

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE FÍSICA-LICENCIATURA**

JOICE STALLBAUM KLUG

**APLICAÇÃO DE CONCEITOS NO FUTEBOL:
DESVENDANDO A FÍSICA POR TRÁS DO CHUTE DO ROBERTO
CARLOS**

**CERRO LARGO
2022**

JOICE STALLBAUM KLUG

**APLICAÇÃO DE CONCEITOS NO FUTEBOL:
DESVENDANDO A FÍSICA POR TRÁS DO CHUTE DO ROBERTO
CARLOS**

Trabalho de conclusão do curso de graduação apresentado
como requisito para obtenção do grau de Licenciada em
Física da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Dr. Ney Marçal Barraz Junior

CERRO LARGO

2022

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Klug, Joice Stallbaum
APLICAÇÃO DE CONCEITOS NO FUTEBOL: DESVENDANDO A
FÍSICA POR TRÁS DO CHUTE DO ROBERTO CARLOS / Joice
Stallbaum Klug. -- 2022.
27 f.:il.

Orientador: Prof. Dr. Ney Marçal Barraz Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Licenciatura em Física, Cerro Largo, RS, 2022.

1. Lance marcante do futebol. 2. Desvendando a
física. 3. Velocidade do chute. 4. Conservação do
momento linear. 5. Colisões.. I. Júnior, Ney Marçal
Barraz, orient. II. Universidade Federal da Fronteira
Sul. III. Título.

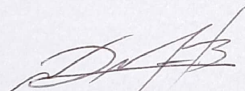
JOICE STALLBAUM KLUG

**APLICAÇÃO DE CONCEITOS NO FUTEBOL: DESVENDANDO A FÍSICA POR TRÁS
DO CHUTE DO ROBERTO CARLOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Física - Licenciatura da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de licenciada em Física.

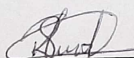
Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 05/04/2022

BANCA EXAMINADORA



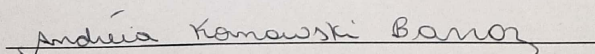
Prof. Dr. Ney Marçal Barraz Júnior – UFFS

Orientador



Prof. Me. Rafael Schmatz Tolfo – Colégio La Salle Medianeira

Avaliador



Profa. Andréia Kornowski Barraz – Escola Estadual Técnica Guaramano

Avaliadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me conceder as bênçãos de poder estudar em uma universidade pública, gratuita e de qualidade. Por me dar saúde, coragem e força de vontade para correr atrás dos meus objetivos. Por me proteger durante toda a minha vida, salvando-me de todos os males e perigos.

Aos meus pais, avós, irmão e namorado, por todo o apoio que sempre me deram em toda a vida, me ensinando aquilo que é justo e certo. Por estarem comigo nos momentos mais difíceis da vida, e principalmente nos momentos bons. Por persistirem e estarem comigo, quando meus esforços pareciam não dar resultados. Com toda certeza sem o apoio deles eu não conseguiria.

Aos demais familiares, gratidão pelo apoio e energias positivas que me enviaram, seja de perto ou de longe, durante todo o período da graduação.

Aos amigos que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos, estendendo-me a mão todas as vezes que precisei, sem hesitar em me ajudar, seja com palavras ou gestos de carinho.

Aos colegas da graduação, que estiveram comigo desde o início, compartilhando momentos e experiências inesquecíveis. Estes sim sabem como foram difíceis algumas etapas e como nossa parceria, amizade e cumplicidade foram fundamentais nesse processo. Vocês estarão sempre guardados em minha memória e principalmente no coração.

A minha amiga, prima e colega Viviane Klug, a qual tenho um carinho, respeito e admiração desde quando éramos crianças. Toda a minha gratidão por cada segundo vivido com a tua companhia. Pelos risos e também os choros. Pelos dias de luta e principalmente os de vitória. Por cada momento que compartilhamos juntas durante nossa graduação. Iniciamos juntas, terminaremos juntas e seguiremos juntas daqui por diante, como sempre.

Ao meu orientador, professor e amigo, Ney Marçal, por tudo que fez por mim durante o curso, e principalmente durante a realização deste trabalho. Desejo-lhe prosperidade na vida e agradeço por tudo que me ensinou e ajudou.

Aos demais professores do curso, por todos os ensinamentos que me foram passados durante o período da graduação. Por cada experiência compartilhada, seja dentro ou fora da sala de aula. Levarei cada um de vocês comigo como minhas referências de profissionais da educação.

Gratidão a cada servidor e funcionário da Universidade, todos os serviços que me foram prestados, por todo seu empenho e dedicação em bem atender a todos.

