



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA**

ARTHUR MONTEIRO MIRANDA

**AVALIAÇÃO POSTURAL EM CRIANÇAS E ADOLESCENTES COM PARALISIA
CEREBRAL: VALIDAÇÃO CLÍNICA DE UMA ABORDAGEM QUANTITATIVA
VIA ESTIMATIVA DE POSE 2D**

**BELÉM
2025**

ARTHUR MONTEIRO MIRANDA

**AVALIAÇÃO POSTURAL EM CRIANÇAS E ADOLESCENTES COM PARALISIA
CEREBRAL: VALIDAÇÃO CLÍNICA DE UMA ABORDAGEM QUANTITATIVA
VIA ESTIMATIVA DE POSE 2D**

Monografia a ser apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Biomédica.

Orientadora: Dra. Adriana Rosa Garcez Castro

Coorientadora: Dra. Daniela Rosa Garcez

BELÉM
2025

ARTHUR MONTEIRO MIRANDA

**AVALIAÇÃO POSTURAL EM CRIANÇAS E ADOLESCENTES COM PARALISIA
CEREBRAL: VALIDAÇÃO CLÍNICA DE UMA ABORDAGEM QUANTITATIVA
VIA ESTIMATIVA DE POSE 2D**

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, do Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Biomédica.

Data da aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. ADRIANA ROSA GARCEZ CASTRO
Orientadora - Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica - UFPA

Dra. DANIELA ROSA GARCEZ
Coorientadora - Hospital Universitário Bettina Ferro de Souza - UFPA

Profª. MSc. ROSANA PAULA DE OLIVEIRA SOARES
Membro - Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica - UFPA

Dedico este trabalho a todos os formandos que, com esforço e perseverança, lutam para concluir seus cursos, superar desafios e alcançar seus sonhos.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, pelo amor e apoio incondicional.

Ao meu irmão, por sempre tolerar minhas perturbações.

Ao meu pai, por me impulsionar a ser gentil, leal e resiliente.

À Bianka, meu amor, por me elevar e me fazer sentir um vencedor.

À dona Lu e seu Antônio, por me tratarem como um filho desde sempre.

À dona Socorro, por me dar o privilégio do tempo para me dedicar neste trabalho.

Aos meus cachorrinhos Fox, Hiroki e Nino, pelas insistentes palavras de motivação.

Ao gato Bast, que me acompanhava e assustava às noites enquanto escrevia este TC.

Às Dras. Adriana e Daniela, pela paciência, dedicação e orientação magistral deste trabalho.

À professora Rosana, por me reprovar e me impulsionar a elevar meu padrão à excelência.

Às crianças dessa pesquisa, que trouxeram alegria às tardes de coleta no Bettina.

Ao meu parceiro de TC, Rafael, pelo apoio durante as coletas da pesquisa.

Aos meus amigos de trabalho, Iran Neto, Juan Almeida e Daniel Dantas, pelas inúmeras manhãs, tardes, noites e madrugadas divertidas de colaboração.

Aos meus amigos de formação, Frank Oliveira, André Muniz e Sávio Mendes, pela amizade, história e momentos desde antes do meu primeiro TCC.

Às minhas tias, Rosi, Francisca e Lourdes, pelos diários “E o TCC!?”, que sempre me encheram de muita determinação.

À minha amada bisa Orlandina, que sem ela eu nem estaria aqui.

RESUMO

A paralisia cerebral (PC) é uma das condições neurológicas mais comuns na infância, afetando aproximadamente 2 a 2,5 em cada 1.000 crianças nascidas vivas em países desenvolvidos, sendo que em países em desenvolvimento a prevalência pode ser ainda maior devido à falta de recursos médicos adequados. O diagnóstico precoce é fundamental para garantir acesso a tratamentos adequados, melhorando a qualidade de vida das crianças afetadas e de suas famílias. No entanto, o processo de avaliação pode ser complexo, envolvendo análises clínicas subjetivas e exames de imagem especializados, muitas vezes limitados pela disponibilidade de profissionais e de recursos tecnológicos avançados. A Inteligência Artificial, especialmente as redes neurais profundas, tem revolucionado a análise de imagens médicas, oferecendo possibilidades para automatização e objetivação de processos tradicionalmente dependentes da experiência humana. Neste trabalho, a IA é aplicada na estimativa de pose 2D, identificando automaticamente pontos corporais e gerando métricas posturais quantitativas, o que permite uma avaliação mais objetiva e padronizada das alterações posturais. Neste contexto, esta monografia tem como objetivo investigar e validar métricas posturais quantitativas automatizadas para avaliação objetiva da severidade das alterações posturais em crianças e adolescentes com paralisia cerebral via estimativa de pose 2D com redes neurais profundas, fornecendo dados objetivos para apoio à documentação clínica e monitoramento da evolução terapêutica.

Método: Desenvolvimento de um aplicativo móvel que utiliza o algoritmo BlazePose para extrair 33 pontos-chave corporais de imagens estáticas em 3 vistas (frontal, lateral direita e lateral esquerda) de 40 participantes (24 controle, 8 PC diparéticos espásticos e 8 PC hemiparéticos espásticos). A metodologia inclui cálculo automatizado de 31 métricas posturais quantitativas, a partir dos pontos-chave, incluindo ângulos articulares, desníveis segmentares, inclinações corporais e índices de assimetria. A análise estatística das métricas foi realizada utilizando ANOVA, testes post-hoc Tukey e cálculo de tamanho de efeito ('d' de Cohen) para quantificar diferenças entre grupos.

Palavras-chaves: Paralisia Cerebral, Imagem, Rede Neural, Análise Postural.

ABSTRACT

Cerebral palsy (CP) is one of the most common neurological conditions in childhood, affecting approximately 2 to 2.5 per 1,000 live births in developed countries, with prevalence potentially higher in developing countries due to limited access to adequate medical resources. Early diagnosis is essential to ensure access to appropriate treatments, improving the quality of life for affected children and their families. However, the assessment process can be complex, involving subjective clinical evaluations and specialized imaging exams, often limited by the availability of trained professionals and advanced technological resources. Artificial Intelligence, particularly deep neural networks, has revolutionized medical image analysis, offering possibilities for automating and objectifying processes traditionally dependent on human expertise. In this work, AI is applied to 2D pose estimation, automatically identifying body keypoints and generating quantitative postural metrics, enabling a more objective and standardized assessment of postural alterations. In this context, this thesis aims to investigate and validate automated quantitative postural metrics for the objective evaluation of the severity of postural alterations in children and adolescents with cerebral palsy via 2D pose estimation using deep neural networks, providing objective data to support clinical documentation and monitoring of therapeutic progress.

Method: Development of a mobile application using the BlazePose algorithm to extract 33 body keypoints from static images in three views (frontal, right lateral, and left lateral) of 40 participants (24 controls, 8 with spastic diplegic CP, and 8 with spastic hemiplegic CP). The methodology includes automated calculation of 31 quantitative postural metrics derived from the keypoints, including joint angles, segmental imbalances, body inclinations, and asymmetry indices. Statistical analysis of the metrics was performed using ANOVA, Tukey post-hoc tests, and effect size calculation (Cohen's d) to quantify group differences.

Keywords: Cerebral Palsy, Image, Neural Network, Postural Assessment.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Classificação da Paralisia Cerebral..... | 15 |
| Figura 2 - Sistema de Classificação da Função Motora Grossa..... | 18 |
| Figura 3 - Topologia do PoseNet (17 pontos anatômicos)..... | 23 |
| Figura 4 - Topologia do BlazePose com 33 pontos anatômicos..... | 24 |
| Figura 6 - Ângulos articulares no plano Frontal e Sagital..... | 28 |
| Figura 7 - Desvios e inclinações segmentares no plano Frontal e Sagital..... | 29 |
| Figura 8 - Distâncias relativas ao eixo médio..... | 30 |
| Figura 9 - Distâncias Intersegmentares..... | 31 |
| Figura 10 - Fluxo Metodológico da Pesquisa..... | 36 |
| Figura 11 - Capturas de Tela do aplicativo Pose Health..... | 38 |
| Figura 12 - Tela de visualização dos pontos obtidos após captura de imagem..... | 39 |
| Figura 13 - Indicador visual de inclinação do acelerômetro..... | 40 |
| Figura 14 - Participantes do grupo Controle..... | 42 |
| Figura 15 - Participantes do grupo Diparesia..... | 42 |
| Figura 16 - Participantes do grupo hemiparesia..... | 42 |
| Figura 17 - Diagrama de Processamento de Extração..... | 43 |
| Figura 18 - Dados estruturados em JSON..... | 45 |
| Figura 19 - Documentação visual dos pacientes com diparesia..... | 50 |
| Figura 20 - Documentação visual dos pacientes com hemiparesia..... | 50 |
| Figura 21 - Documentação visual de alguns pacientes controle..... | 51 |
| Figura 22 - Pontos-chaves originais sobrepostos..... | 51 |
| Figura 23 - Pontos-chaves normalizados sobrepostos..... | 52 |
| Figura 24 - ‘d’ de Cohen (Diparesia vs Controle)..... | 67 |
| Figura 25 - ‘d’ de Cohen (Hemiparesia vs Controle)..... | 68 |
| Figura 26 - ‘d’ de Cohen (Hemiparesia vs Diparesia)..... | 68 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Distribuição temporal dos acometimentos na Paralisia Cerebral..... | 14 |
| Tabela 2 - Ocorrência de Paralisia Cerebral por tipo..... | 16 |
| Tabela 3 - Alterações posturais observadas em crianças com paralisia cerebral..... | 20 |
| Tabela 4 - Pontos-chave anatômicos detectados pelo BlazePose..... | 24 |
| Tabela 5 - Classificação das métricas posturais quantitativas..... | 25 |
| Tabela 6 - PCKs relativos à cabeça (hemiparesia vs controle)..... | 53 |
| Tabela 7 - PCKs relativos aos membros superiores (hemiparesia vs controle)..... | 53 |
| Tabela 8 - PCKs relativos aos membros inferiores (hemiparesia vs controle)..... | 54 |
| Tabela 9 - PCKs relativos à cabeça (diparesia vs controle)..... | 55 |
| Tabela 10 - PCKs relativos aos membros superiores (diparesia vs controle)..... | 55 |
| Tabela 11 - PCKs relativos aos membros inferiores (diparesia vs controle)..... | 56 |
| Tabela 12 - Visão Geral dos PCK (diparesia vs controle)..... | 57 |
| Tabela 13 - Visão Geral dos PCK (hemiparesia vs controle)..... | 57 |
| Tabela 14 - Métricas Frontais do Grupo Controle..... | 58 |
| Tabela 15 - Métricas Sagitais do Grupo Controle..... | 59 |
| Tabela 16 - Métricas Frontais do Grupo Diparesia..... | 60 |
| Tabela 17 - Métricas Sagitais do Grupo Diparesia..... | 60 |
| Tabela 18. Métricas Frontais do Grupo Hemiparesia..... | 61 |
| Tabela 19. Métricas Sagitais do Grupo Hemiparesia Espástica..... | 62 |
| Tabela 20 - Resultados da Análise de Variância (ANOVA)..... | 63 |
| Tabela 21 - Comparação Tukey HSD (Diparesia e Controle)..... | 64 |
| Tabela 22 - Comparação Tukey HSD (Hemiparesia e Controle)..... | 65 |
| Tabela 23 - Comparação Tukey HSD (Hemiparesia e Diparesia)..... | 66 |
| Tabela 24 - Ranqueamento considerando significância ‘p’ & magnitude de efeito ‘d’..... | 70 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1 Hipótese..... | 13 |
| 1.2 Objetivo Geral..... | 13 |
| 1.3 Objetivos Específicos..... | 13 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 14 |
| 2.1 Paralisia Cerebral..... | 14 |
| 2.2 Classificação da Paralisia Cerebral Quanto à Desordem do Movimento..... | 15 |
| 2.2.1 Paralisia Cerebral Espástica..... | 16 |
| 2.2.2 Paralisia Cerebral Discinética..... | 16 |
| 2.2.3 Paralisia Cerebral Atáxica..... | 17 |
| 2.2.4 Sistema de Classificação da Função Motora Grossa (GMFCS)..... | 17 |
| 2.3 Alterações Posturais na Paralisia Cerebral..... | 19 |
| 2.3.1 Planos Anatômicos e Controle Postural..... | 19 |
| 2.3.2 Prevalência das Alterações Posturais..... | 19 |
| 2.4 Tratamento de Pessoas com Paralisia Cerebral..... | 20 |
| 2.5 Tecnologias de Análise Postural..... | 21 |
| 2.5.1 Métodos Tradicionais..... | 21 |
| 2.5.2 Método baseado em Algoritmo de Detecção de Pontos-Chave..... | 22 |
| 2.6 Métricas Posturais Quantitativas..... | 25 |
| 2.6.1 Métricas Angulares..... | 25 |
| 2.6.2 Métricas de Distância..... | 26 |
| 2.6.3 Cálculo de Ângulos Articulares..... | 27 |
| 2.6.4 Cálculo de Desvios e Inclinações Segmentares..... | 28 |
| 2.6.5 Cálculo de Índices de Assimetria..... | 29 |
| 2.6.6 Cálculo de Distâncias Intersegmentares..... | 30 |
| 2.6.7 Cálculo da Postura Média Geral..... | 31 |
| 2.7 Validação Estatística em Avaliação Clínica..... | 33 |
| 2.7.1 Análise de Variância (ANOVA) Unifatorial..... | 33 |
| 2.7.2 Teste Post-hoc Tukey HSD..... | 34 |
| 2.7.3 Tamanho de Efeito ‘d’ de Cohen..... | 35 |
| 3. METODOLOGIA..... | 36 |
| 3.1 Fase de Planejamento e Aprovação..... | 37 |
| 3.1.1 Caracterização..... | 37 |
| 3.1.2 Aspectos Éticos..... | 37 |
| 3.1.3 Definição de Critérios de Amostragem..... | 37 |
| 3.2 Fase de Desenvolvimento Tecnológico..... | 38 |
| 3.2.1 Aplicativo Móvel..... | 38 |
| 3.2.2 Implementação do BlazePose..... | 39 |
| 3.2.3 Interface do Usuário..... | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3 Fase de Coleta de Dados..... | 41 |
| 3.3.1 Seleção da Amostra..... | 41 |
| 3.3.2 Protocolo de Captura de Imagens..... | 41 |
| 3.3.3 Aquisição em Três Vistas..... | 41 |
| 3.4 Fase de Processamento e Extração..... | 43 |
| 3.4.1 Pré-processamento dos dados..... | 43 |
| 3.4.2 Estruturação dos pontos-chave..... | 44 |
| 3.4.3 Cálculo das 31 Métricas..... | 45 |
| 3.4.4 Postura Média Geral dos Grupos..... | 46 |
| 3.5 Fase de Análise Estatística..... | 47 |
| 3.5.1 ANOVA..... | 47 |
| 3.5.2 Teste Post-hoc Tukey HSD..... | 47 |
| 3.5.3 Tamanho de Efeito ('d' de Cohen)..... | 48 |
| 3.5.4 Ranqueamento Geral das Métricas..... | 48 |
| 4. RESULTADOS..... | 49 |
| 4.1 Documentação Visual dos Participantes..... | 49 |
| 4.2 Postura Média e Análise dos Pontos-Chave..... | 52 |
| 4.2.1 PCKs do Grupo Hemiparesia..... | 52 |
| 4.2.2 PCKs do Grupo Diparesia..... | 55 |
| 4.2.3 Visão Geral dos PCKs..... | 56 |
| 4.3 Métricas Posturais por Grupo e Vista..... | 57 |
| 4.3.1 Métricas do Grupo Controle..... | 58 |
| 4.3.2 Métricas do Grupo Diparesia..... | 59 |
| 4.3.3 Métricas do Grupo Hemiparesia..... | 61 |
| 4.4 Análise Estatística..... | 63 |
| 4.4.1 Análise de Variância (ANOVA)..... | 63 |
| 4.4.2 Comparações Post-Hoc (Tukey HSD)..... | 64 |
| 4.4.3 Tamanho de Efeito ('d' de Cohen)..... | 67 |
| 4.5 Ranqueamento..... | 70 |
| 5. DISCUSSÃO | |
| 5.1 Quantificação Objetiva de Alterações Posturais..... | 72 |
| 5.2 Padrões Posturais Específicos por Subtipo..... | 72 |
| 5.3 Aplicabilidade Clínica..... | 73 |
| 5.4 Implementação em Aplicação Móvel..... | 73 |
| 5.5 Limitações do Estudo..... | 74 |
| 6. CONCLUSÃO..... | 75 |
| REFERÊNCIAS..... | 77 |

1. INTRODUÇÃO

A paralisia cerebral (PC) é definida como um grupo de distúrbios permanentes do desenvolvimento do movimento e da postura, causando limitações de atividade, que são atribuídos a distúrbios não progressivos que ocorreram no cérebro fetal ou infantil em desenvolvimento (SCPE Working Group, 2022). Esta condição neurológica representa uma das principais causas de deficiência física na infância, com prevalência estimada entre 2 e 2,5 por 1.000 nascidos vivos em países desenvolvidos (McIntyre et al., 2021).

Os distúrbios motores da paralisia cerebral são frequentemente acompanhados por distúrbios de sensação, percepção, cognição, comunicação e comportamento, além de epilepsia e problemas musculoesqueléticos secundários. A heterogeneidade clínica da paralisia cerebral resulta em diferentes apresentações posturais que variam significativamente entre os indivíduos afetados (Novak et al., 2020).

A avaliação postural tradicionalmente realizada por profissionais de saúde, embora fundamental para o planejamento terapêutico, apresenta limitações relacionadas à subjetividade, variabilidade inter-observador e dificuldade na quantificação precisa das alterações posturais. Essas limitações podem impactar a qualidade do acompanhamento clínico e a comunicação entre profissionais da equipe multidisciplinar.

O advento de tecnologias de inteligência artificial, especificamente algoritmos de detecção de pontos-chave corporais, oferece oportunidades para desenvolvimento de ferramentas objetivas de avaliação postural. O algoritmo BlazePose, desenvolvido pelo Google, demonstra alta precisão na detecção de 33 pontos-chave corporais em tempo real, permitindo análise postural automatizada através de dispositivos móveis acessíveis (Bazarevsky et al., 2020).

Neste contexto, o desenvolvimento de métricas posturais quantitativas automatizadas representa uma oportunidade significativa para apoiar profissionais de saúde na avaliação objetiva de crianças com paralisia cerebral, oferecendo dados numéricos padronizados que podem complementar a avaliação clínica tradicional e facilitar o monitoramento de evolução terapêutica.

1.1 Hipótese

É possível identificar e quantificar alterações posturais características da paralisia cerebral através de métricas automatizadas derivadas de pontos-chave corporais obtidos via algoritmo de estimativa de pose 2D, permitindo a diferenciação objetiva entre subtipos de paralisia cerebral (diparesia e hemiparesia espásticas) e o grupo controle, com potencial aplicação no apoio à documentação clínica e monitoramento da evolução terapêutica em crianças e adolescentes com PC.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral investigar e validar métricas posturais quantitativas automatizadas para avaliação objetiva da severidade das alterações posturais em crianças e adolescentes com paralisia cerebral, focando na quantificação de alterações características da condição e fornecendo dados objetivos para apoio à documentação clínica e monitoramento da evolução terapêutica com auxílio de aplicativo móvel com algoritmo de estimativa de pose 2D.

1.3 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- a) Desenvolver um aplicativo móvel para extração de 33 pontos-chave corporais utilizando o algoritmo de estimativa de pose 2D BlazePose aplicado em imagens estáticas capturadas em 3 vistas (frontal, lateral direita e lateral esquerda);
- b) Desenvolver um algoritmo para obter de forma automatizada, a partir dos 33 pontos-chaves extraídos, um conjunto de 31 métricas posturais quantitativas incluindo ângulos articulares, desníveis segmentares, inclinações corporais e índices de assimetria baseados em fundamentos biomecânicos e clínicos;
- c) Identificar pontos-chave discriminantes e padrões de alteração postural específicos em crianças com diparesia espástica e hemiparesia espástica utilizando o grupo controle como padrão comparativo através das métricas PCK (Porcentagem de Pontos-Chave Corretos) e mAP (Porcentagem Média dos PCK);
- d) Quantificar a magnitude das diferenças posturais entre grupos utilizando análise de variância (ANOVA), testes post-hoc Tukey e cálculo de tamanho de efeito ('d' de Cohen) para determinar a relevância clínica das métricas posturais quantitativas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Paralisia Cerebral

A paralisia cerebral (PC) constitui um grupo heterogêneo de distúrbios permanentes do desenvolvimento do movimento e da postura que resultam em limitações funcionais, originados de lesões não progressivas no cérebro em desenvolvimento durante os períodos fetal ou infantil (Rosenbaum et al., 2022). Embora a lesão cerebral primária seja estática, as manifestações clínicas evoluem dinamicamente ao longo do desenvolvimento da criança.

A etiologia da PC é multifatorial e temporalmente diversa, conforme demonstrado na Tabela 1. Os fatores perinatais representam a maior proporção dos casos (42,50%), seguidos pelos fatores pré-natais (33,75%) e pós-natais (13,75%), com 10% dos casos sem etiologia determinada. Entre as causas pré-natais destacam-se infecções congênicas (rubéola, citomegalovírus, toxoplasmose), malformações cerebrais e distúrbios genéticos. O período perinatal, responsável pela maior incidência, segundo os dados apresentados, engloba principalmente eventos hipóxico-isquêmicos, prematuridade extrema e hemorragia intracraniana. As causas pós-natais, embora menos frequentes, incluem traumatismo cranioencefálico, neuroinfecções e acidente vascular cerebral pediátrico (Reid et al., 2021).

