UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA

Trabalho de Conclusão de Curso

DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA ANÁLISE DA ALTURA DO ARCO LONGITUDINAL MEDIAL HUMANO A PARTIR DE VÍDEOS EM MOVIMENTO

Maria Victória Alves de Miranda

Natal/RN
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA

DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA ANÁLISE DA ALTURA DO ARCO LONGITUDINAL MEDIAL HUMANO A PARTIR DE VÍDEOS EM MOVIMENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Biomédica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte para obtenção do título de Graduado em Engenharia Biomédica.

Graduando: Maria Victória Alves de Miranda
Orientador: Prof.ª Dra. Heliana B. Soares

Natal/RN
2023

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Miranda, Maria Victoria Alves de.
Desenvolvimento de um algoritmo para análise da altura do arco longitudinal medial humano a partir de vídeos em movimento / Maria Victoria Alves de Miranda. - 2023.
58f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Biomédica, Natal, RN, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Heliana Bezerra Soares.

1. Arco longitudinal medial - Monografia. 2. Software executável - Monografia. 3. Análise - Monografia. 4. Altura - Monografia. 5. Palmilhas personalizadas - Monografia. I. Soares, Heliana Bezerra. II. Título.

RN/UF/BCZM CDU 004.41

Elaborado por Ana Cristina Cavalcanti Tinoco - CRB-15/262

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA ANÁLISE DA ALTURA DO ARCO LONGITUDINAL MEDIAL HUMANO A PARTIR DE VÍDEOS EM MOVIMENTO

Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso:

Profa. Dra.Heliana Bezerra Soares _____

UFRN - Orientadora

Profa. Dra. Liu Chiao Yi _____

Avaliadora Externa

Prof. Dr. Anthony Andrey Ramalho Diniz _____

Avaliador Externo

Natal/RN
2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e amigos que estão sempre comigo independente da distância, me apoiaram em todas as minhas decisões, e estiveram ao meu lado em toda minha trajetória na engenharia biomédica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais que me apoiaram desde o início a correr atrás dos meus sonhos independentes da graduação ser em outro estado. A minha mãe Bruna que me ligava todos os dias para saber como eu estava, se precisava de alguma coisa e mesmo distante se fez presente todos os dias dessa jornada com suas palavras. Ao meu pai José Roberto que apesar de não ser bom com palavras, os gestos dele falam por si só, obrigada por todas as vezes que fui visitar você em Recife todos os dias tinha sonho de chocolate da padaria Rosarinho na mesa.

Ao meu namorado Brenner que me incentivou a encarar todas as entrevistas e desafios que achei que não conseguiria superar ao longo do curso. A todos os amigos que fiz na Escola de Ciências e Tecnologia (ECT), em especial a Allesson, Frankson, Luis, Reilta e Wagner, agradeço por todas as tardes que íamos para a biblioteca estudar e fazer todas as listas possíveis.

Agradeço a todos os professores que me ensinaram ao longo de todos esses anos, Josinaldo Menezes e Fabiana Tristão foram meus primeiros professores na faculdade e que eu guardo até hoje na memória das aulas. Ao professor George Nascimento, que apesar de não ter tido oportunidade de ter aula com ele, proporcionou o primeiro contato que pude ter com iniciação científica junto com a professora Luciana Mendes quando me deixaram ajudar com o projeto. A professora Heliana Soares por ter me orientado ao longo deste trabalho.

Agradeço a CORE por ter me proporcionado a vivência de mercado de trabalho ao lado de uma equipe incrível. Obrigada também às pessoas que eu conheci durante o estágio na secretaria da saúde, principalmente a Camila, Hellen, Marcos e Juciara foram grandes inspirações para mim.

Agradeço a Zapisp que sempre me faz querer alcançar o próximo nível, em especial ao time que faço parte, a equipe de desenvolvimento, obrigada a Paulo e Aleck por acreditarem no meu potencial e serem líderes que motivam a equipe todos os dias a crescer, agradeço também a Diogo que mesmo conhecendo a pouco tempo me dá muito apoio no trabalho e fora.

A minhas amigas, Bruna, Carol, Mariana, Luana, Rebeca e Sofia que mesmo estando longe me apoiaram e me aconselharam durante todos esses anos. Agradeço a todos que passaram por mim durante todos esses anos e compartilharam comigo suas experiências e vivências que me ajudaram a chegar até aqui.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS X
LISTAS DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS XII
RESUMO XIII
ABSTRACT XIV
1. INTRODUÇÃO 1
1.1. OBJETIVO GERAL 2
1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3
1.2. ESTADO DA ARTE 4
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO 5
2. REVISÃO ANATÔMICA 6
2.1. PÉS 6
2.1.1. PÉ CAVO 7
2.1.2. PÉ PLANO 8
2.2. ARCO PLANTAR 8
2.2.1. ARCO LONGITUDINAL MEDIAL 9
2.3. MARCHA 10
2.4. ANÁLISES CLÍNICAS DO ARCO LONGITUDINAL MEDIAL DURANTE A MARCHA 12
3. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO E BIBLIOTECAS 13
3.1. NUMPY 13
3.2. OPENCV 14
4. MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E VISÃO COMPUTACIONAL 16
4.1. SEGMENTAÇÃO 18
4.1.1. SEGMENTAÇÃO POR DETECÇÃO DE BORDA 18
4.1.2. SEGMENTAÇÃO POR CRESCIMENTO DE REGIÃO 19
4.2. *K-NEAREST NEIGHBORS* 20
4.3. CMG 21
4.4. *MIXTURE OF GAUSSIANS* 22
5. METODOLOGIA EXPLORATÓRIA 23
5.1. ESTUDO DA LITERATURA 24

5.2. ENTREVISTA COM O ESPECIALISTA 24
5.3. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE REQUISITOS 25
5.3.1. FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO 28
5.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE 29
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES 33
6.1. INTERFACE DO SISTEMA 33
6.2. RESULTADO DA VALIDAÇÃO DO SISTEMA 36
7. CONCLUSÕES 40
7.1. TRABALHOS FUTUROS 41
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Regiões dos pés……6
Figura 2: Pé normal vista lateral e baropodometria……..……7
Figura 3: Pé cavo vista lateral e baropodometria.……..……..7
Figura 4: Pé plano vista lateral e baropodometria……...….8
Figura 5: Vista lateral do pé direito……..9
Figura 6: Arcos longitudinais do pé..……...……10
Figura 7: Ciclo da marcha humana…...……11
Figura 8: Veículo em uma imagem escura. Após a equalização de histograma em nível de cinza, a placa do veículo está legível. As informações da placa e do veículo estão destacadas no retângulo…….....……...17
Figura 9: Exemplo de segmentação de imagem utilizando o operador de Canny.19
Figura 10: Exemplo de segmentação pelo método de crescimento da região.…..20
Figura 11: Conectividade de vizinhança de imagem (à esquerda) e um exemplo de vizinhança 3 x 3 centrada em uma localização específica de *pixel* da imagem....20
Figura 12: Diagrama de blocos do sistema de segmentação probabilística de primeiro plano para um único pixel...…….22
Figura 13: O ciclo do projeto com base no conceito MVP……..……..….23
Figura 14: Ambiente de gravação da marcha durante os exames..……..…25
Figura 15: Pontos referenciais para análise do arco plantar longitudinal...…….25
Figura 16: Diagrama de caso de uso..……..26
Figura 17: Exemplo de como será calculado a altura dos pontos de referência...26
Figura 18: Frame da fase de apoio-pré-balanço..……..……29
Figura 19: Resultado da aplicação do método GMG no *frame*..……...30
Figura 20: Resultado da aplicação do método MOG e MOG2 no *frame*..……..30
Figura 21: Resultado da aplicação do método KNN no frame.……....31
Figura 22: Resultado da aplicação de *blobs* no frame……...32
Figura 23: Resultado da aplicação com a mensuração realizada no *frame* ……32
Figura 24: *Interface* do sistema - Tela inicial.……...34
Figura 25: *Interface* do sistema - Menu..……..35
Figura 26: *Interface* do sistema - explorar arquivos…...……35

Figura 27: *Interface* do sistema - Momento inicial do vídeo……36
Figura 28: Executável do *software* no sistema operacional *windows* 10……..37
Figura 29: *Interface* do sistema - vídeo em pausa……..…..37
Figura 30: *Interface* do sistema - vídeo em pausa……..38
Figura 31: *Interface* do sistema - vídeo em execução……..……38
Figura 32: Nome do arquivo .txt gerado na sessão…….39
Figura 33: Dados gerados na sessão……....39

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ALM - Arco Longitudinal Medial

AM - Análise de Marcha

CMG - *Godbehere, Matsukawa e Goldberg*

EQL - Estimativa Quadrática Linear

FPS - *Frames* por Segundo

KNN - *K-nearest neighbors*

MOG - *Mixture of Gaussians*

MOG2 - *Mixture of Gaussians* 2

MVP - Produto Mínimo Viável

OpenCV - *Open Source Computer Vision*

Miranda, Maria Victória. **Desenvolvimento De Um Algoritmo Para Análise Da Altura Do Arco Longitudinal Medial Humano A Partir De Vídeos Em Movimento.** Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Biomédica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 59p., 2023.

RESUMO

A região do arco do pé desempenha um papel importante na sustentação adequada, amortecimento do peso corporal e suporte dos pés. Entretanto, existem diferentes tipos de pé, como o pé cavo e o pé chato, que podem apresentar variações em seus arcos, afetando a postura e a marcha do indivíduo. Para garantir uma adequada distribuição do peso corporal e minimizar os riscos de lesões e desconfortos, se torna importante analisar cuidadosamente os arcos do pé antes de confeccionar palmilhas personalizadas. As palmilhas, quando confeccionadas adequadamente, são capazes de fornecer um suporte extra aos pés, proporcionando mais estabilidade e amortecimento, além de corrigir desvios posturais e aliviar dores. O processamento digital de imagens se torna uma forma de analisar os arcos dos pés através da utilização de técnicas como a segmentação para isolar áreas específicas de acordo com as características determinadas. Diante deste contexto, o intuito deste trabalho de conclusão de curso foi desenvolver a primeira versão de um *software* executável em qualquer sistema operacional, que tem por objetivo auxiliar de forma simples e objetiva o cálculo de parâmetros pré definidos, a partir de entrevista com um fisioterapeuta, para calcular alturas importantes do arco plantar medial longitudinal quando avaliados em vídeos de caminhada gravados para estudos da marcha do paciente para auxiliar a confecção de palmilhas, além de fornecer um relatório com os dados obtidos.

Palavras-chave: Arco Longitudinal Medial; *Software* Executável; Análise; Altura; Palmilhas Personalizadas.

Miranda, Maria Victória. **Development of an Algorithm for Analysis of Human Medial Longitudinal Arch Height from Moving Videos.** Conclusion Work Project, Biomedical Engineering Bachelor Degree, Federal University of Rio Grande do Norte, 59p., 2023.

ABSTRACT

The region of the arch of the foot plays a crucial role in proper support, cushioning of body weight, and foot support. However, it is important to note that there are different types of feet, such as high arches and flat feet, which can have variations in their arches, affecting an individual's posture and gait. To ensure proper distribution of body weight and minimize the risks of injuries and discomfort, it is important to carefully analyze the arches of the feet before crafting custom insoles. When properly crafted, insoles are capable of providing additional support to the feet, offering enhanced stability and cushioning, as well as correcting postural misalignments and relieving pain. The digital image processing becomes a way to analyze the arches of the feet through the use of techniques such as segmentation to isolate specific areas according to the determined characteristics. Given this context, the purpose of this final course project was to develop the first version of an executable software that can run on any operating system. The software's main objective is to assist in a simple and straightforward manner by calculating predefined parameters based on an interview with a physiotherapist. These parameters are used to determine important heights of the medial longitudinal arch when assessing walking videos recorded for gait analysis studies. The software aims to aid in the creation of custom insoles and provides a report with the obtained data.

Keywords: Medial Longitudinal Arch; Executable Software; Analysis; Height; Custom Insoles.

1. INTRODUÇÃO

Segundo uma pesquisa realizada entre fevereiro e março de 2012 pela empresa “A Pés Sem Dor”, especializada na confecção de palmilhas ortopédicas e sapatos sob medida, o questionário realizado pela internet foi iniciado por 26.339 pessoas, e 21.423 delas responderam a todas as perguntas do extenso questionário, que variava de 51 a 156 perguntas. Os participantes da amostra abrangiam indivíduos com idades entre 15 e 90 anos, provenientes de todas as regiões do Brasil, sendo 44,6% homens e 55,4% mulheres. Dentre os entrevistados, 47,3% estão envolvidos em atividades físicas ou praticam esportes. 14% apresentam pés planos, enquanto 16,9% possuem pés cavos (Case, 2012).

Atualmente existem três tipos de pé: normal, plano ou chato e cavo. Segundo Viladot (1987), descreve a patologia do ante pé, o pé cavo se caracteriza pelo aumento pronunciado do arco longitudinal medial, resultando, em casos extremos, na perda total de contato da parte média da planta do pé com o solo. Enquanto, o pé plano ou chato está marcado pela acentuada diminuição ou desaparecimento completo do arco longitudinal medial, provocando uma rotação da parte anterior para fora. A ausência desse arco compromete as propriedades de absorção de impacto do pé, resultando em considerável desconforto (Viladot, 1987).