RESUMO

Neste trabalho realizamos análise da cobrança de falta realizada pelo jogador Roberto Carlos, no jogo Brasil versus França pelo Torneio da França em 1997. Dividimos a cobrança de falta em três partes: jogador correndo até o instante antes de chutar a bola; o movimento do pé do jogador até atingir a bola e o início do movimento da bola; e o movimento da bola após o chute, onde ela faz uma curva na sua trajetória. Neste Trabalho de Conclusão de Curso nos debruçamos na segunda parte do movimento da falta cobrada no torneio. Tendo em vista as dificuldades dos estudantes do Ensino Básico de compreender a Física envolvida nos conceitos genéricos, puramente matemáticos e sabendo que a paixão nacional é o futebol. Perguntamos: como foi transferido o movimento do pé do jogador Roberto Carlos para a bola? Conseguimos estimar a velocidade inicial após o chute do jogador com a velocidade encontrada pelas câmeras televisivas da época? No desenvolvimento deste trabalho foi mostrado como foi realizada a transformação do movimento e estimada a velocidade inicial da bola após o chute. Para isso, utilizamos os conceitos fundamentais, como: comprimento de um segmento circular, massa, velocidade, momento linear, conservação do momento linear e colisões. A continuação deste estudo seria a explicação do movimento curvo que a bola após a cobrança de falta.

Palavras-chave: Ensino básico. Física no futebol. Lance de jogo. Gol inacreditável.

ABSTRACT

In this work we carry out an analysis of the free kick performed by the player Roberto Carlos, in the game Brazil versus France for the Torneio da França in 1997. We divided the free kick into three parts: player running until the moment before kicking the ball; the movement of the player's foot until it reaches the ball and the beginning of the movement of the ball; and the movement of the ball after the kick, where it curves in its trajectory. In this Course Completion Work we focus on the second part of the movement of the free kick charged in the tournament. In view of the difficulties of Basic Education students to understand the Physics involved in generic concepts, purely mathematical and knowing that the national passion is football. We ask: how was Roberto Carlos' foot movement transferred to the ball? Can we estimate the initial speed after the player's kick with the speed found by television cameras at the time? In the development of this work, it was shown how the transformation of the movement was performed and the initial velocity of the ball after the kick was estimated. For this, we use the fundamental concepts, such as: length of a circular segment, mass, velocity, linear momentum, conservation of linear momentum and collisions. The continuation of this study would be the explanation of the curved movement that the ball after the free kick.

Keywords: Basic education. Physics in football. Game throw. Unbelievable goal.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1	COMPRIMENTO DO SEGMENTO DE UM CÍRCULO.....	11
2.2	MASSA.....	12
2.3	VELOCIDADE.....	12
2.4	MOMENTO LINEAR.....	12
2.5	CONSERVAÇÃO DO MOMENTO LINEAR.....	13
2.5.1	colisões.....	14
3	DESENVOLVIMENTO.....	15
3.1	DADOS PARA REALIZAR A ANÁLISE DO MOVIMENTO.....	16
3.2	VELOCIDADE DA BOLA APÓS O CHUTE.....	17
3.2.1	encontrando a velocidade do pé.....	19
3.2.2	encontrando a velocidade final do pé.....	21
3.3	COMPARANDO AS VELOCIDADES DA BOLA ENCONTRADA EMPIRICAMENTE E TEORICAMENTE.....	22
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	24
	REFERÊNCIAS.....	25

1 INTRODUÇÃO

Todos finais de semana a maior parte da população assiste futebol na televisão ou para ir jogar com a sua turma, sendo assim o futebol se torna um nicho de negócio altamente rentável. Uma competição que gerou milhões de dólares foi o Torneio da França, ocorrido no ano de 1997. Nesta competição, a seleção brasileira realizou uma atuação espetacular, no jogo referido foi entre Brasil e França, onde a seleção brasileira sofreu uma falta entre o meio de campo e a grande área do goleiro adversário. O jogador Roberto Carlos foi escalonado para realizar a cobrança de falta. Roberto se afasta da bola, olha para a bola, para a barreira e para o gol... começa sua corrida para cobrar a falta e *pummm...* a bola realiza uma curva desviando da barreira, bate na trave e entra no gol. Golaço!!! Grita o narrador do jogo.

Com esse cenário descrito, vamos abordar analisar a física envolvida em todo o movimento que o jogador realizou para converter em gol o lance da cobrança de falta. Para abordar os conceitos físicos, dividimos o movimento em três partes: a primeira parte é o movimento do jogador até um instante antes do seu pé colidir com a bola; a segunda parte é o instante que o pé do jogador colide com a bola e coloca ela em movimento; e o terceiro e último movimento a ser analisado é a curvatura realizada pela bola após o chute. Nós vamos nos deter no segundo movimento, o qual o pé do Roberto Carlos colide com a bola. A teoria abordada na Física é a Mecânica, a qual estuda a causa e o movimento do fenômeno físico a ser estudado. Vamos abordar os conceitos de colisão, tipos de colisões, momento linear, massa e velocidade linear.

Através de atividades realizadas durante os estágios obrigatórios da graduação, pude perceber que a maneira de abordar os conteúdos com os estudantes, impacta diretamente na sua aprendizagem. Uma abordagem de maneira genérica, sem aprofundar muito os conceitos e nem mesmo exemplificá-los através de experimentos, usando apenas exercícios escritos, não despertam muito o interesse dos alunos. Esse método de ensinar faz com que apenas se use cálculos e equações previamente desenvolvidos, trazendo à tona uma visão matemática e não física dos conceitos. Com a utilização de outros métodos e abordagens de ensino, pude perceber uma melhor desenvoltura por parte dos alunos.

