



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES COMUNICAÇÃO E DESIGN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

**Design aplicado ao desenvolvimento de
sistemas de informação para pessoas
com deficiência visual: uma proposta
metodológica para avaliação de materiais
utilizados na impressão 3D por
*Fused Filament Fabrication (FFF)***

Antônio José Spirandelli

Bauru

2026

Antônio José Spirandelli

Design aplicado ao desenvolvimento de sistemas de informação para pessoas com deficiência visual: uma proposta metodológica para avaliação de materiais utilizados na impressão 3D por *Fused Filament Fabrication (FFF)*

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design, da Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Design.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cassia Letícia Carrara Domiciano

Bauru

2026

S759d

Spirandelli, Antônio José

Design aplicado ao desenvolvimento de sistemas de informação para pessoas com deficiência visual : uma proposta metodológica para avaliação de materiais utilizados na impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF) / Antônio José Spirandelli. -- Bauru, 2026

247 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, Bauru

Orientadora: Cassia Leticia Carrara Domiciano

1. Impressão 3D FFF. 2. Percepção tátil. 3. Sistemas de informação tátil. 4. Deficiência visual. 5. Design Inclusivo. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE ANTÔNIO JOSÉ SPIRANDELLI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN, DA FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES, COMUNICAÇÃO E DESIGN - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 06 de março de 2026, às 9h, no(a) <https://meet.google.com/goh-nfca-ezg> e Sala de reuniões do Departamento de Design, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de ANTÔNIO JOSÉ SPIRANDELLI, intitulada "Design aplicado ao desenvolvimento de sistemas de informação para pessoas com deficiência visual: uma proposta metodológica para avaliação de materiais utilizados na impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF)". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Professora Associada CASSIA LETICIA CARRARA DOMICIANO (Orientadora - Participação Presencial) do Departamento de Design / FAAC / UNESP / Câmpus de Bauru, Professor Titular LUIS CARLOS PASQUARELLA (Participação Virtual), do Departamento de Design / FAAC / UNESP, Câmpus de Bauru, Professora Doutora FERNANDA HENRIQUES (Participação Virtual), do Departamento de Design, FAAC, UNESP, câmpus de Bauru, Prof. Dr. MARCIO JAMES SOARES GUIMARÃES (Participação Virtual) do Departamento de Desenho e Tecnologia - DDET / Universidade Federal do Maranhão, Professora Doutora LÍVIA FLÁVIA CAMPOS DE ALBUQUERQUE (Participação Presencial) do Departamento de Desenho e Tecnologia - DDET / Universidade Federal do Maranhão. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **APROVADO**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

***“Só porque um homem carece do uso de seus
olhos não significa que ele não tem visão.”***

Stevie Wonder

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as bênçãos que recebo diariamente em minha vida e por colocar pessoas que tornam meu caminho especial e seguro.

Durante esse período de estudos e muito aprendizado me tomei pai pela segunda vez e aprendi a valorizar ainda mais todos os momentos em família, mesmo os mais desafiadores. Por isso, agradeço aos meus pais, José e Sandra, por todos os ensinamentos e esforços pela minha educação e formação como pessoa. E aos meus sogros, meus pais de coração, Roberto e Ruth, por todo apoio e incentivo durante essa caminhada!

Agradeço aos meus tesouros mais valiosos: Roberta, minha amiga e esposa, que sempre me deu uma palavra de incentivo nos momentos em que mais precisei, Enrique e Elena, meu filhos que fazem os meus dias transbordarem de alegria. É por vocês que me dedico cada dia a ser uma pessoa melhor. Amo vocês!

À minha orientadora Cassia, minha sincera gratidão pela dedicação, conselhos e valiosas contribuições durante todas as etapas do trabalho. À todos os professores e amigos que aceitaram participar tanto de minha qualificação, quanto de minha defesa. Obrigado pelas leituras atentas e sugestões que enriqueceram este estudo.