A avaliação clínica da marcha pode ser descrita como a mensuração, processamento e interpretação sistemática de parâmetros biomecânicos que delineiam a locomoção humana, facilitando a identificação de restrições no movimento e orientando a implementação de procedimentos apropriados de reabilitação (Sousa *apud* Baker, 2006). Atualmente, a avaliação clínica da marcha representa um passo crucial no tratamento médico de diversas doenças e disfunções. O arco longitudinal medial (ALM) exerce funções essenciais na biomecânica do pé, incluindo suporte e absorção de impacto durante a marcha. Em situações em que um indivíduo apresenta pés cavos (ALM acentuado) ou planos (ALM diminuídos), essas funções podem ser comprometidas (Morioka *et al.*,2005).

Dentre as técnicas de análise de marcha (AM), Passos e colaboradores (2016), destacam duas formas: a análise visual, que pode ser realizada

diretamente ou por vídeo, mas que possui várias limitações e o exame físico em equipamentos sensoriais, tais como marcadores associados a sistemas de vídeo, eletromiografia, plataformas de força e pressão (Maia,2020 *apud* Passo, 2016).

A avaliação do arco longitudinal medial do pé, embora essencial, pode apresentar desafios aos fisioterapeutas. A realização manual das medidas pode ser influenciada por diversos fatores, como a subjetividade do profissional, a dificuldade de identificação de pontos anatômicos precisos e a falta de padronização na interpretação dos resultados. Além disso, o processo manual consome tempo valioso que poderia ser dedicado a outras áreas da avaliação e ao desenvolvimento de planos de tratamento personalizados (Neves *et. al*, 2020).

Pensando em uma forma de objetivar e agilizar a análise da marcha por vídeo que geralmente fisioterapeutas usam para análise, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um *software* especializado em calcular o arco longitudinal medial do pé humano como uma solução viável. Apesar do desafio com a precisão das medições como resultado, este trabalho tem como objetivo melhorar a qualidade dos diagnósticos, aumentar a eficiência da análise clínica e aprimorar os resultados do tratamento, beneficiando tanto os fisioterapeutas quanto os pacientes.

1.1. OBJETIVOS GERAL

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um produto mínimo viável (MVP) do *software* para cálculo da altura do arco longitudinal medial do pé.

1.1.1. Objetivos específicos

- compreender os tipos de arcos de pés humanos;
- entender a importância da análise do arco longitudinal medial;
- estudar a linguagem de programação a ser aplicada no trabalho;
- consultar um profissional da área e entender suas necessidades;
- desenvolver o *software* com base nos requisitos;
- validar o sistema com base nos resultados obtidos.

1.2. ESTADO DA ARTE

Os *softwares* para análise do movimento da marcha são ferramentas utilizadas por profissionais de saúde, como fisioterapeutas e especialistas em biomecânica, para avaliar e quantificar o padrão de movimento humano durante a marcha. Esses *softwares* permitem uma análise mais detalhada e objetiva da marcha, ajudando no diagnóstico, tratamento e monitoramento de distúrbios musculoesqueléticos e neurológicos.

De acordo com o dicionário Houaiss *online*, vídeo está definido como uma técnica de reprodução eletrônica de imagens em movimento, ou seja, um vídeo consiste em uma sucessão de quadros (ou *frames*), que são imagens capturadas e reproduzidas a uma frequência específica. Em média, os vídeos atuais têm de 24 a 60 *frames* por segundo e a medida que informa a quantidade de *frames* por segundo (FPS) (Wilkinson, Kleijn, 2009). *Frame* significa a combinação de imagens e do tempo que ficam expostas, podendo variar dada a quantidade de FPS. Esta combinação gera um vídeo.

Ao processar vídeos com Python são realizadas operações *frame* a *frame*, analisando as imagens contidas dentro do vídeo. Por conta disso, as operações com imagens são as que também são realizadas em vídeos, sendo a diferença a propagação das técnicas para as imagens contidas durante o vídeo (Lima, 2022).

Na obtenção da imagem de referência, a abordagem mais básica envolve o cálculo médio da imagem de fundo. Isso requer uma sequência de imagens da cena sem as estruturas a serem segmentadas, o que pode não ser viável em todas as situações (CHENG, 2006). Uma alternativa seria calcular individualmente cada *pixel* da imagem de referência, considerando como uma combinação de distribuições Gaussianas. Nessa abordagem, o peso de cada distribuição reflete o período em que cada cor permanece na imagem (KaewTraKulPong, 2001).

Um método amplamente empregado para a segmentação de estruturas em sequências de imagens consiste na subtração dos fundos pertinentes (associados às cenas em questão). Inicialmente, esse método calcula uma imagem de referência, que é então subtraída de cada imagem subsequente na sequência (quadro), seguida pela binarização dos resultados obtidos (Piccardi, 2004). Essa abordagem demonstra eficácia em ambientes controlados, mas altamente

sensível a variações de luminosidade e à presença de sombras. No entanto, diversas técnicas têm sido desenvolvidas para superar tais desafios.

A subtração de fundo, uma técnica comum e amplamente utilizada para gerar uma máscara de primeiro plano (ou seja, uma imagem binária contendo os *pixels* pertencentes a objetos em movimento na cena) usando câmeras estáticas (Vasconcellos, 2019). Como o nome sugere, neste processo está sendo calculada a máscara de primeiro plano realizando uma subtração entre o quadro atual e um modelo de fundo, contendo a parte estática da cena ou, mais em geral, tudo o que pode ser considerado como fundo dadas as características da cena observada.

A conversão de imagem colorida para tons de cinza, um dos requisitos para muitas aplicações em processamento de imagem, como detecção de borda, impressão em preto e branco, e processamento de imagem em único canal (Kim *et al*., 2009).

A técnica de extração de dados a partir de vídeos comumente utilizada em *softwares* utilizados para análise de movimento, como o caso do Kinovea (Sousa, 2023), uma opção acessível e amplamente utilizada por profissionais da saúde, pesquisadores e atletas, do *Dartfish* que realizar análises *frame* a *frame*, com a possibilidade de marcar pontos anatômicos e medir ângulos e distâncias. Ainda existem outros como o *SportsCode*, para análise de desempenho esportivo e o *Simi Motion* que permite a integração com outros sistemas de medição, como plataformas de força.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para desenvolver o método proposto neste trabalho, foram realizados estudos sobre a anatomia do pé e suas características, além disso, foram feitas pesquisas sobre as técnicas de processamento de imagens disponíveis para serem aplicadas com o objetivo de construir um MVP de um *software* capaz de calcular a altura do arco medial do pé em tempo real do processamento do vídeo. Assim, este trabalho foi dividido em seis seções que serão explicadas a seguir.

Na seção 2 deste trabalho, serão apresentados uma revisão anatômica do pé e seus tipos, o arco plantar, com o foco no arco longitudinal medial, sendo este o ponto mais importante desta seção, explicando suas características e como

realizar as análises. A seção 3 explicará as linguagens de programação e suas bibliotecas utilizadas e na seção 4 serão discutidas as técnicas e métodos comumente utilizados no processamento digital de imagens. Na seção 5 está exposto a metodologia utilizada para a construção deste trabalho, e como foi o desenvolvimento do *software* envolvendo o estudo da literatura, entrevista com especialista, levantamento e análise de requisitos e as ferramentas utilizadas. Na seção 6 serão apresentados os resultados obtidos pelo método proposto, realizando uma análise do desempenho do algoritmo e comparando com os resultados obtidos. Por fim, na seção 7 está presente a conclusão do trabalho e as perspectivas de trabalhos futuros.

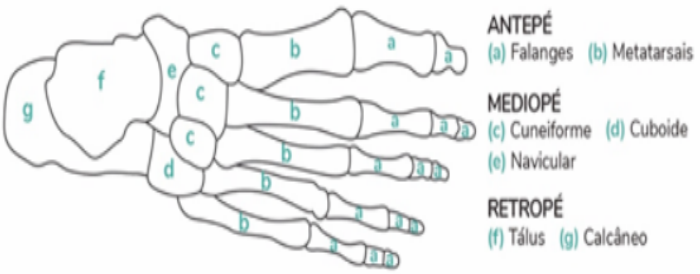
2. REVISÃO ANATÔMICA

Anatomia o estudo da estrutura do corpo humano, também chamada de morfologia, a ciência da forma. Ciência antiga, campo de séria investigação intelectual há pelo menos 2.300 anos. Foi a disciplina biológica de maior prestígio no século XIX (Marieb; Wilhelm; Mallatt, 2014).

2.1 PÉS

Na anatomia, o pé humano como está apresentado na Figura 1, pode ser dividido em três partes principais: o retropé, o mediopé e o antepé. O retropé consiste no astrágalo (ou tálus) e no calcâneo, que se articulam com a perna. O mediopé composto pelo navicular, escafóide e cunhas, enquanto o antepé, formado pelos metatarsos e artelhos. A articulação mediotársica, também conhecida como articulação de Chopard, separa o retropé do mediopé, enquanto a articulação tarsometatársica, ou de Lisfranc, conecta o mediopé ao antepé (Volpon, 1996).

Figura 1: Regiões dos pés



Fonte: MARIEB; MALLATT (2014, p. 212).

Segundo Volpon (1996), embora as articulações sejam, na verdade, compostas por várias outras articulações, elas funcionam como uma unidade integrada.

O pé humano, sendo do segmento do sistema muscular esquelético, tem uma estrutura muito complexa, composta por numerosos ossos, músculos, ligamentos e articulações sinoviais (Volpon,1996),

Como o único componente em contato com o solo, o complexo do pé desempenha uma variedade de funções biomecânicas durante a locomoção

humana, como suporte e propulsão do corpo, manutenção da estabilidade e absorção de impacto. Isso requer que o pé humano seja rígido e amortecido para transmitir as forças de reação do solo para o corpo superior e manter a estabilidade do corpo, além de ser flexível e resiliente para absorver impactos moderadamente arriscados e economizar energia (Ren *et al*., 2008).

O pé possui um arco plantar medial que faz com que haja uma elevação na face interna da planta do pé, podendo ser caracterizado quando este arco está diminuído como pé plano e quando aumentado como pé cavo. Os pés denominados com normais como mostra a Figura 2, tem a seguinte distribuição de carga e vista lateral do arco medial.

Figura 2: Pé normal vista lateral e baropodometria

Fonte: (Palhares; Gabrielle, 2023)

2.1.1 PÉ CAVO

Pé cavo, Figura 3, termo utilizado para descrever um amplo espectro de formatos do pé caracterizados por um arco longitudinal médio alto e a etiologia pode ser amplamente categorizada como idiopática, ou seja, de causa desconhecida, ou como neurogênica, ou seja, pode ser atribuída a uma condição neurológica (Burns *et al.*, 2005)

Figura 3: - Pé cavo vista lateral e baropodometria

Fonte: (Palhares; Gabrielle, 2023)

2.1.2 PÉ PLANO

O pé plano ou raso, Figura 4, está caracterizado pelo arco longitudinal bastante baixo. Com uma prono-eversão do pé na qual o peso do corpo deprime os arcos longitudinal medial e transverso (Cassonato, 2005)

Figura 4: Pé plano vista lateral e baropodometria

Fonte: Palhares; Gabrielle (2023)

2.2 ARCO PLANTAR

O arco plantar, uma das principais características anatômicas dos pés humanos, contém por uma estrutura óssea, ligamentar e muscular que permite uma distribuição equilibrada do peso corporal durante a locomoção, formado por três arcos formados pelos ossos tarsais e metatarsais (Figura 5). Estes arcos compõem um sistema funcional dos pés para a transmissão do peso corporal, amortecimento do choque do pé com o solo e suavização da marcha (Hamill; Knutzen; Derrick, 2015).

Atualmente existem três tipos de arcos plantares no pé humano: o arco longitudinal medial, o arco longitudinal lateral e o arco transverso. O arco longitudinal medial, o mais pronunciado e importante dos três, se estende do calcanhar até a região dos dedos grandes do pé, mantido por uma série de ligamentos e tendões que se estendem desde o calcâneo até os dedos dos pés. O arco longitudinal lateral, o menor e se prolonga do calcanhar até a base do dedinho do pé. Enquanto o arco transverso se dá pelos ossos do tarso e metatarso, responsável pela sustentação da parte anterior do pé (Marieb; Wilhelm; Mallatt, 2014).

Figura 5: Vista lateral do pé direito

Fonte: Marieb; Mallatt (2014).

Segundo Hamill, Knutzen e Derrick (2016) os pés humanos podem ser classificados de acordo com a altura do arco medial em pés que são normais, de arco alto ou cavos, e pés chatos ou planos. Eles podem ser ainda classificados como rígidos ou flexíveis (Hamill *et al*, 2016).

