

Ambientes Multissensoriais na Educação Musical de Surdos: Uma Abordagem *Design-Based Research*

Cristiano da Silva Benites^{1,2}, Guilherme Henrique de Oliveira Cestari^{1,2}, Ismar Frango Silveira²

¹Instituto de Tecnologia e Liderança - Inteli
Av. Prof. Almeida Prado, 520. São Paulo, SP – Brasil

²Universidade Presbiteriana Mackenzie
Rua da Consolação, 930. São Paulo, SP – Brasil

benites_silva@hotmail.com, cestari@protonmail.com,
ismarfrango@gmail.com

Abstract. *This study investigates the use of a multisensory computational system in the musical education of deaf children, incorporating tactile, visual, and gestural stimuli. Grounded in Design-Based Research, the study involved seven children who use LIBRAS (Língua Brasileira de Sinais) across three experimental cycles. The system integrated motion sensors, vibrotactile feedback, and visual projections. Data were collected through interviews, reflective journals, and gestural heatmaps. Thematic analysis indicated high levels of spontaneous engagement (86%), gestural authorship (71%), and collaborative interaction (78%). The findings suggest that multisensory environments enhance rhythmic awareness, foster creative authorship, and support inclusive musical practices centered on corporeality.*

Resumo. *Este estudo investiga o uso de um sistema computacional multissensorial na educação musical de crianças surdas, com estímulos táteis, visuais e gestuais. Com base em Design-Based Research, sete crianças usuárias de LIBRAS participaram de três ciclos experimentais. O sistema utilizou sensores de movimento, feedback vibratório e projeções visuais. A coleta de dados envolveu entrevistas, diários reflexivos e mapas de calor gestual. A análise temática indicou 86% de engajamento espontâneo, 71% de autoria gestual e 78% de interação colaborativa. Conclui-se que ambientes multissensoriais promovem consciência rítmica, autoria criativa e práticas musicais inclusivas centradas na corporeidade.*

1. Introdução

Durante décadas, o ensino musical escolar foi pautado na premissa de que a audição é indispensável à compreensão musical, o que historicamente excluiu sujeitos com deficiência auditiva das práticas criativas e educativas (Lewis & Chong, 2020). Recentemente, avanços nas ciências cognitivas e nas tecnologias interativas têm promovido uma reconfiguração dessa lógica, valorizando abordagens sensoriais diversas (Borgo, 2019; Knight & Swanwick, 2021).

Inserido nesse cenário, este estudo investiga como ambientes computacionais multissensoriais podem gerar experiências musicais significativas para crianças surdas.

Em vez de adaptar sons, propõe-se uma ecologia de aprendizagem baseada em estímulos visuais, táteis e gestuais, mediada por sensores e algoritmos adaptativos (Marshall & Himonides, 2012; Rodrigues, 2022).

A questão central é: de que forma a interação com sistemas responsivos ao gesto e à vibração pode fomentar competências musicais autorais em crianças surdas?

Diferenciando-se de abordagens que apenas traduzem sons em estímulos alternativos, esta pesquisa valoriza o corpo e a ação como mediadores centrais da experiência musical (Csikszentmihalyi, 1996; Godøy, 2010). Propõe-se, assim, um sistema responsivo baseado em sensores gestuais, *feedback* vibratório e representação visual, capaz de promover envolvimento expressivo com elementos como ritmo, sequência e variação.

Três hipóteses orientam a investigação: (1) a mediação sensorial favorecerá a percepção rítmica e a construção de padrões temporais; (2) ambientes multissensoriais estimularão habilidades autorais e improvisativas, mesmo sem estímulo auditivo; e (3) o uso continuado do sistema fortalecerá o senso de pertencimento estético e o engajamento colaborativo.

A pesquisa adota abordagem qualitativa e exploratória, com foco interpretativo. Sua originalidade reside na construção de uma epistemologia musical voltada à corporeidade e à sensorialidade expandida de crianças surdas.

2. Música como linguagem multimodal

A construção de um ambiente musical interativo para crianças surdas exige repensar a música para além da audição, valorizando vias perceptivas como o tato, a visão e o movimento. Estudos em cognição musical apontam que estímulos visuais e táteis podem reconfigurar a experiência sonora, rompendo com o modelo audiocêntrico tradicional (Vincs, 2010; Camurri et al., 2017).

