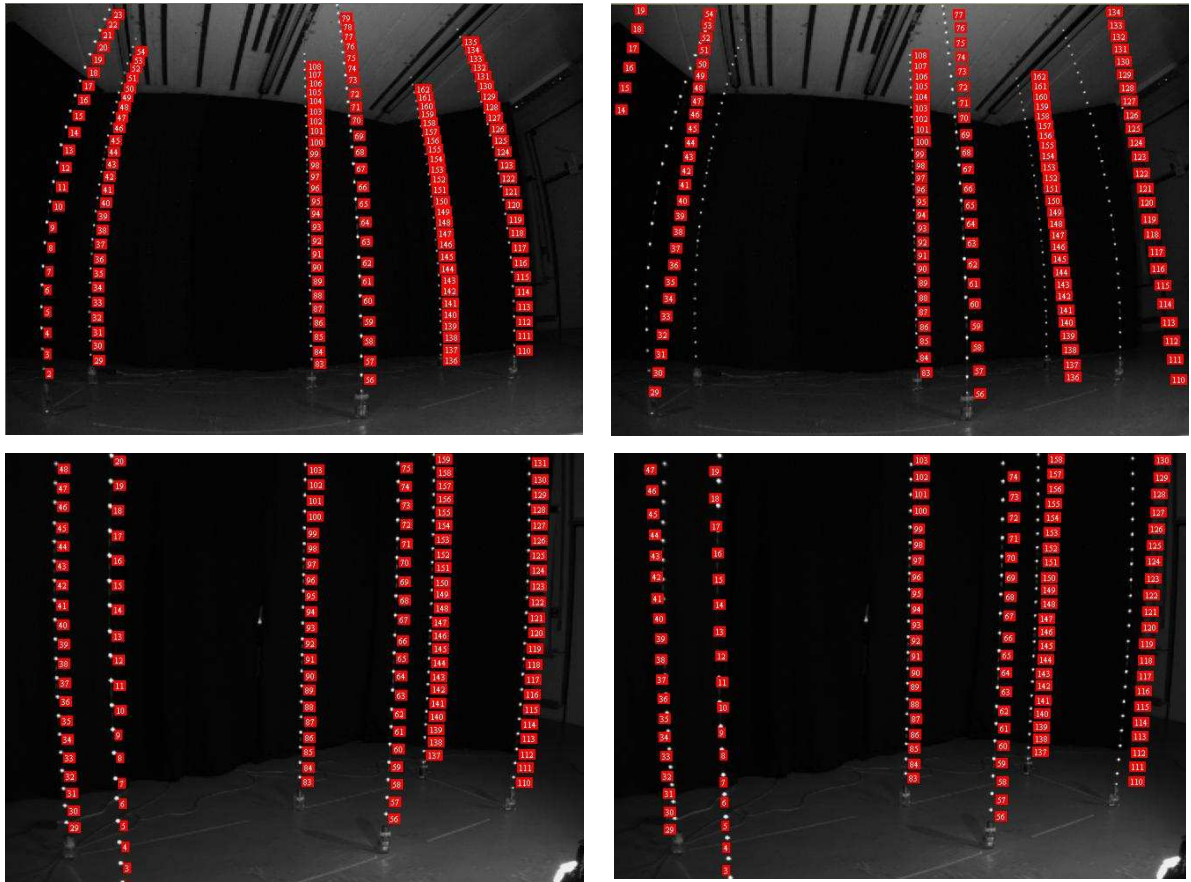


Figura 34: Comparação entre as digitalizações dos pontos de calibração do Conjunto 1 não corrigidos (esq) e as corrigidas (dir), para as câmeras com $f=4mm$ (linha de cima) e $f=8mm$ (linha de baixo). Apesar de alguns pontos não serem mais visualizados em tela, suas coordenadas (negativas) ainda são conhecidas e utilizadas nos cálculos.

A tabela a seguir apresenta as 12 reconstruções da cruz corrigidas a partir dos parâmetros de distorção obtidos:

Tabela 6: Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz. Grupo 1 (2 câmeras, $f=8mm$) corrigido.

Conjuntos	Média	Mediana	$E_{\min}$	$E_{\max}$	SD	SD^2	RMS	RMS (%)	E_{abs}	Acurácia
Todos PC (1)	284,95	284,98	0,07	3,69	0,99	0,97	1,08	0,38	0,83	1,08
18 PC (2)	283,79	283,64	0,08	4,60	1,20	1,43	2,00	0,70	1,77	2,00
12 PC (3)	284,00	283,83	0,18	5,43	1,70	2,90	2,20	0,77	1,92	2,20
8 PC (4)	283,95	283,80	0,13	5,64	1,78	3,15	2,29	0,80	1,99	2,29

Tabela 7: Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz. Grupo 2 (2 câmeras, $f=4\text{mm}$) corrigido.

Conjuntos	Média	Mediana	$E_{\min}$	$E_{\max}$	SD	SD^2	RMS	RMS (%)	E_{abs}	Acurácia
Todos PC (1)	285,44	285,26	0,16	5,68	1,61	2,59	1,61	0,56	1,32	1,61
18 PC (2)	291,25	291,67	0,43	12,21	2,68	7,17	6,43	2,25	5,85	6,43
12 PC (3)	292,89	292,56	0,62	17,99	4,61	21,29	8,79	3,08	7,50	8,80
8 PC (4)	291,66	292,18	0,53	12,52	2,74	7,52	6,83	2,39	6,26	6,83

Tabela 8: Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz. Grupo 3 (4 câmeras) corrigido.

Conjuntos	Média	Mediana	$E_{\min}$	$E_{\max}$	SD	SD^2	RMS	RMS (%)	E_{abs}	Acurácia
Todos PC (1)	284,92	284,97	0,14	5,25	1,65	2,71	1,71	0,60	1,39	1,71
18 PC (2)	287,58	287,41	0,25	5,48	1,25	1,57	2,51	0,88	2,19	2,52
12 PC (3)	286,40	286,46	0,13	3,69	1,18	1,40	1,55	0,54	1,27	1,55
8 PC (4)	287,13	287,05	0,11	4,71	1,14	1,30	2,07	0,73	1,75	2,07