Em um diálogo com uma colega da graduação, pude perceber que a aprendizagem dos alunos acontece muitas vezes de acordo com o modo que o professor aborda os conceitos de forma oral. De acordo com a colega, podemos perceber que alguns dos

profissionais da educação utilizam métodos já ultrapassados.

Pensando inteiramente nos estudantes, para que possam expor suas ideias e relacioná-las com algo interessante do seu cotidiano, escolhemos um tema que atrai o gosto de muitos dos alunos que é o futebol e aplicações de conceitos físicos no mesmo, trazendo assim, uma abordagem diferenciada da física e conquistar resultados significativamente positivos do desenvolvimento dos estudantes.

Tendo em vista a dificuldade dos estudantes do Ensino Básico de compreender a Física envolvida nos conceitos genéricos, puramente matemáticos e sabendo que a paixão nacional é o futebol. Fazemos a pergunta: como foi transferida o movimento do pé do jogador Roberto Carlos para a bola? Conseguimos estimar a velocidade inicial após o chute do jogador com a velocidade encontrada pelas câmeras televisivas da época?

Utilizando a metodologia bibliográfica, onde através de pesquisas, em diversos sites, textos, artigos e vídeos retirados da própria internet, obtivemos os resultados encontrados neste trabalho, analisando os textos em questão foi trabalhado o movimento exato do chute do jogador Roberto Carlos, onde o mesmo transfere a velocidade de sua perna para a bola. Assim, na sequência do trabalho temos os cálculos necessários para demonstrar a velocidade do jogador, de sua perna e também da bola durante o chute.

O objetivo deste trabalho é abordar os conceitos envolvidos para estudar a colisão, utilizando o esporte como referência. Para isso, no Capítulo 2 abordamos os conceitos fundamentais, como: massa, velocidade, momento linear, colisões elásticas e inelásticas. No Capítulo 3 desenvolvemos a aplicação dos conceitos no movimento relacionado a colisão entre o pé do jogador e a bola. E por fim, no Capítulo 4 realizamos as considerações finais do trabalho.

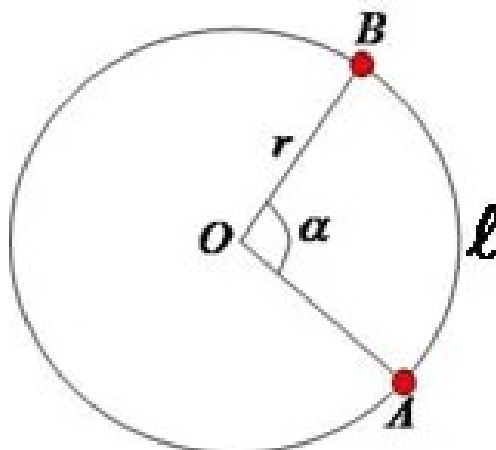
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo iremos abordar os conceitos básicos da mecânica para conseguirmos aplicarmos na colisão pé-bola, iremos abordar os conceitos comprimento de segmento de um círculo, massa, velocidade linear, momento linear, colisões elásticas e inelástica e conservação do momento linear.

2.1 COMPRIMENTO DO SEGMENTO DE UM CÍRCULO

Consideramos uma circunferência de raio r e centralizado em O . Na circunferência marcamos dois pontos, A e B , após uma distância l , varrendo um ângulo α , conforme é mostrado na Fig.1.

Figura 1 - Circunferência de raio r centralizado no ponto O .



Fonte: NOÉ, 2022 (Brasil Escola).

Para encontrarmos o perímetro do círculo podemos utilizar a seguinte expressão:

$$p = 2\pi r,$$

onde o p representa o perímetro do círculo, 2π representa o ângulo total do círculo e r o raio da circunferência. Para encontrarmos um segmento do círculo, podemos trocar o perímetro p pelo segmento de um círculo s , o ângulo 2π pelo ângulo genérico θ , e obtemos:

$$s = \theta r. \quad (1)$$

Aplicando a Eq. 1 na Fig. 1, podemos encontrar o valor do segmento do arco (l) marcado pelos pontos A e B , ou seja,

$$l = \alpha r.$$

2.2 MASSA

A massa é considerada uma das propriedades físicas intrínseca da matéria. Podemos dizer que a quantidade de matéria de um corpo é chamada de massa. Ela

também está relacionada com a forma que os objetos ou corpos possuem uma resistência ao fato de serem acelerados, ou seja, quanto maior for a massa maior é a inércia e vice-versa. A unidade de medida para calcular a massa é o quilograma (kg), dentro do Sistema Internacional de Unidades (SI).

2.3 VELOCIDADE

A definição da palavra veloz pode ser entendida como algo que passa muito depressa. Ainda possui a definição de que algo veloz é quando se desloca a grande velocidade, rápido e ligeiro. Fisicamente definindo velocidade, definimos ela como a razão do deslocamento por um intervalo de tempo, conforme a expressão abaixo:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v_{\text{média}}, \quad (2)$$

$$\frac{x - x_0}{t - t_0} = v_{\text{média}}.$$

Esta é a definição de **velocidade média**, onde devemos considerar: i) devemos compreender que o intervalo de tempo na Mecânica Clássica sempre será positivo; ii) no Sistema Internacional de Unidades a unidade da velocidade média é metros por segundos (m/s); iii) não importa o que acontece no meio do movimento, mas sim o instante inicial (representado pelas grandezas x_0 e t_0) e o instante final (x e t).

