

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional
Programa de Pós-graduação em Ciências do Esporte

Gustavo Ramos Dalla Bernardina

**CÂMERAS DE AÇÃO COMO UM INSTRUMENTO VIÁVEL E CONFIÁVEL PARA
REALIZAR UMA ANÁLISE CINEMÁTICA TRIDIMENSIONAL EM DUPLO MEIO E
AVALIAR A ASSIMETRIA DA BRAÇADA NO NADO CRAWL**

Belo Horizonte
2022

Gustavo Ramos Dalla Bernardina

**CÂMERAS DE AÇÃO COMO UM INSTRUMENTO VIÁVEL E CONFIÁVEL PARA
REALIZAR UMA ANÁLISE CINEMÁTICA TRIDIMENSIONAL EM DUPLO MEIO E
AVALIAR A ASSIMETRIA DA BRAÇADA NO NADO CRAWL**

Versão final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Esporte da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências do Esporte.

Área de Concentração: Treinamento Esportivo

Linha de pesquisa: Análise de métodos para o desempenho humano e esportivo

Orientador: Prof. Dr. André Gustavo Pereira de Andrade

Coorientadora: Profa. Dra. Amanda Piaia Silvatti

Belo Horizonte
2022

B523c Bernardina, Gustavo Ramos Dalla
2022 Câmeras de ação como um instrumento viável e confiável para realizar uma análise cinemática tridimensional em duplo meio e avaliar a assimetria da braçada no nado crawl. [manuscrito] / Gustavo Ramos Dalla Bernardina – 2022.
67 f.: il.

Orientador: André Gustavo Pereira de Andrade
Coorientadora: Amanda Piaia Silvatti

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional.
Bibliografia: f. 57-63

1. Biomecânica – Teses. 2. Cinemática – Teses. 3. Natação – Teses. 4. Esportes – Treinamento técnico – Teses. I. Andrade, André Gustavo Pereira de. II. Silvatti, Amanda Piaia. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional. IV. Título.

CDU: 612.76

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Sheila Margareth Teixeira Adão, CRB 6: n° 2106, da Biblioteca da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional da UFMG.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA, FISIOTERAPIA E TERAPIA OCUPACIONAL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO ESPORTE

ATA DA DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

GUSTAVO RAMOS DALLA BERNARDINA

Às 14:00 horas do dia 06 de maio de 2022, a comissão examinadora de tese, indicada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Esporte, reuniu-se videoconferência, para julgar, em exame final, o trabalho intitulado "CÂMERAS DE AÇÃO COMO UM INSTRUMENTO VIÁVEL E CONFIÁVEL PARA REALIZAR UMA ANÁLISE CINEMÁTICA TRIDIMENSIONAL EM DUPLO MEIO E AVALIAR A ASSIMETRIA DA BRAÇADA NO NADO CRAWL". Abrindo a sessão, o presidente da comissão, Prof. Dr. André Gustavo Pereira de Andrade (UFMG), orientador, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra para o candidato, para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA 93ª TESE DO PPGCE:

Prof. Dr. André Gustavo Pereira de Andrade (orientador) – UFMG

Profa. Dra. Amanda Piaia Silvatti (coorientadora) – UFV

Prof. Dr. Mauro Heleno Chagas – UFMG

Prof. Dr. Renan Alves Resende – UFMG

Prof. Dr. Felipe Arruda Moura – UEL

Prof. Dr. Felipe Pivetta Carpes – UNIPAMPA

Após as indicações, o candidato foi considerado: **APROVADO**

O resultado foi comunicado publicamente para o candidato pelo presidente da comissão examinadora. Nada mais havendo, a tratar o presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da comissão examinadora.

Belo Horizonte, 06 de maio de 2022.



Documento assinado eletronicamente por Felipe Pivetta Carpes, Usuário Externo, em 30/06/2022, às 09:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Andre Gustavo Pereira de Andrade, Coordenador(a) de curso de pós-graduação, em 06/07/2022, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauro Heleno Chagas, Professor do Magistério Superior**, em 12/08/2022, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renan Alves Resende, Professor do Magistério Superior**, em 24/09/2022, às 07:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Arruda Moura, Usuário Externo**, em 28/11/2022, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Amanda Piaia Silvatti, Usuária Externa**, em 20/12/2022, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 1559532 e o código CRC C4DF10E1.

Dedico esse trabalho àqueles que estavam sempre presentes comigo durante todo esse processo, e especialmente a todos que lutam pela ciência.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo ao divino pela minha vida e por me dar a oportunidade de mais essa experiência que, sem dúvidas, foi de muito aprendizado.

Agradeço a toda a minha família. Em especial minha esposa Carolina e nossa filha canina Lua Nova, e principalmente aos meus pais que participaram desse processo parte em vida, parte em espírito, em conexão profunda comigo.

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Esporte da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional e a todos os professores e funcionários da EEEFTO pelo suporte e conhecimento compartilhados nesses anos.

Agradecimento mais que especial ao meu orientador Prof. Dr. André Gustavo Pereira de Andrade e minha coorientadora Profa. Dra. Amanda Piaia Silvatti pelos ensinamentos, convivência, paciência e incentivo para eu trilhar esse processo.

Agradecimento especial aos membros da banca.

Agradeço aos companheiros do BIOLAB, pela convivência diária, com direito a sauna no laboratório (risos), pelos cafés, risadas, diálogos.

Agradeço ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio no desenvolvimento das pesquisas direta e/ou indiretamente.

Agradeço ao esporte e meus companheiros de treino. Foi, é e será essencial em minha vida.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade e confiabilidade das câmeras de ação como um instrumento para realizar análises cinemáticas 3D em duplo meio e avaliar a simetria da braçada no nado crawl. Para isso, o trabalho foi dividido em dois experimentos, nos quais foram utilizadas 12 câmeras de ação posicionadas fora e dentro da água (volume de aquisição estimado em 8 x 3,5 x 3 metros). No primeiro experimento avaliamos a exatidão e a confiabilidade do sistema através de um teste de barra rígida, contendo marcadores que transitaram entre os ambientes (ar e água). Dois marcadores fixados na barra (d : 500 milímetros) foram movimentados continuamente entre os meios, ar e água, dentro do volume de aquisição previamente calibrado e a distância entre esses marcadores foi reconstruída tridimensionalmente em função do tempo. Os resultados encontrados de exatidão de reconstrução 3D (erro médio inferior a 2mm) em relação ao meio em que a barra estava sendo movimentada sugerem que nenhuma dependência específica da magnitude do erro (1,2% a 0,8%) na distribuição dos marcadores no espaço foi verificada. Além disso, os resultados de confiabilidade sugerem que o sistema apresenta dados reprodutíveis a cada nova montagem, com valores de EPM de 1 milímetro e CV abaixo de 1%, indicando uma baixa variabilidade da medida. No segundo experimento comparamos as curvas de deslocamento das braçadas direita e esquerda do nado crawl para avaliar a assimetria. Cinco atletas de natação, do sexo masculino, nadaram o percurso de 25 jardas no nado crawl em três velocidades distintas (velocidade auto selecionada, velocidade correspondente à 85% do teste máximo de 200 jardas [T200] e velocidade correspondente à 100% do T200). Foram fixados marcadores na extremidade distal do terceiro dedo das mãos direita e esquerda e em cada tentativa foram adquiridos dois ciclos de braçada direita e esquerda. Por meio da análise de variância funcional (FANOVA) foi identificada assimetria de deslocamento no eixo Z no nado crawl independentemente da intensidade do exercício. Em conclusão, essa tese sugere que o sistema da análise cinemática 3D utilizando câmeras de ação para uso em duplo meio, com maior quantidade de câmeras e com o método de calibração não-linear possibilitaram o uso de um maior volume de aquisição e mostrou resultados de elevada exatidão e confiabilidade. Além disso, a possibilidade de usar o FANOVA para identificar regiões do movimento influenciadas por determinada condição experimental ou nível de treinamento podem fornecer uma contribuição para a análise e compreensão da assimetria na Biomecânica do esporte.

Palavras-chave: Biomecânica. Análise cinemática tridimensional. Assimetria. Natação.

ABSTRACT

The present study aims to evaluate the feasibility and reliability of action sport cameras as an instrument to perform 3D kinematic analysis in dual-media and to evaluate stroke symmetry in front crawl swimming. For this, the work was divided into two experiments, in which 12 action cameras positioned outside and inside the water (estimated acquisition volume of 8 x 3.5 x 3 meters) were used. In the first experiment, we evaluated the accuracy and reliability of the system through a rigid bar test, containing markers that transited between environments (air and water). Two markers fixed on the bar (d_r : 500 mm) were moved continuously between the media, air and water, within the previously calibrated acquisition volume and the distance between these markers was reconstructed three-dimensionally as a function of time. The results found for 3D reconstruction accuracy (mean error less than 2 mm) in relation to the medium in which the bar was being moved suggest that no specific dependence of the error magnitude (1.2% to 0.8%) in the distribution of markers in space has been verified. Furthermore, the reliability results suggest that the system presents reproducible data with each new assembly, with EPM values of 1 millimeter and CV below 1%, indicating a low measurement variability. In the second experiment, we compared the displacement curves of the right and left arm strokes of freestyle swimming to assess asymmetry. Five male swimmers swam the 25-yard freestyle stroke at three different speeds (self-selected speed, speed corresponding to 85% of the 200-yard maximum test [T200] and speed corresponding to 100% of the T200). Markers were fixed on the distal end of the third finger of the right and left hands and in each attempt two cycles of right and left arm strokes were acquired. Through of the functional analysis of variance (FANOVA) displacement asymmetry in the Z axis was identified in the crawl swimming regardless of the exercise intensity. In conclusion, this thesis suggests that the 3D kinematic analysis system using action sport cameras for use in dual media, with a greater number of cameras and with the non-linear calibration method allowed the use of a greater volume of acquisition and showed results of high accuracy and reliability. Furthermore, the possibility of using FANOVA to identify movement regions influenced by a given experimental condition or training level can provide a contribution to the analysis and understanding of asymmetry in the Biomechanics of sport.

Keywords: Biomechanics. Three-dimensional kinematic analysis. Asymmetry. Swimming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1. (A) Câmeras de ação (GoPro, Black Edition® / USA, dos modelos Hero3+, Hero4 e Hero7) e acessórios utilizados para sua fixação. (B) Posicionamento das câmeras ao redor do volume a ser calibrado na piscina. (C) Controle remoto Wi-Fi GoPro e instrumento com lâmpadas de LED. 21
- Figura 2. (A) Objetos de calibração: estruturas tríades interligadas [$P_n = (X_n, Y_n, Z_n)$, sendo 'n' o número do marcador (1 a 18)] e bastão com dois marcadores (d_n : 250 mm). (B) Definição das coordenadas dos dezoito marcadores (6 câmeras OptiTrack, Prime 17W, NaturalPoint, Inc. USA, aquisição a 360Hz). (C) Posicionamento do objeto de calibração estático na piscina. 23
- Figura 3. Barra rígida se deslocando continuamente entre os ambientes subaquático e fora da água. As trajetórias vermelha e preta representam os dois marcadores fixados na barra.....26
- Figura 4. Reconstrução tridimensional de trajetórias de marcadores. A) Reconstrução dos dois marcadores fixados na barra rígida. As trajetórias vermelha e preta representam marcadores diferentes. B) Reconstrução de dois marcadores, fixados na terceira falange das mãos direita e esquerda, obtendo dois ciclos de braçada direita e esquerda de um nadador. A trajetória vermelha representa o ciclo esquerdo e a preta o ciclo direito.....29
- Figura 5. Comportamento da exatidão de reconstrução 3D da distância entre dois marcadores fixados na barra rígida (d_n : 500 mm) em função da mudança de posição no eixo vertical do volume calibrado. A barra rígida foi movimentada continuamente entre ar e água e a transição entre os meios está localizada próxima ao valor de 2000 milímetros (do eixo X). Os dados em preto representam momentos em que a barra se encontrava no ambiente subaquático. Os dados em vermelho representam momentos em que a barra se encontrava no ambiente fora da água. Os gráficos 1 ao 5 representam aquisições do momento Teste. Os gráficos 6 ao 10 representam aquisições do momento Reteste.....30
- Figura 6. Distribuição do erro médio absoluto nas cinco aquisições do movimento da barra rígida para as condições de teste e reteste.....33
- Figura 7. Marcador esférico preto (\varnothing : 14mm) fixado na extremidade distal do terceiro dedo de cada mão para representar o deslocamento (mm) das braçadas direita e esquerda do nado crawl.....42
- Figura 8. Transformação de série temporal em dado funcional.....44
- Figura 9. Bases de *Fourier*. $\sin(wt)$ é a função seno em vermelho e $\cos(wt)$ é a função cosseno em azul.....45
- Figura 10. Exemplo de reconstrução de um sinal. Suavização ou ajuste realizado com o número de bases ortogonais abaixo (A), acima (B) e com o número ideal (C) (linha contínua nas três imagens), definido pelo critério de erro quadrático médio.....46

Figura 11. Exemplo de sinais antes e após o procedimento registro.....	47
Figura 12. Efeito principal de velocidade entre as curvas de deslocamento (mm) no eixo Z (vertical) nas três diferentes intensidades do nado crawl (auto-selecionada, 85 e 100% da velocidade média alcançada no T200). As curvas representam a média dos perfis de deslocamento no eixo Z (mm) para as diferentes intensidades de exercício (painel superior). O painel inferior indica os intervalos em que foram encontradas diferenças significativas na FANOVA (a linha horizontal pontilhada indica o valor alfa de 5%).....	49
Figura 13. Efeito principal de membro preferido (direito) vs não preferido (esquerdo) entre as curvas de deslocamento no eixo Z (mm) independente da intensidade do nado crawl. As curvas representam a média dos perfis de deslocamento no eixo Z (mm) entre os membros preferido vs não preferido (painel superior). O painel inferior indica os intervalos em que foram encontradas diferenças significativas na FANOVA (a linha horizontal pontilhada indica o valor alfa de 5%).....	50
Figura 14. Efeito principal de velocidade entre as curvas de deslocamento (mm) no eixo X (latero-lateral) nas três diferentes intensidades do nado crawl (auto-selecionada, 85 e 100% da velocidade média alcançada no T200). As curvas representam a média dos perfis de deslocamento no eixo X (mm) para as diferentes intensidades de exercício (painel superior). O painel inferior indica os intervalos em que foram encontradas diferenças significativas na FANOVA (a linha horizontal pontilhada indica o valor alfa de 5%).....	51
Figura 15. Resultados da FANOVA comparando curvas de deslocamento no eixo Y – efeitos principais e interação.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultado das dez aquisições do teste dinâmico da barra rígida (Teste e Reteste). Distância nominal (d_n) entre os dois marcadores: 500 mm.....	32
Tabela 2. Dados antropométricos e velocidade média alcançada no teste de nado máximo de 200 jardas dos cinco atletas de natação do sexo masculino.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
2D	Bidimensional
AB	Assimetria Bilateral
AVI	Audio Video Interleaved
BIOLAB	Laboratório de Biomecânica
COEP	Comitê de Ética em Pesquisa
CNC	Computer Numerical Control Machine
CV	Coeficiente de Variação
DIY	<i>Do It Yourself</i>
DLT	Transformação Linear Direta
d_r	Distância real
EPM	Erro Padrão de Medida
FDA	Funcional data analysis
LED	Light Emitting Diode
Hz	Hertz
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USA	<i>United States of America</i>
\emptyset	Diâmetro
μm	Micrometro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	EXPERIMENTO 1 - Câmeras de ação como um instrumento viável e confiável para realizar análises cinemáticas 3D em duplo meio	188
2.1	Introdução	Erro! Indicador não definido. 8
2.2	Objetivo.....	20
2.3	Hipóteses	20
2.4.	Materiais e métodos	20
2.4.1	Instrumentos	20
2.4.2	Calibração das câmeras.....	21
2.4.3	Viabilidade do sistema	25
2.4.4	Digitalização da imagem	Erro! Indicador não definido. 7
2.4.5	Análise estatística	Erro! Indicador não definido. 7
2.5	Resultado.....	Erro! Indicador não definido. 8
2.5.1	Exatidão da reconstrução 3D	28
2.5.2	Confiabilidade da reconstrução 3D.....	32
2.6	Discussão	33
2.7	Conclusão.....	36
3	EXPERIMENTO 2 – Perfis assimétricos de trajetória 3D no nado crawl em diferentes intensidades de exercício podem ser detectados por meio da análise de dados funcionais	36
3.1	Introdução	Erro! Indicador não definido. 6
3.2	Objetivos	Erro! Indicador não definido. 9
3.3	Hipótese.....	Erro! Indicador não definido. 9
3.4	Materiais e métodos	40
3.4.1	Cuidados éticos.....	40
3.4.2	Instrumentos	40
3.4.3	Calibração das câmeras e digitalização das imagens	40
3.4.4	Procedimentos experimentais	40
3.4.5	Análise de dados funcionais.....	43
3.4.6	Análise estatística	488
3.5	Resultados	499
3.6	Discussão	52

3.7	Conclusão	55
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A biomecânica estuda o movimento humano e busca identificar parâmetros que podem influenciar o rendimento esportivo. Uma de suas áreas de investigação é a análise cinemática que permite descrever características de um corpo ou segmentos quantitativamente mensurando sua posição em função do tempo (ROBERTSON *et al.*, 2013).