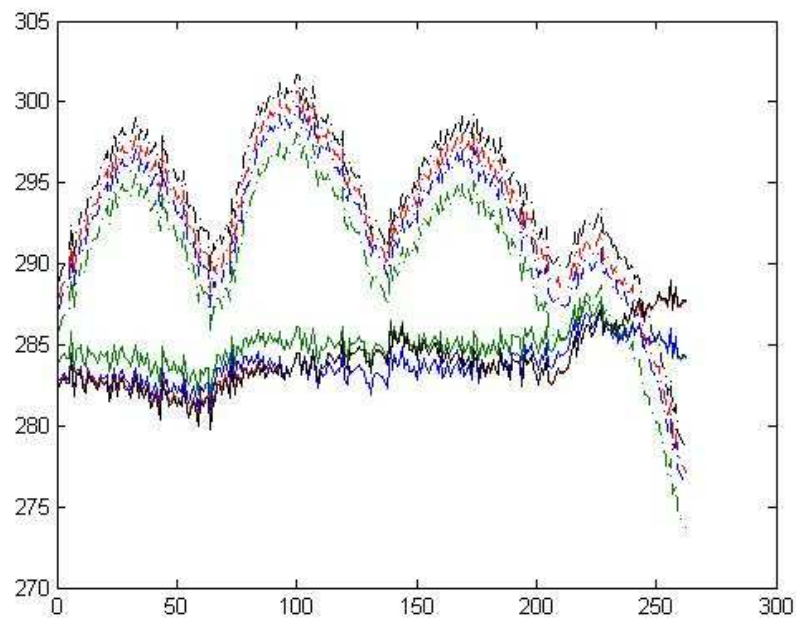


Figura 35: Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 1 corrigido (linha contínua).

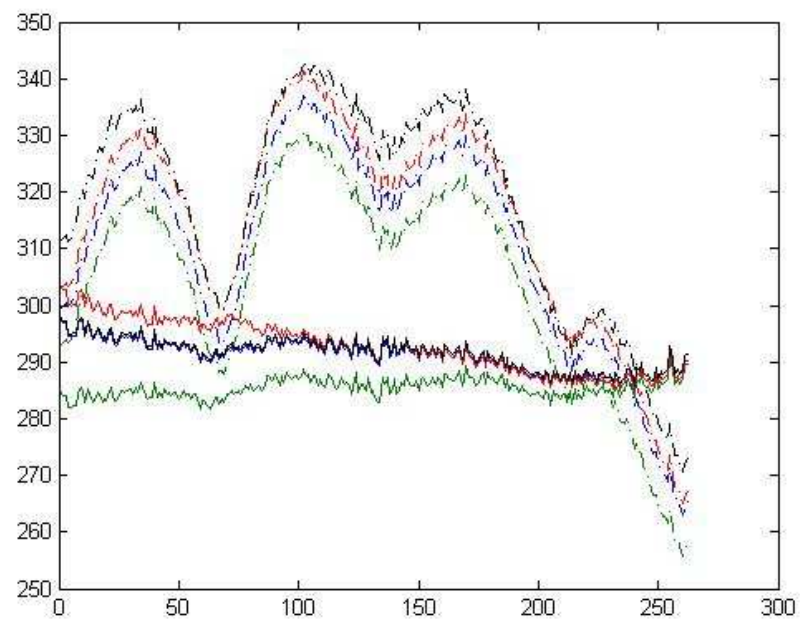


Figura 36: Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 2 corrigido (linha contínua).

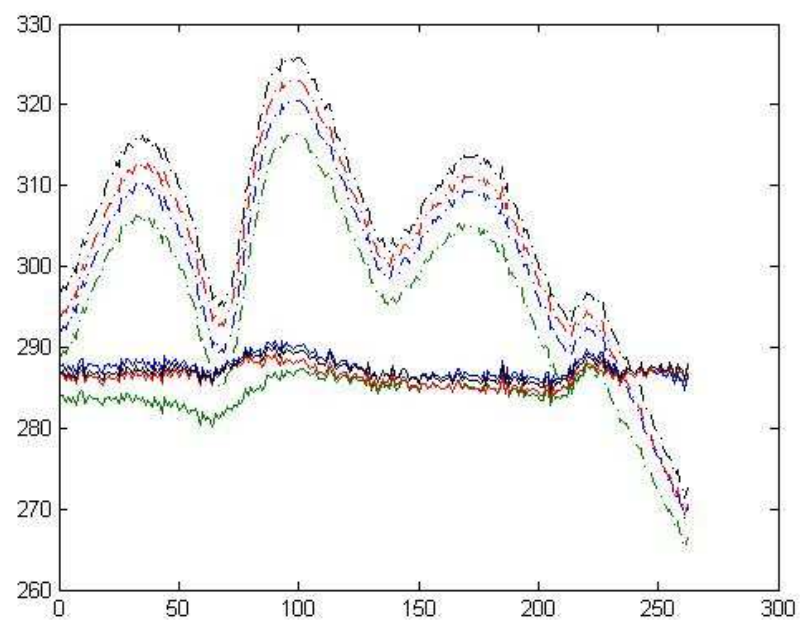


Figura 37: Média das duas distâncias da cruz em cada frame para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto) do Grupo 3 corrigido (linha contínua).

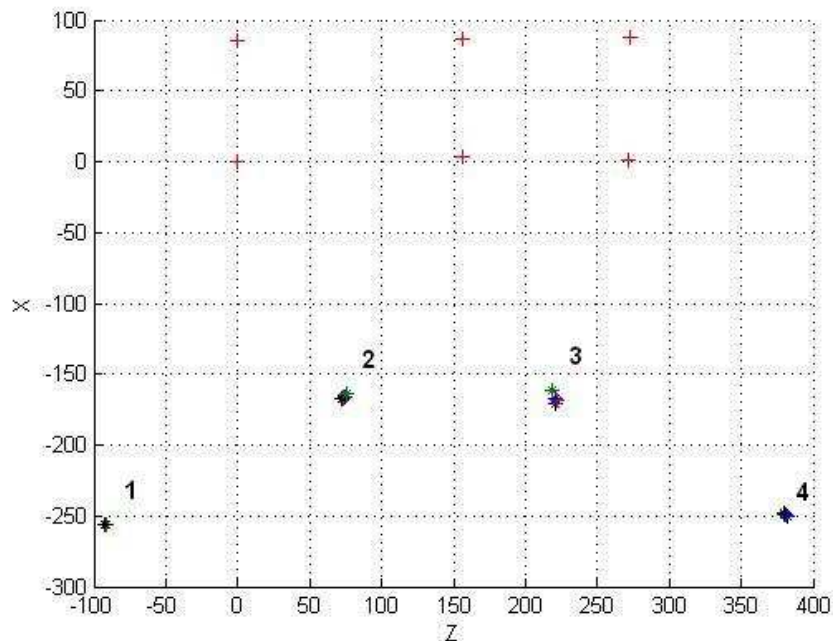


Figura 38: Posição das câmeras 1 a 4 após a correção de distorção em relação ao objeto de calibração (Plano XZ)

Em cada um dos três grupos, a melhora na acurácia é significativa, tanto pela melhora da precisão (diminuição da variância) quanto pela melhora na exatidão (diminuição do erro absoluto). Nos Grupos 1 e 3 e no Conjunto 1 do Grupo 2 (todos os pontos de controle visíveis) são encontrados valores de acurácia inferiores a 3mm, e valores de RMS percentual inferiores aos encontrados por Yanai (1996). O menor valor de RMS percentual encontrado (0,38%, Grupo1 Conjunto1) é ainda melhor que o encontrado por Gougoulis et al. (2007) em um volume de 1m^3 (0.39%), mesmo com um volume de análise maior (aproximadamente 6 vezes maior) e com câmeras mais próximas e em ajuste de grande angular, o que permite afirmar que a correção da distorção pela metodologia proposta permite uma maior flexibilidade quanto ao posicionamento das câmeras de vídeo.

