GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO PARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM REABILITAÇÃO E DESEMPENHO FUNCIONAL

Lana Paula Cardoso Moreira

AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE TRONCO EM LACTENTES TÍPICOS POR MEIO DA CINEMETRIA E ACELEROMETRIA: ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DE CONSTRUCTO DE UM MODELO BIOMECÂNICO INTEGRADO

BELÉM - PA
2026

GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO PARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM REABILITAÇÃO E DESEMPENHO FUNCIONAL

Lana Paula Cardoso Moreira

AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE TRONCO EM LACTENTES TÍPICOS POR MEIO DA CINEMETRIA E ACELEROMETRIA: ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DE CONSTRUCTO DE UM MODELO BIOMECÂNICO INTEGRADO

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Reabilitação e Desempenho Funcional da Universidade do Estado do Pará.
Linha de pesquisa: Avaliação e intervenção terapêutica nos sistemas neuromuscular.
Orientadora: Profª. Drª. Lucieny da Silva Pontes
Co-orientador: Prof. Dr. Givago da Silva Souza

BELÉM - PA
2026

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) de acordo com o ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade do Estado do Pará
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C268a Cardoso Moreira , Lana Paula

Avaliação do controle de tronco em lactentes típicos por meio da cinemetria e acelerometria : elaboraçao e validação de constructo de um modelo biomecânico integrado / Lana Paula Cardoso Moreira . — Belém, 2026.

53 f. : il. color.

Orientadora: Profª. Dra. Lucieny da Silva Pontes

Coorientador: Prof. Dr. Givago da Silva Souza

Dissertação (Mestrado e Reabilitação em Desempenho Funcional) - Universidade do Estado do Pará, Campus III - Curso de Educação Física, 2026.

1. Controle de tronco . 2. Lactentes. 3. Cinemetria . 4. Acelerometria . 5. Biomecânica . I. Título.

CDD 22.ed. 615.82

RESUMO

Introdução: O desenvolvimento do controle de tronco em lactentes é um processo dinâmico, segmentar e não linear, fundamental para a aquisição de marcos motores independentes. Embora a cinemetria seja considerada o padrão-ouro para análise biomecânica, o uso de unidades de medida inerciais (IMUs) integradas a dispositivos como smartphones surge como uma alternativa inovadora, acessível e ecologicamente válida para a avaliação quantitativa em contextos clínicos e comunitários. **Objetivo**: Desenvolver um protocolo biomecânico exploratório para quantificar o controle reativo do tronco em lactentes típicos e analisar a concordância entre as medidas de tempo de resposta obtidas por acelerometria de smartphone e cinemetria optoeletrônica. **Métodos**: Estudo metodológico, quantitativo, com delineamento observacional analítico, conduzido com 16 lactentes típicos, com idade entre 4 a 9 meses. O protocolo foi desenvolvido com base na Segmental Assessment of Trunk Control (SATCo), com aplicação de perturbações externas padronizadas nos níveis axilar e pélvico. O tempo de resposta reativa foi capturado simultaneamente por um sistema de cinemetria 3D e pela acelerometria em um smartphone acoplado ao tórax (Samsung Galaxy A10; aplicativo Momentum®). A análise estatística incluiu o teste de Shapiro-Wilk para a verificação da normalidade dos dados, correlação de Pearson para a análise da correlação entre os métodos, Erro Absoluto Médio (MAE) e análise de Bland-Altman para a avaliação da concordância entre os sistemas de mensuração. **Resultados**: Não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias dos dois métodos em nenhuma das condições avaliadas ($p > 0,05$), indicando ausência de viés sistemático. A acelerometria demonstrou alta precisão clínica no nível axilar (MAE < 0,07s). Ambos os instrumentos foram sensíveis para detectar a precedência temporal do nível axilar em relação ao pélvico ($p < 0,001$), corroborando o padrão de desenvolvimento maturacional céfalo-caudal. **Conclusão**: O nível pélvico apresentou erros absolutos mais elevados em relação ao axilar, sinalizando a necessidade de refinamento do protocolo de filtragem de sinal para esse segmento em estudos futuros. A acelerometria por smartphone apresentou concordância satisfatória com a cinemetria para a mensuração do tempo de resposta reativa, demonstrando potencial como uma ferramenta objetiva e de baixo custo para a avaliação do desenvolvimento postural infantil.

Palavras-chave: Equilíbrio postural; Lactente; Captura de movimento biomecânico; Acelerometria

ABSTRACT

Introduction: Trunk control development in infants is a dynamic, segmental, and non-linear process, which is fundamental for the acquisition of independent motor milestones. Although kinematics is considered the gold standard for biomechanical analysis, the use of inertial measurement units (IMUs) integrated into devices such as smartphones emerges as an innovative, accessible, and ecologically valid alternative for quantitative assessment in clinical and community contexts. **Objective**: To develop an exploratory biomechanical protocol to quantify reactive trunk control in typically developing infants and to analyze the agreement between response time measurements obtained by smartphone accelerometry and optoelectronic kinematics. **Methods**: This is a methodological, quantitative study with an analytical observational design, conducted with 16 typically developing infants aged between 4 and 9 months. The protocol was developed based on the Segmental Assessment of Trunk Control (SATCo), applying standardized external perturbations at the axillary and pelvic levels. The reactive response time was captured simultaneously by a 3D kinematics system and by accelerometry via a smartphone attached to the thorax (Samsung Galaxy A10; Momentum® application). Statistical analysis included the Shapiro-Wilk test to verify data normality, Pearson's correlation to analyze the correlation between methods, Mean Absolute Error (MAE), and Bland-Altman analysis to evaluate the agreement between the measurement systems. **Results**: There was no statistically significant difference between the means of the two methods in any of the evaluated conditions ($p > 0.05$), indicating the absence of systematic bias. Accelerometry demonstrated high clinical accuracy at the axillary level (MAE < 0.07s). Both instruments were sensitive in detecting the temporal precedence of the axillary level relative to the pelvic level ($p < 0.001$), corroborating the cephalo-caudal maturational development pattern. **Conclusion**: The pelvic level presented higher absolute errors compared to the axillary level, signaling the need to refine the signal filtering protocol for this segment in future studies. Smartphone accelerometry showed satisfactory agreement with kinematics for measuring reactive response time, demonstrating potential as an objective and low-cost tool for the assessment of infant postural development.

Keywords: Postural balance; Infant; Kinematics; Accelerometry.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 6
2. OBJETIVOS 9
2.1 OBJETIVO GERAL 9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 9
3. REFERENCIAL TEÓRICO..... 10
3.1 Desenvolvimento do controle postural.....10
3.2 Aquisição do sentar: biomecânica e respostas adaptativas.....11
3.3 Avaliação do Controle Postural.....13
4. MATERIAIS E MÉTODOS..... 16
4.1 Desenho do Estudo..... 16
4.2 População 16
4.3 Critérios de Inclusão..... 17
4.4 Critérios de Exclusão..... 18
4.5 Variáveis e Desfechos..... 18
4.6 Procedimentos, Instrumentos de Avaliação e Coleta..... 18
4.7 Escala Motora Infantil Alberta (AIMS) 19
4.8 Avaliação Segmentar de Controle de Tronco (SATCo) 20
4.9 Acelerômetro e Registros de Sinais Inerciais..... 22
4.10 Análise do Movimento com Captura em 3D por câmeras ópticas..... 24
4.11 Análise de Concordância entre Métodos..... 25
4.12 Aspectos Éticos.....25
5. ANÁLISE DE DADOS..... 26
6. RESULTADOS..... 27
6.1 Desfecho primário..... 28
6.2 Desfecho secundário..... 31
7. DISCUSSÃO..... 34
8. CONCLUSÃO..... 39
REFERÊNCIAS 41
APÊNDICE A..... 46
APÊNDICE B..... 50
ANEXOS.....52

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento motor nos primeiros meses de vida constitui um processo dinâmico, não linear e contínuo, no qual a aquisição de habilidades posturais básicas sustenta a emergência de comportamentos motores mais complexos e globais (Rachwani et al., 2013; Rachwani et al., 2015; Thelen, 1994; Woollacott; Shumway-Cook, 2022). Nesse contexto, o controle de tronco, entendido como a capacidade de estabilizar ativamente os segmentos corporais (cervical, torácico e pélvico) frente às demandas posturais de natureza estáticas e dinâmicas assume um papel central, emerge de forma céfalo-caudal e segmentar para sustentar a organização postural e de proximal-distal para a exploração motora fina (Greco et al., 2020; Horak, 2006; Hadders-Algra, 2013; Thelen, 1994; Woollacott; Shumway-Cook, 2022).

Esse processo depende da integração contínua de informações visuais, vestibulares e somatossensoriais que possibilitam ajustes adaptativos frente às demandas internas e externas do ambiente (Hadders-Algra, 2013) e, pode ser organizada em três categorias funcionais: controle antecipatório, reativo e ajustes voluntários do equilíbrio (Horak, 2006; Massion, 1992; Woollacott; Shumway-Cook, 2022). A aquisição da postura sentada ocorre entre os 4-9 meses de idade, representa um marco motor crítico para habilidades subsequentes como o engatinhar e a marcha, sendo sustentado pelo progressivo refinamento do controle segmentar de tronco (Pin et al., 2018; Saavedra; Woollacott, 2009; Silva et al., 2024). Dentre os componentes do controle postural, o controle reativo de tronco – caracterizado por sinergias musculares automáticas desencadeadas por perturbações externas inesperadas – é fundamental para a progressão motora independente do lactente (Hedberg et al., 2005; Rachwani et al., 2023).

A avaliação segmentar proposta por Saavedra e Woollacott (2009), articula dimensões cronológicas, biomecânicas e sensoriais do desenvolvimento constituindo referencial metodológico consolidado para investigação do controle de tronco de lactentes. O controle reativo de tronco é fundamental para a dinâmica maturacional do lactente, pois

falhas nessa capacidade de ajuste imediato podem comprometer a progressão para marcos motores independentes e limitar a interação segura do lactente com o meio (Rachwani et al., 2023). Estudos de Hedberg et al. (2005) focaram na emergência precoce das sinergias musculares reativas, inferindo que estão presentes ainda no primeiro mês de vida nos músculos cervicais, diminuem entre o 1º e o 3º mês, para a seguir ocorrer o refinamento temporal a partir do 4º mês de vida do lactente. Portanto, a quantificação objetiva dessas respostas permite identificar precocemente variações no desenvolvimento postural, a emergência de padrões como a lateralidade e a direção das sinergias musculares reativas com evidências biomecânicas precisas, bem como subsidiar diagnóstico, prognóstico e direcionamento de intervenção terapêutica (Silva et al., 2024; Woollacott; Shumway-Cook, 2022). Embora o sistema neuromotor reaja a desafios de equilíbrio desde os primeiros meses de vida, o componente reativo em lactentes permanece subexplorado sob uma perspectiva quantitativa e segmentar (Saavedra et al., 2012; Sibley et al., 2017).

Escalas clínicas como a *Alberta Infant Motor Scale* (AIMS) e a *Segmental Assessment of Trunk Control* (SATCo) são amplamente utilizadas nesse contexto. (Butler et al., 2010; Piper; Darrah, 1994). Entretanto, a natureza observacional dessas ferramentas limita a quantificação de respostas dinâmicas e temporais rápidas, essenciais para caracterizar a dinâmica do tronco durante a recuperação do equilíbrio. O padrão-ouro para análise biomecânica é a cinemetria, que permite a reconstrução precisa de trajetórias espaciais por meio de sistemas optoeletrônicos 2D e 3D. Devido à sua alta confiabilidade e acurácia na detecção de deslocamentos milimétricos, este sistema é amplamente consolidado em pesquisas clínicas que investigam o controle postural e a dinâmica do movimento (Archibeck et al., 2025; Das et al., 2023; Suo et al., 2024).

Unidades de medidas inerciais (UMI’s) têm sido amplamente utilizadas na análise do movimento humano devido à sua portabilidade, baixo custo e facilidade de aplicação em diferentes contextos clínicos e experimentais. UMI’s, frequentemente são integradas a dispositivos portáteis como smartphones e sistemas vestíveis, permitindo registrar variáveis

cinemáticas como a velocidade angular, por meio do giroscópio e a aceleração linear, usando acelerômetros, dessa forma é possível avaliar o movimento corporal em tempo real, possibilitando a obtenção de medidas objetivas relacionadas à dinâmica do controle postural (Airaksinen et al. 2020, Garcia-Soidan et al., 2020; Oliveira et al., 2023; Lin, 2025).

Estudos recentes demonstram grande potencial de tecnologias portáteis para avaliar o controle postural, especificamente UMIs, com aplicabilidade em diferentes populações clínicas, ampliando as possibilidades de monitoramento funcional do movimento humano, contudo, quando o enfoque se torna a primeira infância, esta tecnologia ainda é pouco explorada. Iniciativas voltadas à democratização das tecnologias de análise do movimento, como o projeto Momentum da Universidade Federal do Pará, destacam o potencial de soluções baseadas em sensores acessíveis para ampliar a avaliação biomecânica em contextos clínicos e de pesquisa, mantendo custos reduzidos e maior viabilidade de implementação (Duarte et al., 2021; Igarashi et al., 2024; Oliveira et al., 2023; Rodrigues et al., 2022).