Tabela 1 - Distribuição temporal dos acometimentos na Paralisia Cerebral

| Momento do acometimento | Frequência (%) |
|--------------------------------|-----------------------|
| Pré-natal | 33,75 |
| Perinatal | 42,50 |
| Pós-natal | 13,75 |
| Não conhecido | 10,00 |

Fonte: Autor, adaptado de Peixoto et al., 2020

A prevalência global varia de 2,0 a 3,5 por 1.000 nascidos vivos em países desenvolvidos, com taxas significativamente maiores em regiões com recursos limitados. Esta disparidade reflete diferenças na qualidade da assistência obstétrica e neonatal, bem como fatores socioeconômicos que influenciam o acesso aos cuidados de saúde (McIntyre et al., 2021).

Do ponto de vista fisiopatológico, as lesões afetam circuitos neuromotores complexos envolvendo córtex motor, vias corticoespinhais, núcleos da base e cerebelo. A espasticidade, presente em aproximadamente 80% dos casos, decorre da desinibição dos reflexos espinhais após lesão do neurônio motor superior, manifestando-se através de hipertonia velocidade-dependente, hiperreflexia e clônus (Novak et al., 2020).

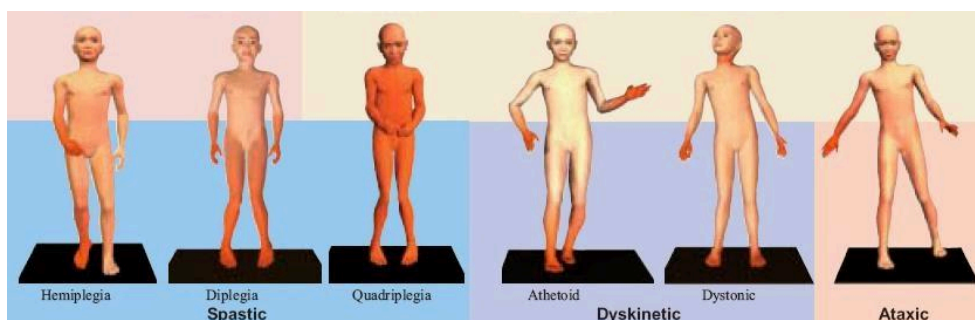
A classificação funcional moderna utiliza instrumentos padronizados e validados internacionalmente. O Gross Motor Function Classification System (GMFCS) estratifica a mobilidade em cinco níveis progressivos de limitação funcional. Complementarmente, o Manual Ability Classification System (MACS) avalia a função manual e o Communication Function Classification System (CFCS) classifica as habilidades comunicativas. Estes sistemas integrados fornecem uma estrutura prognóstica abrangente e facilitam o planejamento terapêutico individualizado (Palisano et al., 2020).

2.2 Classificação da Paralisia Cerebral Quanto à Desordem do Movimento

A classificação da paralisia cerebral é fundamental para o planejamento terapêutico, comunicação entre profissionais e determinação do prognóstico funcional. O sistema de classificação mais amplamente utilizado baseia-se em dois critérios principais: a distribuição topográfica do comprometimento motor e o tipo predominante de distúrbio motor observado (SCPE, 2020).

A Figura 1 apresenta os diferentes níveis de alterações posturais para as respectivas classificações: Espástico (hemiparesia, diparesia e Quadriplegia), Discinético (Atetóide e Distônico) e Atáxico.

Figura 1 - Classificação da Paralisia Cerebral



Fonte: Berker e Yalçin (2008)

Conforme apresentado na Tabela 2, a paralisia cerebral espástica bilateral (diparesia) representa a forma mais prevalente (45,42%), seguida pela espástica unilateral (hemiparesia) (19,17%). As formas discinética (2,08%) e atáxica (2,92%) apresentam menor incidência, enquanto uma parcela significativa permanece sem classificação definida (30,42%).

Tabela 2 - Ocorrência de Paralisia Cerebral por tipo

| Tipo de paralisia cerebral | % |
|-----------------------------------|----------|
| Espástica bilateral | 45,42 |
| Espástica unilateral | 19,17 |
| Discinética | 2,08 |
| Atáxica | 2,92 |
| Não conhecido | 30,42 |

Fonte: Autor, adaptado de Peixoto et al, 2020

2.2.1 Paralisia Cerebral Espástica

A paralisia cerebral espástica, representando 64,59% dos casos quando somadas as formas bilateral e unilateral (Tabela 2), caracteriza-se pela lesão do neurônio motor superior, resultando em hipertonia muscular velocidade-dependente, hiperreflexia e presença de reflexos patológicos. A espasticidade manifesta-se clinicamente através do aumento da resistência ao movimento passivo, padrões de movimento estereotipados e tendência ao desenvolvimento de contraturas musculares.

A forma espástica bilateral apresenta comprometimento de ambos os hemisférios, frequentemente com maior acometimento dos membros inferiores. A forma espástica unilateral limita-se a um hemisfério, tipicamente com maior comprometimento do membro superior em relação ao inferior.

2.2.2 Paralisia Cerebral Discinética

A paralisia cerebral discinética, representando 2,08% dos casos (Tabela 2), resulta de lesões nos núcleos da base, particularmente no complexo estriatal. Caracteriza-se pela presença de movimentos involuntários, incluindo atetose, coreia e distonia. Estes movimentos são exacerbados pelo estresse emocional, esforço ou tentativas de movimento voluntário, apresentando redução durante o relaxamento e ausência durante o sono.

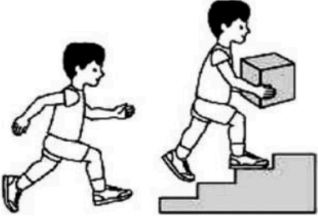
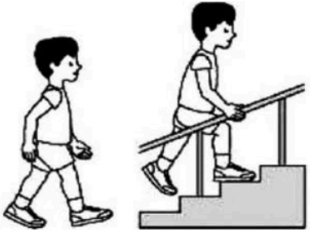
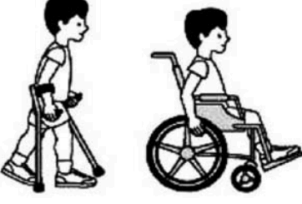
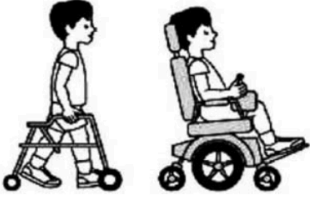
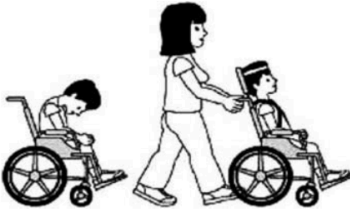
2.2.3 Paralisia Cerebral Atáxica

A paralisia cerebral atáxica constitui 2,92% dos casos (Tabela 2) e resulta de lesões cerebelares ou de suas vias aferentes e eferentes. Manifesta-se clinicamente através de incoordenação motora, dismetria, tremor intencional e alterações do equilíbrio. A marcha caracteriza-se por base alargada e instabilidade postural, com dificuldades na execução de movimentos precisos e coordenados.

2.2.4 Sistema de Classificação da Função Motora Grossa (GMFCS)

O Sistema de Classificação da Função Motora Grossa (Gross Motor Function Classification System – GMFCS) é um instrumento amplamente utilizado para avaliar e categorizar o nível de funcionalidade motora de indivíduos com paralisia cerebral. Desenvolvido pelo CanChild Centre for Childhood Disability Research, o GMFCS classifica as habilidades motoras grossas em cinco níveis, conforme apresentado na Figura 2, que variam desde a capacidade de caminhar sem limitações até a necessidade de uso de cadeira de rodas e assistência completa para mobilidade. Essa classificação baseia-se em aspectos como postura, equilíbrio, deslocamento e uso de dispositivos auxiliares, proporcionando um entendimento objetivo sobre as limitações e potencialidades motoras do paciente.

Figura 2 - Sistema de Classificação da Função Motora Grossa

| | |
|---|---|
|  | <p>Nível I Marcha independente sem limitações (domicílio e comunidade) Pula e corre Velocidade, coordenação e equilíbrio prejudicados</p> |
|  | <p>Nível II Andar no domicílio e na comunidade com limitações mesmo para superfícies planas Andar de gato em casa Dificuldade para pular e correr</p> |
|  | <p>Nível III Andar no domicílio e na comunidade com auxílio de muletas e andadores Sobe escadas segurando em corrimão Depende da função dos membros superiores para tocar a cadeira de rodas para longas distâncias</p> |
|  | <p>Nível IV Senta-se em cadeira adaptada Faz transferências com a ajuda de um adulto Andar com andador para curtas distâncias com dificuldades em superfícies irregulares Pode adquirir autonomia em cadeira de rodas motorizada</p> |
|  | <p>Nível V Necessita de adaptações para sentar-se É totalmente dependente em atividades de vida diária e em locomoção Podem tocar cadeira de rodas motorizada com adaptações.</p> |

Fonte: Sposito e Riberto, 2010

A representação visual apresentada na Figura 2 auxilia na compreensão dos critérios de classificação, permitindo uma interpretação mais clara das capacidades motoras em cada nível. Além disso, a utilização do GMFCS no contexto clínico e de pesquisa contribui para padronizar a comunicação entre profissionais de saúde, facilitar o acompanhamento evolutivo dos pacientes e apoiar a definição de estratégias terapêuticas individualizadas.

2.3 Alterações Posturais na Paralisia Cerebral

As alterações posturais na paralisia cerebral resultam de múltiplos fatores incluindo espasticidade (quando os músculos ficam muito rígidos e é difícil movimentá-los), fraqueza muscular, contraturas e alterações do controle motor. O comprometimento do sistema nervoso central interfere diretamente nos mecanismos de controle postural, resultando em padrões anormais de alinhamento corporal que afetam a funcionalidade e participação social (PAVÃO et al., 2021).

2.3.1 Planos Anatômicos e Controle Postural

O controle postural eficiente requer a integração de ajustes nos três planos anatômicos fundamentais. No plano sagital, ocorrem os movimentos de flexão e extensão; no plano frontal, os movimentos de adução e abdução; e no plano transversal, as rotações (PROSSER et al., 2020). Na paralisia cerebral, observa-se comprometimento multidirecional, com alterações posturais manifestando-se simultaneamente em múltiplos planos, dificultando a manutenção do alinhamento biomecânico adequado e a realização de ajustes posturais antecipatórios necessários para o movimento funcional (SANTAMARIA et al., 2020).

2.3.2 Prevalência das Alterações Posturais

Conforme demonstrado na Tabela 3, as alterações posturais na paralisia cerebral apresentam prevalências variadas, com destaque para a incapacidade de manter a cabeça na linha média (63%) e punhos fechados (35%). A persistência da resposta tônica cervical assimétrica em 33% dos casos evidencia a manutenção de reflexos primitivos que deveriam estar integrados, interferindo no desenvolvimento motor típico (MORGAN et al., 2021). As alterações dos membros, incluindo braços estendidos (25%) e pernas estendidas (24%), refletem os padrões espásticos característicos e a dificuldade na dissociação de movimentos (PATEL et al., 2020).

Tabela 3 - Alterações posturais observadas em crianças com paralisia cerebral

| Alteração Postural | % |
|--|----------|
| Incapacidade de manter a cabeça na linha média | 63 |
| Postura corporal assimétrica | 15 |
| Tronco e membros apoiados totalmente na superfície | 16 |
| Resposta tônica cervical assimétrica persistente | 33 |
| Braços estendidos | 25 |
| Pernas estendidas | 24 |
| Hiperextensão do pescoço e tronco | 11 |
| Punhos fechados | 35 |
| Abertura e fechamento sincronizado dos dedos | 19 |
| Dedos em abdução | 16 |

Fonte: Autor, adaptado de Yang et al, 2012.

A complexidade das alterações posturais observadas reflete o impacto multissistêmico da paralisia cerebral, onde a interação entre déficits primários (lesão neural) e secundários (contraturas, deformidades) resulta em padrões posturais atípicos que comprometem a funcionalidade. A identificação precoce e caracterização precisa destas alterações são fundamentais para o planejamento de intervenções terapêuticas individualizadas, visando otimizar o alinhamento postural e prevenir complicações músculo-esqueléticas secundárias (NOVAK et al., 2020; TE VELDE et al., 2021).

2.4 Tratamento de Pessoas com Paralisia Cerebral

O tratamento de pessoas com paralisia cerebral (PC) requer uma abordagem integrada e multidisciplinar, pois os comprometimentos funcionais associados à condição abrangem aspectos motores, posturais, cognitivos e sociais, afetando significativamente a autonomia e a participação nas atividades de vida diária. O trabalho conjunto de médicos, fisioterapeutas, terapeutas ocupacionais, fonoaudiólogos e psicólogos é fundamental para planejar intervenções individualizadas, que busquem reduzir complicações secundárias, melhorar a funcionalidade motora e cognitiva e fornecer suporte aos familiares ou cuidadores. A intervenção precoce é especialmente relevante, uma vez que a plasticidade cerebral nos primeiros anos de vida permite maximizar ganhos motores e prevenir limitações funcionais

graves, evidenciando a importância de estratégias terapêuticas intensivas e contínuas desde a infância (Novak, 2020).

O tratamento, portanto, deve ser contínuo, personalizado e baseado em evidências, integrando métodos convencionais e recursos tecnológicos inovadores, sempre com foco na promoção da autonomia, funcionalidade e qualidade de vida do indivíduo e de sua rede de apoio familiar. A combinação de terapias físicas, farmacológicas, cirúrgicas e educativas, articuladas em um plano coerente e multidisciplinar, demonstra ser a estratégia mais efetiva para lidar com os múltiplos desafios impostos pela PC, consolidando uma abordagem holística e centrada no paciente (Shumway-Cook, 2023).

2.5 Tecnologias de Análise Postural

A análise postural consiste na avaliação da posição e alinhamento do corpo em repouso ou em movimento, com o objetivo de identificar alterações musculoesqueléticas, desequilíbrios e padrões compensatórios. Essa análise é fundamental para o planejamento e monitoramento da evolução terapêutica, permitindo que profissionais da saúde ajustem intervenções de forma individualizada e acompanhem progressos ao longo do tempo (PAVÃO et al., 2021; GRAHAM et al., 2021).

2.5.1 Métodos Tradicionais

Os métodos tradicionais de avaliação postural incluem a avaliação visual clínica, fotogrametria bidimensional, análise radiográfica e sistemas de análise tridimensional.

Em especial a Fotogrametria bidimensional consiste na captura de imagens do corpo em posições padronizadas e posterior análise de ângulos e distâncias entre pontos anatômicos (ROBERTSON et al., 2021). Permite avaliações objetivas do alinhamento corporal, sendo menos invasiva que radiografias e mais acessível que sistemas 3D complexos. Um exemplo de software é o SAPO (Sistema de Avaliação Postural), que processa imagens digitais e fornece medidas de inclinação, desvio e ângulos articulares, facilitando a análise e registro de evolução postural ao longo do tempo (MARTINEZ et al., 2021).

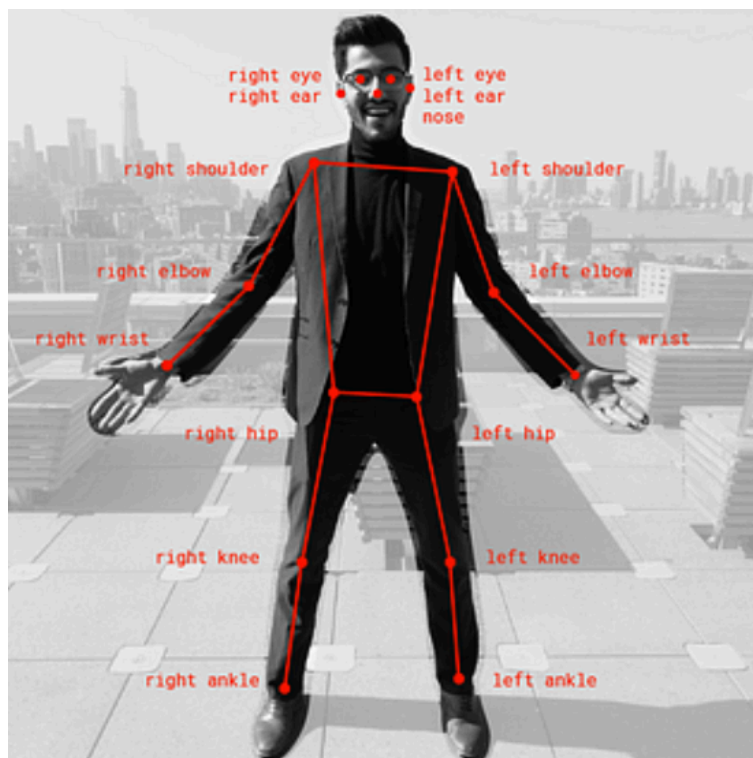
Embora precisos, esses métodos frequentemente requerem equipamentos especializados, podem ser demorados e apresentam custo elevado, limitando sua aplicação clínica rotineira.

2.5.2 Método baseado em Algoritmo de Detecção de Pontos-Chave

O desenvolvimento de algoritmos de visão computacional para detecção de pontos-chave corporais revolucionou a análise postural automatizada, permitindo calcular métricas quantitativas a partir dos pontos detectados. Avanços em redes neurais convolucionais e técnicas de aprendizado profundo possibilitaram sistemas capazes de identificar e rastrear pontos anatômicos específicos em tempo real, sem marcadores físicos ou equipamentos especializados (TOSHEV & SZEGEDY, 2014; CAO et al., 2017; SANDLER et al., 2018).

Alguns algoritmos mais simples apenas seguem os conceitos já existentes em métodos tradicionais ou softwares como o SAPO (Software para Avaliação Postural), que realiza análise postural via fotogrametria. No entanto, diferentemente dos métodos baseados em visão computacional, o SAPO não realiza detecção automática de pontos-chave: o avaliador marca manualmente os marcos anatômicos seguindo o protocolo do software (FERREIRA et al., 2010). O protocolo padrão utiliza cerca de 31 pontos para análises de validação, podendo chegar a 41 pontos possíveis distribuídos nas vistas anterior, posterior e laterais. A partir desses pontos, o SAPO calcula ângulos articulares, distâncias lineares, índices de assimetria, alinhamentos relativos ao prumo.

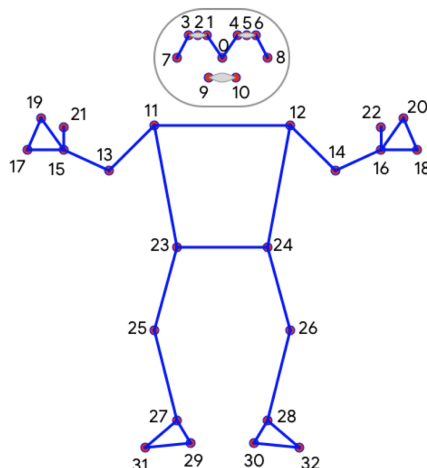
O PoseNet, desenvolvido pela equipe do Google, representa um marco nessa evolução tecnológica. Utilizando arquiteturas como MobileNetV2 e ResNet, o algoritmo detecta 17 pontos-chave corporais conforme a Figura 3, incluindo articulações principais e pontos de referência facial (PAPANDREOU et al., 2018; SANDLER et al., 2018). Sua implementação em TensorFlow.js permite execução diretamente em navegadores web, democratizando o acesso à análise postural.

Figura 3 - Topologia do PoseNet (17 pontos anatômicos)

Fonte: PAPANDREOU, G. et al, 2018.

O BlazePose representa uma evolução significativa na detecção de pontos-chave, expandindo a capacidade de rastreamento para 33 pontos anatômicos. O algoritmo utiliza uma arquitetura de detector-rastreador que primeiro localiza a região corporal na imagem e posteriormente identifica os pontos-chave específicos (BAZAREVSKY et al., 2020). As características principais do BlazePose incluem a detecção de 33 pontos anatômicos, conforme apresentado na Figura 4, com detalhamento na tabela 4, incluindo pontos faciais detalhados e extremidades digitais; Inferência otimizada com latência inferior a 20ms em dispositivos móveis; Funcionamento consistente sob diferentes condições de iluminação, oclusões parciais e variações de ambiente.

Figura 4 - Topologia do BlazePose com 33 pontos anatômicos



Fonte: BAZAREVSKY, V. et al, 2020.

A evolução de 17 para 33 pontos-chave amplia significativamente as possibilidades de análise postural detalhada. No contexto da paralisia cerebral, esta granularidade permite identificação de compensações posturais sutis e padrões de movimento atípicos que poderiam passar despercebidos em análises com menor resolução de pontos anatômicos.

Tabela 4 - Pontos-chave anatômicos detectados pelo BlazePose

| Índice | Ponto Anatômico | Região Corporal |
|--------|--|-----------------|
| 0 | Nariz | Face |
| 1 | Olho esquerdo (canto interno) | Face |
| 2 | Olho esquerdo | Face |
| 3 | Olho esquerdo (canto externo) | Face |
| 4 | Olho direito (canto interno) | Face |
| 5 | Olho direito | Face |
| 6 | Olho direito (canto externo) | Face |
| 7 | Orelha esquerda | Face |
| 8 | Orelha direita | Face |
| 9 | Boca (canto esquerdo) | Face |
| 10 | Boca (canto direito) | Face |
| 11 | Ombro esquerdo | Membro superior |
| 12 | Ombro direito | Membro superior |
| 13 | Cotovelo esquerdo | Membro superior |
| 14 | Cotovelo direito | Membro superior |
| 15 | Punho esquerdo | Membro superior |
| 16 | Punho direito | Membro superior |
| 17 | Dedo mínimo esquerdo (1ª articulação) | Mão |
| 18 | Dedo mínimo direito (1ª articulação) | Mão |
| 19 | Dedo indicador esquerdo (1ª articulação) | Mão |
| 20 | Dedo indicador direito (1ª articulação) | Mão |
| 21 | Polegar esquerdo (2ª articulação) | Mão |
| 22 | Polegar direito (2ª articulação) | Mão |
| 23 | Quadril esquerdo | Tronco |
| 24 | Quadril direito | Tronco |
| 25 | Joelho esquerdo | Membro inferior |
| 26 | Joelho direito | Membro inferior |
| 27 | Tornozelo esquerdo | Membro inferior |
| 28 | Tornozelo direito | Membro inferior |
| 29 | Calcanhar esquerdo | Pé |
| 30 | Calcanhar direito | Pé |
| 31 | Indicador do pé esquerdo | Pé |
| 32 | Indicador do pé direito | Pé |

Fonte: Autor, adaptado de BAZAREVSKY et al., 2020.