O retropé do pé rígido de arco alto não faz nenhum contato com o chão e geralmente tem pouca ou nenhuma inversão ou eversão em posição de apoio, um tipo de pé que possui absorção de impacto ruim. O pé plano, por outro lado, geralmente hipermóvel, com a maior parte da superfície plantar fazendo contato em posição de apoio, um tipo de pé geralmente associado à pronação excessiva durante a fase de suporte da marcha (Hamill; Knutzen; Derrick, 2015).

2.2.1 ARCO LONGITUDINAL MEDIAL

Uma estrutura composta de múltiplos componentes só pode suportar peso se for arqueada (Marieb; Mallatt, 2014). O Arco Plantar Longitudinal Medial geralmente se desenvolve na infância, na primeira década de vida, antes dos seis anos de idade. Porém muitos fatores são considerados essenciais na influência da formação do arco plantar, dentre como a idade, gênero, raça, calçados (Stewart, 1970; Staheli; Chew e Corbett, 1987; Lin *Et Al.*, 2001; Razeghi e Batt, 2002).

O arco longitudinal medial (ALM) realiza funções essenciais na biomecânica do pé, como ação de suporte e absorção de impactos durante a marcha (Marioka *et al.*, 2005). Mesmo que o arco medial seja muito ajustável, geralmente ele não faz contato com o chão, a menos que uma pessoa tenha pés planos. O arco medial, sustentado pelo osso navicular em forma de quilha, pelo ligamento

calcaneonavicular, pelo ligamento plantar longo e pela fáscia plantar (Hamill; Knutzen; Derrick, 2015).

De acordo com Viladot (1986), o autor separa os tipos de arcos longitudinais, de acordo com a região lateral para a medial como mostra a Figura 6:

V. Ângulo formado por calcâneo-tálus-navicular-1° cuneiforme e metatarso I, formando um ângulo de 20° em relação com a horizontal;

II. Ângulo formado pela junção do calcâneo-tálus-navicular-2° cuneiforme e metatarso II. Neste caso o ângulo de 15° com a horizontal;

III. Ângulo formado por calcâneo-navicular-3°cuneiforme e metatarso III, formando o ângulo de 10° com a horizontal.

IV. Ângulo formado pelo calcâneo-cubóide e metatarso IV, formando um ângulo aproximado de 8° com a horizontal.

V. Ângulo formado por calcâneo-cubóide e metatarso V. Neste arco o ângulo com a horizontal até 5°, ou seja, aproximadamente paralelo com o solo.

Figura 6: Arcos longitudinais do pé

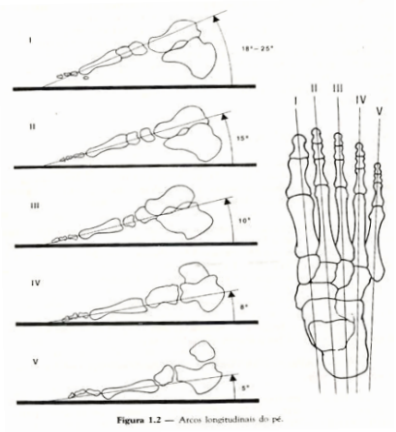


Figura 1.2 — Arcos longitudinais do pé.

Fonte: (Viladot,1986)

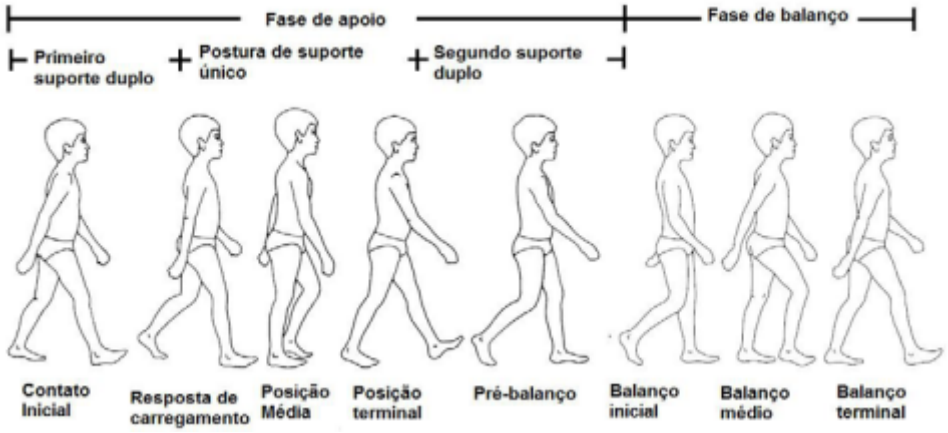
2.3 MARCHA

O andar, uma habilidade humana cíclica caracterizada por um padrão básico de deslocamento rítmico das partes inferiores do corpo e que mantém o indivíduo em constante movimento (Maia *Apud* Alonso *et al.*, 2002; Ávila *et al.*, 2017). Esse padrão demonstra diversas valências do ser humano, as quais, por meio de suas características, podem ser avaliadas a partir da marcha (Ribas *et al.*, 2007).

A marcha humana contém um ciclo com duas fases principais, a fase de apoio onde o pé está no chão, e a fase de balanço em que o pé não está mais em

contato com o solo e a perna está na posição terminal em preparação para o próximo passo, como mostrado na Figura 7 (Vaughan, 1992). Durante a fase de apoio, o pé toca a superfície de contato, e para a fase de balanço o pé está suspenso no ar sem nenhum contato com a superfície, neste instante o pé está em oscilação preparando para o próximo contato com a superfície (Palhano, 2008).

Figura 7: Ciclo da marcha humana



Fonte: (Vaughan, 1992)

Formada por oito eventos durante o ciclo da marcha, o calcanhar toca o solo dando o contato inicial sendo este o ponto em que o centro de gravidade do corpo está na posição mais baixa, em seguida a perna esquerda impulsiona o corpo para frente e o pé direito fica totalmente plano ao chão como resposta de carregamento. Após isso ocorre a posição média, em que o peso do corpo está carregado totalmente no pé direito, o pé esquerdo atravessa o direito, que está totalmente estendido, neste evento o centro de gravidade do corpo está na sua posição mais alta (Ferreira; Gois, 2018).

A análise clínica de marcha pode ser definida como a medição, o processamento e a interpretação sistemática de parâmetros biomecânicos, que caracterizam a locomoção humana e facilitam a identificação de limitações no movimento de modo a identificar procedimentos adequados de reabilitação (Sousa *apud* Baker, 2006).

2.4 ANÁLISES CLÍNICAS DO ARCO LONGITUDINAL MEDIAL DURANTE A MARCHA

A análise clínica da marcha, um passo fundamental no tratamento médico de muitas doenças e disfunções. O arco longitudinal medial (ALM) desempenha funções essenciais na biomecânica do pé, entre elas, a ação de suporte e a absorção do impacto da marcha, sendo que em situações que um indivíduo apresenta pés cavos (ALM acentuado) ou planos (ALM diminuídos), podem ser prejudicados estas funções (Morioka *et al.*, 2005).

Há diversas formas de analisar o Arco Plantar Longitudinal Medial, dentre os métodos utilizados estão o uso de radiografias, ultrassonografias, altura do arco plantar, impressões plantares e distribuição de pressão plantar.

Palhano (2008) analisou a altura do arco plantar longitudinal medial durante a fase de apoio na marcha, citando a pesquisa de Razegui *et al*., (2001) onde foi analisado o ângulo do Arco Plantar Longitudinal Medial utilizando o segmento do maléolo medial interligado com a protuberância do navicular e Metatarso I, que indiretamente indica a altura do arco plantar longitudinal medial. Nakamura e Kukurai (2003) utilizaram 17 pessoas relacionando o movimento do Arco Plantar Longitudinal Medial e o padrão do movimento do retropé durante a fase de apoio da marcha, para determinar o ângulo do arco utilizaram marcas no calcanhar medial, Tuberosidade do Navicular e cabeça do Metatarso I.

Para esta análise foram utilizadas seis câmeras com frequências de 60 Hz e duas plataformas de força com uma frequência de aquisição de 120 Hz determinando a entrada do calcanhar e a saída dos dedos, na qual os sujeitos da pesquisa caminhavam na velocidade habitual. Os autores dividiram em dois grupos chegando aos seguintes resultados, o ângulo do Arco Plantar Longitudinal Medial de 148,2° (± 3,8) e 146° (± 2,8); enquanto a variação do ângulo do arco plantar longitudinal medial foi de 4,7° (± 2,4) a 7,24° (± 2), concluindo que a eversão excessiva do pé pode melhorar a flexibilidade do arco e a absorção de choques (Palhano, 2008).

Em 1987, Cavanagh e Rodgers conduziram avaliações antropométricas diretas em adultos, abrangendo o comprimento do pé, a largura do antepé, a largura do calcâneo sendo uma medida indireta do índice do arco plantar, sendo uma das características estruturais mais significativas do pé.

3. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO E BIBLIOTECAS

Segundo a documentação do *Python*, esta foi descrita como uma linguagem de programação que permite trabalhar de forma mais rápida e integrar seus sistemas de maneira mais eficaz. Python descrita como uma linguagem de programação de alto nível, interpretada e multiparadigma, que se destaca pela sua sintaxe clara e legibilidade (Python Documentation, 2021). Foi criada por Guido van Rossum e outros programadores no Centro de Matemática Stichting na Holanda como uma sucessora da linguagem ABC e lançada em 1991, sendo amplamente utilizada em diversos campos, como desenvolvimento *web*, ciência de dados, inteligência artificial e automação.

Python tem sido amplamente utilizado na área da saúde, incluindo a análise de marcha (Awari, 2023). A análise de marcha, uma área de estudo que envolve a medição e avaliação dos padrões de movimento durante a caminhada. Desempenha um papel importante na avaliação clínica, no monitoramento de pacientes e na pesquisa (Carvalho, 2019).

Para a linguagem *Python*, existem diversas bibliotecas e ferramentas disponíveis que facilitam o processamento e a visualização dos dados de marcha (Awari, 2023). Por exemplo:

- *NumPy*: Utilizada para cálculos numéricos em Python, fornecendo suporte para manipulação de *arrays* multidimensionais, pode ser usada para processar dados de sensores e realizar cálculos estatísticos.
- *OpenCV*: Comumente utilizada em Python para processamento de imagens e visão computacional. Na análise de marcha, o OpenCV utilizado para capturar e processar vídeos de pessoas caminhando, extrair informações sobre as articulações e realizar análises mais avançadas.
- *Kivy*: Uma biblioteca que permite criar aplicativos com *interfaces* gráficas, particularmente útil para desenvolver aplicativos móveis e multiplataforma.

3.1 NUMPY

O *Numerical Python* (*NumPy*), uma biblioteca para a linguagem *Python* que oferece funcionalidades voltadas para a computação numérica em áreas como modelos de *machine learning*, tarefas matemáticas, processamento de imagem e computação gráfica (NumPy Documentation, 2023).

Ao elaborar algoritmos de *Machine Learning*, deve ser comum realizar uma variedade de cálculos numéricos, como multiplicação, transposição, adição, entre outros. O *NumPy* oferece uma biblioteca eficaz para executar esses cálculos de maneira fácil em termos de codificação e rápida em termos de velocidade. Os *arrays* do *NumPy* são empregados para armazenar tanto os dados de treinamento quanto os parâmetros dos modelos de *Machine Learning* (Santiago, 2018).

O *NumPy* oferece funções de biblioteca excelentes para a manipulação rápida de imagens, incluindo operações como espelhamento e rotação por um ângulo específico, além de ser uma ferramenta bastante útil para realizar diversas tarefas matemáticas, abrangendo integração numérica, diferenciação, interpolação, extrapolação, além de oferecer funções incorporadas para álgebra linear e geração de números aleatórios (Santiago, L., 2018).

3.2 OPENCV

OpenCV (*Open Source Computer Vision*), uma biblioteca de programação de código aberto, inicialmente desenvolvida pela *Intel Corporation* (Marengoni, M.; Stringhini, S.,2010). O OpenCV oferece uma ampla gama de ferramentas para processamento de imagens, abrangendo desde operações simples, como filtros de ruído, até tarefas mais complexas, como análise de movimento, reconhecimento de padrões e reconstrução tridimensional (Marengoni, M.; Stringhini, S.,2010).

A biblioteca conta com mais de 2.500 algoritmos otimizados, abrangendo uma ampla gama de algoritmos em visão computacional e aprendizado de máquina. Esses algoritmos são aplicáveis para diversas finalidades, como detecção e reconhecimento facial, identificação de objetos, classificação de ações humanas em vídeos, rastreamento de movimentos de câmera, acompanhamento de objetos em movimento, extração de modelos 3D de objetos, geração de nuvens de pontos 3D a partir de câmeras estéreo, fusão de imagens para criar imagens de alta resolução, busca de imagens semelhantes em bancos de dados de imagens, remoção de olhos vermelhos em fotos tiradas com flash, monitoramento do movimento dos olhos, reconhecimento de cenários e criação de marcadores para sobreposição com realidade aumentada, entre outras funcionalidades (Sette *et al*., 2021).

A biblioteca está dividida em cinco grupos de funções: processamento de imagens, análise estrutural, análise de movimento e rastreamento de objetos, reconhecimento de padrões e calibração de câmera e reconstrução 3D (Marengoni, M.; Stringhini, S., 2010).

4. MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E VISÃO COMPUTACIONAL

O processamento de imagens se refere ao conjunto de operações aplicadas a uma imagem com o objetivo de facilitar a extração de informações, proporcionando a interpretação e o reconhecimento de suas características. (Arthur, *et al.*, 2015). Derivado disto a visão computacional pode ser encontrada na área da Computação e Inteligência Artificial que estuda o processamento e análise de imagens e vídeos através de computadores, dentre as áreas de aplicação está a extração de dados a partir de imagens e vídeos.

Sendo uma imagem uma função bidimensional *f(x, y)*, em que *x* e *y* são coordenadas espaciais (plano), e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas *(x, y)* chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto. Quando *x*, *y* e os valores de intensidade de *f* são quantidades finitas e discretas, denomina-se de imagem digital (Gonzalez; Woods, 2010).

O processamento de imagens pode ser descrito como um procedimento no qual uma imagem serve como entrada para o sistema, resultando em uma saída que consiste em um conjunto de valores numéricos, os quais podem ou não ser utilizados para formar uma nova imagem.

Assim, processamento de imagens se torna um processo em que a entrada do sistema espera uma imagem e a saída um conjunto de valores numéricos, que podem ou não compor uma outra imagem. Enquanto a visão computacional, com o objetivo de emular a capacidade visual humana, busca empregar computadores para processar informações visuais, incorporando elementos como aprendizado, habilidade de inferência e capacidade de ação com base em dados visuais (Gonzalez; Woods, 2010).

A Figura 8 ilustra as distinções entre o processamento de imagens e a visão computacional. A imagem à esquerda exibe um veículo, mas a leitura da placa está dificultada devido à escuridão da imagem. Enquanto na imagem à direita, foi aplicada uma operação de equalização de histograma à imagem, caracterizando tipicamente uma operação de processamento de imagem onde são ajustados os níveis de cinza de uma imagem automaticamente, garantindo

um brilho e contraste balanceados de forma rápida e fácil (Marengoni, M.; Stringhini, S.,2010).

Como resultado, foi obtido uma imagem mais nítida que facilita a leitura da placa do veículo. Enquanto uma operação de visão computacional envolve a aplicação de um operador que extrai a placa do veículo e identifica as letras e números, viabilizando a busca dos dados do veículo em um banco de dados (Marengoni, M.; Stringhini, S., 2010).

Figura 8: Veículo em uma imagem escura (à esquerda). Após a equalização de histograma em nível de cinza, a placa do veículo está legível (à direita). As informações da placa e do veículo estão destacadas no retângulo.

Fonte: Marengoni; Stringhini (2010).

Segundo Gonzalez e Woods (2010), a escala que abrange desde o processamento de imagens até a visão computacional pode ser categorizada em três níveis: processos de níveis baixo, médio e alto.

As operações primitivas realizadas nos processos de nível baixo incluem atividades como pré-processamento de imagens para a diminuição de ruídos, aprimoramento de contraste e nitidez da imagem (Gonzalez; Woods, 2010). Nesse contexto, um processo de nível baixo é identificado pela característica de ter tanto a entrada quanto a saída como imagens.

O processamento de imagens de nível médio compreende atividades como a segmentação (divisão de uma imagem em regiões ou objetos), a descrição desses objetos para adaptá-los a uma forma adequada ao processamento computacional e a classificação (reconhecimento) de objetos individuais (Gonzalez; Woods, 2010). Em geral, um processo de nível médio onde suas entradas são predominantemente, imagens, enquanto as saídas consistem em

atributos extraídos dessas imagens, como bordas, contornos e a identificação de objetos individuais.

O processamento de nível alto consiste em atribuir significado a um conjunto de objetos identificados, como ocorre na análise de imagens, e, no ponto mais avançado dessa escala, desempenhar as funções cognitivas habitualmente relacionadas à percepção visual (Gonzalez; Woods, 2010).

4.1 SEGMENTAÇÃO

A segmentação envolve a subdivisão de uma imagem em regiões ou objetos distintos. Geralmente, esse procedimento está orientado por características específicas do objeto ou da região, tais como cor ou proximidade (Gonzalez; Woods, 2010).

Os algoritmos de segmentação para imagens monocromáticas geralmente se enquadram em uma de duas categorias fundamentais, que estão relacionadas às propriedades dos valores de intensidade: descontinuidade e similaridade. Na primeira categoria, as fronteiras das regiões são suficientemente diferentes entre si e em relação ao fundo da imagem para permitir a detecção de limite com base nas descontinuidades locais em intensidade (Gonzalez; Woods, 2010). A principal estratégia nesta categoria está na segmentação baseada em bordas. Por outro lado, as abordagens de segmentação baseada em região na segunda categoria estão fundamentadas na subdivisão de uma imagem em regiões semelhantes, seguindo um conjunto predefinido de critérios (Marengoni, M.; Stringhini, S., 2010).

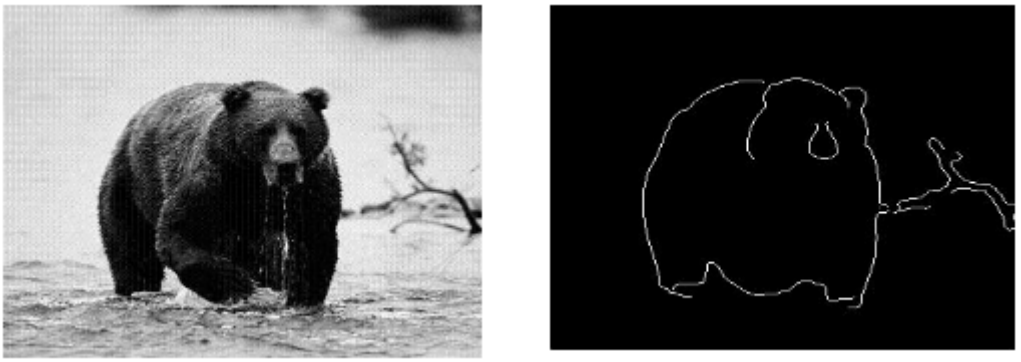
4.1.1 SEGMENTAÇÃO POR DETECÇÃO DE BORDA

Detecção de bordas, método usado mais frequentemente para segmentar as imagens com base nas variações abruptas (locais) de intensidade (Gonzalez; Woods, 2010). Uma borda em uma imagem pode ser identificada por uma alteração, geralmente abrupta, no nível de intensidade dos *pixels*. Detectores de borda são projetados para identificar esse tipo de variação nos *pixels*, e quando esses *pixels* estão próximos, eles podem ser conectados para formar uma borda ou contorno, delineando assim uma região ou objeto (Marengoni, M.; Stringhini, S., 2010).

A técnica de detecção de bordas de Canny, como mostra a Figura 9, se trata de um processo realizado a partir de critérios de quantificação de desempenho de operadores de bordas conhecidos como: critério de detecção e critério de localização (Gonzalez; Woods, 2010).

A abordagem de Canny tem três objetivos básicos: baixa taxa de erro, as bordas encontradas devem ser o mais próximo possível das bordas verdadeiras, pontos de borda bem localizados, a distância entre um ponto marcado como uma borda pelo detector e o centro da borda verdadeira deve ser mínima e a resposta de um único ponto de borda, ou seja, significa que o detector não deve identificar múltiplos *pixels* de borda em que apenas um único ponto de borda deve existir (Gonzalez; Woods, 2010).

Figura 9: Exemplo de segmentação de imagem utilizando o operador de Canny.

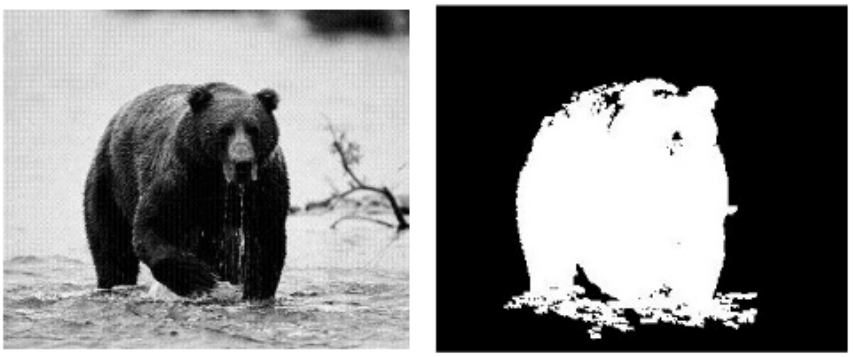


Fonte: Marengoni; Stringhini (2010).

4.1.2 SEGMENTAÇÃO POR CRESCIMENTO DE REGIÃO

A técnica de segmentação por crescimento, como mostra a Figura 10, identifica regiões diretamente na imagem, agrupando *pixels* ou sub-regiões em regiões maiores com base em critérios de crescimento previamente definidos. O procedimento parte de um conjunto de pontos, chamados de sementes, e a partir destes pontos vai agrupando pontos utilizando uma vizinhança de influência, formando as regiões (Marengoni, M.; Stringhini, S., 2010). Dentro dessa vizinhança, são avaliadas propriedades e medidas de similaridade para determinar se o *pixel* pertence ou não à região em análise. As propriedades geralmente levadas em consideração incluem cor, intensidade de nível de cinza, textura, momentos, entre outras.

Figura 10: Exemplo de segmentação pelo método de crescimento de região



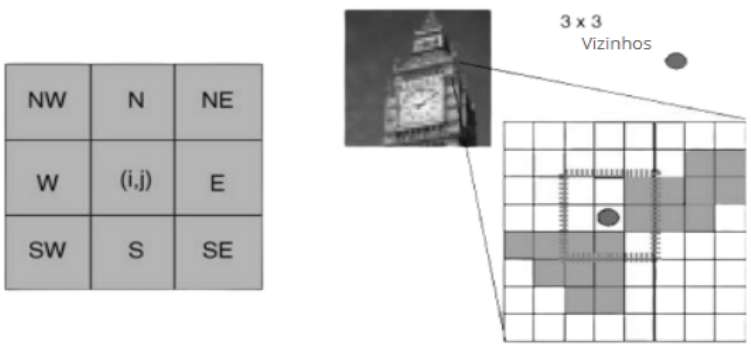
Fonte: Marengoni; Stringhini (2010).

4.2 *K-NEAREST NEIGHBORS*

O *K-nearest neighbors* (KNN), modelo de aprendizado de máquina que procura identificar as *k* correspondências mais próximas para determinar a classe à qual um item pertence. Uma medida importante em imagens, o conceito de conectividade. Muitas operações no processamento de imagens utilizam o conceito de vizinhança local da imagem para definir uma área local de influência, relevância ou interesses (Solomon, 2011).

Central a esse tema de definir a vizinhança local está a noção de conectividade de *pixels*, ou seja, decidir quais *pixels* estão conectados entre si. O KNN possibilita essa tarefa ao empregar as distâncias entre *pixels* para categorizar cada plano como mostra a Figura 11 (SOLOMON, 2011).

Figura 11: Conectividade de vizinhança de imagem (à esquerda) e um exemplo de vizinhança 3 x 3 centrada em uma localização específica de *pixel* da imagem.



Fonte: Solomon (2011).

A maioria das técnicas de processamento de imagem agora utiliza a conectividade-8 por padrão, o que, para um tamanho razoável de vizinhança, muitas vezes alcançável em tempo real em processadores modernos para a maioria das operações. Operações de filtragem em toda a imagem geralmente são realizadas como uma série de operações de vizinhança local usando o princípio de janela deslizante, ou seja, cada *pixel* na imagem processado com base em uma operação realizada em sua vizinhança local de *pixels* N x N (região de influência) (Solomon, 2011).

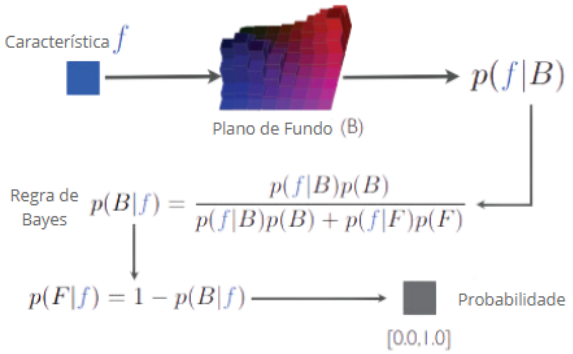
4.3 CMG

Método desenvolvido por Godbehere, Matsukawa e Goldberg (Godbehere; Matsukawa; Goldberg, 2012), cujo nome tem origem na abreviação dos sobrenomes dos autores, utiliza a inferência Bayesiana para definir objetos de primeiro plano e diferenciá-los do plano de fundo.

O procedimento utiliza os primeiros *frames* do vídeo para construir o plano de fundo, exibindo quadros completamente escuros durante a fase inicial. Esse método compreende duas etapas principais. Na primeira etapa, uma segmentação probabilística do primeiro plano, identificando potenciais objetos por meio de Inferência Bayesiana, enquanto simultaneamente cria um modelo dinâmico do plano de fundo (Godbehere; Matsukawa; Goldberg, 2012).