Nesse contexto, a análise de concordância entre métodos com medidas obtidas simultaneamente por UMI's e por sistemas de captura de imagem por cinemetria torna-se relevante cientificamente para verificar a consistência de novos métodos de avaliação, e assim determinar se tecnologias mais acessíveis podem fornecer estimativas equivalentes às obtidas por métodos laboratoriais consolidados e padrão ouro, contribuindo para ampliar as ferramentas disponíveis para avaliação do controle postural. Até o momento, não foram identificados na literatura estudos que investigam simultaneamente controle de tronco em lactentes típicos quanto ao tipo de movimento (reativo) e o segmento (axilar e pélvico), utilizando concomitantemente acelerometria e cinemetria.

A investigação do controle reativo em lactentes permanece relativamente pouco investigado sob uma perspectiva quantitativa e biomecânica, para tanto se propõe um modelo biomecânico de avaliação do controle postural na postura sentada, para lactentes com faixa etária entre 4-9 meses de idade. Adicionalmente, busca-se realizar a análise de concordância

entre essas abordagens instrumentais, contribuindo para o aprimoramento de ferramentas objetivas e de baixo custo de avaliação do desenvolvimento postural infantil.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver um protocolo biomecânico preliminar e exploratório para quantificar o controle reativo do tronco na postura sentada, em lactentes típicos, por meio da análise do tempo de resposta do tronco frente a perturbações externas padronizadas, comparando simultaneamente medidas obtidas por acelerometria de smartphone e cinemetria optoeletrônica.

2.2 Específicos

- Analisar a consistência das medidas de tempo de resposta reativa do tronco obtidas por acelerometria e cinemetria em lactentes típicos
- Comparar as medidas de tempo de resposta reativa obtidas pela cinemetria (padrão-ouro) e acelerometria a fim de verificar o nível de concordância e correlação linear entre os instrumentos.
- Verificar a correlação entre a cinemetria e a acelerometria quanto ao segmento – axilar e pélvico – frente ao tempo de resposta reativa de tronco.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Desenvolvimento do controle postural

O controle postural pode ser compreendido, à luz da teoria dos sistemas dinâmicos, como uma propriedade emergente e auto-organizada, resultante da interação contínua entre o sistema nervoso em maturação, as propriedades biomecânicas do corpo em crescimento e as restrições impostas pelo ambiente e pela tarefa, e não como o produto de um programa maturacional fixo e predeterminado (Hadders-Algra, 2013; Thelen, 1994). Nessa perspectiva, cada nova aquisição postural representa a resolução, pelo sistema nervoso imaturo, do chamado "problema dos graus de liberdade": a necessidade de coordenar um número elevado de segmentos corporais de modo funcional, congelando inicialmente alguns graus de liberdade para, progressivamente, liberá-los à medida que a estabilidade postural é conquistada (Bernstein, 1967). Essa concepção dialoga com a Teoria da Seleção por Grupos Neuronais, segundo a qual a variabilidade motora observada nos primeiros meses de vida constitui uma marca funcional de um sistema nervoso que explora ativamente diferentes soluções motoras antes de selecionar, pela experiência sensoriomotora repetida, os padrões mais eficientes para cada contexto (Hadders-Algra, 2018).

Sob o ponto de vista funcional, o controle postural tem sido classicamente organizado em três categorias complementares: o controle antecipatório, programado momentos antes da execução de um movimento voluntário; o controle reativo, deflagrado de forma automática e de latência curta em resposta a perturbações externas inesperadas; e os ajustes voluntários do equilíbrio, mobilizados durante a execução de movimentos dirigidos a um objetivo (Horak, 2006; Massion, 1992). Do ponto de vista ontogenético, o controle reativo desponta como o componente mais precocemente identificável, ao passo que as estratégias antecipatórias emergem de forma mais tardia, à medida que o lactente acumula experiência motora e sensorial (Hadders-Algra, 2013).

A emergência do controle postural segue, ainda, uma direção céfalo-caudal e próximo-distal amplamente documentada: o controle cervical antecede o torácico, que

antecede o pélvico, e a estabilização proximal do tronco constitui pré-requisito biomecânico para a liberação dos graus de liberdade distais necessários à exploração manual (Greco et al., 2020; Horak, 2006; Woollacott; Shumway-Cook, 2022). Essa organização depende da integração progressiva de informações visuais, vestibulares e somatossensoriais, cuja ponderação relativa se modifica ao longo do desenvolvimento conforme a fonte mais confiável para cada contexto postural (Hadders-Algra, 2013).

Estudos eletromiográficos indicam que as sinergias musculares reativas do tronco não seguem uma trajetória estritamente linear. Respostas posturais direcionalmente específicas a perturbações externas já estão presentes em lactentes de apenas um mês de vida, antes de qualquer experiência postural relevante, sugerindo uma origem inata desses circuitos reflexos primários (Hedberg et al., 2004). Essas respostas diminuem entre o primeiro e o terceiro mês, retomando um refinamento temporal progressivo a partir do quarto mês, período que coincide com a janela de aquisição da postura sentada (Hedberg et al., 2005). Desvios nesse padrão têm sido associados a risco de atraso no neurodesenvolvimento e podem subsidiar diagnóstico, prognóstico e intervenção terapêutica precoce (Silva et al., 2024; Woollacott; Shumway-Cook, 2022).

3.2 Aquisição do sentar: biomecânica e respostas adaptativas

A aquisição da postura sentada independente, tipicamente concluída entre os 4 e os 9 meses de idade, pode ser interpretada como um caso paradigmático da resolução do problema dos graus de liberdade (Bernstein, 1967). Utilizando análise não linear do centro de pressão, Harbourne e Stergiou (2003) identificaram três estágios biomecânicos. Inicialmente, o lactente reduz a dimensionalidade do movimento e adota estratégias rígidas de estabilização ("congelamento" dos graus de liberdade); em seguida, à medida que a estabilidade aumenta, a dimensionalidade volta a crescer e os graus de liberdade são progressivamente "liberados", permitindo respostas mais flexíveis às perturbações. Esses achados sustentam a compreensão do sentar como processo exploratório e não linear.

A avaliação segmentar proposta por Saavedra e Woollacott (2009) articula essa progressão em três dimensões: cronológica, pela janela etária de 4 a 9 meses; biomecânica, pela direção céfalo-caudal de liberação segmentar do tronco; e sensorial, pelo refinamento gradual do controle reativo à medida que a ponderação das aferências vestibulares e somatossensoriais se torna mais eficiente (Harbourne; Stergiou, 2003; Hedberg et al., 2005; Saavedra; Woollacott, 2009). Essa maturação não ocorre de maneira homogênea entre os planos de movimento: o controle no plano anteroposterior tende a se estabilizar mais precocemente do que no mediolateral, que permanece com padrão distinto do observado em adultos mesmo em fases avançadas da aquisição do sentar independente (Cignetti et al., 2011).

Estudos eletromiográficos e cinemáticos aprofundam essa compreensão: De Graaf-Peters et al. (2007), ao investigarem lactentes de 4 e 6 meses durante alcance manual em postura sentada, verificaram um padrão de recrutamento predominantemente descendente (*top-down*), no qual os segmentos torácicos superiores são estabilizados antes dos lombopélvicos, achado consistente com a direção céfalo-caudal de maturação já descrita e também documentado por Rachwani et al. (2015) e Saavedra, Van Donkelaar e Woollacott (2012), que descreveram a aquisição da estabilidade postural como um processo sequencial e descendente.

As respostas adaptativas do tronco a perturbações externas constituem, nesse contexto, uma janela privilegiada para o estudo do controle reativo. O princípio biomecânico subjacente a protocolos de avaliação segmentar, isto é, perturbações padronizadas em níveis progressivamente mais caudais, do axilar ao pélvico, reside em remover, de forma controlada, o suporte externo ao tronco, exigindo do lactente a geração de sinergias corretivas automáticas (Hedberg et al., 2005; Rachwani et al., 2023). Uma revisão sistemática recente sobre a avaliação biomecânica do sentar identificou marcante heterogeneidade entre os modelos empregados na literatura, além da ausência de modelos que integrem dados cinéticos, cinemáticos e eletromiográficos de forma abrangente

(Gkaraveli et al., 2023), reforçando a relevância de abordagens que combinem cinemetria e acelerometria.

Por envolverem latências curtas e deslocamentos de pequena amplitude, essas respostas demandam instrumentos com resolução temporal e espacial elevada, o que torna a validação das ferramentas de avaliação um elemento central para o avanço do conhecimento sobre o controle postural na infância, tema tratado a seguir.

3.3 Avaliação do Controle Postural

A transposição desses conceitos para a prática clínica consolidou o uso de escalas padronizadas de avaliação motora. A *Alberta Infant Motor Scale* (AIMS) é um instrumento observacional amplamente validado, que avalia a capacidade do lactente de controlar o peso corporal e realizar movimentos antigravitacionais nas posições prona, supina, sentada e em pé, classificando o desempenho em percentis normativos (Piper; Darrah, 1994). No contexto brasileiro, a escala foi validada por Valentini e Saccani (2012), que estabeleceram os pontos de corte utilizados para classificar o desempenho como típico, suspeito de atraso ou com atraso motor, permitindo identificar o risco de vulnerabilidade motora na população avaliada (Eliks; Gajewska, 2022).

De forma complementar, a *Segmental Assessment of Trunk Control* (SATCo), desenvolvida por Butler et al. (2010), avalia o controle de tronco segmento a segmento, por meio da redução sistemática do suporte externo, da cintura escapular à pelve, testando em cada nível os componentes estático, ativo e reativo. Estudos psicométricos demonstram confiabilidade interexaminador elevada e capacidade de identificar, em lactentes típicos entre 4 e 9 meses, o padrão céfalo-caudal de desenvolvimento do controle de tronco, com o componente reativo diferenciando lactentes a termo e pré-termo apenas a partir dos 8 meses de idade (Butler et al., 2010; Pin et al., 2018). Essa granulação segmentar distingue a SATCo de escalas motoras globais como a AIMS, e estudos subsequentes reforçam sua relação com o desenvolvimento motor grosso global (Pin et al., 2019).

Por serem instrumentos observacionais e de natureza ordinal, tanto a AIMS quanto a SATCo apresentam limitações para quantificar parâmetros temporais rápidos e oscilações posturais sutis (Gkaraveli et al., 2023; Cignetti et al., 2011). Métodos instrumentais como a análise do centro de pressão, a eletromiografia, a cinemática tridimensional e a acelerometria capturam dimensões complementares do comportamento postural, ampliando a sensibilidade para detectar diferenças sutis de maturidade neuromotora e reduzindo a dependência exclusiva da interpretação clínica observacional (Pavão et al., 2013).

A cinemetria, por meio de marcadores rastreados por câmeras infravermelhas em configurações bidimensionais ou tridimensionais, permite reconstruir trajetórias espaciais com resolução milimétrica e mensurar variáveis como deslocamento angular, velocidade segmentar e deslocamento do centro de massa (Archibeck et al., 2025; Das et al., 2023; Suo et al., 2024). A análise biomecânica do controle de tronco combina a cinemetria de alta precisão (para reconstrução tridimensional e cálculo de deslocamentos angulares) e a acelerometria triaxial (para registro da aceleração angular e do tempo de resposta postural reativa).

Essa abordagem integrada possibilita a aplicação de protocolos padronizados de avaliação postural, incluindo testes em posição sentada estática (análise do *sway* postural) e testes de estabilidade dinâmica frente a perturbações externas ou tarefas de alcance de objetos. Dessa forma, extraem-se variáveis cinemáticas e inerciais que fundamentam a caracterização quantitativa da função postural do lactente. (Archibeck et al., 2025; Suo et al., 2024). Ainda assim, o custo elevado dos equipamentos, a necessidade de ambientes laboratoriais controlados e a complexidade de calibração restringem a aplicação da cinemetria a contextos de pesquisa especializados, dificultando sua incorporação à rotina clínica.

As unidades de medida inerciais (UMIs) surgem, nesse cenário, como alternativa instrumental mais acessível. Integradas a smartphones e sistemas vestíveis, permitem registrar a aceleração linear e a velocidade angular, possibilitando a obtenção de medidas

objetivas da dinâmica postural fora do ambiente laboratorial, com portabilidade, baixo custo e maior validade ecológica (Airaksinen et al., 2020; García-Soidán et al., 2020; Lin, 2025; Oliveira et al., 2023). Especificamente quanto ao controle postural sentado, Frechette et al. (2020) demonstraram que a acelerometria por smartphone acoplado ao tórax fornece avaliação válida e sensível, capaz de discriminar entre grupos com e sem comprometimento motor, e Rihar et al. (2014) validaram unidades inerciais associadas a colchonetes de pressão para avaliar a postura de tronco diretamente em lactentes.

Mais recentemente, Marín-Palma et al. (2025) reforçaram a relevância do tronco nesse tipo de avaliação: ao analisarem o movimento espontâneo de lactentes entre 0 e 6 meses por meio de sensores inerciais vestíveis, identificaram que os parâmetros extraídos do tronco discriminam melhor as diferentes faixas etárias do que os parâmetros extraídos dos membros, sobretudo entre os 3 e os 6 meses de vida, evidência adicional de que o tronco constitui um segmento particularmente informativo para a caracterização instrumental do desenvolvimento motor precoce.