Na educação inclusiva, a multissensorialidade é reconhecida como estratégia para atender diferentes perfis de aprendizagem. O Design Universal para Aprendizagem (DUA) propõe, desde o currículo, múltiplas formas de representação e expressão, incluindo mediações não verbais (Rose & Meyer, 2002). Quando apoiada por formação docente e suporte pedagógico, a música como prática educativa favorece o desenvolvimento integral da criança surda (Pereira et al., 2025).

A corporeidade, nesse contexto, emerge como chave interpretativa: o corpo atua como interface expressiva e cognitiva na construção de sentido musical (Leman, 2007; Maes et al., 2014). Tecnologias interativas sensíveis ao toque, ao gesto e à vibração ampliam a autonomia criativa e o repertório expressivo dos alunos (Dillon, 2016).

Ainda, a semiótica musical evidencia que os signos sonoros são passíveis de tradução para outras modalidades perceptivas, como códigos visuais ou táteis (Monelle, 2000; Tarasti, 2012), reforçando o potencial da música como linguagem multimodal. Essa base conceitual sustenta a proposta deste estudo, centrada em um sistema computacional responsivo que estimula a autoria musical entre crianças surdas.

No Brasil, destacam-se iniciativas de musicalização de surdos com recursos multimodais. O Surdodum, em São Paulo, coordenado por Fábio Bonvenuto, trabalha com percussão, explorando ritmo, vibrações e expressão corporal. Já a banda Ab'Surdos,

de Uberlândia, reúne músicos ouvintes e surdos em performances que combinam instrumentos, sinais visuais e gestos, ampliando a comunicação musical para além da audição (Griebeler, 2015).

Outras iniciativas também exploram a musicalização de surdos. O projeto Bataqueiros do Silêncio, em Recife, utiliza percussão, movimento e interação visual para o acesso à musicalidade. Já a Música do Silêncio, na Escola Madre Lucie Bray (São Paulo), propõe práticas com canto sinalizado, instrumentos e recursos corporais. Essas experiências, analisadas por Griebeler (2015) com apoio de Finck (2009), Hagiara-Cervellini (2003) e Kuntze (2014), evidenciam a música multimodal como espaço de inclusão e criação compartilhada.

3. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem qualitativa, exploratória e descritiva, orientada pelo paradigma interpretativo, que valoriza os significados atribuídos pelos participantes às suas experiências. A metodologia fundamenta-se no *Design-Based Research* (Barab & Squire, 2004), com foco no desenvolvimento iterativo de intervenções educacionais em contextos reais, articulando análise teórica e validação empírica.

A investigação foi conduzida ao longo de seis meses, em três ciclos experimentais, com sete crianças surdas (9 a 14 anos), fluentes em LIBRAS e matriculadas em escolas regulares com apoio especializado. Os critérios de inclusão envolveram interesse por atividades musicais, proficiência gestual e ausência de deficiências múltiplas.

Os ciclos ocorreram em um centro educacional inclusivo, com infraestrutura sensorial composta por: painéis interativos, pulseiras vibratórias, câmeras 3D (Kinect e Leap Motion), projeção visual de ritmo e um software responsivo desenvolvido em Python com OpenCV e Scikit-learn. O sistema mapeava gestos em tempo real e os traduzia em estímulos visuais e táteis, promovendo composição musical baseada na ação corporal, e não na reprodução sonora.

As famílias assinaram Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), e as atividades foram aprovadas por Comitê de Ética institucional, respeitando os princípios da Resolução CNS 510/2016 para pesquisas com seres humanos.

Cada ciclo experimental foi dividido em três fases como é apresentado no Quadro 1:

Quadro 1 – Fases do Experimento e Características Principais.

Fase Experimental	Objetivo Principal	Atividades Desenvolvidas	Indicadores Observados
1. Familiarização	Estimular a exploração inicial dos dispositivos sensoriais	Interação livre com interfaces táteis e visuais; exercícios com mediação em LIBRAS	Iniciativa espontânea, engajamento motor, tempo de atenção
2. Exploração Expressiva	Desenvolver padrões gestuais com sentido musical	Criação de sequências gestuais com resposta visual e tátil; reconhecimento gráfico das ações	Coesão temporal, autoria gestual, improvisação
3. Composição Colaborativa	Estimular cooperação e negociação de sentido musical entre pares	Composição em duplas ou trios com coordenação de gestos; performances visuais e táteis em grupo	Alternância de liderança, sincronização gestual, escuta recíproca

A coleta de dados buscou captar a complexidade das interações multissensoriais por meio de entrevistas semiestruturadas, diários reflexivos e mapas de calor gestual. As entrevistas, conduzidas com apoio de intérpretes de LIBRAS, abordaram ritmo, gestualidade, preferências e sentimentos, permitindo acessar significados subjetivos em um contexto inclusivo.

