



JULIANA EXEL SANTANA

Caracterização da trajetória de bolas de futebol:
Proposta de avaliação a partir de variáveis cinemáticas da bola após o chute

CAMPINAS

2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Educação Física

JULIANA EXEL SANTANA

Caracterização da trajetória de bolas de futebol:
Proposta de avaliação a partir de variáveis cinemáticas da bola após o chute

Tese de Doutorado apresentada à Pós-
Graduação da Faculdade de Educação Física
da Universidade Estadual de Campinas para
obtenção do título de Doutora em Educação
Física na área de Biodinâmica do
Movimento e Esporte.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
TESE DEFENDIDA PELA ALUNA JULIANA EXEL
SANTANA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. SERGIO
AUGUSTO CUNHA

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Juliana Exel Santana".

CAMPINAS

2015

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Educação Física
Dulce Inês Leocádio dos Santos Augusto - CRB 8/4991

Sa59c Santana, Juliana Exel, 1986-
Caracterização da trajetória de bolas de futebol : proposta de avaliação a partir de variáveis cinemáticas da bola após o chute / Juliana Exel Santana. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Sergio Augusto Cunha.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física.

1. Aerodinâmica. 2. Análise de trajetória. 3. Cinemática. 4. Futebol. I. Cunha, Sergio Augusto. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Educação Física. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Ball trajectories characterization : proposal of assessment from kinematic data obtained in real kicks

Palavras-chave em inglês:

Aerodynamics

Analysis of trajectory

Kinematics

Soccer

Área de concentração: Biocinética do Movimento e Esporte

Titulação: Doutora em Educação Física

Banca examinadora:

Sergio Augusto Cunha [Orientador]

Ricardo Machado Leite de Barros

Paulo Regis Caron Ruffino

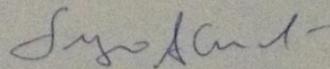
Felipe Pivetta Carpes

Paulo Roberto Pereira Santiago

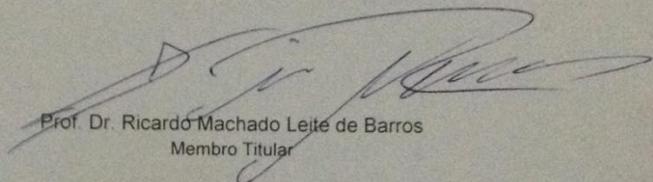
Data de defesa: 15-05-2015

Programa de Pós-Graduação: Educação Física

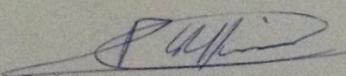
COMISSÃO EXAMINADORA



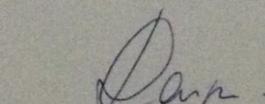
Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha
Orientador



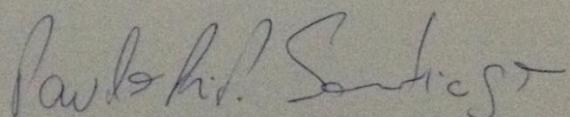
Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros
Membro Titular



Prof. Dr. Paulo Regis Caron Ruffino
Membro Titular



Prof. Dr. Felipe Pivetta Carpes
Membro Titular



Prof. Dr. Paulo Roberto Pereira Santiago
Membro Titular

ABSTRACT

The aim of this study was to characterize soccer ball trajectories from real kicks, applying the theoretical models of projectile movement to the experimental data, and analyzing the kinematic and aerodynamic variables calculated. Ten participants were recruited to perform 8 kicks of a stationary ball in a defined target. To obtain the ball position during its flight we used a motion capture system, with 12 synchronized cameras distributed through a 2 m x 5 m x 2.5 m volume. The motion capture system recorded and reconstructed the 3D positions of 3 reflective markers of 0.018 m of diameter placed in the ball, at 250 Hz. Ball center of mass positions were derived numerically as function of time so the ball velocities and accelerations were obtained. The representation for the rotation axis, spin and angular velocity of the ball was performed using the quaternions. The results showed that the mean \pm standard deviation for the resultant ball velocity was $14,95 \pm 2,57$ m/s, $0,44 \pm 0,77$ m/s in the lateral direction (X), $14,18 \pm 2,57$ m/s in the anterior (Y) direction and $4,57 \pm 0,82$ in the vertical direction (Z). The mean resultant ball acceleration was $11,12 \pm 2,34$ m/s², $-1,50 \pm 2,16$ m/s² at X, $-0,33 \pm 2,09$ m/s² at Y and $-8,20 \pm 1,28$ m/s² at Z directions. The mean angular velocity was $1323,37 \pm 330,19$ °/s. For the non-dimensional parameters, the mean for the Reynolds number was $2,21 \times 105 \pm 5,27 \times 104$. The mean drag coefficient and force, lift coefficient and force, as well the sideways coefficient and force were $0,20 \pm 0,08$ and $1,19 \pm 0,71$ N, $-0,09 \pm 0,07$ and $0,26 \pm 0,31$ N, $-0,09 \pm 0,12$ and $0,87 \pm 0,48$ N, respectively. The present study proposed how to obtain kinematical and dynamical variables for soccer ball trajectories in real kicks and characterized these variables as function of a specific precision kicking task.

RESUMO

Os objetivos deste trabalho foram caracterizar a trajetória de uma bola de futebol após o chute; aplicando os modelos teóricos de movimento de projétil em dados experimentais de chute e analisando as variáveis cinemáticas e aerodinâmicas do voo da bola obtidas. Dez participantes foram recrutados para realizar 8 chutes em uma bola estacionária. Para obter a localização da bola durante sua trajetória foi utilizado um sistema de captura de movimento com de 12 câmeras sincronizadas que foram distribuídas ao longo de um volume de 2 m x 5 m x 2,5 m. Esse sistema gravou e reconstruiu as posições 3D de 3 marcadores de 0,018 m de diâmetro colocados na bola, em uma frequência de 250 Hz. Os dados de posição do centro de massa da bola foram derivados numericamente para a obtenção das respectivas velocidades e acelerações. A representação do eixo de rotação e velocidade angular foi feita através dos quatérnions. A média \pm desvio padrão da velocidade resultante da bola foi de $14,95 \pm 2,57$ m/s, $0,44 \pm 0,77$ m/s na direção médio-lateral (X), $14,18 \pm 2,57$ m/s na direção anteroposterior (Y) e $4,57 \pm 0,82$ m/s na direção vertical (Z). A média da aceleração resultante foi de $11,12 \pm 2,34$ m/s², $-1,50 \pm 2,16$ m/s² em X, $-0,33 \pm 2,09$ m/s² em Y e $-8,20 \pm 1,28$ m/s² em Z. A velocidade angular média foi de $1323,37 \pm 330,19$ °/s. A média do número de Reynolds e parâmetro de rotação encontrada foi de $2,21 \times 105 \pm 5,27 \times 104$. A média dos coeficientes e forças de arrasto, sustentação e lateral encontrados foi de $0,20 \pm 0,08$ e $1,19 \pm 0,71$ N, $-0,09 \pm 0,07$ e $0,26 \pm 0,31$ N, $-0,09 \pm 0,12$ e $0,87 \pm 0,48$ N, respectivamente. O presente trabalho apresentou uma proposta para obtenção das variáveis cinemáticas e aerodinâmicas da bola de futebol em situação real de chute e caracterizou estas variáveis em função de uma tarefa específica de chute de precisão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. MÉTODOS	9
2.1 Fundamentação teórica	9
2.2 Coleta de dados	13
2.3 Cálculo e análise das variáveis cinemáticas lineares	16
2.4 Cálculo e análise das variáveis cinemáticas angulares	17
2.5 Cálculo e análise das variáveis dinâmicas	19
3. RESULTADOS	20
3.1 Variáveis cinemáticas lineares	20
3.2 Variáveis Cinemáticas Angulares	22
3.3 Variáveis Dinâmicas	25
4. DISCUSSÃO	30
5. CONCLUSÃO	34
APÊNDICE A – Médias e desvios-padrão das velocidades lineares do centro de massa da bola em cada tentativa de chute	38
APÊNDICE B – Médias e desvios-padrão das acelerações lineares do centro de massa da bola em cada tentativa de chute	39
APÊNDICE C – Médias e desvios-padrão da velocidade angular da bola em cada tentativa de chute ..	41
APÊNDICE D – Médias e desvios-padrão do número de Reynolds (Re) em cada tentativa de chute...	43
APÊNDICE E – Médias e desvios-padrão coeficientes adimensionais aerodinâmicos calculados para cada tentativa de chute	45
APÊNDICE F – Médias e desvios-padrão das forças aerodinâmicas (N) calculadas para cada tentativa de chute	47
ANEXO 1 – Parecer do Comitê de Ética em Pesquisas da Unicamp	49
ANEXO 2 - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.....	54

“ Poucos entendiam quase nada, eu entendia um pouco menos. ”
Manuel de Barros

*Aos meus pais Eliana e Jucelino
e irmãos Juninho e Leonardo por
acompanharem de mãos dadas
comigo esta longa caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas e instituições foram indispensáveis para que eu conseguisse chegar até esta versão final da minha tese, concluindo o curso de Doutorado. Os parágrafos a seguir são dedicados à elas.

Agradeço ao Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha pela orientação dada nesta tese e pelos ensinamentos. Através das portas que me abriu naquele primeiro dia em que conversamos sobre o meu interesse em ingressar na pós-graduação, eu pude realizar muitos sonhos. Foi também por conta desta oportunidade que ganhei mais do que um amigo, ganhei uma nova e amada família.

Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Eduardo Barreto Martins pelas oportunidades cotidianas de importantes aprendizados e pela grande amizade e carinho que fomos criando ao longo destes anos. Você é a outra parte desta grande família que viramos e que estará sempre no meu coração.

Agradeço ao Prof. René Brenzikofer por toda disponibilidade em me ajudar a solucionar grandes problemas que enfrentei nesta tese. O seu entusiasmo e carinho foram fundamentais para que eu concluisse o trabalho. Você é uma grande inspiração.

Agradeço ao Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros por contribuir muito para a minha formação acadêmica. Tenho em você um profissional da área de Biomecânica que admiro muito, um grande professor e colega de trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo Roberto Pereira Santiago por fazer deste trabalho algo possível de ser concluído. Você me ofereceu muitas oportunidades, muita ajuda, ensinamentos e, acima de tudo, muita paciência. Que nossa parceria e grande amizade perdure muito.

Agradeço aos Professores Joseph Hamill e Richard van Emmerick pela oportunidade de estágio no Laboratório de Biomecânica e Laboratório de Controle Motor da Universidade de Massachusetts – Amherst.

Agradeço ao Prof. Dr. Felipe Arruda Moura por ter me ensinado, entre muitas coisas, que a luta pelos nossos sonhos pode ser demorada, árdua e nem sempre reconhecida, mas ela faz o nosso crescimento e traz os bons frutos da realização. Saiba que tenho em você um grande exemplo de professor e pesquisador, pela paixão com que sempre realizou seu trabalho, assim como um exemplo único de pessoa, pela grande generosidade que existe em você. Obrigada pela amizade, carinho, força e amor em todos estes anos.

Agradeço aos meus colegas do Laboratório de Instrumentação para Biomecânica pela convivência e ajuda.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Educação Física (FEF) da UNICAMP, aos funcionários da FEF.

Agradeço a Capes pelo fomento dado à esta pesquisa durante todo o curso do Doutorado e também durante o Estágio Sanduíche no Exterior (Processo 9823-12-3) ao qual tive oportunidade de realizar.

Agradeço ao Laboratório de Biomecânica e Controle Motor da Escola de Educação Física da USP – campus de Ribeirão Preto pela parceria e oportunidade de realização da coleta dos dados utilizados nesta tese.

Agradeço aos meus amigos do Grupo de Escalada Esportiva da Unicamp e a minha grande amiga Mailde Tripoli por abrirem os meus olhos para outras perspectivas sobre mim mesma.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação das forças de sustentação (\vec{F}_L) e força de arrasto (\vec{F}_D) atuantes na bola durante o voo a uma velocidade linear \vec{v} e do tipo de escoamento do fluxo de ar que ocorre quando a bola gira à uma velocidade angular $\vec{\omega}$ (Robinson e Robinson, 2013).....	4
Figura 2. Visualização dos escoamentos laminar (A) e turbulento (B) em uma esfera lisa.....	5
Figura 3. Modelo de trajetória para o <i>home run</i> de 494 pés (aproximadamente 150 m) de Giancarlo Stanton. A trajetória em linha pontilhada representa a estimativa através do modelo no vácuo, a trajetória em linha tracejada representa a estimativa através de um modelo que considera a força de arrasto e a linha sólida representa a estimativa utilizando um modelo que considera as forças de arrasto e sustentação (Goff, 2013).....	6
Figura 4. Definição do sistema de coordenadas associado ao centro de massa (CoM) da bola e representação do sistema de coordenadas associado às forças dinâmicas que atuam na bola.....	11
Figura 5. Representação das forças e velocidades de um instante em uma das trajetórias reais coletadas. As pequenas esferas pretas representam a posição dos 3 marcadores reflexivos colocados na bola. O segmento de reta em azul representa o vetor de velocidade linear do centro de massa da bola, enquanto que o segmento de reta vermelho representa o eixo de rotação instantâneo. O segmento de reta magenta representa a posição do vetor da força de arrasto. O segmento de reta em amarelo representa a posição do vetor da força lateral. O segmento de reta em verde representa a posição do vetor da força de sustentação. Todos os vetores têm origem no centro de massa da bola e estão no sistema global de coordenadas.....	12
Figura 6 – Representação do posicionamento da bola e do alvo no ambiente em que foram realizadas as coletas de dados.....	14
Figura 7 – Posicionamento dos marcadores refletivos na bola (M1, M2 e M3) e representação da localização do centro de massa (CoM) e da orientação de um sistema local de coordenadas associados à bola (x_b , y_b , z_b).....	16

Figura 8: Posição, velocidade e aceleração do centro de massa da bola durante o voo, na direção lateral (X), em 3 dos chutes analisados neste estudo.....	20
Figura 9: Posição, velocidade e aceleração do centro de massa da bola, na direção anteroposterior, em 4 dos chutes analisados neste estudo. A linha pontilhada representa uma estimativa do momento a partir do qual a bola está em voo, sob a ação somente das forças aerodinâmicas.....	21
Figura 10: Posição, velocidade e aceleração do centro de massa da bola, na direção vertical, em 4 dos chutes analisados neste estudo. A linha pontilhada representa uma estimativa do momento a partir do qual a bola está em voo, sob a ação somente das forças aerodinâmicas.....	21
Figura 11. Velocidade e aceleração resultante do centro de massa das bolas em função do tempo para 4 das trajetórias analisadas.....	22
Figura 12. Latitude do eixo de rotação da bola durante os chutes dos participantes P2 (linha contínua) e P5 (linha tracejada). A linha vertical pontilhada indica a estimativa do último instante do chute e início da fase de voo da bola.....	23
Figura 13. Longitude do eixo de rotação da bola durante os chutes dos participantes P2 (linha contínua) e P5 (linha tracejada). A linha vertical pontilhada indica a estimativa do último instante do chute e início da fase de voo da bola.....	23
Figura 14. Velocidade angular da bola em função do tempo para 3 das trajetórias analisadas.....	24
Figura 15. Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds.....	25
Figura 16. Coeficiente de sustentação em função da componente lateral da velocidade angular.....	26
Figura 17. Coeficiente lateral em função do componente vertical da velocidade angular.....	27
Figura 18. Força de arrasto em função da velocidade linear anteroposterior do centro de massa da bola nas trajetórias analisadas. A linha vermelha representa um ajuste linear no conjunto de dados, com a respectiva equação identificada no gráfico.....	28
Figura 19. Força de sustentação em função da projeção da velocidade angular da bola na direção lateral.....	28

Figura 20. Força lateral em função da projeção da velocidade angular da bola na direção vertical..... 29

1. INTRODUÇÃO

O voo da bola é objeto de estudo dentro de diversas áreas científicas relacionadas ao esporte, pela complexa interação entre a bola e a ação dos praticantes na execução de uma tarefa técnica.

Os fatores que influenciam a trajetória da bola são frequentemente relacionados às variáveis determinantes na realização de uma tarefa motora e utilizados no ensino e treinamento de habilidades técnicas esportivas (Alcock *et al.*, 2012). O sucesso do serviço de um tenista, por exemplo, é associado com a rotação imposta na bola, pois afeta tanto a sua trajetória após a rebatida quanto a trajetória após quicar na quadra. Sakurai, Reidi e Elliott (2013) observaram uma relação inversa entre a velocidade angular da bola de tênis e sua velocidade linear horizontal, além de maiores ângulos entre o eixo de rotação e o plano horizontal para o serviço por *slice* comparado ao *kick*. No voleibol, uma comparação das variáveis cinemáticas e dinâmicas das trajetórias de bolas de saque entre atletas de diferentes categorias encontrou que jogadores de alto nível imprimem maior velocidade linear e menor ângulo de saída na bola. Este estudo também encontrou que a altura de saída da bola de saque e o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds estão mais ligados à caracterização dos tipos de saque do que à qualidade técnica do saque em atletas de diferentes categorias (Deprá e Brenzikofer, 2004). Algumas variáveis de saída da bola de futebol foram usadas em um modelo para predizer a sua posição final e comparadas em função de uma simulação de cobrança de falta realizada de duas formas: chutando a bola diretamente ao alvo e imprimindo uma curva na trajetória para atingi-lo. A posição vertical da bola foi melhor predita quando o ângulo de saída, a velocidade linear horizontal e a velocidade angular foram incluídas no modelo. Na comparação entre as duas formas de chutar a bola, o início da trajetória em curva apresentou maiores ângulos de saída, maior velocidade angular, e um maior ângulo entre eixo de rotação e o plano horizontal (Alcock *et al.*, 2012).

Existe também um grande interesse no estudo das trajetórias de bolas pela área de desenvolvimento tecnológico de materiais esportivos. No caso do futebol, por exemplo, desde que a FIFA (*Fédération Internationale de Football Association*) decidiu por regulamentar a padronização das bolas utilizadas em jogos oficiais internacionais, a inovação tecnológica na sua confecção tem sido constante na tentativa de garantir maior estabilidade nas suas principais características físicas: esfericidade, resistência ao esmagamento, à água e à abrasão, tamanho da circunferência, peso e pressão (Fifa).