As análises cinemáticas são comumente aplicadas em avaliações na natação para analisar a qualidade técnica, que é um fator importante para o aumento do desempenho na água, pois contribuem para maximizar a aplicação de forças propulsivas e minimizar forças resistivas oferecidas pela água (FIGUEIREDO *et al.*, 2013). Pelo aspecto técnico, a natação é caracterizada por uma sequência de ações coordenadas do tronco e dos membros, em um padrão repetitivo e sincronizado. As ações dos membros superiores definem fases específicas das braçadas dos nados (CHOLLET *et al.*, 2000; MATSUDA *et al.*, 2014) e a partir da trajetória 3D das braçadas é possível obter variáveis cinemáticas, como variação da velocidade e aceleração da mão em função do ciclo de braçada, deslocamentos das mãos nas direções médio-lateral, ântero-posterior e vertical e informações do tempo despendido em cada fase da braçada (FIGUEIREDO *et al.*, 2013; GOURGOULIS *et al.*, 2010; McCABE *et al.*, 2015). Reduções na velocidade da mão têm sido relacionadas a reduções na velocidade do nado, sugerindo uma diminuição da eficiência propulsiva (FIGUEIREDO *et al.*, 2013). Ainda, tem sido avaliado se a ação de respirar durante uma prova de velocidade afeta variáveis cinemáticas da braçada (McCABE *et al.*, 2015), e se o uso de resistências adicionais, comumente utilizada em treinos, modifica a técnica do atleta (GOURGOULIS *et al.*, 2010).

A análise da técnica da natação, utilizando câmeras, iniciou no fim dos anos 60, para identificar a trajetória da braçada em cada estilo a fim de entender como se dava a propulsão na água (BARTHELIS, 1983). Desde então, começou-se a investigar fatores biomecânicos que são determinantes no desempenho na natação (TOUSSAINT; BEEK, 1992) tanto utilizando análises bidimensionais (ALBERT *et al.*, 2009; GARCIA-RAMOS *et al.*, 2015; JESUS *et al.*, 2013) quanto tridimensionais (3D) (ANDERSEN *et al.*, 2020; GOURGOULIS *et al.*, 2010; MONNET *et al.*, 2014).

Os dados cinemáticos 3D podem ser adquiridos por sistemas de captura de movimento compostos por câmeras de luz infravermelha (optoeletrônicas) ou de luz branca (imagem) (BARROS *et al.*, 1999). Os sistemas que utilizam a tecnologia infravermelha foram desenvolvidos especialmente para capturar movimentos 3D (Vicon, 2016; BTS Bioengineering, 2014; Motion Analysis Corporation, 2016; Optitrack, 2016; Qualisys, 2014). Eles possuem *hardwares* e *softwares* específicos que processam as imagens e os dados de forma rápida e em tempo real, sendo instrumentos com alta exatidão em obter dados quantitativos do movimento.

Devido à sua configuração, os estudos que utilizam tais sistemas se limitam às análises de movimentos fora da água e em ambiente controlado. Entretanto, Monnet *et al.* (2014) adaptaram a utilização do sistema de câmeras infravermelhas para criar uma condição de laboratório para análise na natação. Para isso, as câmeras foram dispostas ao redor de uma piscina com janelas e as imagens do movimento submerso foram adquiridas por uma janela lateral e uma abaixo de onde o nadador se deslocava. Os autores utilizaram oito câmeras para avaliar a exatidão do sistema através da reconstrução de 45 distâncias definidas por dez marcadores fixados em uma barra rígida. Duas condições foram consideradas: (1) um movimento da barra rígida fora da água e (2) um movimento da barra rígida dentro da água. Para as duas condições foram utilizadas as mesmas configurações de disposição das câmeras e definição do volume. Foi analisado se a exatidão do sistema se mantinha entre as duas condições e percebeu-se que ao adaptar o sistema para analisar o movimento submerso através de janelas a exatidão era afetada (0,65 milímetros para condição 1 e 5,75 milímetros para condição 2, sendo o valor médio do erro médio absoluto da reconstrução das 45 distâncias entre marcadores fixados na barra rígida). Apesar da diminuição da exatidão, os autores ressaltam que o sistema manteve a vantagem de rastreamento automático dos marcadores. No entanto, ainda que tal adaptação se configure como uma nova alternativa de análise, ela se limita à necessidade de piscinas com janelas e o alto custo dos equipamentos.

Uma exceção a esses sistemas é o *Qualisys (Oqus Underwater, Qualisys, 2014)*, que permite colocar as câmeras embaixo da água e ampliou o uso dessas tecnologias em investigações de esportes aquáticos, como a natação, mantendo a alta exatidão do sistema, com um erro de reconstrução de 1,6 milímetros (OLSTAD *et al.*, 2016). As câmeras são protegidas por uma caixa à prova d'água e possuem

um recurso digital que minimiza reflexos causados pelas bolhas e outros objetos, que são exemplos de problemas enfrentados na captura de movimentos subaquáticos. Alguns estudos têm investigado características biomecânicas na natação utilizando este sistema (RIBEIRO *et al.*, 2016; VITOR *et al.*, 2016; OLSTAD *et al.*, 2016), porém, da mesma forma que os outros sistemas com câmeras optoeletrônicas, ele tem um alto custo e apenas poucos laboratórios no mundo o possuem.

De forma geral, vale destacar que, os sistemas optoeletrônicos apresentam vantagens, como *hardwares* e *softwares* integrados, processamento de dados em tempo real, rastreamento automático dos marcadores e maior exatidão. Porém, também apresentam limitações, como altos custos, baixa portabilidade, presença de cabos e utilização em ambiente controlado, sejam laboratórios ou piscinas com instalações específicas.

Neste sentido, os sistemas com câmeras de vídeo se apresentam como uma tecnologia alternativa, pois essas câmeras registram toda a sequência de imagens do movimento. Além disso, o desenvolvimento de acessórios, como caixas-estranques e ventosas, que permitem sua colocação e fixação submersa, facilita sua utilização para análises cinemáticas 3D. Apesar de uma complexidade para mensurar os dados e alta demanda de tempo para processamento posterior às aquisições (BARROS *et al.*, 1999; JESUS *et al.*, 2015; MAGALHAES *et al.*, 2013) esses sistemas apresentam vantagens, como baixo custo em relação à sistemas optoeletrônicos, transporte facilitado pelo menor tamanho das câmeras, ausência de cabos e utilização em diversos ambientes. São necessários *softwares* específicos para a identificação de pontos de interesse na imagem e obtenção das coordenadas dos pontos de referência do corpo (MOONEY *et al.*, 2015). Esse processo pode ser feito de forma manual, semiautomática ou automática, dependendo do contraste do marcador na imagem em cada um dos quadros, para cada vídeo.

Uma alternativa entre as câmeras de vídeo são as câmeras de ação. Essas são câmeras digitais projetadas para serem compactas e permitirem capturar imagens em diversas situações como, por exemplo, em esportes, constantemente utilizadas presas em capacetes, pranchas de surf e guidão de bicicletas. As câmeras de ação podem ser três vezes menores e mais leves que alguns modelos de

câmeras de vídeo usadas em estudos de natação, além de geralmente serem à prova d'água ou possuírem caixa-estaque como acessório. Outra vantagem se refere às várias configurações presentes em uma única câmera. São disponíveis diferentes campos de visão e para cada um deles há uma série de combinações de resolução de imagem e frequência de aquisição. Alguns modelos possibilitam registrar em vídeo com resolução 4k (3840 × 2160 pixels) e frequência de 240 Hz, dependendo da configuração utilizada. A mudança do campo de visão possibilita que, para um mesmo posicionamento da câmera, diferentes volumes de aquisição sejam obtidos para se analisar movimentos (BERNARDINA *et al.*, 2017).

Um exemplo de câmeras de ação conhecidas mundialmente é a GoPro® (USA), que, além de várias configurações de resolução de imagem e frequência de aquisição, possuem um controle remoto Wi-Fi que pode ser utilizado para iniciar e parar as filmagens. Nos últimos anos, essas câmeras passaram a ser utilizadas no meio científico em avaliações bidimensionais (TIMMIS *et al.*, 2014; MOONEY *et al.*, 2017), entretanto poucos estudos investigaram a aplicabilidade das câmeras de ação em movimentos 3D.

Com base na ideia de que esta tecnologia pode ser uma ferramenta potencial para compor sistemas de captura de movimentos 3D, capaz de adquirir dados fora e debaixo d'água para análise 3D na natação, é necessário investigar se técnicas e procedimentos, como aquisição, sincronização e processamento da imagem, recursos de rastreamento, calibração das câmeras, estimativa de parâmetros internos e externos das câmeras, poderiam ser aplicados para esse tipo de câmera. Há alguns anos, nosso grupo, composto por universidades brasileiras (UNICAMP, UFV, UFMG) e estrangeiras (Politécnico de Milão, Universidade de *Poitiers*, Universidade Campus Biomédico), vem estudando as possibilidades de realizar avaliações 3D usando sistemas '*do it yourself*' (DIY), com câmeras de vídeo, para análises subaquáticas. Até o momento foram abordadas as seguintes investigações:

- (1) Procedimentos de calibração - Utilizando um tipo de câmera CCD foi investigado diferentes tipos de calibração (*chess board calibration* e *wand calibration*) (SILVATTI *et al.*, 2012, SILVATTI *et al.*, 2013);
- (2) Teste das câmeras de ação estáticas para avaliar a exatidão da reconstrução 3D em condições subaquáticas - Com o surgimento e

aprimoramento das câmeras GoPro® (USA) investigamos a viabilidade de usar essas câmeras para avaliação biomecânica na natação através da investigação de variáveis que influenciam a calibração. Além disso, com as diferentes possibilidades de frequência de aquisição e resolução de imagem, foi necessário investigar como cada configuração influenciava na reconstrução 3D (BERNARDINA *et al.*, 2016, BERNARDINA *et al.*, 2017).

- (3) Teste das câmeras de ação estáticas para avaliar a exatidão da reconstrução 3D em condições de laboratório - Como na etapa anterior, foi realizada uma avaliação das câmeras fora d'água e como a frequência de aquisição e a resolução da imagem influenciam na precisão (BERNARDINA *et al.*, 2017).
- (4) Comparação da exatidão da reconstrução 3D e concordância de dados cinemáticos da marcha e salto comparando as câmeras de ação e um sistema de captura de movimento comercial – Em condição de laboratório, as câmeras GoPro® e as câmeras ViconMX40 foram calibradas usando o protocolo do sistema comercial Vicon e adquiriram dados simultaneamente (BERNARDINA *et al.*, 2018).
- (5) Teste das câmeras de ação em movimento para avaliar a exatidão da reconstrução 3D em condição terrestre – Assim como na etapa anterior, os dados adquiridos pelas câmeras GoPro® foram comparados aos adquiridos pelas câmeras ViconMX40, no entanto, as câmeras foram montadas em uma estrutura que se movia em linha reta por 40 metros juntamente com o sujeito no intuito de adquirir e reconstruir movimentos de caminhada e corrida em grandes volumes espaciais (BERNARDINA *et al.*, 2019).

Essas investigações foram etapas necessárias para o objetivo final de ter um sistema móvel na piscina. Entretanto, antes de se concretizar esse sistema ainda são necessárias algumas novas investigações, como por exemplo, procedimentos de calibração duplo meio, que será objeto de estudo do Experimento 1 desta tese.

Como o movimento completo da natação se dá em dois ambientes (ar e água), a reconstrução 3D do gesto completo do atleta requer a calibração de ambos os meios e o registro de um sistema de coordenadas entre eles. Diante dessas informações, pode-se destacar que até o presente momento não se tem

conhecimento de estudos que avaliaram a viabilidade e a confiabilidade do método de calibração não linear em duplo-meio utilizando câmeras de ação para análise de movimentos 3D. Nessa tese, entende-se por ‘viabilidade’ como uma tradução do termo *feasibility*, que se refere a algo possível de ser feito (*Cambridge Dictionary Online*). Um estudo de viabilidade (*feasibility study*) investiga a praticidade de um sistema quanto ao método e instrumentos utilizados e, para isso, avaliaremos a exatidão dos dados adquiridos no Experimento 1 (MONNET *et al.*, 2014). Se esse sistema se mostrar viável e confiável, algumas aplicações na natação seriam possíveis, como por exemplo, obter a trajetória tridimensional nas fases aérea e submersa das braçadas, identificar dados cinemáticos a partir dessas trajetórias e analisar a presença ou não de assimetrias das braçadas pela análise de séries temporais.

As assimetrias entre os lados direito e esquerdo do corpo podem ser causadas por diversos fatores, desde o desenvolvimento de um lado dominante até mesmo por consequência de alguma lesão (SANDERS *et al.*, 2011). Os estudos prévios realizados na natação que verificaram assimetrias e relacionaram ao desempenho, avaliaram parâmetros de força propulsiva, através de testes de nado atado, identificando a presença de um lado dominante (MOROUÇO *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2017), parâmetros cinemáticos relacionados à padrões respiratórios (SEIFERT *et al.*, 2008) e rolamento do ombro durante o nado crawl (PSYCHARAKIS; SANDERS, 2008). No entanto, até o momento, não foram verificados estudos que buscaram investigar a assimetria da trajetória das braçadas no nado crawl, por meio da análise de séries temporais, que será objeto de estudo do Experimento 2 desta tese.

Portanto, o presente estudo se propõe a avaliar a viabilidade e confiabilidade das câmeras de ação como um instrumento para realizar análises cinemáticas 3D em duplo meio e avaliar a assimetria da braçada no nado crawl. Para isso, o trabalho foi dividido em dois experimentos: no primeiro experimento foi avaliada a exatidão e confiabilidade do sistema através de um teste de barra rígida, contendo marcadores que transitam entre os ambientes (ar e água), e no segundo experimento foram comparadas as curvas de deslocamento das braçadas direita e esquerda do nado crawl para avaliar a assimetria.

2 EXPERIMENTO 1 - Câmeras de ação como um instrumento viável e confiável para realizar análises cinemáticas 3D em duplo meio

2.1 Introdução

A maioria dos sistemas propostos para a análise cinemática tridimensional por meio de câmeras de vídeo utilizam o método da Transformação Linear Direta (DLT) que se baseia no princípio da colinearidade (ABDEL-AZIZ *et al.*, 1971) para a calibração das câmeras (MACHTSIRAS; SANDERS, 2009; GOURGOULIS, *et al.*, 2008). Reconstruções 3D, utilizando esse modelo relataram erros que variaram de 4 a 8 milímetros em análises subaquáticas e erros de 3 a 7 milímetros no ambiente fora da água (FIGUEIREDO *et al.*, 2011; GOURGOULIS *et al.*, 2008), com possíveis influências do tamanho do volume a ser calibrado e da quantidade de pontos de controle a ser utilizado na calibração. Esse método de calibração para aquisições em grandes volumes, que são essenciais para se obter mais de um ciclo de braçada do nadador, exige grandes estruturas (GOURGOULIS *et al.*, 2008).

Além disso, durante esse processo de captura de imagens alguns fatores podem violar a condição de colinearidade proposta pela DLT, gerando desvios na projeção linear. As projeções perspectivas, em que há mudança do espaço 3D para o 2D, podem causar perdas ou distorções das características geométricas da imagem. Ainda, as distorções das lentes podem alterar o formato da imagem (KWON *et al.*, 2006). Com o objetivo de melhorar a precisão dos resultados obtidos na análise cinemática 3D, métodos não-lineares de calibração foram propostos na literatura (ZHANG, 2000; CERVERI *et al.*, 1998; PRIBANIĆ *et al.*, 2009) e valores de erro de reconstrução abaixo de 1 milímetro foram encontrados em aplicações fora e dentro da água (CERVERI *et al.*, 1998; SILVATTI *et al.*, 2012; BERNARDINA *et al.*, 2016; BERNARDINA *et al.*, 2017).

Os métodos não-lineares, assumem que há desvios de luz e que essa projeção não acontece em linha reta. Algoritmos de calibração foram desenvolvidos para corrigir esses efeitos não-lineares e permitem que câmeras com lente grande angulares, como no caso das GoPro®, sejam utilizadas. Esses métodos modelam e corrigem as distorções ópticas envolvidas pelo uso deste tipo de lente, possibilitando aumentar o volume de aquisição enquadrado pelas câmeras fixas, e

consequentemente, obter mais ciclos de nado, por exemplo. Também são métodos que normalmente são adotados pelos sistemas de captura de movimentos 3D com alta tecnologia (Vicon, 2016; BTS Bioengineering, 2014; Motion Analysis Corporation, 2016; Optitrack, 2016; Qualisys, 2014).

Silvatti *et al.*, (2012) listou vantagens e desvantagens, ao comparar três métodos não-lineares em análise de movimentos subaquáticos. O método de Cerveri *et al.*, (1998) apresentou bons resultados na exatidão da reconstrução e a vantagem da calibração das câmeras simultaneamente, além de utilizar ferramentas mais simples e portáteis. Esse método é composto pela aquisição de um instrumento estático, que utiliza o método DLT para determinar os parâmetros iniciais das câmeras, e pela aquisição de uma barra rígida em movimento, em que as coordenadas 3D de seus marcadores são utilizadas para ajustar os parâmetros de todas as câmeras e corrigir distorções ópticas. Essa sequência é usada para refinar os parâmetros para a otimização de um ajuste em conjunto (*bundle adjustment optimization*) de todas as câmeras simultaneamente, considerando tanto os pontos do instrumento estático como os pontos tridimensionais do instrumento em movimento (barra rígida). O método de ajuste em conjunto baseia-se na solução pelo método dos mínimos quadrados e estima os parâmetros de todas as câmeras, juntamente com as coordenadas 3D desconhecidas, minimizando o erro de projeção bidimensional, nas imagens (medido *versus* predito pelo modelo da câmera). A distorção pode ser considerada adotando diferentes modelos, como radial, tangencial e prisma fino, com diferentes quantidades de parâmetros. O sistema de coordenadas global é fornecido pela geometria do triedro (CERVERI *et al.*, 1998; CERVERI *et al.*, 2001).