Aos alunos da graduação que participaram do projeto e à instituição que abriu as portas para que eu realizasse os testes, Projeto Vida Iluminada na cidade de Lençóis Paulista/SP, expresse meu reconhecimento pela colaboração, confiança e apoio, fundamentais para a realização da pesquisa.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Design, obrigado pelas oportunidades de aprendizado e pelo suporte institucional que tornaram possível o desenvolvimento desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento desta pesquisa, por meio do processo nº 88887.803856/2023-00.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho e para o fortalecimento do meu crescimento acadêmico, profissional e humano.

RESUMO

Esta tese investiga a influência dos materiais utilizados na impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF) no desempenho háptico de texturas aplicadas a sistemas de informação tátil destinados a pessoas com deficiência visual (PcDVs). Parte-se do pressuposto de que, em contextos inclusivos, o material não constitui apenas suporte físico, mas componente ativo da legibilidade informacional. A pesquisa busca responder se diferentes filamentos impactam a clareza geométrica percebida e como variações dimensionais da textura modulam esse efeito. Adotou-se delineamento experimental estruturado em dois experimentos complementares. O Experimento 1 consistiu em tarefa de ordenação incremental de texturas produzidas em PLA, PETG e TPU, permitindo avaliar a discriminação tátil em condição comparativa. O Experimento 2 simulou contexto de uso por meio de tarefa de busca em mapa tátil, investigando a organização perceptiva da escala sob condição mais ecológica. Participaram dois grupos: controle (universitários videntes sob privação visual temporária) e experimental (PcDVs). No segundo experimento, introduziram-se variações controladas na dimensão dos pontos (D0%, D50% e D100%). A análise integrou indicadores de eficácia (percentual de acertos), eficiência (tempo médio e desvio padrão), Diferença Mínima Significativa (DMS) e modelagem estrutural por matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS). Essa abordagem permitiu compreender não apenas o desempenho quantitativo, mas a organização relacional do espaço perceptivo. Os resultados indicam que o material influencia a clareza geométrica de forma relacional e não linear. O PLA apresentou maior estabilidade discriminativa, especialmente em tarefas que exigiram separação incremental precisa. O PETG apresentou desempenho intermediário, enquanto o TPU evidenciou maior variabilidade associada à sua deformabilidade. A ampliação máxima do relevo não produziu melhora proporcional, demonstrando que a proporção entre níveis consecutivos é mais determinante que o aumento absoluto da altura. Conclui-se que decisões técnicas em FFF impactam diretamente a experiência cognitiva do usuário. A tese contribui ao propor metodologia integrada de avaliação que articula desempenho e estrutura perceptiva, oferecendo subsídios projetuais para o desenvolvimento de sistemas de informação tátil mais consistentes e empiricamente fundamentados.

Palavras-chave: impressão 3D FFF; percepção tátil; sistemas de informação tátil; deficiência visual; design inclusivo.

ABSTRACT

This thesis investigates the influence of materials used in Fused Filament Fabrication (FFF) 3D printing on the haptic performance of textures applied to tactile information systems designed for people with visual impairments (PVI). It is grounded on the assumption that, in inclusive contexts, material is not merely a physical substrate but an active component of informational legibility. The research examines whether different filaments affect perceived geometric clarity and how controlled dimensional variations of textures modulate this effect. An experimental design was structured into two complementary studies. Experiment 1 consisted of an incremental ordering task using textures printed in PLA, PETG, and TPU, allowing the assessment of tactile discrimination under comparative conditions. Experiment 2 simulated a real-use context through a tactile search task in a map-based configuration, investigating the perceptual organization of the scale under more ecological conditions. Two groups participated: a control group (sighted university students under temporary visual deprivation) and an experimental group (PVI participants). In Experiment 2, controlled variations in point height (D0%, D50%, and D100%) were introduced. Data analysis integrated effectiveness (accuracy rate), efficiency (mean time and standard deviation), Minimum Significant Difference (MSD), and structural modeling through confusion matrices and Multidimensional Scaling (MDS). This combined approach enabled the examination not only of quantitative performance but also of the relational organization of the perceptual space. Results indicate that material influences geometric clarity in a relational and non-linear manner. PLA demonstrated greater discriminative stability, particularly in tasks requiring precise incremental separation. PETG showed intermediate performance, whereas TPU exhibited higher variability associated with its deformability. Increasing relief height did not produce proportional performance gains, indicating that proportional differentiation between consecutive levels is more determinant than absolute height increase. The thesis concludes that technical decisions in FFF printing directly affect users' cognitive experience. It contributes by proposing an integrated methodological framework that articulates performance indicators and perceptual structure, offering design guidelines for the development of empirically grounded and more consistent tactile information systems.