Quando nos referenciamos a **velocidade** ou **velocidade instantânea** é preciso levar em conta que o intervalo de tempo a ser considerado é extremamente pequeno. Desta maneira, podemos verificar que num intervalo de tempo muito pequeno a velocidade média tende a velocidade instantânea, ou seja,

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

2.4 MOMENTO LINEAR

Momento linear (p) trata o movimento de um corpo com massa m se deslocando com uma velocidade constante v , ou seja, o momento linear é o produto da massa pela velocidade, matematicamente, temos:

$$p = mv. \quad (3)$$

Ao analisarmos fisicamente a Eq. (3), podemos perceber que ao aumentar a massa de um corpo em movimento, o momento linear (p) também aumenta proporcionalmente.

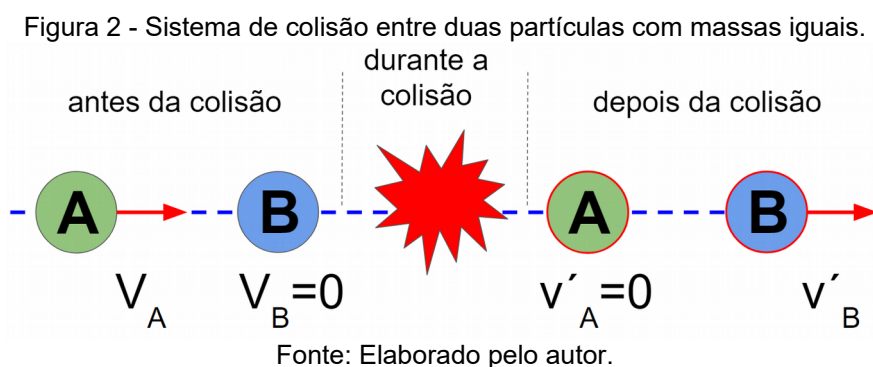
Da mesma forma, se aumentarmos a velocidade do corpo, podemos perceber que o momento linear também aumentará proporcionalmente. Desta maneira, podemos dizer que o momento é uma medida da massa em movimento, quanta massa exista e enquanto exista o movimento. Também dizemos que o momento é linear, momento linear, por estamos nos referindo ao movimento da massa em linha reta, sem sofrer forças externas que faça a sua trajetória ser modificada.

2.5 CONSERVAÇÃO DO MOMENTO LINEAR

Ao analisarmos a palavra conservação, podemos dizer que é algo que não muda após um evento acontecer. Ou seja, quando uma grandeza da equação é conservada, ou seja, é constante ao longo do tempo, esta tem o mesmo valor antes e depois de um evento acontecer. Modelando o texto, temos a seguinte equação:

$$p_{antes} = p_{depois} \quad (4)$$

Na Mecânica Clássica existem três grandezas fundamentais que são conservadas: momento linear, energia e momento angular. Um exemplo de conservação do momento linear é descrever colisões entre duas ou mais partículas. Vamos supor que temos um sistema de partículas, conforme mostrado na Fig. 2, onde possui uma partícula denominada A com uma velocidade inicial V_A e com massa m ; e outra partícula chamada B possuindo massa m e se encontra em repouso. Acontece a colisão entre as duas partículas e após isso, a partícula A que possui massa m coloca-se em repouso; e a partícula B possuindo a massa m e adquirindo uma velocidade v'_B .



Com esse cenário apresentado pela Fig. 2, precisamos compreender mais sobre cada parte do movimento. Para isso, ao analisarmos somente a parte antes da colisão das partículas, temos:

$$p_{antes} = p_A + p_B,$$

substituindo a definição matemática para o momento linear,

$$p_{antes} = m v_A + m v_{B\Box}.$$

Como a partícula B está em repouso, a sua velocidade é zero, logo

$$p_{antes} = m v_{A\Box}. \quad (5)$$

Agora analisando somente a parte depois da colisão das partículas, temos:

$$p_{depois} = p'_A + p'_{B\Box},$$

substituindo a definição matemática para o momento linear,

$$p_{depois} = m v'_A + m v'_{B\Box}.$$

Como a partícula A ficou em repouso após a colisão, temos:

$$p_{depois} = m v'_{B\Box}. \quad (6)$$

Ao utilizarmos a conservação do momento linear, Eq.(4), podemos afirmar que a velocidade da partícula A é igual a velocidade da partícula B, ou seja,

$$v_A = v'_{B\Box}.$$

No entanto, o que aconteceu no exato momento da colisão? Para responder isso, precisamos compreender melhor os tipos de colisões existentes.