2.6 Métricas Posturais Quantitativas

O desenvolvimento de métricas posturais quantitativas fundamenta-se em princípios biomecânicos estabelecidos e parâmetros clinicamente relevantes para caracterização objetiva do status postural. Estas métricas proporcionam quantificação numérica precisa de alterações posturais, permitindo comparações sistemáticas entre indivíduos, monitoramento de progressão temporal e avaliação de eficácia terapêutica. A categorização das métricas em classes específicas facilita a interpretação clínica e organiza a análise postural de forma estruturada (Pearsall & Reid, 2020). A tabela 5 apresenta um resumo das métricas posturais quantitativas.

Tabela 5 - Classificação das métricas posturais quantitativas

| Tipo de Métrica | Descrição | Unidade |
|-----------------------------|---|-----------------------|
| Ângulos articulares | Relações angulares entre segmentos corporais adjacentes (flexão/extensão, abdução/adução) | Graus (°) |
| Inclinações segmentares | Orientação de segmentos corporais em relação a referências verticais | Graus (°) |
| Desnível segmentar | Orientação de segmentos corporais em relação a referências horizontal | Graus (°) |
| Desvios angulares relativos | Comparação de ângulos entre lados corporais ou em relação a valores normativos | Graus (°) |
| Distâncias intersegmentares | Separações lineares entre pontos anatômicos específicos | Centímetros (cm) |
| Deslocamentos relativos | Desvios de pontos anatômicos em relação a posições de referência ou eixos centrais | Centímetros (cm) ou % |
| Assimetrias bilaterais | Comparação de posicionamentos correspondentes entre lados direito e esquerdo | Centímetros (cm) ou % |

Fonte: Autor, baseado em PEARSALL & REID, 2020; ROBERTSON et al., 2021.

2.6.1 Métricas Angulares

As métricas angulares constituem a base fundamental da análise postural quantitativa, fornecendo informações precisas sobre orientações articulares e alinhamentos segmentares. Estas medidas baseiam-se em princípios trigonométricos aplicados às coordenadas dos pontos-chave detectados, permitindo cálculo automatizado de ângulos com alta reprodutibilidade.

Os ângulos articulares representam as relações angulares entre segmentos corporais adjacentes, refletindo o posicionamento relativo de estruturas anatômicas específicas. Na análise postural de crianças com paralisia cerebral, os ângulos articulares primários incluem

flexão/extensão do quadril, joelho e tornozelo, bem como abdução/adução do quadril. Estes ângulos são particularmente relevantes para caracterização de padrões espásticos típicos, como flexão excessiva de joelhos na diparesia ou assimetrias angulares na hemiparesia. O cálculo utiliza vetores formados por trios de pontos anatômicos, aplicando produtos vetoriais para determinação angular precisa (ROBERTSON et al., 2021).

As inclinações segmentares quantificam a orientação de segmentos corporais individuais em relação a referências verticais ou horizontais. Estas métricas são fundamentais para identificação de compensações posturais e desvios de neutralidade. A inclinação do tronco, por exemplo, indica deslocamentos anteriores, posteriores ou laterais em relação à vertical, fornecendo informações sobre estratégias de equilíbrio e controle postural. Inclinações da cabeça revelam protrusão cefálica ou rotações cervicais, enquanto inclinações pélvicas indicam anteversão ou retroversão que podem afetar significativamente o alinhamento de membros inferiores (KENDALL et al., 2022).

Os desvios angulares relativos comparam ângulos correspondentes entre lados corporais ou em relação a valores normativos estabelecidos. Estas métricas são particularmente úteis para quantificação de assimetrias posturais características da hemiparesia, onde diferenças angulares entre lados afetado e não-afetado podem ser precisamente mensuradas. Desvios em relação a padrões normativos permitem classificação de severidade e identificação de alterações clinicamente significativas (SAHRMANN et al., 2021).

2.6.2 Métricas de Distância

As métricas de distância fornecem informações quantitativas sobre relações espaciais entre pontos anatômicos e segmentos corporais, complementando as análises angulares com dados de posicionamento absoluto e relativo.

As distâncias intersegmentares medem separações lineares entre pontos anatômicos específicos, oferecendo informações sobre proporções corporais e alinhamentos posturais. Distâncias como separação entre ombros, largura pélvica e comprimento de membros proporcionam contexto antropométrico para interpretação de outras métricas. Em crianças com paralisia cerebral, alterações nestas distâncias podem indicar crescimento assimétrico, contraturas progressivas ou compensações posturais adaptativas (RODBY-BOUSQUET et al., 2021).

Os deslocamentos relativos quantificam desvios de pontos anatômicos em relação a posições de referência ou eixos corporais centrais. O deslocamento lateral da cabeça em relação ao centro de gravidade, por exemplo, indica estratégias compensatórias para manutenção do equilíbrio ou assimetrias neuromotoras. Deslocamentos anteriores/posteriores revelam alterações no alinhamento sagital que podem impactar a eficiência biomecânica e aumentar demandas energéticas para manutenção postural (SHUMWAY-COOK & WOOLLACOTT, 2023).

As assimetrias bilaterais comparam posicionamentos correspondentes entre os lados direito e esquerdo do corpo, fornecendo quantificação objetiva de desequilíbrios laterais. Estas métricas são fundamentais para caracterização de hemiparesia, onde assimetrias significativas em altura de ombros, posicionamento de quadris ou alinhamento de membros podem ser precisamente documentadas. A quantificação de assimetrias permite monitoramento de progressão e avaliação de eficácia de intervenções terapêuticas direcionadas (GRAHAM et al., 2021).

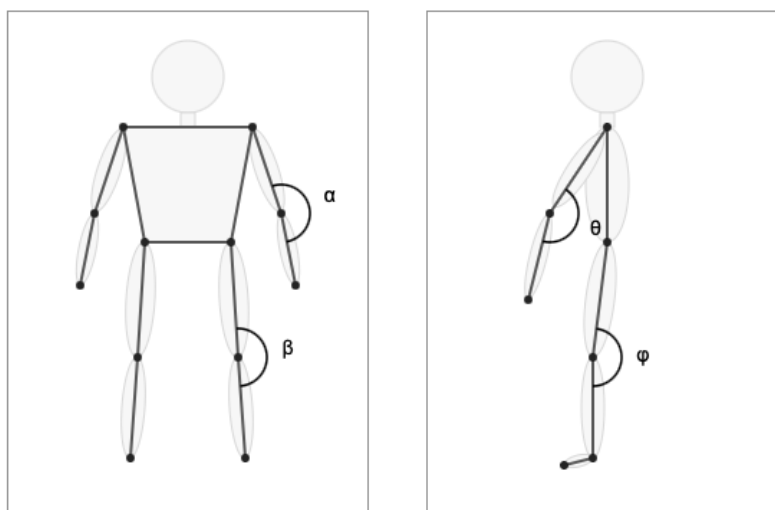
2.6.3 Cálculo de Ângulos Articulares

Os ângulos articulares são calculados utilizando coordenadas de três pontos anatômicos que definem a articulação de interesse. Para um ângulo formado pelos pontos A, B e C, onde B representa o vértice articular, utiliza-se a fórmula do produto escalar entre vetores (ROBERTSON et al., 2021), com:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{AB} \cdot \vec{BC}}{\|\vec{AB}\| \|\vec{BC}\|}\right) \quad (1)$$

Onde \vec{AB} e \vec{BC} são os vetores formados pelos segmentos adjacentes, e $|\vec{AB}|$, $|\vec{BC}|$ representam suas magnitudes respectivas. Na Figura 6, observa-se a representação dos ângulos articulares em dois planos anatômicos distintos.

Figura 6 - Ângulos articulares no plano Frontal e Sagital



Fonte: autor

No plano frontal (imagem à esquerda da Figura 6), são destacados os ângulos α e β , que correspondem respectivamente às articulações do cotovelo e joelho quando visualizadas frontalmente. No plano sagital (imagem à direita da Figura 6), os ângulos θ e φ representam as mesmas articulações em vista lateral.

2.6.4 Cálculo de Desvios e Inclinações Segmentares

As inclinações segmentares quantificam a orientação de um segmento corporal em relação à vertical ou horizontal. Para um segmento definido pelos pontos P1 (x_1, y_1) e P2 (x_2, y_2), a inclinação em relação à vertical é calculada por (KENDALL et al., 2022):

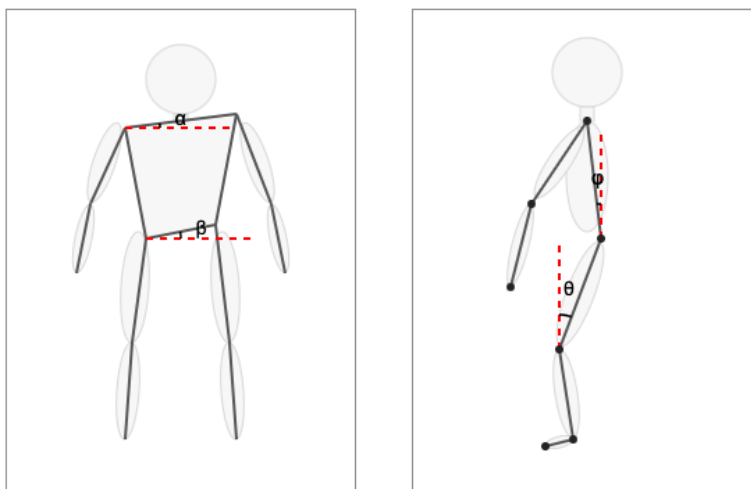
$$\alpha = \arctan\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right) \quad (2)$$

Assim como o desvio em relação à horizontal, por:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (3)$$

Onde $x_2 - x_1$ representa o deslocamento horizontal entre os pontos extremos do segmento e $y_2 - y_1$ o deslocamento vertical correspondente. Esta formulação matemática utiliza a função arco tangente para converter a razão entre as diferenças de coordenadas no ângulo de inclinação segmentar. A Figura 7 ilustra a metodologia para análise das orientações segmentares em dois planos distintos.

Figura 7 - Desvios e inclinações segmentares no plano Frontal e Sagital



Fonte: Autor

No plano frontal (imagem à esquerda da Figura 7), são quantificados os desníveis segmentares em relação à horizontal, representados pelas linhas tracejadas vermelhas que indicam os desvios dos segmentos corporais. No plano sagital (imagem à direita da Figura 7), calculam-se as inclinações segmentares em relação à vertical, conforme descrito na Equação 2, onde a função arco tangente das coordenadas dos pontos extremos P1 e P2 permite determinar o ângulo de orientação de cada segmento corporal em relação ao eixo de referência vertical.

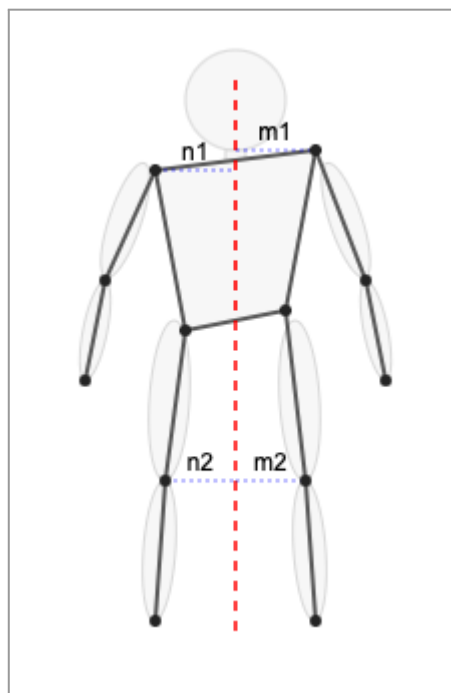
2.6.5 Cálculo de Índices de Assimetria

Os índices de assimetria bilateral comparam posicionamentos correspondentes entre os lados direito e esquerdo do corpo. Para duas medidas correspondentes m (lado direito) e n (lado esquerdo), utiliza-se (GRAHAM et al., 2021):

$$IA = \frac{m - n}{\frac{m+n}{2}} \times 100\% \quad (4)$$

Esta fórmula expressa a diferença percentual normalizada, onde valores próximos a zero indicam simetria e valores elevados indicam assimetria pronunciada. Na Figura 8, é possível visualizar os componentes de m e n .

Figura 8 - Distâncias relativas ao eixo médio



Fonte: autor

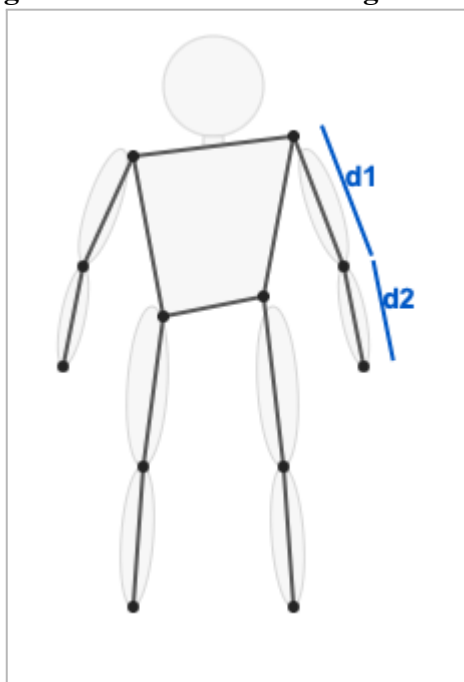
Para esse cálculo, como apresentado na Figura 8, considera-se o eixo médio, uma linha vertical posicionada centralmente em relação aos pontos de apoio do corpo, que serve como referência para medir as distâncias relativas de cada lado. (MARTINEZ et al., 2021).

2.6.6 Cálculo de Distâncias Intersegmentares

As distâncias lineares entre pontos anatômicos são calculadas utilizando a fórmula euclidiana para espaço bidimensional (PEARSALL; REID, 2020):

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5)$$

Onde (x_1, y_1) e (x_2, y_2) representam as coordenadas dos dois pontos de interesse e 'd' representa a distância euclidiana entre esses dois pontos. Na figura 9, é possível ver a distância entre os pontos do ombro direito e cotovelo direito (d_1) e cotovelo direito e mão direita (d_2).

Figura 9 - Distâncias Intersegmentares

Fonte: autor

2.6.7 Cálculo da Postura Média Geral

Em análises posturais baseadas em pontos anatômicos, cada postura pode ser representada como um vetor contendo as coordenadas espaciais dos marcadores posicionados em referências anatômicas específicas. Para estabelecer um padrão postural de referência, calcula-se inicialmente a posição média de cada ponto anatômico ao longo de múltiplas observações (KENDALL et al., 2019). Dado um conjunto de N posturas com K pontos anatômicos, a posição média de cada ponto é definida por:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_{i,j}, \quad i = 1, \dots, K \quad (6)$$

Esse conjunto de pontos médios constitui a postura média geral, servindo como referência anatômica padrão para comparações subsequentes.

Para avaliar o alinhamento postural de novas observações em relação a essa referência, utiliza-se a distância euclidiana entre os pontos anatômicos detectados e suas posições médias correspondentes, conforme:

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^K (v_{i,j} - \bar{v}_i)^2} \quad (7)$$

A partir dessa métrica de distância, define-se o Percentage of Correct Keypoints (PCK), que quantifica a proporção de pontos anatômicos detectados dentro de um limiar aceitável:

$$PCK = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbb{1}(d_i \leq \alpha \cdot L) \quad (8)$$

Onde “1” é a função indicadora (1 se verdadeiro, 0 se falso), α é o fator de tolerância (tipicamente 0.1 a 0.2) e L é uma medida normalizadora baseada em dimensões anatômicas. Complementarmente, o Mean Average Precision (mAP) fornece uma avaliação mais abrangente ao calcular a precisão média sobre múltiplos limiares:

$$mAP = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T PCK_k(\alpha_t) \right) \quad (9)$$

Onde T representa o número de limiares testados e PCK_k é a precisão do k -ésimo ponto anatômico no limiar t . Essa métrica permite uma análise robusta da consistência postural ao avaliar o desempenho em diferentes níveis de tolerância. Essas métricas são fundamentais para quantificar desvios posturais, validar protocolos de avaliação e monitorar a evolução do alinhamento corporal em contextos clínicos (SAHRMANN et al., 2017).

2.7 Validação Estatística em Avaliação Clínica

A integração entre análises estatísticas robustas e avaliação clínica em fisioterapia é essencial para garantir a confiabilidade dos achados e a tomada de decisão baseada em evidências. Em condições neurológicas, como a paralisia cerebral, o uso de métodos estatísticos como ANOVA, testes post-hoc e medidas de tamanho de efeito possibilita diferenciar padrões funcionais, quantificar progressos terapêuticos e validar instrumentos clínicos de mensuração. Essa abordagem aumenta a precisão na interpretação dos resultados, permitindo distinguir mudanças clinicamente significativas da variabilidade amostral. Além disso, a utilização combinada de significância estatística e relevância clínica assegura maior validade externa aos estudos, impactando diretamente protocolos de reabilitação e estratégias de intervenção individualizada (PORTNEY, 2020; FIELD, 2022; SULLIVAN, 2012).

2.7.1 Análise de Variância (ANOVA) Unifatorial

A análise de variância unifatorial constitui método estatístico fundamental para comparar simultaneamente múltiplos grupos clínicos. O teste avalia se as diferenças observadas entre os grupos podem ser explicadas pela variabilidade natural dos dados ou se indicam diferenças reais entre os grupos. Para isso, calcula-se a estatística F como a razão entre a variância entre grupos e a variância dentro dos grupos (intragrupos) (FIELD, 2022).

$$F = \frac{MS_e}{MS_w} = \frac{SS_e/(k - 1)}{SS_w/(N - k)} \quad (10)$$

Onde:

- MS_e = Quadrado médio entre grupos
- MS_w = Quadrado médio intragrupos
- SS_e = Soma de quadrados entre grupos
- SS_w = Soma de quadrados intragrupos
- k = número de grupos
- N = número total de observações

A soma de quadrados entre grupos é calculada por (MONTGOMERY, 2020):

$$SS_e = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (11)$$

Onde n_i é o tamanho de cada grupo, \bar{x}_i é a média do grupo i , e \bar{x} é a média geral.

A soma de quadrados intragrupos é calculada por:

$$SS_w = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (12)$$

Onde x_{ij} representa cada observação individual no grupo i .

O valor p é a probabilidade de que uma variável aleatória F seja maior ou igual ao F observado.

O nível de significância $p < 0,05$ representa critério amplamente aceito na literatura médica para determinação de diferenças estatisticamente relevantes, fornecendo base objetiva para validação de ferramentas diagnósticas em paralisia cerebral (ALTMAN; BLAND, 2021).

2.7.2 Teste Post-hoc Tukey HSD

Quando a ANOVA indica diferenças significativas ($p < 0,05$), o teste Tukey HSD identifica especificamente quais pares de grupos diferem significativamente. A diferença honestamente significativa é calculada por (TUKEY, 1949):

$$HSD = q(\alpha, k, df) \sqrt{\frac{MS_w}{n}} \quad (13)$$

Onde:

- $q(\alpha, k, df)$ = valor crítico da distribuição Studentized Range
- α = nível de significância (0,05)
- k = número de grupos
- df = graus de liberdade do erro ($N-k$)
- MS_w = Quadrado médio intragrupos do ANOVA
- n = tamanho do grupo (quando grupos têm tamanhos iguais)

Para grupos com tamanhos diferentes, utiliza-se:

$$HSD = q(\alpha, k, df) \sqrt{\frac{MS_w}{2} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (14)$$

Onde n_i e n_j são os tamanhos dos grupos sendo comparados.

2.7.3 Tamanho de Efeito ‘d’ de Cohen

O ‘d’ de Cohen quantifica a magnitude prática das diferenças observadas entre dois grupos, complementando a significância estatística com informação sobre relevância clínica. É calculado pela diferença padronizada entre médias (COHEN, 1988):

$$d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s} \quad (15)$$

Onde \bar{x}_1 e \bar{x}_2 são as médias dos dois grupos, e s é o desvio padrão combinado calculado por:

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (16)$$

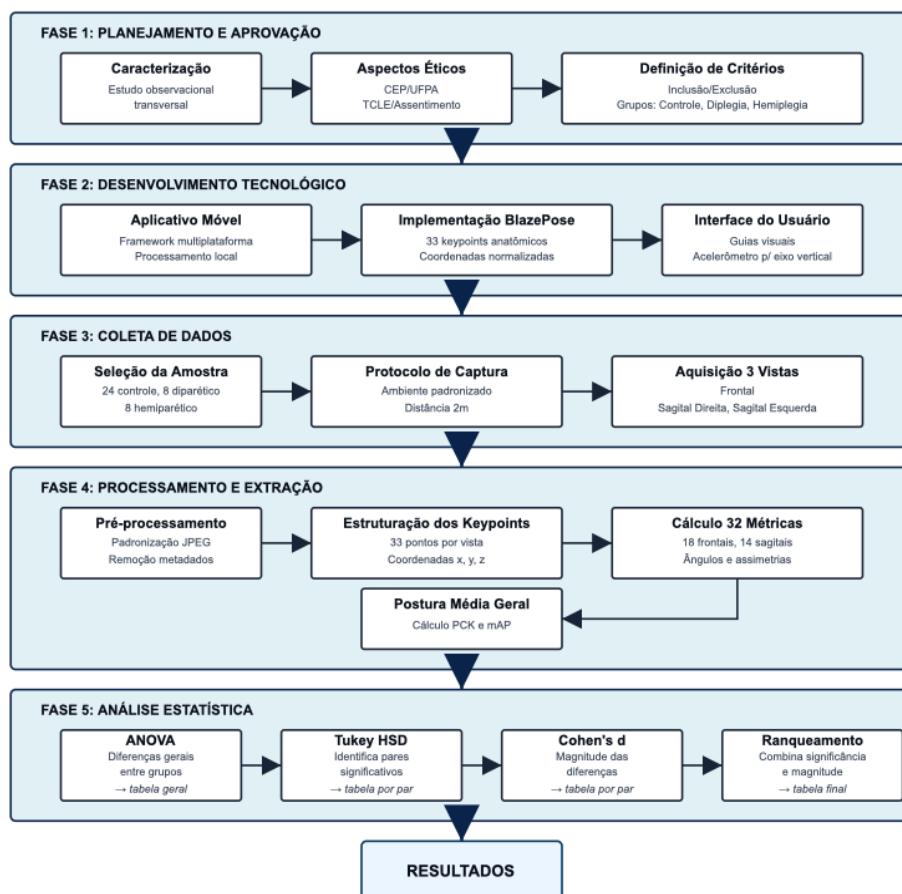
Onde s_1^2 e s_2^2 são as variâncias dos grupos, e n_1 e n_2 são os tamanhos amostrais respectivos.