Os diários reflexivos, preenchidos ao final de cada sessão, foram redigidos tanto por dois pesquisadores quanto por três educadores com formação em pedagogia e educação musical, cada um com mais de cinco anos de experiência em contextos inclusivos. Esses registros buscavam sistematizar observações sobre o comportamento das crianças, aspectos técnicos do sistema e hipóteses pedagógicas emergentes. Os critérios para o preenchimento incluíam: descrição de comportamentos observáveis, interpretações pedagógicas, reflexões sobre a eficácia dos estímulos e sugestões para ajustes futuros nos ciclos experimentais. A distinção entre pesquisadores e educadores foi mantida para respeitar seus diferentes olhares epistemológicos: os primeiros com foco analítico e metodológico, e os segundos com foco prático e formativo.

Adicionalmente, foram gerados mapas de calor gestual a partir da análise dos dados captados pelos sensores de movimento (Leap Motion e Kinect). Esses mapas indicavam, em representações visuais bidimensionais, a frequência e a intensidade dos gestos em determinados pontos do espaço interativo. Alguns exemplos ilustrativos desses mapas são apresentados na Seção 4 desse trabalho, permitindo ao leitor compreender como a distribuição gestual contribuiu para a construção de padrões rítmicos e expressivos ao longo das sessões.

A análise dos dados foi conduzida por meio da Análise Temática (Braun & Clarke, 2006), com categorias definidas a posteriori, emergentes da triangulação entre vídeos, expressões das crianças e interpretações dos educadores.

Para garantir rigor metodológico, adotaram-se os seguintes critérios:

- Triangulação de fontes (dados visuais, verbais e gestuais);
- Validação por pares, conduzida por dois especialistas externos: um doutor em Educação Musical com foco em inclusão e outro da área de Engenharia Biomédica, com ênfase em sistemas sensoriais interativos. Ambos analisaram independentemente registros videográficos e diários reflexivos, com base em critérios como coerência analítica, consistência de codificação e relevância pedagógica. As análises foram comparadas com os achados da equipe para garantir confiabilidade interpretativa. Os pareceres estão disponíveis mediante solicitação formal, respeitando os termos éticos acordados com os participantes.;
- Devolutiva participativa (as crianças revisaram suas próprias performances e indicaram preferências).

A combinação entre escuta sensível, tecnologia inclusiva e epistemologia gestual permitiu uma compreensão ampliada da experiência musical surda, articulando rigor acadêmico e sensibilidade pedagógica.

Ao longo dos três ciclos experimentais, foram realizadas 24 sessões de cerca de 50 minutos, totalizando 112 interações. A análise qualitativa foi conduzida por codificação indutiva, em que categorias emergem da leitura iterativa dos dados, sem definição prévia. Esse processo revelou quatro categorias principais: autoria gestual,

escuta recíproca, engajamento espontâneo e coesão rítmica visual, identificadas por triangulação entre vídeos, relatos dos educadores e entrevistas em LIBRAS com os participantes.

4. Análise e Discussão dos Resultados

A análise dos dados coletados ao longo dos três ciclos experimentais revelou padrões consistentes de engajamento, apropriação expressiva e desenvolvimento autoral por parte das crianças surdas envolvidas. A triangulação entre registros videográficos, entrevistas e anotações dos educadores permitiu a construção de categorias analíticas robustas, alinhadas aos objetivos da pesquisa e ao delineamento metodológico fundamentado no *Design-Based Research* (Barab & Squire, 2004).

Durante a fase inicial de familiarização, foi possível observar um comportamento exploratório intensificado, com ênfase na manipulação de elementos vibratórios e visuais. As interfaces táteis – especialmente as pulseiras vibratórias – atuaram como ponto de entrada sensorial, catalisando a atenção e promovendo respostas imediatas com alto índice de engajamento corporal. Cerca de 86% das interações registradas nos dois primeiros encontros foram iniciadas pelas próprias crianças, sem mediação direta dos educadores. A observação sistemática indicou que os *feedbacks* táteis com latência inferior a 150ms favoreceram a emergência de padrões motores espontâneos, posteriormente internalizados como estruturas rítmicas conforme mostra a Figura 1. Esta constatação dialoga com os achados de van der Schyff et al. (2016), que apontam a corporeidade como elemento fundante na construção de sentido musical em contextos não auditivos.