Revisões sistemáticas identificam, ainda assim, um número reduzido de estudos empregando a acelerometria para avaliação do equilíbrio postural em crianças, evidenciando que a aplicação específica em lactentes permanece particularmente pouco explorada (García-Soidán et al., 2020). Publicações recentes começam a preencher parcialmente essa lacuna: Bosserman et al. (2023) demonstraram, em revisão sistemática, que medidas instrumentais do controle postural têm potencial preditivo para comprometimentos motores futuros em lactentes pré-termo, e Airaksinen et al. (2025) validaram o uso de um sistema vestível domiciliar para acompanhar longitudinalmente marcos motores grossos em lactentes, com desempenho comparável ao da avaliação interexaminador estabelecida pela Organização Mundial da Saúde.

No cenário nacional, o projeto Momentum, da Universidade Federal do Pará, integra esse movimento de democratização tecnológica, ampliando as possibilidades de avaliação biomecânica em contextos clínicos e de pesquisa com sensores acessíveis (Duarte et al.,

2021; Igarashi et al., 2024; Oliveira et al., 2023, Rodrigues et al., 2022). Do ponto de vista estatístico, a validação de um método alternativo frente a um padrão-ouro não deve se apoiar isoladamente em coeficientes de correlação, uma vez que a correlação avalia a força de uma associação linear entre duas medidas, mas não indica se ambas produzem valores intercambiáveis na prática. A abordagem consolidada para esse tipo de comparação é a análise de concordância proposta por Bland e Altman (1986), fundamentada na estimativa de limites de concordância a partir da média e do desvio-padrão das diferenças entre os métodos, o que permite identificar tanto o erro sistemático (*bias*) quanto a magnitude aceitável de variação entre as medidas, lógica estatística que fundamenta a análise de concordância conduzida no presente estudo, detalhada nos procedimentos metodológicos a seguir.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenho do Estudo

Trata-se de um estudo metodológico, de abordagem quantitativa, com delineamento observacional analítico, voltado para o desenvolvimento, aplicabilidade e validação de constructo de um protocolo biomecânico integrado. A investigação concentrou-se na análise comparativa e de concordância entre um sistema portátil de acelerometria por smartphone e o sistema de cinemetria tridimensional (padrão-ouro) no contexto da avaliação do controle reativo de tronco em lactentes típicos.

4.2 População

A amostra foi constituída por lactentes de ambos os sexos, na faixa etária de 4 a 9 meses, atendidos no Centro de Saúde Escola do Marco (CSEM), localizado na Av. Rômulo Maiorana, 2558, bairro do Marco, na cidade de Belém.

A amostragem deu-se por conveniência, resultando em uma amostra final de 16 lactentes típicos. Essa magnitude amostral é compatível com a literatura sobre biomecânica do desenvolvimento motor em lactentes, na qual amostras entre 10 e 20 participantes são recorrentes em razão da complexidade dos protocolos de coleta e da alta variabilidade

comportamental dessa população (Hedberg et al., 2005; Rachwani et al., 2015; Airaksinen et al., 2020). Dado o caráter exploratório e de prova de conceito do presente estudo, não foi realizado cálculo amostral formal a priori por *G*Power* ou método equivalente, procedimento mais indicado quando diante de estudos confirmatórios e ensaios clínicos.

Inicialmente, foram recrutados 31 lactentes; contudo, houve uma perda amostral de 15 participantes devido à exclusão de registros que apresentaram artefatos gerados pelo estado comportamental dos lactentes (como choro persistente e agitação psicomotora), critério indispensável para garantir a integridade dos sinais cinemáticos e acelerométricos analisados (Figura 1).



Figura 1. Fluxograma de recrutamento e seleção dos participantes do estudo. Fonte: Notebook LM.

4.3 Critérios de Inclusão

Lactentes de 4 a 9 meses de idade, nascidos a termo, de ambos os sexos, com desenvolvimento motor típico, sem histórico de intercorrências neonatais significativas e sem diagnóstico de condições neurológicas, musculoesqueléticas ou sensoriais que pudessem interferir no controle postural e no desempenho motor.

4.4 Critérios de Exclusão

Presença de alterações neuromotoras, ortopédicas ou síndromes genéticas; deficiências sensoriais não corrigidas; uso de dispositivos ortopédicos (órteses ou coletes); e condições clínicas agudas no dia da coleta (como febre ou infecções respiratórias). Também foram excluídos lactentes que não completaram os procedimentos de avaliação devido à agitação, não colaboração ou choro persistente.

4.5 Variáveis e Desfechos

Variável principal e desfecho primário: Tempo de resposta reativa de tronco de lactentes, medido em segundos, após as perturbações externas em diferentes níveis de controle.

Variáveis secundárias e desfecho secundário: Variação do tempo de resposta entre o suporte axilar e o suporte pélvico medidos por cinemetria e acelerometria.

4.6 Procedimentos, Instrumentos de Avaliação e Coleta

A captação dos participantes ocorreu por meio de busca ativa nas dependências do CSEM, especificamente durante os dias de atendimento ambulatorial. As famílias cujos lactentes atendiam à faixa etária elegível foram abordadas de forma padronizada pelos pesquisadores, que apresentaram os objetivos do estudo e os procedimentos de avaliação. Mediante o interesse e o consentimento formal dos responsáveis legais, consolidado pela assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – TCLE (APÊNDICE A), foi realizado o agendamento prévio das sessões de coleta individual.

As coletas foram realizadas na Universidade do Estado do Pará, em colaboração com o Laboratório de Estudos de Motricidade Humana (LEMOH) do Instituto de Ciências da Saúde (ICS)/UFPA, no período de setembro de 2024 a dezembro de 2025. Os procedimentos foram conduzidos em sala climatizada, com iluminação adequada, ausência de ruído ambiental e controle de estímulos visuais e sonoros que pudessem provocar reações não relacionadas ao protocolo experimental.

No momento da avaliação, foi aplicado um questionário não estruturado (APÊNDICE B) para caracterização sociodemográfica e clínica dos participantes, com levantamento de variáveis relevantes para o desfecho do estudo, como idade gestacional. Em seguida, foi aplicada a Escala Motora Infantil Alberta (AIMS) para confirmação do desenvolvimento motor típico dos participantes, conforme será descrito na seção 4.7. O protocolo biomecânico de avaliação do controle reativo de tronco foi estruturado com base na Avaliação Segmentar do Controle de Tronco (SATCo), detalhada na seção 4.8.

Para garantir a qualidade dos registros coletados, foram adotadas as seguintes condições de medição: (a) lactente acordado e em estado de alerta calmo no momento da avaliação; (b) uso de fralda e ausência de peças de roupa que pudessem interferir no posicionamento ou na captação dos sensores inerciais; (c) presença obrigatória do cuidador/responsável durante todo o procedimento, posicionado de forma a oferecer segurança emocional ao lactente sem interferir no campo de captação das câmeras.

O protocolo de perturbações externas foi composto por três repetições para cada lado (direito e esquerdo), totalizando seis perturbações por nível de suporte avaliado. Nos casos em que o lactente apresentou choro ou agitação psicomotora, o procedimento foi pausado e retomado somente após o retorno ao estado de alerta calmo, com auxílio do cuidador e de estímulos visuais. Quando esse retorno não foi possível, a coleta foi interrompida e o participante foi excluído da análise, conforme detalhado na Figura 1. Ao final da avaliação, os responsáveis receberam um relatório sobre o desempenho do lactente na AIMS, acompanhado de orientações para estimulação do desenvolvimento neuropsicomotor quando identificado risco de atraso. A avaliação teve duração média de 30 minutos, podendo se estender até 45 minutos em função da irritabilidade do lactente ou de intercorrências na conexão dos sensores inerciais.

4.7 Escala Motora Infantil Alberta (AIMS)

A AIMS é uma ferramenta de avaliação desenvolvida para medir o desenvolvimento motor de crianças de 0 a 18 meses. Ela foi projetada para avaliar o controle postural e a

aquisição de habilidades motoras grossas em quatro posições: prono, supino, sentado e em pé (Piper; Darrah, 1994; Valentini; Saccani, 2012). A escala inclui 58 itens observacionais que analisam a capacidade da criança de controlar o peso corporal, manter a postura, realizar movimentos antigravitacionais, e a qualidade desses movimentos. É uma escala validada e amplamente utilizada para avaliar o desenvolvimento motor típico e identificar atrasos motores em populações pediátricas.

A pontuação total, resultante da soma dos pontos obtidos em todos os itens de cada posição, é convertida em um percentil de desenvolvimento de acordo com as normas para a idade cronológica. Para fins de interpretação clínica, adotam-se os pontos de corte estabelecidos na literatura: o desempenho é considerado 'típico' quando o percentil está acima de 25; 'suspeito de atraso motor' entre os percentis 6 e 25; e 'atraso motor' quando o valor é igual ou inferior ao percentil 5 (Valentini; Saccani, 2012). Dessa forma, o percentil permite identificar não apenas o nível de maturidade neuropsicomotora, mas também o risco de vulnerabilidade motora na população estudada (Eliks; Gajewska, 2022).

4.8 Avaliação Segmentar de Controle de Tronco (SATCo)

A Avaliação Segmentar do Controle de Tronco, desenvolvido e validado por Butler et al. (2010), é um instrumento clínico específico para a avaliação do controle segmentar do tronco em lactentes e crianças, permitindo identificar, de forma precisa, o nível mais elevado de controle postural ativo ao longo do eixo céfalo-caudal. Diferentemente de escalas globais, a SATCo possibilita a análise detalhada do controle do tronco segmento por segmento, considerando os fatores neuromusculares envolvidos na aquisição da postura sentada.

O instrumento avalia progressivamente o controle de tronco por meio da redução sistemática do nível de suporte oferecido pelo examinador, partindo de níveis mais altos de estabilização até níveis mais baixos, culminando na ausência de suporte. Essa abordagem permite verificar o desenvolvimento gradual do controle postural, em consonância com a organização segmentar do tronco descrita na literatura (Butler et al., 2010; Pin et al., 2018; Saavedra; Woollacott; 2009).

Embora o presente estudo não tenha aplicado a escala clínica completa, o protocolo de posicionamento e a escolha dos níveis de suporte basearam-se na SATCo. A avaliação foi realizada exclusivamente na condição reativa, por serem consideradas mais sensíveis para a identificação de ajustes posturais e respostas neuromusculares frente a demandas funcionais e perturbações externas. Neste estudo, adotou-se o posicionamento preconizado pelo instrumento, com o lactente sentado em banco ajustável, pés apoiados e quadris estabilizados por sistema de cintas, mantendo os membros superiores livres de apoio (Figura 2). Foram selecionados dois níveis estratégicos de suporte manual para a coleta dos dados biomecânicos: axilar e pélvico. A escolha desses níveis fundamenta-se em evidências que apontam sua relação direta com a aquisição da postura sentada independente e com a estabilidade postural proximal (Butler et al., 2010; Saavedra, et al., 2012).

Na condição reativa, os dois avaliadores posicionados lateralmente ao lactente aplicaram perturbações externas padronizadas, por meio de leves empurrões horizontais realizados com a ponta de dois dedos na região do acrômio, sendo executadas três repetições para cada lado a fim de desencadear a resposta reativa analisada pelos sensores e filmagens. As perturbações externas foram aplicadas seguindo o domínio de controle reativo da SATCo, que avalia a capacidade de recuperar a posição neutra do tronco frente a estímulos externos.

O terceiro avaliador, posicionado posteriormente, forneceu o suporte manual no segmento do tronco correspondente ao nível avaliado, observando a capacidade do lactente de recuperar o alinhamento neutro do tronco após a perturbação. As condições avaliadas foram realizadas em 1 minuto, cada.



Figura 2. Posicionamento do lactente e dos avaliadores. Fonte: dos autores.

4.9 Acelerômetro e Registros de Sinais Inerciais

A avaliação instrumental do controle postural foi realizada por meio do uso de Unidades de Medida Inerciais, integradas ao protocolo de aplicação da SATCo.

Para a coleta dos dados instrumentais, o lactente utilizou um colete confeccionado em tecido neoprene na cor preta, especialmente adaptado para o estudo, contendo bolso posicionado na região torácica, na linha média. No bolso localizado anteriormente no tórax foi acoplado um dispositivo de telefonia móvel, destinado à captação dos sinais acelerométricos. Adicionalmente, um sensor vestível comercial foi posicionado em bolso específico no colete, alinhado ao eixo do tronco, para a captação das imagens necessárias à análise cinemática por meio do sistema de captura tridimensional 3D (Figura 3).