Os critérios interpretativos estabelecidos são: pequeno ($d = 0,2$), médio ($d = 0,5$) e grande ($d = 0,8$), fornecendo referencial para avaliação da importância clínica dos achados em fisioterapia (SULLIVAN; FEINN, 2012).

3. METODOLOGIA

O objetivo geral deste estudo visa investigar e validar métricas posturais quantitativas automatizadas para avaliação objetiva da severidade postural em crianças e adolescentes com paralisia cerebral, focando na quantificação de alterações posturais características da condição e fornecendo dados objetivos para apoio à documentação clínica e monitoramento da evolução terapêutica, com auxílio de aplicativo móvel com algoritmo de estimativa de pose 2D. O sistema automatizado desenvolvido para auxiliar no processo investigativo foi implementado através do algoritmo BlazePose, em um aplicativo móvel, para extração de 33 pontos anatômicos (pontos-chave) corporais, a partir dos quais 31 métricas posturais quantitativas foram calculadas. Para desenvolvimento do estudo, um total de 40 participantes foram selecionados entre pacientes (crianças e adolescentes) do departamento de Fisioterapia do Hospital Universitário Bettina Ferro de Souza da Universidade Federal do Pará sendo, 24 participantes com desenvolvimento motor típico e 16 participantes com diagnóstico de paralisia cerebral, permitindo a obtenção dos dados, cálculos das métricas posturais e análise estatística como demonstrados na Figura 10.

Figura 10 - Fluxo Metodológico da Pesquisa



Fonte: Autor

3.1 Fase de Planejamento e Aprovação

3.1.1 Caracterização

O estudo caracterizou-se como observacional, transversal e quantitativo, realizado em crianças e adolescentes com diagnóstico de paralisia cerebral e com desenvolvimento motor típico, com o objetivo de analisar diferenças posturais e funcionais em um único momento temporal. A amostra foi composta por 40 participantes, sendo 16 indivíduos com paralisia cerebral; 8 com diparesia espástica e 8 com hemiparesia espástica; e 24 participantes do grupo controle, com desenvolvimento motor típico. Os participantes foram selecionados entre pacientes (crianças e adolescentes) do departamento de Fisioterapia do Hospital Universitário Bettina Ferro de Souza, da Universidade Federal do Pará, abrangendo a faixa etária entre 4 e 14 anos e ambos os sexos, sem distinção de cor de pele ou etnia.

3.1.2 Aspectos Éticos

O estudo foi previamente aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos do Instituto de Ciências da Saúde da Universidade Federal do Pará (CEP/ICS/UFPA) com o parecer 6.603.015. Todos os responsáveis pelos participantes assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) ou Assentimento, assegurando ciência dos objetivos e procedimentos da pesquisa. O anonimato e a privacidade dos participantes foram garantidos conforme as normas da Resolução CNS nº 466/2012.

3.1.3 Definição de Critérios de Amostragem

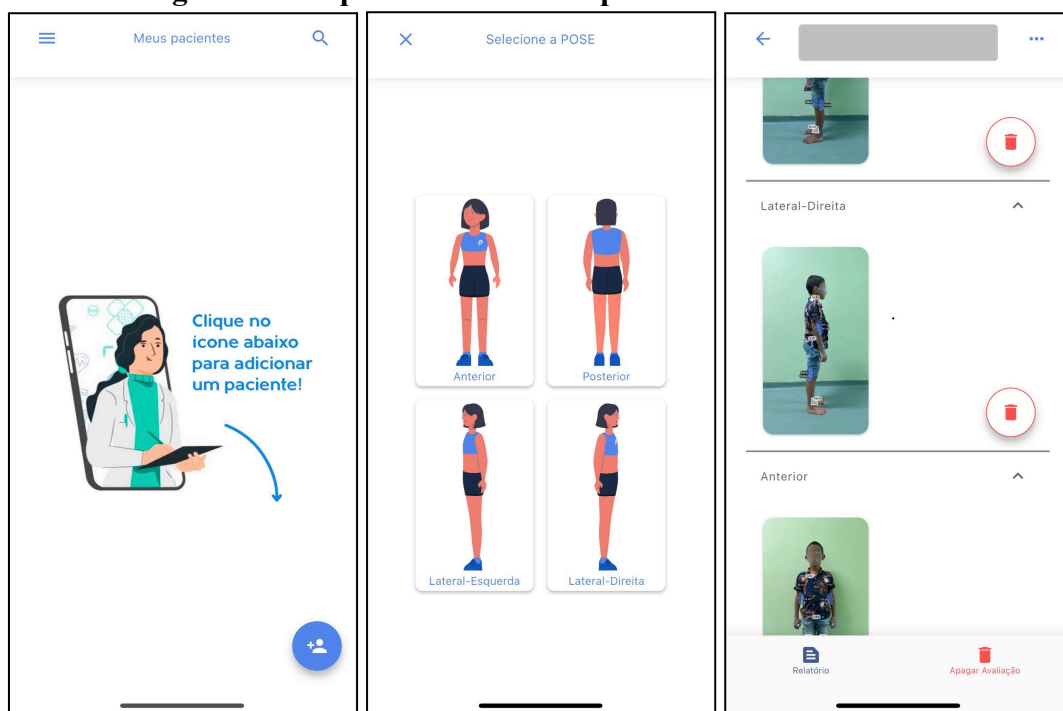
A seleção dos participantes foi realizada com base em critérios específicos de inclusão e exclusão. Para o grupo com paralisia cerebral, os critérios de inclusão incluíram diagnóstico confirmado de paralisia cerebral, idade entre 4 e 14 anos, ambos os sexos e assinatura do TCLE ou Assentimento e classificados no Sistema de Classificação da Função Motora Grossa (GMFCS) de I a III, o que caracteriza de uma forma geral pacientes capazes de deambular sem ajuda externa. Os critérios de exclusão abrangeram presença de outras doenças neurológicas, lesões ortopédicas que impedissem a realização dos testes, amputações nos membros inferiores, histórico de acidente vascular cerebral, deficiência visual, impossibilidade de deambular ou recusa em assinar o TCLE/Assentimento. Para o grupo controle, os critérios de inclusão foram desenvolvimento neuromotor típico, ausência de deficiências físicas, sensoriais ou cognitivas, idade entre 4 e 14 anos, ambos os sexos e assinatura do TCLE/Assentimento.

3.2 Fase de Desenvolvimento Tecnológico

3.2.1 Aplicativo Móvel

O desenvolvimento tecnológico do estudo concentrou-se na criação de um aplicativo móvel capaz de capturar e analisar imagens corporais para avaliação postural de crianças e adolescentes, de forma precisa, eficiente e acessível. O aplicativo foi concebido para auxiliar no processo de coleta de dados dos participantes da pesquisa e foi desenvolvido em Flutter, utilizando a linguagem Dart, em uma versão proprietária do Pose Health adaptada pelo autor para fins de pesquisa. A plataforma foi planejada para funcionar em dispositivos iOS e Android, com integração nativa à câmera e processamento local de imagens, garantindo compatibilidade multiplataforma e preservação da privacidade dos participantes. A Figura 11 apresenta algumas telas gerais de funcionamento do aplicativo.

Figura 11 - Capturas de Tela do aplicativo Pose Health



Fonte: Autor

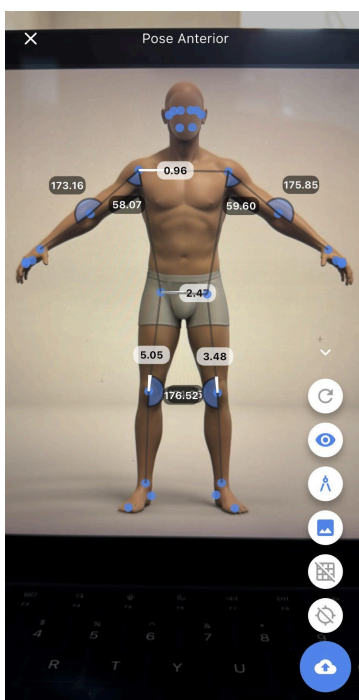
3.2.2 Implementação do BlazePose

O aplicativo móvel Pose Health foi adaptado para incorporar o algoritmo BlazePose, responsável pela detecção de 33 pontos-chave corporais. A implementação foi realizada em Flutter, utilizando o pacote 'google_mlkit_pose_detection' (flutter-ml.dev, 2025), que fornece integração com a API ML Kit para visão computacional (GOOGLE, 2025), garantindo processamento local eficiente em dispositivos iOS e Android.

As coordenadas dos pontos-chave obtidas pelo BlazePose a partir das imagens são normalizadas (0 a 1), permitindo análise da postura e detecção de alterações funcionais, sendo que essas coordenadas relativas são calculadas em relação ao tamanho da imagem, dessa forma, é possível através de código desenhar os pontos sobre a imagem, como demonstrado na Figura 12.

Além disso, o aplicativo possui funcionalidades de exportação das imagens e dos pontos-chave, possibilitando análise posterior em softwares estatísticos. A implementação do ML Kit permite processamento em tempo real, aproveitando o hardware nativo dos dispositivos, e reduz a necessidade de conexão com servidores externos, preservando a privacidade dos dados dos participantes e garantindo maior eficiência no fluxo de coleta de informações para pesquisa.

Figura 12 - Tela de visualização dos pontos obtidos após captura de imagem

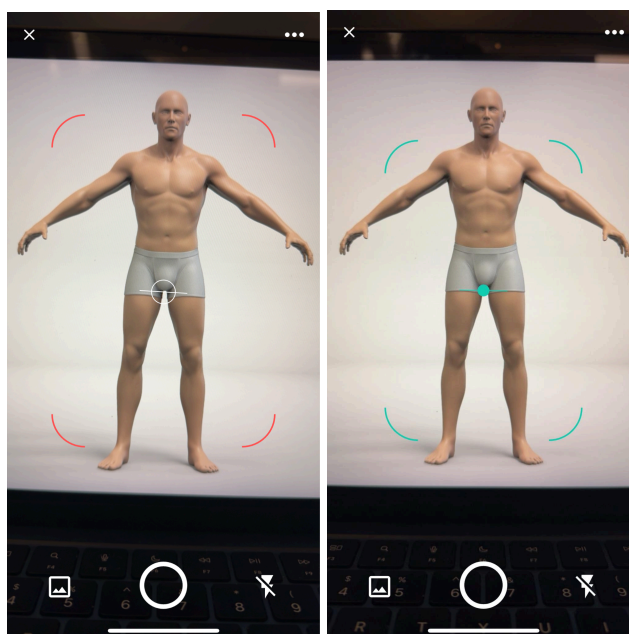


Fonte: Autor

3.2.3 Interface do Usuário

A interface foi projetada para guiar o posicionamento da câmera e garantir fotos estáveis, prevenindo capturas com inclinação do smartphone. O acelerômetro do dispositivo foi utilizado para calcular o eixo médio vertical, aplicando uma técnica de média móvel para suavização dos sinais e maior precisão nos cálculos de desníveis, inclinações e assimetrias corporais. Guias visuais e feedback em tempo real garantem qualidade das capturas como demonstrado na Figura 13 (onde verde indica que o sensor do acelerômetro está perfeitamente alinhado ao centro de gravidade do smartphone), permitindo coleta consistente e confiável de dados para análise postural.

Figura 13 - Indicador visual de inclinação do acelerômetro



Fonte: autor

3.3 Fase de Coleta de Dados

3.3.1 Seleção da Amostra

A amostra foi composta por participantes divididos em três grupos: grupo controle, diparesia espástica e hemiparesia espástica. Os indivíduos foram selecionados de acordo com critérios clínicos previamente estabelecidos na etapa de definição de critérios de amostragem, garantindo a representatividade dos diferentes fenótipos de paralisia cerebral e permitindo a comparação com padrões posturais típicos de desenvolvimento neuromotor normal.

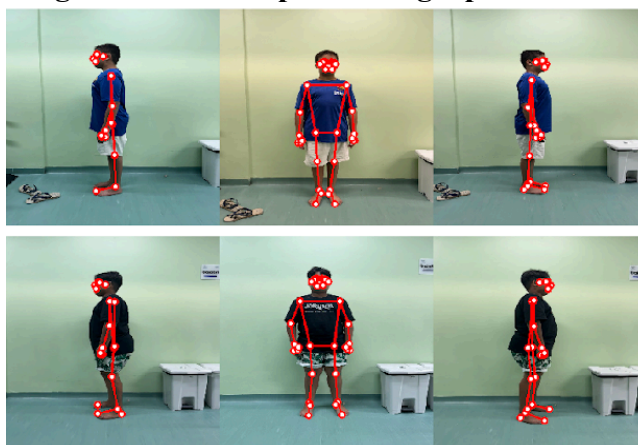
3.3.2 Protocolo de Captura de Imagens

O protocolo de captura de imagens foi padronizado para assegurar a qualidade e a reprodutibilidade das mesmas. As fotografias foram realizadas utilizando um iPhone 15 Pro por meio do aplicativo Pose Health adaptado para a pesquisa, que integra a rede neural BlazePose para extração automática dos pontos-chave. A coleta ocorreu em ambiente controlado, com iluminação uniforme e fundo de cor neutra, de modo a facilitar a identificação dos segmentos corporais.

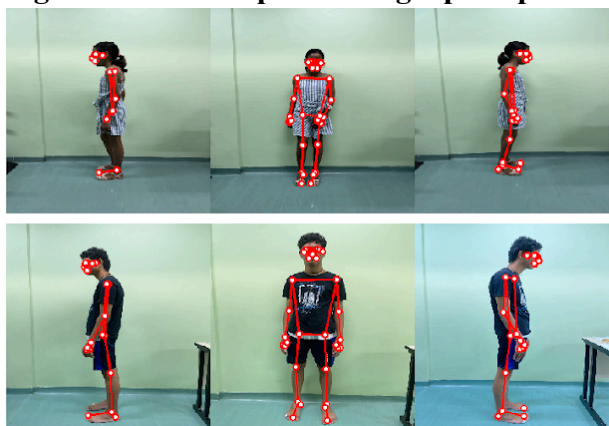
A câmera foi posicionada a uma distância aproximada de 2 metros dos participantes e ajustada à altura centralizada na região abdominal, visando evitar distorções e garantir enquadramento adequado de todo o corpo. Foram fornecidas orientações para que os participantes utilizassem roupas justas e contrastantes em relação ao fundo, permitindo uma detecção mais precisa dos pontos anatômicos. Além disso, os indivíduos foram instruídos a adotar uma postura neutra e natural, com membros visíveis e sem obstruções, garantindo maior consistência na extração dos dados.

3.3.3 Aquisição em Três Vistas

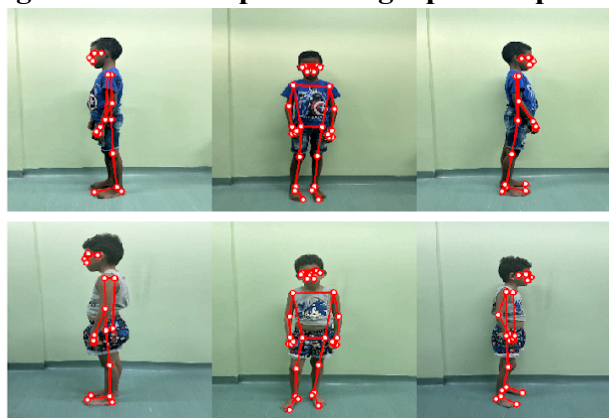
A aquisição das imagens foi realizada em três vistas padronizadas: frontal, lateral esquerda e lateral direita. Essa abordagem permitiu avaliar a postura corporal de forma mais abrangente e possibilitou a extração precisa dos 33 pontos-chave anatômicos detectados pelo sistema. Esses pontos foram distribuídos entre cabeça e pescoço, tronco superior, tronco inferior, membros superiores e membros inferiores, permitindo mapear a postura de forma detalhada. As Figuras 14, 15 e 16 apresentam exemplos de imagens em três vistas obtidas.

Figura 14 - Participantes do grupo Controle

Fonte: Autor

Figura 15 - Participantes do grupo Diparesia

Fonte: Autor

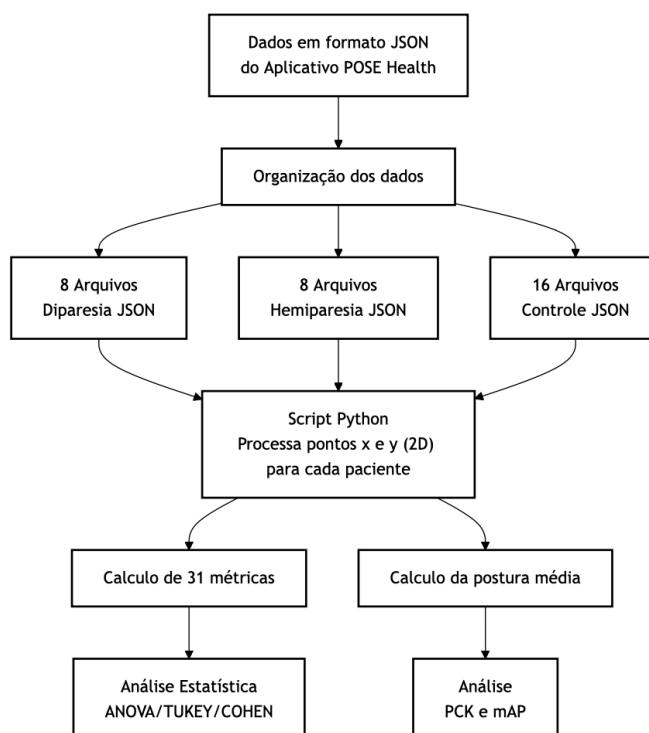
Figura 16 - Participantes do grupo hemiparesia

Fonte: Autor

3.4 Fase de Processamento e Extração

Essa fase envolve a organização, estruturação e processamento dos dados capturados pelo aplicativo POSE Health, incluindo a categorização dos participantes por grupo clínico e o cálculo automatizado das 31 métricas posturais, assim como o cálculo da postura média, demonstrados na Figura 17, para posterior análise estatística.

Figura 17 - Diagrama de Processamento de Extração



3.4.1 Pré-processamento dos dados

O pré-processamento consistiu na organização manual dos arquivos JSON exportados do aplicativo Pose em pastas específicas por grupo clínico dentro do projeto do TC. Esta estruturação em pastas permite que o código Python identifique automaticamente o grupo clínico de cada participante com base na pasta atual durante o processamento. Para cada paciente, foi gerado um único arquivo JSON contendo os dados das três vistas analisadas, totalizando 40 arquivos.

A organização final resultou em três pastas distintas: Controle (24 arquivos JSON), Hemiparesia (8 arquivos JSON) e Diparesia (8 arquivos JSON), facilitando tanto o gerenciamento quanto o processamento automatizado dos dados por grupo clínico.

3.4.2 Estruturação dos pontos-chave

Após a organização inicial, os dados dos participantes foram reestruturados em arquivos JSON, que consolidam todas as informações necessárias para a análise postural. Cada arquivo contém a chave "patient_id", garantindo a identificação anônima do participante, "type", que indica o grupo clínico ao qual o indivíduo pertence: Diparesia ("palsy-di"), Hemiparesia ("palsy-hemi") ou Controle ("control"), e a chave "keypoints", que armazena os 33 pontos-chave anatômicos detectados em cada uma das três vistas padronizadas: Frontal ("center"), Lateral Esquerda ("left") e Lateral Direita ("right"). Essa estrutura permite representar de forma completa a postura de cada participante e organiza os dados de forma padronizada, facilitando o acesso e a manipulação automatizada das informações.

Dentro de cada keypoint, estão presentes as coordenadas tridimensionais "x", "y" e "z", que descrevem a posição de cada ponto anatômico no espaço. Apesar de o eixo "z" estar disponível nos dados, neste trabalho a análise será realizada apenas com as coordenadas "x" e "y", pois o foco da estimativa postural é bidimensional, concentrando-se na projeção 2D da postura estimada. Essa decisão permite simplificar a análise sem comprometer a interpretação dos padrões posturais relevantes para os grupos clínicos estudados.

Todos os arquivos são gerados automaticamente pelo sistema e estruturados de forma consistente, garantindo que cada participante tenha um arquivo único com todos os keypoints organizados por vista. Essa organização detalhada fornece uma base confiável para o cálculo automatizado das 31 métricas posturais desenvolvidas, possibilitando comparações analíticas entre os grupos de Diparesia, Hemiparesia e Controle. A estrutura do arquivo JSON pode ser observada na Figura 18.

Figura 18 - Dados estruturados em JSON

```
{
  "patient_id": "anonimo_001",
  "type": "palsy-di",
  "keypoints": {
    "center": [
      {
        "x": 0.5036339163780212,
        "y": 0.16905172169208527,
        "z": -0.5277925729751587
      },
      {
        "x": 0.5165392756462097,
        "y": 0.15698274970054626,
        "z": -0.49184516072273254
      }
    ]
    // ... demais 31 pontos-chave da vista frontal
  },
  "left": [
    {
      "x": 0.4088520407676697,
      "y": 0.15481217205524445,
      "z": -0.2605528235435486
    }
    // ... 33 pontos-chave da vista lateral esquerda
  ],
  "right": [
    {
      "x": 0.5949205756187439,
      "y": 0.157252237200737,
      "z": -0.2077106088399887
    }
    // ... 33 pontos-chave da vista lateral direita
  ]
}
```

Fonte: Autor

3.4.3 Cálculo das 31 Métricas

O cálculo das métricas posturais foi realizado utilizando diversos scripts Python, desenvolvidos especificamente para implementar cada uma das fórmulas matemáticas correspondentes. A partir dos 33 pontos-chave extraídos em cada uma das três vistas padronizadas pelo aplicativo Pose Health, os dados foram processados para gerar todas as medições de forma automatizada e padronizada.