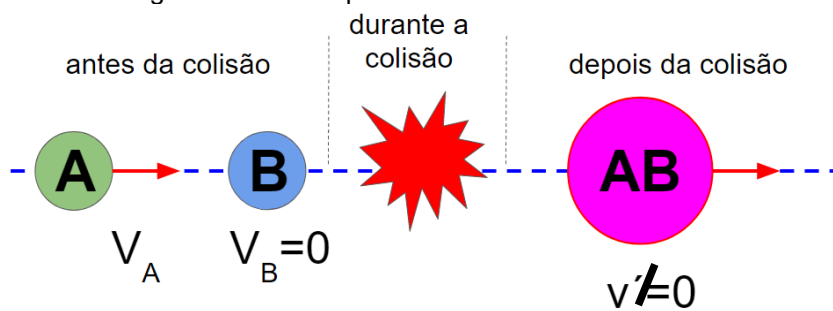
2.5.1 Colisões

A definição de colisões é, segundo HALLIDAY(2007): “um evento isolado no qual dois ou mais corpos (corpos que colidem) exercem uns sobre os outros forças relativamente elevadas por um tempo curto”. Continuando no exemplo mostrado na Fig. 2, existiu um contato entre a partícula A e B para acontecer colisão. No entanto, não é necessário haver contato físico entre duas partículas para ocorrer uma colisão.

Podemos classificar colisões em dois grupos: elásticas ou inelásticas. Dentro das colisões inelásticas, podemos dividir em mais duas situações: inelásticas e perfeitamente inelásticas. Uma colisão elástica é aquela que, ao ocorrer, a massa dos corpos é conservada, não havendo a união das mesmas e nem mesmo a perda destas. Este tipo de colisão, elástica, pode ser percebida pela Fig. 2, onde a massa da partícula A após a colisão é a mesma de antes da colisão, a mesma coisa acontece com a partícula B.

Em uma colisão inelástica ou perfeitamente inelástica a massa das partículas são alteradas após a colisão. A Fig. 3 mostra a colisão perfeitamente inelástica, onde a massa das partículas A e B se somam após a colisão, desta maneira caracterizando uma colisão inelástica.

Figura 3 - Colisão perfeitamente inelástica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo vamos aplicar os conceitos físicos vistos no Cap. 2 no movimento do chute do Roberto Carlos. Classificamos o movimento do chute do Roberto Carlos em três movimentos, veja a Fig. 4: Movimento 1, o jogador se afasta da bola e depois corre em direção a bola para efetuar o chute da bola; Movimento 2, o jogador está prestes a transferir o máximo do seu movimento para a bola e coloca-lá em movimento; e Movimento 3, análise do movimento da bola após o chute do jogador.

Figura 4 - Os três movimentos do lance da cobrança de falta convertida em gol pelo jogador Roberto Carlos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vamos estudar o movimento 2, onde o jogador Roberto Carlos chuta a bola para que ela consiga fazer um movimento curvo até entrar no gol. A Fig. 5 mostra o início do movimento 2, onde ele levanta a perna para conseguir transferir o movimento do seu corpo para a bola e assim atingindo o seu objetivo, que era de realizar o efeito curvado na bola para ela entrar no gol.

Figura 5 - Movimento 2, onde Roberto Carlos começa o movimento final para transferir o seu movimento para a bola.



Fonte: WEEBLY, 2015.

O nosso texto está focado para os alunos do Ensino Médio, onde devemos passar aos conhecimentos de Cinemática e Conservação de Movimento. Logo, não abordaremos os conceitos de Energia, quando abordado com esse conceito o movimento fica mais fácil de ser trabalhado.

Então, neste capítulo abordaremos na Seção 1 todos os dados importantes para realizar os cálculos necessários para a troca de movimento. Na Seção 2, será abordado o cálculo do movimento final do Roberto Carlos para efetuar o chute. Na seção 3 encontraremos a velocidade do pé em relação ao corpo de Roberto Carlos, antes e depois do movimento. Já na Seção 4 abordaremos a transferência de velocidade do jogador para a bola. E por fim e não menos importante, Seção 5, onde compararemos o resultado obtido teoricamente com o resultado obtido experimentalmente.

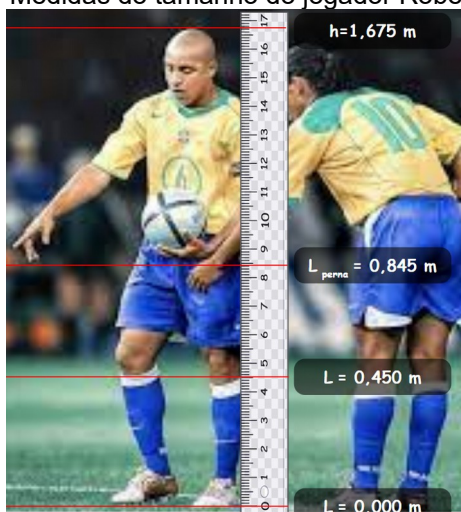
3.1 DADOS PARA REALIZAR A ANÁLISE DO MOVIMENTO

Nesta seção trabalharemos todos os dados necessários para efetuar os cálculos necessários para estimar a velocidade final da bola após o chute do Roberto Carlos. A bola oficial utilizada no jogo possui massa de 420 g ou 0,42 kg.