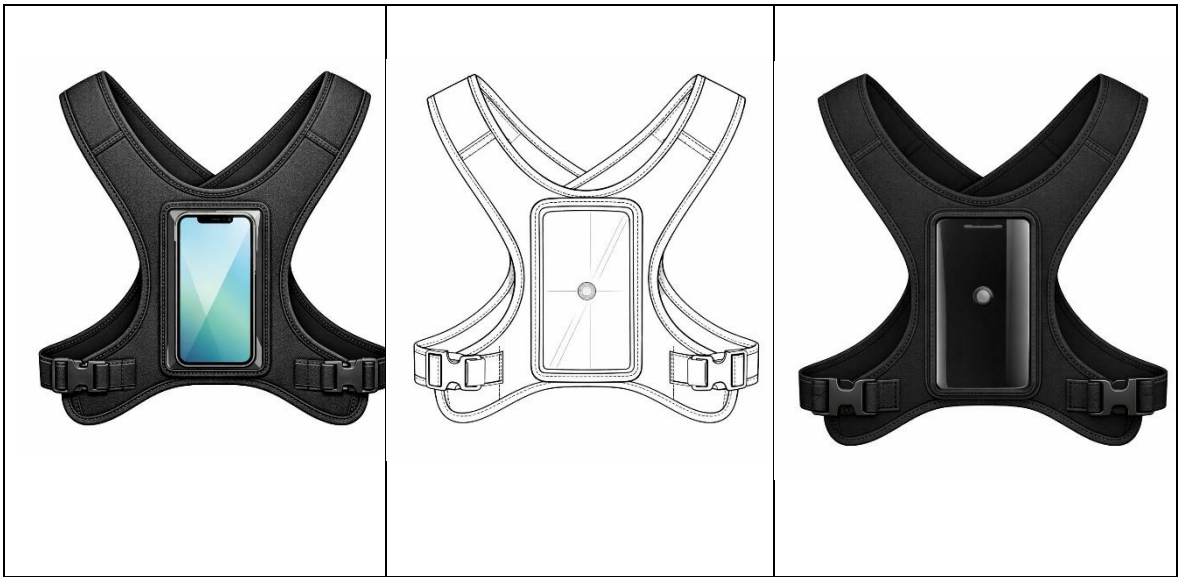


Figura 3. Colete de neoprene com bolso transparente para acoplagem do smartphone. Fonte: Notebook LM.

Durante a avaliação, os sensores inerciais permaneceram acoplados ao tronco do lactente, permitindo o registro contínuo das variáveis cinemáticas e acelerométricas associadas ao controle postural e ao alinhamento do tronco nos diferentes níveis segmentares avaliados. Essa abordagem possibilitou a coleta simultânea de dados clínicos e instrumentais, garantindo a correspondência temporal entre as respostas posturais observadas clinicamente e os parâmetros objetivos obtidos por meio das IMUs.

A utilização integrada das unidades de medida inerciais ao protocolo da SATCo permitiu a quantificação objetiva das oscilações do tronco, da estabilidade postural e das respostas às perturbações externas, contribuindo para uma análise mais sensível e detalhada do controle segmentar do tronco em lactentes com desenvolvimento típico.

O dispositivo utilizado para a avaliação do equilíbrio foi composto por um smartphone Samsung Galaxy A10 (149,9 mm × 70,4 mm × 7,8 mm; 157 g; Samsung, Seul, Coreia do Sul) e por um sensor inercial vestível comercial, devidamente ajustado a um colete. Os sensores foram distribuídos em uma área aproximada de 50 cm², e um notebook equipado com o software *Biomec* (EMG System do Brasil Ltda., São Paulo, Brasil) foi utilizado para a recepção das leituras, com taxa de aquisição de 100 Hz.

Embutido ao smartphone, foi utilizado o aplicativo personalizado *Momentum*®, desenvolvido no Android Studio, para o registro dos sinais inerciais provenientes do acelerômetro triaxial (modelo LSM6DSL, resolução de amplitude de 16 bits, alcance de ±4

g). O aplicativo foi validado para diferentes protocolos de avaliação do movimento e estará disponível para testes internos na Play Store, mediante solicitação aos autores da presente investigação (Duarte et al., 2021).

4.10 Análise do Movimento com Captura em 3D por câmeras ópticas

Um sistema de captura de análise de movimento foi adquirido para a obtenção dos parâmetros cinemáticos, temporais e espaciais do movimento do lactente. O sistema possui três câmeras com iluminação produzida por infravermelho e lentes de 4-12 mm, 3 cabos de Ethernet de 30m, 1 vara de calibração ativa, 1 POE switch com 8 portas, 3 tripés para ajustes em altura e um kit com 50 marcadores esféricos retrorefletivos passivos de 6 mm e 14 mm e base rígida.

De forma concomitante à avaliação dos sensores inerciais, os lactentes foram filmados após estarem ajustados em posição ereta, sentados em um banco com o corpo em uma superfície livre de apoio, com os pés apoiados no chão e o quadril estabilizado pelo sistema de cintas, sendo determinado um intervalo de tempo para a captura dos movimentos nos eixos X, Y e Z. Um único marcador retroreflexivo foi utilizado, sendo este posicionado acima do terço médio do osso esterno e fixado com fita adesiva preta ao bolso do colete neoprene do lactente. Foram registradas as seguintes variáveis: (a) RMS do deslocamento, aceleração linear e velocidade das rotações em torno do eixo X, Y; (b) Valor MAX e frequência média do deslocamento, aceleração linear e velocidade das rotações em torno do eixo X, Y.

O sistema de cinemetria mede os parâmetros cinemáticos da trajetória tridimensional de lactentes. Todos os parâmetros (luminosidade, resolução espacial e temporal e foco) foram calibrados, ajustados e mantidos inalterados durante todos os procedimentos de aquisição das imagens, garantindo os mesmos parâmetros em cada câmera para todos os indivíduos. As câmeras de captura de imagem (Figura 4) são integradas e registram a imagem do movimento por meio de um software específico, no qual variáveis cinemáticas pré-estabelecidas são calculadas. Em seguida, por meio de um modelo matemático, são

determinados os segmentos corporais e são quantificadas as relações de deslocamentos angulares e lineares entre eles. Dessa forma, os movimentos espontâneos dos lactentes são analisados e comparados com dados normativos, dentro da faixa etária, a fim de identificar atrasos ou desvios do desenvolvimento.

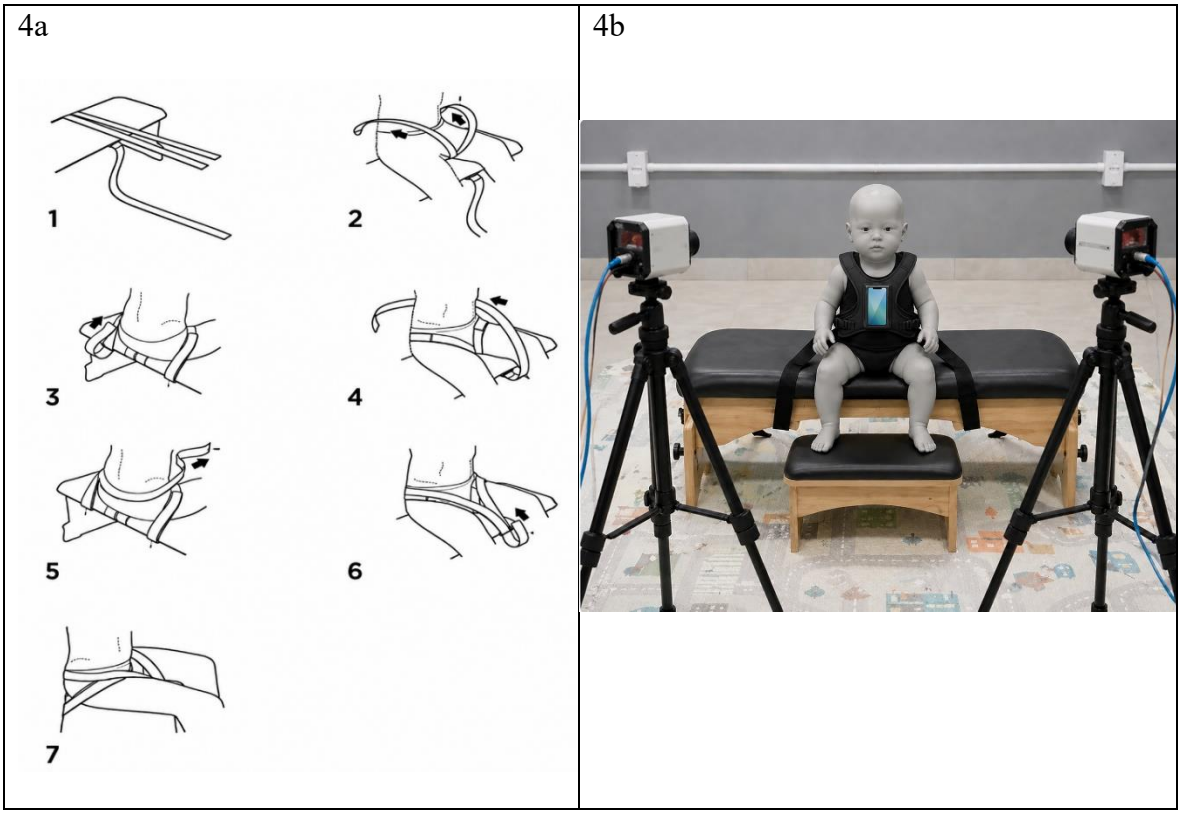


Figura 4. 4a. Sistema de cintas; 4b. Configuração experimental para avaliação do controle de tronco em lactentes, destacando o sistema de captura de movimento tridimensional, o banco de assento ajustável e as cintas de estabilização. Fonte Notebook LM.

4.11 Análise de Concordância entre Métodos

A concordância entre a análise de acelerometria e cinemetria foi avaliada pelo Coeficiente de correlação de Pearson, análise de concordância pelo método Bland-Altman e o Erro Absoluto Médio (MAE) entre as medidas. Essa análise foi realizada a fim de identificar a associação linear entre os métodos aplicados para a mensuração do controle reativo de tronco.

4.12 Aspectos Éticos

O presente estudo constitui um recorte derivado de projeto de pesquisa mais amplo, aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade do Estado do Pará sob o parecer nº 3.620.751. Os procedimentos descritos nesta dissertação foram realizados no âmbito desse

projeto matriz, cujos Termos de Consentimento Livre e Esclarecido e Autorizações de Imagem (APÊNDICE A) foram devidamente obtidos dos responsáveis legais pelos participantes, contemplando integralmente as avaliações aqui conduzidas.

A pesquisa foi conduzida em conformidade com os princípios éticos estabelecidos pela Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012, do Conselho Nacional de Saúde. Foram assegurados aos participantes o respeito à autonomia, à privacidade e à confidencialidade das informações, bem como o direito à participação voluntária e à desistência da pesquisa.

5. ANÁLISE DE DADOS

Os dados obtidos pela cinemetria e sensores inerciais foram exportados em arquivos de texto que posteriormente foram analisados em rotinas computacionais programadas em Microsoft Excel. A série temporal acelerométrica do eixo X e cinemática do eixo Y foram usadas na análise. Como foram aplicadas 3 perturbações posturais deslocando o lactente da esquerda para a direita e outras 3 perturbações da direita para a esquerda, foi feita inspeção visual na série temporal a fim de encontrar componentes transitórios referentes aos deslocamentos gerados durante a perturbação postural sobre os lactentes

Foram encontrados componentes transitórios com polaridade positiva (referente aos deslocamentos para a direita) e negativos (referentes aos deslocamentos para a esquerda). Com o intuito de quantificar a duração dos movimentos, foi calculada a diferença entre o fim do componente e o pico do mesmo componente como indicador da duração do movimento reativo do participante (Figura 5). Foi calculada a média do deslocamento das 3 perturbações para cada lactente. Este procedimento foi aplicado de forma semelhante aos dados de cinemetria e acelerometria em condições de suporte axilar e pélvico.

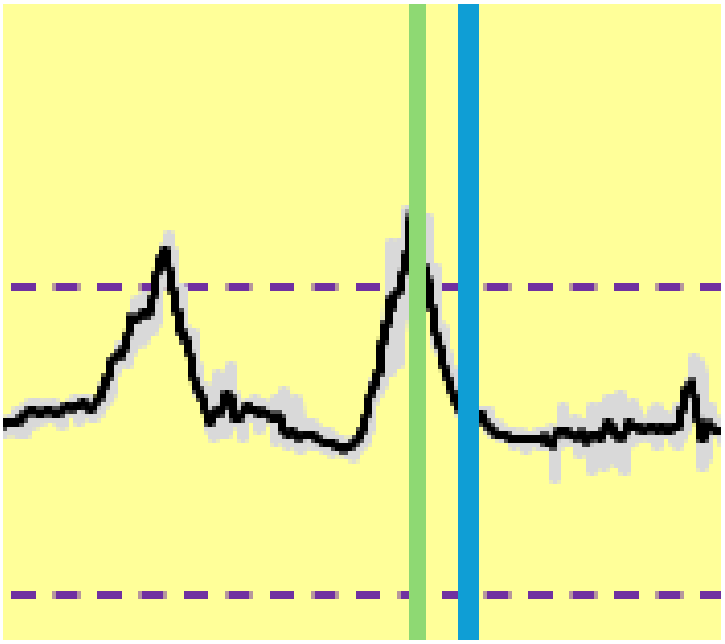


Figura 5. Representação esquemática do processamento do sinal para quantificação da duração do movimento reativo. A duração foi definida como o intervalo de tempo entre o *offset* do componente transiente (linha vertical azul) e seu pico de amplitude (linha vertical verde). Fonte: dos autores.

As análises foram realizadas no *software* Jamovi (versão 2.3). A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Para o desfecho primário, a concordância entre o sensor do smartphone e a cinemetria foi avaliada por meio da correlação de Pearson (r), do Erro Absoluto Médio (MAE) e da análise visual de Bland-Altman, a fim de identificar possíveis vieses sistemáticos e estabelecer os limites de concordância de 95%.