Para determinar um novo *pixel*, o algoritmo adota a fórmula de probabilidade baseada na inferência bayesiana, classificada como primeiro plano (F) ou plano de fundo (B), dada a característica observada, *fij (k)*. Para simplificar a notação, *p(F|f)* representa a probabilidade de que o *pixel (i, j)* seja classificado como primeiro plano no tempo *k*, dado a característica *fij* (k) (Godbehere; Matsukawa; Goldberg, 2012). Sendo o único *pixel*, representado pela probabilidade na Figura 12, obtido utilizando o filtro de Kalman, também conhecido como estimativa quadrática linear (EQL), responsável por organizar os frames do vídeo de entrada para que o modelo seja construído.

Figura 12: Diagrama de blocos do sistema de segmentação probabilística de primeiro plano para um único pixel.



Fonte: Godbehere; Matsukawa; Goldberg (2012).

4.4 *MIXTURE OF GAUSSIANS*

Mixture of Gaussians (MOG), que em português adaptada para Mistura de fundo adaptativa. Nela deve ser feita uma distribuição gaussiana implementado no OpenCV foi proposto inicialmente por Kaewtrakulpong e Bowden (2002). Nele, cada *pixel* do *background* está modelado a partir de uma mistura de K distribuições Gaussianas, com K assumindo um valor sempre pequeno, fixo, de três a cinco (Marcomini, 2018), de forma que seja caracterizado por sua intensidade no espaço de cores RGB.

Os parâmetros de peso associados a cada mistura de distribuições representam a proporção de tempo na qual uma cor permanece no vídeo. Como as prováveis cores do *background* tendem a ficar estáticas e a permanecer por mais tempo no vídeo, os *pixels* do *background* são identificados ao verificar quais misturas de distribuições possuem pesos maiores (Marcomini, 2018).

A distinção fundamental entre o MOG2 e o MOG está na aplicação das distribuições Gaussianas. Enquanto o algoritmo MOG emprega um único valor de K para todos os *pixels* do plano de fundo, o MOG2 utiliza uma variedade de distribuições, uma para cada *pixel*, cujo número pode variar dinamicamente durante a execução (Marcomini, 2018). Essa adaptação flexível possibilita ao algoritmo ajustar de maneira mais eficaz às alterações na luminosidade da imagem (Zivkovic, 2004; Zivkovic; Van Der Heijden, 2006).

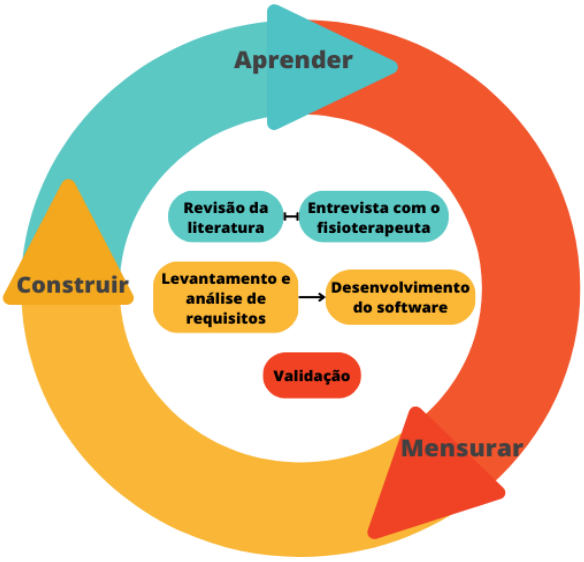
5. METODOLOGIA EXPLORATÓRIA

A escolha da metodologia exploratória neste trabalho de conclusão de curso se justifica pela necessidade de investigar um tema pouco explorado: a análise do arco longitudinal medial por meio de vídeos, visando o desenvolvimento de um protótipo de *software* para auxiliar profissionais da área da saúde nesse processo.

A pesquisa foi dividida em cinco etapas que foram apresentadas ao decorrer deste trabalho, além de seguirem o ciclo do produto mínimo viável como mostrado na Figura 13, sendo: o estudo da literatura, entrevista com um profissional de fisioterapia, levantamento e análise de requisitos, o desenvolvimento do *software* e validação.

O termo inglês *Minimum Viable Product* conhecido como MVP, em português significa produto mínimo viável, o conceito de MVP foi introduzido por Eric Ries (2012) um produto, um *app*, ou um *site* com todas as características mais básicas necessárias para ser considerado como "entregável". De acordo com Felipe (2017), atualmente os empreendedores buscam cada vez mais entregar valor com o mínimo de recursos possíveis para avaliar o mercado.

Figura 13: O ciclo do projeto com base no conceito MVP.



Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

Este sistema tem por objetivo ser um arquivo executável, de baixo custo de manutenção e que seja possível o seu uso em diversos sistemas operacionais.

5.1 ESTUDO DA LITERATURA

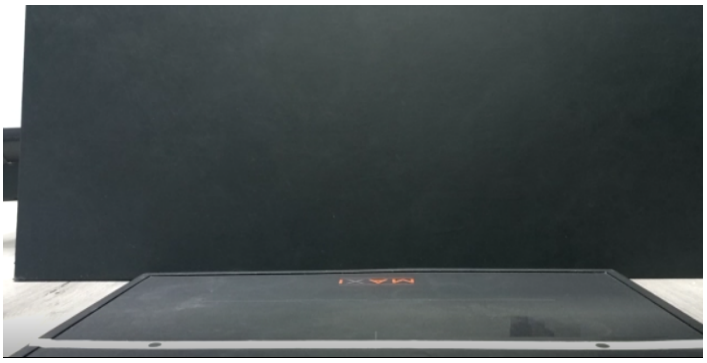
O presente estudo da literatura, abordado neste trabalho de conclusão de curso, foi obtido mediante consulta a múltiplas bases de dados, tais como *Scielo*, *Pubmed*, *Scholar Google*, *Consensus*, periódicos CAPES, Sebrae, periódicos UDESC, *IEEE xplore*, além de buscas em documentações de *software* como *Kinovea*, *Dartfish*, *SportsCode*, entre outros. Esta foi conduzida com o intuito de localizar artigos pertinentes a termos-chave específicos, tais como "arco longitudinal medial", "arco plantar humano", "análise da marcha através de vídeos" e "*software* para análise de movimento", para que fosse possível construir o entendimento anatômico, definição de características do arco plantar e levantar os pontos mais importantes para o desenvolver do projeto.

5.2 ENTREVISTA COM O ESPECIALISTA

A entrevista foi realizada via *Google Meet* com um pesquisador parceiro, formado em fisioterapia. O pesquisador grava a marcha e corrida dos pacientes em diferentes consultas e faz uma avaliação biomecânica sem nenhuma referência mensurável dos arcos plantares longitudinais para identificar os tipos de arcos que classificam os pés. Além disso, o especialista utiliza o exame de baropodometria com sensores de pressão para entender quais partes do pé recebem uma pressão maior, definindo assim os tipos de pisada, tipos de pé chato e cavo.

Durante a entrevista, o pesquisador explicou como preparava o ambiente para a gravação da marcha. O ambiente de gravação acontece no consultório do pesquisador, durante o exame da marcha, posicionado um tapete preto com uma linha de referência branca e um fundo preto, para gravação ele utiliza a câmera traseira de um celular *iPhone 7 Plus* posicionado a 180º em um tripé baixo, de modo que a linha de referência estivesse situada paralelamente com a base da imagem, conforme mostrado na Figura 14.

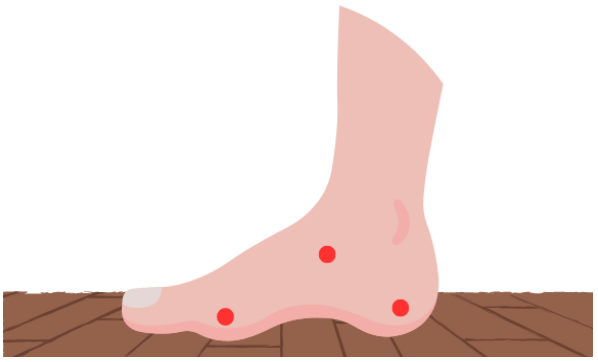
Figura 14: Ambiente de gravação da marcha durante os exames



Fonte: imagem disponibilizada pelo pesquisador parceiro (2023).

Para auxiliar na análise, são posicionados pontos de referência na parte lateral interna do pé do paciente em três diferentes posições: na ponta do metatarso próximo aos ossos sesamóides, no navicular e no calcâneo, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15: pontos referenciais para análise do arco plantar longitudinal

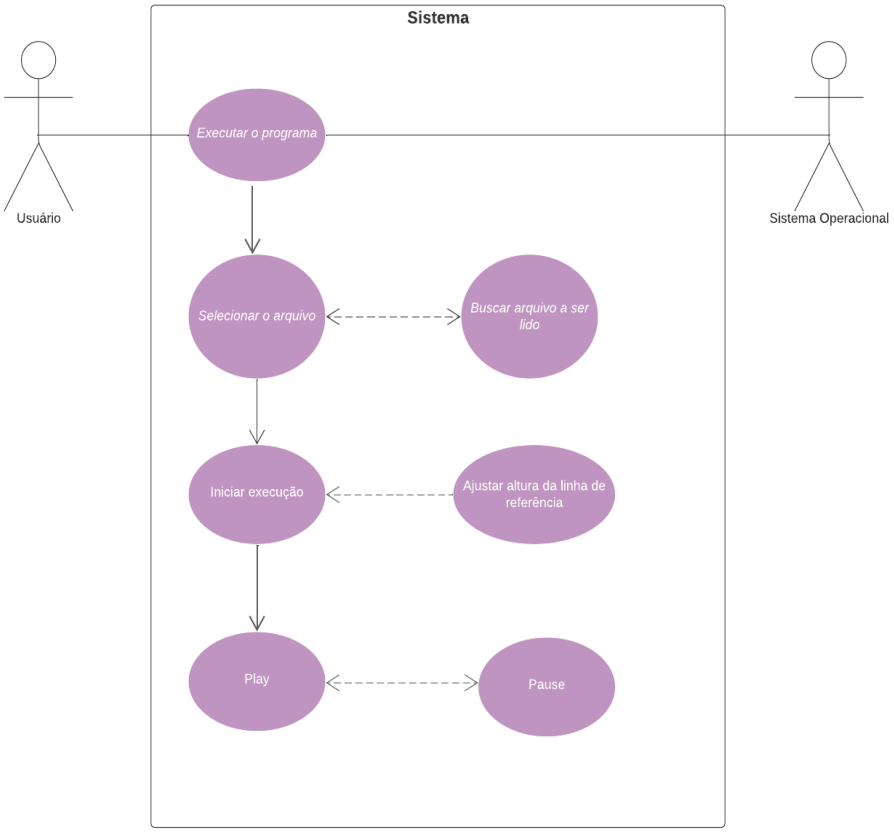


Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

5.3 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE REQUISITOS

Após a entrevista, foi usada a linguagem de modelagem unificada (UML) para auxiliar na criação e definição do uso do *software*, definindo as principais funcionalidades que a primeira versão deveria ter. Como ferramenta auxiliar para esse processo, foi utilizada a ferramenta Lucidchart para desenhar o diagrama de caso de uso da primeira versão do *software*, apresentado na Figura 16.

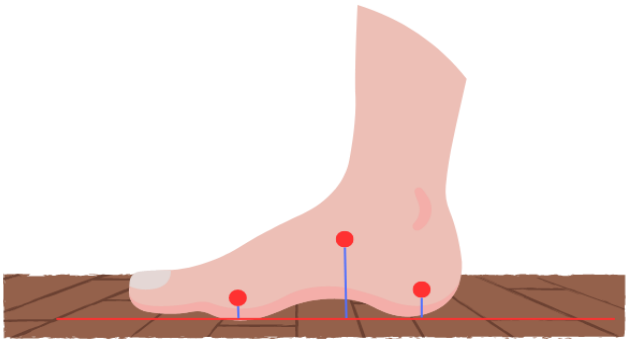
Figura 16: Diagrama de caso de uso



Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

Conforme mostrado na Figura 16 acima, foi estabelecido que, inicialmente, o programa deve permitir que o usuário selecione um vídeo localizado em seu *desktop*. Após a seleção, o usuário terá três opções básicas: reproduzir o vídeo, pausar e ajustar a linha de referência a ser utilizada. Durante a execução do vídeo a altura dos pontos de referência devem ser calculados como mostra a Figura 17.

Figura 17: Exemplo de como será calculado a altura dos pontos de referência



Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

A análise de requisitos está intimamente relacionada com o diagrama de caso de uso, pois este último desempenha um papel fundamental na identificação e compreensão das funcionalidades e interações do *software*.

Com base no diagrama de caso de uso (Figura 16), foi possível visualizar os atores envolvidos no sistema e as principais interações. Essas interações, representadas pelos casos de uso, fornecem *insights* sobre as funcionalidades do *software* e os principais fluxos de trabalho.

Ao analisar o diagrama de caso de uso, foi possível identificar os diferentes atores e suas respectivas responsabilidades no sistema. Essa análise ajuda a compreender as necessidades e expectativas dos usuários e outras partes interessadas envolvidas no sistema. A partir dessa análise, foram extraídos os requisitos funcionais e não funcionais do *software*.