Nos três gráficos sem a correção, verifica-se o surgimento de máximos e mínimos locais. Essas regiões coincidem nos três gráficos entre si, uma vez que o centro e as fronteiras do volume de análise localizavam-se aproximadamente nos centros e bordas das imagens das quatro câmeras. Os instantes onde ocorreram os máximos locais referem-se aos momentos nos quais a cruz passava na linha que dividia horizontalmente a tela ao meio; já os mínimos locais ocorreram todas as vezes em que a cruz atingia as regiões mais altas ou mais baixas em tela, ou quando se

aproximou mais da borda esquerda. Quando foram feitas as correções nas digitalizações dos pontos da cruz, assim como na correção das digitalizações dos pontos de calibração, foi possível perceber que quando mais próximas das bordas da tela (limites do volume de análise), maiores eram os efeitos das correções. Além disso, as distâncias $dP1P2$ e $dP3P4$ tornavam-se ligeiramente maiores. Por não incorporar os efeitos da distorção óptica, a metodologia baseada no DLT interpreta a relação entre as dimensões tridimensionais e as coordenadas em tela como lineares. As dimensões da cruz nas bordas, sendo menores do que o esperado sem os erros, eram interpretadas como se o objeto rígido pudesse se dilatar e encolher durante a movimentação. A incorporação dos parâmetros de distorção nas digitalizações dos pontos de controle e dos pontos da cruz eliminou ou minimizou o surgimento de máximos e mínimos locais, dando às curvas de reconstrução um caráter mais constante. Porém, é importante ressaltar que, uma vez que a resolução torna-se menor nas bordas da tela com uma distância focal em ajuste de grande angular, a medição nesse momento pode ficar mais suscetível a erros randômicos. Isso porque, embora a correção da distorção tenha se mostrado satisfatória, ela depende de localização precisa do ponto de controle ou validação na imagem distorcida, cada vez mais difícil com uma menor resolução. A dilatação da imagem decorrente da correção da distorção pode vir a potencializar o erro randômico da imagem original.

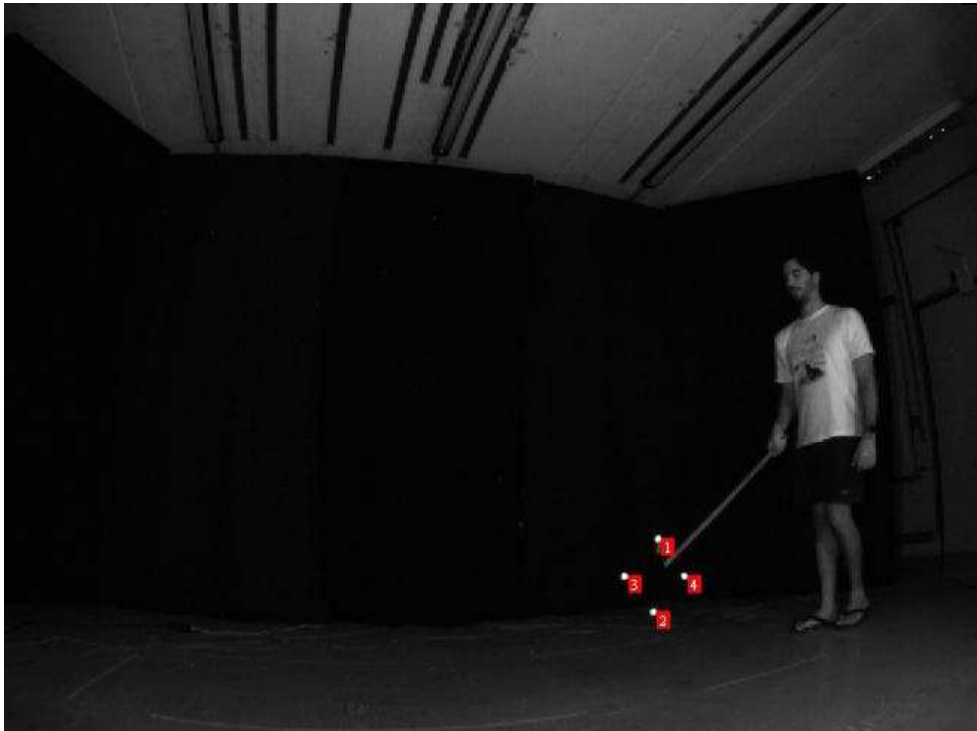


Figura 39: Imagem da cruz digitalizada sem correção do frame 68 (Câmera 2), região de mínimo local nos gráficos.

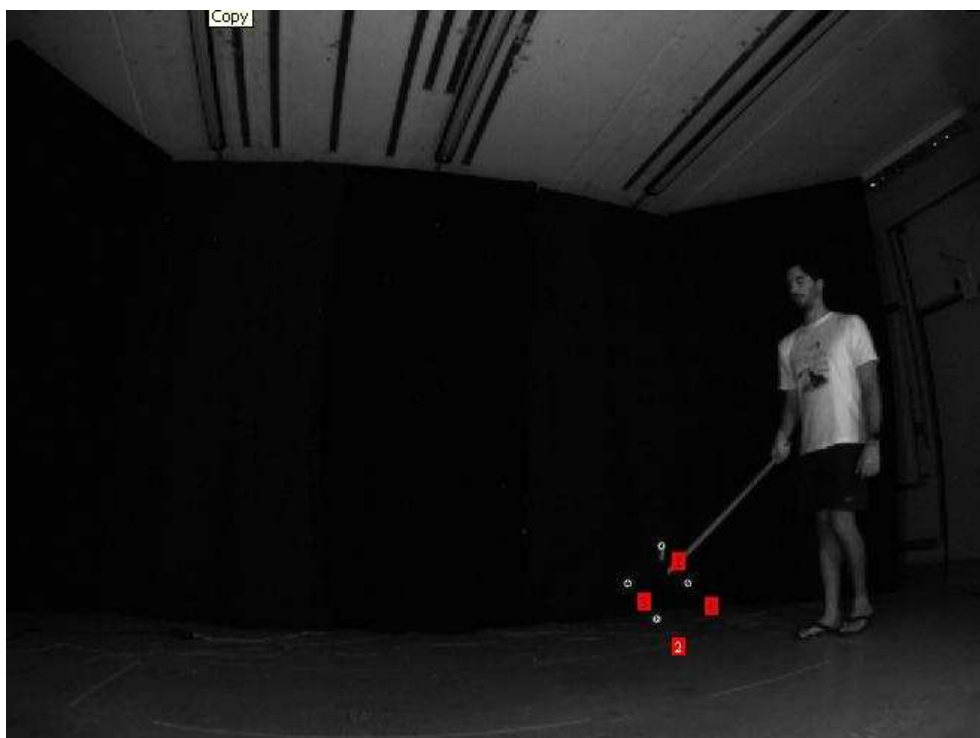


Figura 40: Imagem da cruz digitalizada e corrigida do frame 68 (Câmera 2), região de mínimo local nos gráficos.