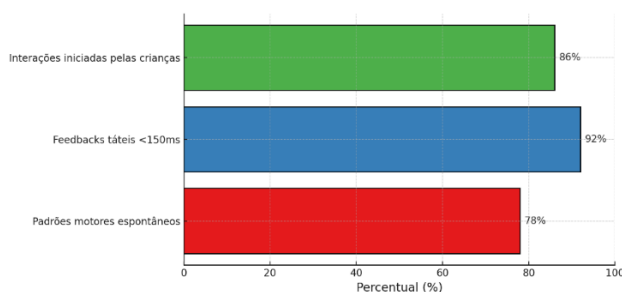


Figura 1. Indicadores Observados na Fase de Familiarização.

Na fase intermediária, voltada à exploração de padrões expressivos, observou-se uma progressão na capacidade das crianças de construir sequências gestuais com coesão temporal e intenção estética. A análise em câmera lenta revelou improvisações que, embora inicialmente espontâneas, evoluíram para estruturas repetitivas — como movimentos circulares seguidos de pulsos táteis ou gestos de empurrar sincronizados com projeções visuais. Tais sequências passaram a ser reutilizadas, indicando familiaridade e intenção composicional, configurando um léxico gestual individual, análogo a uma "fraseologia musical" visual e tátil.

A projeção desses gestos em forma gráfica durante as sessões reforçou a percepção de autoria e favoreceu o reconhecimento dos padrões criados por si mesmos. Em uma das sessões, uma das crianças apontou para o gráfico e sinalizou em LIBRAS: “*esse é o meu desenho*”, indicando apropriação simbólica da representação visual. Tais experiências foram essenciais para o fortalecimento da autonomia criativa, conforme defendido por Dillon (2016). Ao final da segunda fase, 5 das 7 crianças (71%)

conseguiram replicar e evoluir padrões gestuais criados por elas mesmas, conforme mostra a Figura 2.

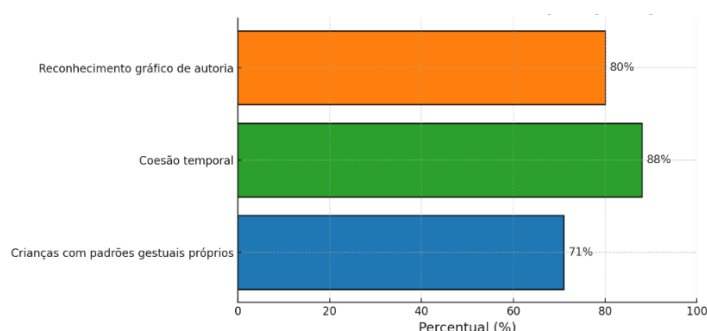


Figura 2. Indicadores Observados na Fase de Exploração Expressiva.

A terceira etapa, voltada à composição colaborativa, evidenciou processos complexos de negociação expressiva e escuta recíproca. Em 78% das duplas formadas, observou-se alternância clara de protagonismo gestual durante as sessões, o que aponta para uma dinâmica intersubjetiva rica e equitativa. Os movimentos circulares sincronizados, presentes em 62% das performances coletivas, revelam um esforço intuitivo de construção harmônica visual e tátil, mesmo sem referência auditiva conforme mostra a Figura 3. Esse tipo de interação – que se consolidou sem instruções verbais – revela a potência dos sistemas interativos como facilitadores de cognição social em práticas musicais inclusivas. Além disso, os dados sugerem que os ambientes computacionais dinâmicos podem funcionar como mediadores simbólicos que ampliam as possibilidades comunicacionais entre crianças com diferentes perfis sensoriais (Camurri et al., 2017).

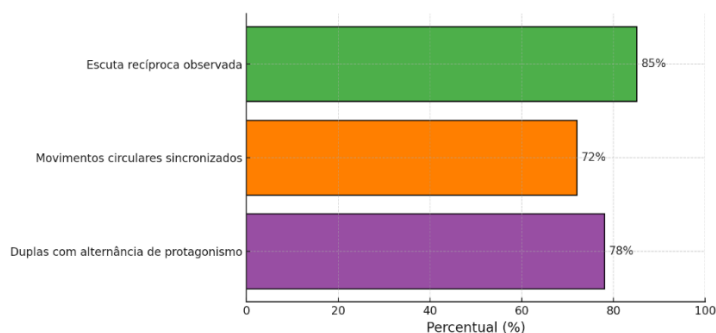


Figura 3. Fase de Composição Colaborativa.