Os requisitos funcionais são derivados diretamente dos casos de uso identificados no diagrama, descrevendo as principais funcionalidades e comportamentos esperados do sistema. Enquanto os requisitos não funcionais podem ser inferidos a partir da compreensão das interações e restrições representadas pelo diagrama de caso de uso, como requisitos de desempenho, segurança, usabilidade, entre outros (Cunha, 2022).

Após a análise do diagrama da Figura 16, que fornece uma visão abrangente das funcionalidades do sistema e das interações com os atores, este contribuiu para o desenvolvimento do um *software* que atende os seguintes requisitos:

- Ser executável no formato .exe;
- Rodar em sistema operacional *Windows*;
- Permitir o *upload* de vídeos presentes nos arquivos do computador;
- Quando o usuário selecionar um vídeo, deve ser capaz de identificar os pontos de referência demarcados na Figura 17;
- Deve conter uma linha de referência que possa ser alterada pelo usuário;
- Após a identificação dos pontos de referência, o *software* deve calcular a altura em centímetros do ponto de referência até a linha de referência;
- Permitir que o usuário pause ou reproduza os vídeos;
- Ao final da sessão, deve gerar um arquivo .txt com os valores das alturas calculadas.

5.3.1 Ferramenta de desenvolvimento

Pensando nos preceitos do produto *Minimum Viable Product* (MVP), apresentado no capítulo 4, como uma forma de construir um *software* com todas as características básicas necessárias a linguagem escolhida para o desenvolvimento foi o *Python* devido a sua vasta gama de bibliotecas que auxiliam em diversos tipos de análises, ainda mais quando se trata de visão computacional. Além disso, foi criado um repositório *online* no *github* com objetivo de se ter um melhor controle de versões, documentação do *software* e para um desenvolvimento mais eficiente e eficaz do projeto.

Para o desenvolvimento deste projeto foram utilizadas as seguintes tecnologias:

- *Visual Studio Code*: um editor de código fonte desenvolvido pela *Microsoft*. Foi escolhido para este trabalho por possuir diversos recursos como destaque de sintaxe, depuração integrada, controle de versão e suporte a várias linguagens de programação.
- *Python* versão 3.9.12: *Python* uma linguagem de programação de alto nível, versátil e fácil de aprender. A versão 3.9.12, uma das versões lançadas da linguagem *Python* e esta versão foi escolhida devido a compatibilidade entre as bibliotecas utilizadas (Python Documentation, 2021).
    - Bibliotecas:
        - *Numpy*: bastante utilizada para computação científica e numérica. Ela fornece estruturas de dados eficientes para armazenar e manipular matrizes multidimensionais, além de funções matemáticas de alto desempenho (NumPy Documentation, 2023).
        - *Kivy*: uma biblioteca Python de código aberto para desenvolvimento de aplicativos multiplataforma com *interface* de usuário (UI) atrativa. Permite a criação de aplicativos que podem ser executados em *desktops*, dispositivos móveis e até mesmo em TVs (Kivy Documentation, 2010-2023).

        - *OpenCV*: *OpenCV* (*Open Source Computer Vision Library*), uma biblioteca de código aberto amplamente utilizada para processamento de imagens e visão computacional.
        - *Pyinstaller*: *Pyinstaller*, uma ferramenta que permite empacotar aplicativos *Python* em executáveis independentes que podem ser executados em diferentes sistemas operacionais.
- Github: uma plataforma *web* baseada em *Git* que permite o controle de versão e colaboração em projetos de desenvolvimento de *software*.
- Canva: uma plataforma *online* de *design* gráfico que permite criar facilmente uma ampla variedade de conteúdos visuais.

5.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O *software* foi desenvolvido com as ferramentas pontuadas no tópico 5.3.1, para a fase experimental foram feitos diversos testes de processamentos digitais de imagens para a análise e produção do algoritmo.

A primeira etapa se deu na análise de *frames*, foi utilizado um *frame* específico, mostrado na Figura 18, onde a pessoa se encontra na fase de apoio no segundo suporte duplo do pré-balanço como base de estudo para entendimento para o tratamento das imagens. Com base nos processos e métodos discutidos no capítulo 4, antes da construção do algoritmo foi realizado um estudo no processamento dos *frames*.

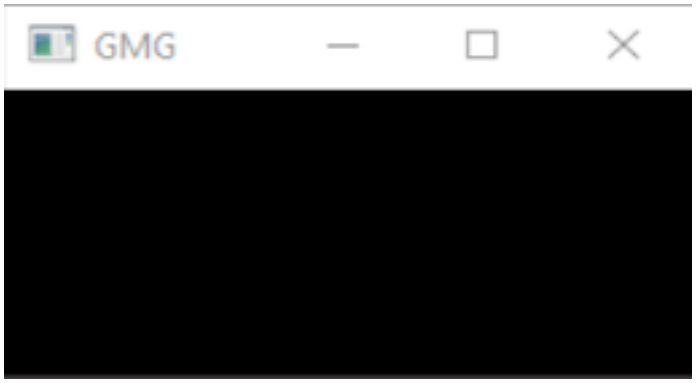
Figura 18: *Frame* da fase de apoio - pré-balanço.

Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

O método GMG foi prontamente descartado, como evidenciado na Figura 19. Mesmo com a implementação da etapa de correção, destinada a reduzir o

ruído da fase inicial por meio da ponderação de *pixels*, não foi alcançado um resultado satisfatório, que consistiria na efetiva separação do objeto do primeiro plano em relação ao plano de fundo.

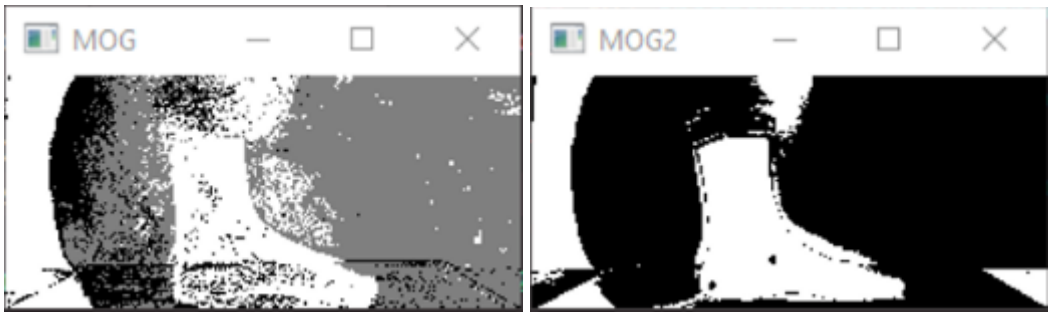
Figura 19: Resultado da aplicação do método GMG no *frame*.



Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

Em seguida foi analisada a técnica de *Mixture of Gaussians* (MOG) onde foi feita uma distribuição gaussiana para cada *pixel*, Figura 20, de forma que estes foram caracterizados por sua intensidade no espaço de cores RGB. Ao implementar o método MOG, uma segunda análise foi conduzida, agora com a ativação do controle de sombras no objeto. Apesar do aumento no tempo de processamento, foi observado uma melhoria significativa no resultado obtido. Esta técnica foi aplicada ao vídeo para uma análise mais aprofundada, uma vez que o MOG leva em conta a duração temporal da presença das cores na cena.

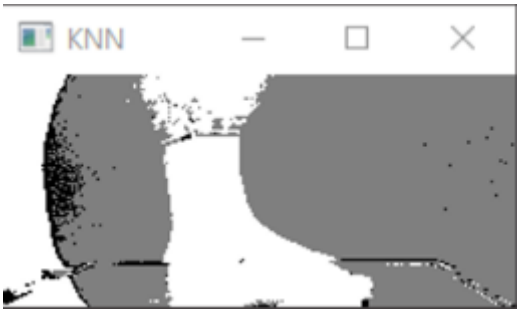
Figura 20: Resultado da aplicação do método MOG e MOG2 no frame.



Desenvolvida pela autora (2023).

Ainda a níveis de teste foi analisado os *frames* após utilizar o método KNN visto no capítulo 4.2 *K-nearest neighbors*, tendo como resultado uma imagem com o plano de fundo agora cinza, com ruídos e apesar do objeto está identificado há a perda dos pontos de referência como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21: Resultado da aplicação do método KNN no frame.



Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

Diante dos métodos utilizados o MOG2 teve o melhor resultado em sua execução, porém para que não houvesse perda da informação e fosse possível realizar a detecção dos pontos de referência foi necessário utilizar a biblioteca OpenCV do python amplamente utilizada no campo da visão computacional como visto no tópico 3.2 deste trabalho.

Dentro da biblioteca OpenCV foi utilizado a detecção dos *"blobs*", bolhas em português, que se dá por um grupo de *pixels* conectados em uma imagem que compartilham alguma propriedade comum. Como base nos vídeos utilizados por fisioterapeutas, na área que abrange este trabalho de conclusão de curso, foi utilizado um vídeo simulado com pontos de referências colocados na ponta do metatarso próximo aos ossos sesamóides, no navicular e no calcâneo obtendo assim o padrão desejado para construção do algoritmo, como mostrado na Figura 22.

Figura 22: Resultado da aplicação de *blobs* no *frame*.

Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

Além da detecção dos pontos de referência de forma automatizada também faz se necessário a impressão das alturas em relação ao chão e o centro dos pontos de referência, Figura 23, para isto foi levado em consideração a configuração da câmera de um celular supondo que a escala do vídeo foi de 12 *pixels* por centímetro e uma linha de referência para ser posicionada próxima à base do pé.

Figura 23: Resultado da aplicação com a mensuração realizada no frame.

Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

A construção deste algoritmo para análise da altura do arco medial plantar foi versionado no *Github* com o intuito de armazenar o histórico de produção, podendo realizar alterações, caso necessário consultar códigos escritos em versões anteriores e visualizar instruções de configurações de ambiente para instalação do programa para uso de desenvolvimento. Além disso, foi possível baixar apenas a versão executável do projeto sem a necessidade de ter Python ou qualquer biblioteca instalada no computador.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos através da metodologia utilizada no capítulo anterior e suas respectivas discussões. Sendo assim, este estará dividido em duas etapas: apresentações das *interfaces* e os resultados dos testes de validação.

6.1 INTERFACE DO SISTEMA

O *software* desenvolvido foi batizado com o nome de “Alpla”, uma aglutinação das palavras “altura” e “plantar”. Que tem por objetivo otimizar a análise de marcha feita por fisioterapeutas que trabalham diariamente avaliando o arco longitudinal medial de diversos pacientes fazendo a análise da curvatura para confecções de palmilhas.

Um exame clínico completo e minucioso deve ser realizado por um profissional especializado, que poderá identificar quaisquer desvios posturais, avaliar as características do arco do pé e indicar a melhor opção de palmilha para cada caso. Vale ressaltar que palmilhas inadequadas ou mal confeccionadas podem piorar a condição do paciente e até mesmo causar novas lesões e dores.

Diante disso, pensando no dia a dia corrido destes profissionais o *software* foi feito pensando não só em otimizar a análise mas também o tempo dos mesmos, sendo assim, o sistema vem pré-configurado e com a possibilidade de gerar um relatório a cada sessão com as alturas captadas pelo sistema, diferente de muitos *softwares* no mercado que para funcionar efetivamente precisa que o usuário gaste um tempo configurando os pontos de interesse e ainda repetir o processo a cada novo vídeo a ser analisado.

O *software* conta com uma tela inicial com um *design* minimalista, porém amigável e simples para o entendimento do usuário com um grande botão de “começar” como mostra Figura 24.

Figura 24: Interface do sistema - Tela inicial

Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

Ao clicar em “começar”, o usuário será direcionado para a segunda tela, conforme ilustrado na Figura 25. Essa tela exibe um "manual do usuário" resumido e dois botões. O manual do usuário contém o seguinte:

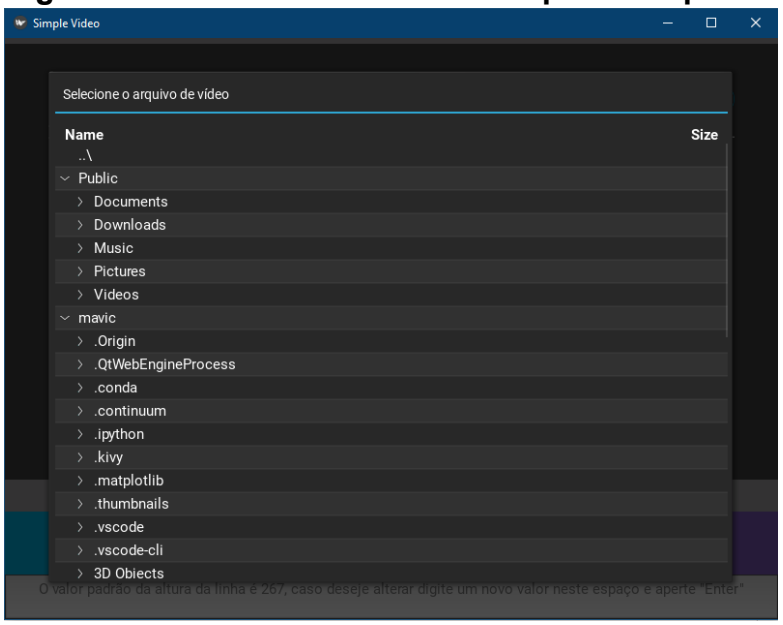
1. Selecione o arquivo de vídeo que deseja analisar clicando no botão "Selecionar arquivo".
2. Dê um duplo clique no botão "*play*" para iniciar a reprodução do vídeo.
3. Caso necessário, ajuste a altura da linha horizontal que servirá como referência para medição das alturas. Para fazer isso, digite o valor da altura no espaço abaixo e aperte "*Enter*".
4. Durante a reprodução do vídeo, serão detectados os pontos de referência presentes e exibidas as alturas em centímetros correspondentes.
5. Ao final da sessão, será gerado um arquivo .txt com os dados das alturas medidos durante a análise.
6. Para iniciar uma nova análise, clique no botão "Selecionar arquivo" novamente.