As métricas derivadas da vista frontal englobam dezoito medições, incluindo ângulos articulares dos joelhos, desníveis segmentares da pelve, ombros, cotovelos, punhos, joelhos, tornozelos e orelhas, inclinações do tronco e da cabeça em relação à vertical, bem como índices de assimetria bilateral entre lados direito e esquerdo para ombros, quadris, joelhos, cotovelos, punhos e orelhas. Os ângulos articulares foram calculados com base na Equação 1,

utilizando os vetores formados pelos três pontos anatômicos que definem cada articulação. Os desníveis segmentares e inclinações foram obtidos a partir das equações 2 e 3, que permitem calcular a orientação dos segmentos corporais em relação aos eixos vertical e horizontal. Os índices de assimetria bilateral foram determinados pela Equação 4, expressando a diferença percentual normalizada entre lados correspondentes.

As métricas derivadas das vistas sagitais, totalizando quatorze medições, englobam ângulos articulares do joelho, cotovelo e ombro, bem como inclinações da cabeça, tronco, pelve e tornozelos em relação à vertical. Os ângulos articulares sagitais foram calculados com a Equação 1, considerando os vetores formados pelos três pontos que definem cada articulação, enquanto as inclinações segmentares utilizaram a Equação 2, com a função arco tangente das coordenadas dos extremos de cada segmento.

Todos os cálculos foram realizados automaticamente, assegurando reprodutibilidade e padronização. As medições foram estruturadas em tabelas organizadas por participante, vista anatômica e grupo clínico, fornecendo uma base consistente para análise descritiva comparativa e subsequente avaliação quantitativa dos padrões posturais observados.

Foram estabelecidos valores de referência (média \pm desvio padrão) para cada uma das 31 métricas posturais por subtipo de paralisia cerebral, fornecendo base quantitativa para interpretação clínica e documentação padronizada da severidade postural. Estes valores constituem uma base de dados normativos que pode ser utilizada por profissionais de saúde para avaliação objetiva e monitoramento evolutivo de pacientes com paralisia cerebral.

3.4.4 Postura Média Geral dos Grupos

Para avaliar a qualidade da detecção dos pontos-chave e verificar se os resultados encontravam-se dentro de faixas aceitáveis, consideraram-se todos os pacientes do estudo. Inicialmente, foram coletados os pontos-chave detectados pelo algoritmo BlazePose para cada paciente, garantindo padronização na ordem e na quantidade de pontos. Em seguida, calcularam-se os pontos-chave médios do grupo controle, formando um modelo postural de referência, que serviu como padrão para as análises comparativas.

A partir desse padrão, foram calculadas duas métricas utilizadas em estudos de detecção de pontos-chave: Percentage of Correct Keypoints (PCK), que indica a porcentagem de pontos-chave dentro de um limiar de distância aceitável em relação ao padrão, e Mean Average Precision (mAP), que considera a precisão média da detecção combinada com a

proximidade em relação ao padrão. Para cada paciente, essas métricas foram obtidas individualmente e, posteriormente, agregadas por grupo (controle, hemiparético e diparético), calculando-se médias e desvios padrão.

Por fim, os grupos foram comparados utilizando os valores médios das métricas, permitindo avaliar a proximidade postural dos pacientes com PC em relação ao grupo controle e identificar pontos-chave com maior variação..

3.5 Fase de Análise Estatística

A análise estatística das métricas posturais foi realizada com o objetivo de comparar quantitativamente os padrões posturais entre os três grupos clínicos estudados: controle, diparesia espástica e hemiparesia espástica. Para tanto, as 31 métricas extraídas e estruturadas foram submetidas a procedimentos estatísticos que permitiram avaliar diferenças significativas, quantificar a magnitude dos efeitos e estabelecer um ranqueamento objetivo das medições mais discriminativas entre os grupos.

Todo o processamento foi executado utilizando notebooks em Python, onde cada métrica teve seus cálculos implementados a partir das equações referenciadas na fundamentação (Equações 10 a 16), garantindo reprodutibilidade e padronização das análises.

3.5.1 ANOVA

A análise de variância unifatorial (one-way ANOVA) foi aplicada a cada métrica para testar a hipótese nula de igualdade das médias entre os três grupos. A ANOVA permite avaliar a relação entre a variabilidade observada entre grupos e a variabilidade intragrupos, considerando as somas de quadrados e os quadrados médios correspondentes (Equações 10, 11 e 12). A significância estatística foi definida como $p < 0,05$, permitindo identificar métricas que apresentassem diferenças relevantes entre os grupos.

3.5.2 Teste Post-hoc Tukey HSD

Foi conduzida uma análise comparativa entre as vistas laterais direita e esquerda com o objetivo de identificar assimetrias posturais, por meio do cálculo das diferenças absolutas e percentuais nas métricas sagitais bilaterais, aspecto clinicamente relevante para a diferenciação entre hemiparesia e diparesia. Essa etapa permitiu quantificar objetivamente o grau de assimetria postural, fornecendo subsídios adicionais para a caracterização fenotípica dos subtipos de paralisia cerebral avaliados.

Em seguida, para as métricas em que a ANOVA identificou diferenças estatisticamente significativas, foi aplicado o teste post-hoc Tukey HSD, a fim de determinar quais pares de grupos apresentaram diferenças relevantes. Esse procedimento possibilitou a análise detalhada das comparações múltiplas, considerando cenários com tamanhos amostrais iguais e desiguais (Equações 13 e 14), permitindo maior precisão na interpretação dos resultados obtidos.

3.5.3 Tamanho de Efeito ('d' de Cohen)

O tamanho de efeito 'd' de Cohen foi calculado para todas as métricas posturais com o objetivo de quantificar a magnitude prática das diferenças observadas entre os grupos. O 'd' de Cohen representa a diferença padronizada entre as médias de dois grupos, expressa em unidades de desvio padrão, sendo calculado através da equação 15 apresentada na fundamentação teórica. Esta medida permite avaliar se as diferenças estatisticamente significativas possuem relevância clínica substancial, independentemente do tamanho amostral, fornecendo informação objetiva sobre a magnitude real das alterações posturais observadas entre os grupos controle, diparesia espástica e hemiparesia espástica.

A interpretação dos valores de 'd' de Cohen seguiu os critérios estabelecidos na literatura científica, onde valores de 0,2 indicam efeito pequeno, 0,5 efeito médio e 0,8 efeito grande, conforme descrito na seção 2.7.3. Para cada métrica postural, foram calculados três valores de 'd' de Cohen correspondentes às comparações entre pares de grupos: controle versus diparesia, controle versus hemiparesia e diparesia versus hemiparesia.

3.5.4 Ranqueamento Geral das Métricas

Para estabelecer um ranking das métricas mais discriminativas entre os grupos, foi combinada a significância estatística obtida pelo Tukey HSD com a magnitude de efeito do 'd' de Cohen. Cada métrica recebeu uma pontuação de acordo com o número de comparações significativas entre pares de grupos. Em seguida, as métricas foram ordenadas considerando o valor médio de 'd' de Cohen, priorizando aquelas com maior efeito. Esse método de ranqueamento proporcionou uma visão objetiva e hierarquizada das métricas mais sensíveis às diferenças posturais entre os três grupos, facilitando a interpretação dos resultados e subsidiando futuras análises clínicas.

4. RESULTADOS

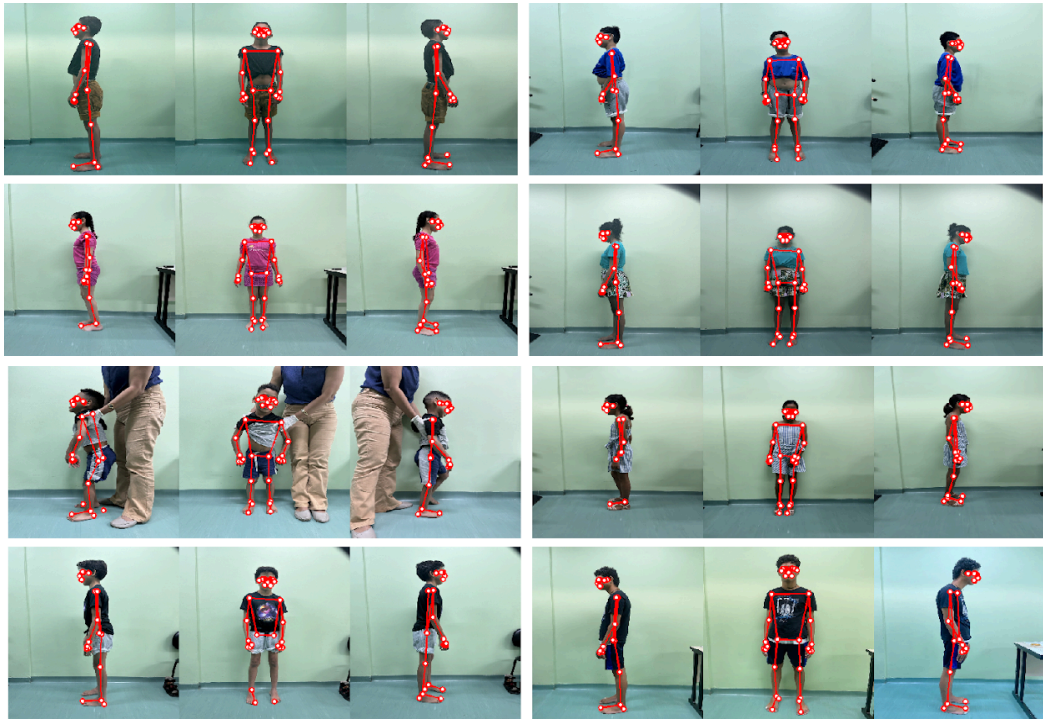
O presente capítulo apresenta os resultados obtidos a partir do fluxo metodológico apresentado na Figura 10. Primeiramente será apresentada a documentação visual obtida de todos os participantes. Em seguida, serão apresentadas as posturas médias obtidas dos grupos de participantes, comparando os grupos controle, hemiparesia e diparesia, procurando evidenciar padrões distintos de comprometimento motor, assim como os pontos-chaves mais divergentes. Posteriormente, será apresentado uma discussão sobre as 31 métricas posturais (derivadas dos pontos-chave), organizadas por grupo e vista anatômica, permitindo identificar assimetrias e alterações específicas em cada subtipo de paralisia cerebral. Por fim, será apresentada a seção de análise estatística que procura destacar as métricas com diferenças significativas entre os grupos, estabelecendo os principais parâmetros discriminativos para caracterização postural.

4.1 Documentação Visual dos Participantes

A amostra final foi composta por 40 participantes distribuídos em três grupos: 24 participantes do grupo controle (60%), 8 participantes com diparesia espástica (20%) e 8 participantes com hemiparesia espástica (20%). Para cada participante foram obtidas imagens através do aplicativo móvel, sendo que a aquisição das imagens foi realizada em três vistas padronizadas: frontal, lateral esquerda e lateral direita. Para cada imagem, os 33 pontos-chaves foram determinados automaticamente.

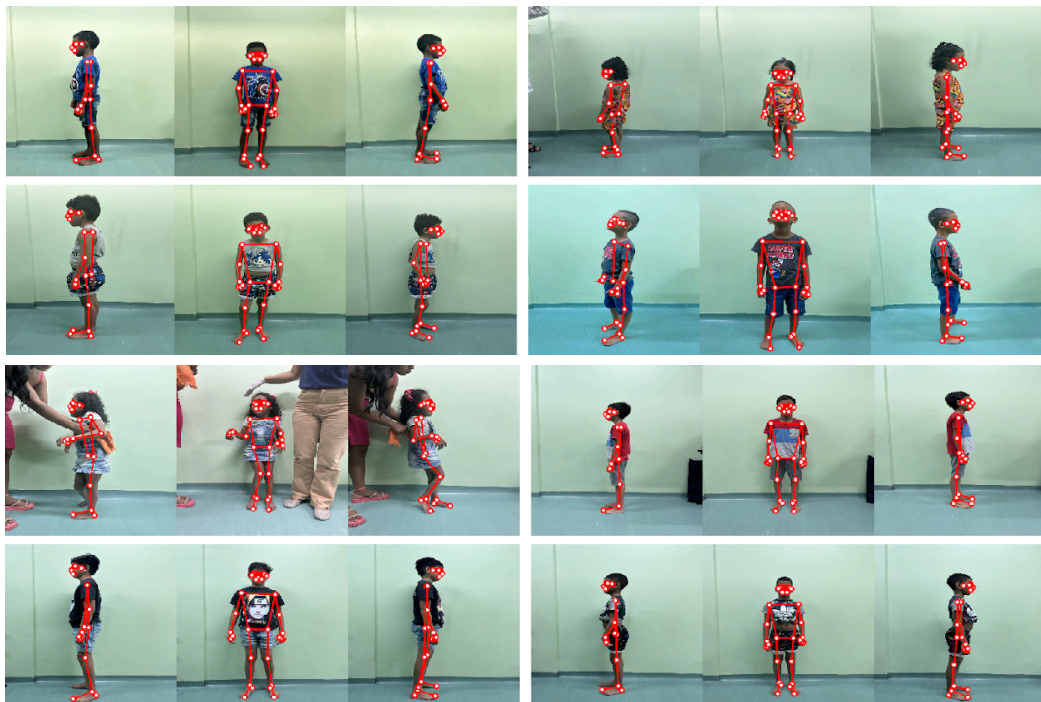
A documentação visual final de todos os participantes demonstra a aplicação bem-sucedida do algoritmo BlazePose na detecção automática dos 33 pontos-chave posturais sobre diferentes fenótipos clínicos. A Figura 19 e 20 apresenta a documentação visual para o caso dos pacientes com paralisia cerebral e a Figura 21 apresenta alguns casos para pacientes do grupo controle.

Figura 19 - Documentação visual dos pacientes com diparesia



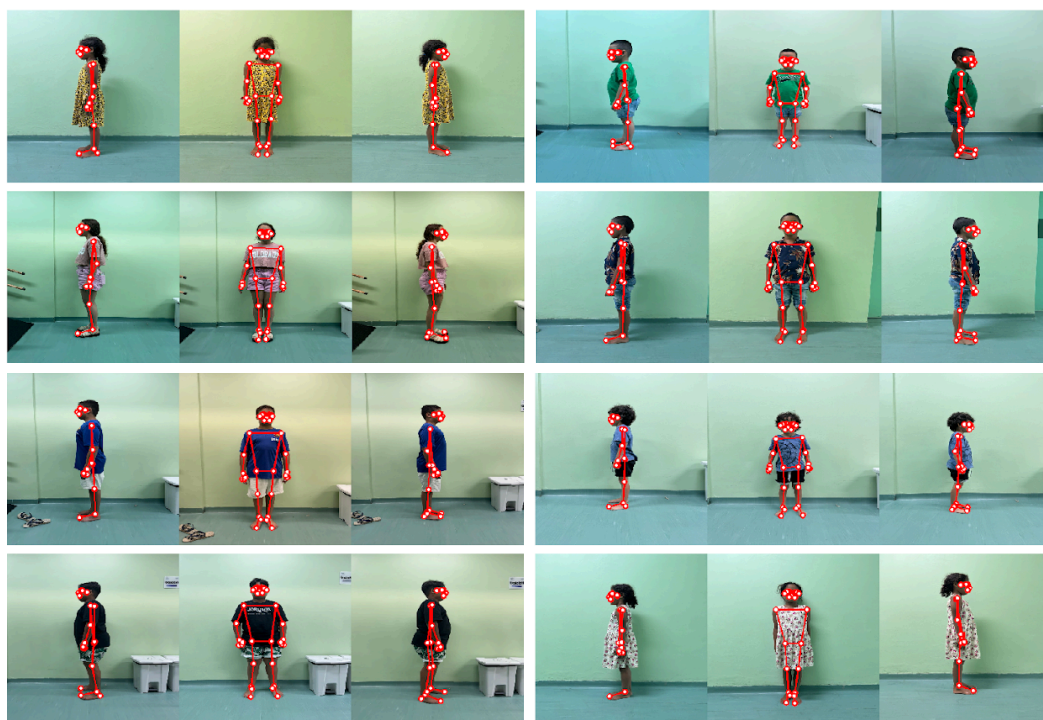
Fonte: Autor

Figura 20 - Documentação visual dos pacientes com hemiparesia



Fonte: Autor

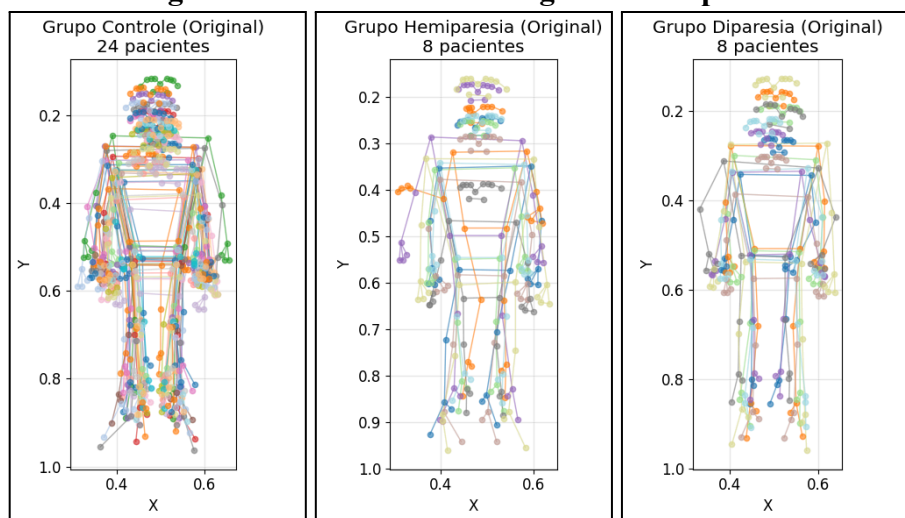
Figura 21 - Documentação visual de alguns pacientes controle



Fonte: Autor

A Figura 22 apresenta, para todos os grupos de pacientes, os pontos-chave sobrepostos das vistas frontais originais obtidas através do BlazePose.

Figura 22 - Pontos-chave originais sobrepostos

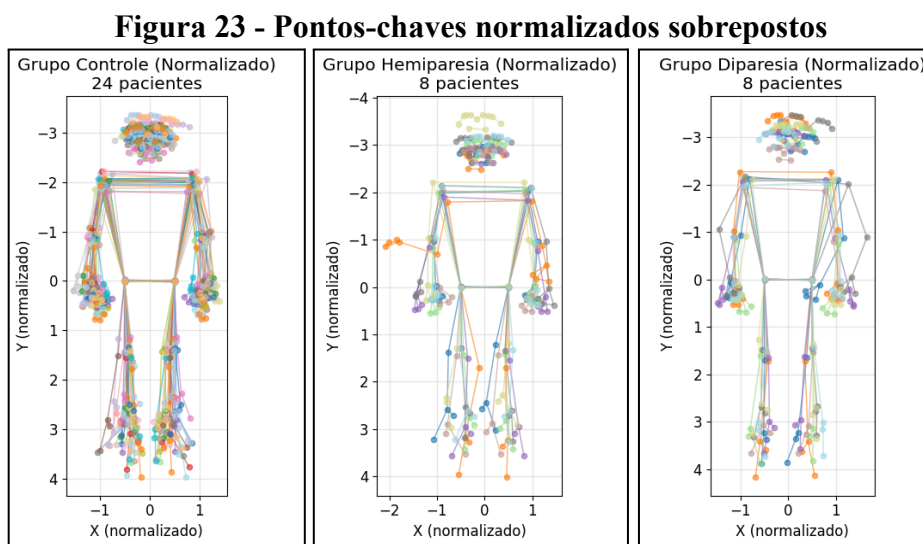


Fonte: Autor

A partir dos 33 pontos-chave, as 31 métricas posturais foram calculadas com sucesso para todos os participantes, resultando em uma base de dados completa, sem valores ausentes, para futura análise estatística.

4.2 Postura Média e Análise dos Pontos-Chave

As coordenadas obtidas pelo BlazePose foram normalizadas (0 a 1) em relação ao tamanho da imagem para permitir comparações consistentes, como mostrado na Figura 23, que apresenta os pontos-chave normalizados sobrepostos por grupo.



Fonte: autor

Diferente dos pontos originais, os valores normalizados permitem comparar proporções e alinhamentos corporais independentemente da escala da imagem. Para o grupo controle, os pontos tendem a se concentrar mais, indicando maior consistência postural, enquanto os grupos com hemiparesia e diparesia mostram maior dispersão, refletindo alterações típicas da paralisia cerebral.

4.2.1 PCKs do Grupo Hemiparesia

A análise do Percentage of Correct Keypoints (PCK) para o grupo hemiparesia em comparação ao controle revelou variações significativas na posição entre diferentes regiões anatômicas. A Tabela 6 apresenta os resultados PCK relativos aos pontos da cabeça. Para o limiar mais restritivo (PCK1 com $\alpha=0.5$), a maioria dos pontos cefálicos apresentou 0% de concordância, indicando divergência substancial das posições anatômicas do grupo hemiparesia em relação ao padrão do grupo controle. Esta variação pode refletir tanto alterações posturais reais quanto limitações na detecção de pontos faciais em presença de movimentos involuntários ou posicionamentos atípicos da cabeça.