As inovações tecnológicas implicam muitas vezes na alteração nos materiais e forma de construção das bolas, fazendo com as características cinemáticas e aerodinâmicas sejam também alteradas. O desempenho aerodinâmico das bolas utilizadas nas 3 últimas edições da Copa do Mundo foi reportado por diversos estudos a fim de destacar as consequências das mudanças na construção das bolas. A bola utilizada no mundial de 2002 constituía de 20 painéis hexagonais e 12 painéis pentagonais, ligados entre si como icosaedro arredondado. Já na Copa de 2006, a bola de futebol foi construída a partir de somente 14 painéis lisos que foram ligados entre si termicamente e em 2010 foram utilizados apenas 8 painéis. Essa redução de número de painéis e de costuras foi compensada com a colocação de ranhuras para criar rugosidade suficiente na sua superfície como forma de aproximar as propriedades aerodinâmicas das bolas anteriores (Goff, 2013). Os estudos que compararam o desempenho das variáveis aerodinâmicas entre estes diferentes modelos encontraram que as bolas mais antigas apresentam um coeficiente arrasto menor comparado aos modelos de bolas mais recentes em velocidades próximas à 20 m/s. Entretanto, em velocidades lineares maiores, as novas bolas apresentam um menor coeficiente de arrasto, chegando próximo ao arrasto encontrado para bolas de golfe (Asai e Seo, 2013). Uma predição da distância horizontal alcançada pelas bolas utilizadas no mundial de 2010 e nos jogos olímpicos de 2012 mostrou que a primeira alcança uma distância maior comparada à segunda (47,1 m e 45,7 m, respectivamente). Assim, é evidente que as alterações nos materiais utilizados na confecção das bolas alteram seu desempenho durante o voo.

Para o estudo do movimento um objeto lançado no espaço, a forma mais simples de aproximação assume que a única força que age sobre este objeto é a força peso (De Mestre, 1990):

$$\vec{F} = m\vec{g} \quad (1)$$

Portanto,

$$m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = m\vec{g} \quad (2)$$

Que é

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -g\vec{j} \quad (3)$$

Em que \vec{r} é o vetor posição do objeto com respeito a um sistema de coordenadas fixo na superfície da terra, de coordenadas bidimensionais. O vetor que representa a gravidade, \vec{g} , tem sentido para baixo e direção vertical.

Uma bola chutada a uma velocidade instantânea inicial v_0 e um ângulo de saída α relativo à horizontal, tem o vetor velocidade inicial \vec{v}_0 dado por:

$$\vec{v}_0 = v_0 \cos \alpha \vec{i} + v_0 \sin \alpha \vec{j} \quad (4)$$

Em que \vec{i} é um vetor unitário na direção horizontal, formando um sistema coordenado com \vec{j} , que está na direção vertical. Se integrarmos a equação 3 em relação ao tempo, temos:

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \vec{v}_0 - g t \vec{j} \\ &= v_0 \cos \alpha \vec{i} + (v_0 \sin \alpha - gt) \vec{j} \end{aligned} \quad (5)$$

Em que

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (6)$$

representa o vetor velocidade em qualquer instante de tempo t . O componente horizontal da velocidade do objeto durante o voo é constante.

Entretanto, o modelo da trajetória no vácuo não reflete a realidade. Existe uma interação constante do ar presente na atmosfera, fazendo com que as forças inerentes a esta interação aja sobre estes corpos. A primeira destas forças a ser denotada é a força de arrasto, que, por simetria, é oposta à direção do vetor velocidade da bola e é uma função da densidade do ar, coeficiente de arrasto, área de secção transversa da bola e sua velocidade.

A bola quando chutada dificilmente apenas translada no espaço. A rotação que é impressa em qualquer técnica de chute faz com que o ar passe de forma assimétrica gerando uma força perpendicular ao vetor de velocidade linear da bola e da força de arrasto, chamada força Magnus (Alaways, 1998; Goff e Carré, 2009). Na figura 1, a representação do movimento de rotação da bola está na mesma direção que a velocidade do ar relativa à esfera, aumentando esta velocidade relativa. Na parte inferior da esfera, o movimento de rotação da bola é oposto ao fluxo de ar, diminuindo a velocidade. Nas regiões do fluido onde a velocidade é baixa, a pressão é alta e vice-versa. Assim, existe uma região de baixa pressão no topo da esfera e uma região de alta pressão na sua parte inferior. Essa diferença de pressão existente nos diferentes pontos da bola é responsável por direcionar o efeito Magnus (Robinson e Robinson, 2013), que é responsável por gerar desvios nas trajetórias. A força Magnus pode ser decomposta em duas forças que são dependentes da velocidade linear da bola, da densidade do ar e da área de secção transversa da

bola. A primeira delas é a força de sustentação, que atua perpendicularmente ao vetor de velocidade linear e a gravidade. A segunda força é a lateral, de direção perpendicular à força de arrasto e força de sustentação (na direção do produto vetorial entre a força de arrasto e de sustentação). A direção do eixo de rotação e coeficiente adimensional de sustentação e lateral definem e diferenciam estas duas forças.

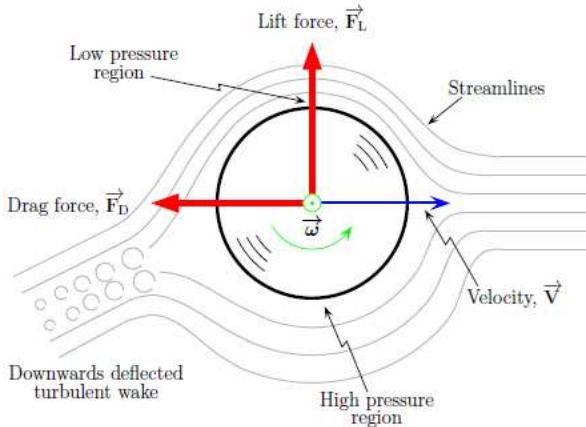


Figura 1. Representação das forças de sustentação (\vec{F}_L) e força de arrasto (\vec{F}_D) atuantes na bola durante o voo a uma velocidade linear \vec{v} e do tipo de escoamento do fluxo de ar que ocorre quando a bola gira à uma velocidade angular $\bar{\omega}$ (Robinson e Robinson, 2013).

Existem também outros parâmetros que descrevem o comportamento do fluxo de ar na interação com o objeto. O número de Reynolds é uma quantidade adimensional que mede a razão entre as forças iniciais e viscosas do fluido que agem sobre a camada limite de um objeto (Barber e Carré, 2009). A camada limite tem origem na aderência das moléculas de ar à superfície da bola, formando uma região que tende a se mover com a bola.

Dois tipos de interação no ar da camada limite podem ocorrer e indicam o tipo de escoamento do fluxo de ar que passa por um corpo. O escoamento laminar caracteriza-se por ser um fluxo ordenado e estável, que envolve completamente o objeto, como representado em A na figura 2. Entretanto, o fluxo laminar na camada limite pode se tornar turbulento. O escoamento turbulento (em B na figura 2) caracteriza-se por um fluxo caótico, que apresenta grande variação de velocidade e pressão. Nesse regime, vórtices instáveis aparecem na parte do corpo oposta à direção do trajeto, e um dos efeitos destes

vórtices é a redução do arrasto. Se o escoamento de fluido é turbulento na camada limite, este se agarra a bola na sua parte onde o fluxo desce para a parte posterior da bola, ou seja, existe um atraso na separação da camada limite como resultado da turbulência. Isso leva a ocorrência de uma menor força de arrasto, comparada ao momento em que o fluxo é laminar, fazendo com que as trajetórias nessa condição sejam maiores (Barber e Carré, 2009), alterando o tamanho da força de sustentação. A rugosidade da superfície da bola e a presença de costuras em seus gomos podem influenciar o momento em que essa transição de fluxos ocorre.

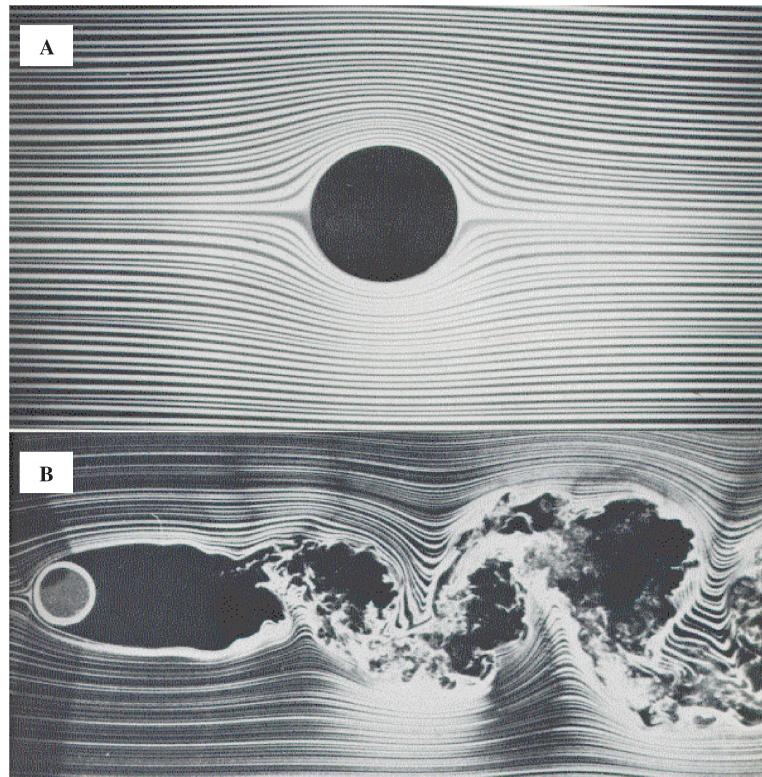


Figura 2. Visualização dos escoamentos laminar (A) e turbulento (B) em uma esfera lisa.

A partir desta breve revisão sobre os modelos de aproximação das trajetórias no vácuo, incluindo o efeito do ar, assumindo somente translação e incluindo movimentos de rotação da bola após o chute, a questão que surge refere-se à escolha de qual deles adotar para a estimativa de uma trajetória. Goff (2013) mostra que diferentes modelos levam à diferentes estimativas de trajetórias e também que quanto mais

complexo o modelo, mais próximas as estimativas ficam da distância real percorrida pelo objeto após o seu lançamento (Figura 3).

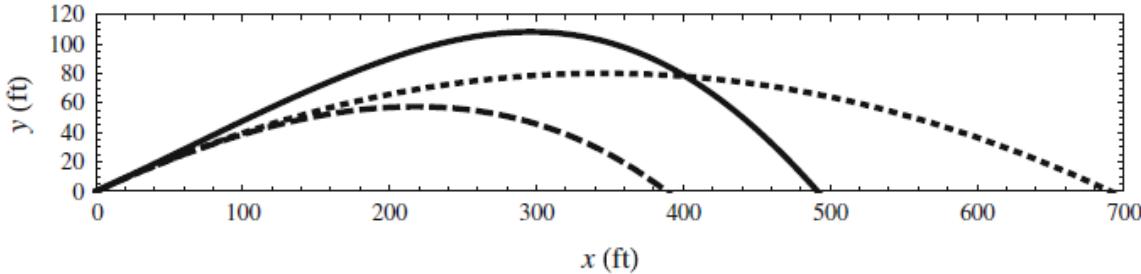


Figura 3. Modelo de trajetória para o *home run* de 494 pés (aproximadamente 150 m) de Giancarlo Stanton. A trajetória em linha pontilhada representa a estimativa através do modelo no vácuo, a trajetória em linha tracejada representa a estimativa através de um modelo que considera a força de arrasto e a linha sólida representa a estimativa utilizando um modelo que considera as forças de arrasto e sustentação (Goff, 2013).

Existem diferentes abordagens para o estudo da mecânica do escoamento dos fluidos. A análise por diferenciação utiliza as equações de Navier-Stokes, que são um conjunto de equações derivadas parciais que estabelecem que a taxa de variação no momento e na aceleração de uma partícula fluída são o produto das mudanças na pressão e forças viscosas dissipativas que atuam no fluido. Estas equações estão baseadas na aplicação da segunda lei de Newton em combinação com termos de viscosidade e pressão do fluido. Entretanto, estas equações são não-lineares, existindo mais de uma solução possível na maioria dos casos em que são aplicáveis (Genick, 2013).

Modelos em dinâmica de fluidos computacional têm sido utilizados para a obtenção da aproximação destas equações diferenciais parciais para aprofundar o conhecimento de fenômenos como a separação da camada limite e a sua variação em função de detalhes da superfície das bolas. Embora seja uma metodologia desafiadora, ela tem mostrado com sucesso o comportamento do fluxo de ar em torno de bolas utilizadas em diferentes esportes. Barber e Carré (2009) aplicaram a técnica em bolas de geometrias diferentes para que os coeficientes de força calculados fossem usados em uma predição de trajetória. Os resultados mostraram que o número de costuras, a orientação das costuras em função da

velocidade angular da bola, sua profundidade e a simetria na distribuição dos painéis podem interferir na consistência da trajetória da bola em termos de desvios que ela pode realizar no ar.

Outra forma utilizada para a solução de problemas na mecânica de fluidos é a análise dimensional. Esta tem como objetivo reduzir o número e complexidade das variáveis experimentais que afetam um dado fenômeno físico de forma a apresentar uma solução analítica ou um resultado para um modelo computacional. A questão chave no uso deste tipo de análise está na consistência das dimensões das variáveis que compõem qualquer equação que governa um fenômeno e no fato de que algumas destas dimensões são redundantes. Esta forma de análise em fluidos é muito utilizada por auxiliar no planejamento de experimentos em escalas reduzidas (protótipos), facilitando o estudo do comportamento de variáveis complexas de se obter analiticamente (Genick, 2013).

Os estudos em túnel de vento têm sido tradicionalmente utilizados na tentativa de estabelecer o comportamento de parâmetros aerodinâmicos em função da rugosidade da superfície e da rotação (Carre *et al.*, 2005; Alam *et al.*, 2012; Kray *et al.*, 2014). Entretanto, este tipo de análise pode ser um processo oneroso financeiramente. Nesse sentido, alguns estudiosos propuseram o uso de simulações computacionais e modelos matemáticos de trajetórias para o entendimento do comportamento aerodinâmico em diferentes situações (Tuplin *et al.*, 2012; Choppin, 2013; Myers e Mitchell, 2013). Embora esta seja uma forma interessante de se estudar os efeitos aerodinâmicos na trajetória final da bola, estes modelos podem não refletir uma situação real de um jogo de futebol, pois acabam por não incluir ou simplificam a rotação da bola, considerando-a constante em sua quantidade e posição do eixo de rotação durante o voo.

O uso de métodos de captura de movimento para análise cinemática e dinâmica do voo de bolas é uma alternativa interessante para a superação de limitações inerentes aos métodos descritos anteriormente. A captura do movimento de um objeto através de imagens de vídeo permite a reconstrução tridimensional do objeto e, a partir das suas coordenadas em função do tempo, variáveis cinemáticas e dinâmicas podem ser estimadas.

Goff & Carre (2009) propuseram uma metodologia para o cálculo dos coeficientes e forças aerodinâmicas a partir de dados cinemáticos de posição da bola em função do tempo e aplicaram esse método em dados bidimensionais coletados nos início do lançamento de uma bola de futebol de um canhão e pouco depois do ápice da parábola realizada pela bola. Os coeficientes de arrasto e sustentação obtidos apresentaram resultados coerentes com a literatura e permitiram um bom ajuste dos dados

coletados nos dois momentos do voo com a estimativa da trajetória completa. Entretanto, este modelo assumiu que a bola realizava somente translação em sua trajetória.

Bray & Kerwin (2003) apresentaram uma abordagem interessante para a representação de valores de coeficientes de sustentação e arrasto de uma bola de futebol após um chute característico de cobrança de falta a 20 m de distância do gol. Os coeficientes foram calculados como os valores que permitiram um melhor ajuste das equações diferenciais que representariam a trajetória da bola mais apropriada, a partir das posições da bola em função do tempo. Assim como na maioria dos estudos de projéteis no esporte (REF), o modelo de trajetória assumiu que a bola rodava em velocidade constante somente em torno de um eixo paralelo ao plano vertical e com inclinação constante com relação ao eixo lateral. Um modelo de trajetória que leve em conta um eixo de rotação arbitrário ao invés de eixos de rotação em direções específicas como *top-spin* ou *backspin*, pode representar o fenômeno estudado mais próximo de uma situação real.

A análise da trajetória da bola tem sido um desafio para a comunidade científica da área em termos metodológicos e muito tem sido proposto para entender o comportamento de parâmetros aerodinâmicos e cinemáticos. Uma metodologia de estudo das características cinemáticas e dinâmicas da trajetória de bolas de futebol após o chute pode proporcionar aos estudiosos e profissionais da área informações importantes acerca do desempenho de atletas ou praticantes em tarefas específicas envolvendo o chute, bem como sobre o desempenho dos próprios materiais desenvolvidos para a confecção das bolas. Dessa forma, os objetivos do presente trabalho serão definidos como:

Objetivo geral:

- Caracterizar a trajetória da bola de futebol após o chute;

Objetivos específicos:

- Determinar as variáveis cinemáticas angulares e lineares da bola durante sua trajetória
- Aplicar os modelos teóricos de movimento de projétil nos dados experimentais;
- Analisar as variáveis cinemáticas e aerodinâmicas do voo da bola obtidas em situação experimental de chute.

2. MÉTODOS

2.1 Fundamentação teórica

Equação geral do movimento

O voo de qualquer objeto após o seu lançamento é determinado pela ação das forças gravitacional e aerodinâmica. Sendo assim, a equação geral do movimento que modela sua trajetória é representada por:

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (7)$$

em que F é o vetor que representa as forças externas atuantes, \vec{P} é o vetor de momento linear. O momento linear é definido como o produto da massa da bola pela velocidade linear do seu centro de massa (v). Como a massa da bola não é alterada durante o voo, a equação 1 pode ser escrita como:

$$\sum \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (8)$$

Entretanto, as únicas forças que agem sobre bola durante o voo são a força gravitacional (\vec{F}_G) e a força aerodinâmica (\vec{F}_A). Podemos então substituir estas forças na somatória da equação 8, que resulta em:

$$\vec{F}_G + \vec{F}_A = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (9)$$

A bola de futebol após um chute não só translada no espaço como também pode realizar rotações. Sendo assim os momentos gerados em torno do centro de massa (CoM) da bola é representado na equação 10 a seguir:

$$\sum \vec{M}_{CoM} = \frac{d\vec{H}_{CoM}}{dt}, \quad (10)$$

em que é $\hat{\mathbf{M}}_{CoM}$ o vetor de momentos aerodinâmicos em torno do centro de massa da bola e \vec{H}_{CoM} é o momento angular relativo também ao centro de massa da bola. Assumindo que a bola é um corpo rígido, esférico, de massa uniformemente distribuída e constante, o tensor do momento de inércia da bola I_G é diagonal e não varia com o tempo. Podemos assim utilizar a definição do momento angular para reescrever a equação 10 como:

$$\sum \mathbf{M}_{CoM} = \mathbf{I}_{CoM} \frac{d\omega}{dt}, \quad (11)$$

em que ω é a velocidade angular.

Forças

Quando chutada, a bola viaja sob a ação de uma força resultante da ação da aceleração da gravidade e do arrasto gerado pelo atrito da bola com o ar. Os vetores das forças estão representados na figura 5. Em uma situação em que a bola somente translada no espaço, a força de arrasto, que é tangencial à direção da trajetória, age paralela e oposta ao sentido do vetor de velocidade linear do centro de massa da bola, representada pelo segmento de reta azul na figura 5 e por \vec{v} na figura 4.