Keywords: FFF 3D printing; haptic perception; tactile information systems; visual impairment; inclusive design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Interação das variáveis relativas ao estudo do toque na percepção das propriedades dos objetos	43
Figura 2 - Esquema básico do funcionamento de impressoras FFF	54
Figura 3 - Esquema da estrutura do hotend de impressoras FFF	55
Figura 4 - Etapas do processo de impressão por FFF	56
Figura 5 - Técnicas de escaneamento 3D	58
Figura 6 - Interface de software CAD	59
Figura 7 - Comparação entre as interferências ocasionadas pelo deslocamento do bico impressor em peças posicionadas horizontal e verticalmente na mesa de impressão	61
Figura 8 - Orientação de peças com balanços, cavidades ou descontinuidades e o uso de estruturas de suporte	62
Figura 9 - Principais imperfeições na impressão 3D por FFF	63
Figura 10 - Altura de camada e relação entre qualidade e tempo de impressão	68
Figura 11 - Variação na densidade de preenchimento e relação em função do tempo de impressão e consumo de material, considerando os mesmos parâmetros para impressão	68
Figura 12 - Padrões de preenchimento mais comuns nos softwares fatiadores	69
Figura 13 - Sistema de movimentação nas impressoras cartesianas	72
Figura 14 - Sistema de movimentação nas impressoras core XY	73
Figura 15 - Sistema de movimentação impressoras delta	74
Figura 16 - Sistemas de tração bowden e direct drive	75
Figura 17 - Bicos extrusores duplo e triplo	75
Figura 18 - Impressão de suportes do modelo utilizando filamento solúvel	76
Figura 19 - Sistema de ícones táteis para ensino de topologia de redes de computadores	85
Figura 20 - Representações das maneiras que o carbono tetravalente pode formar suas	

ligações	86
Figura 21 - Demonstração do encaixe das peças impressas para formação das ligações químicas	86
Figura 22 - Hapstick-Figure e a dinâmica de representação de gestos humanos.....	89
Figura 23 - Instrumento para avaliação de variáveis em sistemas táteis para exposições interativas.....	91
Figura 24 - Peças que compõem o conceito de learning desktop utilizado na exposição	93
Figura 25 - Detalhe da impressão das peças em partes e montagem.....	94
Figura 26 - Processo de digitalização e impressão utilizando macro-OCT.....	95
Figura 27 - Teste de toque em ícones táteis impressos em 3D para mapas de parques, playgrounds e lojas.....	98
Figura 28 - Princípio de funcionamento da tecnologia TouchIt3D.....	102
Figura 29 - Exemplo de distribuição das camadas em um mapa do tipo turismo: camada 1= ruas, camada 2= espaços abertos, camada 3= florestas/ parques, camada 4= construções, e tema= camada temática de PIs.....	103
Figura 30 - Padrão braille Resolução nº 4/SEHAB/CPA (2000) - Dimensões entre os pontos (A) e altura dos pontos (B)	111
Figura 31 - Amostras impressas em 3D: detalhamento das densidades das texturas	111
Figura 32 - Variação das dimensões dos pontos com os grupos D0%, D50% e D100%.....	112
Figura 33 - Variação dimensional e deformações na impressão do braille por FFF.....	113
Figura 34 - Processo de produção e resultado das amostras impressas	115
Figura 35 - Plataforma para teste de ordenação	116
Figura 36 - Esquema de montagem do mapa tátil	117
Figura 37 - Abordagem para os experimentos do Grupo Experimental	118
Figura 38 - Layout do experimento 01	122
Figura 39 - Layout do experimento 2.....	125
Figura 40 - Randomização e contrabalanço das amostras.....	126
Figura 41 - Tabulação e cálculo da DMS com valores fictícios para uma coleta com 20 participantes	131
Figura 42 - Cálculos para estruturação da matriz de dissimilaridade.....	132
Figura 43 - Modelo de visualização dos dados utilizando a MDS	134