Tabela 6 - PCKs relativos à cabeça (hemiparesia vs controle)

| Pontos-chave | PCK1 ($\alpha=0.5$) | PCK2 ($\alpha=1$) | PCK3 ($\alpha=2$) | PCK4 ($\alpha=4$) | mAP |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| Nariz | 0 | 12.5 | 62.5 | 87.5 | 40.6 |
| Canto Externo Olho Direito | 0 | 25 | 50 | 87.5 | 40.6 |
| Canto Interno Olho Direito | 0 | 25 | 62.5 | 87.5 | 43.8 |
| Olho Direito | 0 | 25 | 62.5 | 87.5 | 43.8 |
| Canto Interno Olho Esquerdo | 0 | 25 | 75 | 87.5 | 46.9 |
| Orelha Direita | 0 | 25 | 75 | 87.5 | 46.9 |
| Canto Direito Boca | 0 | 25 | 75 | 87.5 | 46.9 |
| Olho Esquerdo | 12.5 | 25 | 75 | 87.5 | 50 |
| Canto Externo Olho Esquerdo | 12.5 | 25 | 87.5 | 87.5 | 53.1 |
| Canto Esquerdo Boca | 0 | 50 | 75 | 87.5 | 53.1 |
| Orelha Esquerda | 12.5 | 37.5 | 87.5 | 87.5 | 56.2 |
| MÉDIA | 3.41 | 27.27 | 71.59 | 87.50 | 47.45 |

A Tabela 7 e 8 apresenta os resultados PCK relativos aos membros superiores e inferiores respectivamente. Os resultados demonstraram padrão similar de divergentes posições em limiares restritivos, com média geral de PCK1 de 5.68% e mAP de 39.20% para os superiores e PCK1 de 10.23% e mAP de 43.48%.

Tabela 7 - PCKs relativos aos membros superiores (hemiparesia vs controle)

| Pontos-chave | PCK1 ($\alpha=0.5$) | PCK2 ($\alpha=1$) | PCK3 ($\alpha=2$) | PCK4 ($\alpha=4$) | mAP |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| Cotovelo Direito | 0 | 0 | 50 | 87.5 | 34.4 |
| Pulso Direito | 0 | 0 | 50 | 87.5 | 34.4 |
| Dedo Mínimo Direito | 0 | 0 | 50 | 87.5 | 34.4 |
| Dedo Indicador Direito | 0 | 0 | 50 | 87.5 | 34.4 |
| Polegar Direito | 0 | 0 | 50 | 87.5 | 34.4 |
| Dedo Indicador Esquerdo | 0 | 12.5 | 50 | 87.5 | 37.5 |
| Pulso Esquerdo | 0 | 25 | 50 | 87.5 | 40.6 |
| Polegar Esquerdo | 0 | 12.5 | 62.5 | 87.5 | 40.6 |
| Ombro Direito | 12.5 | 25 | 62.5 | 100 | 50 |
| Dedo Mínimo Esquerdo | 25 | 37.5 | 50 | 87.5 | 50 |
| Ombro Esquerdo | 12.5 | 37.5 | 62.5 | 100 | 53.1 |
| Cotovelo Esquerdo | 12.5 | 37.5 | 75 | 100 | 56.2 |
| MÉDIA | 5.68 | 17.05 | 51.14 | 82.95 | 39.20 |

Tabela 8 - PCKs relativos aos membros inferiores (hemiparesia vs controle)

| Pontos-chave | PCK1 ($\alpha=0.5$) | PCK2 ($\alpha=1$) | PCK3 ($\alpha=2$) | PCK4 ($\alpha=4$) | mAP |
|--------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| Calcanhar Esquerdo | 0 | 12.5 | 37.5 | 100 | 37.5 |
| Calcanhar Direito | 0 | 12.5 | 50 | 87.5 | 37.5 |
| Tornozelo Esquerdo | 0 | 12.5 | 50 | 100 | 40.6 |
| Tornozelo Direito | 0 | 12.5 | 50 | 100 | 40.6 |
| Joelho Direito | 12.5 | 12.5 | 62.5 | 87.5 | 43.8 |
| Joelho Esquerdo | 12.5 | 25 | 50 | 100 | 46.9 |
| Dedão Pé Esquerdo | 12.5 | 37.5 | 50 | 87.5 | 46.9 |
| Dedão Pé Direito | 0 | 25 | 62.5 | 100 | 46.9 |
| Quadril Esquerdo | 37.5 | 50 | 87.5 | 100 | 68.8 |
| Quadril Direito | 37.5 | 50 | 87.5 | 100 | 68.8 |
| MÉDIA | 10.23 | 22.73 | 53.41 | 87.50 | 43.48 |

Particularmente, os pontos do hemicorpo direito apresentam maiores alterações comparada aos pontos esquerdos, sugerindo maior variabilidade postural no lado tipicamente mais afetado na hemiparesia.

A análise dos PCKs para o grupo hemiparesia evidencia um padrão de divergência significativa, sobretudo nos pontos cefálicos, onde, para o limiar mais restritivo (PCK1, $\alpha=0.5$), a maioria apresentou 0% de concordância. Isso indica que, nesses casos, nenhum participante do grupo hemiparesia apresentou posições anatômicas próximas às do grupo controle, evidenciando alta variabilidade postural na região da cabeça. Embora os limiares mais permissivos revelem melhora progressiva na taxa de acertos, o comportamento observado em PCK1 reforça que as diferenças posturais são mais acentuadas na região cefálica do que nos membros. Nos membros superiores e inferiores, os valores de PCK1 foram relativamente maiores, sugerindo que a estabilidade postural dos segmentos distais é mais preservada quando comparada à região da cabeça.

4.2.2 PCKs do Grupo Diparesia

A análise PCK para o grupo diparesia revelou padrões distintos comparados à hemiparesia. A Tabela 9, 10 e 11 demonstram maior variabilidade cefálica comparada ao grupo controle. Esta variação pode estar relacionada às compensações posturais típicas da diparesia, incluindo alterações no controle cervical e posicionamento cefálico.

Tabela 9 - PCKs relativos à cabeça (diparesia vs controle)

| Pontos-chave | PCK1 ($\alpha=0.5$) | PCK2 ($\alpha=1$) | PCK3 ($\alpha=2$) | PCK4 ($\alpha=4$) | mAP |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| Nariz | 0 | 12.5 | 12.5 | 75 | 25 |
| Canto Interno Olho Direito | 0 | 12.5 | 12.5 | 75 | 25 |
| Canto Esquerdo Boca | 0 | 0 | 25 | 75 | 25 |
| Canto Direito Boca | 0 | 0 | 25 | 75 | 25 |
| Canto Interno Olho Esquerdo | 0 | 12.5 | 12.5 | 87.5 | 28.1 |
| Olho Direito | 0 | 12.5 | 25 | 75 | 28.1 |
| Canto Externo Olho Direito | 0 | 12.5 | 25 | 75 | 28.1 |
| Olho Esquerdo | 0 | 0 | 37.5 | 87.5 | 31.2 |
| Canto Externo Olho Esquerdo | 0 | 0 | 37.5 | 87.5 | 31.2 |
| Orelha Esquerda | 0 | 0 | 37.5 | 87.5 | 31.2 |
| Orelha Direita | 0 | 0 | 50 | 87.5 | 34.4 |
| MÉDIA | 0.00 | 5.68 | 27.27 | 80.68 | 28.39 |

Tabela 10 - PCKs relativos aos membros superiores (diparesia vs controle)

| Pontos-chave | PCK1 ($\alpha=0.5$) | PCK2 ($\alpha=1$) | PCK3 ($\alpha=2$) | PCK4 ($\alpha=4$) | mAP |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| Ombro Esquerdo | 0 | 12.5 | 50 | 87.5 | 37.5 |
| Pulso Esquerdo | 0 | 25 | 50 | 75 | 37.5 |
| Dedo Indicador Esquerdo | 0 | 25 | 62.5 | 62.5 | 37.5 |
| Polegar Esquerdo | 0 | 25 | 50 | 75 | 37.5 |
| Cotovelo Esquerdo | 0 | 25 | 50 | 87.5 | 40.6 |
| Dedo Mínimo Esquerdo | 12.5 | 25 | 50 | 87.5 | 43.8 |
| Ombro Direito | 12.5 | 37.5 | 50 | 100 | 50 |
| Cotovelo Direito | 37.5 | 37.5 | 50 | 75 | 50 |
| Pulso Direito | 12.5 | 37.5 | 75 | 100 | 56.2 |
| Dedo Mínimo Direito | 12.5 | 37.5 | 75 | 100 | 56.2 |
| Polegar Direito | 25 | 37.5 | 75 | 100 | 59.4 |
| Dedo Indicador Direito | 25 | 50 | 75 | 100 | 62.5 |
| MEDIA | 11.46 | 31.25 | 59.38 | 87.50 | 47.39 |

Tabela 11 - PCKs relativos aos membros inferiores (diparesia vs controle)

| Pontos-chave | PCK1 ($\alpha=0.5$) | PCK2 ($\alpha=1$) | PCK3 ($\alpha=2$) | PCK4 ($\alpha=4$) | mAP |
|--------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| Tornozelo Esquerdo | 0 | 0 | 37.5 | 87.5 | 31.2 |
| Calcanhar Esquerdo | 0 | 0 | 37.5 | 87.5 | 31.2 |
| Calcanhar Direito | 0 | 12.5 | 37.5 | 75 | 31.2 |
| Dedão Pé Esquerdo | 0 | 25 | 25 | 75 | 31.2 |
| Dedão Pé Direito | 0 | 0 | 37.5 | 87.5 | 31.2 |
| Tornozelo Direito | 0 | 12.5 | 37.5 | 87.5 | 34.4 |
| Joelho Direito | 0 | 12.5 | 37.5 | 100 | 37.5 |
| Joelho Esquerdo | 0 | 12.5 | 62.5 | 100 | 43.8 |
| Quadril Esquerdo | 12.5 | 25 | 87.5 | 100 | 56.2 |
| Quadril Direito | 12.5 | 25 | 87.5 | 100 | 56.2 |
| MÉDIA | 2.5 | 12.5 | 48.75 | 90 | 38.41 |

Os membros superiores no grupo diparesia apresentaram PCK1 médio de 11.46% e mAP de 47.39%, superando os valores observados no grupo hemiparesia. Esta diferença sugere menor comprometimento dos membros superiores na diparesia comparada à hemiparesia, consistente com o padrão clínico esperado.

Os membros inferiores apresentaram PCK1 médio de 2.5% e mAP de 38.41%, valores inferiores aos observados na hemiparesia, refletindo o maior comprometimento dos membros inferiores característico da diparesia espástica.

4.2.3 Visão Geral dos PCKs

A análise comparativa geral dos PCKs entre hemiparesia e diparesia, apresentada nas Tabelas 12 e 13, evidenciam padrões de comprometimento distintos entre os subtipos. O grupo hemiparesia apresentou mAP geral de 45.45%, superior aos 38.34% observados na diparesia, sugerindo maior proximidade postural global ao padrão controle. No entanto, esta aparente proximidade pode mascarar assimetrias significativas que se tornam evidentes na análise das métricas posturais específicas.

Tabela 12 - Visão Geral dos PCK (diparesia vs controle)

| Regiao | n° pontos-chave | PCK1 | PCK2 | PCK3 | PCK4 | mAP |
|--------------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Cabeça | 11 | 0 | 5.7 | 27.3 | 80.7 | 28.4 |
| Membro Superior | 12 | 11.5 | 31.2 | 59.4 | 87.5 | 47.4 |
| Membro Inferior | 10 | 2.5 | 12.5 | 48.8 | 90 | 38.4 |
| MÉDIA GERAL | 33 | 4.94 | 17.03 | 45.49 | 85.99 | 38.34 |

Tabela 13 - Visão Geral dos PCK (hemiparesia vs controle)

| Regiao | n° pontos-chave | PCK1 | PCK2 | PCK3 | PCK4 | mAP |
|--------------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Cabeça | 11 | 3.4 | 27.3 | 71.6 | 87.5 | 47.4 |
| Membro Superior | 12 | 5.2 | 15.6 | 55.2 | 90.6 | 41.7 |
| Membro Inferior | 10 | 11.2 | 25 | 58.8 | 96.2 | 47.8 |
| MÉDIA GERAL | 33 | 6.42 | 22.35 | 61.76 | 91.26 | 45.45 |

A distribuição regional dos PCKs revelou que ambos os grupos apresentaram maior variabilidade nos pontos da cabeça comparados aos membros, possivelmente relacionada às dificuldades de controle cervical e compensações posturais cefálicas características da paralisia cerebral.

Os membros inferiores no grupo diparesia demonstraram maior variação comparada à hemiparesia, confirmando o padrão de comprometimento predominante dos membros inferiores nesta condição.

4.3 Métricas Posturais por Grupo e Vista

A análise descritiva das 31 métricas posturais revelou variabilidade distinta entre os grupos estudados, evidenciando padrões específicos para cada subtipo de paralisia cerebral. As métricas foram organizadas por grupo e vista anatômica, proporcionando caracterização detalhada dos perfis posturais.

4.3.1 Métricas do Grupo Controle

O grupo controle estabeleceu valores de referência para as métricas posturais, representando padrões de desenvolvimento neuromotor típico. A Tabela 14 apresenta as métricas frontais (valor médio), onde se observam ângulos articulares de joelhos próximos à neutralidade (direito: 3.8°, esquerdo: 4.36°), inclinações corporais mínimas (tronco: 1.62°, cabeça: 1.91°) e desníveis segmentares reduzidos em todas as estruturas avaliadas.

As assimetrias bilaterais mantiveram-se dentro de faixas esperadas, com destaque para a assimetria de orelhas (49.46%), refletindo variações anatômicas normais, e assimetrias articulares reduzidas nos membros (ombros: 20.91%, joelhos: 19.26%).

Tabela 14 - Métricas Frontais do Grupo Controle

| Métrica | Média |
|--------------------------------|--------------|
| Ângulo joelho frontal direito | 3.8° |
| Ângulo joelho frontal esquerdo | 4.36° |
| Assimetria cotovelos | 14.97% |
| Assimetria joelhos | 19.26% |
| Assimetria ombros | 20.91% |
| Assimetria orelhas | 49.46% |
| Assimetria punhos | 14.66% |
| Assimetria quadris | 24.82% |
| Desnível biacromial | 1.28° |
| Desnível cotovelos | 1.56° |
| Desnível joelhos | 2.15° |
| Desnível orelhas | 1.32° |
| Desnível pélvico | 0.99° |
| Desnível punhos | 1.68° |
| Desnível tornozelos | 2.05° |
| Inclinação cabeça | 1.91° |
| Inclinação tronco | 1.62° |

As métricas sagitais do grupo controle (valor médio), apresentadas na Tabela 15, demonstraram inclinações cefálicas fisiológicas (esquerda: 17.45°, direita: 19.2°), inclinações corporais mínimas (tronco esquerda: 2.88°, direita: 2.9°) e ângulos articulares dentro de parâmetros normativos. Os ângulos articulares sagitais evidenciaram variações laterais discretas, com cotovelos apresentando valores ligeiramente superiores (esquerdo: 18.57°, direito: 22.96°) comparados aos demais segmentos articulares.

Tabela 15 - Métricas Sagitais do Grupo Controle

| Métrica | Média |
|-------------------------------|--------|
| Ângulo cotovelo direito | 22.96° |
| Ângulo cotovelo esquerdo | 18.57° |
| Ângulo joelho direito | 4.45° |
| Ângulo joelho esquerdo | 6.58° |
| Ângulo ombro direito | 5.02° |
| Ângulo ombro esquerdo | 4.65° |
| Inclinação cabeça direita | 19.2° |
| Inclinação cabeça esquerda | 17.45° |
| Inclinação pélvica direita | 4.1° |
| Inclinação pélvica esquerda | 4.56° |
| Inclinação tornozelo direita | 4.45° |
| Inclinação tornozelo esquerda | 4.37° |
| Inclinação tronco direita | 2.9° |
| Inclinação tronco esquerda | 2.88° |

4.3.2 Métricas do Grupo Diparesia

O grupo diparesia espástica apresentou alterações posturais bilaterais características, conforme demonstrado nas Tabelas 16 e 17. As métricas frontais revelaram ângulos articulares de joelhos similares ao controle (direito: 4.55°, esquerdo: 3.47°), porém com inclinações corporais aumentadas (tronco: 2.55°, cabeça: 4.19°) e desníveis segmentares mais pronunciados, particularmente nas orelhas (4.01° vs 1.32° controle). As assimetrias bilaterais mostraram-se elevadas comparadas ao controle, com destaque para assimetrias de orelhas (80.74% vs 49.46% controle) e quadris (27.73% vs 24.82% controle).

Tabela 16 - Métricas Frontais do Grupo Diparesia

| Métrica | Média |
|--------------------------------|--------------|
| Ângulo joelho frontal direito | 4.55° |
| Ângulo joelho frontal esquerdo | 3.47° |
| Assimetria cotovelos | 15.1% |
| Assimetria joelhos | 23.77% |
| Assimetria ombros | 22.88% |
| Assimetria orelhas | 80.74% |
| Assimetria punhos | 11.08% |
| Assimetria quadris | 27.73% |
| Desnível biacromial | 1.83° |
| Desnível cotovelos | 1.59° |
| Desnível joelhos | 2.65° |
| Desnível orelhas | 4.01° |
| Desnível pélvico | 1.2° |
| Desnível punhos | 1.7° |
| Desnível tornozelos | 1.64° |
| Inclinação cabeça | 4.19° |
| Inclinação tronco | 2.55° |

Tabela 17 - Métricas Sagitais do Grupo Diparesia

| Métrica | Média |
|-------------------------------|--------------|
| Ângulo cotovelo direito | 34.0° |
| Ângulo cotovelo esquerdo | 23.5° |
| Ângulo joelho direito | 6.76° |
| Ângulo joelho esquerdo | 9.36° |
| Ângulo ombro direito | 6.67° |
| Ângulo ombro esquerdo | 6.85° |
| Inclinação cabeça direita | 24.45° |
| Inclinação cabeça esquerda | 22.22° |
| Inclinação pélvica direita | 3.97° |
| Inclinação pélvica esquerda | 6.78° |
| Inclinação tornozelo direita | 8.12° |
| Inclinação tornozelo esquerda | 5.18° |
| Inclinação tronco direita | 3.92° |
| Inclinação tronco esquerda | 5.75° |

As métricas sagitais da diparesia evidenciaram alterações bilaterais mais pronunciadas, com inclinações cefálicas aumentadas bilateralmente (esquerda: 22.22°, direita: 24.45°) e inclinações corporais superiores ao controle (tronco esquerda: 5.75°, direita: 3.92°). Os ângulos articulares sagitais demonstraram padrões espásticos característicos, com ângulos de cotovelos significativamente aumentados (esquerdo: 23.5°, direito: 34.0°) comparados ao grupo controle, refletindo os padrões de flexão típicos da espasticidade em membros superiores.

4.3.3 Métricas do Grupo Hemiparesia

O grupo hemiparesia espástica apresentou perfil postural claramente assimétrico, conforme evidenciado nas Tabelas 18 e 19. As métricas frontais revelaram ângulos articulares de joelhos aumentados (direito: 8.62°, esquerdo: 5.62°) e assimetrias bilaterais marcadamente elevadas em todas as estruturas avaliadas. As assimetrias de quadris (65.44%) e joelhos (50.4%) demonstraram-se substancialmente superiores aos valores de controle, caracterizando o padrão unilateral típico da hemiparesia. Os desníveis segmentares também se mostraram aumentados, particularmente nos punhos (3.79° vs 1.68° controle) e tornozelos (3.49° vs 2.05° controle).

Tabela 18. Métricas Frontais do Grupo Hemiparesia

| Métrica | Média |
|--------------------------------|--------|
| Ângulo joelho frontal direito | 8.62° |
| Ângulo joelho frontal esquerdo | 5.62° |
| Assimetria cotovelos | 27.4% |
| Assimetria joelhos | 50.4% |
| Assimetria ombros | 32.48% |
| Assimetria orelhas | 56.14% |
| Assimetria punhos | 35.09% |
| Assimetria quadris | 65.44% |
| Desnível biacromial | 1.34° |
| Desnível cotovelos | 2.28° |
| Desnível joelhos | 2.97° |
| Desnível orelhas | 1.72° |
| Desnível pélvico | 0.97° |
| Desnível punhos | 3.79° |
| Desnível tornozelos | 3.49° |
| Inclinação cabeça | 3.32° |
| Inclinação tronco | 1.39° |

Tabela 19. Métricas Sagitais do Grupo Hemiparesia Espástica

| Métrica | Média |
|-------------------------------|--------|
| Ângulo cotovelo direito | 35.99° |
| Ângulo cotovelo esquerdo | 28.12° |
| Ângulo joelho direito | 15.42° |
| Ângulo joelho esquerdo | 9.37° |
| Ângulo ombro direito | 6.33° |
| Ângulo ombro esquerdo | 6.19° |
| Inclinação cabeça direita | 19.61° |
| Inclinação cabeça esquerda | 18.41° |
| Inclinação pélvica direita | 8.64° |
| Inclinação pélvica esquerda | 4.18° |
| Inclinação tornozelo direita | 10.85° |
| Inclinação tornozelo esquerda | 6.3° |
| Inclinação tronco direita | 3.38° |
| Inclinação tronco esquerda | 2.39° |

As métricas sagitais da hemiparesia evidenciaram assimetrias marcantes entre hemisférios, com diferenças substanciais nos ângulos articulares entre os lados direito e esquerdo. Os ângulos de joelhos apresentaram variação lateral significativa (esquerdo: 9.37°, direito: 15.42°), assim como os ângulos de cotovelos (esquerdo: 28.12°, direito: 35.99°). As inclinações segmentares também demonstraram assimetrias, particularmente nas inclinações pélvicas (esquerda: 4.18°, direita: 8.64°) e tornozelos (esquerda: 6.3°, direita: 10.85°).

A organização dos dados por vista anatômica evidenciou padrões específicos para cada subtipo: o grupo hemiparesia apresentou assimetrias marcantes nas métricas frontais, enquanto o grupo diparesia demonstrou alterações bilaterais mais pronunciadas nas métricas sagitais, com maior variabilidade entre hemisférios direito e esquerdo, caracterizando os perfis posturais distintivos de cada condição.