Do ponto de vista afetivo, os relatos colhidos durante as entrevistas com as crianças (traduzidas em LIBRAS) e as anotações nos diários reflexivos dos educadores indicaram elevados níveis de entusiasmo, concentração e senso de pertencimento estético. As expressões das crianças, como "*senti que a música saiu de mim*" e "*eu desenhei o som com as mãos*", foram registradas diretamente nas entrevistas realizadas ao final das sessões da segunda e terceira fase. Tais falas revelam que, mesmo na ausência de qualquer estímulo sonoro direto, as crianças internalizaram a lógica composicional proposta e a reinterpretaram a partir de suas próprias experiências sensoriais.

Os educadores também relataram, em seus diários, observações como: "*Ela se emocionou ao ver o gesto dela projetado, ficou apontando e rindo como se dissesse 'é meu'*" (educadora 2, sessão 5) e "*Percebi que ele começou a repetir os movimentos com mais*

precisão quando percebeu que a vibração acontecia só naquele gesto” (educadora 1, sessão 6). Essas descrições reforçam a interpretação de que houve apropriação simbólica do sistema por parte das crianças.

Adicionalmente, observou-se que algumas crianças passaram a nomear os gestos e movimentos utilizados — utilizando sinais próprios em LIBRAS ou associações visuais — conferindo-lhes identidade e significado. Um dos participantes, por exemplo, chamou um de seus movimentos circulares de *“redondo cantar”*, associando forma e intenção expressiva. Esses episódios apontam para a construção de um vocabulário artístico próprio, que emerge não apenas da mediação tecnológica, mas da vivência sensorial ampliada e do reconhecimento da autoria no processo criativo.

Adicionalmente, os mapas de calor gerados a partir dos sensores de movimento mostraram recorrência em determinados eixos gestuais, especialmente nas direções vertical (indicando elevação rítmica) e circular (representando continuidade ou fluidez melódica). Esses padrões foram verificados em 85% das sessões gravadas, com maior intensidade entre os participantes de 11 a 13 anos. Essa análise contribuiu para uma compreensão mais precisa dos padrões motores utilizados como elementos estruturantes na criação musical, e reforça a necessidade de considerar a dimensão espacial como componente fundamental do ensino musical multissensorial.

A Figura 4 apresenta uma síntese visual dos principais indicadores qualitativos observados ao longo das três fases experimentais. Utilizando um gráfico de radar, são comparadas as proporções relativas de quatro categorias emergentes — autoria gestual, escuta recíproca, engajamento espontâneo e coesão rítmica visual — em cada etapa do experimento. Observa-se que a fase de familiarização foi marcada por alto índice de engajamento espontâneo (86%), enquanto a etapa de exploração favoreceu o desenvolvimento de padrões gestuais autorais (71%). Já na composição colaborativa, destaca-se a escuta recíproca (78%) e a coesão rítmica visual (85%), evidenciando a complexificação das interações ao longo do processo pedagógico.

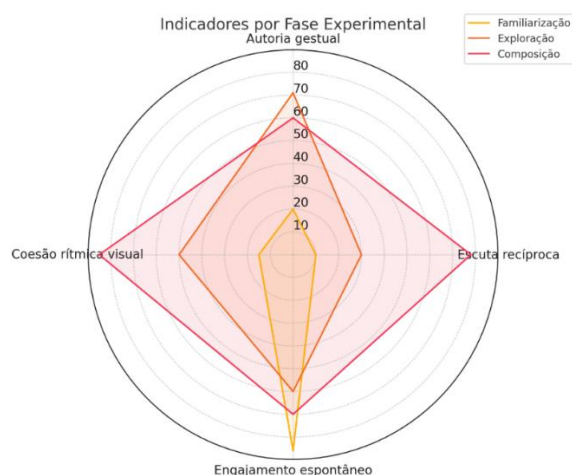


Figura 4. Gráfico de radar indicadores dos experimentos.