A força de arrasto é caracterizada em termos de um número adimensional chamado coeficiente de arrasto (C_D), equacionada como:

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2} \rho C_A A v^2 (-\vec{v}), \quad (12)$$

em que é a ρ densidade do ar, A é a área de secção transversa da bola, v é o módulo do vetor velocidade linear do centro de massa da bola, \vec{v} é o vetor velocidade linear do centro de massa da bola normalizado.

Já ao considerar que a bola também pode rodar em torno de um eixo durante o seu voo, um componente da força de arrasto adicional é definido. A força Magnus representa a força que age perpendicularmente ao vetor de velocidade linear. Modelos matemáticos definem a força Magnus em dois componentes: força de sustentação e força lateral (Goff e Carré, 2009; Myers e Mitchell, 2013).

Se a bola se move na direção de \vec{v} , um segundo vetor \vec{l} (figura 4) pode ser definido, perpendicular a \vec{v} , porém no mesmo plano formado por \vec{v} e a aceleração da gravidade. A direção do vetor \vec{l} define a direção da força de sustentação (segmento de reta verde na figura 5), que também é caracterizada em termos de um coeficiente adimensional, o coeficiente de sustentação (C_L):

$$\vec{F}_L = \frac{1}{2} \rho C_L A v^2 \vec{l}, \quad (13)$$

O segundo componente da força Magnus, a força lateral (em amarelo na figura 5), compõe o terceiro eixo de um sistema de coordenadas ortonormal no qual as forças que agem na bola estão fixas, que tem a direção do produto vetorial entre \vec{v} e \vec{l} (figura 4). A força lateral é então equacionada:

$$\vec{F}_S = \frac{1}{2} \rho C_S A v^2 \frac{\vec{v} \times \vec{l}}{|\vec{v} \times \vec{l}|}, \quad (14)$$

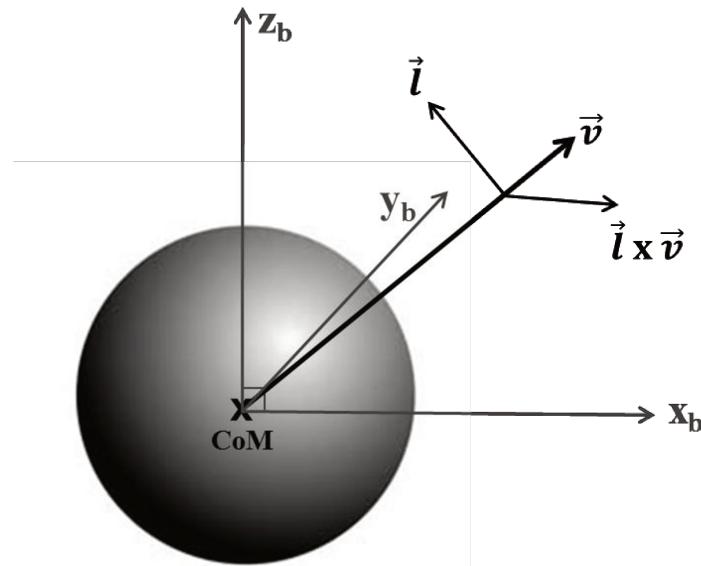


Figura 4. Definição do sistema de coordenadas associado ao centro de massa (CoM) da bola e representação do sistema de coordenadas associado às forças dinâmicas que atuam na bola.

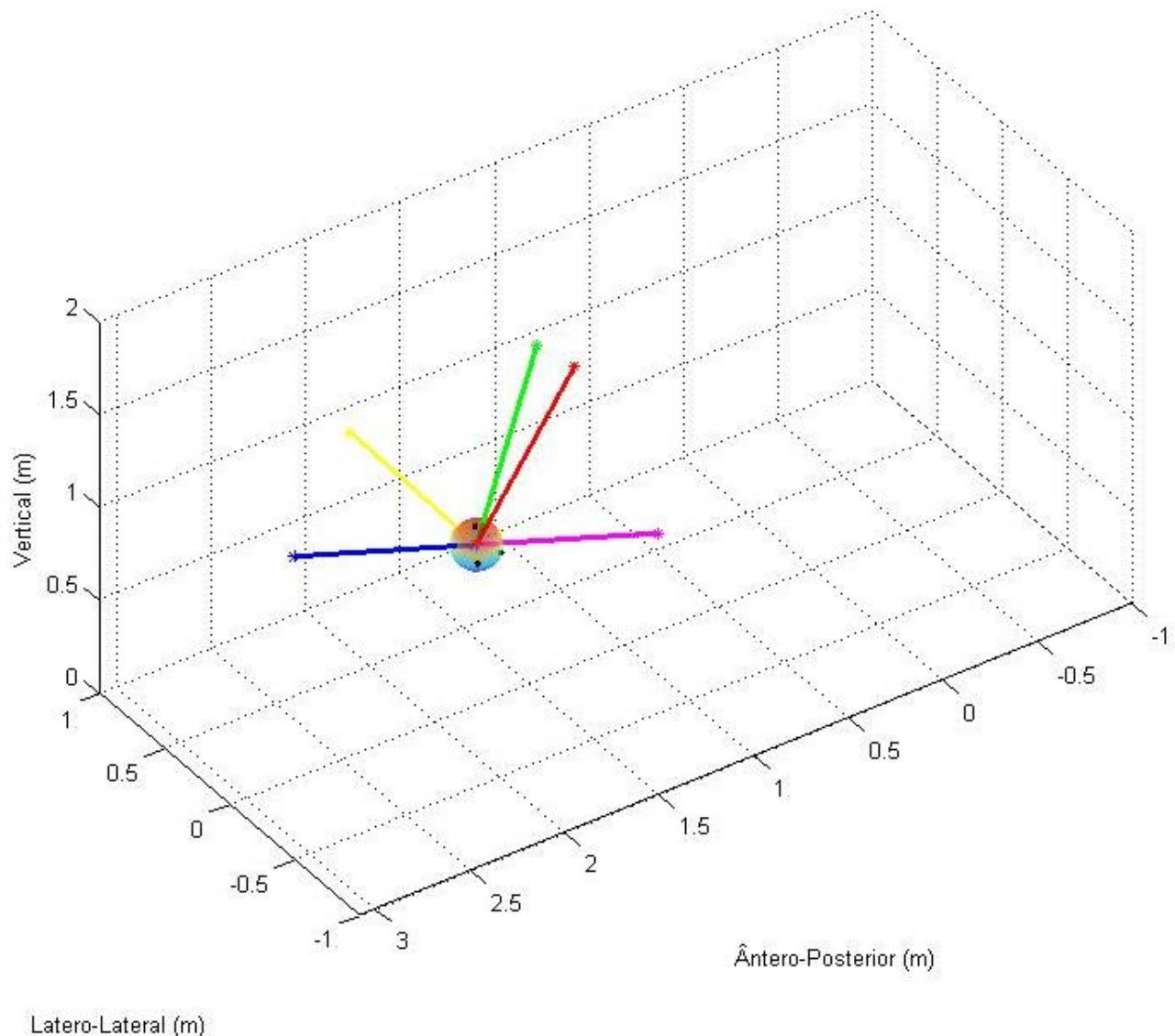


Figura 5. Representação das forças e velocidades de um instante em uma das trajetórias reais coletadas.

As pequenas esferas pretas representam a posição dos 3 marcadores reflexivos colocados na bola. O segmento de reta em azul representa o vetor de velocidade linear do centro de massa da bola, enquanto que o segmento de reta vermelho representa o eixo de rotação instantâneo. O segmento de reta magenta representa a posição do vetor da força de arrasto. O segmento de reta em amarelo representa a posição do vetor da força lateral. O segmento de reta em verde representa a posição do vetor da força de sustentação. Todos os vetores têm origem no centro de massa da bola e estão no sistema global de coordenadas.

Os coeficientes aerodinâmicos serão calculados neste trabalho a partir da abordagem cinemática na análise dimensional proposta por Goff & Carre (2009). Dessa forma, as equações 15, 16 e 17 foram aplicadas:

$$C_D = - \left[\frac{(a_z + g)v_z + (a_x v_x + a_y v_y)}{\beta v^3} \right], \quad (15)$$

$$C_L = \frac{(a_z + g)v_{\perp}^2 - (a_x v_x + a_y v_y)v_z}{\beta v^3 v_{\perp}}, \quad (16)$$

$$C_S = \frac{a_y + v_x - a_x v_y}{\beta v^2 v_{\perp}}, \quad (17)$$

em que a_x , a_y , a_z e v_x , v_y , v_z são respectivamente os componentes tridimensionais de aceleração e velocidade linear do centro de massa da bola, v é a velocidade linear resultante do centro de massa da bola, $v_{\perp} = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)}$, g é a aceleração da gravidade e $\beta = \frac{\rho A}{2m}$, em que m é a massa da bola.

2.2 Coleta de dados

Set up experimental

Dez participantes foram recrutados para realizar o experimento, que foi aprovado pelo Comitê de Ética da Faculdade de Medicina da Unicamp (Parecer nº 21566614.0.0000.5404). O experimento consistia em realizar 10 chutes em uma bola estacionária, com o objetivo do acerto de um alvo posicionado 5 m a sua frente, com dimensões de 1,8 m x 1,3 m, suspenso a uma altura de 1,1 m do chão do laboratório, como representado na figura 6. Os participantes realizaram a série de chutes o membro inferior dominante, identificado a partir do que foi declarado por cada um previamente aos testes.

A bola utilizada no experimento era de tamanho 5 (Kipsta® F500) e estava de acordo com as especificações técnicas exigidas pela FIFA: circunferência não superior a 70 cm e não inferior a 68 cm, massa não superior a 450 g e não inferior a 410 g, pressão equivalente a 600 - 1100 g/cm² ao nível do mar (Fifa).

Para obter a localização da bola durante sua trajetória até o alvo foi utilizado o sistema de captura de movimento OptiTrack (NaturalPoint®, Oregon, USA). Doze câmeras do modelo S250e, sincronizadas e com resolução de 832 x 832 pixels foram distribuídas ao longo de um volume de aproximadamente 2 m x 5 m x 2,5 m (largura x comprimento x altura), como exemplificado na figura 6. Esta disposição de câmeras foi definida em função da sua eficiência em capturar o objeto de interesse até chegar o mais próximo possível do alvo ou qualquer ponto de impacto próximo. Portanto, as trajetórias obtidas tiveram tamanhos de alcance diferentes.

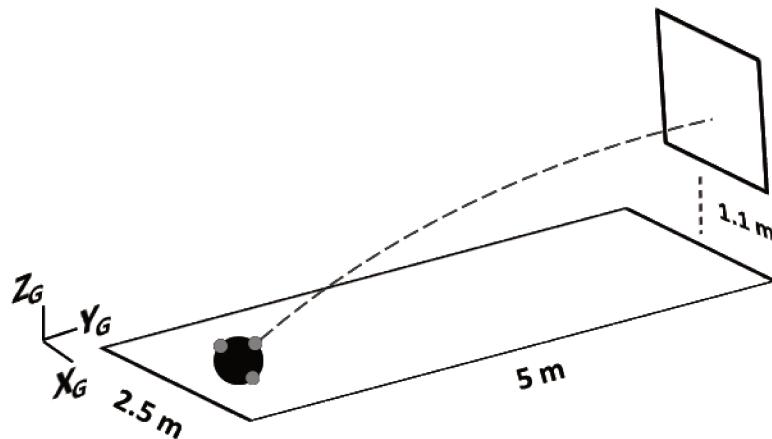


Figura 6 – Representação do posicionamento da bola e do alvo no ambiente em que foram realizadas as coletas de dados.

Aquisição dos dados

O sistema opto eletrônico citado anteriormente foi utilizado para gravar e reconstruir as posições tridimensionais de 3 marcadores esféricos e retro refletivos de 0,018 m de diâmetro colocados na bola, em uma frequência de 250 Hz. A figura 7 mostra como os 3 marcadores foram posicionados: dois deles (M1 e M2) permaneceram paralelos ao diâmetro da bola e o terceiro (M3) foi colocado perpendicularmente à metade da distância entre os marcadores M1 e M2. A trajetória foi considerada

como o primeiro momento em que existe o contato do pé do participante na bola até o último momento em que os marcadores que representavam a bola foram identificados pelo sistema.

No sistema de captura de movimento utilizado, a gravação do movimento a ser estudado é feita em coordenadas bidimensionais de tela. Assim, um pré-processamento destes dados é necessário para a reconstrução tridimensional dos pontos de interesse. Neste processo, os marcadores foram rotulados para que suas respectivas trajetórias fossem associadas corretamente. Quando uma das marcas não foi captada em um determinado número de quadros, interpolações por ajustes lineares ou cúbicos foram realizadas utilizando ferramentas disponíveis pelo software de aquisição de dados (Arena – NaturalPoint®, Oregon, USA) no processo de rastreamento e reconstrução. De um total de 200 trajetórias, 80 delas foram obtidas corretamente e utilizadas nas análises deste trabalho. A acurácia média na reconstrução tridimensional destes pontos de interesse calculada no processo de calibração das câmeras foi de 0,005 m.

Processamento

Os dados brutos de posição dos marcadores colocados na bola durante a trajetória foram suavizados utilizando a função não-paramétrica ponderada local *loess*, com um parâmetro de suavização de 0,2 para as coordenadas X e Y e 0,3 para a coordenada Z. O parâmetro de suavização relaciona-se com o tamanho da janela ou a porcentagem do vetor de dados que será usada para cada ajuste parcial. A escolha deste modo de suavização foi determinada tendo como parâmetro a medida do diâmetro da bola, que devem apresentar circunferência de 0,68 – 0,70 m e, consequentemente, diâmetro entre 0,216 – 0,223 m, para bolas de tamanho 5 aprovadas pela FIFA. Após o tratamento de suavização, a média ± desvio padrão do diâmetro calculado para o conjunto de dados deste trabalho foi de $0,221 \pm 0,05$ m.

2.3 Cálculo e análise das variáveis cinemáticas lineares

A partir dos dados de posição tridimensional dos marcadores suavizados foi calculado o centro de massa da bola como a metade da distância entre os marcadores M1 e M2 (figura 7). As velocidades foram então calculadas a partir da derivada numérica da posição do centro de massa da bola em função do tempo. Para o cálculo das acelerações, a velocidade do centro de massa da bola em função do tempo foi primeiramente suavizada por um filtro digital passa-baixa Butterworth de primeira ordem, com uma frequência de corte de 10 Hz. Esta frequência de corte foi determinada a partir de um estudo do conteúdo das frequências dos sinais de velocidade linear do centro de massa, em que foi verificado que a maior amplitude do sinal estava contida nas frequências abaixo de 10 Hz. As acelerações foram obtidas, então, a partir da derivada numérica das velocidades do centro de massa suavizadas.

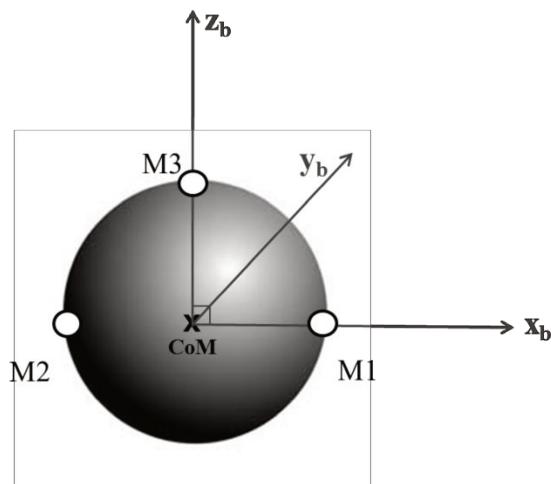


Figura 7 – Posicionamento dos marcadores refletivos na bola (M1, M2 e M3) e representação da localização do centro de massa (CoM) e da orientação de um sistema local de coordenadas associados à bola (x_b , y_b , z_b).

As variáveis cinemáticas lineares serão descritas como média \pm desvio padrão de cada trajetória. As séries de tempo para cada uma destas variáveis serão representadas graficamente por exemplos de trajetórias escolhidos.

2.4 Cálculo e análise das variáveis cinemáticas angulares

A cada instante de tempo do voo da bola foi construído um sistema de coordenadas ortonormal com origem no seu centro de massa. O vetor que dá a direção de \vec{x}_b , positivo para a direita, foi construído como:

$$\vec{x}_b = \frac{\overrightarrow{M1-CoM}}{\|\overrightarrow{M1-CoM}\|} \quad (18)$$

O vetor que dá a direção de \vec{y}_b , positivo para a frente (em direção ao alvo do chute), foi construído como:

$$\vec{a} = \frac{\overrightarrow{M3-CoM}}{\|\overrightarrow{M3-CoM}\|} \quad (19)$$

$$\vec{y}_b = \frac{\vec{a} \times \vec{x}_b}{\|\vec{a} \times \vec{x}_b\|} \quad (20)$$

Por fim, o vetor que define a direção vertical, positiva para cima, foi construído como:

$$\vec{z}_b = \frac{\vec{x}_b \times \vec{y}_b}{\|\vec{x}_b \times \vec{y}_b\|} \quad (21)$$

A rotação do sistema de coordenadas da bola em função da sua trajetória foi obtida partir das matrizes de rotação calculadas entre os instantes $(i+1)$ e o instante (i) :

$$M_R = SC_{b(i+1)} SC_{b(i)}^{-1} \quad (22)$$

A representação do eixo de rotação e da quantidade de rotação em torno deste eixo foi feita utilizando-se os quatérnions (Santiago, 2009). A velocidade angular foi computada da seguinte forma:

$$\vec{\omega}_{(1)} = \frac{(2 \log \vec{q}_1 \vec{q}_{(2)}^{-1})}{t_{(2)} - t_{(1)}} \quad (22)$$

$$\vec{\omega}_{(i)} = \frac{(\log \vec{q}_{(i-1)} \vec{q}_{(i)}^{-1} + \log \vec{q}_{(i)} \vec{q}_{(i+1)}^{-1})}{0.5(t_{(i+1)} - t_{(i-1)})} \quad (23)$$

$$\vec{\omega}_{(n)} = \frac{(2 \log \vec{q}_{n-1} \vec{q}_{(n)}^{-1})}{t_{(n)} - t_{(n-1)}} \quad (24)$$

no qual t compreende o instante de tempo, \vec{q} é a parte vetorial do quatérnion e n compreende o último instante de tempo da trajetória da bola (Tincknell, 2013).

A posição do eixo de rotação da bola será representada em coordenadas esféricas de latitude e longitude. Exemplos de séries de tempo desta variável serão apresentadas para o conjunto de chutes de dois participantes. A posição do eixo de rotação da bola também será descrita como média \pm desvio padrão de cada trajetória. A latitude representa o ângulo que o vetor \vec{q} faz com o eixo vertical, com origem no centro de massa da bola, enquanto que a longitude representa o ângulo medido entre o vetor \vec{q} projetado perpendicularmente no plano X-Y e um vetor de referência, que no caso deste trabalho, é o eixo X e positivo no sentido anti-horário.

A velocidade angular também será descrita como média \pm desvio padrão de cada trajetória. As séries de tempo da posição e velocidade do eixo de rotação da bola serão representadas graficamente por exemplos de trajetórias escolhidos.