Pensando na utilização desses métodos para a reconstrução 3D na natação, como o movimento completo do atleta se dá em dois ambientes (ar e água), a reconstrução 3D do gesto técnico requer a calibração de ambos os meios e o registro de um sistema de coordenadas entre eles. Diante dessas informações, pode-se destacar que até o presente momento não se tem conhecimento de estudos que avaliaram a viabilidade e a confiabilidade do método de calibração não linear em duplo-meio utilizando câmeras de ação para análise de movimentos 3D. Se esse sistema se mostrar confiável, algumas aplicações na natação seriam possíveis,

como por exemplo, a análise da trajetória da braçada e das variáveis cinemáticas derivadas a partir dela.

2.2 Objetivo

Avaliar a exatidão e a confiabilidade de um conjunto de câmeras de ação compondo um sistema de análise cinemática tridimensional para análise de movimentos em duplo meio.

2.3 Hipóteses

H1 – A exatidão de reconstrução 3D do sistema pode ser afetada pelos instantes que os marcadores transitam entre ambientes (ar e água). Apesar disso, o sistema será confiável com dados reprodutíveis a cada nova montagem e aquisição.

2.4 Materiais e métodos

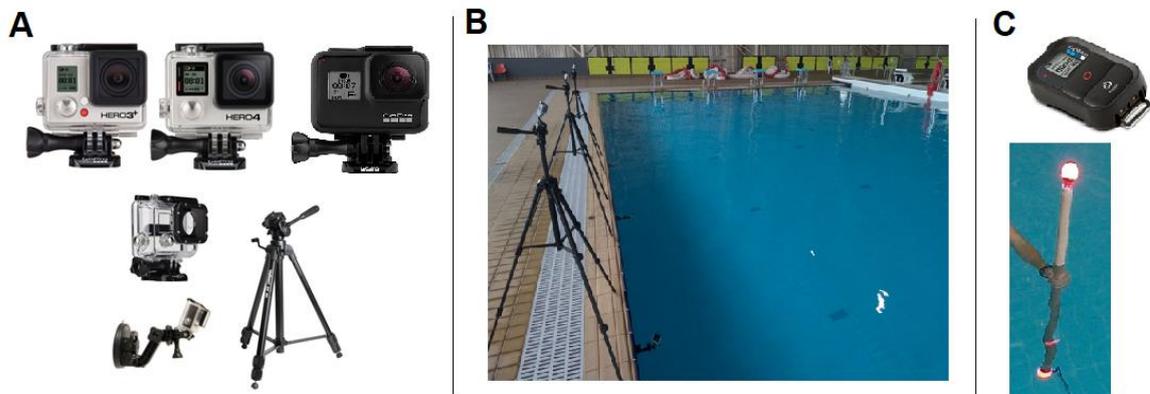
2.4.1 Instrumentos

A aquisição dos dados foi realizada em uma piscina de 25 jardas (22,86 metros) de comprimento, localizada no Centro de Treinamento Esportivo da Universidade Federal de Minas Gerais. As imagens foram adquiridas por doze câmeras de ação (GoPro, Black Edition[®] / USA, dos modelos Hero3+, Hero4 e Hero7). Seis câmeras foram colocadas fora da água, em tripés (Velbon – DF60 / USA) na beira da piscina e seis câmeras dentro da água, em caixas-estaque e fixadas na parede da piscina através de acessórios com ventosas desenvolvidos pela GoPro (USA) (Figura 1). As câmeras foram dispostas ao redor do volume a ser calibrado (estimado em 8,0 x 3,5 x 3,0 metros), com uma distância de aproximadamente 8 metros entre os lados direito e esquerdo da piscina. As câmeras colocadas fora da água foram posicionadas à aproximadamente 1,5 metros de altura da água e com 2,0 metros de distância entre elas. As câmeras submersas foram colocadas à aproximadamente 0,10 metros de profundidade e também distanciadas 2,0 metros entre elas. O campo de visão de cada câmera foi ajustado para enquadrar pelo menos dois ciclos de braçada de um atleta no nado crawl.

As configurações das câmeras foram definidas em 1920 x 1080 pixels de resolução de imagem e 60 Hz de frequência de aquisição. Uma vez que o efeito de *fish eyes* é reduzido no ambiente aquático (BERNARDINA *et al.*, 2017), o ângulo de visão foi de 90° (*Linear*) para as câmeras de fora e 170° (*Wide*) para as de dentro da água.

Controles remoto Wi-Fi *GoPro* foram utilizados para iniciar e parar todas as câmeras, e a sincronização foi realizada por um disparo de luz no início de cada aquisição. Para essa sincronização foi construído um instrumento de um metro de comprimento, com duas lâmpadas de LED esféricas, uma em cada extremidade. O instrumento foi impermeabilizado possibilitando sua utilização na água. Por um comando Arduino foi feito o acendimento simultâneo das lâmpadas e definida a frequência de disparo da luz.

Figura 1. (A) Câmeras de ação (GoPro, Black Edition® / USA, dos modelos Hero3+, Hero4 e Hero7) e acessórios utilizados para sua fixação. (B) Posicionamento das câmeras ao redor do volume a ser calibrado na piscina. (C) Controle remoto Wi-Fi GoPro e instrumento com lâmpadas de LED.



Fonte: Próprio autor

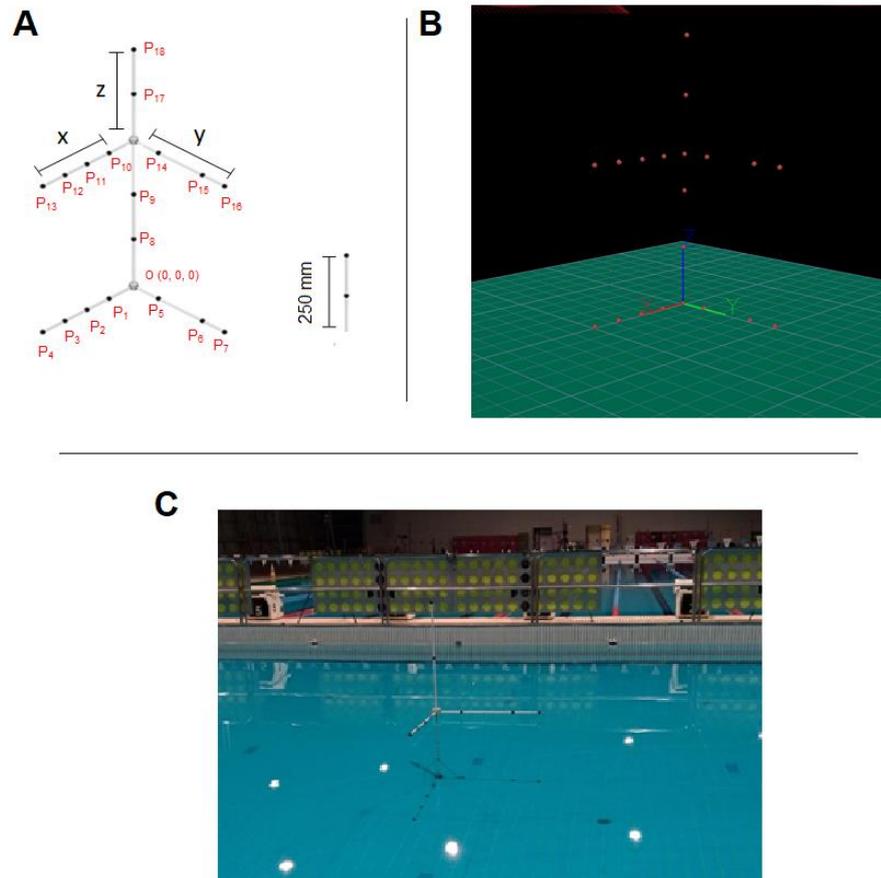
2.4.2 Calibração das câmeras

A calibração das câmeras no duplo meio (ar e água) foi realizada seguindo o método de calibração não-linear proposto por Cerveri *et al.* (1998). As estimativas dos parâmetros internos (ex. distância focal, ponto principal e escala x / y) e externos (posição e orientação da câmera em relação ao sistema de coordenadas

de referência) das câmeras são obtidas pela aquisição de um objeto estático (estrutura tríade) e um em movimento (bastão) contendo marcadores esféricos passivos. Pela necessidade de se calibrar os dois ambientes (ar e água), o objeto de calibração estático foi composto por duas estruturas tríades interligadas (Figura 2A). Cada estrutura, construídas por uma máquina de controle numérico computadorizada (CNC - *Computer Numerical Control Machine*), é ortogonal com dimensão 1 x 1 x 1 metro, à prova d'água e é composta por nove marcadores esféricos pretos (\varnothing : 30 mm) com posições conhecidas (10 μ m de exatidão). Como a piscina tem 2 metros de profundidade, uma conexão de 1 metro foi utilizada para interligar as duas estruturas tríades com a finalidade de que a estrutura inferior pudesse ficar apoiada no chão da piscina e a estrutura superior acima do nível da água (Figura 2C).

Devido à interligação das duas estruturas tríades, primeiramente, o objeto de calibração estático foi colocado em laboratório e foram definidas previamente as coordenadas dos dezoito marcadores, utilizando um sistema com câmeras optoeletrônicas (6 câmeras OptiTrack, Prime 17W, NaturalPoint, Inc. USA, aquisição a 360Hz) (Figura 2B). Posteriormente, ele foi posicionado na piscina, no centro do volume de aquisição, estando a estrutura inferior apoiada no chão e a estrutura superior acima do nível da água. O eixo Y (três marcadores) foi alinhado com a direção horizontal do nado. Os eixos X (quatro marcadores) e Z (dois marcadores) definiram as direções lateral e vertical, respectivamente.

Figura 2. (A) Objetos de calibração: estruturas tríades interligadas [$P_n = (X_n, Y_n, Z_n)$, sendo 'n' o número do marcador (1 a 18)] e bastão com dois marcadores (dn: 250 mm). (B) Definição das coordenadas dos dezoito marcadores (6 câmeras OptiTrack, Prime 17W, NaturalPoint, Inc. USA, aquisição a 360Hz). (C) Posicionamento do objeto de calibração estático na piscina.



Fonte: Próprio autor

O processo de calibração foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa, o objeto estático, estando posicionado na piscina e no centro do ângulo de visão das câmeras, foi filmado por 5 segundos. Os dados bidimensionais dos marcadores em cada câmera, juntamente com as coordenadas 3D correspondentes a cada marcador foram utilizados no algoritmo DLT (Equação 1), desprezando distorções ópticas (SILVATTI *et al.*, 2012), para determinar os parâmetros iniciais das câmeras e definir a origem e orientação do volume de aquisição.

$$u = \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \quad (\text{Equação 1})$$

$$v = \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1}$$

Em que u e v são coordenadas bidimensionais de um ponto na imagem; L_1 a L_{11} são os ‘coeficientes DLT’ que refletem a relação entre o objeto do espaço e o plano da imagem e serão posteriormente usados no processo de reconstrução 3D.

Na segunda etapa, o objeto estático foi retirado da piscina e foi filmado o movimento de uma barra rígida contendo dois marcadores a uma distância conhecida (d_n : 250 mm). A barra foi movimentada dentro do volume por aproximadamente 40 segundos, de forma a preencher os campos de visão comum de todas as câmeras, não se limitando apenas ao espaço ocupado pela estrutura estática. Foi utilizado um movimento previamente avaliado a fim de obter uma calibração com baixos erros de reconstrução (BERNARDINA *et al.*, 2016).

Do total de quadros adquiridos, 100 posições da barra distribuídas no volume de aquisição foram usadas em um pacote de ajuste de otimização dos parâmetros da câmera, incluindo o modelo de distorção óptica. Os pontos principais (parâmetro interno das câmeras), definidos como a intersecção do eixo óptico com o plano da imagem, são os parâmetros envolvidos na otimização. O algoritmo de calibração utiliza os parâmetros iniciais das câmeras (estimado pelo algoritmo DLT) e as coordenadas 2D das 100 posições da barra para refinar os parâmetros das câmeras, estimar os parâmetros de distorção e calcular as coordenadas 3D dos marcadores da barra (Equação 2). A distância entre os dois marcadores (d_n : 500 mm) foi explorada como uma restrição adicional no pacote de ajuste. Para as câmeras fora da água foi considerado o modelo de distorção radial com dois parâmetros (k_1 e k_2) e para as câmeras dentro da água, distorções radial e tangencial com dois parâmetros radiais (k_1 e k_2) e um tangencial (p_1) (BERNARDINA *et al.*, 2017; SILVATTI *et al.*, 2012).

$$J = \alpha \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (d_j - L)^2} + \beta \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{e_{intjP}^2 + e_{intjQ}^2}{2} \right)} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que N é o número de posições da barra; L é a distância real entre os dois marcadores (P e Q); d_j é distância entre os marcadores reconstruída tridimensionalmente em função do tempo (j); e_{intjP} e e_{intjQ} são o erro de interseção para os marcadores na barra em função do tempo (j), e α e β são os fatores de peso.

Uma vez que as estruturas tríades estão em diferentes locais, o processo de calibração foi realizado separadamente para cada um dos ambientes (ar e água). Após esse processo, com as coordenadas dos dezoito marcadores do objeto estático previamente definidas em laboratório, foi realizada a rotação e translação do sistema de coordenadas do ambiente fora da água para o sistema de coordenadas do ambiente submerso, no qual foi definida a origem do espaço duplo-meio.

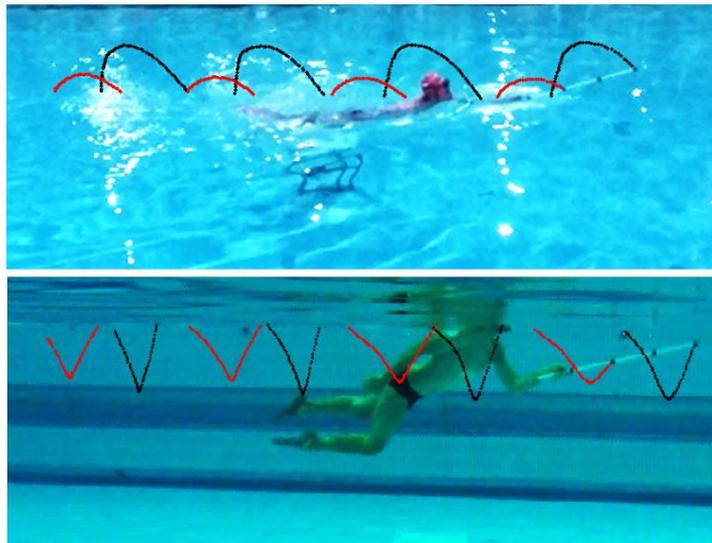
2.4.3 Viabilidade do sistema

Um teste de barra rígida foi utilizado para avaliar a viabilidade do sistema em relação à exatidão e à confiabilidade. Exatidão se refere à proximidade entre um valor medido e um valor verdadeiro, que pode ser assumido como um valor de referência. Dessa forma, o sistema é mais exato quando fornece um erro de medição baixo (VIM, 2012). Confiabilidade se refere à reprodutibilidade dos resultados. Um sistema confiável fornece uma medida estável da variável, em que sua repetida aplicação, ao mesmo sujeito ou objeto, fornece resultados similares (MARTINS, 2006; THOMAS; NELSON, 2002). O teste consistiu em movimentar uma barra rígida contendo dois marcadores esféricos pretos (Figura 2A) de distância conhecida (d_n : 500 mm) dentro de um volume previamente calibrado e a distância entre os dois marcadores em função do tempo foi reconstruída tridimensionalmente.

Ao total foram feitas dez aquisições de movimentos contínuos da barra rígida se deslocando continuamente entre os ambientes subaquático e fora da água, realizados dentro do volume de aquisição, por aproximadamente 10 segundos

(Figure 3). Cinco dessas aquisições foram realizadas em um dia (teste inicial) e as outras cinco aquisições capturadas em outros momentos, separados por pelo menos 5 dias após o teste inicial.

Figura 3. Barra rígida se deslocando continuamente entre os ambientes subaquático e fora da água. As trajetórias vermelha e preta representam os dois marcadores fixados na barra.



Fonte: Próprio autor

Para a avaliação de exatidão as dez aquisições da barra foram consideradas. As variáveis calculadas em cada aquisição para descrever a exatidão da reconstrução 3D da distância entre os marcadores fixados na barra foram: (a) valor médio e desvio-padrão da distância entre os marcadores; (b) erro de reconstrução da distância entre os marcadores (diferença entre a distância real e a distância medida entre os marcadores), e (c) o erro médio absoluto (CHIARI *et al.*, 2005).

Para a avaliação de confiabilidade do sistema, as aquisições da barra foram analisadas em procedimento teste (cinco aquisições do teste inicial) e reteste (cinco aquisições capturadas em outros momentos). A confiabilidade foi avaliada pela consistência das variáveis calculadas para cada aquisição.

2.4.4 Digitalização da imagem

Após as aquisições, os vídeos foram convertidos para o formato AVI no *software GoPro Studio* (GoPro, Inc., USA). O rastreamento dos marcadores nas sequências de imagens das doze câmeras foi feito no *software DVideo* (FIGUEROA *et al.*, 2003). A identificação das coordenadas 2D, tanto dos objetos de calibração quanto da barra rígida utilizada no teste de avaliação da viabilidade do sistema, ocorreu por digitalização semi-automática e/ou manual. Um algoritmo desenvolvido no *software MATLAB*[®] (2015a) (Mathworks, Natick MA, USA) foi usado para calcular as coordenadas 3D dos marcadores.