O primeiro botão foi denominado “selecionar o arquivo”, permitindo ao usuário navegar pelos arquivos em seu computador, como mostra a Figura 26. O segundo botão, chamado de “*play*”, deve ser acionado pelo usuário após selecionar o arquivo de vídeo a ser reproduzido, a fim de iniciar a reprodução. Logo abaixo dos botões, há um campo de entrada de valor que deve ser utilizado para “calibrar” a altura da linha de referência.

Figura 25: Interface do sistema - Menu

Desenvolvida pela autora, em 2023.

Figura 26: Interface do sistema - explorar arquivos

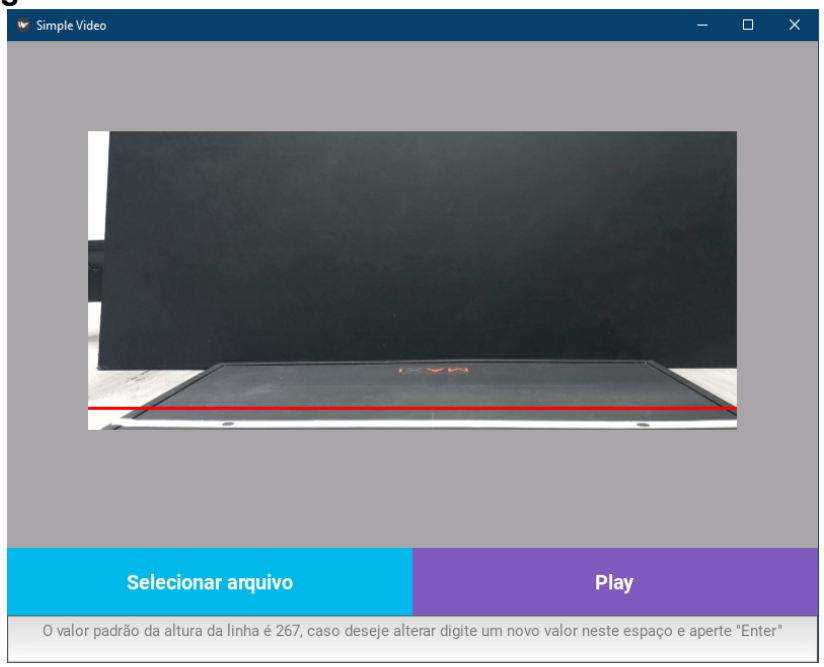


Desenvolvida pela autora, em 2023.

Ao selecionar o arquivo, o manual do usuário some e dá lugar ao vídeo a ser analisado, a linha de referência está calibrada para começar sempre na

coordenada 267 do eixo *y*, Figura 27, podendo ser alterada sempre que preciso caso haja necessidade.

Figura 27: Interface do sistema - Momento inicial do vídeo



Desenvolvida pela autora, em 2023.

Com o vídeo em execução e as referências estabelecidas no capítulo 5 apresentado na Figura 17, foi possível captar a altura em relação a linha de referência sempre que os círculos estiverem visíveis no vídeo como mostra a Figura 23.

6.2 RESULTADO DA VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Os testes foram realizados pela própria autora deste trabalho de conclusão de curso, onde foram aplicadas sessões de análise de marcha utilizando o *software* desenvolvido na pesquisa. A primeira fase de testes foi utilizada 5 (cinco) vídeos de marcha diferente que foram gravados pela autora deste trabalho com a orientação de um especialista.

Como resultado da validação do sistema, o *software* serviu como uma solução que auxilia no processo da análise da marcha e na confecção de palmilhas, foi possível acessar o Alpla diretamente da área de trabalho do sistema operacional do usuário, Figura 28, necessitando apenas realizar o *download* de seu arquivo executável.

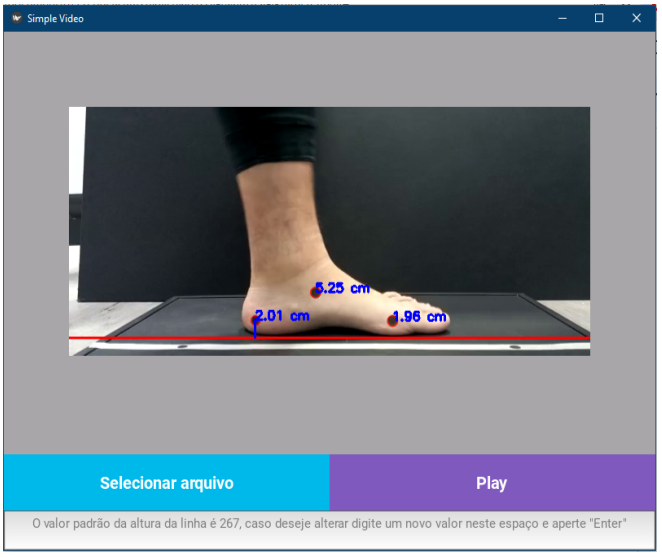
Figura 28: executável do *software* no sistema operacional *windows* 10

Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

Como mostrado no tópico anterior a *interface* do *software* simples direta e objetiva com o intuito de agilizar o trabalho dos usuários e melhorar a forma de análise da altura dos pontos de referência, mas principalmente o arco longitudinal medial.

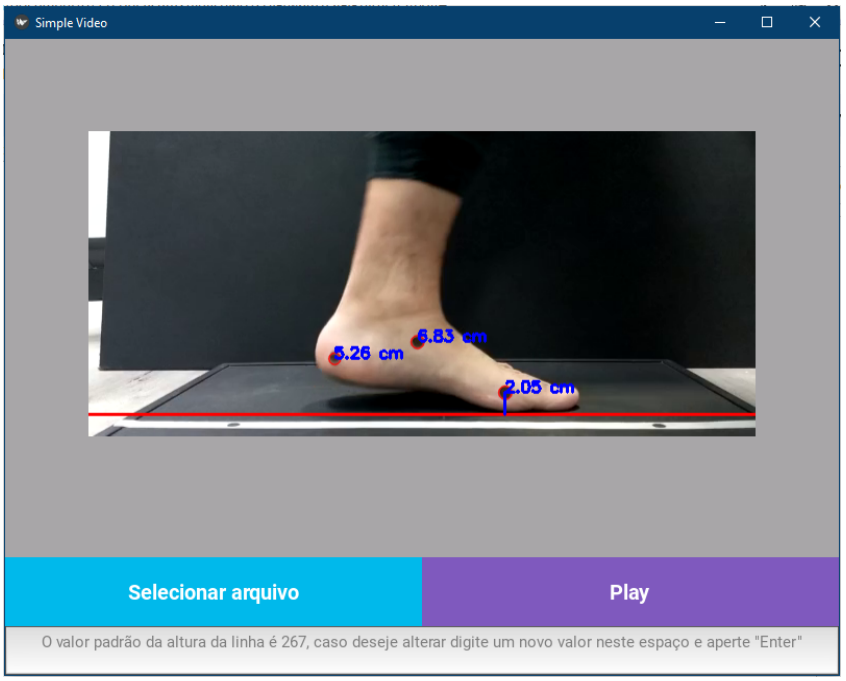
Ao selecionar o vídeo escolhido para análise e apertar o *play* para executá-lo a cada vez que o paciente passar pela câmera a altura dos pontos de referência serão calculados seguindo uma escala de 12 *pixels* por cm sem a necessidade de o usuário calibrar nada além da linha de referência, caso seja necessário como mostra a Figura 29 e 30.

Figura 29: Interface do sistema - vídeo em pausa



Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

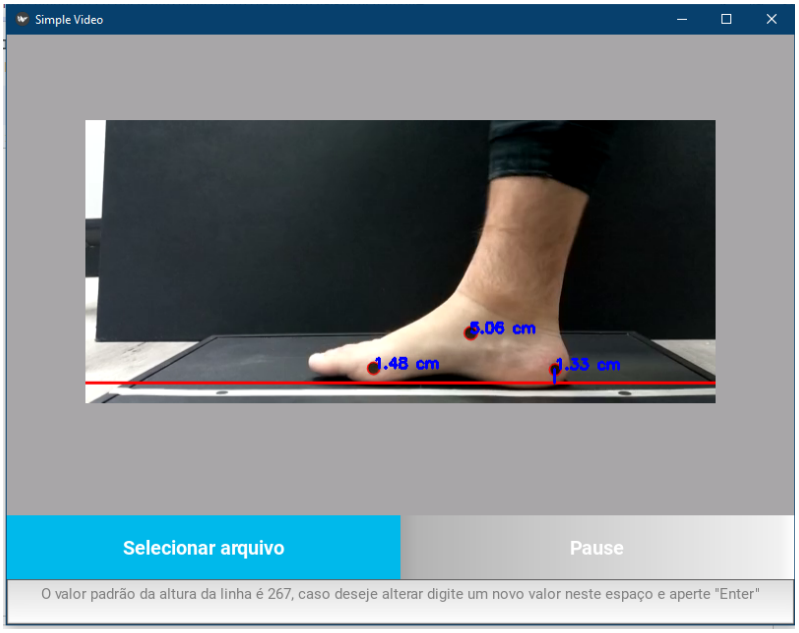
Figura 30: Interface do sistema - vídeo em pausa



Fonte: Desenvolvida pela autora, em 2023.

O usuário ainda tem a possibilidade de pausar o vídeo quando desejar com apenas um *clique*, como mostrado na Figura 31, e alterar a altura da linha de referência durante a execução do vídeo.

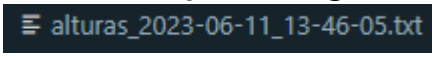
Figura 31: Interface do sistema - vídeo em execução



Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

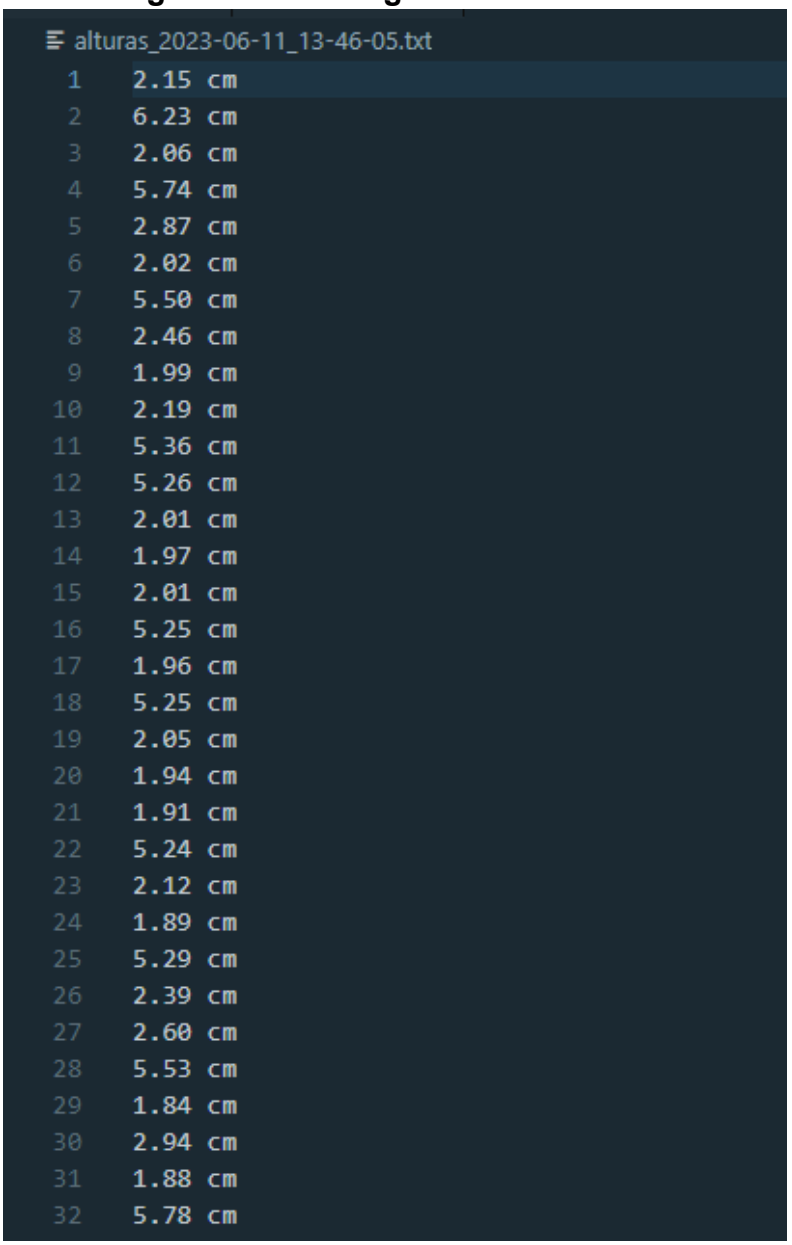
Com o objetivo de melhorar a coleta dos dados no fim de cada sessão, uma nova será marcada pela abertura do executável, gerando um arquivo .txt com a data e hora que a sessão foi iniciada e contendo todas as alturas em cm calculadas durante a execução do vídeo como mostra as Figuras 32 e 33.