Embora seja bastante significativa as melhoras obtidas no Grupo 2, os resultados encontrados nos Conjuntos 2-4 demonstram uma baixa acurácia, em comparação com os valores obtidos pelas melhores configurações sem correção. Uma possível razão para isso é com relação à proporção entre a distância de uma câmera a outra, denominada base, e a distância dessa base ao volume analisado. Essa questão, levada em conta na literatura (Wood & Marshall, 1986; Challis & Kerwin, 1992; Chen et al., 1994; Allard et al. 1995; Yanai, 1996; Psycharakis et al., 2005; Gougoulis et al, 2007), foi negligenciada nesse estudo. Allard et al. (1995) menciona que usando um mesmo set de câmeras, o erro varia aproximadamente de forma linear com a distância do objeto para a base das câmeras. Wood & Marshall encontraram valores superiores de acurácia na proporção distância-base de 1:2, comparadas com uma proporção de 1:1. No estudo aqui apresentado, essa relação no par de câmeras com $f=4mm$ era de aproximadamente 4:3. É provável, portanto, que a proporção distância-base relacione-se menos com os erros oriundos de distorções, e mais com a correção dos efeitos de erros randômicos. Câmeras mais afastadas entre si e com um maior ângulo formado por seus eixos ópticos proporcionam uma maior diferença entre os parâmetros extrínsecos (posição e orientação) das câmeras utilizadas. Além disso, o posicionamento das câmeras deve ser realizado de forma que permita uma boa resolução de cada uma das direções cartesianas (Gourgoulis et al. 2008). Nesse caso, a posição das câmeras com $f=4mm$ privilegiou as resoluções das direções Y (altura) e Z (comprimento), em detrimento da direção X (largura). Porém, com a utilização de uma maior quantidade de pontos de controle (Conjunto 1) foi possível melhorar consideravelmente a acurácia da reconstrução, com resultados próximos aos obtidos nos Grupos 1 e 3.

Nesses dois grupos, por sua vez, em valores absolutos, a acurácia foi menos influenciada pela quantidade de pontos de controle utilizados. Isso significa que uma menor quantidade de pontos de controle passa a ter uma menor influência nos resultados finais com a metodologia proposta e com os devidos cuidados no posicionamento e orientação das câmeras utilizadas. Essa menor influência também é verificada comparando-se os posicionamentos das câmeras a partir dos 11 parâmetros do DLT para cada conjunto, variando menos do que nos conjuntos sem correção. A utilização de uma menor quantidade de pontos de controle nos objetos de calibração é bastante vantajosa, pois diminui consideravelmente o tempo empregado no processo de obtenção de suas coordenadas tridimensionais com instrumentos de alta precisão e também no

processo de medição.

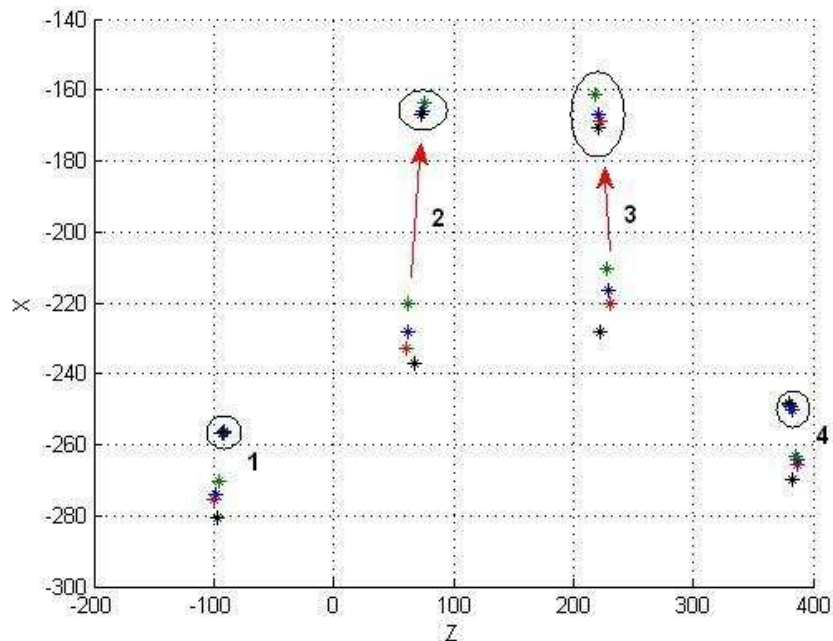


Figura 41: Comparação da posição entre as câmeras 1, 2, 3 e 4 corrigidas (circundadas) e não corrigidas, para os Conjuntos 1 (verde), 2 (azul), 3 (vermelho) e 4 (preto).

Os valores de acurácia para o Grupo 3 tornaram-se muito mais próximos dos valores encontrados no Grupo 1 quando ambos são corrigidos, sendo inclusive os conjuntos com 12 e 8 PC com acurácia superior aos respectivos no grupo com o par de câmeras com $f=8mm$. Isso significa que a inclusão de mais câmeras, mesmo com configurações críticas de distância focal ou posicionamento em relação às demais, passa a interferir muito menos nos resultados finais quando corrigidas as distorções, podendo inclusive apresentar resultados melhores. Essa situação pode representar uma considerável vantagem em análises de movimentos mais complexos, possibilitando que câmeras sejam posicionadas em locais estratégicos para uma melhor captura de uma determinada fase do movimento, que na ausência de correção poderia até piorar os resultados finais.

5.2 - Teste 2:

Primeiramente são apresentados os valores dos parâmetros da matriz intrínseca obtidos:

Tabela 9: Valores de parâmetros intrínsecos e de distorção obtidos com o Toolbox desenvolvido por Bouguet (2002) para as câmeras utilizadas.