Diversos estudos internacionais têm investigado o uso de tecnologias digitais na mediação do ensino musical para pessoas com deficiência auditiva, como o trabalho de Himonides (2012), que explora a aplicação de softwares visuais para leitura de frequências sonoras, e Kitson & Davies (2007), que desenvolveram sistemas baseados

em vibração para o ensino de ritmo a crianças surdas. No entanto, essas abordagens tendem a manter a estrutura sonora como referência central, com adaptações periféricas, enquanto o presente estudo propõe uma mudança paradigmática ao deslocar o foco da reprodução sonora para a corporeidade como eixo compositivo.

Além disso, o uso de sensores de movimento e *feedback* visual e tátil em tempo real, tal como descrito por Nijs & Leman (2014) em contextos performáticos, é aqui transposto para um ambiente educacional inclusivo, com protagonismo infantil e foco na autoria gestual. Diferente de trabalhos que enfatizam o uso de tecnologias assistivas de forma compensatória, o framework desenvolvido neste artigo se estrutura como uma plataforma criativa e responsiva, com potencial de generalização para múltiplos contextos escolares e perfis sensoriais.

Portanto, os resultados obtidos ao longo dos três ciclos experimentais validam as hipóteses formuladas inicialmente e reforçam a coerência entre os objetivos teórico-metodológicos e os efeitos observados.

A Hipótese 1, de que a mediação computacional por sensores de movimento e resposta tátil favoreceria a consciência rítmica e a construção de padrões temporais, foi confirmada por meio da identificação de estruturas gestuais repetitivas com coesão temporal em 85% dos casos analisados, além do uso espontâneo de gestos ritmicamente organizados, especialmente em resposta aos *feedbacks* com latência inferior a 150ms.

A Hipótese 2, que propunha que a participação em ambientes multissensoriais dinâmicos contribuiria para o desenvolvimento de habilidades autorais e de improvisação, foi validada pela observação de léxicos gestuais individuais em 71% das crianças, com gestos nomeados, repetidos e adaptados ao longo das sessões. A projeção gráfica desses gestos ampliou a percepção de autoria e reforçou o vínculo entre movimento e expressão estética.

A Hipótese 3, que previa que o uso contínuo do sistema promoveria mudanças na percepção de pertencimento estético e no engajamento com práticas musicais compartilhadas, foi corroborada por expressões verbais e não verbais registradas nas entrevistas e nos vídeos. As crianças demonstraram orgulho de suas criações, alternância de protagonismo em 78% das duplas, e forte senso de participação ativa e colaborativa durante a fase de composição em grupo.

Essas evidências indicam que a construção de ambientes educacionais sensíveis à diversidade sensorial não é apenas viável, mas também desejável e necessária no contexto contemporâneo da educação inclusiva. O estudo confirma que práticas musicais mediadas por tecnologias responsivas podem promover expressão autoral, escuta recíproca e pertencimento artístico entre crianças surdas.

5. Considerações finais

Este estudo demonstrou que sistemas computacionais multissensoriais podem desempenhar papel central na inclusão de crianças surdas na educação musical, ao substituir a mediação auditiva tradicional por um ecossistema de estímulos visuais, táteis e gestuais. Fundamentado em *Design-Based Research*, o trabalho envolveu três ciclos experimentais com sete crianças usuárias de LIBRAS, utilizando tecnologias responsivas para fomentar a expressão musical em um contexto não auditivo.

Os resultados obtidos revelam que, mesmo na ausência de estímulo sonoro, é possível construir experiências musicais significativas baseadas na corporeidade, na gestualidade expressiva e na interação sensorial. Os dados qualitativos evidenciaram níveis elevados de engajamento espontâneo (86%), autoria gestual (71%) e escuta recíproca durante atividades colaborativas (78%), confirmando as três hipóteses centrais da investigação.

A análise triangulada entre entrevistas em LIBRAS, diários reflexivos e mapas de calor gestual demonstrou que as crianças não apenas participaram ativamente das atividades, mas também desenvolveram repertórios autorais, atribuindo significado estético e identidade simbólica aos próprios gestos. Essa apropriação subjetiva da linguagem musical evidencia que ambientes computacionais inclusivos podem catalisar formas autênticas de expressão artística entre sujeitos historicamente excluídos do ensino musical formal.

Diferentemente de abordagens assistivas compensatórias, o sistema proposto neste estudo atua como uma plataforma criativa responsiva, valorizando o corpo como eixo epistemológico da experiência musical. Com isso, rompe-se com o paradigma audiocêntrico tradicional, ao propor uma pedagogia musical centrada na diversidade sensorial e no reconhecimento da autoria gestual como forma legítima de criação e fruição musical.