4.4 Análise Estatística

4.4.1 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância entre os 3 grupos identificou diferenças estatisticamente significativas em 9 ($p < 0.05$) das 31 métricas posturais avaliadas, conforme apresentado na Tabela 20. As métricas de assimetria emergiram como os principais discriminadores entre os 3 grupos, com a assimetria dos joelhos apresentando o maior valor de F-statistic (11.314, $p=0.0001$), seguida pela assimetria dos punhos (8.2, $p=0.0011$) e desnível das orelhas (8.06, $p=0.0012$).

Tabela 20 - Resultados da Análise de Variância (ANOVA)

| Metrica | F-statistic | p |
|---|---------------|---------------|
| Assimetria dos Joelhos | 11.314 | 0.0001 |
| Assimetria dos Punhos | 8.2 | 0.0011 |
| Desnível das Orelhas | 8.06 | 0.0012 |
| Ângulo do Cotovelo Direito | 6.783 | 0.0031 |
| Assimetria dos Quadris | 6.009 | 0.0055 |
| Desnível dos Punhos | 4.806 | 0.014 |
| Ângulo do Joelho Frontal Direito | 4.194 | 0.0228 |
| Inclinação do Tornozelo Direito | 3.691 | 0.0346 |
| Ângulo do Cotovelo Esquerdo | 3.532 | 0.0395 |
| Inclinação da Cabeça | 3.221 | 0.0514 |
| Inclinação do Tronco para Esquerda | 2.447 | 0.1004 |
| Assimetria dos Cotovelos | 2.207 | 0.1243 |
| Desnível dos Tornozelos | 2.194 | 0.1258 |
| Inclinação do Tronco | 2.089 | 0.1382 |
| Ângulo do Joelho Direito | 2.064 | 0.1414 |
| Inclinação Pélvica para Direita | 1.858 | 0.1703 |
| Assimetria das Orelhas | 1.282 | 0.2896 |
| Ângulo do Joelho Frontal Esquerdo | 1.276 | 0.2912 |
| Desnível dos Cotovelos | 1.133 | 0.333 |
| Inclinação da Cabeça para Direita | 1.11 | 0.3404 |
| Ângulo do Joelho Esquerdo | 1.042 | 0.363 |
| Inclinação da Cabeça para Esquerda | 1.029 | 0.3673 |
| Assimetria dos Ombros | 1.013 | 0.3731 |
| Inclinação Pélvica para Esquerda | 0.921 | 0.4069 |
| Desnível Biacromial | 0.908 | 0.4123 |
| Inclinação do Tornozelo Esquerdo | 0.808 | 0.4536 |
| Desnível dos Joelhos | 0.502 | 0.6096 |
| Ângulo do Ombro Esquerdo | 0.495 | 0.6134 |
| Inclinação do Tronco para Direita | 0.422 | 0.6588 |
| Ângulo do Ombro Direito | 0.42 | 0.6602 |
| Desnível Pélvico | 0.181 | 0.8349 |

Os ângulos articulares também demonstraram diferenças significativas, particularmente o ângulo do cotovelo direito (6.783, $p=0.0031$) e o ângulo do joelho frontal direito (4.194, $p=0.0228$). As inclinações segmentares apresentaram significância em menor número de métricas, com destaque para a inclinação do tornozelo direito (3.691, $p=0.0346$). As demais 23 métricas não alcançaram significância estatística ($p > 0.05$), sugerindo menor capacidade discriminativa entre os grupos ou maior variabilidade intragrupos.

4.4.2 Comparações Post-Hoc (Tukey HSD)

As análises post-hoc permitem revelar diferenças específicas entre pares de grupos, sendo que, como apresentado nas Tabelas 21, 22 e 23, a maioria das diferenças significativas ocorreram entre o grupo controle e hemiparesia.

Tabela 21 - Comparação Tukey HSD (Diparesia e Controle)

| Métrica | Diferença Média | p |
|------------------------------------|-----------------|----------------|
| Desnível das Orelhas | 2.69 % | 0.00030 |
| Ângulo do Cotovelo Direito | 11.04 % | 0.01630 |
| Inclinação da Cabeça | 2.28 % | 0.03500 |
| Inclinação do Tronco para Esquerda | 2.87 % | 0.08080 |
| Inclinação do Tronco | 0.93 % | 0.12980 |
| Assimetria das Orelhas | 31.29 % | 0.20060 |
| Inclinação do Tornozelo Direito | 3.68 ° | 0.25100 |
| Inclinação da Cabeça para Direita | 5.24 ° | 0.25670 |
| Inclinação da Cabeça para Esquerda | 4.78 ° | 0.27270 |
| Desnível Biacromial | 0.55 ° | 0.32270 |
| Ângulo do Cotovelo Esquerdo | 4.93 ° | 0.32810 |
| Inclinação Pélvica para Esquerda | 2.22 ° | 0.37220 |
| Ângulo do Joelho Esquerdo | 2.78 ° | 0.43580 |
| Ângulo do Ombro Esquerdo | 2.20 ° | 0.58960 |
| Inclinação do Tronco para Direita | 1.02 ° | 0.59430 |
| Ângulo do Joelho Frontal Esquerdo | 0.89 ° | 0.65740 |
| Ângulo do Ombro Direito | 1.65 ° | 0.66070 |
| Assimetria dos Joelhos | 4.51 ° | 0.73630 |
| Desnível dos Joelhos | 3.58 ° | 0.75920 |
| Desnível Pélvico | 0.50 ° | 0.80740 |
| Inclinação do Tornozelo Esquerdo | 0.20 ° | 0.81270 |
| Desnível dos Tornozelos | 0.81 ° | 0.83570 |
| Ângulo do Joelho Frontal Direito | 0.41 ° | 0.83940 |
| Assimetria dos Quadrís | 0.75 ° | 0.87550 |
| Assimetria dos Ombros | 2.91 ° | 0.96150 |
| Ângulo do Joelho Direito | 1.97 ° | 0.96240 |
| Inclinação Pélvica para Direita | 0.57 ° | 0.99020 |
| Desnível dos Cotovelos | 0.14 ° | 0.99790 |
| Desnível dos Punhos | 0.03 ° | 0.99820 |
| Assimetria dos Cotovelos | 0.03 ° | 0.99890 |

Tabela 22 - Comparação Tukey HSD (Hemiparesia e Controle)

| Métrica | Diferença Média | p |
|------------------------------------|-----------------|----------------|
| Assimetria dos Joelhos | 31.14 % | 0.00002 |
| Assimetria dos Punhos | 20.43 % | 0.00066 |
| Assimetria dos Quadris | 40.62 % | 0.00172 |
| Ângulo do Cotovelo Direito | 13.03 ° | 0.00403 |
| Desnível dos Punhos | 2.11 ° | 0.00583 |
| Ângulo do Joelho Frontal Direito | 4.82 ° | 0.00853 |
| Inclinação do Tornozelo Direito | 6.40 ° | 0.02026 |
| Ângulo do Cotovelo Esquerdo | 9.55 ° | 0.02100 |
| Assimetria dos Cotovelos | 12.43 % | 0.07883 |
| Ângulo do Joelho Direito | 9.23 ° | 0.08747 |
| Inclinação Pélvica para Direita | 4.53 ° | 0.12001 |
| Desnível dos Tornozelos | 1.44 ° | 0.12424 |
| Inclinação da Cabeça | 1.41 ° | 0.25439 |
| Desnível dos Cotovelos | 0.72 ° | 0.25537 |
| Assimetria dos Ombros | 11.57 % | 0.27953 |
| Inclinação do Tornozelo Esquerdo | 1.93 ° | 0.36760 |
| Ângulo do Joelho Esquerdo | 2.80 ° | 0.43159 |
| Ângulo do Joelho Frontal Esquerdo | 1.26 ° | 0.43693 |
| Desnível dos Joelhos | 0.82 ° | 0.56513 |
| Ângulo do Ombro Direito | 1.31 ° | 0.76871 |
| Ângulo do Ombro Esquerdo | 1.54 ° | 0.77182 |
| Desnível das Orelhas | 0.40 ° | 0.79391 |
| Inclinação do Tronco | 0.23 ° | 0.87235 |
| Inclinação do Tronco para Direita | 0.48 ° | 0.89044 |
| Inclinação do Tronco para Esquerda | 0.49 ° | 0.92341 |
| Assimetria das Orelhas | 6.68 % | 0.92624 |
| Inclinação da Cabeça para Esquerda | 0.96 ° | 0.94661 |
| Inclinação Pélvica para Esquerda | 0.38 ° | 0.96989 |
| Desnível Biacromial | 0.06 ° | 0.98515 |
| Inclinação da Cabeça para Direita | 0.41 ° | 0.99151 |
| Desnível Pélvico | 0.02 ° | 0.99697 |

Tabela 23 - Comparação Tukey HSD (Hemiparesia e Diparesia)

| Métrica | Diferença Média | | p |
|------------------------------------|-----------------|----------|----------------|
| Assimetria dos Punhos | 24.01 | % | 0.00096 |
| Assimetria dos Joelhos | 26.62 | % | 0.00218 |
| Desnível das Orelhas | 2.29 | ° | 0.01076 |
| Assimetria dos Quadrís | 37.71 | % | 0.01848 |
| Desnível dos Punhos | 2.08 | ° | 0.02842 |
| Ângulo do Joelho Frontal Direito | 4.06 | ° | 0.08515 |
| Inclinação do Tronco para Esquerda | 3.36 | ° | 0.09448 |
| Desnível dos Tornozelos | 1.85 | ° | 0.09878 |
| Inclinação do Tronco | 1.16 | ° | 0.11453 |
| Assimetria dos Cotovelos | 12.30 | % | 0.17676 |
| Ângulo do Joelho Frontal Esquerdo | 2.15 | ° | 0.20086 |
| Inclinação Pélvica para Direita | 4.67 | ° | 0.21109 |
| Ângulo do Joelho Direito | 8.66 | ° | 0.22324 |
| Inclinação Pélvica para Esquerda | 2.60 | ° | 0.39569 |
| Desnível dos Cotovelos | 0.69 | ° | 0.41670 |
| Inclinação da Cabeça para Direita | 4.84 | ° | 0.44953 |
| Assimetria das Orelhas | 24.60 | % | 0.49986 |
| Ângulo do Cotovelo Esquerdo | 4.62 | ° | 0.50984 |
| Desnível Biacromial | 0.49 | ° | 0.54121 |
| Assimetria dos Ombros | 9.60 | % | 0.54423 |
| Inclinação da Cabeça para Esquerda | 3.81 | ° | 0.56276 |
| Inclinação do Tornozelo Direito | 2.73 | ° | 0.58893 |
| Inclinação da Cabeça | 0.86 | ° | 0.69979 |
| Inclinação do Tornozelo Esquerdo | 1.12 | ° | 0.79037 |
| Desnível Pélvico | 0.23 | ° | 0.83754 |
| Ângulo do Cotovelo Direito | 1.99 | ° | 0.90295 |
| Inclinação do Tronco para Direita | 0.54 | ° | 0.90411 |
| Desnível dos Joelhos | 0.32 | ° | 0.94160 |
| Ângulo do Ombro Esquerdo | 0.67 | ° | 0.96720 |
| Ângulo do Ombro Direito | 0.34 | ° | 0.98807 |
| Ângulo do Joelho Esquerdo | 0.02 | ° | 0.99998 |

Os resultados indicam que o fenótipo hemiplégico apresenta as alterações posturais mais pronunciadas, diferenciando-se significativamente tanto do grupo controle quanto do grupo diparesia na maioria das métricas avaliadas.

A análise Tukey HSD entre hemiparesia e diparesia (Tabela 23) mostra que cinco métricas: assimetria dos punhos, joelhos, quadrís e desnível das orelhas, apresentam diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$). Esses resultados indicam que essas métricas capturam o que realmente discrimina os dois grupos: a hemiparesia tende a apresentar alterações assimétricas e localizadas em um lado do corpo, enquanto a diparesia apresenta comprometimento mais simétrico, principalmente nos membros inferiores. As

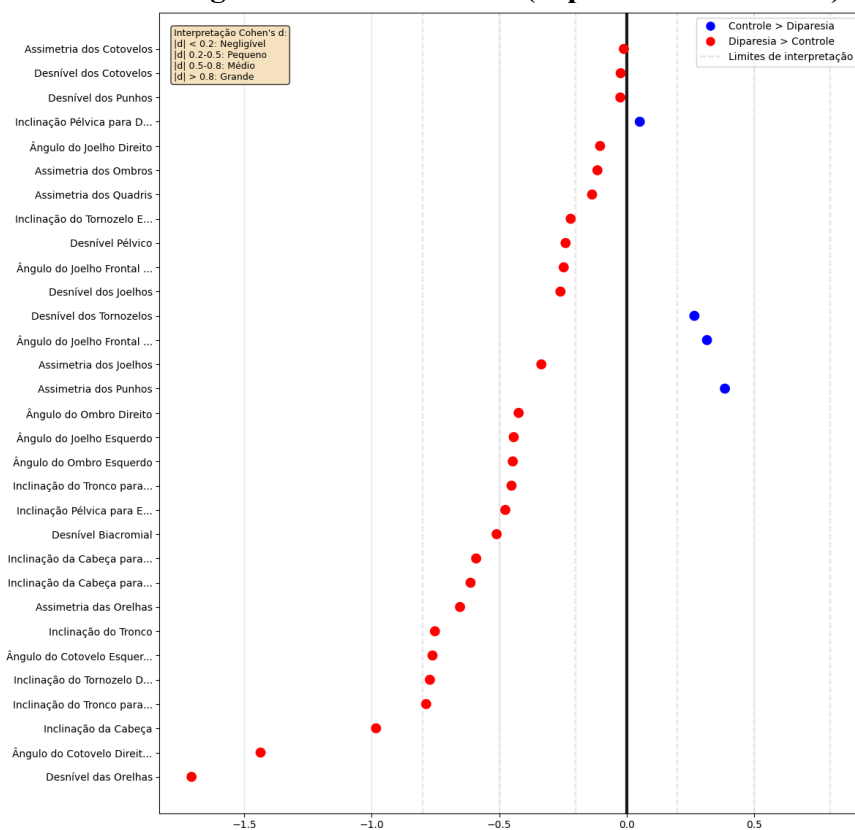
demais métricas, sem diferenças significativas, sugerem que outras regiões corporais apresentam padrões posturais semelhantes entre os grupos. Assim, essas cinco métricas não apenas quantificam as diferenças entre hemiparesia e diparesia, mas também corroboram a caracterização clínica conhecida de cada tipo de paralisia, reforçando sua relevância para discriminação postural.

Vale ressaltar que uma diferença média grande entre grupos não garante significância estatística, pois o valor de p também depende da variabilidade dos dados e do tamanho da amostra. Assim, mesmo diferenças aparentes podem não refletir um padrão consistente se houver muita dispersão ou valores extremos (indivíduos com medidas muito diferentes do restante do grupo).

4.4.3 Tamanho de Efeito ('d' de Cohen)

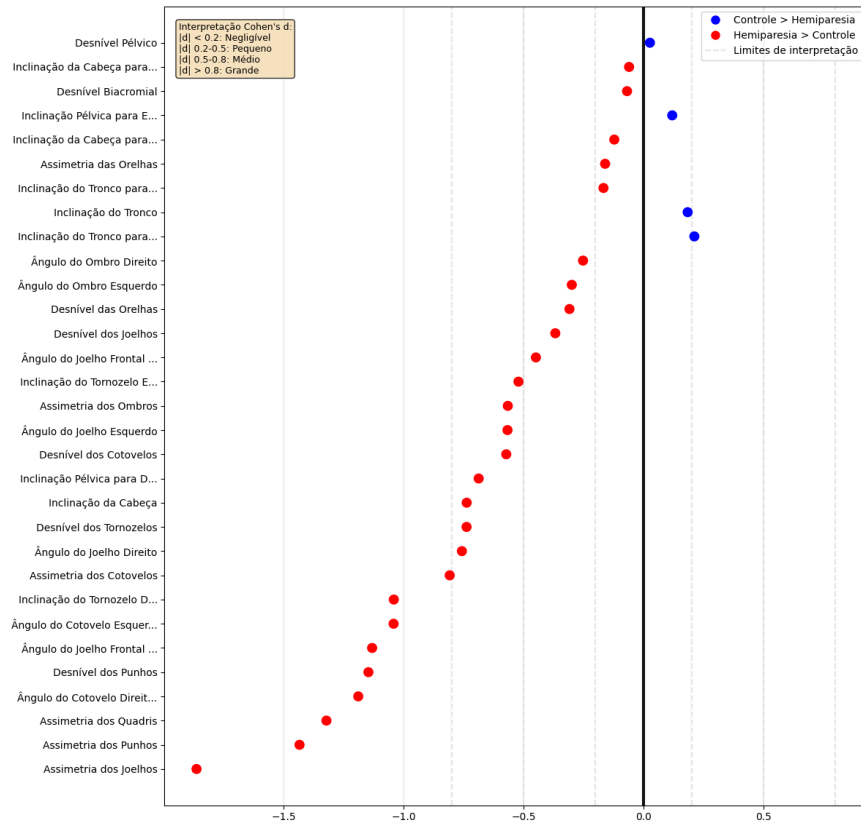
A análise do tamanho de efeito confirmou a relevância clínica das diferenças estatisticamente significativas observadas. Dezoito comparações apresentaram efeito grande ($d > 0.8$), validando a magnitude prática das alterações posturais identificadas. As Figuras 24, 25 e 26 apresentam os valores de 'd' de Cohen para as comparações entre grupos.

Figura 24 - 'd' de Cohen (Diparesia vs Controle)



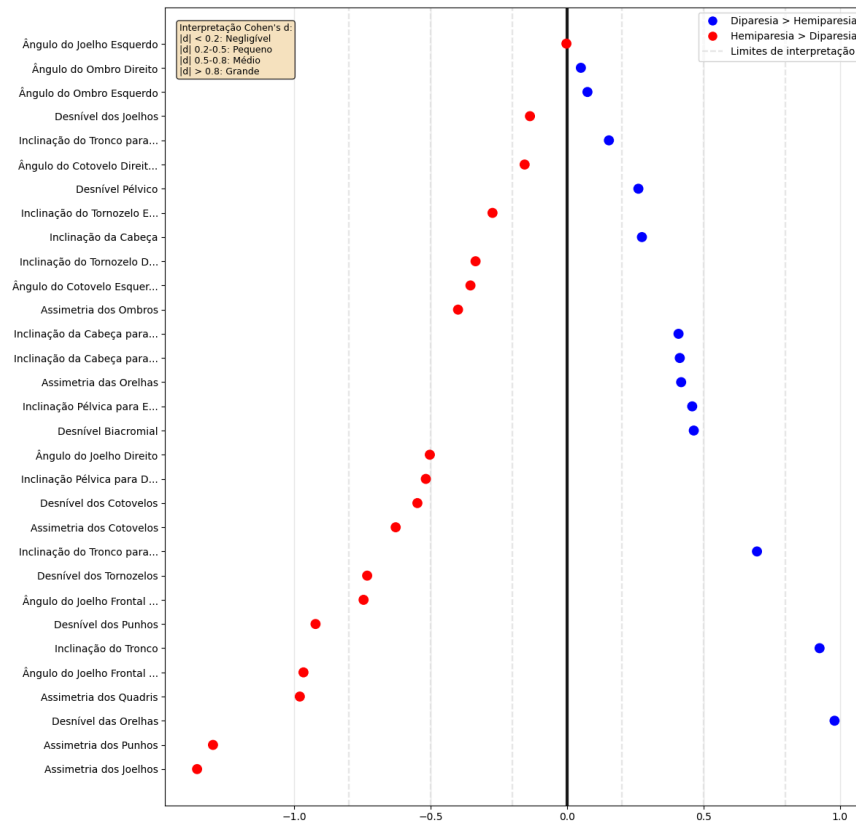
Fonte: autor

Figura 25 - 'd' de Cohen (Hemiparesia vs Controle)



Fonte: autor

Figura 26 - 'd' de Cohen (Hemiparesia vs Diparesia)



Fonte: autor

A comparação entre diparesia e controle, na Figura 24, demonstrou efeitos predominantemente pequenos a médios, com algumas métricas atingindo efeitos grandes, particularmente nas assimetrias e ângulos articulares específicos. A comparação entre hemiparesia e controle, na Figura 25, revelou efeitos consistentemente grandes na maioria das métricas de assimetria, confirmando as alterações posturais pronunciadas características da hemiparesia. A comparação entre hemiparesia e diparesia, na Figura 26, evidenciou efeitos médios a grandes, destacando as diferenças substanciais entre estes subtipos de paralisia cerebral.

Os valores de 'd' de Cohen mais elevados foram observados nas métricas de assimetria, com a assimetria de joelhos apresentando $d=1.184$ na comparação controle vs hemiparesia, seguida pela assimetria de punhos ($d=1.039$) e desnível de orelhas ($d=0.999$). Estes resultados confirmam que as diferenças observadas possuem não apenas significância estatística, mas também relevância clínica substancial, validando a capacidade discriminativa das métricas posturais desenvolvidas.

4.5 Ranqueamento

O sistema de ranqueamento das métricas, baseado na combinação de significância estatística e magnitude de efeito, identificou as medidas mais discriminativas entre os grupos estudados. A Tabela 24 de ranqueamento apresenta a pontuação de significância, calculada com base no número de comparações estatisticamente significativas entre pares de grupos, variando de 0/3 para métricas sem diferenças significativas até 3/3 para métricas significativas em todas as comparações.