2.4.5 Análise estatística

Para descrever a exatidão da reconstrução 3D da distância entre os marcadores fixados na barra rígida foi feita uma análise descritiva, por meio de média e desvio-padrão, dos momentos teste e reteste e o erro médio absoluto de cada aquisição.

O erro médio absoluto também foi representado em forma de gráfico *BoxPlot*, apresentando a variação dos dados entre cada condição. No gráfico *BoxPlot* cada barra representa distribuição desse erro de cada uma das dez aquisições do teste de barra rígida. A linha central da barra é a mediana e as bordas superior e inferior da barra são os percentis 25 e 75. A linha tracejada representa os valores de dados mais extremos e os *outliers* são representados separadamente pelos pontos asteriscos.

A variável de erro de reconstrução foi representada em forma de gráfico *ScatterPlot*, verificando a associação entre dois conjuntos de dados, no caso, os valores de exatidão e a mudança de posição da barra rígida na posição vertical do volume de aquisição. Nesse tipo de gráfico os dados são exibidos como uma coleção de pontos, em que cada um possui o valor de uma variável determinando a posição no eixo horizontal e o valor da outra variável determinando a posição no eixo vertical, representando assim a dispersão das variáveis analisadas.

Para verificar a confiabilidade dos dados de reconstrução 3D, a medida de distância entre os marcadores fixados na barra rígida foi usada para calcular o erro padrão de medida (EPM), quantificando a variação aleatória da medida, e o

coeficiente de variação (CV), analisando a dispersão da medida em relação ao valor médio, em termos relativos (WEIR, 2005).

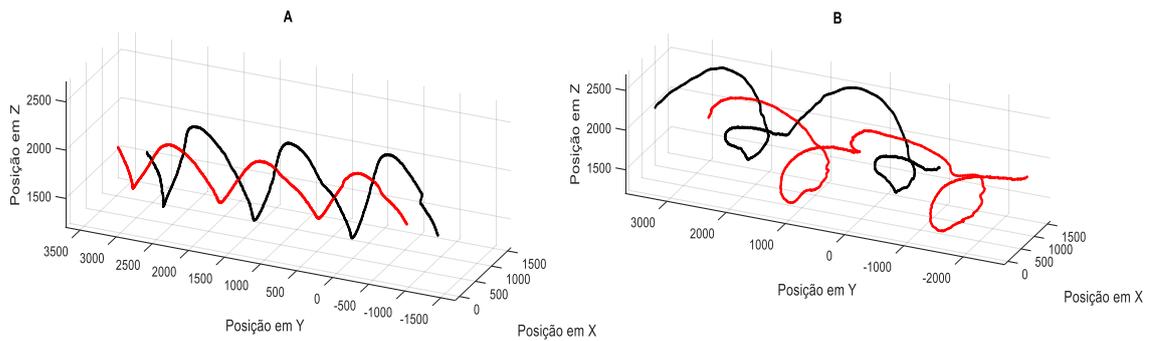
2.5 Resultado

2.5.1 Exatidão da reconstrução 3D

Em todas as aquisições o erro médio absoluto da reconstrução 3D da distância entre os marcadores fixados na barra rígida foi inferior a 2 milímetros. Esse resultado se refere ao movimento da barra em função do tempo independente do meio e/ou aos momentos de transição entre os ambientes (água e ar).

Uma vez que o gesto técnico das braçadas na natação (no nado crawl, por exemplo) requer mudanças de ambiente (ar e água) a cada ciclo, uma alta exatidão da reconstrução 3D encontrada no teste de barra rígida pode suportar também uma alta exatidão para dados cinemáticos de nadadores. A figura 4 ilustra a reconstrução da trajetória tridimensional dos dois marcadores da barra rígida (Fig. 4A) e de dois ciclos de braçada direita e esquerda de um nadador (Fig. 4B). Nas aquisições da barra rígida procurou-se assemelhar o movimento da barra em relação à variação de posição nos três eixos (x, y e z) ao movimento das braçadas do nado crawl, principalmente no eixo vertical (z) – eixo principal para a mudança dos meios (ar e água).

Figura 4. Reconstrução tridimensional de trajetórias de marcadores. A) Reconstrução dos dois marcadores fixados na barra rígida. As trajetórias vermelha e preta representam marcadores diferentes. B) Reconstrução de dois marcadores, fixados na terceira falange das mãos direita e esquerda, obtendo dois ciclos de braçada direita e esquerda de um nadador. A trajetória vermelha representa o ciclo esquerdo e a preta o ciclo direito.



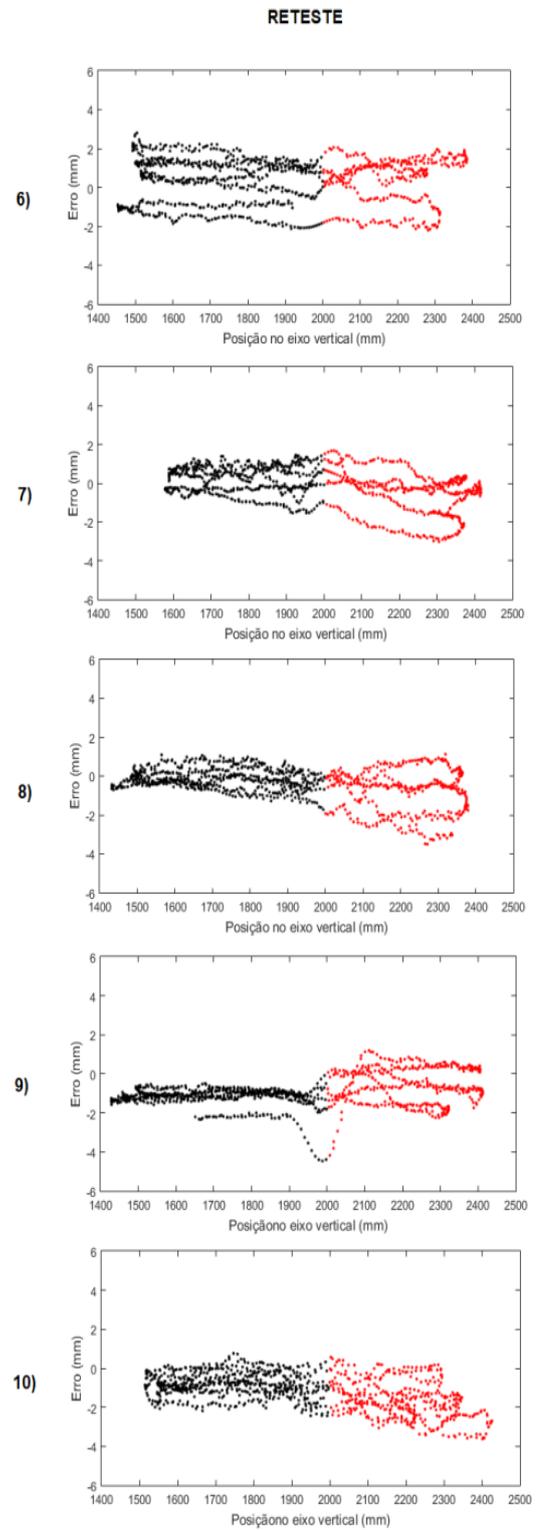
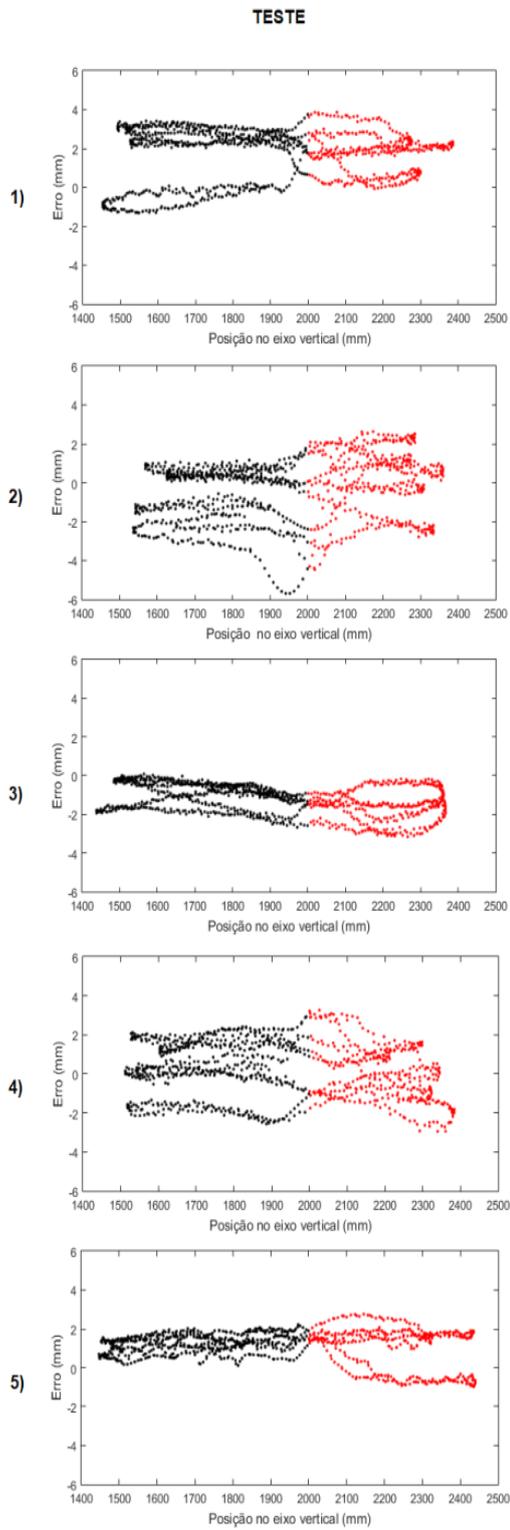
Fonte: Próprio autor

Uma análise do comportamento da exatidão de reconstrução 3D em relação ao meio em que a barra estava sendo movimentada pode ser observada na figura 5. A figura apresenta a relação entre os valores de exatidão (diferença entre a distância real e a distância medida entre os marcadores pelo sistema) e a mudança de posição da barra rígida na posição vertical do volume de aquisição. Os movimentos da barra rígida aconteceram com deslocamentos contínuos entre o meio aéreo e submerso e a transição entre os meios está localizada próximo aos 2 metros partindo do chão da piscina. No gráfico podemos perceber essa área próxima ao valor de 2000 milímetros (do eixo X), sendo que os dados dispostos abaixo dessa posição indicam momentos em que a barra se encontrava no ambiente subaquático, já os dados acima dessa posição indicam momentos da barra fora da água.

É possível observar que não houve uma dependência da exatidão de reconstrução 3D em relação ao meio e/ou aos momentos de transição entre os meios (água e ar). O erro de reconstrução da distância dos marcadores não aumentou, nem diminuiu com a variação do meio, visto que, em todas as aquisições, tanto no teste quanto no reteste, ele se manteve entre -6 e 4 milímetros em função da mudança de posição no volume calibrado. Considerando a distância real da barra

rígida (500 milímetros) essa variação representa -1,2% a 0,8% de erro ao reconstruir distâncias entre pontos.

Figura 5. Comportamento da exatidão de reconstrução 3D da distância entre dois marcadores fixados na barra rígida (dn: 500 mm) em função da mudança de posição no eixo vertical do volume calibrado. A barra rígida foi movimentada continuamente entre ar e água e a transição entre os meios está localizada próxima ao valor de 2000 milímetros (do eixo X). Os dados em preto representam momentos em que a barra se encontrava no ambiente subaquático. Os dados em vermelho representam momentos em que a barra se encontrava no ambiente fora da água. Os gráficos 1 ao 5 representam aquisições do momento Teste. Os gráficos 6 ao 10 representam aquisições do momento Reteste.



Fonte: Próprio autor

2.5.2 Confiabilidade da reconstrução 3D

Uma vez que os resultados de exatidão não mostraram interferências de transição de ambientes, considerou-se todo o deslocamento da barra rígida no volume calibrado. A tabela 1 e a figura 6 apresentam a análise descritiva das variáveis calculadas para cada aquisição.

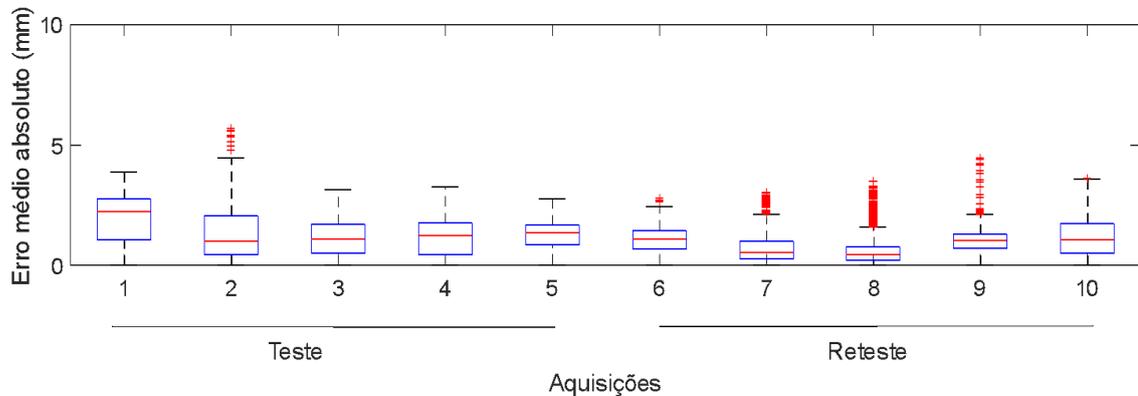
Quando analisadas as condições teste e reteste, os resultados se assemelham. O desvio padrão da distância entre os marcadores revela um comportamento homogêneo da reconstrução da distância em função do tempo, com um CV de 0,25% para a condição teste e de 0,12% para a condição reteste. O EPM indicou uma variação aleatória da medida em 1,03 milímetros na condição teste e em 0,96 milímetros na condição reteste. Analisando a variação aleatória entre as condições teste-reteste foi encontrado um EPM de 0,29 milímetros.

Tabela 1. Resultado das dez aquisições do teste dinâmico da barra rígida (Teste e Reteste). Distância nominal (d_n) entre os dois marcadores: 500 mm.

Aquisição	Média da distância entre os marcadores \pm DP (mm)		Erro Médio Absoluto (mm)	
	Teste	Reteste	Teste	Reteste
1	501,70 \pm 1,23	500,44 \pm 1,09	1,86	1,04
2	499,38 \pm 1,72	499,64 \pm 1,05	1,44	0,88
3	498,66 \pm 0,89	499,46 \pm 0,89	1,34	0,78
4	499,83 \pm 2,02	499,06 \pm 0,74	1,52	1,05
5	501,14 \pm 0,74	498,91 \pm 0,95	1,26	1,19
Média	500,14 \pm 1,25	499,50 \pm 0,60	1,49	0,99

DP= desvio padrão; mm = milímetro.

Figura 6. Distribuição do erro médio absoluto nas cinco aquisições do movimento da barra rígida para as condições de teste e reteste.



Fonte: Próprio autor

2.6 Discussão

O objetivo desse experimento foi avaliar a exatidão e a confiabilidade de um conjunto de câmeras de ação compondo um sistema de análise cinemática tridimensional, em duplo meio. Mesmo que anteriormente já tenha sido relatada na literatura a avaliação dessas câmeras em termos de configurações e suas potencialidades em compor sistemas para reconstrução tridimensional do movimento (BERNARDINA *et al.*, 2016; BERNARDINA *et al.*, 2017; BERNARDINA *et al.*, 2018), ainda há novas possibilidades de avaliação e expansão do seu uso no meio científico e prático do esporte.

Os resultados encontrados confirmam parcialmente a hipótese. Era esperado que a exatidão de reconstrução 3D do sistema poderia ser afetada pelos instantes que os marcadores transitassem entre os ambientes (ar e água), entretanto a exatidão não se mostrou afetada negativamente nesses instantes. Essa hipótese foi formulada, pois no estudo de Bernardina *et al.* (2017), os autores observaram que no ambiente subaquático o efeito 'fisheye' da lente em relação ao ambiente fora da água pode interferir nos valores de exatidão do sistema. Esse fator poderia gerar um viés do erro entre os ambientes devido à detecção do marcador e/ou efeitos de distorção óptica. Entretanto, ao se analisar o comportamento da reconstrução 3D em relação ao meio em que a barra estava sendo movimentada (Figura 4) nenhuma

dependência específica da magnitude do erro na distribuição dos marcadores no espaço foi verificada. Um fator que pode ter levado a ausência de influência da mudança de meio (ar-água) no comportamento da reconstrução 3D foi a calibração não-linear utilizada (CERVERI *et al.*, 1998) que leva em consideração os parâmetros de distorção e foi capaz de ajustar os dados para melhoria da reconstrução 3D.

Já a hipótese em relação ao sistema apresentar dados reprodutíveis a cada nova montagem e aquisição foi confirmada. A confiabilidade entre as aquisições e entre as condições teste-reteste sugerem que as reconstruções 3D das distâncias entre os dois marcadores fixados na barra foram consistentes com EPM de 1 milímetro e CV abaixo de 1%, indicando uma baixa variabilidade da medida.