Para o desfecho secundário, utilizou-se o teste t de Student pareado para comparar as médias entre os instrumentos e níveis de suporte, além da aplicação complementar de correlação linear, diferença média e Bland-Altman para explorar a consistência das medidas em diferentes condições experimentais. O nível de significância adotado para todos os testes foi de $p < 0,05$.

6. RESULTADOS

Foram avaliados 31 lactentes típicos, nascidos a termo e sem fatores de risco para atraso no desenvolvimento motor, os quais participaram de um protocolo biomecânico preliminar e exploratório para quantificar o controle reativo do tronco na postura sentada. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e análise da qualidade dos dados acelerométricos e de cinemetria, a amostra final foi composta por 16 lactentes.

A Tabela 1 apresenta as características sociodemográficas e o desempenho motor pela escala AIMS dos lactentes participantes. Os lactentes nasceram a termo e o desempenho motor revelou um percentil médio de 76,25 ± 15,32, caracterizando uma amostra com desenvolvimento motor típico para a idade cronológica.

Tabela 1. Características sociodemográficas e de desenvolvimento motor dos participantes.

Variáveis	Total de sujeitos (*n*=16)
Idade cronológica (meses) [Média ± DP (Mín–Max)]	6,69 ± 1,85 (4,00 – 9,00)
Sexo [n (%)]	
Masculino	7 (43,75%)
Feminino	9 (56,25%)
Idade gestacional (semanas) [Média ± DP]	38,19 ± 1,06
Peso ao nascimento (kg) [Média ± DP]	3,14 ± 0,44
Altura ao nascimento (cm) [Média ± DP]	51,06 ± 7,61
Escore Total AIMS [Média ± DP]	35,00 ± 10,23
Percentil AIMS [Média ± DP]	76,25 ± 15,32

DP = désvio padrão; AIMS = Alberta Infant Motor Scale.

Fonte: dos autores (2026)

6.1 DESFECHO PRIMÁRIO

Tempo de resposta reativa de tronco dos lactentes frente a perturbações externas

Para o desfecho primário, a normalidade dos dados foi confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk. A análise comparativa entre a cinemetria e a acelerometria por smartphone revelou uma importante consistência na mensuração do tempo de resposta reativa (Tabela 2). Foram comparados os tempos de respostas reativas para o deslocamento realizado para o lado direito e esquerdo e por segmento, axilar e pélvico.

Tabela 2. Concordância e erro de medida entre a cinemetria (padrão-ouro) e a acelerometria por smartphone para o tempo de resposta reativa do tronco em lactentes.

Movimento reativo	Cinemetria (Média ± DP)	Acelerometria (Média ± DP)	*p*-valor	Pearson (*r; p)*	MAE	Bland-Altman Bias [95% LoA]

Axilar (Direito)	0,367±0,054	0,329±0,080	0,098	0,25 ; 0,344	0,068s	0,0375 [-0,00786 to 0,0829]
Axilar (Esquerdo)	0,239±0,049	0,258±0,086	0,375	0,37 ; 0,150	0,060s	-0,0187 [-0,0623 to 0,0248]
Pelve (Direito)	0,586±0,173	0,501±0,122	0,066	0,47 ; 0,063	0,266s	0,0856 [0,00171 to 0,1695]
Pelve (Esquerdo)	0,588±0,217	0,534±0,095	0,316	0,29; 0,263	0,241s	0,0544 [-0,0573 to 0,166]

Nota: Os valores estão expressos como Média ± Desvio Padrão (DP). MAE: Erro Absoluto Médio; LoA: Limites de Concordância de 95%. Os valores de *p* referem-se à comparação entre os métodos (análise pareada), onde p > 0,05 indica ausência de viés sistemático significativo. O *r* de Pearson descreve a força da associação linear.

Nenhuma das quatro condições avaliadas apresentou diferença estatisticamente significativa entre os métodos (p = 0,098; 0,375; 0,066; 0,316), indicando ausência de viés sistemático nas médias. Esse achado foi complementado pela análise de Bland-Altman, que evidenciou vieses próximos de zero e limites de concordância compatíveis com a variabilidade esperada para o desfecho avaliado. A convergência entre os resultados dos dois instrumentos sugere que a acelerometria de smartphone produz estimativas do tempo de resposta reativa semelhantes às da cinemetria em nível de grupo, constituindo um achado favorável à viabilidade clínica do método proposto.

Com relação a correlação de Pearson entre a acelerometria e cinemetria foram encontradas correlações fracas para o segmento axilar e direção direita (r = 0,25) e segmento pélvico e direção esquerda (r = 0,29), fraca a moderada para o segmento axilar e direção esquerda (r = 0,37) e, por fim, correlação moderada para o segmento pélvico e direção direita (r = 0,47). Dessa forma, esses valores indicam que os dois métodos não capturam o fenômeno de forma idêntica, o que é esperado dada a distinção técnica entre as grandezas mensuradas por cada instrumento.

Os valores de viés foram pequenos em termos absolutos para os segmentos axilares (37 ms e 18 ms), e o Erro Absoluto Médio (MAE) foi inferior a 0,07 s, demonstrando alta precisão clínica para esse nível (Figura 6, painéis A e B). Embora as correlações lineares tenham se mostrado de magnitude fraca a moderada (*r* entre 0,25 e 0,47), o que reflete a variabilidade motora intrínseca de lactentes em fase de aquisição do controle de tronco, a estabilidade das médias e os limites de concordância estreitos no segmento superior reforçam o potencial da acelerometria por smartphone como ferramenta acessível para a avaliação do controle de tronco. No segmento pélvico, apesar de erros absolutos mais elevados e limites de concordância mais amplos (Figura 6, painéis C e D), observou-se a maior tendência de associação linear do estudo (r = 0,47), indicando que o sensor captura a dinâmica do movimento reativo de forma consistente com o padrão-ouro.

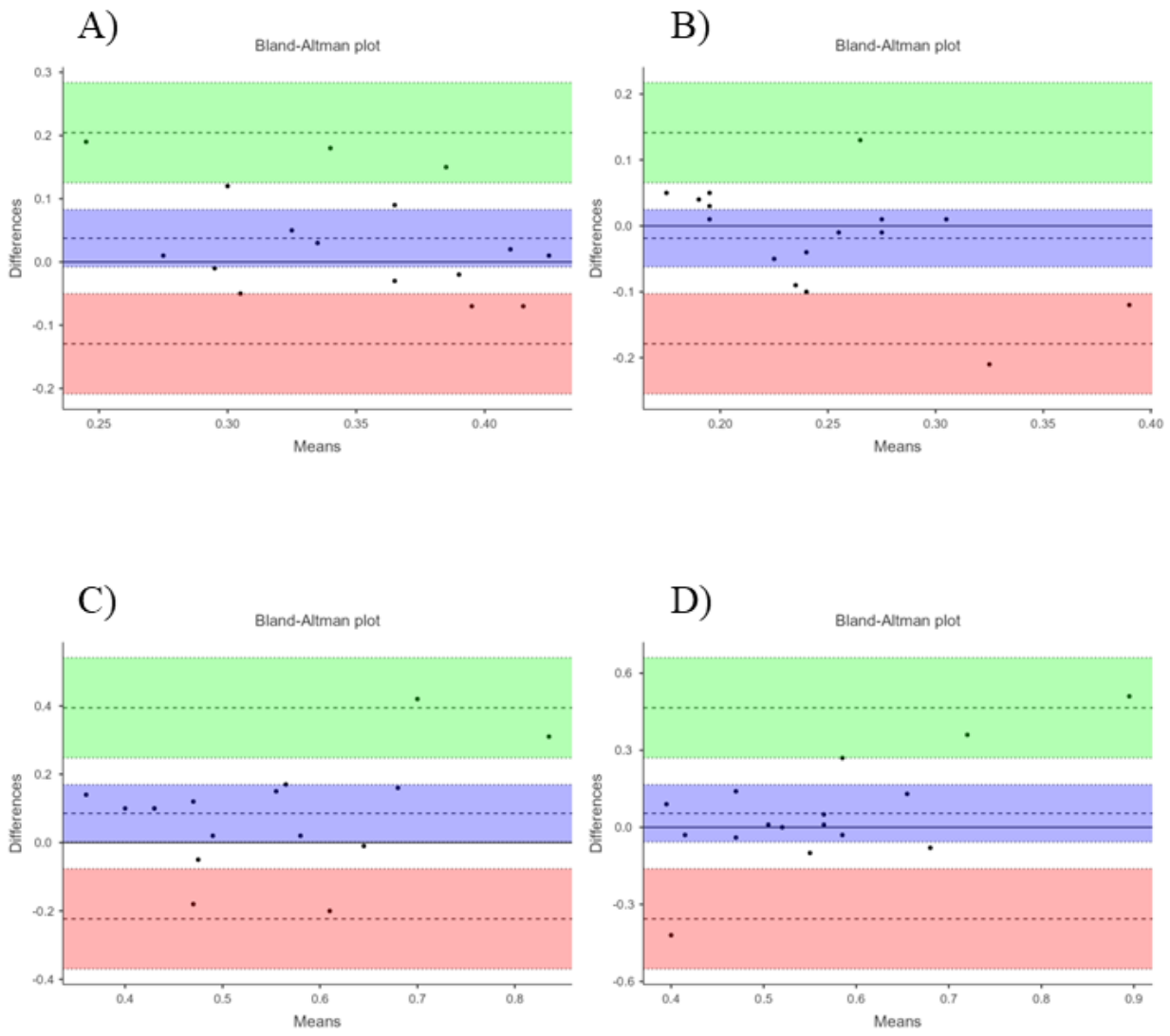


Figura 6. Gráficos de Bland-Altman comparando o tempo de resposta reativa entre a cinemetria baseada em vídeo e a acelerometria por smartphone. Os painéis superiores representam os níveis axilares direito (A) e esquerdo (B); os painéis inferiores representam os níveis pélvicos direito (C) e esquerdo (D). A linha central contínua indica o viés médio (mean bias) e as linhas tracejadas representam os limites de concordância de 95%. O eixo Y representa a diferença entre os métodos (Cinemetria menos Acelerometria) em segundos, e o eixo X representa a média de ambos os métodos em segundos. Fonte: Jamovi.

6.2 DESFECHO SECUNDÁRIO

Para o desfecho secundário, a normalidade da distribuição dos dados foi confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). Esta etapa buscou verificar se ambos os métodos – cinemetria e acelerometria – eram sensíveis para identificar o padrão de maturação céfalo-caudal, no qual se espera que o tempo de resposta reativa do segmento axilar seja menor –

ou seja, mais precoce – do que no segmento pélvico. Os resultados demonstraram padrão de resposta consistente entre os dois instrumentos; ambos foram capazes de detectar a precedência temporal do nível axilar em relação ao pélvico, corroborando a validade de constructo do modelo biomecânico proposto (Tabela 3).

Tabela 3. Comparação dos tempos de resposta reativa entre os níveis axilar e pélvico nos métodos de cinemetria e acelerometria.

Método	Axilar (s) (Média ± DP)	Pelve (s) (Média ± DP)	Dif. Média (s)	*p*-valor	Pearson (*r;p)*	Bland-Altman Bias [95% LoA]
Cinemetria	0,303±0,033	0,587±0,152	-0,285	<0,001	-0,042 ; 0,877	-0,2846 [-0,368 to -0,201]
Acelerometria	0,294±0,066	0,516±0,100	-0,223	<0,001	0,343 ; 0,193	-0,2228 [-0,276 to -0,1698]

Nota: DP: Desvio Padrão; Diferença Média: Diferença média entre os segmentos (Axilar menos Pelve); LoA: Limites de Concordância de 95%. Valores de p calculados por meio do teste t pareado (p < 0,05 considerado significativo).

Tanto a cinemetria quanto a acelerometria por smartphone identificaram diferenças estatisticamente significativas entre os tempos de resposta reativa para os segmentos axilar e pélvico ($p < 0,001$). Esse achado fornece evidências de validade de constructo, ao demonstrar que ambos os métodos foram capazes de identificar o padrão de maturação céfalo-caudal descrito na literatura. O tempo de resposta reativa foi consistentemente maior no segmento pélvico em relação ao axilar, o que é coerente, do ponto de vista neurodesenvolvimentista, com a maturação tardia do tronco inferior nessa faixa etária. Em ambos os instrumentos, o segmento axilar reagiu sistematicamente antes do segmento pélvico, com uma diferença média de -0,285 s na cinemetria e -0,223 s na acelerometria

Na análise de correlação de Pearson, a cinemetria apresentou valor próximo de zero ($r = -0,042$), indicando ausência de relação linear entre os tempos de resposta reativa para os segmentos axilar e pélvico nesse método, o que sugere que ambos os segmentos operam em

tempos independentes, com dinâmicas de ativação distintas, achado coerente com o padrão de dissociação segmentar esperado pelo desenvolvimento céfalo-caudal. A acelerometria identificou correlação positiva fraca (r = 0,343), sugerindo tendência de associação entre os segmentos. Essa diferença em relação a cinemetria pode estar relacionada a maior suscetibilidade do sensor inicial em captar vibrações mecânicas não relacionadas ao movimento postural em si, mas a episódios de choro, movimentos espontâneos e agitação, comportamentos frequentes em lactentes nessa faixa etária, e que impõem limitações à colaboração durante o protocolo de avaliação.