2.5 Cálculo e análise das variáveis dinâmicas

As forças aerodinâmicas foram calculadas como nos modelos apresentados na seção de fundamentação teórica deste trabalho. A média da série de tempo das velocidades e acelerações do centro de massa da bola, bem como da velocidade angular foram utilizadas no cálculo das variáveis dinâmicas descritas a seguir. Esta média foi extraída entre 15 quadros após o momento em que a bola já não está mais sendo acelerada pelo contato do pé do participante, estimado visualmente, até 15 quadros anteriores ao final da série de tempo.

O número de Reynolds, que é uma variável adimensional proporcional à medida dos tamanhos relativos das forças iniciais e viscosas na bola (Alaways, 1998), foi calculado como:

$$Re = \frac{\rho d}{\mu} \quad (25)$$

em que d é o diâmetro da bola e μ é a viscosidade cinemática do ar, que foi considerada como $\mu \approx 1,54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

As variáveis adimensionais e as forças serão descritas como média \pm desvio padrão de cada trajetória e serão apresentados em função do número de Reynolds e componentes da velocidade angular e linear das trajetórias. Uma análise de regressão linear foi realizada entre os coeficientes e forças de sustentação e as projeções da velocidade angular na direção lateral, bem como os coeficientes e forças laterais e as projeções da velocidade angular na direção vertical. Um ajuste por regressão linear também foi realizado para a força de arrasto em função da velocidade linear da bola na direção antero-posterior.

3. RESULTADOS

3.1 Variáveis cinemáticas lineares

As figuras 8, 9 e 10 apresentam exemplos das posições, velocidades e acelerações calculadas para o centro de massa da bola de 4 trajetórias e decompostas nas 3 direções. Como estas variáveis estão compreendidas desde o primeiro instante de toque do pé na bola no momento do chute até o último quadro captado pelo conjunto de câmeras utilizado, observamos um aumento das velocidades e acelerações no início da trajetória. As médias das velocidades de todas as trajetórias analisadas foram de 0,44 m/s, 14,18 m/s e 4,57 m/s nas direções X, Y e Z, respectivamente. Já as médias das acelerações foram de -1,50 m/s², -3,33 m/s² e -8,20 m/s² para as direções X, Y e Z, respectivamente.

As médias da velocidade e aceleração resultante foram de 14,83 m/s e 11,10 m/s², respectivamente. Exemplos das séries de tempo destas variáveis estão apresentadas na figura 11.

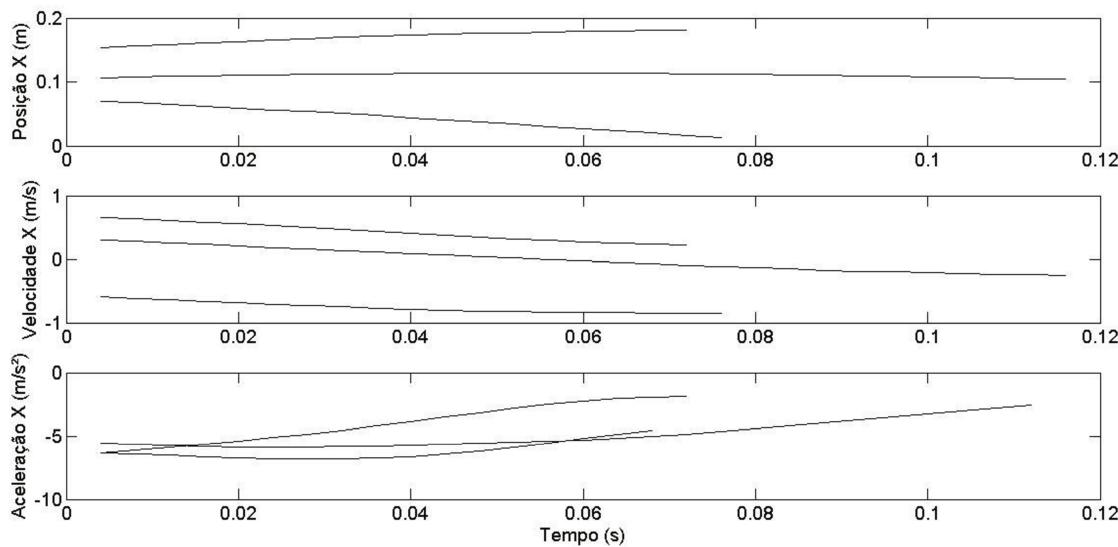


Figura 8: Posição, velocidade e aceleração do centro de massa da bola durante o vôo, na direção lateral (X), em 3 dos chutes analisados neste estudo.

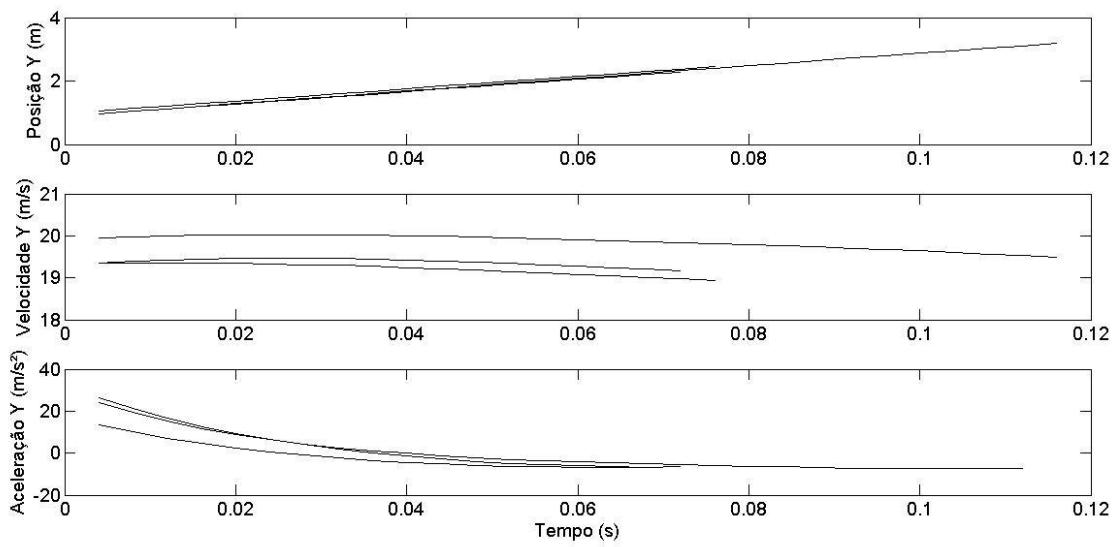


Figura 9: Posição, velocidade e aceleração do centro de massa da bola, na direção anteroposterior, em 4 dos chutes analisados neste estudo. A linha pontilhada representa uma estimativa do momento a partir do qual a bola está em voo, sob a ação somente das forças aerodinâmicas.

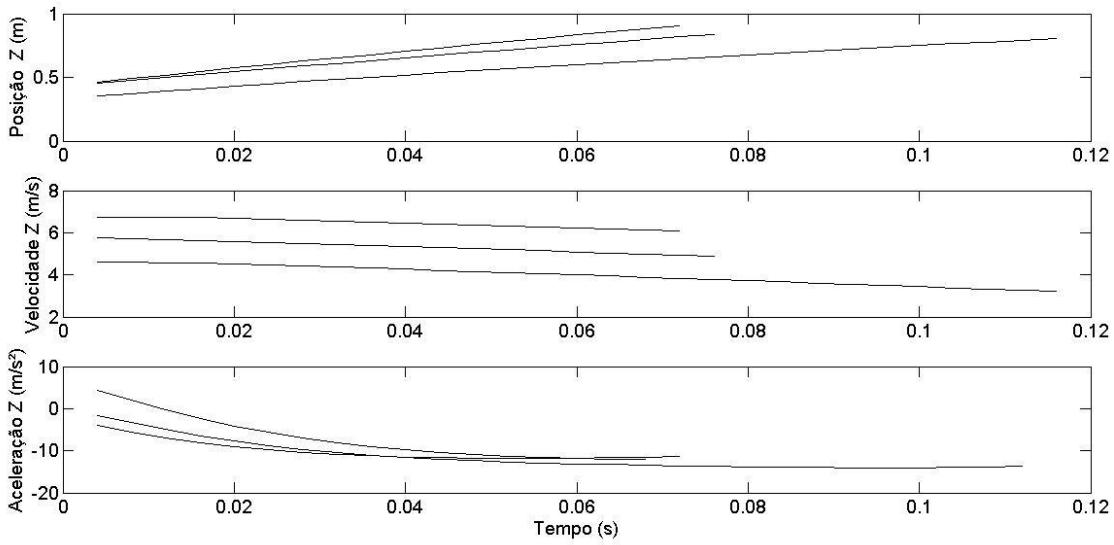


Figura 10: Posição, velocidade e aceleração do centro de massa da bola, na direção vertical, em 4 dos chutes analisados neste estudo. A linha pontilhada representa uma estimativa do momento a partir do qual a bola está em voo, sob a ação somente das forças aerodinâmicas.

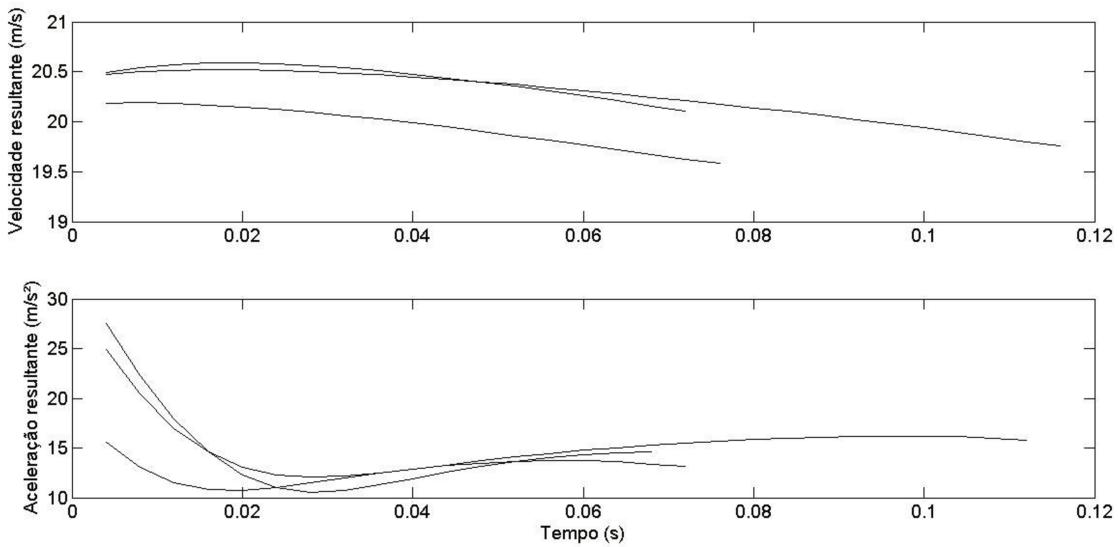


Figura 11. Velocidade e aceleração resultante do centro de massa das bolas em função do tempo para 4 das trajetórias analisadas.

3.2 Variáveis Cinemáticas Angulares

As figuras 12 e 13 mostram a posição do eixo de rotação da bola em função do tempo para um conjunto de trajetórias. O conjunto de dados representados nestas duas figuras são referentes às tentativas de chute de dois participantes e apresentam duas situações distintas. A primeira delas é a situação em que a latitude do eixo de rotação da bola decai em função da trajetória e a segunda é a situação contrária, ou seja, em que a latitude aumenta em função do chute. Quanto à longitude, o grupo de trajetórias converge, após o chute, para a mesma direção, que consistia no alvo do chute.

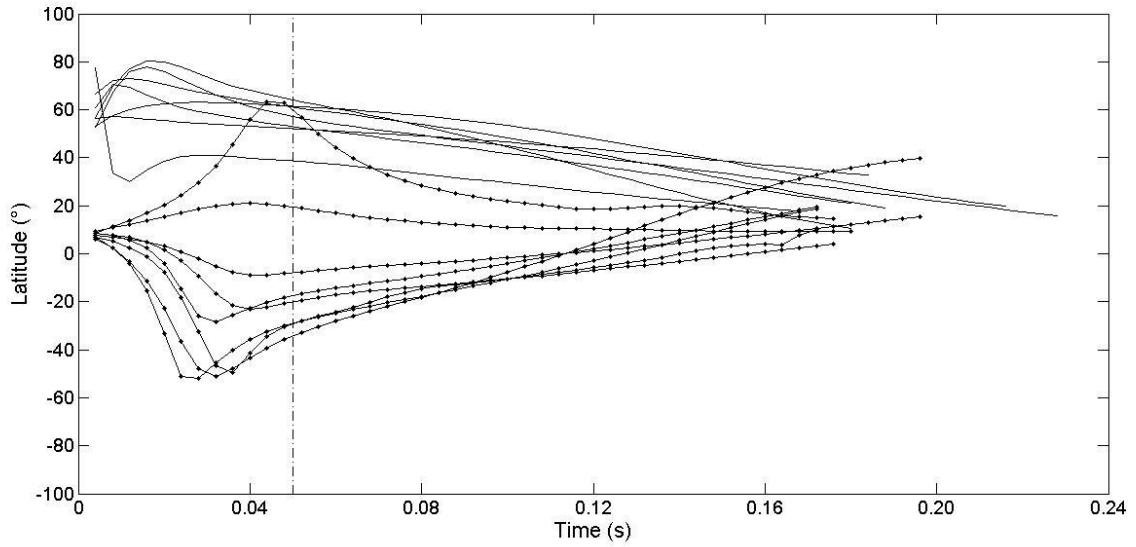


Figura 12. Latitude do eixo de rotação da bola durante os chutes dos participantes P2 (linha contínua) e P5 (linha tracejada). A linha vertical pontilhada indica a estimativa do último instante do chute e início da fase de voo da bola.

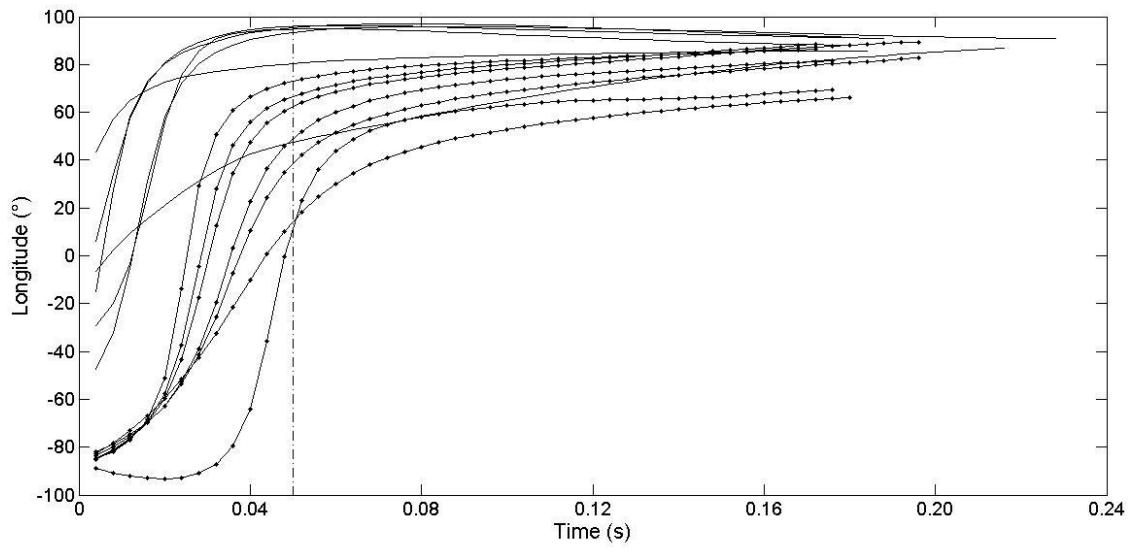


Figura 13. Longitude do eixo de rotação da bola durante os chutes dos participantes P2 (linha contínua) e P5 (linha tracejada). A linha vertical pontilhada indica a estimativa do último instante do chute e início da fase de voo da bola.

As velocidades angulares obtidas em 4 trajetórias estão mostradas na figura 14. É possível observar que, durante o chute, a velocidade angular aumenta de forma rápida. Após este momento, a velocidade angular gradativamente diminui até o final da trajetória. As médias da velocidade angular de cada trajetória estão descritas no Apêndice C deste trabalho.

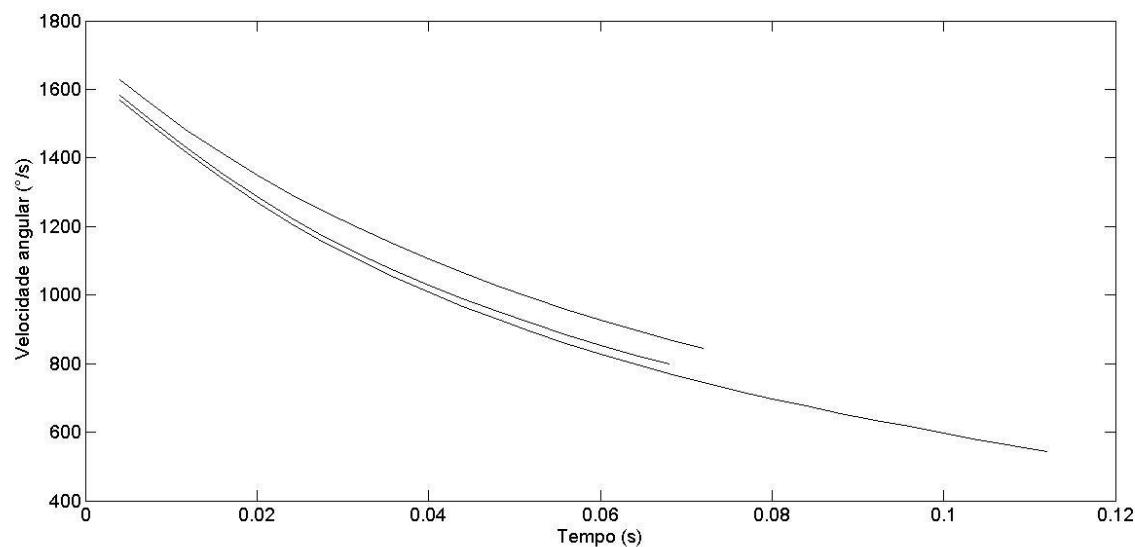


Figura 14. Velocidade angular da bola em função do tempo para 3 das trajetórias analisadas.

3.3 Variáveis Dinâmicas

Número de Reynolds

Os valores mínimos e máximos do número de Reynolds foram de $3,14 \times 10^3$ e $3,32 \times 10^5$, respectivamente.

Coeficientes aerodinâmicos

Os resultados obtidos para o coeficiente de arrasto estão apresentados em função do número de quadros na figura 15. A média do coeficiente de arrasto encontrada para o conjunto de trajetórias analisadas foi de $0,20 \pm 0,08$.