O jogador Roberto Carlos, o qual fez a cobrança de falta no Torneio da França, possuía uma massa corporal de 73,0 kg. Para estimarmos a massa do pé do jogador, utilizamos uma regra simples, a qual é de utilizar 1,5% da massa corporal da pessoa. Realizando as contas necessárias, verificamos que a massa estimada para o pé do jogador é de 1,095 kg. É extremamente importante salientar que esse valor encontrado possui erros, pois para estimar o mais próximo possível da massa real do pé, deveríamos utilizar outras ferramentas, tais como: ressonância magnética, densidade óssea, densidade do pé e entre outros.

Também estimamos o comprimento da perna do Roberto, como a sua estatura é de 1,68 m, adicionamos uma escala de cm ao seu lado para encontrar as dimensões necessárias da perna e do joelho até o pé. Lembrando que estamos fazendo uma estimativa de comprimento e essas medidas retiradas não substituem as medidas reais do jogador. Na Fig. 6 mostra as medidas retiradas, onde a altura estimada para sua altura é de 1,675 m por não estar totalmente ereto. O tamanho da perna foi considerado do calcanhar até a articulação do quadril, a estimativa é de 0,845 m. E o tamanho da sua canela, do joelho até o calcanhar, é de 0,450 m.

Figura 6 - Medidas do tamanho do jogador Roberto Carlos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Ao visualizar o vídeo que forneceu o movimento do lance da falta cobrado pelo Roberto Carlos, conseguimos estimar o tempo que o jogador leva para dar o chute, o qual é aproximadamente de 0,6 s. Ao terminar o movimento após o chute na bola, o jogador leva 0,75s para parar o movimento do seu pé, e a distância que ele gasta para finalizar o movimento é de 1,5m.

3.2 VELOCIDADE DA BOLA APÓS O CHUTE

Para encontrarmos a velocidade da bola após o chute do jogador, precisamos utilizar o conceito da conservação do momento linear. Em outras palavras, precisamos encontrar o momento linear do pé do jogador e da bola antes da colisão, a colisão é o momento exato em que o pé atinge a bola. Também precisamos encontrar o momento linear após a colisão, após o chute. Neste tipo de caso, precisamos prestar atenção no tipo de colisão que existe entre a bola e o pé do jogador, fisicamente dizendo que esta colisão é perfeitamente elástica. A colisão elástica pode ser observada na Fig. 7, onde o pé atinge a bola, se chama este nome porque a massa do pé e da bola não se unem após a colisão, continuando assim, cada um com a sua massa inicial.

Figura 7 - Momento exato de uma colisão entre o pé e a bola, a qual chamamos de chute.



Fonte: ESPN, 2017.

Desta maneira, utilizando a conservação do momento linear, ou seja, o momento linear inicial (p_0) é igual o momento linear final (p), i.e.,

$$p_0 = p. \quad (6)$$

Onde o momento inicial (p_0) é a união do momento linear do pé do jogador e do momento linear da bola, ou seja,

$$p_0 = p_{\text{pé}} + p_{\text{bola}},$$

ou ainda,

$$p_0 = m_{\text{pé}} v_{\text{jogador}} + m_{\text{bola}} v_{\text{bola}}. \quad (7)$$

A velocidade do jogador (v_{jogador}) deve ser considerada a soma da velocidade do Roberto (v_{Roberto}) e da velocidade do pé ($v_{\text{pé}}$), ou seja,

$$v_{\text{jogador}} = v_{\text{Roberto}} + v_{\text{pé}}. \quad (8)$$

A velocidade do pé é adquirida na última passada do jogador antes de chutar a bola, e ela deve ser medida separadamente do movimento da corrida do jogador.

3.2.1 Encontrando a velocidade do pé

A velocidade do pé pode ser encontrada através da razão da distância percorrida do pé (s) pelo tempo (t), ou seja,

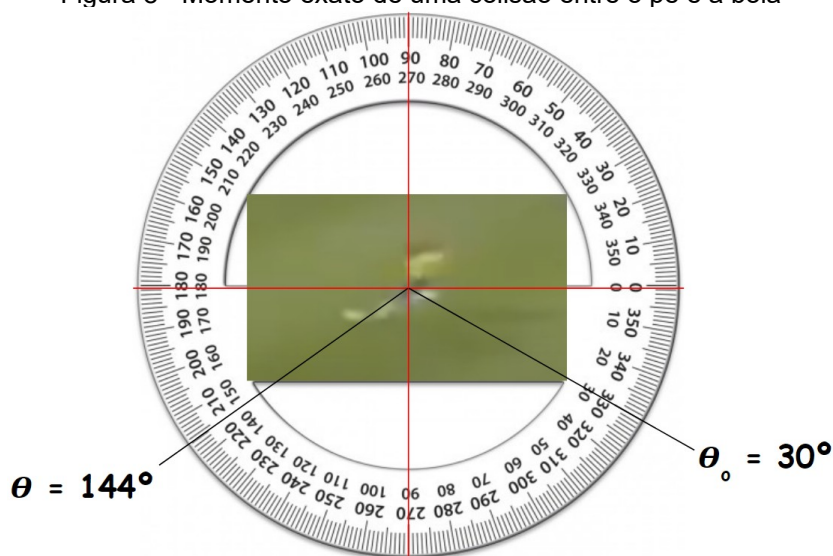
$$v_{\text{pé}} = \frac{s}{t}. \quad (9)$$