A análise de concordância entre os métodos, realizada por meio do gráfico de Bland-Altman (Figura 7), demonstrou que a acelerometria por smartphone foi capaz de capturar o viés de atraso (*bias*) da pelve em relação à axila de forma muito próxima ao padrão-ouro (viés de -0,22 s vs -0,28 s, respectivamente). Os gráficos de dispersão da cinemetria (Figura 7A) e da acelerometria (Figura 7B) evidenciam esse padrão, com a maioria dos pontos situados abaixo da linha de zero, confirmando um tempo de resposta reativa inferior no segmento axilar. Embora as correlações lineares tenham apresentado magnitudes distintas, a capacidade de ambos os métodos em detectar a mesma estratégia de controle postural na direção céfalo-caudal sustenta a validade clínica da acelerometria por smartphone como ferramenta confiável para a identificação dinâmica do controle postural reativo em lactentes.

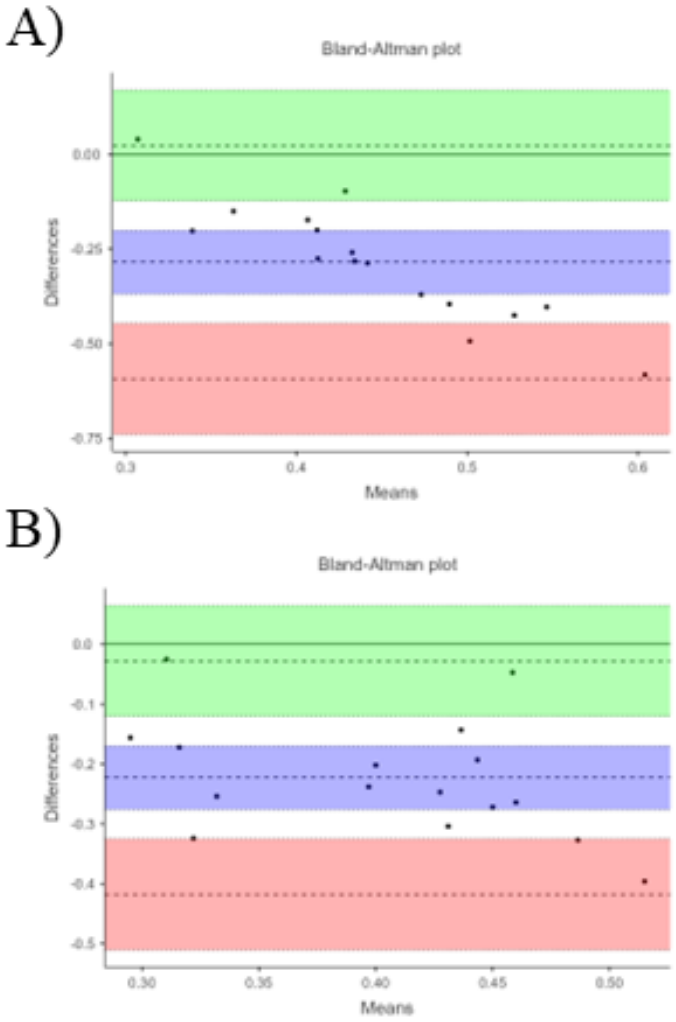


Figura 7. Gráficos de Bland-Altman representando a análise temporal entre segmentos (níveis Axilar vs. Pélvico). O painel (A) mostra a concordância entre os segmentos utilizando a cinemetria baseada em vídeo, e o painel (B) mostra a concordância utilizando a acelerometria por smartphone. O viés (bias) negativo indica que a resposta axilar precede consistentemente a resposta pélvica em ambos os métodos. Fonte: Jamovi.

7. DISCUSSÃO

O presente estudo desenvolveu e investigou um protocolo biomecânico exploratório para quantificar o tempo de resposta reativa do tronco em lactentes típicos de 4 a 9 meses, comparando simultaneamente medidas da duração das respostas obtidas por acelerometria por smartphone e cinemetria optoeletrônica. Os resultados fornecem evidências iniciais da viabilidade clínica do uso de tecnologias portáteis, especificamente acelerometria por smartphone, para a análise do controle postural de lactentes. O protocolo proposto, demonstrou ausência de viés sistemático entre os instrumentos e capacidade de ambos em

detectar o padrão de maturação céfalo-caudal do controle postural, corroborando a validade de constructo do protocolo biomecânico desenvolvido.

A literatura contemporânea aponta para o uso complementar entre escalas funcionais e métodos instrumentais na avaliação do controle postural em lactentes. Revisões sistemáticas recentes demonstram que os métodos instrumentais mais empregados são a análise do centro de pressão (COP) por plataformas de força, a cinemática tridimensional, a acelerometria e a eletromiografia de superfície (EMG), os quais capturam dimensões complementares do comportamento postural, respectivamente, cinética, cinemática, inercial e neuromuscular (Pavão et al., 2013; Gkaraveli et al., 2023).

Esses métodos fornecem dados quantitativos e reprodutíveis que ampliam a sensibilidade para detectar diferenças sutis de maturação neuromotora, reduzindo a dependência exclusiva da interpretação clínica observacional (Bosserman et al., 2023). Notavelmente, Gkaraveli et al. (2023) identificaram que nenhum estudo publicado até aquele momento havia integrado simultaneamente dados cinéticos, cinemáticos e eletromiográficos na avaliação biomecânica da posição sentada em lactentes, sinalizando que a abordagem multimodal ainda representa uma lacuna prioritária para a área e reforçando a relevância de estudos que ampliem o repertório metodológico disponível.

No que se refere ao desfecho primário, a concordância entre a acelerometria de smartphone e a cinemetria foi sustentada pela ausência de diferenças de associação estatisticamente significativas entre as médias em todas as quatro condições avaliadas ($p >$ 0,05) e por vieses próximos de zero nos gráficos de Bland-Altman. Esses achados são consistentes com estudos que demonstraram que acelerômetros são capazes de estimar parâmetros cinemáticos com equivalência funcional à cinemetria óptica em tarefas de equilíbrio, embora capturem grandezas físicas distintas (Mayagoitia et al., 2002; Kavanagh e Menz, 2008; Ofori et al., 2021). Correlações de magnitude fraca a moderada (r observado entre 0,25 e 0,47) entre IMUs e sistemas de captura óptica são um padrão recorrente na literatura de validação de sensores inerciais, explicado pelas distinções técnicas intrínsecas

entre as grandezas mensuradas por cada método: enquanto a cinemetria registra o deslocamento espacial de marcadores, a acelerometria mensura a taxa de variação da velocidade linear do segmento (Al-Amri et al., 2023; Lin, 2025; Mayagoitia et al., 2002; Menz et al., 2003).

Correlações superiores às aqui observadas foram relatadas por Rihar et al. (2014) ao comparar IMUs no tronco de lactentes com cinemetria optoeletrônica em movimentos espontâneos de membros superiores. Contudo, esses autores avaliaram parâmetros de trajetória contínua, aceleração e *jerk*, em movimentos de maior amplitude e repetitividade, condições mais favoráveis à captura inercial do que a detecção de eventos temporais discretos, como o *onset* da resposta reativa frente a perturbações externas. A natureza transitória e de curta duração dos componentes analisados no presente estudo, associada à alta variabilidade comportamental dos lactentes, impõe maior exigência à resolução temporal do acelerômetro, o que justifica correlações mais modestas mesmo diante de concordância adequada nas médias.

O nível axilar demonstrou maior acurácia, com Erro Absoluto Médio (MAE) inferior a 0,07s e vieses de apenas 37 ms e 18 ms para os lados direito e esquerdo, respectivamente. Essa precisão superior pode ser atribuída à maior proximidade do sensor ao centro de massa da parte superior do corpo, o que favorece uma detecção mais precisa da aceleração inicial frente à perturbação externa, com menor influência de forças compressivas externas (Nataraj et al., 2012). Em contraste, o nível pélvico exibiu erros absolutos mais elevados (MAE de 0,266 s e 0,241 s). Do ponto de vista biomecânico, a pelve constitui a base de suporte primária do lactente na postura sentada e está diretamente exposta a forças de compressão e atrito contra a superfície de assento (Moore et al., 2019; Hedberg et al., 2004). Essas influências mecânicas podem introduzir interferências no sinal acelerométrico, fenômeno descrito na literatura de sensores inerciais como erro de retificação por vibração (*vibration rectification error*), que dificulta a identificação precisa do *onset* da resposta postural (Poddar et al., 2017). Essa limitação técnica inerente ao segmento pélvico deve ser

considerada em protocolos futuros, possivelmente com filtragem de sinal mais refinada ou posicionamento alternativo do sensor.

A alta variabilidade motora intrínseca dos lactentes em fase de aquisição do controle de tronco contribui para a dispersão das medidas, independentemente do instrumento utilizado. Hadders-Algra (2002; 2018) descreve essa variabilidade como característica funcional do sistema nervoso em maturação, que explora ativamente diferentes estratégias motoras antes de selecionar padrões mais estáveis. Essa propriedade amplifica a dispersão de qualquer medida temporal nessa população e deve ser interpretada não como falha metodológica, mas como característica biológica inerente ao período estudado. A convergência das médias entre os dois métodos demonstra que, independentemente da natureza do sinal captado, ambos os instrumentos respondem ao mesmo evento temporal - a resposta reativa do tronco frente à perturbação externa – sustentando a validade do modelo biomecânico proposto.

No que se refere ao desfecho secundário, ambos os métodos detectaram com significância estatística ($p < 0,001$) a precedência temporal do segmento axilar em relação ao pélvico, com diferenças médias de -0,285 s na cinemetria e -0,223 s na acelerometria. Esse padrão é consistente com o modelo de aquisição segmentar progressiva do controle postural, no qual a estabilidade é adquirida de forma descendente ao longo do eixo do tronco (Rachwani et al., 2015; Saavedra et al., 2012). Hedberg et al. (2005) documentaram que sinergias musculares reativas já estão presentes nos músculos cervicais desde o primeiro mês de vida, passam por um período de reorganização entre o 1º e o 3º mês e se refinam temporalmente a partir do 4º mês - faixa etária esta que coincide com a do presente estudo. De Graaf-Peters et al. (2007) confirmaram, por meio de análise eletromiográfica e cinemática, que lactentes de 4 a 6 meses apresentam predominantemente um padrão de recrutamento *top-down* durante perturbações, no qual os segmentos torácicos superiores são estabilizados antes dos segmentos lombopélvicos. O fato de a acelerometria ter capturado um viés de atraso pélvico numericamente próximo ao do padrão-ouro (-0,22 s vs. -0,28 s)

reforça a validade de constructo do modelo proposto. O sensor inercial possui resolução temporal suficiente para detectar a propagação sequencial da resposta motora ao longo da coluna vertebral, achado clinicamente relevante para a identificação de atrasos no amadurecimento das sinergias posturais reativas.

Clinicamente, a capacidade de detectar a dissociação temporal segmentar por meio de um dispositivo móvel de baixo custo representa um avanço metodológico relevante. Bosserman et al. (2023) demonstraram, por meio de revisão sistemática, que medidas instrumentais do controle postural têm potencial preditivo para comprometimentos motores futuros em lactentes prematuros, evidência que reforça a importância de ampliar o acesso a ferramentas objetivas de avaliação postural. Nessa direção, Frechette et al. (2020) demonstraram que a acelerometria por smartphone acoplada ao tórax fornece avaliação válida e confiável do controle postural sentado, com capacidade de discriminar entre grupos com e sem comprometimento — resultado convergente com os achados do presente estudo e que fortalece a viabilidade clínica do método em diferentes populações. A democratização dessas medidas, até então restritas a laboratórios de alta complexidade, amplia as possibilidades de triagem precoce em contextos de atenção primária e ambulatorial (Airaksinen et al., 2020; Garcia-Soidan et al., 2020). O aplicativo Momentum®, validado para diferentes protocolos de avaliação do movimento (Rodrigues et al., 2022), representa um exemplo concreto dessa transposição tecnológica ao integrar sensores inerciais de smartphone a protocolos biomecânicos estruturados sem demandar infraestrutura laboratorial.

Limitações

Apesar da relevância dos achados, este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas. Primeiramente, destaca-se a redução amostral ocorrida entre a avaliação inicial (n=31) e a análise final (n=16), conforme detalhado no fluxograma (Figura 1). Essa perda amostral, além de decorrer da incompletude de avaliações ou desistências, foi motivada pela necessidade de exclusão de dados corrompidos ou que apresentaram alta divergência nos

tempos de resposta. Tais inconsistências estiveram frequentemente associadas ao estado de agitação psicomotora e choro excessivo dos lactentes durante a coleta. Esses comportamentos, verificados via inspeção qualitativa das gravações de vídeo, geram artefatos que impossibilitam a distinção precisa entre a resposta postural reativa e o movimento voluntário ou irritativo. Portanto, a remoção desses *outliers* foi indispensável para mitigar vieses e preservar a integridade e a homogeneidade da amostra final.