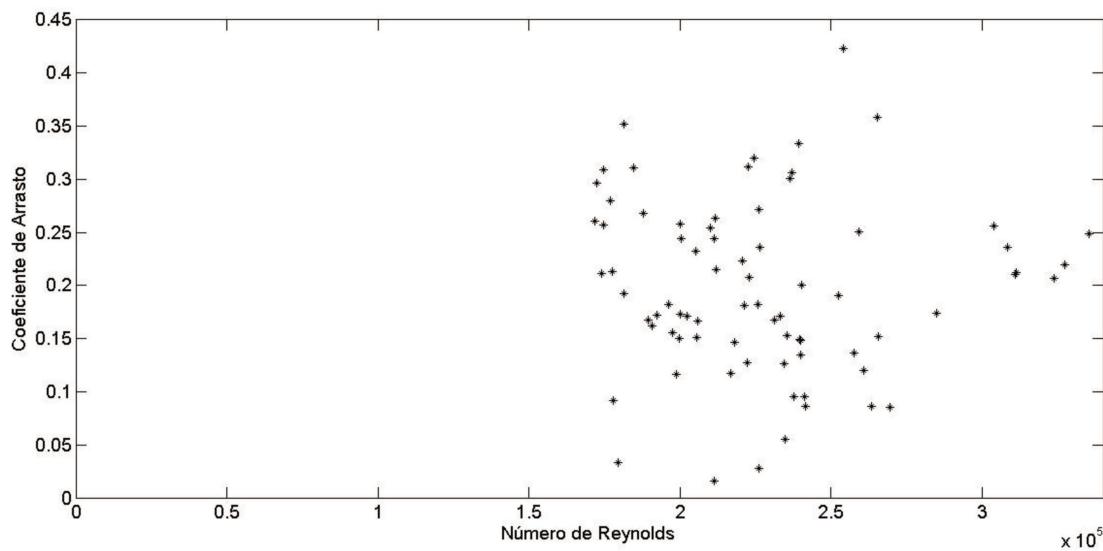


Figura 15. Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds.

As figuras 16 e 17 representam o componente anteroposterior e vertical da velocidade linear normalizada do centro de massa da bola em função do tempo para um exemplo de conjunto de trajetórias com diferentes coeficientes de arrasto e sustentação. Assim como na figura, quando todo o conjunto de trajetórias foram analisadas, não foi possível identificar um agrupamento das velocidades em função destes dois coeficientes.

Os coeficientes de sustentação são apresentados em função da componente lateral da velocidade angular da bola nas diferentes trajetórias (figura 17). O coeficiente de sustentação apresenta-se consistente em função da pouca variação da velocidade angular projetada. O mesmo comportamento é observado para o coeficiente lateral (figura 18) em função da velocidade angular projetada no componente vertical.

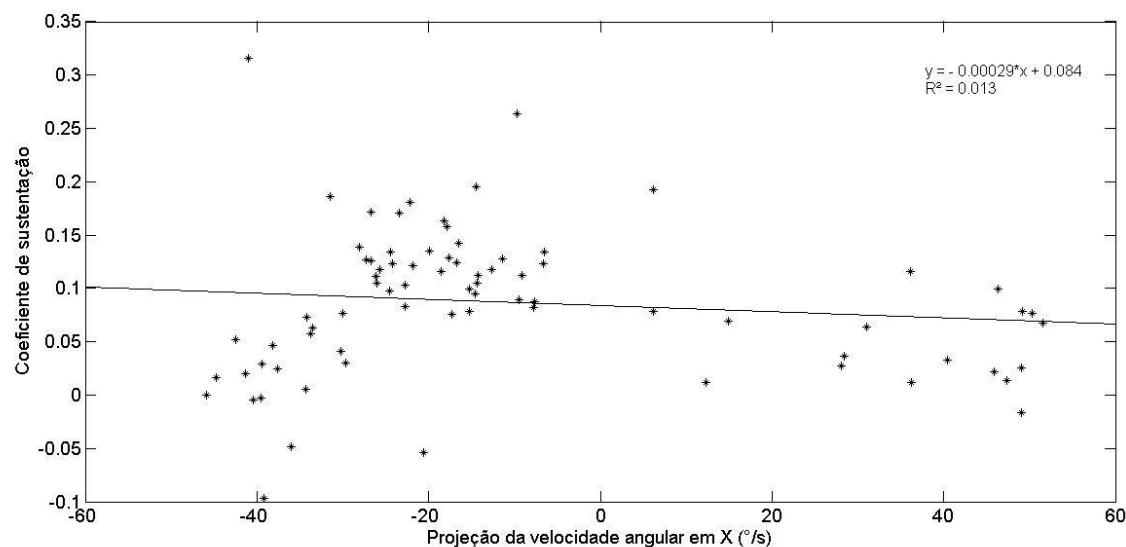


Figura 16. Coeficiente de sustentação em função da componente lateral da velocidade angular.

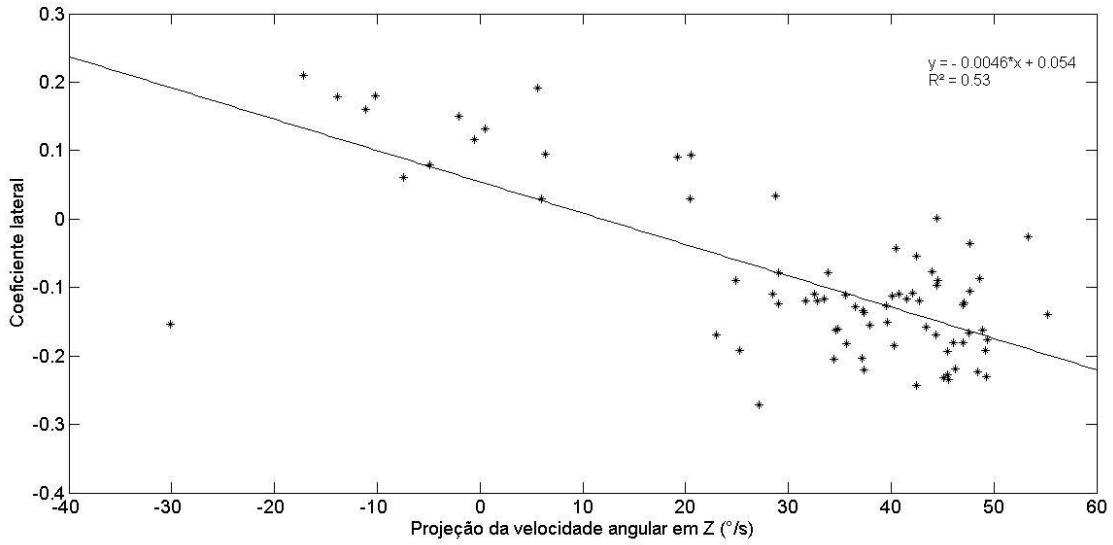


Figura 17. Coeficiente lateral em função do componente vertical da velocidade angular.

Forças Aerodinâmicas

As médias das forças de arrasto, sustentação e lateral das trajetórias foram de $1,19 \pm 0,71$ N, $0,26 \pm 0,31$ N e $0,87 \pm 0,48$ N, respectivamente. Na figura 18 estão representadas as médias das séries de tempo da força de arrasto calculadas para cada trajetória em função da velocidade linear anteroposterior do centro de massa da bola. O ajuste linear realizado confirma a tendência de aumento desta força em função do aumento da velocidade.

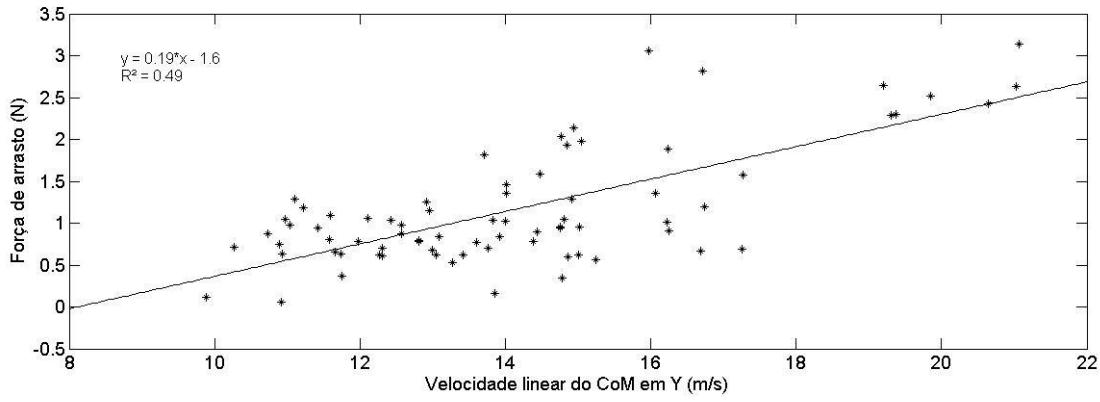


Figura 18. Força de arrasto em função da velocidade linear anteroposterior do centro de massa da bola nas trajetórias analisadas. A linha vermelha representa um ajuste linear no conjunto de dados, com a respectiva equação identificada no gráfico.

Já nas figuras 19 e 20 temos representadas a força de sustentação e lateral em função das velocidades angulares da bola projetadas na direção de X e Z, respectivamente. As velocidades angulares nestas duas direções parecem não ter sido suficientes para demonstrar qualquer tendência nas forças calculadas.

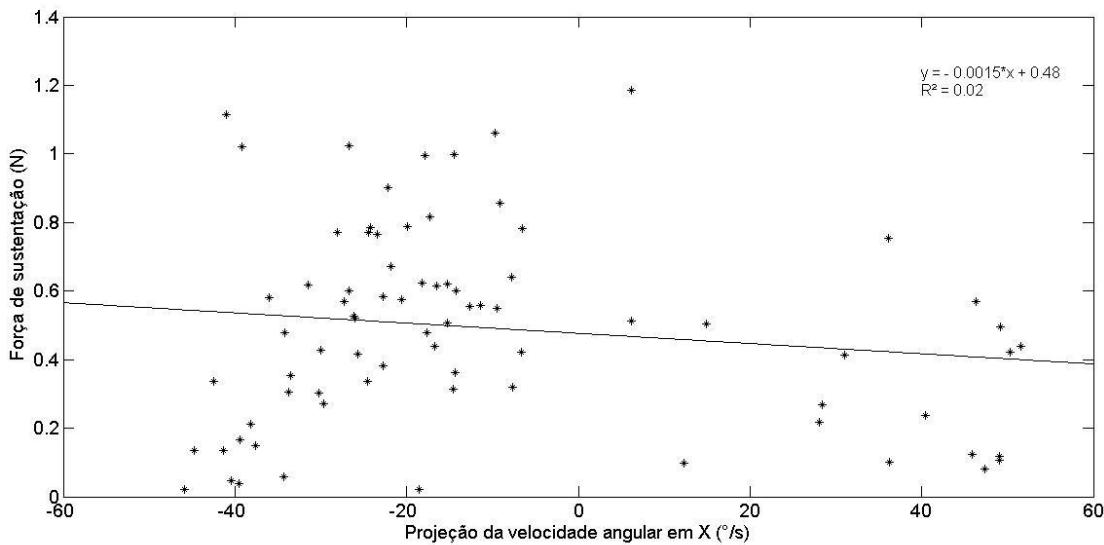


Figura 19. Força de sustentação em função da projeção da velocidade angular da bola na direção lateral.

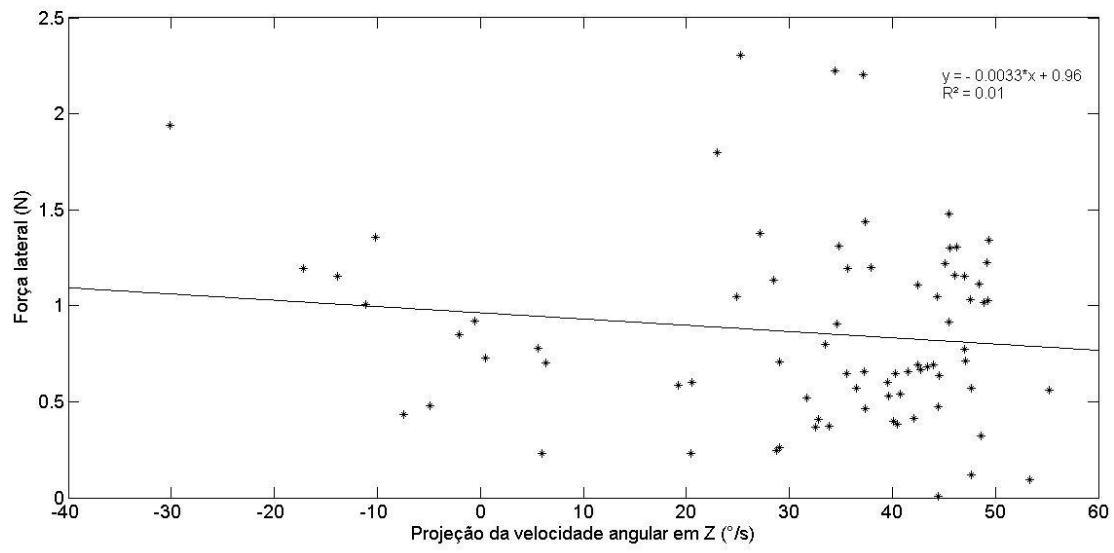


Figura 20. Força lateral em função da projeção da velocidade angular da bola na direção vertical.

4. DISCUSSÃO

Os objetivos deste trabalho foram analisar as variáveis cinemáticas e aerodinâmicas para caracterizar a trajetória de uma bola de futebol após o chute, aplicando os modelos teóricos de movimento de projétil em dados experimentais.

Os primeiros resultados apresentados foram as variáveis cinemáticas lineares. As velocidades e acelerações lineares do centro de massa da bola apresentaram-se condizentes com o esperado para tarefas de chute com o objetivo de acerto de um alvo, ou chute de precisão. Após a fase de chute, ou seja, de contato do pé com a bola, as velocidades na direção vertical e horizontal decrescem levemente, enquanto que a velocidade na direção médio-lateral se mantém constante ao redor de zero. A aceleração na direção vertical se mantém em torno de -8.20 m/s^2 . A velocidade resultante apresenta o mesmo comportamento das velocidades horizontal e vertical e foi, em média, de $14,83 \text{ m/s} \pm 2,56 \text{ m/s}$. A literatura apresenta valores de velocidade resultante maiores do que o obtido neste estudo para tarefas de chute com precisão, porém estes tipos de chute têm como característica importante baixas velocidades lineares de saída da bola (Barbieri *et al.*, 2010; Alcock *et al.*, 2012), comparados à outros tipos de chute. Essas baixas velocidades são resultado de uma relação inversa entre velocidade e acurácia na realização de uma tarefa (Lees, Asai, Andersen, Nunome, & Sterzing, 2010; Teixeira, 1999). Tarefas que restringem o alvo a ser atingido apresentam uma redução na velocidade do movimento e, consequentemente, do objeto projetado durante a tarefa, como parte da estratégia geral de controle.

As variáveis cinemáticas angulares obtidas no presente estudo apresentam informações importantes e novas no estudo de modelo de representação de trajetórias. Na literatura, os estudos que incluem nos modelos a rotação da bola além da translação simplificam sua ocorrência em apenas plano para um melhor entendimento dos fenômenos físicos associados à rotação (Goff e Carré, 2009; Goff e Carré, 2010). Entretanto, sabemos que dificilmente um chute é realizado imprimindo uma rotação na bola puramente em um só plano, como verificado nos resultados do presente trabalho. A representação tridimensional da rotação da bola utilizando os quatérnions resultou na apresentação da posição de um eixo único no espaço, com origem no centro de massa da bola, e da quantidade de rotação instantânea ao redor deste eixo. Essa metodologia permite a obtenção das velocidades angulares projetadas nos planos perpendiculares correspondentes aos que atuam as forças de arrasto, de sustentação e lateral. Dessa forma é possível o cálculo mais acurado destas forças nos modelos do movimento.

Ainda, a posição do eixo de rotação permitiu a análise de características da trajetória associadas as demandas da tarefa imposta aos participantes. Esta variável mostrou-se sensível ao tipo de chute e destreza do participante, pois na tentativa de realizar a tarefa com sucesso, as estratégias adotadas pelos participantes refletiram na posição do eixo de rotação em função do chute. Os resultados apresentados nas figuras para as coordenadas esféricas do eixo de rotação da bola mostram o desempenho do chute de dois participantes com dominâncias diferentes. Na figura 12, o conjunto das latitudes de linha contínua, resultado dos chutes realizados por um participante canhoto, apresenta uma diminuição da latitude em função do tempo. No conjunto inferior de tentativas, estão apresentados os chutes realizados por um participante destro, as latitudes parecem aumentar em função do tempo após o chute. Essa diferença de padrão apresentado pelos participantes pode estar associada à técnica de chute. No primeiro caso, o participante canhoto parece ter realizado o chute imprimindo algo próximo a um *topspin*. No segundo caso, o participante destro parece ter utilizado a estratégia de imprimir algo próximo a um *backspin* para conseguir realizar a tarefa. Ao verificar na tabela do Apêndice C, a decomposição vetorial da velocidade angular na direção lateral para estes dois participantes mostra que os sentidos dos valores ajudam no suporte desta hipótese, pois para o participante canhoto, estes valores estão positivos e para o participante destro, negativos. Para ambos participantes, os valores das latitudes parecem convergir para e ficarem bem próximos, indicando a tentativa de dirigir a bola ao alvo fixo. Com relação à longitude, ocorre um aumento dos valores até as trajetórias se aproximarem da mesma posição no final da série de tempo, demonstrando que o eixo de rotação apresentou desvios no plano horizontal. Por fim, as velocidades angulares obtidas mostraram um leve decaimento até o final da trajetória. James e Haake (2008) atribuem este decaimento ao regime de fluxo de ar laminar que atinge a bola durante o voo e também à rugosidade da sua superfície.

A partir das variáveis cinemáticas obtidas os modelos descritos neste capítulo foram aplicados para a obtenção das variáveis relacionadas às forças dinâmicas atuantes durante o voo real de uma bola de futebol. A primeira variável importante é o número de Reynolds, que descreve o comportamento do fluxo de ar na camada limite da bola (Goff e Carré, 2009; Goff e Carré, 2010) e vai definir como a força de arrasto está atuando. O presente estudo encontrou valores entre $1,7 \times 10^5 < Re < 3,32 \times 10^5$ em um experimento que se aproxima à uma situação real de cobrança de pênalti durante o jogo. Estudos realizados com a simulação de eventos em túneis de vento sugerem que a faixa de número de Reynolds (Re) esperado para um jogo de futebol é de aproximadamente $0,7 \times 10^5 < Re < 4,9 \times 10^5$ (Goff e Carré, 2009).