O tempo para esse movimento foi medido através do vídeo que analisamos do lance da cobrança de falta, o qual medimos aproximadamente 0,69 s. Para encontrarmos a distância s precisamos utilizar a seguinte expressão,

$$s = 2\theta r, \quad (10)$$

onde θ é o ângulo que o pé faz da sua posição inicial até a colisão da bola, r é o raio da circunferência que movimento descreve, neste caso é o tamanho da perna do jogador ($L_{\text{perna}} = 0,845 \text{ m}$, veja a Fig. 7).

Figura 8 - Momento exato de uma colisão entre o pé e a bola



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ângulo θ pode ser encontrado através da Fig. 8, onde o ângulo inicial θ_0 é exatamente a maior distância do pé antes do chute, o qual foi encontrado na figura o ângulo de 30° . O ângulo final θ é exatamente quando o pé do jogador atinge a bola, este ângulo é de 144° . Logo temos,

$$\theta = 144^\circ - 30^\circ,$$

o ângulo que se deve usar na Eq. (10) é de 114° , ou transferindo para radianos, temos:

$$\theta = 1,99 \text{ rad}.$$

Substituindo os dados na Eq. (10), obtemos

$$s = 2 \cdot 1,99 \cdot 0,845,$$

ou ainda,

$$s = 3,36 \text{ m}.$$

Com os dados encontrados, vamos calcular a velocidade do pé no instante anterior da colisão com a bola, para isso, usaremos a Eq. (9),

$$v_{pé} = \frac{3,36 \text{ m}}{0,6 \text{ s}},$$

logo,

$$v_{pé} = 5,6 \text{ m/s}.$$

Em diálogo com a colega e observando os cálculos desenvolvidos em seu trabalho, percebi que é estimado a velocidade do Roberto Carlos antes do chute da bola, a qual é $v_{Roberto} = 10,95 \text{ m/s}$. Ao realizar as somas das duas velocidades citada anteriormente, obtemos:

$$v_{jogador} = 16,55 \text{ m/s}.$$

Já a velocidade da bola é nula ($v_{bola} = 0 \text{ m/s}$), pois ela está em repouso. Desta maneira, a Eq. (7) fica

$$p_0 = (1,095 \text{ kg})(16,55 \text{ m/s}) + (0,420 \text{ kg})(0 \text{ m/s}),$$

ou ainda,

$$p_0 = 18,12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$$

Por outro lado, precisamos encontrar o momento linear após a colisão elástica, ou seja, a soma do momento linear da bola com o momento linear do pé do jogador, i.e.,

$$p = m_{pé} V_{pé} + m_{bola} V_{bola}. \quad (11)$$

A velocidade final da bola (v_{bola}) será encontrada ao resolver a equação da conservação do momento linear. A velocidade final do pé ($v_{pé}$) precisamos encontrar através da análise do vídeo que apresenta a cobrança de falta.

3.2.2 Encontrando a velocidade final do pé

O modo de calcular a velocidade se repete novamente, ou seja, devemos considerar a distância que o pé percorreu após o contato com a bola até parar totalmente o pé,

$$V_{pé} = \frac{d}{t}. \quad (12)$$

Os dados para resolver essa expressão foram retirados do vídeo de análise e eles foram estimados, ou seja, não são precisos. A distância percorrida pelo pé até parar totalmente em relação ao jogador é de 1,5 m e o tempo para realizar este movimento é de 0,75 s, substituindo esses valores na Eq. (12) obtemos:

$$V_{pé} = 2,0 \text{ m/s}.$$

Desta maneira, a Eq. (11) se torna

$$p = (1,095 \text{ kg})(2,0 \text{ m/s}) + (0,420 \text{ kg}) V_{bola},$$

ou ainda,

$$p = 2,19 \text{ kg} \cdot \text{m/s} + (0,420 \text{ kg}) V_{bola},$$

Aplicando o momento linear inicial e final na Eq. (6), temos:

$$18,12 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 2,19 \text{ kg} \cdot \text{m/s} + (0,420 \text{ kg}) V_{bola},$$

realizando os cálculos necessários, obtemos

$$V_{bola} = \frac{15,93 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{0,420 \text{ kg}}.$$

Então, a velocidade da bola logo após a cobrança de falta é de

$$V_{bola} = 37,93 \text{ m/s},$$

ou seja,

$$V_{bola} = 136,55 \text{ km/h}.$$

A velocidade final da bola encontrada de maneira teórica deve ser considerada que possui erros de medidas do lance da cobrança de falta, mesmo assim, obtivemos um excelente resultado. Na Seção 3.3 vamos comparar o resultado teórico com o resultado empírico.