Câmeras	$f \cdot s_x$	$f \cdot s_y$	$f \cdot \tau$	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
Câmera 1	428,80	428,34	0	345,44	248,97	-0,3612	0,1217	0,0000	-0,00148	-0,00113
Câmera 2	420,58	419,49	0	319,27	244,75	-0,3746	0,1600	0,0000	-0,00076	0,00169
Câmera 3	422,21	420,71	0	321,81	250,10	-0,3844	0,1498	0,0000	-0,00089	-0,00108
Câmera 4	428,31	427,74	0	320,35	240,19	-0,3666	0,1756	0,0000	0,00190	-0,00384

Como era de se esperar, a reconstrução a partir do Conjunto 1 apresentou baixa acurácia. Todos os demais conjuntos, apesar de utilizarem quantidade inferior de PC, ou mesmo menor volume de calibração, obtiveram resultados melhores que o primeiro. Os conjuntos 2, 3 e 4 apresentaram resultados satisfatórios, e assim como nos resultados apresentados por Gourgoulis et al. (2008), os valores de RMS percentual encontraram-se abaixo de 1%. Entretanto, o movimento no presente estudo foi relativo a um volume de análise de 25m³, enquanto que o utilizado pelos autores era de apenas 3m³.

Os resultados encontrados nos conjuntos 5 e 6, cujos volumes de calibração eram aproximadamente 11,5 e 20,5 vezes menores, respectivamente, que o volume de análise, apesar de piores, também foram considerados satisfatórios. Porém, devem ser considerados os valores de erros máximos obtidos nesses últimos conjuntos (12,60 e 17,01mm, respectivamente). Em ambas as curvas, é possível verificar a formação de máximos e mínimos locais, diferentemente dos Conjuntos 2 a 4.

Alguns fatores podem estar relacionados à perda de acurácia nos Conjuntos 5 e 6. Primeiramente, deve-se levar em consideração o posicionamento do objeto de calibração em relação ao volume de análise. É provável que o melhor posicionamento possível desse objeto de calibração seja aquele no qual, ao mesmo tempo que seu centro fique próximo do centro do volume de análise, as coordenadas bidimensionais de seu centro também estejam próximas do centro da tela. Além disso, deve-se tentar minimizar ao máximo o surgimento de erros nos processos de medição dos pontos de controle. Nesse segundo teste, é possível que a utilização de

pontos de controle de 10mm de diâmetro tenha influenciado negativamente os resultados obtidos. As resoluções em tela desses PC ficaram muito pequenas para as dimensões do volume de análise, o que pode ter potencializado os erros randômicos.

Tabela 10: Variáveis obtidas na reconstrução das duas distâncias da cruz no Teste 2.

Conjuntos	Média	Mediana	$E_{\min}$	$E_{\max}$	SD	SD^2	RMS	RMS (%)	E_{abs}	Acurácia
Todos PC (1)	280,79	285,91	0,16	33,82	11,98	143,50	12,83	4,50	9,34	12,84
18 PC (2)	285,39	285,39	0,10	7,40	2,22	4,94	2,22	0,78	1,79	2,22
12 PC (3)	285,38	285,38	0,05	7,05	2,40	5,75	2,40	0,84	1,96	2,40
8 PC (4)	285,32	285,26	0,14	7,19	2,81	7,88	2,81	0,98	2,35	2,81
12 PC menor (5)	286,52	286,43	0,13	12,60	3,56	12,69	3,73	1,31	3,02	3,73
8 PC menor (6)	284,36	284,87	0,22	17,01	5,65	31,92	5,74	2,01	4,56	5,74

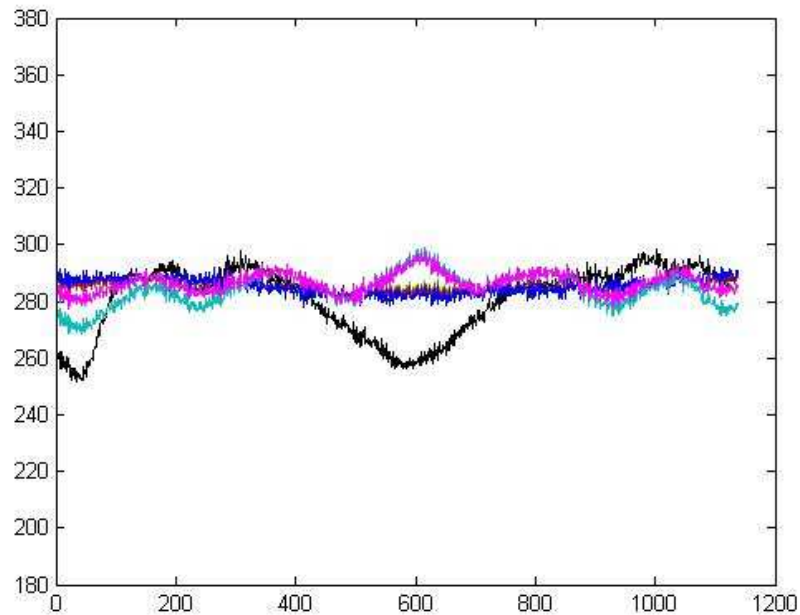


Figura 42: Reconstruções dos 6 Conjuntos de pontos de controle: 1 (preto), 2 (verde), 3 (vermelho), 4 (azul escuro), 5 (lilás) e 6 (azul turquesa).

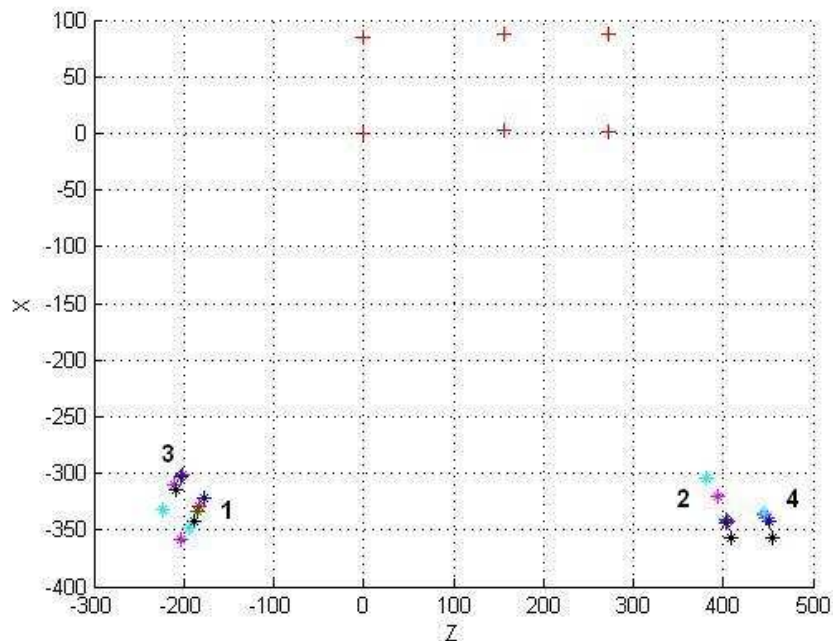


Figura 43: Posição das câmeras 1 a 4 a partir dos 6 Conjuntos de pontos de controle: 1 (preto), 2 (verde), 3 (vermelho), 4 (azul escuro), 5 (lilás) e 6 (azul turquesa), plano XZ.