Quando os coeficientes de arrasto são analisados em função do número de Reynolds e comparados com as regiões críticas de mudança de regime de fluxo de ar para uma esfera lisa (Barber e Carré, 2009), estima-se que, no caso deste estudo, parte das trajetórias passou pela região subcrítica (com Reynolds até 2×10^5). Nessa região ocorre a separação laminar da camada limite (Asai *et al.*, 2007; Asai e Seo, 2013). Entretanto, a queda brusca do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds, característica da mudança dos regimes de fluxo de ar não é identificada, no conjunto de dados deste trabalho. No caso de situações próximas a cobranças de pênaltis, os valores de coeficiente de arrasto não parecem formar uma tendência em função do Reynolds, não se aproximando da situação em que a trajetória passa pelo Reynolds crítico (Asai *et al.*, 2007; Asai e Seo, 2013) e diminuição do coeficiente de arrasto. Isso indica que, para a realização desta tarefa, as velocidades impressas na bola durante o chute podem não ter sido suficientes para fazer com que as trajetórias experimentassem todas estas situações específicas. Entretanto, são as velocidades e respectivos Reynolds característicos de trajetórias de bolas chutadas em função do acerto de um alvo.

A partir deste trabalho, apresenta-se pela primeira vez na literatura uma análise cinemática e dinâmica da trajetória da bola após a realização de uma ação técnica esportiva. Para verificar as características das variáveis aerodinâmicas obtidas em função do fenômeno estudado, algumas relações entre as velocidades, coeficientes e forças aerodinâmicas foram realizadas.

Ainda, não se observou aumento dos coeficientes de sustentação e lateral em função dos componentes lateral e vertical da velocidade angular. Asai e Seo (2013) estimaram o coeficiente de arrasto em função da velocidade linear resultante de vários tipos de bola de futebol. Foi encontrada uma queda brusca dos valores em velocidades acima de 10 m/s e uma estabilização nos coeficientes em velocidades acima de 15 m/s, que estão acima as encontradas no presente trabalho.

As forças aerodinâmicas, principalmente a de arrasto, mostrou-se bem caracterizada pela metodologia aplicada. O coeficiente angular da reta de regressão ajustada nas médias das velocidades lineares do centro de massa na direção anteroposterior em função das médias de força de arrasto indicou uma relação positiva. Já as forças de sustentação e lateral em função dos componentes vertical e lateral da velocidade angular da bola não apresentaram uma tendência evidente. Algumas razões podem explicar estes resultados. A primeira é que o tempo de voo obtido não tenha sido grande o suficiente para que fosse possível observar grandes alterações nas velocidades e, consequentemente, no coeficiente e força de arrasto. O volume em que ocorreu o experimento e a tarefa requisitada restringiram as velocidades que poderiam ser atingidas durante os experimentos. Isso pode ter contribuído para que a atuação dos

fenômenos aerodinâmicos na trajetória da bola durante o voo não tenha sido evidenciada nos resultados do presente estudo. Entretanto, como um trabalho pioneiro na coleta tridimensional de variáveis cinemáticas para análise cinemática e dinâmica do voo da bola de futebol após um chute real, as comparações com a literatura ficam limitadas as estimativas dos parâmetros obtidos por simulações computacionais e modelos matemáticos, como realizados durante a discussão.

5. CONCLUSÃO

O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar a trajetória de uma bola de futebol após uma série de chutes reais. Nesse sentido, foram aplicados modelos teóricos de movimento de projétil em dados experimentais coletados, que forneceram todas as variáveis de interesse a partir da posição tridimensional da bola em função do tempo, o que ainda não tinha sido reportado pela literatura.

O presente trabalho apresentou contribuições importantes para a coleta e análise da trajetória de bolas a partir de chutes reais, a partir da captura da posição e orientação da bola utilizando videogrametria. Assim, foi possível obter as características cinemáticas e aerodinâmicas associadas ao chute de precisão executado pelos participantes do experimento.

Em estudos futuros, esta metodologia pode ser utilizada para o estudo de padrões de trajetórias associadas a diferentes técnicas de chute, que pode auxiliar praticantes de futebol no processo de aprendizagem e refinamento desta ação técnica. O estudo da trajetória de diferentes tipos de bola e em diferentes altitudes podem fornecer importantes informações para o treinamento desta ação técnica, que é a mais realizada durante um jogo. Esta metodologia também permite que os desenvolvedores de tecnologias de materiais esportivos possam avaliar o comportamento da bola após o chute em situações reais e em diferentes condições de tarefa e ambiente.

REFERÊNCIAS

ALAM, F. et al. Effects of surface structure on soccer ball aerodynamics. **Engineering of Sport Conference 2012**, v. 34, p. 146-151, 2012. ISSN 1877-7058. Disponível em: < <Go to ISI>://000314046000026 >.

ALAWAYS, L. W. **Aerodynamics of the curve-ball: an investigation of the effects of angular velocity on baseball trajectories**. 1998. 150 (PhD). Engineering, University of California, Davis, Davis.

ALCOCK, A. et al. Initial ball flight characteristics of curve and instep kicks in elite women's football. **Journal of applied biomechanics**, v. 28, n. 1, p. 70-7, Feb 2012. ISSN 1065-8483 (Print)
1065-8483 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22431217> >.

ASAI, T.; SEO, K. Aerodynamic drag of modern soccer balls. **SpringerPlus**, v. 2, n. 1, p. 171, 2013. ISSN 2193-1801. Disponível em: < <http://www.springerplus.com/content/2/1/171> >.

ASAI, T. et al. Fundamental aerodynamics of the soccer ball. **Sports Engineering**, v. 10, n. 2, p. 101-109, 2007. ISSN 1369-7072. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/BF02844207> >.

BARBER, S.; CARRÉ, M. J. Soccer Ball Aerodynamics. In: PETERS, M. (Ed.). **Lecture Notes in Computational Science and Engineering: Computational fluid dynamics for sport simulation**. Heidelberg ; New York: Springer, 2009. p.83-102. ISBN 9783642044656 (hardcover alk. paper)
1439-7358 ;

BARBIERI, F. A. et al. Performance comparisons of the kicking of stationary and rolling balls in a futsal context. **Sports biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports**, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2010. ISSN 1476-3141 (Print)

1476-3141 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20446635> >.

BRAY, Y.; KERWIN, D. G. Modelling the flight of a soccer ball in a direct free kick. **Journal of sports sciences**, v. 21, n. 2, p. 75-85, 2003. ISSN 0264-0414. Disponível em: < <Go to ISI>://000181274600002 >.

CARRE, M. J.; GOODWILL, S. R.; HAAKE, S. J. Understanding the effect of seams on the aerodynamics of an association football. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 219, n. 7, p. 657-666, 2005. ISSN 0954-4062. Disponível em: < <Go to ISI>://000231845500004 >.

CHOPPIN, S. Calculating football drag profiles from simulated trajectories. **Sports Engineering**, v. 16, n. 3, p. 189-194, 2013. ISSN 1369-7072. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s12283-013-0124-0> >.

DE MESTRE, N. **The mathematics of projectiles in sport**. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1990. 175 ISBN 0521398576. Disponível em: < <http://www.loc.gov/catdir/description/cam024/90193034.html> < <http://www.loc.gov/catdir/toc/cam029/90193034.html> >.

DEPRÁ, P. P.; BRENZIKOFER, R. Comparação de atletas do voleibol através da análise cinemática e dinâmica de trajetórias de bolas de saque. **Revista da educação física/UEM**, v. 15, n. 1, p. 7-15, 2004.

FIFA. Regras do jogo. Webpage, Disponível em: < <http://quality.fifa.com/pt/Bolas-de-Futebol/Programa-de-Qualidade-para-Bolas-de-Futebol/Regras-do-Jogo/> >. Acesso em: 07/02/2014.

GENICK, B. **Basics of Fluid Mechanics** 2013.

GOFF, J. E. A review of recent research into aerodynamics of sport projectiles. **Sports Engineering**, v. 16, n. 3, p. 137-154, 2013. ISSN 1369-7072. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s12283-013-0117-z> >.

GOFF, J. E.; CARRÉ, M. J. Trajectory analysis of a soccer ball. **American Journal of Physics**, v. 77, n. 11, p. 1020-1027, 2009. ISSN 0002-9505. Disponível em: < <Go to ISI>://000270749500008 >.

GOFF, J. E.; CARRÉ, M. J. Soccer ball lift coefficients via trajectory analysis. **European Journal of Physics**, v. 31, n. 4, p. 775, 2010. ISSN 0143-0807. Disponível em: < <http://stacks.iop.org/0143-0807/31/i=4/a=007> >.

JAMES, D.; HAAKE, S. The spin decay of sports balls in flight (P172). In: (Ed.). **The Engineering of Sport 7**: Springer Paris, 2008. cap. 20, p.165-170. ISBN 978-2-287-09412-5.

KRAY, T.; FRANKE, J.; FRANK, W. Magnus effect on a rotating soccer ball at high Reynolds numbers. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 124, p. 46-53, Jan 2014. ISSN 0167-6105. Disponível em: < <Go to ISI>://000331349500005 >.

MYERS, T. G.; MITCHELL, S. L. A mathematical analysis of the motion of an in-flight soccer ball. **Sports Engineering**, v. 16, n. 1, p. 29-41, 2013. ISSN 1369-7072. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s12283-012-0105-8> >.

ROBINSON, G.; ROBINSON, I. The motion of an arbitrarily rotating spherical projectile and its application to ball games. **Physica Scripta**, v. 88, n. 1, 2013. ISSN 0031-8949. Disponível em: <Go to ISI>://000321430800031 >.

SAKURAI, S.; REID, M.; ELLIOTT, B. Ball spin in the tennis serve: spin rate and axis of rotation. **Sports biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports**, v. 12, n. 1, p. 23-9, Mar 2013. ISSN 1476-3141 (Print)

1476-3141 (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23724605> >.

SANTIAGO, P. R. P. **Rotações tridimensionais em biomecânica via quatérnions: aplicação na análise dos movimentos esportivos**. 2009. 119 (PhD). Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

TINCKNELL, M. **Matlab® quaternion class**. Matlab® Central File Exchange 2013.

TUPLIN, S. et al. The application of simulation to the understanding of football flight. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part P-Journal of Sports Engineering and Technology**, v. 226, n. P2, p. 134-142, 2012. ISSN 1754-3371. Disponível em: <Go to ISI>://000308317900008 >.

APÊNDICE A – Médias e desvios-padrão das velocidades lineares do centro de massa da bola em cada tentativa de chute

Participante	Velocidade (m/s)							
	X		Y		Z		Resultante	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
P1	0.16	0.09	13.00	0.05	5.21	0.24	14.01	0.13
	0.76	0.09	14.02	0.09	4.14	0.25	14.64	0.16
	-1.17	0.11	14.01	0.11	4.30	0.31	14.70	0.19
	1.23	0.10	13.71	0.15	5.95	0.26	15.00	0.25
	0.35	0.10	14.47	0.13	3.88	0.30	14.99	0.20
	-2.08	0.07	14.01	0.10	4.51	0.26	14.87	0.17
	1.19	0.11	14.76	0.13	5.09	0.23	15.66	0.20
	-0.46	0.10	15.05	0.13	5.13	0.29	15.91	0.21
P2	0.08	0.04	14.76	0.07	5.53	0.24	15.76	0.15
	0.69	0.01	15.97	0.06	4.75	0.19	16.68	0.11
	0.52	0.00	16.72	0.12	4.85	0.23	17.42	0.17
	0.88	0.03	16.23	0.04	4.63	0.18	16.90	0.08
	1.16	0.04	16.74	0.06	4.76	0.18	17.44	0.11
	0.66	0.02	16.06	0.09	4.07	0.20	16.58	0.14
	0.80	0.04	14.86	0.05	4.69	0.24	15.60	0.12
	0.52	0.00	16.72	0.12	4.85	0.23	17.42	0.17
P3	-0.15	0.12	15.02	0.08	4.62	0.36	15.72	0.17
	1.77	0.08	14.38	0.06	5.18	0.27	15.39	0.15
	-0.15	0.12	15.02	0.08	4.62	0.36	15.72	0.17
	0.21	0.12	14.78	0.06	4.36	0.35	15.41	0.15
	0.14	0.11	14.76	0.09	4.55	0.33	15.45	0.17
	-0.42	0.11	14.85	0.15	4.64	0.29	15.57	0.22
	0.68	0.09	16.69	0.05	4.46	0.25	17.29	0.12
	0.71	0.12	16.25	0.07	5.30	0.27	17.11	0.13
P4	0.64	0.10	13.04	0.17	4.79	0.48	13.91	0.32
	0.57	0.04	11.73	0.15	4.61	0.53	12.63	0.33
	-0.54	0.05	12.31	0.09	4.26	0.50	13.04	0.25
	0.96	0.09	11.58	0.16	4.08	0.62	12.32	0.36
	0.12	0.09	13.60	0.18	4.96	0.45	14.48	0.32
	-0.25	0.08	12.27	0.15	4.63	0.56	13.13	0.33
	0.05	0.05	13.28	0.16	5.33	0.52	14.31	0.34
	-0.23	0.10	12.57	0.18	3.74	0.58	13.13	0.33
P5	0.43	0.15	19.37	0.09	6.46	0.23	20.43	0.16
	-0.36	0.10	21.07	0.11	6.41	0.21	22.03	0.17
	1.16	0.08	17.27	0.14	7.11	0.36	18.72	0.27
	-0.01	0.18	19.85	0.17	3.97	0.45	20.25	0.25
	1.33	0.13	19.31	0.09	6.50	0.27	20.42	0.18
	-0.36	0.07	20.64	0.13	5.01	0.25	21.25	0.18
	0.27	0.13	21.02	0.10	4.41	0.25	21.48	0.14
	-0.76	0.09	19.21	0.14	5.34	0.28	19.95	0.21
P6	1.29	0.08	12.57	0.17	4.69	0.44	13.48	0.32
	0.89	0.12	12.42	0.18	4.11	0.48	13.12	0.33
	0.10	0.10	14.43	0.08	4.67	0.24	15.17	0.14
	0.88	0.11	13.09	0.08	4.48	0.28	13.87	0.16
	0.67	0.09	12.11	0.15	4.55	0.42	12.96	0.29
	1.36	0.11	12.31	0.08	4.39	0.34	13.14	0.18
	0.75	0.12	12.96	0.18	3.66	0.47	13.49	0.31
	0.69	0.12	13.92	0.08	4.43	0.28	14.63	0.16
P7	2.11	0.08	10.28	0.13	4.54	0.55	11.44	0.35
	-0.31	0.09	11.04	0.12	3.58	0.46	11.62	0.25
	-0.34	0.09	10.97	0.17	3.29	0.62	11.47	0.34
	0.64	0.05	11.10	0.17	4.25	0.57	11.92	0.35
	0.17	0.08	11.98	0.12	4.71	0.40	12.88	0.26

	0.51	0.07	11.23	0.14	4.51	0.46	12.12	0.30
	0.49	0.10	10.73	0.16	3.97	0.58	11.47	0.35
	-0.37	0.09	12.81	0.08	4.29	0.34	13.52	0.18
P8	0.69	0.11	11.75	0.08	3.99	0.26	12.44	0.15
	0.88	0.11	13.09	0.08	4.48	0.28	13.87	0.16
	0.79	0.09	10.92	0.08	2.81	0.36	11.31	0.13
	-0.62	0.06	11.60	0.15	2.64	0.43	11.92	0.24
	0.18	0.05	10.93	0.13	2.71	0.56	11.27	0.26
	0.19	0.05	11.42	0.13	2.86	0.43	11.78	0.23
	-1.50	0.15	9.89	0.11	6.01	0.37	11.68	0.25
P9	1.03	0.09	12.81	0.05	3.35	0.31	13.28	0.13
	1.23	0.10	10.89	0.15	3.93	0.61	11.66	0.35
	1.43	0.10	13.42	0.04	4.48	0.32	14.22	0.14
	1.78	0.07	17.25	0.03	3.48	0.18	17.69	0.06
	1.03	0.10	15.00	0.05	4.91	0.26	15.82	0.12
	-0.20	0.09	15.25	0.05	4.30	0.26	15.85	0.10
	0.77	0.13	12.91	0.18	4.77	0.49	13.79	0.34
P10	1.64	0.04	14.81	0.11	3.44	0.35	15.30	0.18
	0.20	0.09	11.65	0.07	4.55	0.50	12.52	0.24
	0.10	0.05	14.94	0.20	4.89	0.32	15.72	0.28
	0.91	0.07	13.83	0.12	5.24	0.38	14.82	0.24
	2.23	0.08	13.85	0.04	4.81	0.32	14.83	0.12
	0.14	0.05	13.76	0.08	4.82	0.37	14.59	0.20
	1.20	0.10	16.24	0.12	4.90	0.28	17.01	0.19
Média		0.44	14.18		4.57	14.95		
Desvio Padrão		0.77	2.57		0.82	2.57		

APÊNDICE B – Médias e desvios-padrão das acelerações lineares do centro

de massa da bola em cada tentativa de chute

Participante	ACELERAÇÃO (m/s ²)								
	X			Y			Z		
Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
P1	-2.27	1.71	0.02	3.81	-7.15	1.94	8.59	1.72	
	-2.73	1.21	-0.71	3.99	-8.01	2.42	9.64	1.23	
	-2.86	1.68	-0.58	3.50	-7.97	2.82	9.62	1.30	
	-2.72	1.21	-1.30	5.31	-6.91	4.19	9.86	2.24	
	-3.10	2.01	0.06	6.12	-8.29	3.30	11.19	1.80	
	-3.18	2.27	0.09	5.26	-8.36	2.94	10.85	1.39	
	-3.77	0.76	-0.37	6.46	-6.82	3.73	10.48	2.16	
P2	-3.59	1.06	-1.63	4.59	-9.39	2.46	11.35	1.32	
	1.56	0.21	0.98	5.05	-7.44	3.17	15.76	0.15	
	0.33	0.24	0.29	7.84	-7.73	3.33	16.68	0.11	
	-0.08	0.45	-5.12	1.28	-10.19	1.55	17.42	0.17	
	2.06	0.42	1.71	4.86	-7.61	2.47	16.90	0.08	
	2.51	0.51	2.14	5.93	-7.36	2.99	17.44	0.11	
	1.20	0.20	-4.77	1.07	-10.24	0.33	16.58	0.14	
P3	1.66	0.85	0.59	3.65	-7.80	2.12	15.60	0.12	
	-0.08	0.45	-5.12	1.28	-10.19	1.55	17.42	0.17	
	-2.76	0.69	0.79	6.42	-7.43	3.47	10.47	2.45	
	-1.35	1.50	0.89	6.04	-5.84	3.42	8.85	2.69	
	-2.76	0.69	0.79	6.42	-7.43	3.47	10.47	2.45	
	-2.35	0.74	2.37	6.95	-6.80	3.83	10.25	3.79	
	-2.53	0.81	0.84	6.22	-7.33	3.07	10.19	2.07	
P4	-3.04	1.19	-0.53	7.33	-6.98	3.19	10.83	2.04	
	-2.48	0.83	1.58	5.51	-6.94	2.77	9.46	2.17	
	-2.97	0.85	1.55	6.82	-6.34	3.63	10.14	2.63	
	-1.45	0.88	-0.44	5.51	-7.76	3.51	9.99	2.31	
	-0.82	0.93	-1.17	2.82	-8.22	2.36	9.02	1.60	