Considerando que maiores volumes de calibração permitem obter mais informações sobre a cinemática dos nadadores (FIGUEIREDO *et al.*, 2011), o presente estudo objetivou analisar um volume de aproximadamente 70m³ (8,0 x 3,0 x 3,0 m) e em condição de ambiente do treinamento de natação encontrando um erro médio absoluto das aquisições abaixo de 3 milímetros (Tabela 1). Apesar do maior volume utilizado, os resultados corroboram com estudos prévios realizados por nosso grupo em condições de maior controle do ambiente, com o volume de aquisição reduzido e limitada à utilização de duas ou quatro câmeras (BERNARDINA *et al.*, 2016; BERNARDINA *et al.*, 2017; BERNARDINA *et al.*, 2018) que também reportaram exatidão da reconstrução subaquática e em ambiente terrestre inferior a 3 milímetros.

No presente estudo, os baixos erros de reconstrução encontrados podem estar relacionados à configuração das câmeras utilizadas e ao procedimento de calibração. É sabido que resoluções de imagem e frequências de aquisição não adequadas podem afetar os dados de reconstrução 3D (BERNARDINA *et al.*, 2017). Além disso, dependendo do método de calibração utilizado os valores de exatidão podem ser maiores ou menores (FIGUEIREDO *et al.*, 2011; SILVATTI *et al.*, 2012). Estudos que utilizaram modelos lineares de calibração de câmeras relataram erros que variaram de 4 a 8 milímetros em análises subaquáticas e erros de 3 a 7 milímetros no ambiente fora da água (FIGUEIREDO *et al.*, 2011; GOURGOULIS *et al.*, 2008). Já estudos que utilizaram métodos de calibração não-linear relataram erros abaixo de 2 milímetros para ambiente aquático e aplicações fora da água.

Utilizando a abordagem proposta por Cerveri *et al.* (1998) (*wand calibration*), a dispersão do erro no volume de calibração pode ter uma redução de aproximadamente 4 mm, o que é justificado pela abordagem do uso de pacote de ajuste para otimizar os parâmetros das câmeras (SILVATTI *et al.*, 2012).

O método por último citado, em sua maioria, é adotado pelos sistemas comerciais de captura de movimentos 3D com câmeras optoeletrônicas. Estudos em natação que utilizam essa tecnologia e método de calibração têm usado o sistema *Qualisys* (Oqus Underwater, *Qualisys*, 2014) que permite colocar as câmeras embaixo da água e reconstruir ambientes duplo-meio para análises de movimentos fora e dentro da água. Mesmo com os desafios que o ambiente aquático apresenta para a aquisição de dados cinemáticos, esse sistema tem reportado erros de reconstrução abaixo de 2 milímetros (CHAINOK *et al.*, 2021; OLISTAD *et al.*, 2016).

Essa exatidão também pode sofrer influências pelo tamanho do volume a ser calibrado e pela quantidade de pontos de controle a ser utilizada na calibração. Estudos prévios utilizaram volumes próximos a 5m³ (SANTOS *et al.*, 2020), a 7m³ (PSYCHARAKIS *et al.*, 2008) e 18m³ (FIGUEIREDO *et al.*, 2011), sendo verificado que os maiores volumes podem resultar em erros de reconstrução maiores (MOONEY *et al.*, 2015). Nossos resultados divergem dos estudos prévios que utilizaram maiores volumes de calibração, sendo que os baixos erros de reconstrução encontrados podem estar relacionados à configuração das câmeras utilizadas e ao procedimento de calibração.

Até o presente momento não se tem conhecimento de estudos que utilizaram o método de calibração não-linear em ambiente duplo meio com câmeras de ação e/ou comerciais. De um ponto de vista operacional, a calibração de câmeras representa uma dificuldade para o desenvolvimento de sistemas de análise de movimentos subaquáticos baseados em vídeo por duas questões principais. Em primeiro lugar, a reconstrução 3D do gesto completo do atleta requer a calibração tanto no ar quanto subaquática e o registro de um sistema de coordenadas entre eles. Em segundo lugar, a calibração subaquática pode exigir soluções específicas que amenizem perturbações da água na qualidade da imagem para garantir uma alta exatidão na reconstrução.

2.7 Conclusão

O sistema da análise cinemática 3D utilizando câmeras de ação para uso em duplo meio, com maior quantidade de câmeras e com o método de calibração não-linear possibilitaram o uso de um maior volume de aquisição e mostrou resultados de elevada exatidão e confiabilidade. Estudos futuros devem verificar se o sistema composto por câmeras de ação aliado ao procedimento de calibração não-linear pode ser utilizado de maneira reprodutível na análise da trajetória 3D da braçada e na quantificação da assimetria no nado crawl.

3 EXPERIMENTO 2 – Perfis assimétricos de trajetória 3D no nado crawl em diferentes intensidades de exercício podem ser detectados por meio da análise de dados funcionais.

3.1 Introdução

O desempenho na natação pode ser influenciado pela interação de diversos fatores fisiológicos, psicológicos e mecânicos (BARBOSA *et al.*, 2021). Do ponto de vista biomecânico, a trajetória, a velocidade e a aplicação de força ao longo do ciclo da braçada podem influenciar o desempenho dessa modalidade (BARBOSA *et al.*, 2021). Para entender melhor esses fatores e identificar oportunidades de melhora do desempenho, treinadores e cientistas do esporte buscam avaliações que capturem informações relevantes durante as rotinas de treino e competição.

Os estudos que utilizam análise biomecânica em natação têm investigado como as informações cinemáticas podem estar relacionadas ao desempenho. Considerando que as curvas de deslocamento e velocidade refletem a capacidade dos nadadores de coordenar as ações propulsivas dos braços e pernas, minimizando as fontes de forças de resistência (ALBERTY *et al.*, 2005), as variações da velocidade representam o resultado líquido das forças resistivas e propulsivas que atuam no corpo do nadador (ALBERTY *et al.*, 2005). Sendo assim, a velocidade aumenta quando a força propulsora excede o arrasto e diminui quando o arrasto é maior que a força propulsora (TERMIN & PENDERGAST, 1998).

Tradicionalmente, variáveis discretas, como os valores de pico máximo e mínimo obtidos de séries temporais, servem como descritores do padrão de movimento do atleta. Na maioria dos estudos anteriores, a análise do movimento foi restrita a valores de máximo ou mínimo das curvas de deslocamento e velocidade. Embora os parâmetros discretos possam ser rapidamente extraídos das curvas das variáveis cinemáticas e permitem feedback imediato, eles negligenciam as informações temporais e dinâmicas contidas nas séries temporais. Nesse sentido, métodos de análise quantitativa que consideram todo o ciclo da braçada, como análise de dados funcionais (FDA) (RAMSAY e SILVERMAN, 2005; ANDRADE *et al.*, 2014; BERNARDINA *et al.*, 2021; SOARES *et al.*, 2021), poderia identificar as diferenças entre nadadores em diferentes velocidades do nado crawl por levar em consideração todo o padrão de movimento.

O presente estudo investigou a influência de diferentes intensidades do nado crawl, representada por três velocidades distintas (auto-selecionada, 85 e 100% da velocidade média alcançada em um teste máximo de 200 jardas) na assimetria da trajetória das braçadas direita e esquerda no nado crawl. Em outras modalidades esportivas, que envolvem movimentos cíclicos, como no ciclismo por exemplo, essa relação entre intensidade do exercício e assimetria tem sido investigada no intuito de verificar a relação entre assimetria e o desempenho (CARPES *et al.*, 2007; SOARES *et al.*, 2021). No ciclismo, os resultados mostram padrões assimétricos em exercício prolongado realizado em intensidade baixa a moderada, mas não em intensidades maiores em testes máximos (TRECROCI *et al.*, 2018). Entretanto, no melhor do nosso conhecimento, não encontramos estudos em natação que buscassem investigar a relação entre assimetria bilateral com a intensidade do exercício analisando as séries temporais do movimento.

A assimetria bilateral (AB) foi entendida como a diferença em parâmetros cinéticos e cinemáticos entre os membros inferiores ou superiores durante a realização de uma determinada tarefa (HODGES *et al.*, 2011). A análise da AB é importante para identificação do membro mais fraco para posterior prescrição de treinamento a fim de minimizar essas assimetrias, pois especula-se que maiores níveis de AB possam causar maior sobrecarga do membro que contribui mais para a produção de força, conduzindo este membro para um processo de fadiga de maneira prematura (CARPES *et al.*, 2007). Essa condição irá demandar do membro

menos forte uma maior participação de maneira precoce e que também irá se fadigar antecipadamente, portanto influenciando no desempenho do atleta.

Tradicionalmente, a quantificação da AB tem sido feita por equações como, por exemplo, o índice de assimetria, que a quantifica em relação a variáveis cinéticas e/ou cinemáticas definidas em um determinado instante do tempo (e.g. pico de velocidade) (CARPES *et al.*, 2010; SANDERS *et al.*, 2012). Na natação, os estudos que quantificaram a AB, utilizaram variáveis discretas para caracterizar o movimento. Santos *et al.* (2017), avaliaram parâmetros de força propulsiva no nado crawl, através de testes de nado atado, sendo que as variáveis de pico de força e taxa de desenvolvimento de força apresentaram diferença significativa entre os lados, com índice de assimetria maior que 10%. Estudos que avaliaram parâmetros cinemáticos quantificaram assimetrias no índice de coordenação (definido por um evento temporal no ciclo de braçada) quando utilizado padrões respiratórios de característica unilateral (SEIFERT *et al.*, 2008) e no rolamento do ombro durante o nado crawl, através do evento de máximo ângulo de rotação para os lados direito e esquerdo (PSYCHARAKIS, SANDERS, 2008).

No entanto, até o momento, não foram encontrados estudos que analisaram a assimetria da trajetória das braçadas por meio da análise de séries temporais. Métodos de análise quantitativa da série temporal têm sido propostos (e.g. *functional data analysis*) (CRENSHAW; RICHARDS, 2006; SEMINATI *et al.*, 2013; ANDRADE *et al.*, 2014) que permitem quantificar a assimetria em todo o ciclo da braçada. Se por um lado, a forma de se representar a trajetória da braçada em 3D envolve certa complexidade matemática, por meio da modelagem da série temporal, por outro, ganha em informação, pois acredita-se que as alterações na cinemática do movimento se reflitam na trajetória 3D da braçada e pode ser captada em instantes não relacionados a eventos específicos que são investigados por meio de índices.

Assim, diferente dos índices de assimetria utilizados em estudos (CARPES *et al.*, 2010; SANDERS *et al.*, 2012), que resumem a informação de assimetria a um único ponto definido a partir da escolha de um evento específico (geralmente valores de pico máximo e mínimo), a análise de séries temporais considera toda a informação contida nas curvas de deslocamento. Dessa forma, o objetivo do estudo foi comparar as curvas de trajetória completa das braçadas direita e esquerda do

nado crawl, em três velocidades distintas, por meio da análise de variância funcional (FANOVA) de dois fatores (lado preferido vs não preferido) e velocidade (auto-selecionada, 85 e 100% da velocidade média alcançada em um teste máximo de 200 jardas).

Em resumo, a proposta desse trabalho foi verificar a viabilidade de um sistema composto por câmeras de ação e pelo algoritmo de calibração não-linear em duplo meio no registro de deslocamento (mm) do marcador do terceiro dedo nos três eixos (X, Y e Z) no nado crawl e posterior quantificação da assimetria em diferentes velocidades do nado. Este seria um passo para o desenvolvimento de uma ferramenta confiável e de elevada exatidão que possibilitaria ao treinador/pesquisador ter um registro dos movimentos do nadador utilizando um sistema de baixo custo, permitindo que fosse feita a relação entre o desempenho dos atletas e as alterações na cinemática, e um consequente ajuste de planejamentos futuros.

3.2 Objetivos

Comparar as curvas de trajetória completa das braçadas direita e esquerda do nado crawl, em três velocidades distintas (auto selecionada, 85 e 100% da velocidade média alcançada em um teste máximo de 200 jardas), por meio da análise de variância funcional (FANOVA) de medidas repetidas de dois fatores.

3.3 Hipótese

H₁: A análise de variância funcional (FANOVA) será capaz de detectar assimetria das curvas de deslocamento das braçadas nos membros direito e esquerdo do nado crawl.

H₂: A mudança da intensidade de nado provocará assimetria nas curvas de deslocamento das braçadas direita e esquerda do nado crawl, principalmente no eixo vertical Z que apresenta os maiores deslocamentos no movimento.

3.4 Materiais e métodos

3.4.1 Cuidados éticos

O Projeto foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa da UFMG (COEP - UFMG) e aprovado sob o número do parecer 3.203.594. Os voluntários participantes da pesquisa foram informados quanto aos possíveis riscos e desconfortos, assim como os benefícios da pesquisa, e posteriormente assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

3.4.2 Instrumentos

Os instrumentos utilizados foram os mesmos adotados no experimento 1, conforme descritos no item 2.4.1, ainda assim serão acrescentadas algumas informações.

As câmeras foram dispostas nos lados direito e esquerdo da piscina, a uma distância aproximada de 10 metros entre os lados, a fim de capturar a cinemática das braçadas direita e esquerda do nado crawl. O deslocamento dos atletas aconteceu no centro desse espaço, estando à aproximadamente 5 metros de cada um dos lados. A fim de eliminar a influência da saída e dos primeiros metros nadados, as câmeras foram posicionadas a uma distância de 11,5 metros da borda em relação ao comprimento da piscina.

3.4.3 Calibração das câmeras e digitalização das imagens

Os procedimentos de calibração das câmeras foram os mesmos adotados no experimento 1, conforme descrito no item 2.4.2. Os procedimentos de digitalização das imagens foram os mesmos adotados no experimento 1, conforme descritos no item 2.4.4.

3.4.4 Procedimentos experimentais

Foram recrutados oito atletas de natação, do sexo masculino, com idade entre 17 e 34 anos (categoria júnior até as primeiras categorias máster), federados ou não federados. Neste estudo, define-se atleta de natação aquele indivíduo que está em treinamento regular com frequência semanal mínima de três sessões, mínimo de

seis mil metros de metragem semanal, e com pelo menos dois anos de experiência na modalidade. Além disso, o atleta deveria participar de competições a nível regional, estadual, nacional e/ou internacional e competir em provas do nado crawl, incluindo os 200 metros. Como critério de exclusão foi adotado o fato de o indivíduo apresentar alguma enfermidade ou patologia que pudesse comprometer a coleta dos dados e desistência por livre e espontânea vontade do voluntário. Durante a coleta, três voluntários abandonaram a pesquisa devido à pandemia do sars cov-2.

Os atletas participantes do estudo compareceram ao local de testes em dois dias distintos, separados por 24 ou 48 horas. A primeira visita de cada nadador ao local do experimento foi composta por: (1) medidas antropométricas (massa, estatura e envergadura); (2) atividade preparatória padronizada de 1000 metros na piscina, (3) teste de nado máximo de 200 jardas (T200). Na segunda visita, (1) atividade preparatória padronizada de 1000 metros na piscina; (2) procedimento de fixação de marcadores nas mãos e (3) teste de nado de 25 jardas (T25), em três velocidades distintas. Foi recomendado que os atletas não realizassem exercícios físicos de qualquer natureza no dia anterior às coletas e nos dias subsequentes, até o término dos testes.

As características antropométricas dos e a velocidade média alcançada no T200 são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2. Dados antropométricos e velocidade média alcançada no teste de nado máximo de 200 jardas dos cinco atletas de natação do sexo masculino.

Voluntários	Idade (anos)	Estatura (m)	Envergadura (m)	Massa corporal (kg)	Velocidade média do T200 (m/s)
1	23	179,5	180,3	82,9	1,66
2	20	175,5	185,0	72,0	1,62
3	23	182,5	190,0	74,0	1,46
4	24	181,0	188,3	79,9	1,51
5	24	169,5	173,0	65,2	1,42
Média	22,8±1,6	177,6±5,2	183,3±6,9	74,8±6,9	1,53±0,10

m = metros; kg = quilogramas; T200 = teste de nado máximo de 200 jardas; m/s = metros/segundos.

Fonte: Próprio autor

O teste de 200 jardas consistiu em nadar a distância à máxima velocidade. O tempo foi controlado por um treinador experiente, através de um cronômetro (TYR[®], Brasil) com precisão de 0,01 segundos. O desempenho do T200 (tabela 1) definiu as três velocidades alvo a serem nadadas no T25.

O teste de nado de 25 jardas consistiu em nadar doze vezes o percurso de 25 jardas no nado crawl, com um descanso de 3 minutos entre cada tentativa. Os quatro primeiros T25 foram realizados em velocidade auto selecionada (< 85% da velocidade média alcançada no T200), os quatro seguintes na velocidade correspondente à 85% velocidade média do T200 e os últimos quatro na velocidade correspondente à 100% do T200. Em cada um dos T25, dados cinemáticos de dois ciclos das braçadas direita e esquerda (definidos pela entrada na água de um dos membros superiores até a próxima entrada na água do mesmo membro) foram adquiridos pelas câmeras dispostas ao redor da piscina quando o atleta deslocou dentro do volume calibrado. Um marcador esférico preto (\varnothing : 14mm) foi fixado, por fita dupla face antialérgica (APD Motion, Brasil), na extremidade distal do terceiro dedo de cada mão dos nadadores (Figura 7). Devido ao fato dos marcadores serem da cor preta os atletas foram orientados a utilizarem vestimenta e touca em cor clara. Os nadadores realizaram a saída de dentro da piscina e para eliminar possíveis efeitos da respiração nas variáveis estudadas, os nadadores foram instruídos a evitar respirar enquanto atravessavam o volume calibrado.