Chama a atenção, porém, o fato de que o Conjunto 1 teve uma acurácia superior a encontrada no respectivo conjunto do Grupo 2 sem correção (Teste 1). Da mesma forma, as reconstruções corrigidas dos Conjuntos 2, 3 e 4 deste segundo teste obtiveram acurácia superior aos respectivos conjuntos corrigidos no Grupo 2. A comparação é pertinente, pois no Grupo 2 também foram usadas apenas câmeras com distância focal de 4mm, porém o volume de calibração não havia sido extrapolado. E, ao contrário do que se imaginava, os resultados acabaram sendo piores que os respectivos encontrados no segundo teste.

Existem duas diferenças entre ambos os testes que parecem ter sido decisivas. Primeiramente, a utilização de quatro câmeras, e não apenas duas, pode ter contribuído para uma melhora na acurácia, uma vez que fornece uma maior quantidade de informações aos cálculos no DLT (obtem-se as coordenadas dos pontos durante a reconstrução a partir de 8 equações; com duas câmeras, 4). Outra diferença diz respeito ao posicionamento das câmeras, em especial à questão da relação entre a base e a distância. As 4 câmeras foram dispostas em pares, de forma que em cada par as câmeras possuíam características muito semelhantes de posição e orientação, porém esses parâmetros extrínsecos diferenciaram-se entre os pares, estabelecendo uma boa razão entre a base desses pares com a distância para o centro do volume de análise.

Como forma de verificar a influência de ambos os fatores, a reconstrução da cruz a partir de 18 pontos de controle foi feita novamente em três situações distintas: utilizando duas câmeras de um mesmo par (câmeras 1 e 3), uma câmera de cada par (1 e 2) e três câmeras (1, 2 e 3).

Tabela 11: Valores para as reconstruções utilizando as câmeras com $f=4\text{mm}$ e o conjunto de 18 PC, realizadas nos Testes 1 e 2.

Teste	Quantidade de câmeras	Média	Mediana	$E_{\min}$	$E_{\max}$	SD	SD^2	RMS	RMS (%)	E_{abs}	Acurácia
Teste 1	2 câmeras (razão 1:0,75)	291,25	291,67	0,43	12,21	2,68	7,17	6,43	2,25	5,85	6,43
Teste 2	4 câmeras	285,39	285,39	0,10	7,40	2,22	4,94	2,22	0,78	1,79	2,22
Teste 2	3 câmeras	285,55	285,45	0,09	8,12	2,52	6,35	2,52	0,88	2,02	2,53
Teste 2	2 câmeras (razão 1:1,70)	285,47	285,58	0,12	9,95	2,93	8,58	2,93	1,03	2,36	2,93
Teste 2	2 câmeras (razão 1:0,09)	303,54	299,09	0,68	175,06	27,06	732,17	32,57	11,41	23,45	32,58

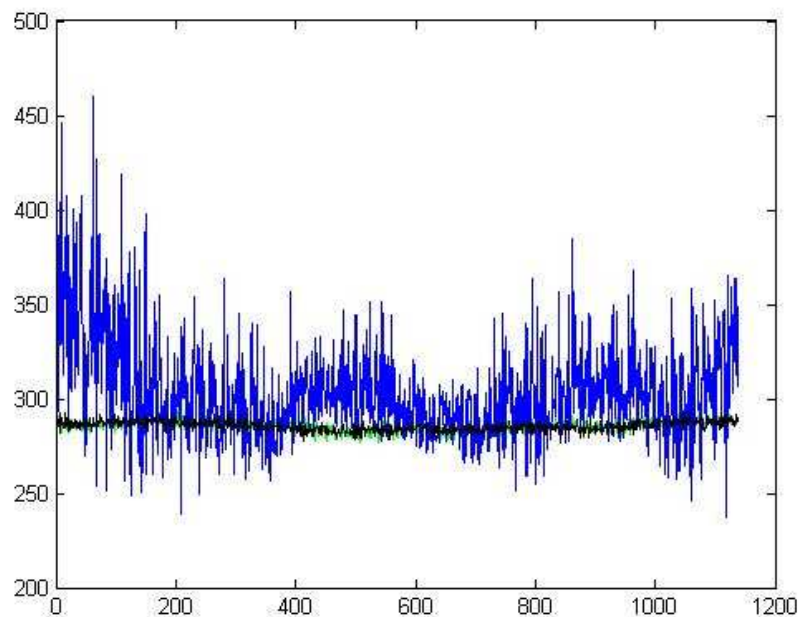


Figura 44: Gráficos das reconstruções utilizando 18 PC, com 4 câmeras (preto), 3 câmeras (vermelho), par de câmeras 1 e 2 (verde) e par de câmeras 1 e 3 (azul).

A acurácia obtida na reconstrução a partir do par de câmeras 1 e 3 foi consideravelmente baixa, pior inclusive que o resultado obtido no Teste 1, no qual a relação distância/base foi mais adequada (apesar do par 1 e 3 possuir um posicionamento que possibilitou uma melhor resolução das três direções do volume de análise em tela) e não houve a extrapolação do volume de calibração. Entretanto, como mostram os valores obtidos com as demais configurações de

reconstrução, a questão da extrapolação parece ser a menos influente. Os valores obtidos pelo par de câmera 1 e 2 foram consideravelmente melhores que os verificados no Teste 1, indicando uma forte influência dessa relação distância/base na acurácia das reconstruções mesmo com correção para distorção óptica. A reconstrução do objeto com três câmeras, apesar do posicionamento desfavorável da câmera 3 em relação à câmera 1, apresentou resultados de acurácia ainda melhores que o par 1 e 2, reafirmando a hipótese de que mesmo com a adição de mais uma câmera de vídeo com valores de parâmetros intrínsecos e extrínsecos críticos em relação às demais, a acurácia da reconstrução não será afetada significativamente (podendo inclusive se tornar melhor) quando utilizada a metodologia do DLT cujas digitalizações foram corrigidas a partir dos parâmetros de distorção. A reconstrução com 4 câmeras apresentou os melhores resultados, porém, como pode-se perceber pelo comportamento das curvas no gráfico, a melhora na acurácia em relação às reconstruções com três câmeras e com o par 1 e 2 é mínima.

6 Conclusão

Foi possível verificar que a utilização dos parâmetros de distorção na correção das coordenadas bidimensionais dos pontos de calibração e de referência do objeto reconstruído contribuiu para uma efetiva melhora tanto na exatidão quanto na precisão das reconstruções tridimensionais a partir do DLT.