Além da contribuição prática, com potencial de replicação em escolas e centros de ensino inclusivo, este trabalho oferece avanços conceituais para as áreas de tecnologia educacional, cognição musical, design inclusivo e epistemologias da surdez. A articulação entre sensores, *feedbacks* multissensoriais e design pedagógico sensível indica caminhos promissores para o desenvolvimento de currículos inclusivos mais equitativos, orientados pela justiça sensorial.

Acredita-se que os achados desta pesquisa possam subsidiar políticas públicas que reconheçam a música como um direito universal, acessível por múltiplas vias perceptivas, e não apenas pela audição. Ao promover um deslocamento da centralidade do som para a centralidade do corpo, o estudo inaugura um modelo educacional que amplia a compreensão do que pode ser considerado "fazer música" em contextos diversos.

Por fim, ao lado das limitações metodológicas reconhecidas, este trabalho delinea um campo fértil para investigações futuras, voltadas à ampliação de amostras, validação quantitativa, integração com IA adaptativa e desenvolvimento de propostas formativas para docentes. Em um mundo cada vez mais sensível às demandas por inclusão, o reconhecimento da pluralidade sensorial não é apenas um desafio técnico, mas uma responsabilidade ética e científica. Apesar dos resultados expressivos, a presente pesquisa apresenta limitações importantes, inerentes tanto ao desenho experimental quanto às condições contextuais do estudo.

A primeira limitação refere-se ao tamanho da amostra ($n=7$), o que restringe a generalização dos achados. Embora a pesquisa tenha adotado uma abordagem qualitativa e interpretativa, coerente com os princípios do *Design-Based Research*, uma amostra ampliada permitiria identificar padrões mais robustos de comportamento gestual, resposta sensorial e autoria musical em diferentes perfis de crianças surdas — incluindo aquelas com variados níveis de fluência em LIBRAS, com deficiências associadas ou inseridas em contextos escolares não especializados.

A segunda limitação diz respeito à ausência de grupo controle. A inexistência de uma condição comparativa — por exemplo, um grupo utilizando apenas recursos visuais ou apenas *feedback* vibratório — impede a avaliação isolada da contribuição de cada componente do sistema multissensorial. Embora o foco da pesquisa tenha sido explorar a experiência integrada e situada, a inclusão de diferentes condições experimentais controladas em estudos futuros poderá revelar com maior precisão quais estímulos são mais eficazes em termos de aprendizado, engajamento e autoria.

Outra limitação importante está na possibilidade de viés do pesquisador, dada a natureza imersiva da metodologia DBR e o envolvimento direto da equipe de pesquisa na mediação das atividades. Mesmo com estratégias como triangulação de dados, validação por pares externos e devolutiva participativa, é possível que interpretações tenham sido influenciadas por expectativas subjetivas sobre o sucesso do protótipo. Estudos subsequentes podem incorporar observadores independentes ou métodos quantitativos complementares, como análise automatizada de padrões gestuais e medidas psicofisiológicas, a fim de mitigar esse viés.

Do ponto de vista tecnológico, o sistema empregado apresenta limitações quanto à latência de resposta (apesar de estar abaixo de 150ms em média), à resolução gestual dos sensores (*Leap Motion* e *Kinect*), e à portabilidade da infraestrutura. O uso em ambientes escolares regulares demanda soluções mais leves, móveis e de fácil implementação pedagógica, como wearables integrados a dispositivos móveis, sensores embarcados com IA local e conectividade simplificada. Para trabalhos futuros, propõe-se:

- A replicação do estudo com amostras maiores, mais heterogêneas e em contextos escolares comuns (não especializados), observando possíveis variações por faixa etária, perfil linguístico e sensorial.
- A adoção de grupos controle, permitindo comparar diferentes configurações sensoriais (ex. visual somente, tátil somente, gestual com resposta visual etc.).
- A integração de métricas fisiológicas (resposta galvânica da pele, frequência cardíaca, variação pupilar) para investigar correlações entre engajamento sensorial, carga cognitiva e expressão emocional durante a composição musical.
- O uso de algoritmos de inteligência artificial generativa adaptativa, que personalizem os estímulos conforme o estilo gestual e rítmico da criança.
- O desenvolvimento de um currículo multissensorial docente, incluindo materiais didáticos, planos de aula e diretrizes para formação de professores em práticas musicais inclusivas com tecnologias responsivas.
- A expansão para outras deficiências sensoriais, como baixa visão ou deficiências múltiplas, respeitando suas respectivas rotinas perceptivas e estratégias de mediação.