Figura 7. Marcador esférico preto (\varnothing : 14mm) fixado na extremidade distal do terceiro dedo de cada mão para representar o deslocamento (mm) das braçadas direita e esquerda do nado crawl.



Fonte: Próprio autor

O tempo foi controlado através de um cronômetro (TYR[®], Brasil) com precisão de 0,01 segundos, a fim de que cada nadador cumprisse as quatro tentativas que compõem o teste em velocidades similares. Para a velocidade auto-selecionada, uma margem de 1 segundo a mais ou 1 segundo a menos em relação ao tempo da primeira tentativa foi considerada. Para as demais velocidades também foram consideradas mais ou 1 segundo a menos em relação ao tempo alvo. A cada tentativa não válida foi realizada uma nova, para que ao total fossem registrados dados de quatro T25.

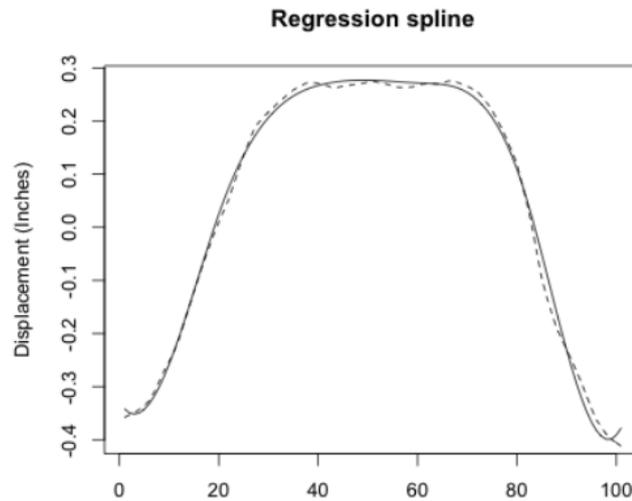
3.4.5 Análise de dados funcionais

Antes de abordar a FANOVA será feita uma breve descrição da abordagem da *Functional data analysis* (FDA). Existem cinco procedimentos principais no FDA: (a) transformar os dados em funções; (b) escolher a base ortogonal que vai representar os dados, (c) suavizar funções, (d) registrar as funções e (e) realizar a análise estatística (CRANE *et al.*, 2011).

(a) Transformar os dados capturados em funções:

Inicialmente os dados da série temporal força vs. ângulo foram transformados em uma função. Portanto, se um ciclo fosse representado por n observações, transformando esses pontos de dados em uma função, o comportamento pode agora ser considerado uma observação funcional única. A figura abaixo (Figura 8) ilustra um exemplo de transformação de uma série temporal em um dado funcional em que a linha pontilhada seria o dado original (série temporal) e a linha contínua o funcional desta série temporal:

Figura 8. Transformação de série temporal em dado funcional



Fonte: adaptada de CRANE *et al.*, 2011, p.4

(b) Escolha da base ortogonal que vai representar os dados:

Dentre as várias bases ortogonais, as mais utilizadas são as bases de *Fourier* e *Spline*. Uma base de *Fourier* é tipicamente usada para dados periódicos, enquanto *Splines* (em particular *b-splines*) são usados para dados não periódicos. No presente estudo será utilizada a base de *Fourier* para reconstruir a série temporal, já que os dados da trajetória da braçada nos eixos x, y e z são periódicos e estacionários. Uma vantagem importante de transformar dados discretos em funções é a facilidade com que as derivadas podem ser calculadas, que é uma atividade comum na análise biomecânica do movimento humano (CRANE *et al.*, 2011). Por exemplo, a partir do dado de deslocamento é possível obter as velocidades e acelerações, sem a propagação de erro que haveria caso a derivada fosse realizada na própria série temporal.

Uma maneira de armazenar observações funcionais é em termos de uma base. Uma base é um conjunto padrão de funções, denotado $\beta_1(t)$, $\beta_2(t)$, ..., $\beta_m(t)$, por exemplo, para que qualquer função de interesse possa ser expandida em termos das funções $\beta_j(t)$. Em termos formais, a série temporal de dados 'y' qualquer é representada pela seguinte equação (Equação 3):

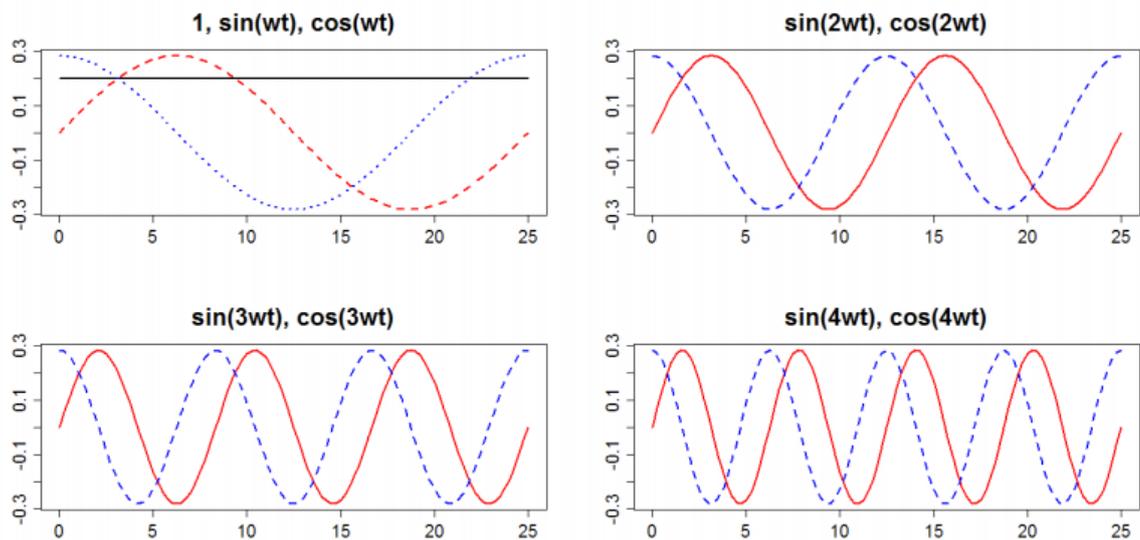
$$y(t) = \sum_{j=1}^m \beta_j(t) c_j$$

Equação 3

Em que o vetor 'c' de coeficientes $c = (c_1, \dots, c_m)$ que especifica a função e $\beta_j(t)$ representam as funções de base.

A figura abaixo (Figura 9) ilustra as quatro primeiras bases de *Fourier* que podem ser utilizadas para reconstruir uma série temporal cíclica qualquer $y(t)$.

Figura 9. Bases de Fourier. $\sin(wt)$ é a função seno em vermelho e $\cos(wt)$ é a função cosseno em azul.



Fonte: Adaptado de Ramsay, Hooker e Graves (2009).

(c) Suavização dos dados:

As funções podem ser suavizadas minimizando o número de bases ortogonais a serem utilizadas e adotando o método de mínimos quadrados (CRANE *et al.*, 2011) para definição do número ideal de bases. A questão que se coloca é o número de bases ' β_j ' a serem utilizadas para reconstruir a série temporal, em que um número grande de bases ortogonais pode levar a modelar, além do sinal também os ruídos presentes, e um número pequeno de bases pode implicar em não capturar importantes modificações no comportamento da série temporal. Portanto, a escolha do número de bases ortogonais a serem utilizadas para reconstrução do sinal, passa

por um critério objetivo dado pela minimização do erro quadrático médio (EQM) entre a série temporal e o modelo construído (Equação 4).

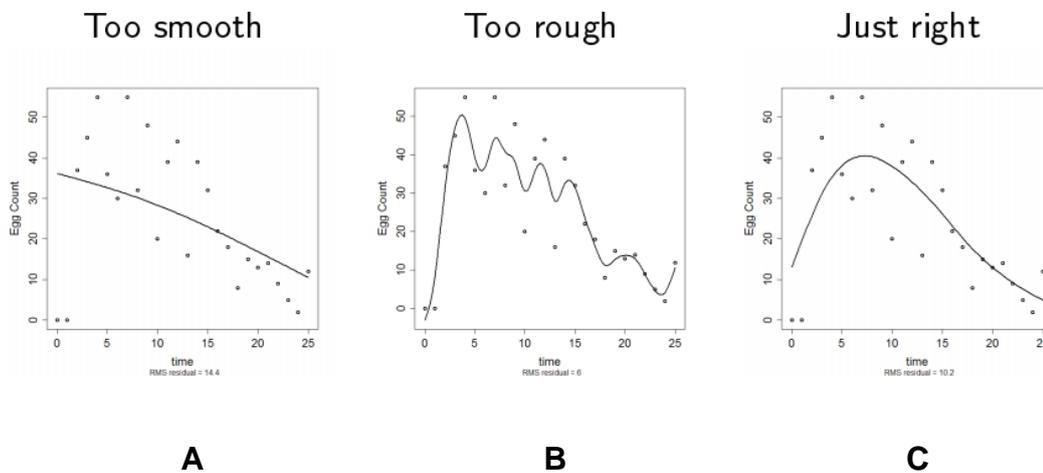
$$EQM = \sum_{i=1}^n (y_i - x(t_i))^2$$

$$= \sum_{i=1}^n (y_i - \beta(t_i)c)^2 \quad \text{Equação 4}$$

Em que a série temporal $x(t)$ foi reconstruída a partir das funções de base ' β ' e seus coeficientes ' c '.

A figura 10 abaixo ilustra a reconstrução de um sinal, representado pelos pontos (.) por meio de diferentes números de bases ortogonais (linha contínua).

Figura 10. Exemplo de reconstrução de um sinal. Suavização ou ajuste realizado com o número de bases ortogonais abaixo (A), acima (B) e com o número ideal (C) (linha contínua nas três imagens), definido pelo critério de erro quadrático médio.



Fonte: adaptada de Ramsay, Hooker e Graves (2009).

(d) Registro das funções - Alinhamento de curvas:

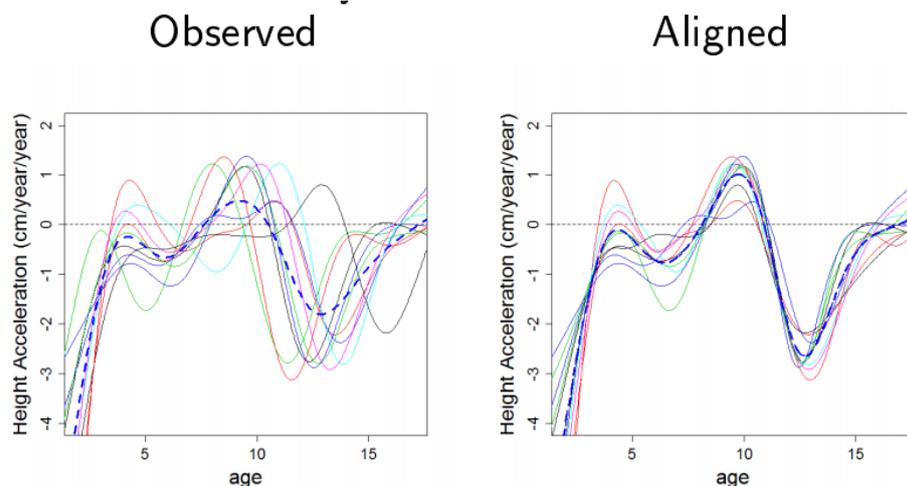
Geralmente na análise biomecânica são realizadas várias tentativas de um determinado movimento, por diferentes razões, como por exemplo, o de garantir maior reprodutibilidade da informação adquirida. Se as séries temporais de

diferentes tentativas apresentarem alguma variação de fase e/ou de amplitude, a curva média pode não representar com precisão o verdadeiro comportamento de diferentes realizações daquele movimento. O propósito do alinhamento de curvas é reduzir a variabilidade de fase enquanto preserva a forma e a amplitude das curvas. Um método comum para o alinhamento de curvas é um procedimento de normalização de tempo linear e um procedimento análogo na *FDA* se chama registro (*registration*).

O registro do ponto de referência é, uma forma mais simples de registrar um conjunto de curvas. Um ponto de referência é definido como um ponto identificável em todas as curvas. Pode ser um cruzamento de mínimos, máximos ou zero. O registro de ponto de referência alinha todos os pontos de referência especificados, fazendo com que a curva média represente de forma fidedigna as tentativas realizadas (CRANE *et al.*, 2011).

A figura 11 abaixo mostra a esquerda uma curva média (linha pontilhada) gerada sem o registro das curvas, e à direita a curva média gerada após o registro.

Figura 11. Exemplo de sinais antes e após o procedimento registro



Fonte: Adaptada de Ramsay, Hooker e Graves (2009).

(e) Análise estatística funcional:

Uma vantagem de tratar o comportamento de determinada variável como uma função é não reduzi-la a um único ponto para a análise, já que isso eliminaria informações que poderiam ser importantes para o fenômeno analisado (CRANE *et al.*, 2011). Portanto, ao utilizar o *FDA* e representar cada curva como uma função, é possível usar um análogo funcional dos métodos estatísticos tradicionais sem reduzir a variável a um único ponto. Como no presente estudo, compararemos dois fatores (intensidade vs lado), a análise formal seria dada por (Equação 5).

$$\text{Trajetória}_{kc}(t) = \mu(t) + \alpha_c(t) + \varepsilon_{kc}(t) \quad \text{Equação 5}$$

‘ μ ’ indica o perfil de trajetória média em todas as condições (e.g. eixo vertical z). O termo α_c refere-se ao perfil de trajetória específica de uma condição ‘c’. O funcional residual ε_{kc} é a variação não explicada pelo modelo. Além disso, as análises resultam em curvas dos efeitos médios estimados para cada variável durante todo o ciclo da braçada, com intervalos de confiança de 95% (IC). Pode-se afirmar que as condições experimentais são significativamente diferentes das demais, se os valores de IC não incluírem a linha zero (RØISLIEN *et al.*, 2009).

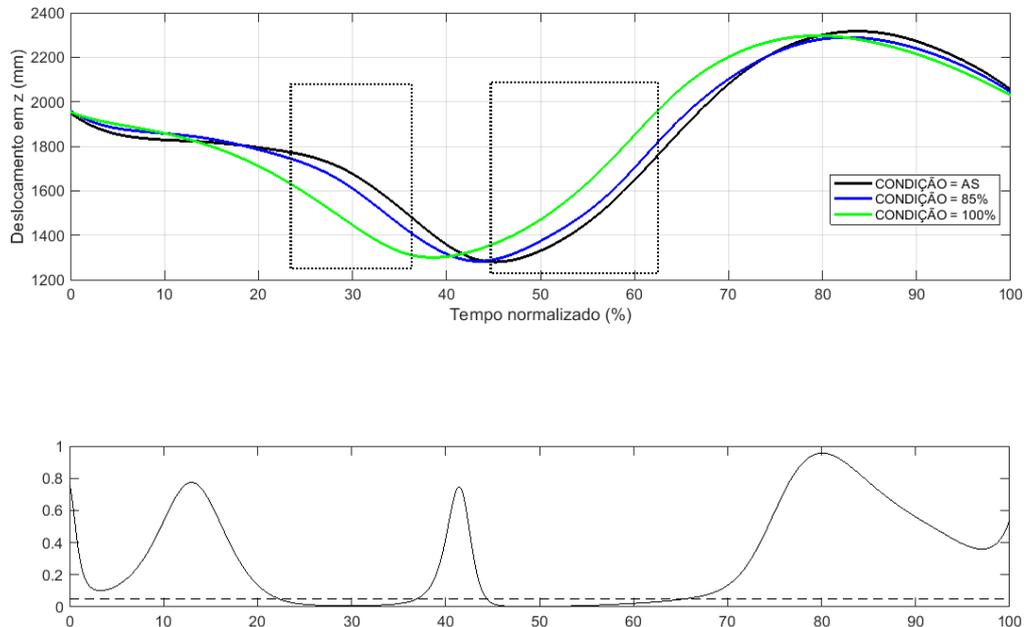
3.4.6 Análise estatística

Para determinar as assimetrias nas séries temporais da trajetória da braçada no nado crawl, foi aplicada uma análise de variância funcional *two-way* (FANOVA) para medidas repetidas, considerando os fatores membro com dois níveis (direita e esquerda) e intensidade do nado com três níveis (velocidade auto selecionada, 85 e 100%). Em caso de interação significativa foi aplicado o *post hoc* de *Bonferroni*. A variável dependente analisada foi a trajetória reconstruída em cada um dos três planos de movimento já que as alterações promovidas pela modificação da velocidade do nado podem influenciar de formas distintas o padrão de movimento em cada um dos planos. As rotinas da confiabilidade e da FANOVA foram implementadas no Matlab 2017a (MathWorks, USA).

3.5 Resultados

Os resultados da FANOVA, com o *post hoc* de *Bonferroni*, mostraram diferenças entre o deslocamento no eixo Z na intensidade de 100% comparada as demais, sendo que não houve diferença significativa entre as velocidades de 85% e auto selecionada. As diferenças na curva de deslocamento no eixo Z ocorreram durante 23 a 38% e 45 a 62% do tempo normalizado do ciclo da braçada (Figura 12).