Os resultados apresentados em ambos os testes indicam que é possível a utilização de menores objetos de calibração, contendo uma quantidade menor de pontos de calibração, para movimentos em grandes volumes de análise, sem perda de acurácia. Essa vantagem é de grande importância para as pesquisas na área, uma vez que permite a construção, montagem, mensuração e transporte de objetos de calibração mais práticos. Além disso, é possível a calibração de maiores volumes de análise, possibilitando um aumento no potencial de análise dos movimentos específicos da natação, como por exemplo, mais de um ciclo de movimento.

O posicionamento das câmeras também se tornou mais flexível, permitindo que se localizem mais próximas aos movimentos analisados. Isso porque a metodologia se mostrou eficiente para a correção das distorções em decorrência da utilização de um campo de visão mais amplo (com o ajuste da distância focal para grande angular). Essa configuração de câmeras pode ser interessante, por exemplo, para se filmar o plano frontal de um nadador, pois caso não fossem feitas as correções das distorções, as câmeras precisariam ser posicionadas em uma piscina de grande profundidade. Porém, uma desvantagem dessa configuração é a perda de resolução nas bordas da tela, uma vez que as distorções tornam a imagem do objeto menor nessas regiões. Isso potencializa o surgimento de erros de medição, que com a correção das distorções, também se tornam maiores. Duas possíveis soluções para esse problema seriam: (i) realizar a medição na imagem corrigida, ao invés de corrigir as coordenadas bidimensionais da imagem distorcida; e (ii) a utilização de câmeras de alta definição, pois uma melhor resolução permite uma maior precisão na localização dos referenciais desejados.

A metodologia proposta não foi suficiente para a correção dos erros em função da utilização de um par de câmeras com posição e orientação muito similares, pois nessas situações há uma maior influência de erros oriundos do processo de medição. Entretanto, na existência de um par de câmeras com uma relação distância/base favorável à minimização de erros

randômicos, a inclusão de uma terceira câmera, mesmo que não estabeleça uma relação distância/base favorável com qualquer uma das duas, pode inclusive melhorar a qualidade das reconstruções.

Apesar dos testes não terem sido realizados em ambiente aquático, os dados encontrados na literatura acerca da relação entre as distorções verificadas em aquisições subaquáticas e no ar, juntamente com os resultados obtidos pelo trabalho apresentado, demonstram que há grandes possibilidades da metodologia funcionar de forma igualmente satisfatória embaixo d'água. A próxima etapa é, portanto, testar a metodologia aqui proposta em análises subaquáticas, levando em consideração os resultados e apontamentos levantados nos testes realizados em laboratório.

Referências

ALLARD, P.; BLANCHI, J.P.; AÏSSAOUI, R. Bases of Three-Dimensional Reconstruction. In: ALLARD, P., STOKES, I.A.F., BLANCHI, J.P. **Three Dimensional Analysis of Human Movement**. USA: *Human Kinetics*, p. 19-39, 1995.

ARELLANO, R. et al. Analysis of 50-, 100-, and 200-m freestyle swimmers at the 1992 Olympic Games. **Journal of Applied Biomechanics**. v.10, p.189-199, 1994.

BARROS, R.M.L. **Concepção e implementação de um sistema para análise cinemática de movimentos humanos**. 1997. Tese (Doutorado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

BOUGUET, J.Y. **Camera Calibration Toolbox for Matlab, Supplied by Computer Vision Research Group, Department of Electric Engineering, California Institute of Technology**. 2002. Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/>. Acesso em: 12 fev. 2009.

BROWN, D.C. Close-Range Camera Calibration. **Photogrammetric Engineering**, p. 855-866, 1971.

CAPPAERT, J.M.; PEASE, D.L.; TROUP, J.P. Three-dimensional analysis of the men's 100-m freestyle during the 1992 Olympic Games. **Journal of Applied Biomechanics**. v. 11, p. 103-112, 1995.

CHALLIS, J.H.; KERWIN, D.G. Accuracy assessment and control point configuration when using the DLT for photogrammetry. **Journal of Biomechanics**, v. 25, p. 1053-1058, 1992.

CHEN, L.; ARMSTRONG, C.W.; RAFTOPOULOS, D.D. An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the Direct Linear Transformation technique. **Journal of Biomechanics**. v. 27, p. 493-500, 1994.

CLARKE, T.A.; FRYER, J.G. The development of camera calibration methods and models. **Photogrammetric Reconstruction**. v. 16, p. 51-66, 1998.

COELHO, M.C.F.S.P.; TAVARES, J.M.R.S. **Método de Calibração de Câmeras Proposto por Zhang**. Relatório Interno, Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental, p. 1-11. Disponível

em: < http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/relatorios/Relatorio_zhang.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2009.

COLEMAN, S.; RANKIN, A. A three-dimensional examination of the planar nature of the golf swing. **Journal of Sports Science**. v. 23, p. 227-234, 2005 apud PSYCHARAKIS, S.; SANDERS, R.H.; MILL, F. A calibration frame for 3D swimming analysis. IN: XXIII ISBS SYMPOSIUM, Beijing, v.23, p. 901-904, 2005.

GOURGOULIS, V. et al. Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 11, p. 90-95, 2008.

GREAVES, J.O.B. Instrumentation in Video-Based Three-Dimensional Systems. In: ALLARD, P.; STOKES, I.A.F.; BLANCHI, J.P. **Three Dimensional Analysis of Human Movement**. USA: *Human Kinetics*, p. 41-55, 1995.

HATZE, H. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. **Journal of Biomechanics**. v. 21, p. 533-538, 1988.

HAY, J.G.; GEROT, J.T. Periscope systems for recording the underwater motions of a swimmer. **International Journal of Sport Biomechanics**. v. 7, p. 392-399, 1991.

HAY, J.G.; THAYER, A.M. Flow visualization of competitive swimming techniques: the Tufts Method. **Journal of Biomechanics**. v. 22, p. 11-19, 1989.

HEIKKILÄ, J.; SILVÉN, O. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. **Computer Vision and Pattern Recognition**. San Juan, Puerto Rico, p. 1106-1112, 1997.

KWON, Y.H. Object Plane Deformation Due to Refraction in Two-Dimensional Underwater Motion Analysis. **Journal of Applied Biomechanics**. v. 15, p. 396-403, 1999.

LAM, T.C.; FRANK, C.B.; SHRIVE, N.G. Calibration characteristics of a video dimension analyzer (VDA) system. **Journal of Biomechanics**. v. 25, p. 1227-1231, 1992.

LADIN, Z. Three-Dimensional Instrumentation. In: ALLARD, P.; STOKES, I.A.F.; BLANCHI, J.P. **Three Dimensional Analysis of Human Movement**. USA: *Human Kinetics*, p. 3-17, 1995.

LAVEST, J.M.; RIVES, G.; LAPRESTÉ, J.P. Underwater camera calibration. **Lecture Notes on Computer Science**. v. 1843, p. 654-668, 2000.