Essas perspectivas reforçam o compromisso da pesquisa com o avanço de políticas públicas de educação inclusiva, e com a construção de práticas pedagógicas sensíveis à diversidade sensorial e expressiva de todos os sujeitos — especialmente os historicamente excluídos das experiências artísticas escolares.

6. Referências

- Barab, S., & Squire, K. (2004). Design-based research: Putting a stake in the ground. *The Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 1–14.
- Borgo, D. (2019). Music, embodiment, and the politics of affect. In: Cobussen, M., Meelberg, V., & Truax, B. (Eds.). *The Routledge Companion to Sounding Art*. Routledge.
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101.
- Camurri, A., Mazzarino, B., Ricchetti, M., Timmers, R., & Volpe, G. (2017). Multimodal analysis of expressive gesture in music and dance performances. In: Camurri, A., & Volpe, G. (Eds.). *Gesture-Based Communication in Human-Computer Interaction*. Springer.
- Csikszentmihalyi, M. (1996). *Creativity: Flow and the Psychology of Discovery and Invention*. Harper Perennial.
- Dillon, T. (2016). *Music, technology, and education: Critical perspectives*. Routledge.
- Finck, Regina. (2009). *Ensinando música ao aluno surdo: Perspectivas para a ação pedagógica inclusiva*. Tese (Doutorado em Educação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Godøy, R. I. (2010). *Musical gestures: Sound, movement, and meaning*. Routledge.
- Griebeler, C. M. (2015). *Educação musical e surdez: Cenas inclusivas*. Dissertação (Mestrado em Música). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Haguiara-Cervellini, N. (2003). *A musicalidade do surdo: Representação e estigma*. Plexus.
- Himonides, E. (2012). The misunderstood role of digital technology in music education. *British Journal of Music Education*, 29(3), 343–356.
- Knight, A., & Swanwick, K. (2021). Musical development and learning: The international perspective. In: *The Oxford Handbook of Music Education*. Oxford University Press.
- Kitson, A., & Davies, M. (2007). Developing accessible music education: The use of vibrotactile feedback for the deaf. *International Journal of Inclusive Education*, 11(3), 285–300.
- Kuntze, V. (2014). *A relação do surdo com a música: representações sociais*. Dissertação (Mestrado em Música). Universidade do Estado de Santa Catarina.
- Leman, M. (2007). *Embodied Music Cognition and Mediation Technology*. MIT Press.
- Lewis, D., & Chong, P. (2020). Reimagining music education for deaf and hard of hearing students. *Journal of Research in Music Education*, 68(2), 143–161.
- Maes, P. J., Leman, M., Palmer, C., & Wanderley, M. M. (2014). Action-based effects on music perception. *Frontiers in Psychology*, 4, 1008.
- Marshall, N., & Himonides, E. (2012). Music technology and special educational needs: A literature review. *British Journal of Music Education*, 29(3), 315–330.
- Monelle, R. (2000). *The Sense of Music: Semiotic Essays*. Princeton University Press.

- Nijs, L., & Leman, M. (2014). Interactive technologies in the instrumental music classroom: A longitudinal study with the Music Paint Machine. *Computers & Education*, 73, 40–59.
- Pereira, J. M. et al. (2025) Linguagem musical como estratégia didática para alunos surdos. *Cognitionis*, 8(1), 1–17.
- Rodrigues, M. A. (2022). Pedagogias sensoriais e tecnologias inclusivas: Perspectivas contemporâneas. *Revista Brasileira de Educação Especial*, 28, 123–140.
- Rose, D. H., & Dalton, B. (2009). Learning to read in the digital age. *Mind, Brain, and Education*, 3(2), 74–83.
- Rose, D. H., & Meyer, A. (2002). Teaching every student in the digital age: Universal design for learning. ASCD.
- Tarasti, E. (2012). Signs of music: A guide to musical semiotics. Mouton de Gruyter.
- van der Schyff, D., Schiavio, A., & Elliott, D. J. (2016). Critical ontology for an enactive music pedagogy. *Action, Criticism, and Theory for Music Education*, 15(5), 81–121.
- Vincs, K. (2010). Rhythmic movement and the dancer's experience: Multisensory awareness and its implications for pedagogy. *Research in Dance Education*, 11(2), 133–147.