Figura 32: nome do arquivo .txt gerado na sessão



Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

Figura 33: dados gerados na sessão



Fonte: Desenvolvida pela autora (2023).

7. CONCLUSÕES

Este trabalho de conclusão de curso resultou no desenvolvimento de uma solução que irá auxiliar nos processos avaliativos, realizados principalmente por fisioterapeutas, de marchas humanas para a confecção de palmilhas personalizadas baseadas na altura do arco plantar longitudinal, com referências na ponta do metatarso próximo aos ossos sesamóides, no navicular e no calcâneo. O embasamento teórico mostrado no capítulo 3 e 4, forneceu a base para a compreensão da anatomia do pé humano, assim como processos para o tratamento de imagens através da composição de diversas técnicas.

Levando como base o referencial teórico e no objetivo de desenvolver um *software* este trabalho trouxe uma solução que irá auxiliar nos processos avaliativos, realizados principalmente por fisioterapeutas, de marchas humanas para a confecção de palmilhas personalizadas baseadas na altura do arco plantar longitudinal, com referências na ponta do metatarso próximo aos ossos sesamóides, no navicular e no calcâneo.

O uso de técnicas de processamento digital de imagens para o tratamento de *frames*, como a segmentação e a identificação dos pontos de referência automaticamente com base nos *blobs* facilita a análise do arco longitudinal medial através de vídeos. A partir das metodologias apresentadas no capítulo 5 para o desenvolvimento do algoritmo em conjunto com as técnicas citadas anteriormente a fim de facilitar o uso e auxiliar a avaliação para os profissionais responsáveis pela análise, foi criado um *software* com *interface* simples e objetiva, com o processamento de dados ágil. A ferramenta desenvolvida mostrou acurácia elevada ao ser aplicada em testes simulados, como foi observado no capítulo 6. No todo, o algoritmo apresentou resultados relevantes ao que se propõe.

Com o uso desse *software*, os fisioterapeutas poderão obter medidas precisas da altura do arco longitudinal medial do pé, com base em dados específicos coletados a partir da amostra analisada, complementado a avaliação clínica. Essas medidas fornecerão informações sobre a estrutura e o tipo dos pés dos pacientes, permitindo uma análise mais detalhada da marcha e da postura. As palmilhas personalizadas, criadas com base nos dados obtidos pelo *software*, podem ajudar a corrigir desalinhamentos biomecânicos e fornecer suporte adequado aos pés durante a marcha. Isso pode resultar em melhorias

significativas na postura, no alívio da dor e no desempenho funcional dos pacientes.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Para futuras melhorias, uma das atualizações a serem implementadas será a detecção automatizada da base do pé, eliminando a necessidade de uma linha de referência. Essa melhoria envolverá a aplicação de técnicas de *machine learning*, com o objetivo de permitir que o *software* aprenda padrões de identificação do pé em diferentes indivíduos e ambientes de avaliação.

Além disso, outras atualizações mais simples serão incorporadas, como a adição de um botão de *replay* para reproduzir o vídeo novamente. Também será incluído um recurso de entrada para o arquivo de dados gerados durante a sessão, permitindo que o usuário atribua um código ou nome predefinido ao paciente.

Melhorias como essas visam aprimorar a usabilidade e a eficiência do *software*, proporcionando uma experiência mais intuitiva e personalizada para os fisioterapeutas. Ao implementar a detecção automática da base do pé, o processo de análise será simplificado, economizando tempo e aumentando a precisão dos resultados. A utilização de *machine learning* permitirá ao *software* se adaptar a diferentes características anatômicas e padrões individuais, tornando mais versátil e abrangente.

No geral, essas atualizações contribuirão para a evolução contínua do *software*, fornecendo recursos avançados e facilitando a rotina de trabalho dos fisioterapeutas na análise da marcha e na confecção de palmilhas personalizadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, V. K.; OKAJI, S. S.; PINHEIRO, M. T.; RIBEIRO, C. M.; SOUZA, H. P.; SANTOS, S. S.; GARANHANI, R. M. Análise cinemática da marcha em pacientes hemiparéticos. Revista Fisio Brasil, v. 55, 2002.

AMADIO, A.C. Considerações metodológicas da biomecânica para análise do movimento humano. Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE BIOMECÂNICA 7., 1997, Campinas. Anais...Campinas: SBB, 1997. p.11-15.

Antoine Vacavant, Thierry Chateau, Alexis Wilhelm and Laurent Lequievre. A Benchmark Dataset for Foreground/Background Extraction. Em: ACCV 2012, Workshop: Background Models Challenge, LNCS 7728, 291-300. Novembro 2012, Daejeon, Korea.

Awari. Aplicações em Python para Data Science. Publicado em 1 de agosto de 2023. Disponível em: <https://awari.com.br/aplicacoes-em-python-para-data-science/?utm_source=blog&utm_campaign=projeto+blog&utm_medium=Aplica%C3%A7%C3%B5es%20em%20Python%20para%20Data%20Science> Acesso em: 20 set. 2023.

BOOCH, Grady; RUMBAUGH, James; JACOBSON, Ivar. The Unified Modeling Language User Guide. 1ª ed. São Paulo: Addison Wesley, 1998. ISBN 0-201-57168-4. 512 páginas.

Burns, J., Crosbie, J., Hunt, A., Ouvrier, R. The effect of pes cavus on foot pain and plantar pressure. 2005. Clinical Biomechanics, 20(9), 877-882. ISSN 0268-0033. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.03.006.

CARVALHO, Maria Teresa Bento. Análise do Movimento Humano de Marcha Condicionada com Recurso a Tecnologia Móvel. 2019. Trabalho Final de Mestrado (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Lisboa, 2019.

CASE, Thomas A., Ph.D. Os Pés Brasileiros: Um estudo profundo de 26.339 pessoas. 2012. Disponível em: < https://www.pessemdor.com.br/pesquisas/orteses-plantares-e-palmilhas-ortopedicas/ > Acesso em: 11 out. 2023.

Chen, X., He, Z., et al. "Adaptive Silhouette Extraction and Human Tracking in Complex and Dynamic Environments." In: Proceedings of the International Conference on Image Processing, Atlanta, Georgia, 2006.

CUNHA, Fernando. Requisitos funcionais e não funcionais: o que são? Disponível em: https://www.mestresdaweb.com.br/tecnologias/requisitos-funcionais-e-nao-funcionais-o-que-sao. Acesso em: 1 nov. 2023.

FELIPE, Alex. O que é MVP? Minimum Viable Product. Alura, 06 set. 2017. Disponível em: <https://www.alura.com.br/artigos/voce-sabe-o-que-e-o-minimum-viable-product>. Acesso em: 05 mai. 2023.

FERREIRA, Anna R. S.; GOIS, Jorge A. M. Análise da cinemática e dinâmica da marcha humana. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, v. 35, n. 3, 2018. Disponível em: <https://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_tri_2018_web/RMCT_36217.pdf>. Acesso em: 25 out. 2023.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. C. Processamento digital de imagens. tradução: Cristina yamagami e leonardo piamonte. 3ª Edição, 2010.

IBM. Rational Software Architect Standard Edition. Versão 2021.03.05. Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/pt-br/rsas/7.5.0?topic=models-uml-model-elements>. Acesso em: 11 jun. 2023.

KaewTraKulPong, P.; Bowden, R. An Improved Adaptive Background Mixture Model for Real-time Tracking with Shadow Detection. In: 2º Workshop Europeu sobre Sistemas Avançados de Vigilância por Vídeo, 2001, Kingston, Reino Unido.

Santiago, L. (30/09/2018). Entendendo a biblioteca NumPy. Obtido de http: https://medium.com/ensina-ai/entendendo-a-biblioteca-numpy-4858fde63355.
MARCOMINI, Leandro Arab. Identificação Automática do Comportamento do Tráfego a Partir de Imagens de Vídeo. 2018. o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Lima, A. (2022). Python - Processa imagens de um vídeo usando OpenCV. Disponivel em: <https://acervolima.com/python-processa-imagens-de-um-video-usando-opencv/> Acesso em: 11 jun. 2023.

MAIA, M. M. Software para análise de marcha: uma alternativa ao auxílio terapêutico. Revista Expressão Católica Saúde, v. 5, n. 2, p. 77-82, dezembro de 2020. DOI: 10.25191/recs.v5i2.4093. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/348884536_GAIT_ANALYSIS_SOFTWARE_AN_ALTERNATIVE_TO_THERAPEUTIC_AID>. Acesso em: 07 mai. 2023.

MARENGONI, M.; STRINGHINI, S. Tutorial: Introdução à Visão Computacional usando OpenCV. Revista de Informática Teórica e Aplicada, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 125–160, 2010. DOI: 10.22456/2175-2745.11477. Disponível em: https://seer.ufrgs.br/index.php/rita/article/view/rita_v16_n1_p125. Acesso em: 26 nov. 2023.

MARIEB, Elaine Nicpon; MALLATT, Jon. Anatomia humana. 7ª ed. São Paulo: Editora Pearson, 2014.

NEVES, J. C. J. et al. Influência do arco longitudinal medial na distribuição plantar na flexibilidade posterior. Fisioter. Pesqui, vol.27, n.1, pp.16-21. Apr 06, 2020. ISSN2316-9117.

PALHANO, Rudnei. Análise biomecânica do arco plantar longitudinal medial durante a fase de apoio na marcha. Mestrado em Ciências do Movimento Humano - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências da Saúde e do Esporte - CEFID, Florianópolis, SC, 2008.

Piccardi, M. "Background subtraction techniques: a review". In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Haia, Países Baixos, 2004.

RIES, E. A startup enxuta: como os empreendedores atuais utilizam a inovação contínua para criar empresas extremamente bem-sucedidas. São Paulo: Lua de Papel, 2012.

RIBAS, D. I. R.; ISRAEL, V. L.; MANFRA, E. F.; ARAÚJO, C. D. Estudo comparativo dos parâmetros angulares da marcha humana em ambiente aquático e terrestre em indivíduos hígidos adultos jovens. Rev Bras Med Esporte, v. 13, n. 6, p. 371-5, 2007.

REN, Lei et al. A Phase-Dependent Hypothesis for Locomotor Functions of Human Foot Complex. Journal of Bionic Engineering, v. 5, n. 3, p. 175-180, setembro de 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1672652908600220>. Acesso em: 23 mai. 2023.

SETTE, Guilherme A.; CARVALHO, Luiz H. M. de; BASILE, Antonio L. Reconhecimento facial pela região dos olhos utilizando OpenCV. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Computação e Informática, Universidade

Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/30978>. Acesso em: 26 out. 2023.

SOUSA, D. S. S. et al. Análise clínica da marcha exemplo de aplicação em laboratório de movimento. No 2º Encontro Nacional de Biomecânica, Évora, Portugal, 8 e 9 de fevereiro de 2007.

TAKAYAMA, L.; MERINO, G. S. A. D. Percepção de uso e antropometria do pé no design de calçados para a saúde. Human Factors in Design, Florianópolis, v. 9, n. 18, p. 078-096, 2020. DOI: 10.5965/2316796309182020078. Disponível em: <https://periodicos.udesc.br/index.php/hfd/article/view/14812>. Acesso em: 29 maio. 2023.

VASCONCELLOS, Bruno Campos de. Método aplicado ao monitoramento remoto de animais baseado em aerolevantamento com VANT e aprendizagem profunda. 2019. Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada - Universidade Federal do Pampa, Bagé.

Vaughan, C. L.; Davis, B. L; O'Connor, J. C.; Dynamics of human gait, 2ª ed., Human Kinetics Publishers: Champaign, Illinois, 1992.

VOLPON, José B. Semiologia Ortopédica / Orthopedic Semiology. Capítulo VII. In: Simpósio: SEMIOLOGIA ESPECIALIZADA, Medicina, Ribeirão Preto, v. 29, p. 67-79, jan./mar. 1996.

Wilkinson, J; Kleijn, K. "SMPTE DC Study Group: Report on Additional Frame Rates for Digital Cinema," in SMPTE Motion Imaging Journal, vol. 118, no. 3, pp. 22-26, Abril 2009, doi: 10.5594/J14955. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7270016&isnumber=7269909> Acesso em: 15 nov. 2023.