Figura 44 - Gráficos de dispersão.....	138
Figura 45 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o PLA do grupo controle	139
Figura 46 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o PETG do grupo controle.....	141
Figura 47 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o TPU do grupo controle.....	142
Figura 48 - Matriz de confusão e gráfico MDS (PETG D0%, D50% e D100%) do grupo controle.....	143
Figura 49 - Matriz de confusão e gráfico MDS (PLA D0%, D50% e D100%) do grupo controle.....	170
Figura 50 - Matriz de confusão e gráfico MDS (TPU D0%, D50% e D100%) do grupo controle.....	171
Figura 51 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o PLA do grupo experimental.....	171
Figura 52 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o PETG do grupo experimental.....	176
Figura 53 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o TPU do grupo experimental	177
Figura 54 - Matriz de confusão e gráfico MDS (PETG D0%, D50% e D100%), grupo experimental.....	178
Figura 55 - Matrizes de confusão e gráficos de MDS (PLA D0%, D50% e D100%), grupo experimental.....	181
Figura 56 - Matriz de confusão e gráfico MDS (TPU D0%, D50% e D100%, grupo experimental.....	182
Figura 57 - Comparação entre as matrizes de confusão do PLA (grupo controle).....	183
Figura 58 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o PLA (grupo controle).....	187
Figura 59 - Gráfico de dispersão para o PLA (grupo controle)	188
Figura 60 - Comparação entre as matrizes de confusão do PETG (grupo controle)	189
Figura 61 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o PETG (grupo controle).....	194
Figura 62 - Gráficos de dispersão para o PETG (grupo controle).....	194
Figura 63 - Comparação entre as matrizes de confusão do TPU (grupo controle).....	195
Figura 64 - Sobreposição dos gráficos de MDS e gráficos de dispersão TPU (grupo controle)	196
Figura 65 - Gráfico de dispersão TPU (grupo controle).....	196
Figura 66 - Comparação entre as matrizes de confusão do PLA (grupo experimental)	197
Figura 67 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o PLA (grupo experimental)	198

Figura 68 - Gráfico de dispersão para o PLA (grupo experimental).....	198
Figura 69 - Comparação entre as matrizes de confusão do PETG (grupo controle)	199
Figura 70 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o PETG (grupo experimental)	200
Figura 71 - Gráfico de dispersão para o PETG (grupo experimental)	201
Figura 72 - Comparação entre as matrizes de confusão do TPU (experimental).....	201
Figura 73 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o TPU (grupo experimental).....	202
Figura 74 - Gráfico de dispersão para o TPU (grupo experimental)	203
Figura 75 - Imperfeições superficiais na impressão das amostras de TPU: (A) amostra impressa com rebarbas e (B) amostra depois da etapa de pós-processamento.....	203
Figura 76 - Coleta de dados no estudo piloto, com uma pesquisadora, um participante e os instrumentos: câmera fotográfica com tripé (A); notebook (B); amostras impressas em 3D (C e F); fichas com números para identificação dos participantes (D e E); cabine de avaliação de percepção háptica (G); ficha com instruções para os avaliadores (H)	204
Figura 77 - Cabine de avaliação, com abertura retangular na parte anterior (A); e interior com marcação de posicionamento das amostras (B).....	205
Figura 78 - Comparação entre os desenho metodológico do experimento 2: (A) desenho original e (B) desenho com as modificações	205