	-1.13	0.95	-0.68	2.67	-8.11	2.35	8.92	1.13
	-1.19	0.85	-0.94	4.53	-8.26	3.46	10.00	1.79
	-1.60	1.23	-0.87	5.40	-7.57	3.46	9.91	1.99
	-1.76	1.42	-0.49	4.31	-8.21	3.46	9.98	1.78
	-1.33	1.49	-0.20	5.10	-7.55	4.76	10.06	2.75
	-1.63	1.29	-1.04	4.33	-9.02	2.73	10.52	1.30
P5	-6.19	0.71	3.58	10.39	-7.06	5.25	14.52	4.41
	-6.69	1.64	-4.21	3.04	-10.38	1.97	13.54	1.35
	-2.66	0.96	-1.20	4.47	-9.10	3.17	10.92	1.36
	-4.88	1.07	-0.21	8.80	-11.35	3.52	15.29	2.61
	-5.89	0.22	4.21	0.24	-11.96	1.09	13.99	0.95
	-4.53	2.19	2.34	9.91	-9.10	3.11	14.10	4.07
	-6.14	0.42	-0.72	5.73	-10.84	1.98	13.74	1.22
	-4.01	1.55	-1.28	6.36	-10.01	2.40	12.75	1.27
	-1.24	1.20	-1.04	3.88	-8.04	2.74	9.36	1.76
P6	-1.61	1.48	-0.54	5.13	-7.89	3.14	9.95	1.92
	-2.86	0.65	2.62	8.50	-5.66	3.96	10.61	4.47
	-2.30	1.10	2.79	8.93	-5.67	4.71	10.90	5.18
	-1.65	1.21	-0.42	4.98	-7.58	3.71	9.77	1.98
	-1.83	1.62	3.17	9.25	-5.94	5.15	11.37	5.61
	-1.76	1.39	-1.29	3.90	-8.39	2.02	9.72	1.22
	-2.79	1.01	2.93	9.05	-6.07	4.40	11.22	5.19
P7	-0.85	0.97	-0.60	3.15	-8.34	2.90	9.35	1.46
	-1.58	0.72	-0.99	3.31	-8.71	1.82	9.63	1.03
	-1.07	1.04	-2.44	0.74	-9.54	0.57	9.99	0.63
	-0.32	1.23	-1.58	4.31	-8.63	3.11	10.09	2.12
	-1.47	0.62	-0.57	3.56	-7.94	2.32	9.04	1.34
	-1.09	0.78	-1.66	3.44	-8.42	2.24	9.46	1.56
	-1.20	1.06	-0.72	3.79	-8.50	2.94	9.79	1.51
	-2.06	0.50	-0.10	4.18	-7.71	2.48	9.23	1.31
	-1.46	0.93	-1.59	1.37	-7.65	1.75	8.18	1.37
P8	-2.89	0.43	-2.45	1.53	-8.39	0.89	9.32	1.03
	-0.93	0.64	-0.43	1.27	-8.38	2.09	8.67	1.56
	-0.63	0.89	-2.83	0.90	-9.49	0.56	10.01	0.50
	-0.32	0.86	-1.67	1.22	-9.44	0.73	9.70	0.77
	-0.27	0.75	-2.40	0.99	-9.61	0.84	9.99	0.84
	-1.03	1.44	-1.82	0.26	-7.62	4.51	8.95	2.09
	-2.33	0.91	0.79	4.03	-8.64	1.85	9.97	0.99
P9	-1.15	0.88	-0.79	3.04	-8.56	2.20	9.40	1.19
	-2.37	1.27	2.43	6.43	-7.49	3.65	10.70	2.76
	-2.42	1.16	3.17	5.13	-7.81	2.12	10.23	1.55
	-2.92	1.16	3.98	8.29	-6.45	4.14	11.45	4.39
	-3.09	0.57	4.00	8.31	-6.92	3.66	11.62	4.28
	-2.03	1.30	-1.72	3.27	-8.58	2.35	9.80	1.53
	1.96	1.70	0.87	6.20	-8.72	2.64	11.03	2.38
P10	1.73	0.46	0.16	3.79	-9.03	2.52	10.20	1.00
	1.43	0.32	-5.29	2.10	-10.42	0.46	11.89	1.37
	2.38	0.94	-0.06	5.70	-7.36	4.00	10.11	2.39
	3.09	1.50	2.69	6.63	-7.73	3.35	11.03	3.27
	1.78	0.75	-0.51	2.98	-8.73	1.72	9.55	0.72
	3.96	1.21	-0.11	6.13	-9.16	3.10	11.97	1.60
	3.21	1.07	-4.28	1.38	-9.50	0.68	10.98	1.36
Média	-1.50		-0.33		-8.20		11.12	
Desvio Padrão	2.16		2.09		1.28		2.34	

APÊNDICE C – Médias e desvios-padrão da velocidade angular da bola em cada tentativa de chute

Participante	Velocidade Angular (°/s)				Resultante
	X	Y	Z	Média	Desvio Padrão
P1	Média	Média	Média	Média	
	-14.50	-40.54	27.14	2038.62	533.78
	-30.05	-18.48	42.80	1801.31	424.37
	-33.48	-25.66	34.58	1697.59	445.62
	-19.90	-20.57	47.12	1642.66	364.94
	-37.62	-18.94	35.52	1797.64	447.98
	-39.36	-25.07	29.02	1944.99	453.35
	-24.25	-11.24	49.22	1667.28	357.49
P2	-41.32	-11.29	35.62	1641.79	411.40
	31.03	43.13	19.22	1459.66	786.33
	14.87	47.18	28.80	1234.58	563.03
	12.26	50.45	20.40	1228.98	532.79
	28.43	48.84	6.34	1540.79	771.37
	28.07	49.16	-0.54	2032.49	1444.87
	40.47	38.41	-7.40	1864.58	973.71
	49.16	19.30	-11.10	1930.42	985.77
P3	36.22	42.82	6.01	1767.86	951.61
	6.13	30.88	47.01	909.68	548.17
	6.13	30.88	47.01	890.16	508.04
	-15.22	28.28	46.03	832.47	532.59
	-9.45	33.47	44.37	969.47	506.93
	-15.27	25.16	47.58	1079.58	524.21
	-17.89	20.12	48.89	872.29	603.53
	-7.81	41.98	37.95	995.83	519.44
P4	-18.59	1.77	47.69	954.23	531.91
	-6.51	-18.87	40.52	1046.39	487.83
	-21.83	-12.85	40.74	1052.23	491.78
	-14.22	-7.83	44.41	887.33	465.51
	-24.45	-1.92	44.55	1022.00	511.24
	-22.77	-21.53	33.53	1125.12	514.61
	-17.26	-15.28	42.42	1090.06	519.87
	-30.22	5.34	41.56	921.26	434.79
P5	-34.29	28.42	34.45	1240.82	596.81
	-39.52	28.16	-30.09	2049.64	3109.92
	-29.71	11.57	43.96	1162.27	549.46
	-39.22	31.57	22.96	1026.23	561.08
	-20.62	37.59	37.14	1017.23	580.82
	-45.93	18.67	24.88	1482.84	649.35
	-35.97	35.47	25.29	1233.98	676.63
	-40.43	25.87	28.44	1258.44	561.70
P6	-12.62	-39.73	33.82	1418.10	189.59
	-27.28	-31.09	36.51	1279.02	198.65
	-26.69	-19.91	46.28	1364.19	186.47
	-22.16	-20.25	48.39	1302.06	171.03
	-11.38	-42.22	31.71	1517.71	197.57
	-23.37	-16.68	49.30	1157.67	149.38
	-26.09	-28.37	39.57	1312.13	196.30
	-28.05	-19.75	45.61	1304.44	179.77
P7	-6.68	-43.82	29.01	1205.69	167.61
	-25.64	-29.53	40.30	1225.86	152.39
	-24.58	-35.31	32.78	1167.17	205.12
	-17.69	-28.10	44.47	1069.58	106.91
	-16.51	-30.90	43.38	1289.89	141.83
	-18.21	-31.58	42.13	1167.99	122.71

	-14.31	-36.68	37.38	1169.67	150.12
	-26.69	-21.12	45.51	1205.56	158.36
P8	-9.67	11.45	55.19	1030.78	414.33
	-22.16	-20.25	48.39	1302.06	171.03
	-31.43	35.06	32.59	734.23	274.97
	-22.78	-10.45	48.63	1290.53	356.41
	-14.55	-17.02	47.71	1182.53	353.36
	-7.63	-8.10	53.33	1289.75	363.63
	-40.97	5.17	39.66	822.43	521.33
P9	-38.22	-2.96	42.49	1156.65	125.71
	-16.69	-32.50	40.09	1075.18	147.12
	-33.71	-10.11	45.14	1100.44	125.22
	-44.76	7.83	34.85	1371.52	274.05
	-34.20	-6.71	45.45	1183.96	157.19
	-42.47	-8.82	37.38	1280.36	188.90
	-26.03	-30.64	37.29	1250.77	202.86
P10	47.38	26.25	-4.90	1437.85	790.99
	49.03	13.62	5.65	1268.64	670.38
	51.50	2.21	20.56	1693.73	1094.49
	46.32	-14.98	-2.01	1645.98	810.73
	45.88	-0.08	-17.19	1720.34	780.72
	50.31	-0.19	0.52	1609.98	811.17
	49.09	20.90	-10.16	1785.27	936.39
Média		26.90	23.62	34.37	1323.37
Desvio Padrão		27.91	27.14	19.21	330.19

APÊNDICE D – Médias e desvios-padrão do número de Reynolds (Re) em cada tentativa de chute

Participante	Re	
	Média	Desvio Padrão
P1	2.40E+05	3.36E+03
	2.12E+05	2.81E+03
	2.21E+05	2.79E+03
	2.23E+05	3.03E+03
	2.26E+05	3.92E+03
	2.27E+05	3.10E+03
	2.25E+05	2.68E+03
P2	2.36E+05	3.49E+03
	2.40E+05	2.29E+03
	2.54E+05	1.64E+03
	2.40E+05	2.29E+03
	2.57E+05	1.28E+03
	2.66E+05	1.61E+03
	2.52E+05	1.90E+03
P3	2.38E+05	1.72E+03
	2.65E+05	2.13E+03
	2.40E+05	2.56E+03
	2.34E+05	2.27E+03
	2.39E+05	2.57E+03
	2.35E+05	2.32E+03
	2.35E+05	2.55E+03
P4	2.37E+05	3.36E+03
	2.63E+05	1.74E+03
	2.61E+05	2.05E+03
	2.12E+05	4.92E+03
	1.92E+05	4.92E+03
	1.99E+05	3.71E+03
	1.88E+05	5.51E+03
P5	2.21E+05	4.90E+03
	2.00E+05	4.99E+03
	5.09E+03	5.09E+03
	2.00E+05	4.98E+03
	3.11E+05	2.46E+03
	3.35E+05	2.45E+03
	2.85E+05	4.06E+03
P6	3.08E+05	3.79E+03
	3.11E+05	2.61E+03
	3.24E+05	2.78E+03
	3.27E+05	2.21E+03
	3.04E+05	3.09E+03
	2.23E+05	2.43E+03
	2.05E+05	4.79E+03
P7	2.00E+05	4.93E+03
	2.31E+05	2.21E+03
	2.11E+05	2.50E+03
	1.97E+05	4.37E+03
	2.00E+05	2.74E+03
	2.05E+05	4.67E+03
	1.74E+05	5.24E+03
	1.77E+05	3.78E+03
	1.75E+05	5.06E+03
	1.81E+05	5.37E+03
	1.96E+05	3.89E+03
	1.85E+05	4.57E+03
	1.75E+05	5.33E+03

	2.06E+05	2.79E+03
	1.78E+05	3.82E+03
	1.90E+05	2.23E+03
	2.11E+05	2.50E+03
P8	1.72E+05	1.93E+03
	1.82E+05	3.58E+03
	1.72E+05	3.95E+03
	1.79E+05	3.48E+03
	2.02E+05	1.92E+03
	1.78E+05	5.28E+03
	2.17E+05	2.18E+03
P9	2.70E+05	9.91E+02
	2.41E+05	1.81E+03
	2.41E+05	1.57E+03
	2.10E+05	5.13E+03
	2.33E+05	2.70E+03
	1.91E+05	3.63E+03
	2.39E+05	3.99E+03
P10	2.26E+05	3.67E+03
	2.26E+05	1.84E+03
	2.22E+05	2.94E+03
	2.81E+03	2.81E+03
	3.51E+03	3.51E+03
Média	2.21E+05	
Desvio Padrão	5.27E+04	

APÊNDICE E – Médias e desvios-padrão coeficientes adimensionais aerodinâmicos calculados para cada tentativa de chute

Participante	COEFICIENTE DE ARRASTO		COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO		COEFICIENTE LATERAL	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
P1	0.134	0.004	0.196	0.001	-0.271	0.006
	0.263	0.006	0.076	0.002	-0.120	0.004
	0.182	0.005	0.063	0.002	-0.162	0.006
	0.311	0.011	0.135	0.001	-0.123	0.006
	0.271	0.007	0.025	0.004	-0.111	0.005
	0.236	0.005	0.029	0.003	-0.123	0.004
	0.320	0.008	0.123	0.001	-0.193	0.007
	0.301	0.007	0.020	0.004	-0.182	0.007
P2	0.148	0.003	0.064	0.001	0.091	0.002
	0.423	0.006	0.069	0.004	0.034	0.001
	0.358	0.007	0.012	0.004	0.029	0.001
	0.137	0.002	0.036	0.001	0.094	0.001
	0.152	0.002	0.027	0.001	0.117	0.002
	0.190	0.003	0.033	0.001	0.061	0.001
	0.095	0.002	0.078	0.000	0.159	0.003
	0.36	0.01	0.01	0.00	0.029	0.001
P3	0.149	0.003	0.079	0.002	-0.181	0.005
	0.127	0.005	0.193	0.002	-0.126	0.003
	0.149	0.003	0.079	0.002	-0.181	0.005
	0.055	0.002	0.089	0.000	-0.170	0.004
	0.153	0.004	0.100	0.002	-0.167	0.005
	0.306	0.010	0.158	0.002	-0.162	0.007
	0.086	0.001	0.082	0.000	-0.154	0.003
	0.120	0.002	0.112	0.001	-0.176	0.004
P4	0.215	0.013	0.116	0.001	-0.105	0.006
	0.172	0.013	0.134	0.002	-0.042	0.003
	0.116	0.008	0.121	0.001	-0.110	0.005
	0.268	0.020	0.113	0.005	-0.098	0.007
	0.224	0.013	0.134	0.001	-0.090	0.006
	0.173	0.011	0.083	0.003	-0.116	0.007
	0.147	0.009	0.075	0.001	-0.054	0.003
	0.257	0.014	0.041	0.008	-0.116	0.008
P5	0.212	0.002	0.005	0.002	-0.205	0.005
	0.249	0.003	-0.003	0.002	-0.154	0.004
	0.174	0.005	0.030	0.002	-0.076	0.003
	0.236	0.003	-0.096	0.007	-0.169	0.006
	0.211	0.002	-0.054	0.004	-0.204	0.005
	0.207	0.003	0.000	0.002	-0.089	0.002
	0.220	0.001	-0.049	0.003	-0.193	0.004
	0.256	0.005	-0.005	0.003	-0.110	0.003
P6	0.207	0.013	0.117	0.001	-0.079	0.005
	0.233	0.015	0.127	0.001	-0.127	0.008
	0.150	0.004	0.171	0.001	-0.219	0.006
	0.168	0.005	0.181	0.001	-0.223	0.007
	0.244	0.014	0.128	0.001	-0.120	0.007
	0.155	0.006	0.171	0.002	-0.230	0.008
	0.244	0.014	0.111	0.002	-0.127	0.008
	0.151	0.004	0.139	0.001	-0.234	0.007
P7	0.212	0.017	0.123	0.002	-0.078	0.006
	0.280	0.015	0.118	0.005	-0.185	0.010
	0.309	0.022	0.097	0.009	-0.119	0.009
	0.352	0.026	0.129	0.006	0.001	0.002
	0.182	0.010	0.143	0.001	-0.158	0.008
	0.311	0.020	0.163	0.002	-0.108	0.007

	0.257	0.019	0.105	0.005	-0.137	0.011
	0.167	0.006	0.126	0.001	-0.193	0.007
P8	0.091	0.006	0.264	0.005	-0.140	0.004
	0.168	0.005	0.181	0.001	-0.223	0.007
	0.016	0.006	0.186	0.004	-0.110	0.003
	0.296	0.015	0.103	0.006	-0.087	0.005
	0.192	0.013	0.095	0.005	-0.036	0.002
	0.261	0.013	0.088	0.005	-0.026	0.002
	0.033	0.010	0.315	0.013	-0.150	0.007
	0.171	0.003	0.046	0.003	-0.242	0.006
P9	0.214	0.018	0.124	0.003	-0.113	0.008
	0.118	0.002	0.058	0.002	-0.232	0.006
	0.085	0.000	0.017	0.001	-0.161	0.001
	0.095	0.001	0.073	0.001	-0.227	0.004
	0.086	0.001	0.052	0.001	-0.221	0.003
P10	0.254	0.015	0.105	0.003	-0.133	0.009
	0.171	0.004	0.013	0.003	0.079	0.002
	0.162	0.006	0.026	0.005	0.191	0.009
	0.333	0.013	0.068	0.003	0.094	0.004
	0.182	0.007	0.100	0.001	0.150	0.006
	0.028	0.001	0.021	0.001	0.209	0.003
	0.128	0.005	0.076	0.001	0.132	0.004
	0.251	0.004	-0.016	0.004	0.181	0.006
	0.200	0.007	0.116	0.001	0.178	0.007
	Média	0.20	0.09		-0.09	
	Desvio Padrão	0.08	0.07		0.12	

APÊNDICE F – Médias e desvios-padrão das forças aerodinâmicas (N) calculadas para cada tentativa de chute