Além disso, ressalta-se o caráter exploratório deste trabalho. Por tratar-se de uma prova de conceito inicial focada na viabilidade técnica do modelo, não foram realizados testes de confiabilidade interexaminador ou cálculos de Coeficiente de Correlação Intraclasse (ICC). A natureza intrínseca dos movimentos globais de lactentes típicos ainda representa um desafio para sensores inerciais, exigindo cautela na generalização dos resultados. Perspectivas futuras devem contemplar amostras mais robustas e a aplicação deste protocolo em lactentes com riscos no desenvolvimento motor, a fim de consolidar a acelerometria por smartphone como uma ferramenta de triagem clínica acessível e validada.

8. CONCLUSÃO

O presente estudo cumpriu seu objetivo ao desenvolver um protocolo biomecânico preliminar e exploratório para quantificar o controle reativo do tronco na postura sentada em lactentes típicos. A acelerometria por smartphone demonstrou validade de constructo e concordância satisfatória com a cinemetria optoeletrônica, sem viés sistemático, com desempenho clinicamente aceitável no nível axilar (MAE $< 0,07$ s), e foi sensível para detectar o padrão céfalo-caudal esperado ($p < 0,001$). Foi identificado que o segmento pélvico apresentou erros mais elevados que o segmento axilar. Por ser uma tecnologia de baixo custo e alta portabilidade, esse modelo contribui para a democratização da avaliação biomecânica avançada, viabilizando a transposição de métricas laboratoriais para contextos clínicos com recursos limitados.

Estudos futuros devem ampliar o tamanho amostral, adotar delineamento longitudinal, incorporar registro eletromiográfico simultâneo para a caracterização das

sinergias musculares, avaliar a confiabilidade intra e interavaliadores, testar a reprodutibilidade em ambientes clínicos e comunitários externos ao laboratório e investigar a aplicabilidade do protocolo em lactentes pré-termo e com risco para atraso no desenvolvimento, etapas essenciais para a consolidação deste modelo como instrumento de triagem clínica validado e de ampla aplicabilidade em reabilitação pediátrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRAKSINEN, Manu et al. **Automatic posture and movement tracking of infants with wearable movement sensors**. Scientific Reports, v. 10, n. 1, p. 169, 2020.

AIRAKSINEN, Manu; GALLEN, Anastasia; TAYLOR, Elisa; DE SENA, Sofie; PALSA, Taru; HAATAJA, Leena; VANHATALO, Sampsa. **Assessing infant gross motor performance with an at-home wearable**. Pediatrics, v. 155, n. 4, e2024068647, abr. 2025. DOI: 10.1542/peds.2024-068647.

AL-AMRI, M. et al. **Validity and reliability of smartphone applications for postural balance assessment**: a systematic review. Gait & Posture, v. 100, p. 112-125, jan. 2023.

ARCHIBECK, Erin et al. **3D motion capture data into a kinematic composite score for assessing musculoskeletal impairments**. Journal of Biomechanics, v. 186, p. 112725, 2025.

BERNSTEIN, Nikolai A. **The co-ordination and regulation of movements**. Oxford: Pergamon Press, 1967.

BLAND, J. Martin; ALTMAN, Douglas G. **Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement**. The Lancet, v. 1, n. 8476, p. 307-310, 1986.

BOSSERMAN, Jennifer et al. **Postural control measurements to predict future motor impairment in preterm infants**: a systematic review. Diagnostics, v. 13, n. 22, e3473, nov. 2023. DOI: 10.3390/diagnostics13223473.

CIGNETTI, Fabien; KYVELIDOU, Anastasia; HARBOURNE, Regina T.; STERGIOU, Nicholas. **Anterior-posterior and medial-lateral control of sway in infants during sitting acquisition does not become adult-like**. Gait & Posture, v. 33, n. 1, p. 88–92, 2011. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2010.10.002.

BUTLER, Penelope B. et al. **Refinement, reliability, and validity of the segmental assessment of trunk control**. Pediatric Physical Therapy, v. 22, n. 3, p. 246–257, 2010.

DAS, Kishor; DE PAULA OLIVEIRA, Thiago; NEWELL, John. **Comparison of markerless and marker-based motion capture systems using 95% functional limits of agreement in a linear mixed-effects modelling framework**. Scientific Reports, v. 13, n. 1, p. 22880, 2023.

DE GRAAF-PETERS, V. B. et al. **Postural adjustments and reaching in 4- and 6-month-old infants: an EMG and kinematical study**. Experimental Brain Research, v. 181, n. 4, p. 647–656, 2007. DOI: 10.1007/s00221-007-0964-6.

DUARTE, Manuela Brito et al. **Validação de dispositivos móveis para avaliação de ajustes posturais antecipatórios e compensatórios**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Movimento Humano) – Instituto de Ciências da Saúde, Universidade Federal do Pará,

Belém, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/17510. Acesso em: 7 jun. 2026.

ELIKS, M.; GAJEWSKA, E. **The Alberta Infant Motor Scale**: a tool for the assessment of motor aspects of neurodevelopment in infancy and early childhood. Frontiers in Neurology, v. 13, p. 927502, 2022.

FRECHETTE, Mikaela L.; ABOU, Libak; RICE, Laura A.; SOSNOFF, Jacob J. **The validity, reliability, and sensitivity of a smartphone-based seated postural control assessment in wheelchair users**: a pilot study. Frontiers in Sports and Active Living, v. 2, p. 540930, dez. 2020. DOI: 10.3389/fspor.2020.540930.

GARCÍA-SOIDAN, Jose L. et al. **Accelerometric assessment of postural balance in children**: a systematic review. Diagnostics, v. 11, n. 1, p. 8, 2020.

GKARAVELI, Maria et al. **Biomechanical evaluation of sitting postural control in infants**: a systematic review. Gait & Posture, v. 106, p. 218–226, dez. 2023. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2023.09.014.

GRECO, A. L. R. et al. **Is segmental trunk control related to gross motor performance in healthy preterm and full-term infants?** Journal of Motor Behavior, v. 52, n. 6, p. 666–675, 2020.

HADDERS-ALGRA, Mijna. **Early human motor development**: from variation to the ability to vary and adapt. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, v. 90, p. 411–427, jul. 2018. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2018.05.009.

HADDERS-ALGRA, Mijna. **Postural variability and sensorimotor development in infancy**. Developmental Medicine & Child Neurology, v. 55, supl. 4, p. 5–8, nov. 2013.

HADDERS-ALGRA, Mijna. **Variability in infant motor behavior: a hallmark of the healthy nervous system**. Infant Behavior and Development, v. 25, n. 4, p. 433–451, 2002. DOI: 10.1016/S0163-6383(02)00144-3.

HARBOURNE, Regina T.; STERGIOU, Nicholas. **Nonlinear analysis of the development of sitting postural control**. Developmental Psychobiology, v. 42, n. 4, p. 368–377, 2003.

HEDBERG, Åsa; BROGREN CARLBERG, Eva; FORSSBERG, Hans; HADDERS-ALGRA, Mijna. **Development of postural adjustments in sitting position during the first half year of life**. Developmental Medicine & Child Neurology, v. 47, n. 5, p. 312–320, 2005. DOI: 10.1017/S0012162205000605.

HEDBERG, Åsa; FORSSBERG, Hans; HADDERS-ALGRA, Mijna. **Postural adjustments due to external perturbations during sitting in 1-month-old infants**: evidence for the innate origin of direction specificity. Experimental Brain Research, v. 157, n. 1, p. 10–17, jul. 2004. DOI: 10.1007/s00221-003-1811-z.

HORAK, Fay B. **Postural orientation and equilibrium**: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? Journal of Motor Behavior, v. 38, n. 1, p. 7–15, 2006.

IGARASHI, Yuzo et al. **Accelerometer approach for anticipatory postural adjustments assessment during step initiation in patients with leprosy**. Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 17409, 2024.

KAVANAGH, J. J.; MENZ, H. B. **Accelerometry**: a technique for quantifying movement patterns during walking. Gait & Posture, v. 28, n. 1, p. 1-21, jul. 2008. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2007.10.010.

LIN, Yi-Chung. **Human movement monitoring using wearable sensor technology**. Sensors, v. 25, n. 1, p. 208, 2025.

MARÍN-PALMA, María; ROJAS-SEPÚLVEDA, Ignacia; BECERRA-CAROCA, Jessica et al. **The importance of trunk motion in wearable based infant spontaneous movement analysis**. Scientific Reports, v. 15, p. 1419, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-85621-y.

MASSION, Jean. **Movement, posture and equilibrium**: interaction and coordination. Progress in Neurobiology, v. 38, n. 1, p. 35–56, 1992. DOI: 10.1016/0301-0082(92)90034-C.

MAYAGOITIA, Ruth E.; NENE, Anand V.; VELTINK, Peter H. Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems. **Journal of Biomechanics**, v. 35, n. 4, p. 537–542, 2002. DOI: 10.1016/S0021-9290(01)00231-7.

MENZ, Hylton B.; LORD, Stephen R.; FITZPATRICK, Richard C. **Acceleration patterns of the head and pelvis when walking on level and irregular surfaces**. Gait & Posture, v. 18, n. 1, p. 35–46, ago. 2003. DOI: 10.1016/s0966-6362(02)00159-5.

MOORE, Keith L.; DALLEY, Arthur F.; AGUR, Anne M. R. **Anatomia orientada para a clínica**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019.

NATARAJ, Raviraj; AUDU, Musa L.; TRIOLO, Ronald J. **Center of mass acceleration feedback control of functional neuromuscular stimulation for standing in the presence of internal postural perturbations**. Journal of Rehabilitation Research and Development, v. 49, n. 6, p. 889, 2012.

OFORI, Ernest Kwesi; WANG, Shuaijie; BHATT, Tanvi. **Validity of inertial sensors for assessing balance kinematics and mobility during treadmill-based perturbation and dance training**. Sensors, v. 21, n. 9, p. 3065, 2021. DOI: 10.3390/s21093065.

OLIVEIRA, Luana Karine Resende et al. **Wearable-based assessment of anticipatory postural adjustments during step initiation in patients with knee osteoarthritis**. PLOS ONE, v. 18, n. 8, p. e0289588, 2023.

PAVÃO, Sílvia Leticia et al. **Assessment of postural control in children with cerebral palsy**: a review. Research in Developmental Disabilities, v. 34, n. 5, p. 1367–1375, maio 2013. DOI: 10.1016/j.ridd.2013.01.034.

PIN, Tamis W. et al. **Segmental Assessment of Trunk Control in infants from 4 to 9 months of age**: a psychometric study. BMC Pediatrics, v. 18, n. 1, p. 182, 2018.

PIN, Tamis W.; BUTLER, Penelope B.; CHEUNG, Hon-Ming; SHUM, Sandra Lai-Fong. **Relationship between segmental trunk control and gross motor development in typically developing infants aged from 4 to 12 months**: a pilot study. BMC Pediatrics, v. 19, n. 1, p. 425, nov. 2019. DOI: 10.1186/s12887-019-1791-1.

PIPER, Martha C.; DARRAH, Johanna. **Motor assessment of the developing infant**. Philadelphia: W.B. Saunders, 1994.

PODDAR, Shashank; KUMAR, Vinod; SODHI, Amarjit. **Improved gradiometry using MEMS accelerometers**: noise and vibration rectification error analysis. IEEE Sensors Journal, v. 17, n. 22, p. 7359–7367, nov. 2017. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2756065.

RACHWANI, Jaya et al. **Dynamic sitting in infants**: limits of stability. Gait & Posture, v. 102, p. 210–215, 2023.

RACHWANI, Jaya et al. **Segmental trunk control acquisition and reaching in typically developing infants**. Experimental Brain Research, v. 228, n. 2, p. 131–139, 2013.

RACHWANI, Jaya et al. **The development of trunk control and its relation to reaching in infancy**: a longitudinal study. Frontiers in Human Neuroscience, v. 9, p. 94, 2015.

RIHAR, Andraž et al. **Infant trunk posture and arm movement assessment using pressure mattress, inertial and magnetic measurement units (IMUs)**. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, v. 11, n. 1, p. 133, 2014. DOI: 10.1186/1743-0003-11-133.

RODRIGUES, Luciana Abrantes et al. **Wearable devices and smartphone inertial sensors for static balance assessment**: a concurrent validity study in young adult population. Journal of Personalized Medicine, v. 12, n. 7, p. 1019, 2022. DOI: 10.3390/jpm12071019.

SAAVEDRA, Sandra L.; VAN DONKELAAR, Paul; WOOLLACOTT, Marjorie H. **Learning about gravity**: segmental assessment of upright control as infants develop independent sitting. Journal of Neurophysiology, v. 108, n. 8, p. 2215–2229, 2012.

SAAVEDRA, Sandra; WOOLLACOTT, Marjorie H. **Contributions of spinal segments to trunk postural control during typical development.** Developmental Medicine & Child Neurology, v. 51, n. 9, p. 695–705, 2009.

SIBLEY, Kathryn M, et al. **Components of standing postural control evaluated in pediatric balance measures**: a scoping review. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, v. 98, n. 10, p. 2066-2078, out. 2017. DOI: 10.1016/j.apmr.2017.02.032.

SILVA, K. M. da et al**. Relationship between trunk control and gross motor development of infants in the first year of life**: a systematic review. Early Human Development, v. 189, p. 105929, 2024. DOI: 10.1016/j.earlhumdev.2023.105929.

SUO, Xiang; TANG, Weidi; LI, Zhen. **Motion capture technology in sports scenarios**: a survey. Sensors, v. 24, n. 9, p. 2947, 2024.