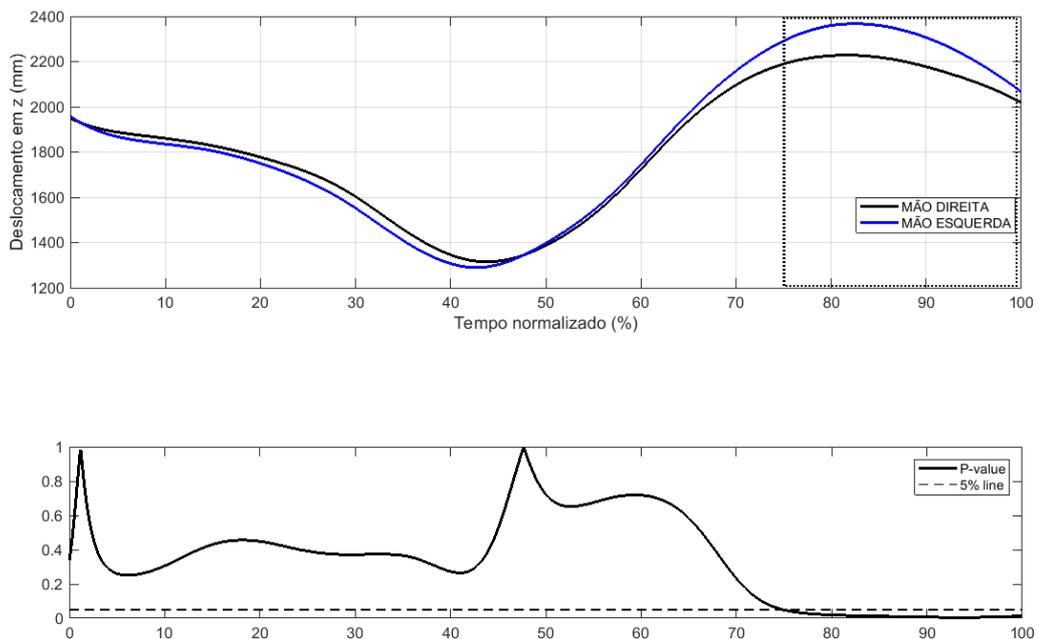
Figura 12. Efeito principal de velocidade entre as curvas de deslocamento (mm) no eixo Z (vertical) nas três diferentes intensidades do nado crawl (auto-selecionada, 85 e 100% da velocidade média alcançada no T200). As curvas representam a média dos perfis de deslocamento no eixo Z (mm) para as diferentes intensidades de exercício (painel superior). O painel inferior indica os intervalos em que foram encontradas diferenças significativas na FANOVA (a linha horizontal pontilhada indica o valor alfa de 5%).



Fonte: Próprio autor

Além disso, a FANOVA identificou diferenças entre os membros, independentemente da intensidade do exercício (efeito principal). O teste *post hoc* de *Bonferroni* identificou assimetrias entre os membros, considerando a curva de deslocamento no eixo Z de 75 a 100% do ciclo de braçada (Figura 13).

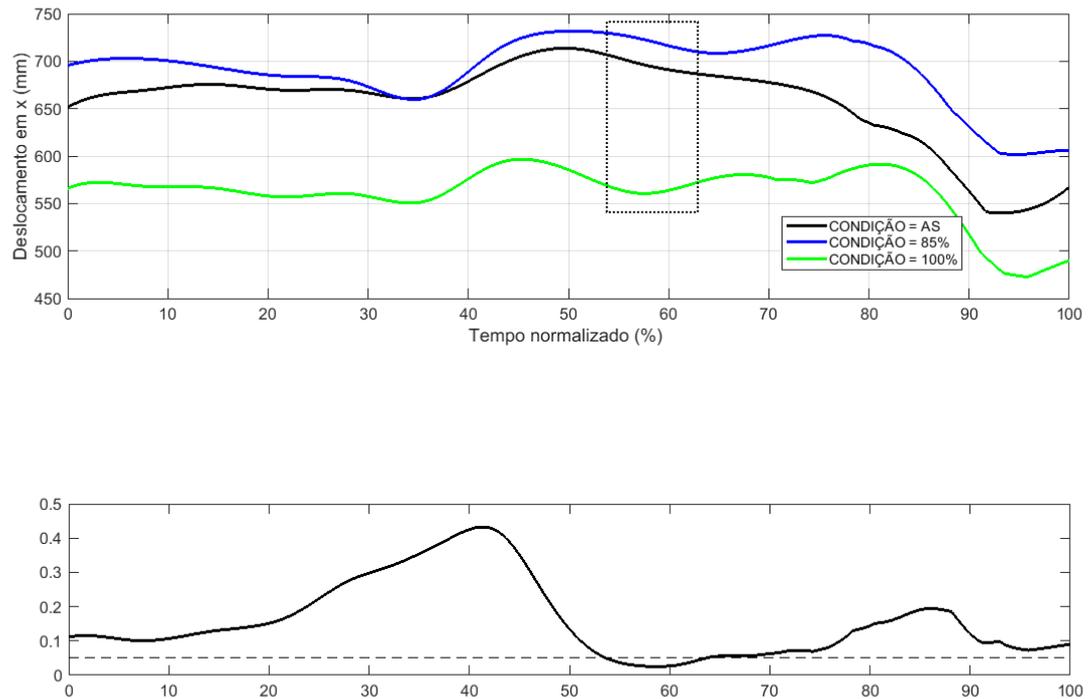
Figura 13. Efeito principal de membro preferido (direito) vs não preferido (esquerdo) entre as curvas de deslocamento no eixo Z (mm) independente da intensidade do nado crawl. As curvas representam a média dos perfis de deslocamento no eixo Z (mm) entre os membros preferido vs não preferido (painel superior). O painel inferior indica os intervalos em que foram encontradas diferenças significativas na FANOVA (a linha horizontal pontilhada indica o valor alfa de 5%).



Fonte: Próprio autor

Em relação ao eixo X, a FANOVA identificou diferenças entre as intensidades, independentemente do membro analisado (efeito principal). O teste *post hoc* de *Bonferroni* mostrou diferenças entre o deslocamento no eixo X na intensidade de 100% comparada as demais, sendo que não houve diferença significativa entre as velocidades de 85% e auto selecionada (Figura 14). As diferenças na curva de deslocamento no eixo X ocorreram durante 53 a 62% do tempo normalizado do ciclo da braçada.

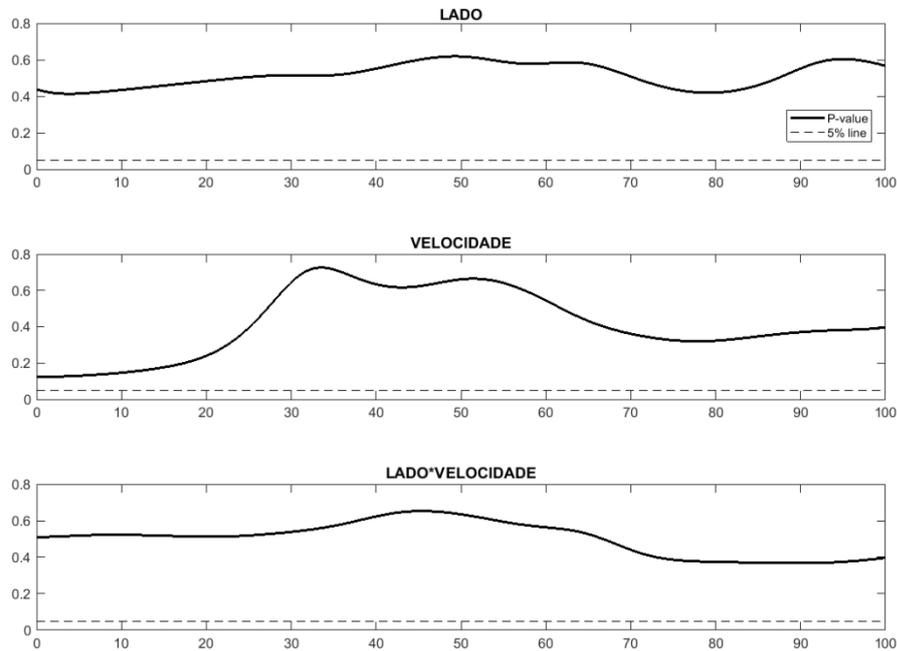
Figura 14. Efeito principal de velocidade entre as curvas de deslocamento (mm) no eixo X (latero-lateral) nas três diferentes intensidades do nado crawl (auto-selecionada, 85 e 100% da velocidade média alcançada no T200). As curvas representam a média dos perfis de deslocamento no eixo X (mm) para as diferentes intensidades de exercício (painel superior). O painel inferior indica os intervalos em que foram encontradas diferenças significativas na FANOVA (a linha horizontal pontilhada indica o valor alfa de 5%).



Fonte: Próprio autor

No eixo Y, a FANOVA não mostrou efeito principal de membro, intensidade e nem de interação significativa entre os fatores para o deslocamento no eixo Y. A figura 15 abaixo mostra os resultados da FANOVA.

Figura 15. Resultados da FANOVA comparando curvas de deslocamento no eixo Y – efeitos principais e interação.



Fonte: Próprio autor

3.6 Discussão

O objetivo desse experimento foi determinar se a observação das assimetrias da braçada no nado crawl, mais especificamente a trajetória da braçada nos três eixos, depende da abordagem de análise dos dados. Os resultados encontrados confirmam nossas hipóteses. A FANOVA se mostrou sensível em identificar às assimetrias, confirmada pela trajetória no eixo Z, e o efeito da intensidade do exercício no deslocamento, foi confirmado nos eixos Z e X, sendo que a FANOVA identificou as diferenças e quando estas ocorreram ao longo do tempo.

Nossa hipótese é que a análise da série temporal forneceria uma compreensão mais clara da trajetória da braçada para cada membro durante o exercício, uma vez que considera todo o perfil da curva de deslocamento. Para testar isso, optou-se por realizar a FANOVA. A principal vantagem do uso dessa análise é que os dados brutos não precisam ser reduzidos a um único valor ou a um grupo de valores para utilizar análises estatísticas tradicionais como a ANOVA e, portanto, todo o padrão

de movimento pode ser considerado. Além disso, o deslocamento é obtido a partir dos dados suavizados e não dos dados brutos, o que evita a propagação do ruído do sinal (RAMSAY *et al.*, 2009), e torna as estimativas estatísticas mais precisas. Esses achados estão de acordo com os estudos prévios realizados pelo grupo (ANDRADE *et al.*, 2014; SOARES *et al.*, 2021; BERNARDINA *et al.*, 2021), que verificaram que a análise de dados funcionais adiciona informações relevantes para a análise do movimento em comparação com a abordagem tradicional da ANOVA. Além disso, as rotinas para análise do FANOVA estão disponíveis e são de fácil implementação (RAMSAY *et al.*, 2009).

A influência das assimetrias de braçada no desempenho na natação ainda não está clara. Poucos estudos avaliaram parâmetros cinemáticos da braçada no nado crawl e ainda utilizam eventos temporais (SEIFERT *et al.*, 2008; NIKODELIS *et al.*, 2005) e quando avaliaram parâmetros cinéticos, foram considerados apenas valores discretos (SANTOS *et al.* 2017). Outros estudos, ao abordarem modificação dos parâmetros cinemáticos da braçada em determinada situação, como durante um nado máximo, uso de resistências adicionais ou em condições de respiração, não apresentam comparação entre os lados direito e esquerdo, e ainda considerados apenas valores discretos (FIGUEIREDO *et al.*, 2013; GOURGOULIS *et al.*, 2010; McCABE e Sanders, 2012; McCABE *et al.*, 2015)

Embora os valores discretos são relevantes para o conhecimento das características da cinética e cinemática do nado crawl, uma vez que um pico de torque mais alto gera uma potência de pico mais alta, a consideração de um único valor para representar o comportamento do movimento negligencia a variabilidade dos graus de liberdade mecânicos do sistema de movimento humano. Considerando que é possível iniciar um movimento a partir da mesma posição inicial e atingir uma posição final idêntica com diferentes movimentos parciais (ANDRADE *et al.*, 2014), é importante considerar toda a trajetória da braçada, uma vez que ela consiste na combinação de movimentos horizontais, verticais e latero-laterais. A abordagem que propomos pode ser facilmente aplicada à análise do desempenho na natação conforme já demonstrado em estudos prévios do nosso grupo de pesquisa em atletas de alto rendimento (BARBOSA *et al.*, 2021).

A FANOVA mostrou um padrão assimétrico, a favor da mão preferida no eixo Z, independentemente da intensidade do exercício. Este resultado indica a

insuficiência da análise de momento único para descrever assimetrias cíclicas. Diferenças no deslocamento no eixo Z, independente das intensidades conforme descrito pela FANOVA, podem indicar que a mão preferida utiliza uma trajetória otimizada quando comparado à mão não preferida no trecho final da braçada submersa e toda a fase aérea (75 a 100%) e, portanto, a assimetria pode ser considerada uma “assinatura” do atleta que é consistente em diferentes intensidades (efeito principal). Estudos futuros devem considerar a análise do perfil de velocidade e outros parâmetros, como variação angular de cotovelo, por exemplo, para verificar se esse raciocínio se sustenta. Portanto, consideramos que o FANOVA foi capaz de mostrar diferenças mais relacionadas à técnica de braçada, em como os nadadores deslocam a mão verticalmente (no eixo Z) durante o nado crawl.

Entretanto, tais padrões assimétricos não foram encontrados para o deslocamento nos eixos X e Y. Os deslocamentos no eixo X representam a variação da posição da mão lateralmente. Mesmo que as mãos devam ser empurradas para trás, a fim de o nadador se deslocar para frente, elas seguem uma trajetória, principalmente submersa, que se desviam lateralmente (GOURGOULIS *et al.*, 2010). Entretanto a amplitude desse deslocamento é pequena em relação a outros eixos o que pode gerar padrões similares entre as braçadas. Os deslocamentos no eixo Y representam a amplitude da braçada antero-posterior e é o principal movimento para gerar forças propulsivas. Isso pode justificar o padrão simétrico entre os membros, entretanto estudos futuros devem considerar a análise do perfil de velocidade, pois informações da trajetória juntamente com a velocidade podem ajudar a compreender o perfil de eficiência propulsiva em cada braçada.

Considerando a intensidade do exercício, representada pelas três velocidades, foram encontradas diferenças significativas para os eixos Z e X, independente do lado analisado (efeito principal). Para o eixo Z, A FANOVA mostrou diferenças entre o deslocamento na intensidade de 100% comparada as demais, sendo que não houve diferença significativa entre as velocidades de 85% e auto selecionada. As diferenças na curva de deslocamento ocorreram durante 23 a 38% e 45 a 62% do tempo normalizado do ciclo da braçada (Figura 12). Esses momentos representam momentos propulsivos na fase submersa, fases de puxada e empurrada, respectivamente. Os deslocamentos no eixo Z representam a variação da posição da mão verticalmente. Os resultados demonstram uma braçada mais profunda na

fase de puxada e mais rasa na fase de empurrada. Em velocidades mais altas, com maiores frequências de braçada, os nadadores podem apresentar maior rolamento do ombro e assim maiores profundidades da braçada na primeira fase propulsiva (FIGUEIREDO *et al.*, 2013). A profundidade também tem influência sobre o ângulo que é formado no cotovelo e na segunda fase propulsiva, com uma braçada mais rasa, e possivelmente menores ângulos de cotovelo, alta velocidade angular de extensão da articulação pode contribuir para a manutenção da velocidade angular da mão e assim eficiência propulsão. Estudos futuros devem considerar a análise do perfil de velocidade e outros parâmetros, como variação angular de cotovelo, por exemplo, para verificar se esse raciocínio se sustenta.

Já para o eixo X, as diferenças na curva de deslocamento ocorreram durante 53 a 62% do tempo normalizado do ciclo da braçada (Figura 14). Esse momento representa a segunda fase propulsiva, empurrada. Os resultados sugerem que, na velocidade mais alta, há manutenção uma braçada mais próxima ao corpo durante toda a trajetória, sem aumento dos desvios laterais. Além disso, esse resultado sustenta a braçada mais rasa encontrada no eixo Z, uma vez que menores ângulos de cotovelo, em decorrência dessa posição vertical, também contribui para a posição da mão no eixo X. Estudos futuros devem considerar outros parâmetros, como variação angular de cotovelo, por exemplo, para verificar se esse raciocínio se sustenta.