Participante	FORÇA DE ARRASTO		FORÇA DE SUSTENTAÇÃO		FORÇA LATERAL	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
P1	0.68	0.01	1.00	0.01	1.38	0.01
	1.46	0.00	0.43	0.02	0.67	0.01
	1.02	0.00	0.35	0.02	0.91	0.01
	1.81	0.01	0.79	0.02	0.71	0.01
	1.58	0.00	0.15	0.03	0.65	0.01
	1.35	0.00	0.17	0.02	0.71	0.01
	2.04	0.00	0.79	0.02	1.22	0.02
P2	1.97	0.01	0.14	0.03	1.19	0.01
	0.95	0.00	0.41	0.01	0.59	0.00
	3.05	0.00	0.50	0.03	0.25	0.00
	2.82	0.00	0.10	0.03	0.23	0.00
	1.01	0.00	0.27	0.01	0.70	0.00
	1.20	0.00	0.22	0.01	0.92	0.00
	1.36	0.00	0.24	0.01	0.43	0.00
P3	0.60	0.00	0.50	0.01	1.01	0.00
	2.82	0.00	0.10	0.03	0.23	0.00
	0.95	0.00	0.51	0.02	1.16	0.01
	0.78	0.01	1.18	0.01	0.77	0.01
	0.96	0.00	0.51	0.02	1.16	0.01
	0.34	0.00	0.55	0.01	1.04	0.00
	0.95	0.00	0.62	0.02	1.03	0.01
P4	1.93	0.01	1.00	0.03	1.02	0.02
	0.67	0.00	0.64	0.01	1.20	0.00
	0.91	0.00	0.86	0.02	1.34	0.01
	0.62	0.02	0.74	0.02	0.57	0.01
	0.63	0.03	0.78	0.02	0.38	0.00
	0.61	0.02	0.67	0.02	0.54	0.00
	0.81	0.03	0.60	0.04	0.47	0.01
P5	0.77	0.02	0.77	0.02	0.64	0.01
	0.63	0.02	0.58	0.03	0.80	0.01
	0.53	0.02	0.82	0.02	0.69	0.00
	0.87	0.01	0.30	0.04	0.66	0.01
	2.30	0.01	0.06	0.03	2.22	0.02
	3.14	0.01	0.04	0.02	1.94	0.01
	1.58	0.00	0.27	0.02	0.69	0.01
P6	2.52	0.04	1.02	0.05	1.80	0.02
	2.28	0.02	0.58	0.03	2.20	0.01
	2.42	0.00	0.02	0.01	1.05	0.01
	2.63	0.02	0.58	0.03	2.31	0.01
	2.64	0.01	0.05	0.03	1.13	0.01
	0.98	0.01	0.56	0.03	0.37	0.01
	1.04	0.01	0.57	0.03	0.57	0.01
P7	0.90	0.01	1.02	0.01	1.31	0.01
	0.84	0.01	0.90	0.02	1.11	0.01
	1.06	0.01	0.56	0.03	0.52	0.01
	0.70	0.01	0.77	0.02	1.03	0.01
	1.15	0.01	0.53	0.03	0.60	0.01
	0.84	0.00	0.77	0.02	1.30	0.01
	0.71	0.02	0.42	0.03	0.26	0.00
P8	0.98	0.01	0.41	0.03	0.65	0.01
	1.05	0.01	0.34	0.05	0.41	0.01
	1.29	0.02	0.48	0.05	0.01	0.00
	0.78	0.01	0.62	0.02	0.68	0.01
	1.18	0.02	0.62	0.04	0.41	0.01
	0.87	0.01	0.36	0.04	0.47	0.01
	0.79	0.01	0.60	0.02	0.92	0.01
	0.37	0.02	1.06	0.01	0.56	0.01
	0.84	0.01	0.90	0.02	1.11	0.01
	0.05	0.02	0.62	0.00	0.37	0.00
	1.09	0.01	0.38	0.03	0.32	0.01
	0.63	0.01	0.31	0.03	0.12	0.00
	0.94	0.01	0.32	0.03	0.09	0.00
	0.11	0.03	1.11	0.00	0.53	0.01

	0.78	0.00	0.21	0.02	1.11	0.01
	0.75	0.02	0.44	0.03	0.40	0.01
	0.62	0.00	0.30	0.02	1.22	0.00
P9	0.69	0.00	0.13	0.01	1.31	0.00
	0.62	0.00	0.48	0.01	1.48	0.00
	0.56	0.00	0.34	0.01	1.44	0.00
	1.25	0.01	0.52	0.04	0.66	0.01
	1.04	0.00	0.08	0.02	0.48	0.00
P10	0.66	0.00	0.11	0.03	0.78	0.01
	2.14	0.00	0.44	0.03	0.60	0.01
	1.04	0.01	0.57	0.02	0.85	0.01
	0.16	0.00	0.12	0.01	1.19	0.00
	0.70	0.01	0.42	0.02	0.73	0.00
	1.88	0.01	0.12	0.03	1.36	0.01
	1.29	0.01	0.75	0.02	1.15	0.01
Média	1.19		0.26		0.87	
Desvio Padrão	0.71		0.31		0.48	

ANEXO 1 – Parecer do Comitê de Ética em Pesquisas da Unicamp

COMITÊ DE ÉTICA EM
PESQUISA DA UNICAMP -
CAMPUS CAMPINAS



PARECER CONSUSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Titulo da Pesquisa: Análise biomecânica do chute

Pesquisador: Juliana Exel Santana

Área Temática:

Versão: 3

CAAE: 21566614.0.0000.5404

Instituição Proponente: Faculdade de Educação Física

Patrocinador Principal: MINISTERIO DA EDUCACAO

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 932.632

Data da Relatoria: 21/01/2015

Apresentação do Projeto:

Trata-se de um projeto de doutorado do Faculdade de Educação Física da UNICAMP e da Escola de Educação Física e Esporte de Ribeirão Preto (USP), em que serão analisadas simulações de cobranças de falta por meio de análise de imagem por videogrametria em dois grupos: praticantes de futebol habilidosos (n=10) e praticantes de futebol não habilidosos (n=10).

Objetivo da Pesquisa:

Investigar e comparar a variabilidade dos parâmetros cinemáticos da trajetória da bola e a coordenação intrassegmentos a partir de chutes realizados por jogadores habilidosos e não habilidosos.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Os riscos estão associados aos voluntários poderem ter dores musculares após o teste e não haverá benefícios aos participantes da pesquisa.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Pesquisa pertinente e embasada na literatura.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Todos os documentos foram apresentados (TCLE, Projeto de Pesquisa, Folha de rosto, Autorização), porém ainda há pendências na segunda versão (ver item Conclusões ou Pendências e

Endereço: Rua Tessália Vieira de Camargo, 126
Bairro: Barão Geraldo CEP: 13.083-887
UF: SP Município: CAMPINAS
Telefone: (19)3521-8936 Fax: (19)3521-7187 E-mail: cep@fcm.unicamp.br

COMITÊ DE ÉTICA EM
PESQUISA DA UNICAMP -
CAMPUS CAMPINAS



Continuação do Parecer: 932.632

Lista de Inadequações).

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

No parecer anterior (844.335), as seguintes pendências haviam sido listadas:

1)TCLE:

1.1)Deixar claro o tempo em que as imagens ficarão armazenadas e se haverá descarte após conclusão do estudo. A frase: "Estas imagens ficarão armazenadas até a publicação da pesquisa em revistas especializadas da área de biomecânica do esporte" é muito vaga, tem que ser em unidade de tempo (por exemplo: 5 anos).

Resposta: A pesquisadora inclui no TCLE a seguinte informação: "Serão registradas imagens dos marcadores esféricos aderidos aos seus membros inferiores durante os chutes que você executar. Estas imagens ficarão armazenadas por um período de 5 anos após a sua coleta."

Análise: pendência atendida.

1.2) Colocar o contato profissional do orientador, da mesma forma que foi colocado o da aluna.

Resposta: os dados de contato do orientador foram acrescentados ao TCLE.

Análise: pendência atendida.

2) Projeto gerado pela Plataforma Brasil:

2.1) A pesquisa com seres humanos deverá ser realizada somente após aprovação do CEP. Readequar o cronograma.

Resposta: O cronograma mostra início do estudo piloto a partir de 01/02/2015 e coleta de dados a partir de 02/03/2015.

Análise: pendência atendida.

2.2) Informar se projeto será apresentado também ao CEP da Escola de Educação Física e Esporte de Ribeirão Preto (USP).

Resposta: a Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto-USP foi indicada como coparticipante.

Análise: pendência atendida.

Endereço: Rua Tessália Vieira de Camargo, 126

Bairro: Barão Geraldo

CEP: 13.083-887

UF: SP

Município: CAMPINAS

Telefone: (19)3521-8936

Fax: (19)3521-7187

E-mail: cep@fcm.unicamp.br

COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA DA UNICAMP - CAMPUS CAMPINAS



[Continuação do Parecer: 932.632](#)

2.3) Pesquisador declara, em critérios de inclusão, participantes com idade entre 17 e 30 anos, portanto menores de idade, considerados vulneráveis. Solicitamos que pesquisador considere a possibilidade de inclusão de participantes acima de 18 anos, apenas. Se não for possível, readequar o TCLE com a assinatura do responsável e assentimento do sujeito da pesquisa, caso menor de idade.

Resposta: o resumo das informações geradas pela PB indica nos critérios de inclusão participantes "entre 18 e 30 anos".

Análise: pendência atendida.

2.4) Informar ONDE E COMO os participantes serão recrutados.

Resposta: O plano de recrutamento não foi inserido no resumo das informações geradas pela PB, mas encontra-se disponível na brochura do pesquisador com o texto a seguir:

O recrutamento dos voluntários para a participação na presente pesquisa será feito pela pesquisadora responsável deste projeto, Juliana Exel Santana. Os potenciais voluntários serão localizados dentro da própria Escola de Educação Física e Esporte de Ribeirão Preto – USP. Serão abordados pessoalmente sobre a participação nesta pesquisa. Assim como consta no Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), a pesquisadora responsável convidará alunos do sexo masculino, universitários, que tenham ou não tido experiência em jogar futebol, de acordo com as características de participantes descritas no corpo do projeto em seguida. Neste convite, a pesquisadora responsável descreverá o título da pesquisa ("Análise da variabilidade da trajetória da bola e do chute no futebol") e o local de realização das coletas de dados (na Escola de Educação Física e Esporte de Ribeirão Preto). Aos convidados será explicado que o objetivo da pesquisa é estudar a variabilidade da coordenação da perna de chute de jogadores habilidosos e não habilidosos e também a variabilidade das variáveis de saída das bolas que chutarão. Será explicado também que a participação se dará da seguinte forma: durante apenas uma visita ao Laboratório de Biomecânica e Controle Motor, faremos o preenchimento de uma ficha contendo o nome e data de nascimento do voluntário. Nesta ficha, também serão registradas suas informações de massa e altura após medi-las a partir de uma balança e uma fita métrica. Em seguida, pediremos para que o voluntário coloque uma vestimenta específica para o teste, que será um shorts comum, como o utilizado em eventuais práticas de atividade física, assim como uma chuteira específica para a prática de futsal. Alguns marcadores esféricos (esferas de plástico revestidas) serão aderidos à pele dos membros inferiores

Endereço: Rua Tessália Vieira de Camargo, 126
Bairro: Barão Geraldo CEP: 13.083-887
UF: SP Município: CAMPINAS
Telefone: (19)3521-8936 Fax: (19)3521-7187 E-mail: cep@fcm.unicamp.br

**COMITÊ DE ÉTICA EM
PESQUISA DA UNICAMP -
CAMPUS CAMPINAS**



Continuação do Parecer: 932.632

direito e esquerdo dos participantes, com uma fita dupla-face antialergênica. Após esta preparação, será pedido que o voluntário execute 10 chutes de uma bola de futebol em um alvo à sua frente. Também será esclarecido que a participação é totalmente voluntária e que a recusa ou a desistência da participação a qualquer momento da coleta de dados será totalmente respeitada sem acarretar nenhum prejuízo para o participante. Informamos ainda que os dados coletados serão utilizados somente para os fins desta pesquisa e serão tratados com o mais absoluto sigilo e confidencialidade, de modo a preservar a sua identidade. Explicaremos também que serão registradas imagens dos marcadores esféricos aderidos aos seus membros inferiores e na bola durante os chutes executados. Explicitaremos também os benefícios e ocasionais riscos associados à presente pesquisa, assim como a não-remuneração do voluntário pela participação e o resarcimento das despesas decorrentes da pesquisa quando devidas e decorrentes.

Análise: pendência atendida.

Conclusão: aprovado após respostas às pendências.

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

Considerações Finais a critério do CEP:

- O sujeito de pesquisa deve receber uma cópia do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, na íntegra, por ele assinado.
- O sujeito da pesquisa tem a liberdade de recusar-se a participar ou de retirar seu consentimento em qualquer fase da pesquisa, sem penalização alguma e sem prejuízo ao seu cuidado.
- O pesquisador deve desenvolver a pesquisa conforme delineada no protocolo aprovado. Se o pesquisador considerar a descontinuação do estudo, esta deve ser justificada e somente ser realizada após análise das razões da descontinuidade pelo CEP que o aprovou. O pesquisador deve aguardar o parecer do CEP quanto à descontinuação, exceto quando perceber risco ou dano não previsto ao sujeito participante ou quando constatar a superioridade de uma estratégia diagnóstica ou terapêutica oferecida a um dos grupos da pesquisa, isto é, somente em caso de necessidade de

Endereço: Rua Tessália Vieira de Camargo, 126

Bairro: Barão Geraldo

CEP: 13.083-887

UF: SP

Município: CAMPINAS

Telefone: (19)3521-8936

Fax: (19)3521-7187

E-mail: cep@fcm.unicamp.br

COMITÊ DE ÉTICA EM
PESQUISA DA UNICAMP -
CAMPUS CAMPINAS



Continuação do Parecer: 932.632

ação imediata com intuito de proteger os participantes.

- O CEP deve ser informado de todos os efeitos adversos ou fatos relevantes que alterem o curso normal do estudo. É papel do pesquisador assegurar medidas imediatas adequadas frente a evento adverso grave ocorrido (mesmo que tenha sido em outro centro) e enviar notificação ao CEP e à Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA – junto com seu posicionamento.

- Eventuais modificações ou emendas ao protocolo devem ser apresentadas ao CEP de forma clara e sucinta, identificando a parte do protocolo a ser modificada e suas justificativas. Em caso de projetos do Grupo I ou II apresentados anteriormente à ANVISA, o pesquisador ou patrocinador deve enviá-las também à mesma, junto com o parecer aprovatório do CEP, para serem juntadas ao protocolo inicial.
- Relatórios parciais e final devem ser apresentados ao CEP, inicialmente seis meses após a data deste parecer de aprovação e ao término do estudo.

CAMPINAS, 14 de Janeiro de 2015

Assinado por:
Renata Maria dos Santos Celeghini
(Coordenador)

Endereço: Rua Tessália Vieira de Camargo, 126
Bairro: Barão Geraldo CEP: 13.083-887
UF: SP Município: CAMPINAS
Telefone: (19)3521-8936 Fax: (19)3521-7187 E-mail: cep@fcm.unicamp.br

ANEXO 2 - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

Titulo da pesquisa:

“Análise biomecânica do chute”

Prezado(a) Senhor(a):

Gostaríamos de convidá-lo (a) a participar da pesquisa **“Análise da variabilidade da trajetória da bola e do chute no futebol”**, realizada na **Escola de Educação Física e Esporte de Ribeirão Preto**. Os responsáveis por este estudo são a aluna de doutorado Juliana Exel Santana e os professores doutores Sergio Augusto Cunha (Faculdade de Educação Física da UNICAMP) e Paulo Roberto Pereira Santiago (Escola de Educação Física e Esportes de Ribeirão Preto). O objetivo da pesquisa é **estudar a variabilidade da coordenação da perna de chute de jogadores habilidosos e não habilidosos e também a variabilidade das variáveis de saída da bola que você chutará**. A sua participação é muito importante e ela se daria da seguinte forma: durante apenas uma visita ao Laboratório de Biomecânica e Controle Motor, faremos o preenchimento de uma ficha contendo seu nome e data de nascimento. Nesta ficha, também registraremos suas informações de massa e altura, após medi-las a partir de uma balança e uma fita métrica. Em seguida, pediremos para que você coloque uma vestimenta específica para o teste. Esta vestimenta será um short comum, como o que você utiliza para sua eventuais práticas de atividade física, e também uma chuteira específica para a prática de futsal. Alguns marcadores esféricos (esferas de plástico revestidas) serão aderidos à pele dos seus membros inferiores direito e esquerdo com uma fita dupla-face antialergênica. Após esta preparação, será pedido que você execute 10 chutes de uma bola de futebol em um alvo à sua frente. Gostaríamos de esclarecer que sua participação é totalmente voluntária, podendo você: recusar-se a participar, ou mesmo desistir a qualquer momento sem que isto acarrete qualquer ônus ou prejuízo à sua pessoa. Informamos ainda que as informações serão utilizadas somente para os fins desta pesquisa e serão tratadas com o mais absoluto sigilo e confidencialidade, de modo a preservar a sua identidade. Serão registradas imagens dos marcadores esféricos aderidos aos seus membros inferiores durante os chutes que você executar. Estas imagens ficarão armazenadas por um período de 5 anos após a sua coleta.

Os benefícios esperados são a compreensão das diferenças na maneira como jogadores habilidosos e não habilidosos coordenam os membros inferiores na hora de realizar chutes. Assim, será possível ter parâmetros para corrigir e melhorar o desempenho do chute nos praticantes de futebol. Quanto aos riscos e desconfortos que podem estar associados a este estudo, os participantes podem experinciar dores musculares após o teste. Em função do risco deste provável desconforto, o protocolo do experimento foi ajustado para a execução de 10 chutes por participante, já que o chute, por si só, é uma tarefa simples e de rápida execução. Informamos que o(a) senhor(a) não pagará nem será remunerado por sua participação. Garantimos, no entanto, que todas as despesas decorrentes da pesquisa serão resarcidas, quando devidas e decorrentes especificamente de sua participação na pesquisa.

Estaremos presente para acompanhar e assistir à qualquer necessidade sua durante toda a realização da coleta, bem como para esclarecer quaisquer dúvidas decorrentes durante o período da pesquisa. Caso o(a) senhor(a) tenha dúvidas ou necessite de maiores esclarecimentos, entre em contato com:

Juliana Exel Santana (aluna), pelo telefone (19) 3521-6626, no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica, prédio Euclides Custódio de Lima Filho, Faculdade de Educação Física da Unicamp – Avenida Érico Veríssimo, 701, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo – CEP 13.083-851, Campinas, SP, Brasil .

Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha (orientador), pelo telefone (19) 3521-6621, no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica, prédio Euclides Custódio de Lima Filho, Faculdade de Educação Física da Unicamp – Avenida Érico Veríssimo, 701, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo – CEP 13.083-851, Campinas, SP, Brasil .

Em caso de eventuais reclamações ou denúncias referentes aos aspectos éticos da pesquisa, por favor, entre em contato com:

Comitê de Ética em Pesquisa/FCM/UNICAMP na rua Tessália Vieira de Camargo, 126 – Campinas – SP (CEP 13083-887), telefone (019) 3521-8936 ou 3521-7187 e e-mail: cep@fcm.unicamp.br.

ou

Comitê de Ética em Pesquisa da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto - USP na Avenida Bandeirantes, 3900 - bloco 3 - sala 16 - 14040-901 - Ribeirão Preto - SP - Brasil, telefone: (16) 3602-4811 / Fax: (16) 3633-2660 e e-mail: coetp@ffclrp.usp.br

Este termo deverá ser preenchido em duas vias de igual teor, sendo uma delas, devidamente preenchida, assinada e entregue ao(a) senhor(a).

Campinas, ____ de _____ de 201_.

Pesquisador Responsável

RG::_____

_____, tendo sido devidamente esclarecido sobre os procedimentos da pesquisa, concordo em participar **voluntariamente** da pesquisa descrita acima.

Assinatura (ou impressão dactiloscópica):_____

Data:_____

Obs: Caso o participante da pesquisa seja menor de idade, deve ser incluído o campo para assinatura do menor e do responsável.