LAUDER, M.A.; DABNICHKI, P. Estimate propulsive forces – sink or swim? **Journal of Biomechanics**. v. 38, p. 1984-1990, 2005.

LAUDER, M.A.; DABNICHKI, P.; BARTLETT, R.M. Improved accuracy and reliability of sweepback angle, pitch angle and hand velocity calculations in swimming. **Journal of Biomechanics**. v. 34, p. 31-39, 2001.

MELEN, T. **Geometrical modelling and calibration of video cameras for underwater navigation**. Tese (Doutorado)-Norges tekniske høgskole, Institutt for teknisk kybernetikk, 1994 apud HEIKKILÄ, J.; SILVÉN, O. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. **Computer Vision and Pattern Recognition**. San Juan, Puerto Rico, p. 1106-1112, 1997.

MILLER, N. R; SHAPIRO, R.; MCLAUGHLIN, T. M. A technique for obtaining spatial kinematic parameters of segments of biomechanical systems from cinematographic data. **Journal of Biomechanics**. v. 13, p. 535-547, 1980.

MORE, J. The levenberg-marquadt algorithm, implementation and theory. In: WATSON, G.A. **Numerical Analysis**. Springer-Verlag, 1977 apud ZHANG, Z. **A flexible new technique for camera calibration**. 1999. Disponível em: < <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/Papers/TR98-71.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2009

PAYTON, C.J.; BARTLETT, R.M. Estimation of propulsive forces in swimming from three-dimensional kinematic data. **Journal of Sports Sciences**. v. 13, p. 447-454, 1995.

PAYTON, C.J.; HAY, J.G.; MULLINEAUX, D.R. The effect of body roll on hand speed and hand path in front crawl swimming – A simulation study. **Journal of Applied Biomechanics**. v. 13, p. 300-315, 1997.

PAYTON, C.J.; BALTZOPOULOS V.; BARTLETT, R. Contributions of rotations of the trunk and upper extremity to hand velocity during front crawl swimming. **Journal of Applied Biomechanics**. v. 18, p. 243-256, 2002 apud PSYCHARAKIS, S.; SANDERS, R.H.; MILL, F. A calibration frame for 3D swimming analysis. IN: XXIII ISBS SYMPOSIUM, 23, p. 901-904, 2005, Beijing.

PERS, J. et al. Observation and analysis of large-scale human motion. **Human Movement Science**. v. 21, p. 295-311, 2002.

PSYCHARAKIS, S. et al. Rolling actions of shoulders and hips in freestyle swimming. **XXV ISBS Symposium**, p. 83-86, 2007.

PSYCHARAKIS, S.; SANDERS, R.H. Validity of the use of a fixed point for intracycle velocity calculations in swimming. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 12, n. 2, p. 262-265, 2008.

PSYCHARAKIS, S.; SANDERS, R.H.; MILL, F. A calibration frame for 3D swimming analysis. IN: XXIII ISBS SYMPOSIUM, Beijing, v. 23, p. 901-904, 2005.

REMONDINO, F.; FRASER, C. Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons. In: ISPRS COMMISSION V SYMPOSIUM 'IMAGE ENGINEERING AND VISION METROLOGY', 36, 2006, Dresden. Disponível em: <http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/fabio/Remondino_Fraser_ISPRSV_2006.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2009.

SANDERS, R.H. Hydrodynamic characteristics of a swimmer's hand. **Journal of Applied Biomechanics**. v. 15, p. 3-26, 1999.

SANDERS, R.H.; CAPPAERT, J.M.; DEVLIN, R.K. Wave characteristics of butterfly swimming. **Journal of Biomechanics**. v. 28, p. 09-16, 1995.

SCHLEIHAUF, R.E. A hydrodynamic analysis of swimming in propulsion. IN: TERAUDS, J.; CLARYS, J.P. **Swimming III, International Series on Sports Science**, v. 8. Baltimore, University Park Press, 1979. p. 70-109 apud LAUDER, M.A.; DABNICHKI, P.; BARTLETT, R.M. Improved accuracy and reliability of sweepback angle, pitch angle and hand velocity calculations in swimming. **Journal of Biomechanics**. v. 34, p. 31-39, 2001.

SILVATTI, A.P. **Metodologia para análise cinemática de volumes respiratórios parciais de nadadores**. 2009. Dissertação (Mestrado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SUITO, H. et al. The effect of fatigue on the underwater arm stroke motion in the 100m front crawl. **Journal of Applied Biomechanics**. v. 24, p. 316-324, 2008.

VEZOS, N. et al. Underwater stroke kinematics during breathing and breath-holding front crawl swimming. **Journal of Sports Science and Medicine**. v. 6, p. 58-62, 2007.

LAUDER, M.A.; DABNICHKI, P.; BARTLETT, R.M. Improved accuracy and reliability of sweepback angle, pitch angle and hand velocity calculations in swimming. **Journal of**

Biomechanics. v. 34, p. 31-39, 2001.

WALTON, J.S. Close-range cine-photogrammetry: A generalized technique for quantifying gross human motion. Dissertação (Mestrado)-Pensilvânia State University, 1981 apud KWON, Y.H. Object Plane Deformation Due to Refraction in Two-Dimensional Underwater Motion Analysis. **Journal of Applied Biomechanics**. v. 15, p. 396-403, 1999.

WOLTRING, H.J. Planar control in multi-camera calibration for 3-D gait studies. **Journal of Biomechanics**. v. 13, p. 39-48, 1980.

YANAI, T. What causes the Body to Roll in Front-Crawl Swimming? **Journal of Applied Biomechanics**. v. 17, p. 28-42, 2001.

YANAI, T. Stroke frequency in front crawl: its mechanical link to the fluid forces required in non-propulsive directions. **Journal of Biomechanics**. v. 36, p. 53-62, 2003.

YANAI, T. Buoyancy is the primary source of generating bodyroll in front crawl swimming. **Journal of Biomechanics**. v. 37, p. 605-612, 2004.

YANAI, T.; HAY, J.G.; GEROT, J.T. Three dimensional videography of swimming with panning periscopes. **Journal of Biomechanics**. v. 29, p. 673-678, 1996.

YANAI, T.; HAY, J.G.; MILLER, G.F. Shoulder impingement in front-crawl swimming: I. A method to identify impingement. **Medicine & Science in Sports & Exercise**. v. 32, p. 21-29, 2000.

YANAI, T.; HAY, J.G. Shoulder impingement in front crawl swimming: II. Analysis of stroke technique. **Medicine & Science in Sports & Exercise**. v. 32, p. 30-40, 2000.

ZHANG, Z. **A flexible new technique for camera calibration**. 1999. Disponível em: <<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/Papers/TR98-71.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2009.