Tabela 24 - Ranqueamento considerando significância 'p' & magnitude de efeito 'd'

| Metrica | Pontuação Significância | p-value Médio (ajustado) | 'd' de Cohen Médio |
|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|
| Assimetria dos Joelhos | 0.67 (2/3) | 0.2598 | 1.184 |
| Assimetria dos Punhos | 0.67 (2/3) | 0.2661 | 1.039 |
| Desnível das Orelhas | 0.67 (2/3) | 0.2826 | 0.999 |
| Ângulo do Cotovelo Direito | 0.67 (2/3) | 0.3197 | 0.927 |
| Inclinação do Tornozelo Direito | 0.33 (1/3) | 0.3318 | 0.716 |
| Ângulo do Cotovelo Esquerdo | 0.33 (1/3) | 0.3345 | 0.719 |
| Assimetria dos Quadris | 0.67 (2/3) | 0.336 | 0.812 |
| Ângulo do Joelho Frontal Direito | 0.33 (1/3) | 0.3473 | 0.708 |
| Desnível dos Punhos | 0.33 (1/3) | 0.3545 | 0.697 |
| Inclinação da Cabeça | 0.00 (0/3) | 0.3734 | 0.665 |
| Desnível dos Tornozelos | 0.00 (0/3) | 0.3942 | 0.578 |
| Inclinação do Tronco para Esquerda | 0.00 (0/3) | 0.3988 | 0.565 |
| Inclinação do Tronco | 0.00 (0/3) | 0.4122 | 0.621 |
| Assimetria dos Cotovelos | 0.00 (0/3) | 0.4518 | 0.482 |
| Ângulo do Joelho Direito | 0.00 (0/3) | 0.4697 | 0.454 |
| Inclinação Pélvica para Direita | 0.00 (0/3) | 0.4807 | 0.419 |
| Ângulo do Joelho Frontal Esquerdo | 0.00 (0/3) | 0.489 | 0.576 |
| Assimetria das Orelhas | 0.00 (0/3) | 0.5869 | 0.41 |
| Desnível dos Cotovelos | 0.00 (0/3) | 0.6004 | 0.381 |
| Inclinação da Cabeça para Direita | 0.00 (0/3) | 0.6095 | 0.354 |
| Inclinação Pélvica para Esquerda | 0.00 (0/3) | 0.6252 | 0.351 |
| Inclinação da Cabeça para Esquerda | 0.00 (0/3) | 0.6375 | 0.381 |
| Assimetria dos Ombros | 0.00 (0/3) | 0.6387 | 0.36 |
| Desnível Biacromial | 0.00 (0/3) | 0.6587 | 0.348 |
| Ângulo do Joelho Esquerdo | 0.00 (0/3) | 0.6636 | 0.337 |
| Inclinação do Tornozelo Esquerdo | 0.00 (0/3) | 0.7049 | 0.338 |
| Desnível dos Joelhos | 0.00 (0/3) | 0.8023 | 0.254 |
| Ângulo do Ombro Esquerdo | 0.00 (0/3) | 0.8064 | 0.273 |
| Inclinação do Tronco para Direita | 0.00 (0/3) | 0.8246 | 0.257 |
| Ângulo do Ombro Direito | 0.00 (0/3) | 0.8328 | 0.242 |
| Desnível Pélvico | 0.00 (0/3) | 0.9009 | 0.176 |

As três métricas mais discriminativas foram a assimetria dos joelhos (pontuação 0.67, d médio 1.184), assimetria dos punhos (pontuação 0.67, d médio 1.039) e desnível das orelhas (pontuação 0.67, d médio 0.999). Estas métricas demonstraram capacidade consistente de diferenciação entre grupos, aliada a tamanhos de efeito grandes, estabelecendo-se como indicadores posturais primários para distinção entre subtipos de paralisia cerebral.

As métricas angulares também apresentaram relevância discriminativa, com o ângulo do cotovelo direito (pontuação 0.67, d médio 0.927) e ângulo do cotovelo esquerdo (pontuação 0.33, d médio 0.719) demonstrando capacidade de diferenciação entre grupos específicos. As métricas de inclinação e desníveis segmentares apresentaram performance variável, com algumas demonstrando diferenças significativas pontuais entre grupos específicos.

O ranqueamento hierarquizado proporcionou visão objetiva das métricas mais sensíveis às diferenças posturais entre os três grupos, estabelecendo base quantitativa para priorização de medidas em aplicações clínicas futuras. As métricas com pontuação 0/3 demonstraram menor capacidade discriminativa, sugerindo maior similaridade entre grupos ou maior variabilidade intragrupos, limitando sua utilidade para diferenciação diagnóstica objetiva.

5. DISCUSSÃO

5.1 Quantificação Objetiva de Alterações Posturais

Os resultados obtidos demonstraram que as métricas posturais calculadas a partir da estimativa de pose 2D permitiram quantificar objetivamente as alterações características da paralisia cerebral. O sistema desenvolvido apresentou elevada capacidade discriminativa, com nove das 31 métricas avaliadas apresentando diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) e dezoito comparações revelando tamanhos de efeito grandes ($d > 0,8$). Essa robustez foi confirmada pela utilização combinada de ANOVA, testes post-hoc de Tukey e cálculo dos tamanhos de efeito, reforçando a validade dos resultados.

A análise comparativa baseada em PCK e mAP evidenciou padrões distintos de variabilidade postural entre os grupos, mostrando que crianças com paralisia cerebral apresentaram maior dispersão em relação ao grupo controle. Essa maior variabilidade confirma a sensibilidade do sistema para identificar desvios sutis no alinhamento corporal, consolidando sua aplicabilidade na avaliação objetiva da postura.

5.2 Padrões Posturais Específicos por Subtipo

A caracterização detalhada das métricas permitiu identificar assinaturas posturais distintas entre os subtipos de paralisia cerebral, evidenciando diferenças coerentes com a literatura clínica. No grupo com hemiparesia espástica, observou-se predomínio de assimetrias laterais, com maior impacto nos joelhos ($d = 1,184$), punhos ($d = 1,039$) e quadris ($d = 0,812$), refletindo o padrão unilateral típico dessa condição. A maior alteração no joelho direito pode estar relacionada à lateralidade da lesão: participantes com comprometimento predominante à esquerda tendem a transferir o peso para o hemicorpo contralateral, o que pode gerar uma flexão compensatória no joelho oposto, justificando os valores observados.

Já no grupo com diparesia espástica, as alterações foram predominantemente bilaterais e simétricas, relacionadas ao controle postural axial, com maior impacto nos ângulos dos cotovelos direito ($d = 0,927$) e esquerdo ($d = 0,719$), além de inclinações cefálicas e do tronco mais acentuadas. Essa diferenciação clara entre os subtipos evidencia que as métricas propostas não apenas identificam alterações posturais gerais, mas também capturam o perfil específico de cada padrão clínico, permitindo um direcionamento mais preciso das estratégias terapêuticas.

5.3 Aplicabilidade Clínica

As métricas automatizadas oferecem dados quantitativos objetivos e padronizados, que podem apoiar a prática clínica em diferentes níveis. Essa abordagem possibilita documentar de forma precisa a severidade das alterações posturais, padronizar critérios de avaliação entre diferentes profissionais, definir parâmetros de referência para o acompanhamento longitudinal e favorecer uma comunicação mais clara com equipes multidisciplinares.

A análise dos resultados também permite estabelecer conjuntos específicos de métricas prioritárias para cada subtipo, otimizando o monitoramento clínico. Para indivíduos com hemiparesia espástica, destacam-se a assimetria dos joelhos, punhos e quadris, o desnível das orelhas e o ângulo do joelho frontal direito, indicadores diretamente relacionados ao padrão unilateral e com maior sensibilidade para detectar compensações progressivas. Já no caso da diparesia espástica, as métricas mais representativas incluem os ângulos dos cotovelos, as inclinações da cabeça e do tronco e o desnível das orelhas, refletindo alterações bilaterais no controle postural axial e padrões espásticos simétricos.

Dessa forma, o uso dessas métricas permite personalizar protocolos de intervenção, selecionar indicadores mais relevantes para cada caso e aprimorar o acompanhamento evolutivo dos pacientes.

5.4 Implementação em Aplicação Móvel

Os achados deste estudo também apontam para a viabilidade de integrar o sistema proposto a aplicações móveis, permitindo avaliações rápidas, padronizadas e acessíveis no contexto clínico. Por meio da captura de imagens com a câmera do dispositivo, o algoritmo BlazePose processaria automaticamente os 33 pontos-chave corporais, calculando em tempo real as 31 métricas posturais. Em seguida, seriam gerados relatórios personalizados contendo apenas as métricas prioritárias para o subtipo do paciente, acompanhadas de gráficos intuitivos, valores normativos e interpretação clínica automatizada.

A arquitetura da aplicação poderia incluir funcionalidades como interface de captura com guias visuais para posicionamento correto, processamento em tempo real baseado no diagnóstico, banco de dados criptografado para armazenamento seguro, gráficos evolutivos com alertas para mudanças clinicamente relevantes, comparação com valores normativos e

exportação de relatórios detalhados em PDF. Essa integração de evidência científica e tecnologia acessível tem potencial para democratizar a avaliação postural objetiva, reduzindo barreiras técnicas e econômicas e ampliando o acesso a métodos de análise biomecânica de alta precisão.

5.5 Limitações do Estudo

O estudo apresenta limitações metodológicas importantes que devem ser consideradas na interpretação dos resultados:

Tamanho da amostra: A amostra de 16 participantes com paralisia cerebral representa uma limitação metodológica significativa que deve ser considerada na interpretação dos resultados. Embora este tamanho amostral seja adequado para análises estatísticas exploratórias e comum em estudos envolvendo populações clínicas específicas, a disponibilidade limitada de pacientes que atendiam rigorosamente aos critérios de inclusão durante o período de coleta restringiu a representatividade dos achados. A distribuição desigual entre os subtipos (8 participantes com diparesia espástica e 8 com hemiparesia espástica) também limita a generalização dos resultados para toda a população com paralisia cerebral. Estudos futuros com amostras maiores e multicêntricas poderiam fortalecer a validade externa dos achados.

Escopo metodológico: A estratégia metodológica de concentrar exclusivamente na análise de pontos-chave corporais através do algoritmo BlazePose, embora tenha proporcionado eficiência operacional e viabilidade técnica dentro das limitações temporais do estudo, restringiu a amplitude da avaliação postural. Esta escolha metodológica limitou a possibilidade de correlacionar os achados posturais com outras medidas biomecânicas complementares, como análise de pressão plantar, eletromiografia ou medidas de força muscular, que poderiam enriquecer a compreensão dos mecanismos subjacentes às alterações posturais observadas. Adicionalmente, a ausência de avaliação funcional associada às métricas posturais representa uma lacuna que poderia ser explorada em investigações futuras para estabelecer correlações entre alterações posturais quantitativas e capacidade funcional.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou um conjunto de 33 pontos-chave e de 31 métricas posturais quantitativas automatizadas que demonstraram capacidade de quantificar objetivamente alterações posturais características da paralisia cerebral. A análise realizada com o auxílio de ferramentas baseadas em smartphone demonstrou potencial para apoiar profissionais de saúde na avaliação postural objetiva, fornecendo dados numéricos padronizados para documentação clínica e monitoramento de evolução terapêutica.

A hipótese inicial de que métricas posturais automatizadas poderiam discriminar objetivamente padrões posturais entre subtipos de paralisia cerebral foi validada pelos resultados obtidos. Das 31 métricas avaliadas, 9 apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0.05$) entre os grupos, com 18 comparações demonstrando tamanhos de efeito grandes ($d > 0.8$), confirmando não apenas significância estatística, mas também relevância clínica. As métricas de assimetria emergiram como principais discriminadores, com a assimetria de joelhos apresentando o maior poder discriminativo ($F=11.314$, $p=0.0001$, $d=1.184$), seguida pela assimetria de punhos ($F=8.2$, $p=0.0011$, $d=1.039$) e desnível de orelhas ($F=8.06$, $p=0.0012$, $d=0.999$).

Os resultados alcançados evidenciam que o grupo hemiparesia apresenta valores consideravelmente elevados em todas as métricas de assimetria analisadas, confirmando o padrão de alterações posturais unilaterais característico desta condição. O grupo diparesia demonstrou alterações mais sutis porém consistentes, particularmente em métricas relacionadas ao controle postural bilateral. As análises post-hoc Tukey HSD confirmaram a capacidade do sistema em diferenciar especificamente entre pares de grupos, com diferenças significativas principalmente entre controle-hemiparesia e hemiparesia-diparesia, validando a especificidade das métricas para cada subtipo de paralisia cerebral.

As métricas automatizadas analisadas demonstraram capacidade robusta de quantificação objetiva das alterações posturais, fornecendo base quantitativa válida para diferenciação entre subtipos de paralisia cerebral e estabelecimento de valores normativos para cada grupo clínico estudado. O trabalho representa um avanço na direção da quantificação objetiva de alterações posturais, com as métricas estudadas mostrando-se sensíveis às particularidades de cada subtipo de paralisia cerebral, proporcionando ferramentas específicas para avaliação personalizada e acompanhamento dos pacientes.

Como trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de um sistema integrado baseado nas métricas validadas neste estudo, expandindo as análises para além da avaliação estática. A evolução natural desta pesquisa inclui a implementação de análises dinâmicas temporais dos mesmos 33 pontos-chave, permitindo avaliação contínua do movimento. Isto possibilitaria quantificar parâmetros como amplitude de movimento articular durante atividades funcionais, análise automatizada de marcha com identificação de fases do ciclo e cálculo de parâmetros espaço-temporais (cadência, comprimento de passo, velocidade), além de análise de tarefas específicas como alcance funcional e transferências posturais.

A expansão para análise tridimensional de postura através da integração de múltiplas câmeras ou sensores de profundidade permitiria reconstrução volumétrica completa do corpo, eliminando limitações de sobreposição de segmentos e fornecendo medidas angulares mais precisas em todos os planos anatômicos simultaneamente. Esta abordagem 3D também viabilizaria a estimativa do centro de gravidade corporal (COG) e sua relação com o centro de pressão (COP), permitindo análise quantitativa de estratégias de equilíbrio e controle postural, fundamentais para compreensão dos mecanismos compensatórios na paralisia cerebral.

Adicionalmente, propõe-se investigar a integração com dados de sensores inerciais (IMUs) para validação cruzada das métricas visuais e obtenção de informações complementares sobre aceleração e velocidade angular dos segmentos. O desenvolvimento de algoritmos de aprendizado profundo específicos para paralisia cerebral, treinados com os dados coletados, poderia aumentar a precisão da detecção de pontos-chave em posturas atípicas. A criação de índices compostos de severidade postural através da combinação ponderada das métricas mais discriminativas identificadas neste estudo facilitaria a comunicação clínica e o acompanhamento longitudinal.

Futuros estudos deverão explorar a aplicabilidade dessas métricas em populações mais amplas, incluindo diferentes níveis GMFCS, investigar sua sensibilidade a mudanças terapêuticas através de estudos longitudinais pré e pós-intervenção, e validar sua utilização em outros distúrbios neuromotores como distrofias musculares e lesões medulares pediátricas.

REFERÊNCIAS

- ALTMAN, D. G.; BLAND, J. M. How to obtain the confidence interval from a P value. *BMJ*, v. 343, p. d2090, 2021.
- BAX, M. et al. Proposed definition and classification of cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 47(8), p. 571-576, 2005.
- BAZAREVSKY, V. et al. BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking. arXiv preprint arXiv:2006.10204, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2006.10204>
- BERKER, A. N.; YALÇIN, S. Cerebral palsy: orthopedic aspects and rehabilitation. *Pediatric Clinics of North America*, v. 55, n. 5, p. 1209-1225, 2008.
- BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). *Diário Oficial da União*, 2018.
- CAO, Z. et al. Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017. *Proceedings...* 2017. p. 7291-7299.
- CHEN, X. et al. Privacy-preserving deep learning for medical image analysis: A comprehensive survey. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 68, n. 10, p. 2953-2964, 2021.
- COHEN, J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2. ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
- ESTEVA, A. et al. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, v. 542(7639), p. 115-118, 2017.
- FERREIRA, E. A. G. et al. Postural assessment software (SAPO): validation and reliability. *Clinics*, v. 66, n. 4, p. 675-681, 2010.
- FIELD, A. *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. 5. ed. London: SAGE Publications, 2022.
- FLUTTER-ML.DEV. `google_mlkit_pose_detection`. Pub.dev, 2025. Disponível em: https://pub.dev/packages/google_mlkit_pose_detection. Acesso em: 28 ago. 2025.
- GOOGLE. `Pose Detection`. Google Developers, 2025. Disponível em: <https://developers.google.com/ml-kit/vision/pose-detection>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- GRAHAM, H. K. et al. Cerebral palsy. *Nature Reviews Disease Primers*, v. 2, p. 15082, 2021.
- HAIR, J. F. et al. *Multivariate data analysis*. 8. ed. Hampshire: Cengage Learning, 2019.
- HEYRMAN, L. et al. A clinical tool to measure trunk control in children with cerebral palsy: the Trunk Control Measurement Scale. *Research in Developmental Disabilities*, v. 34, n. 12, p. 4303-4313, 2013.

JAMES, G. et al. An introduction to statistical learning: with applications in R. 2. ed. New York: Springer, 2021.

KENDALL, F. P. et al. Muscles: testing and function with posture and pain. 5. ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2022.

MARTINEZ, R. et al. Smartphone-based postural assessment: validation against gold standard methods. *Journal of Medical Internet Research*, v. 23, n. 4, p. e26528, 2021.

MCINTYRE, S. et al. Global prevalence of cerebral palsy: a systematic analysis. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 64, n. 12, p. 1494-1506, 2021.

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. 9. ed. New York: John Wiley & Sons, 2020.

MORGAN, C. et al. Early intervention for children with cerebral palsy: an international comparison. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 63, n. 11, p. 1326-1336, 2021.

NOVAK, I. et al. Early, accurate diagnosis and early intervention in cerebral palsy: advances in diagnosis and treatment. *JAMA Pediatrics*, v. 171(9), p. 897-907, 2017.

NOVAK, I. et al. State of the evidence traffic lights 2019: systematic review of interventions for preventing and treating children with cerebral palsy. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, v. 20(2), p. 3, 2020.

OSKOU, M. et al. An update on the prevalence of cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 55(6), p. 509-519, 2013.

PALISANO, R. et al. Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 39, n. 4, p. 214-223, 2020.

PAPANDREOU, G. et al. Real-time human pose estimation in the browser with TensorFlow.js. *TensorFlow Blog*, 2018. Disponível em: <https://blog.tensorflow.org/2018/05/real-time-human-pose-estimation-in.html>.

PATEL, D. R. et al. Cerebral palsy in children: a clinical overview. *Translational Pediatrics*, v. 9(Suppl 1), p. S125-S135, 2020.

PAVÃO, S. L. et al. Postural control in children with cerebral palsy: a systematic review. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 63, n. 8, p. 885-892, 2021.

PEARSALL, D. J.; REID, J. G. Line of gravity relative to upright vertebral posture. *Clinical Biomechanics*, v. 7, n. 2, p. 80-86, 2020.

PEIXOTO, S. V. et al. Prevalence and risk factors for cerebral palsy in Brazil: a population-based study. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, v. 78, n. 10, p. 621-628, 2020.

PORTNEY, L. G.; WATKINS, M. P. Foundations of Clinical Research: Applications to Practice. 4. ed. Philadelphia: F. A. Davis, 2020.

- PROSSER, L. A. et al. Trunk and hip muscle activation patterns are different during walking in young children with and without cerebral palsy. *Physical Therapy*, v. 90, n. 7, p. 986-997, 2020.
- REID, S. M. et al. Population-based studies of cerebral palsy: a systematic review. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 58, n. 2, p. 106-116, 2021.
- ROBERTSON, G. et al. *Research methods in biomechanics*. 3. ed. Champaign: Human Kinetics, 2021.
- RODBY-BOUSQUET, E. et al. Physical activity in children and adolescents with cerebral palsy: a cross-sectional study. *BMC Pediatrics*, v. 14, p. 157, 2021.
- ROSENBAUM, P. et al. A report: the definition and classification of cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 49, p. 8-14, 2022.
- SAHRMANN, S. et al. *Movement system impairment syndromes of the extremities, cervical and thoracic spines*. 2. ed. St. Louis: Elsevier, 2021.
- SANDLER, M.; HOWARD, A. G.; ZHU, M.; ZHMOGINOV, A.; CHEN, L.-C. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1801.04381>
- SANTAMARIA, V. et al. Effect of segmental trunk control on postural control in children with cerebral palsy. *Pediatric Physical Therapy*, v. 28, n. 1, p. 7-13, 2016.
- SCPE. *Surveillance of Cerebral Palsy in Europe (SCPE): reference and training manual*. 5. ed. London: Mac Keith Press, 2020.
- SCPE WORKING GROUP. Surveillance of cerebral palsy in Europe: a collaboration of cerebral palsy surveys and registers. *Developmental Medicine & Child Neurology*, v. 42, n. 12, p. 816-824, 2022.
- SHUMWAY-COOK, A.; WOOLLACOTT, M. H. *Motor control: translating research into clinical practice*. 6. ed. Philadelphia: Wolters Kluwer, 2023.
- SPOSITO, M. M. M.; RIBERTO, M. Avaliação da funcionalidade da criança com paralisia cerebral espástica. *Acta Fisiátrica*, v. 17, n. 2, p. 50-61, 2010.
- SULLIVAN, G. M.; FEINN, R. Using effect size—or why the P value is not enough. *Journal of Graduate Medical Education*, v. 4, n. 3, p. 279-282, 2012.
- TE VELDE, A. et al. Early diagnosis and classification of cerebral palsy: an historical perspective and barriers to an early diagnosis. *Journal of Clinical Medicine*, v. 8, n. 10, p. 1599, 2021.
- TOSHEV, A.; SZEGEDY, C. DeepPose: Human pose estimation via deep neural networks. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014. *Proceedings...* 2014. p. 1653-1660.

TUKEY, J. W. Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, v. 5, n. 2, p. 99-114, 1949.

YANG, J. F. et al. Training to enhance walking in children with cerebral palsy: are we missing the window of opportunity? *Seminars in Pediatric Neurology*, v. 20, n. 2, p. 106-115, 2012.

ZIFCHOCK, R. A. et al. The symmetry angle: a novel, robust method of quantifying asymmetry. *Gait & Posture*, v. 27, n. 4, p. 622-627, 2008.