3.3 COMPARANDO AS VELOCIDADES DA BOLA ENCONTRADA EMPIRICAMENTE E TEORICAMENTE

A matematização da teoria é feita das observações experimentais, logo devemos esperar algumas diferenças. As quais estão relacionadas com as medidas realizadas para retirada dos dados para realizar os cálculos e também a teoria não considerar todas as variáveis existentes no movimento. Mas mesmo assim, encontramos a velocidade de 136,55 km/h teoricamente e o site de notícias mediu a velocidade da bola de 130 km/h. Desta maneira, nós nos encontramos muito satisfeitos com o resultado. No entanto, ainda devemos levar em conta algumas considerações deste resultado, os quais verificaremos nesta seção.

Levando em conta que para estimar o dado teórico precisamos realizar medidas, logo devemos considerar o desvio relativo do cálculo. Definimos que o desvio relativo é a diferença entre o valor obtido (experimental, o qual o site de notícias estimou) ao se medir a velocidade da bola e o valor adotado (teoricamente, o qual nós calculamos anteriormente) que mais se aproxima do valor real, i.e.,

$$D\% = \left| \frac{136,55 - 130}{130} \right| \times 100\%,$$

ou ainda,

$$D\% = 5,04\%.$$

O desvio relativo de 5,04%, o qual obtivemos considerando várias fontes de erros, as quais citaremos adiante, podemos dizer que encontramos um excelente resultado.

Obtemos erros sistemáticos nas medidas da medida do tempo que obtivemos através dos vídeos analisados, na medida do ângulo que o pé percorreu até chutar a bola e na medida do comprimento da perna do jogador. Este tipo de erro sistemático é da natureza dos equipamentos que utilizamos, logo eles sempre afetarão os resultados no mesmo sentido, ou seja, sempre para mais ou para menos. Outro tipo de erros que obtivemos foi o erro acidental, o qual erro foi relacionado a variação da capacidade de avaliação do tempo obtidos pelos vídeos e também na mesma medida realizada dos tempos medidos se teve erros acidentais como o meu reflexo para conseguir pegar o momento exato do início do chute e o final do chute. Mesmo realizando várias medidas para diminuir o erro da medida, não é possível eliminar completamente os erros acidentais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada uma análise da troca de movimento do pé do jogador Roberto Carlos para a bola, a qual entrou em um movimento curvo após o chute. Dentro deste objetivo de mostrar que foi possível estimar a velocidade da bola através apenas do movimento, sem considerar a conservação e transformação de energia, conseguimos aprender alguns conceitos fundamentais, como: comprimento de um segmento circular, massa, velocidade, velocidade, momento linear, conservação do momento linear e colisões.

Ao estimar a velocidade inicial da bola após a colisão, tivemos algumas dificuldades básicas para tirar as medidas precisas das imagens para que pudéssemos utilizá-las nos cálculos realizados, mesmo assim, conseguimos prever um desvio padrão aproximado de 5% ao comparado ao que foi encontrado pelas tecnologias da época do torneio.

A continuação deste trabalho daria pela explicação do movimento curvo que a bola faz após a cobrança de falta, compreender os conceitos para a curvatura da bola seria ideal para o ensino aos estudantes do Ensino Médio.

REFERÊNCIAS

ACREDITE ou não - Explicado! O gol de Roberto Carlos que desafiou a Física. Youtube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=kKwCF07IjiM> . Acesso em: 27 dez. 2021. (Duração do vídeo: 04min25s)

ESPN. 2017. Disponível em: http://www.espn.com.br/noticia/700107_ate-hoje-nao-sei-como-fiz-aquele-gol-ha-20-anos-roberto-carlos-acertava-o-chute-que-desafiou-a-fisica . Acesso em: 08 fev. 2022.

FISICANIMADA. **Colisões no Futebol**. 2014. Disponível em: <http://fisicanimadaunesp.blogspot.com/2014/08/colisoes-no-futebol.html> . Acesso em: 19 jan. 2022.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Mecânica**. Rio de Janeiro: LTC, 2007. v. 1

HELERBROCK, Rafael. "O que é velocidade média?". *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-velocidade-media.htm> . Acesso em 01: dez. 2021.

NOÉ, Marcos. "**Comprimento de um Arco**". *Brasil Escola*. Disponível em: https://brasilecola.uol.com.br/matematica/comprimento-um-arco.htm#:~:text=Essa%20express%C3%A3o%20pode%20ser%20utilizada,%3A%20%E2%84%93%20%3D%20%CE%B1%20*%20r Acesso em: 28 fev. 2022.

TEIXEIRA, Mariane Mendes. **Colisões elásticas e inelásticas**. Mundo Educação. Disponível em: [Colisões elásticas e inelásticas - Mundo Educação \(uol.com.br\)](https://mundoeducacao.uol.com.br/colisoes-elasticas-e-inelasticas/) . Acesso em: 28 jan. 2022.

TIPLER, Paul Allen; MOSCA, Gene. "**Física para Cientistas e Engenheiros: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**". Rio de Janeiro: LTC, 2017, v. 1

WEEBLY. Disponível em: [Como chutar mais forte? - DNA Football \(weebly.com\)](https://www.weebly.com/dna-football/) . Acesso em: 08 fev. 2022.