3.7 Conclusão

A análise de variância funcional identificou a assimetria de deslocamento no eixo Z no nado crawl independentemente da intensidade do exercício, indicando possíveis assimetrias entre membros. Além disso, identificou os atletas podem alterar o padrão de nado, considerando a trajetória da braçada, de acordo com mudanças da intensidade de nado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão, essa tese sugere que o sistema da análise cinemática 3D utilizando câmeras de ação para uso em duplo meio, com maior quantidade de câmeras e com o método de calibração não-linear possibilitaram o uso de um maior volume de aquisição e mostrou resultados de elevada exatidão e confiabilidade. Além disso, a possibilidade de usar o FANOVA para identificar regiões ou partes do movimento influenciadas por uma determinada condição experimental ou nível de treinamento podem fornecer uma contribuição para a análise e compreensão da assimetria na Biomecânica do esporte.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M.. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. In: SYMPOSIUM ON CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY, 1-18, Falls Church. 1971. Proceedings of Close-Range Photogrammetry. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 1971.
- ALBERTY, M., SIDNEY, M., HUOT-MARCHAND, F., HESPEL, J. M., PELAYO, P. Intracyclic velocity variations and arm coordination during exhaustive exercise in front crawl stroke. **International Journal of Sports Medicine**, v. 26, n. 6, p. 471–475, 2005.
- ALBERT, M.; SIDNEY, M.; PELAYO, P.; TOUSSAINT, H.M. Strokking characteristics during time to exhaustion testes. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 41, n. 3, p. 637-644, 2009.
- ANDERSEN, J.T.; SINCLAIR, P.J.; MCCABE, C.B.; SANDERS, R.H. Kinematic Differences in Shoulder Roll and Hip Roll at Different Front Crawl Speeds in National Level Swimmers. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 34, n. 1, p. 20–25, 2020.
- ANDRADE, A.G.P.; POLESE, J.C.; PAOLUCCI, L.A.; MENZEL, H.J.K.; TEIXEIRA-SALMELA, L.F. Functional data analyses for the assessment of joint power profiles during gait of stroke subjects. **Journal of Applied Biomechanics**, v. 30, n. 2, p. 348-352, 2014.
- BARBOSA, A.C.; BARROSO, R.; GONJO, T.; ROSSI, M.M.; PAOLUCCI, L.A.; OLSTAD, B.H.; ANDRADE, A.G.P. 50 m freestyle in 21, 22 and 23 s: What differentiates the speed curve of world-class and elite male swimmers? **International Journal of Performance Analysis in Sport**, v. 21, n. 6, p. 1055-1065, 2021.
- BARROS, R.M.L.; BREZIKOFER, R.; LEITE, N.J.; FIGUEROA, P.J. Desenvolvimento e avaliação de um sistema para análise cinemática tridimensional de movimentos humanos. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, v.15, n.1-2, p. 79-86, 1999.
- BARTHEL, K.M. Biomechanical research in swimming: past, present and future. **International Symposium on Biomechanics in Sports**, 1983.
- BERNARDINA, G.R.D.; CERVERI, P.; BARROS, R.M.L.; MARINS, J.C.B.; SILVATTI, A.P. Action Sport Cameras as an Instrument to Perform a 3D Underwater Motion Analysis. **PLoS ONE**, v. 11, n. 8, p. 1-14, 2016.
- BERNARDINA, G.R.D., CERVERI, P., BARROS, R.M.L., MARINS, J.C.B., SILVATTI, A.P. In-air versus underwater comparison of 3D reconstruction accuracy using action sport cameras. **Journal of Biomechanics**, v. 51, p. 77–82, 2017.
- BERNARDINA, G.R.D., MONNET, T., PINTO, H.T., BARROS, R.M.L., CERVERI, P., SILVATTI, A.P. Are Action Sport Cameras Accurate Enough for 3D Motion Analysis?

A Comparison with a Commercial Motion Capture System. **Journal of Applied Biomechanics**, v. 35, p. 80-86, 2018.

BERNARDINA, G.R.D.; MONNET, T., CERVERI, P.; SILVATTI, A.P. Moving system with action sport cameras: 3D kinematics of the walking and running in a large volume. **PLoS ONE**, v. 14, n. 11, 2019.

BERNARDINA, G.R.D., SANTOS, M.D.M.; RESENDE, R.A.; MELLO, M.T.; ALBUQUERQUE, M.R.; PAOLUCCI, L.A.; CARPES, F.P.; SILVA, A.; ANDRADE, A.G.P. Asymmetric velocity profiles in Paralympic powerlifters performing at different exercise intensities are detected by functional data analysis. **Journal of Biomechanics**, v. 123, 2021.

BTS Bioengineering. BTS Smart DX. 2014. Disponível: [http://www.btsbioengineering.com/wp-content/uploads/2014/02/BTSBRO SMART-DX-1113UK_LQ.pdf](http://www.btsbioengineering.com/wp-content/uploads/2014/02/BTSBRO_SMART-DX-1113UK_LQ.pdf)

CARPES, F.P.; ROSSATO, M.; FARIA, I.E.; MOTA, C B. Bilateral pedaling asymmetry during a simulated 40-km cycling time-trial. **Journal of Sports Medicine and Physical Fitness**, v. 47, p. 51-57, 2007.

CARPES, F.P.; MOTA, C.B.; FARIA, I.E. On the bilateral asymmetry during running and cycling – a review considering leg preference. **Physical Therapy in Sport**, v.11, n.4, p. 136–142, 2010.

CERVERI, P.; BORGHESE, N.A.; PEDOTTI, A. Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates. **Journal of Biomechanics**, v. 31, n. 10, p. 935-940, 1998.

CERVERI, P.; PEDOTTI, A.; BORGHESE, N.A. Combined evolution strategies for dynamic calibration of video-based measurement systems. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 5, n. 3, p. 271-282, 2001.

CHAINOK, P.; MACHADO, L.; DE JESUS, K.; ABRALDES, J.A.; BORGONOVO-SANTOS, M.; FERNANDES, R.J.; VILAS-BOAS, J.P. Backstroke to breaststroke turning performance in age-group swimmers: hydrodynamic characteristics and pull-out strategy. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n.4, p. 1858, 2021.

CHIARI, L.; CROCE, U.D.; LEARDINI, A.; CAPPOZZO, A. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 2: instrumental errors. **Gait Posture**, v. 21, n. 2, p. 197-211, 2005.

CHOLLET, D.; CHALIES, S.; CHATARD, J.C. A new index of coordination for the crawl: description and usefulness. **International Journal of Sports Medicine**, v. 21, n. 1, p. 54-59, 2000.

CRANE, E.; CHILDERS, D.; GERSTNER, G.; ROTHMAN, E. Functional Data Analysis for Biomechanics. In: **Theoretical Biomechanics**. InTechOpen, Londres, p. 78-92, 2011.

CRENSHAW, S.J.; RICHARDS, J.G. A method for analyzing joint symmetry and normalcy, with an application to analyzing gait. **Gait & Posture**, v. 24, p. 515-521, 2006.

FIGUEIREDO, P.; MACHADO, L.; VILAS-BOAS, J.; FERNANDES, R. Reconstruction error of calibration volume's coordinates for 3D swimming kinematics. **Journal of Human Kinetics**, v. 29, p. 35-40, 2011.

FIGUEIREDO, P.; PENDERGAST, D. R.; VILAS-BOAS, J. P.; FERNANDES, R. J. Interplay of Biomechanical, Energetic, Coordinative, and Muscular Factors in a 200 m Front Crawl Swim. **BioMed research international**, v. 2013, p. 1-12, 2013.

FIGUEIREDO, P.; SANDERS, R.; GORSKI, T.; VILAS-BOAS, J.; FERNANDES, R. Kinematic and electromyographic changes during 200 m front crawl at race pace. **International Journal of Sports Medicine**, v. 34, p. 49-55, 2013.

FIGUEROA, P.J.; LEITE, N.J.; BARROS, R.M.L. A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, v. 72, n. 2, p. 155-165, 2003.

GARCÍA-RAMOS, A.; FERICHE, B.; DE LA FUENTE, B.; ARGÜELLES-CIENFUEGOS, J.; STROJNIK, V.; STRUMBELJ, B.; STIRN, I. Relationship between different push-off variables and start performance in experienced swimmers. **European Journal of Sport Science**, v. 15, n. 8, p. 687-695, 2015.

GOURGOULIS, V.; AGGELOUSSIS, N.; KASIMATIS, P.; VEZOS, N.; BOLI, A.; MAVROMATIS, G. Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 11, n. 2, p. 90-95, 2008.

GOURGOULIS, V.; ANTONIOU, P.; AGGELOUSSIS, N.; MAVRIDIS, G.; KASIMATIS, P.; VEZOS, N.; BOLI, A.; MAVROMATIS, G. Kinematic characteristics of the stroke and orientation of the hand during front crawl resisted swimming. **Journal of Sports Sciences**, v. 28, n. 11, p. 1165–1173, 2010.

HODGES, S.J.; PATRICK, R.J.; REISER, R.F. Effects of Fatigue on Bilateral Ground Reaction Force Asymmetries during the Squat Exercise. **Journal of Strength and Conditioning**, v. 25, n. 11, p. 3107-3117, 2011.

JESUS, K.; JESUS, K.; FIGUEIREDO, P.; GONÇALVES, P.; PEREIRA, S.M.; VILAS-BOAS, J.P.; FERNANDES, R.J. Backstroke star kinematic and kinetic changes due to different feet positioning. **Journal of Sports Sciences**, v. 31, n. 15, p. 1665-1675, 2013.

JESUS, K.; JESUS, K.; FIGUEIREDO, P.; VILAS-BOAS, J.P.; FERNANDES, R.J.; MACHADO, L.J. Reconstruction accuracy assessment of surface and underwater 3D motion analysis: a new approach. **Computational and Mathematical Methods in Medicine**, 2015.

KWON, Y.; CASEBOLT, J.B. Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis. **Sports Biomechanics**, v. 5, n. 2, p. 315-340, 2006.

MAGALHAES, F.A.; SAWACHA, Z.; DI MICHELE, R.; CORTESI, M.; GATTA, G.; FANTOZZI, S. Effectiveness of an automatic tracking software in underwater motion analysis. **Journal of Sports Science and Medicine**, v. 12, n. 4, p. 660-667, 2013.

MARTINS, A.G. Sobre Confiabilidade e Validade. **RBGN**, v. 8, n. 20, p. 1-12, 2006.

MACHTSIRAS, G.; SANDERS R.H. Accuracy of portable (PTZ digital) camera system designed for aquatic three-dimensional analysis. In: 27^a International Conference on Biomechanics in Sport, Limerick, Irlanda, 2009.

MATSUDA, Y.; YAMADA, Y.; IKUTA, Y.; NOMURA, T.; ODA, S. Intracyclic velocity variation and arm coordination for different skilled swimmers in the front crawl. **Journal of Human Kinetics volume**, v. 44, p. 67-74, 2014.

McCABE, C.B.; SANDERS, R.H. Kinematic differences between front crawl sprint and distance swimmers at a distance pace. **Journal of Sports Sciences**, v. 30, n. 6, p. 601-608, 2012.

McCABE, C.B.; SANDERS, R.H.; PSYCHARAKIS, S.G. Upper limb kinematic differences between breathing and non-breathing conditions in front crawl sprint swimming. **Journal of Biomechanics**, v. 48, n. 15, p. 3995-4001, 2015.

MONNET, T.; SAMSON, M.; BERNARD, A.; DAVID, L.; LACOUTURE, P. Measurement of three-dimensional hand kinematics during swimming with a motion capture system: a feasibility study. **Sports Engineering**, v. 17, n. 3, p. 171-181, 2014.

MOONEY, R.; CORLEY, G.; GODFREY, A.; OSBOROUGH, C.; QUINLAN, L.R.; OLAIGHIN, G. Application of video-based methods for competitive swimming analysis: a systematic review. **Sports and Exercise Medicine**, v. 1, n. 5, p. 133-150, 2015.

MOONEY, R.; QUINLAN, L.R.; CORLEY, G.; GODFREY, A.; OSBOROUGH, C.; OLAIGHIN, G. Evaluation of the Finis Swimsense® and the Garmin Swim™ activity monitors for swimming performance and stroke kinematics analysis. **PLoS ONE**, v. 12, n. 2, 2017.

MOROUÇO, P.G.; MARINHO, D.A.; FERNANDES, R.J.; MARQUES, M.C. Quantification of upper limb kinetic asymmetries in front crawl swimming. **Human Movement Science**, v. 40, p. 185-192, 2015.

Motion Analysis Corporation. Movement analysis products. 2016. Disponível: <http://www.motionanalysis.com/html/movement/products.html>.

NIKODELIS, T.; KOLLIAS, I.; HATZITAKI, V. Bilateral inter-arm coordination in freestyle swimming: effect of skill level and swimming speed. **Journal of Sports Sciences**, v. 23, n. 7, p. 737-745, 2005.

OLSTAD, B.H.; VAZ, J.R.; ZINNER, C.; CABRI, J.M.H.; KJENDLIE, P.L. Muscle coordination, activation and kinematics of world-class and elite breaststroke swimmers during submaximal and maximal efforts. **Journal of Sports Sciences**, v. 35, n. 11, p. 1107–1117, 2016.

Optitrack. Natural Point. 2016. Disponível: <http://www.optitrack.com/motion-capture-movement-sciences/>

PRIBANIĆ, T.; PEHAREC, S.; MEDVED, V. A comparison between 2D plate calibration and wand calibration for 3D kinematic systems. **Kinesiology**, v. 41, n. 2, p. 147-155, 2009.

PSYCHARAKIS, S.G.; SANDERS, R.H. Shoulder and Hip Roll Changes during 200-m Front Crawl Swimming. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 40, n. 12, p. 2129–2136, 2008.

Qualysis, Oqus Underwater. 2014. Disponível: http://www.qualisys.com/wp-content/uploads/2014/01/PI_Oqus_Underwater.pdf

RAMSAY, J.O.; SILVERMAN, B.W. *Functional Data Analysis*. 2nd ed. New York: Springer Verlag, 2005.

RAMSAY, J. O.; HOOKER, Giles; GRAVES, Spencer. Introduction to functional data analysis. In: **Functional data analysis with R and MATLAB**. Springer, New York, NY, p. 1-19, 2009.

RIBEIRO, J.; FIGUEIREDO, P.; MORAIS, S.; ALVES, F.; TOUSSAINT, H.; VILAS-BOAS, J.P.; FERNANDES, R.J. Biomechanics, energetics and coordination during extreme swimming intensity: effect of performance level. **Journal of Sports Sciences**, p. 1-88, 2016.

ROBERTSON, G.; CALDWELL, G.; HAMILL, J.; KAMEN, G.; WHITTLESEY, S. **Research Methods in Biomechanics**. 2nd ed. Human Kinetics, 2013.

RØISLIEN, J.; SKARE, O.; GUSTAVSEN, M.; BROCH, N.; RENNIE, L.; OPHEIM, A. Simultaneous estimation of effects of gender, age and walking speed on kinematic gait data. **Gait Posture**, v. 30, p. 441–445, 2009.

SANDERS, R.H.; THOW, J.; FAIRWEATHER, M. Asymmetries in swimming: where do they come from? **Journal of Swimming Research**, v. 18, 2011.

SANDERS, R.; THOW, J.; ALCOCK, A.; FAIRWEATHER, M.; RIACH, I.; MATHER, F. How can asymmetries in swimming be identified and measured? **Journal of Swimming Research**, v. 19, n. 1, 2012.

SANTOS, K.B.; BENTO, P.C.B.; PEREIRA, G.; PAYTON, C.; RODACKI, A.L.F. Front crawl swimming performance and bi-lateral force asymmetry during land-based and tethered swimming tests. **Journal of Sport Science and Medicine**, v. 16, n. 4, p. 574-580, 2017.

SANTOS, K.B.; BENTO, P.C.B.; PAYTON, C.; RODACKI, A.L.F. Kinematic parameters after repeated swimming efforts in higher and lower proficiency swimmers and para-swimmers. **Research Quarterly for Exercise and Sport**, p. 574-582, 2020.

SEIFERT, L.; CHEHENSSE, A.; TOURNY-CHOLLET, C.; LEMAITRE, F.; CHOLLET, D. Effect of Breathing Pattern on Arm Coordination Symmetry in Front Crawl. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 22, n. 5, p. 1670–1676, 2008.

SEMINATI, E.; NARDELLO, F.; ZAMPARO, P.; ARDIGÒ, L.P.; FACCIOLI, N.; MINETTI, A.E. Anatomically asymmetrical runners move more asymmetrically at the same metabolic cost. **PLoS ONE**, v. 8, n. 9, 2013.

SILVATTI, A.P.; DIAS, F.A.S.; CERVERI, P.; BARROS, R.M.L. Comparison of different camera calibration approaches for underwater applications. **Journal of Biomechanics**, v. 45, n. 6, p. 1112-1116, 2012.

SILVATTI, A.P.; CERVERI, P.; TELLES, T.; DIAS, F.A.Z.; BARONI, G.; BARROS, R.M.L. Quantitative underwater 3D motion analysis using submerged video cameras: accuracy analysis and trajectory reconstruction. **Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering**, v. 16, n. 11, p. 1240-1248, 2013.

SOARES, J.S.; CARPES, F.P.; GERALDO, G.F.F.; MEDEIROS, F.B.; KUNZLER, M.R.; MACHADO, A.S.; PAOLUCCI, L.A.; ANDRADE, A.G.P. Functional data analysis reveals asymmetrical crank torque during cycling performed at different exercise intensities. **Journal of Biomechanics**, v. 122, n. 9, 2021.

TERMIN, B.; PENDERGAST, D. How to optimize performance. **Swimming Technique**, v. 34, n. 4, p.41–46, 1998.

THOMAS, J.R.; NELSON, J.K. Métodos de pesquisa em atividade física. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2002.

TIMMIS, M.A.; TURNER, K.; VAN PARIDON, K.N. Visual Search Strategies of Soccer Players Executing a Power vs. Placement Penalty Kick. **PLoS ONE**, v. 9, n. 12, p. 115-179, 2014.

TOUSSAINT, H.M.; BEEK, P.J. Biomechanics of Competitive Front Crawl Swimming. **Sports Medicine**, v. 13, n. 1, p. 8–24, 1992.

TRECROCI, A.; FORMENTI, D.; LUDWIG, N.; GARGANO, M.; BOSIO, A.; RAMPININI, E.; ALBERTI, G. Bilateral asymmetry of skin temperature is not related to bilateral asymmetry of crank torque during an incremental cycling exercise to exhaustion. **PeerJ**, v. 6, 2018.

Vicon. Bonita. 2016. Available: <https://www.vicon.com/file/vicon/bonita-brochure.pdf>

VÍTOR, M.; JESUS, K.; MOURÃO, L.; TRIBUZI, S.; GONÇALVES, P.; MARQUES, M.; ROESLER, H.; VAZ, M.; VILAS-BOAS, J.P.; FERNANDES, R.J. Integrated Dynamometric, Kinematic and Electromyographic Characterisation of a Swimming Track Start Block Phase – A Pilot Study. **Central European Journal of Sport Sciences and Medicine**, v. 15, n. 3, p. 5–14, 2016.

Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012.