THELEN, Esther; SMITH, Linda B. **A dynamic systems approach to the development of cognition and action**. Cambridge: MIT Press, 1994.

VALENTINI, Nadia C.; SACCANI, Raquel. **Brazilian validation of the Alberta Infant Motor Scale**. Physical Therapy, v. 92, n. 3, p. 440–447, 2012.

WOOLLACOTT, Marjorie; SHUMWAY-COOK, Anne. **Motor control**: translating research into clinical practice. 6. ed. Philadelphia: Wolters Kluwer, 2022.

APÊNDICE A

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)

Você está sendo convidado(a) a participar de uma pesquisa cujo objetivo é analisar o movimento de lactentes de 4 a 9 meses por meio de variações inerciais e captura de movimento tridimensionais com câmeras ópticas. Esta pesquisa está sendo realizada no Laboratório de Estudos de Motricidade Humana (LEMOH) no Núcleo de Medicina Tropical da Universidade Federal do Pará. Além disso, contará com a participação de discentes do Programa de Pós Graduação em Reabilitação e Desempenho Funcional da Universidade Estadual do Pará, orientado pela Profa. Dra. Lucieny da Silva Pontes, CREFITO 26729-F. Esse termo tem a finalidade de firmar acordo escrito, para que você possa autorizar sua participação com pleno conhecimento da natureza dos procedimentos e riscos a que se submeterá, podendo sair da pesquisa a qualquer momento, sem prejuízo algum.

1. **Título da pesquisa:** ANÁLISE DO MOVIMENTO DE LACTENTES COM RISCO PARA ATRASO NO NEURODESENVOLVIMENTO.

2. **Objetivo principal:** Analisar o movimento de lactentes de 0 a 18 meses por meio de variações inerciais, captura de movimento tridimensionais com câmeras ópticas e associados à escala de avaliação motora em crianças com fator de risco para atraso no desenvolvimento neuropsicomotor.

3. **Risco para participantes:** A presente pesquisa apresenta baixo risco aos participantes, incluindo possíveis quebra de sigilo e privacidade das informações, o que será rigorosamente evitado pelo grupo de pesquisadores com o controle de acesso aos dados. Além disso, há o risco de constrangimento dos participantes devido a situações como: analfabetismo dos pais, irritabilidade por parte das crianças, possível detecção de atraso no desenvolvimento neuropsicomotor ou qualquer outra eventualidade não mencionada, mas que possa trazer desconforto ao participante sem intenção dos autores. Em vista disso, para reduzir os riscos, todas as informações pertinentes serão descritas no TCLE.

4. Benefícios para os participantes: Os participantes poderão contribuir para que o presente estudo aumente a discussão e visibilidade da temática, além de propiciar maiores investimentos e acesso à saúde além da capital do estado, assim resultando na melhora da qualidade de vida e desenvolvimento.

5. Informações das pesquisadoras: Lucieny Da Silva Pontes (pesquisadora responsável), conselho de classe-26729-F. End: (institucional). Contato: (91) 98431-6084. E-mail: lucieny.pontes@uepa.br. Lana Paula Cardoso Moreira, Contato: (91) 98617-1351, E-mail: lanapaulamoreira@gmail.com. Luciane Gisele Olimpio de Souza, Contato: (91) 98191-3667, E-mail: fisiogiseleolimpio@gmail.com.

6. Os dados coletados durante a pesquisa serão tratados confidencialmente. Os resultados serão apresentados de forma conjunta, sem a identificação dos participantes, ou seja, o nome não aparecerá na publicação dos resultados. Será gerada uma sequência de números codificados, sendo que as informações serão armazenadas em pastas e guardadas em um arquivo digital, que ficará sob a guarda dos pesquisadores.

7. Sua participação na pesquisa é totalmente voluntária, ou seja, não é obrigatória. Caso você decida não participar, ou desistir de participar e retirar seu consentimento, não haverá nenhum prejuízo às atividades realizadas na instituição.

8. Não está previsto nenhum tipo de pagamento pela participação na pesquisa e não haverá nenhum custo com respeito aos procedimentos e materiais utilizados, os quais serão custeados pelo orçamento da pesquisa. Caso ocorra alguma intercorrência ou dano resultante de sua participação na pesquisa, é seu direito o acesso a indenizações previstas em lei.

9. Outras informações também poderão ser obtidas através do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) do CCBS, que é a instância que realiza a apreciação ética dos projetos de pesquisa envolvendo seres humanos, e é uma instância vinculada à Comissão Nacional de Ética em Pesquisa. Em caso de dúvidas sobre seus direitos como participante nesta pesquisa, você poderá entrar em contato com o CEP do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde CCBS, o qual realizou a avaliação ética do presente projeto. O CEP está localizado na Travessa Perebebuí, 2623, Biblioteca, 1º andar, Sala 1, Bairro do Marco. Contato: (91)3131-1781. E-mail: cepccbs@uepa.br.

10. Este termo está impresso em 2 vias, sendo que uma fica com você e outra com o pesquisador, ambas devem ser rubricadas em todas as suas páginas e assinadas, ao seu término, por você e pelo pesquisador, devendo as assinaturas estarem na mesma folha.

11. Consentimento Pós-Informação:

Eu,_____, após leitura e compreensão deste termo de informação e consentimento, entendo que minha participação é voluntária e que posso sair a qualquer momento do estudo, sem prejuízo algum para mim. Confirmo que recebi uma via deste termo de consentimento, e autorizo a realização do trabalho de pesquisa e a divulgação dos dados obtidos somente em meio científico.

Assinatura do participante

Belém,_____de_____de _____

Declaro que obtive de forma ética a assinatura do participante da pesquisa e que segui rigorosamente tudo o que a resolução do CNS nº 466/12 e 510/16 determinam.

_____

Responsável pela pesquisa Profª. Dra.
Lucieny Da Silva Pontes. CREFITO 12
26729-F

_____

Pesquisadora
Lana Paula Cardoso Moreira. CREFITO 12 336734-F

_____

Pesquisadora
Luciane Gisele Olimpio de Souza. CREFITO 12 392843-F



AUTORIZAÇÃO DE IMAGEM

Eu, _____,_____

nacionalidade_____, estado civil_____, portador da Cédula de identidade RG nº._____, inscrito no CPF/MF sob nº _____, residente_____

_____, nº._____,mmunicípio de

_____/Pará. Responsável pelo menor:_____

_____. **AUTORIZO,** de livre e espontânea vontade, não recebendo para tanto qualquer tipo de remuneração, o uso de imagem em todo e qualquer material entre imagens de vídeo, fotos e documentos, para ser utilizada na **PESQUISA**, intitulada **"ANÁLISE DO MOVIMENTO DE LACTENTES COM RISCO PARA ATRASO NO NEURODESENVOLVIMENTO"**. Declaro que autorizo o uso acima descrito sem que nada haja a ser reclamado a título de direitos conexos à imagem ou a qualquer outro, e assino a presente autorização em 02 vias de igual teor e forma.

_____, dia_____de_____de_____.

_____

Assinatura do Responsável

Nome:

Telefone p/ contato:

APÊNDICE B



FICHA DE TRIAGEM

Nome:	Data: ____ / __ / _____ Semanas nascido:
Nome do responsável:	Sexo: ( ) Fem. ( ) Masc.
Cidade do Nasc:	Raça/cor: ( ) Branco ( ) Negro ( ) Amarelo ( ) Pardo
Endereço:	
Telefone: ( )	Idade (meses): Idade Corrigida:
APGAR ao nascer:	
Nº de consultas durante pré-natal:	( ) Não realizou
Tipo de parto: ( ) Normal ( ) Cesárea	
Estatura:	Peso:
Aleitamento materno:	
Intercorrências:	
Aceita participar da pesquisa: ( ) Sim ( ) Não	

QUESTIONÁRIO SOCIOECONÔMICO

Renda Familiar	( ) Até 1,5 salário mínimo ( ) Acima de 1,5 salário mínimo Renda aprox:
Renda per capita (renda/quantidade pessoas)	R:
Escolaridade da Mãe	( ) Ensino fundamental incompleto ( ) Ensino fundamental completo ( ) Ensino médio incompleto ( ) Ensino médio completo ( ) Ensino superior incompleto ( ) Ensino superior completo ( ) Não se aplica
Escolaridade do Pai	( ) Ensino fundamental incompleto ( ) Ensino fundamental completo ( ) Ensino médio incompleto ( ) Ensino médio completo ( ) Ensino superior incompleto ( ) Ensino superior completo ( ) Não se aplica
Tipo de Residência	( ) Madeira ( ) tijolo
Abastecimento de água	( ) Poço ou nascente ( ) Diretamente do rio ( ) Rede geral de distribuição (cosanpa)
Tratamento de água	( ) Filtrada ( ) Fervura ( ) Cloração ( ) Sem
Eletricidade?	( ) Sim ( ) Não
Ocupação provedor principal	

ANEXOS

APROVAÇÃO DO CEP

UEPA - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO PARÁ- CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE - CAMPUS II

PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: ANÁLISE DO MOVIMENTO DE LACTENTES DE 0 A 18 MESES USANDO MEDIDAS ACELEROMÉTRICAS EM APARELHO DE TELEFONIA MÓVEL E ESCALA DE DESEMPENHO MOTOR

Pesquisador: LUCIENY DA SILVA PONTES

Área Temática:

Versão: 1

CAAE: 21213119.1.0000.5174

Instituição Proponente: Universidade do Estado do Pará - UEPA / Centro de Ciências Biológicas e da

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio
FUNDACAO AMAZONIA PARAENSE DE AMPARO A PESQUISA - FAPESPA

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 3.620.751

Apresentação do Projeto:

" A identificação precoce de crianças com atrasos motores permite uma intervenção precoce e um melhor prognóstico. Com isso, existem diversas escalas que são utilizadas para avaliar a motricidade nos primeiros anos de vida, como a Escala Motora Infantil Alberta. Além disso, outros instrumentos podem ser úteis, como os acelerômetros, que vêm sendo utilizados para a análise do movimento humano. Medidas acelerométricas em aparelhos de telefonia móvel podem ser um modo fácil, rápido e seguro para se identificar anormalidades no desempenho motor de lactentes. Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar o movimento de lactentes de 0 a 18 meses por meio de variações acelerométricas e associado à escala de avaliação de desempenho motor. Trata-se de um do tipo observacional, descritivo, analítico e transversal. Participarão 20 crianças saudáveis, nascidas a termo, na faixa etária de 0-18 meses de vida, matriculadas no Centro de Saúde Escola do Marco. "

Objetivo da Pesquisa:

OBJETIVO GERAL • Avaliar o movimento de lactentes de 0 a 18 meses por meio de variações acelerométricas e associado à escala de avaliação de desempenho motor.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS • Correlacionar os dados acelerométricos com a Escala Motora Infantil Alberta; • Comparar os dados acelerométricos de acordo os marcos do DNPM; • Comparar os

Endereço: Trav. Perebebui, 2623 (1º andar da biblioteca do Campus II da UEPA)
Bairro: Marco **CEP:** 66.087-670
UF: PA **Município:** BELEM
Telefone: (91)3131-1781 **E-mail:** cep_uepa@hotmail.com

dados acelerométricos entre os sexos; • Correlacionar os dados acelerométricos com o Índice de Massa Corporal (IMC) dos lactentes.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Presentes e de acordo com a resolução 466/12

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

A pesquisa é relevante para a área de Desenvolvimento Motor Infantil.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Presentes

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

As Solicitações foram feitas, portanto a pesquisa está APROVADA por este CEP para iniciar a coleta de dados.

O Pesquisador Responsável deverá enviar a este CEP o Relatório Final ao concluir a pesquisa.

Considerações Finais a critério do CEP:

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Cronograma	Cronograma_Lactentesn.docx	01/10/2019 22:04:47	REGINA GABRIELA CALDAS DE MORAES	Aceito
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_1379937.pdf	11/09/2019 09:51:34		Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLEPibic.pdf	10/09/2019 22:28:33	CHRISTIAN DA SILVA COSTA	Aceito
Declaração de Instituição e Infraestrutura	AceiteInstPibic.pdf	10/09/2019 22:25:25	CHRISTIAN DA SILVA COSTA	Aceito
Orçamento	OrcamentoPibic.pdf	10/09/2019 22:24:32	CHRISTIAN DA SILVA COSTA	Aceito
Cronograma	CronogramaPibic.pdf	10/09/2019 22:24:21	CHRISTIAN DA SILVA COSTA	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	PIBIC2019F.pdf	10/09/2019 22:19:24	CHRISTIAN DA SILVA COSTA	Aceito

UEPA - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO PARÁ- CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE - CAMPUS II

Continuação do Parecer: 3.620.751

Folha de Rosto	FolhaRostoPibic.pdf	10/09/2019 22:18:59	CHRISTIAN DA SILVA COSTA	Aceito

Situação do Parecer:
Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:
Não

BELEM, 04 de Outubro de 2019

Assinado por:
REGINA GABRIELA CALDAS DE MORAES
(Coordenador(a))

Endereço: Trav. Perebebui, 2623 (1º andar da biblioteca do Campus II da UEPA)
Bairro: Marco **CEP:** 66.087-670
UF: PA **Município:** BELEM
Telefone: (91)3131-1781 **E-mail:** cep_uepa@hotmail.com