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais bibliotecas digitais para modelos 3D.....	57
Quadro 2 - Principais filamentos e suas características.....	78
Quadro 3 - Codificação para elementos arquitetônicos em mapas táteis para ambientes internos.....	100
Quadro 4 - Organização vertical das camadas na hierarquização das informações.....	103
Quadro 5 - Parâmetros de impressão utilizados na produção das amostras.....	11
Quadro 6 - Organização e disposição das amostras para o experimento 1	121
Quadro 7 - Organização e disposição das amostras para o experimento 2	123
Quadro 8 - Síntese metodológica das etapas de análise para os experimentos 1 e 2.....	128
Quadro 9 -Relação entre tempo médio (s) e desvio padrão (DP).....	129
Quadro 10 - Modelo da estruturação da matriz de confusão.....	132
Quadro 11 - Síntese metodológica das etapas de análise para a validação metodológica	136

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Classificação da função visual a partir da acuidade visual..... 35
- Tabela 2** - Eficácia (em %) dos materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais..... 146
- Tabela 3** - Eficiência (em segundos) dos materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. O valor destacado em amarelo representa o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais 146
- Tabela 4** - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas..... 148
- Tabela 5** - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais..... 149
- Tabela 6** - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. O valor destacado em amarelo representa o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.....150
- Tabela 7** - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 150
- Tabela 8** - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado

direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais 150

Tabela 9 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 151

Tabela 10 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais..... 151

Tabela 11 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas 152

Tabela 12 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas 153

Tabela 13 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas 154

Tabela 14 - Eficácia (em %) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais..... 156

Tabela 15 - Eficiência (em segundos) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. O desvio padrão (DP) é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais156

Tabela 16 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam

pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas 158

Tabela 17 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 160

Tabela 18 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parêntese, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais..... 160

Tabela 19 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 161

Tabela 20 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais..... 161

Tabela 21 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 161

Tabela 22 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais..... 162

Tabela 23 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em ama-

relo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas 163

Tabela 24 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas 164

Tabela 25 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas 164

Tabela 26 - Eficácia (em %) dos materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais..... 168

Tabela 27 - Eficiência (em segundos) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais 169

Tabela 28 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.. 172

Tabela 29 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores em amarelo indicam melhores índices; os valores em azul indicam os piores índices. Para eficiência, os valores entre parênteses indicam o desvio padrão 173

Tabela 30 - Eficácia das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam os materiais com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 173

Tabela 31 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais..... 174

- Tabela 32** - Eficácia (em %) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 174
- Tabela 33** - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do (TPU D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais 175
- Tabela 34** - Eficácia (em %) dos materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 179
- Tabela 35** - Eficiência (em segundos) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais 180
- Tabela 36** - Eficácia das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 184
- Tabela 37** - Eficiência das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais 184
- Tabela 38** - Eficácia das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais..... 185
- Tabela 39** - Eficiência das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais 185
- Tabela 40** - Eficácia das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam os materiais com melhor eficácia,

enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais 186

Tabela 41 - Eficiência das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais 186

LISTA DE ABREVIATURAS

3DP – 3D Printing

ABNT NBR – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

AM – Additive Manufacturing ou Manufatura Aditiva

AR – Augmented Reality ou Realidade Aumentada

ASA – Acrilonitrila Estireno Acrilato

ASTM – American Society for Testing and Materials International

CAD – Computer-Aided Design ou Projeto Assistido por Computador

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CID – Classificação Estatística Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde

CIF – Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde

CNS – Conselho Nacional de Saúde

CONEP – Comissão Nacional de Ética em Pesquisa

CPA – Comissão Permanente de Acessibilidade

D0% – Variação dimensional de referência dos pontos táteis

D50% – Variação dimensional com aumento de 50% dos pontos táteis

D100% – Variação dimensional com aumento de 100% dos pontos táteis

DMRI – Degeneração macular relacionada à idade

DMS – Diferença Mínima Significativa

DP – Desvio padrão

ECR – Estudo clínico randomizado

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FDM – Fused Deposition Modeling ou Modelagem por deposição fundida

FFF – Fused Filament Fabrication

IA – Inteligência Artificial

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDRC – Inclusive Design Research Center

IoT – Internet of Things

ISO – International Organization for Standardization ou Organização Internacional de Normalização

LOM – Laminated Object Manufacturing

Macro-OCT – Tomografia de Coerência Óptica em escala macroscópica

MDF – Medium Density Fiberboard ou Pannel de fibra de madeira de média densidade

MDS – Multidimensional Scaling

MIT – Massachusetts Institute of Technology

MS – Ministério da Saúde

MSD – Minimum Significant Difference

OMS – Organização Mundial da Saúde

OSM – OpenStreetMap

PcDVs – Pessoas com deficiência visual

PEs – Procedimentos exploratórios

PETG – Politereftalato de etileno modificado com glycol

PIs – Pontos de Interesse

PLA – Ácido polilático

PNS – Pesquisa Nacional de Saúde

PVI – People with Visual Impairments

QR – Quick Response

RM – Rapid Manufacturing

RP – Rapid Prototyping

RT – Rapid Tooling

SEHAB – Secretaria Municipal de Habitação

SGC – Solid Ground Curing

SLA – Estereolitografia

SLS – Sinterização seletiva a laser

TCLE – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

TPU – Poliuretano termoplástico

VAS – Visual Analogue Scale

VR – Virtual Reality ou Realidade Virtual

WHO – World Health Organization

SUMÁRIO

Seção 1 - Introdução	27
1.1. Justificativa.....	28
1.2. Questão de pesquisa.....	29
1.3. Objetivo geral.....	29
1.4. Objetivos específicos.....	29
1.5. Hipóteses e sub-hipóteses.....	29
1.6. Características do estudo e cuidados éticos.....	30
1.7. Estrutura da tese.....	31
Seção 2 - Percepção Háptica e Acessibilidade	33
2.1. Deficiência visual e inclusão: conceitos e classificações.....	33
2.1.1. Classificação da deficiência visual.....	34
2.2. Percepção háptica: transcrição de códigos visuais em informações táteis.....	36
2.3. Sistemas de informação táteis: variáveis relativas ao estudo do toque.....	39
2.3.1. Estímulos.....	40
2.3.2. Repertório visual.....	40
2.3.3. Procedimentos exploratórios.....	43
2.3.2. Estratégias de busca tátil.....	44
2.3.2.1. Cognição de padrões espaciais.....	45
2.3.2.2. Movimentos sistemáticos.....	46
2.3.2.3. Divisão em áreas.....	47
Seção 3 - Impressão 3D por <i>Fused Filament Fabrication</i> (FFF) no Design de Produtos Táteis.....	49
3.1. Manufatura aditiva e impressão 3D: definição dos conceitos.....	49
3.2. Panorama histórico sobre as tecnologias de impressão 3D.....	51
3.3. <i>Fused Filament Fabrication</i> (FFF).....	53

3.3.1. Princípio de funcionamento do método FFF	53
3.3.2. Etapas do processo de impressão 3D por (FFF)	55
3.3.2.1. Obtenção do modelo geométrico 3D	56
3.3.2.2. Planejamento de processo.....	60
3.3.2.3. Fabricação	63
3.3.2.4. Pós-processamento	64
3.4. Parâmetros de Impressão.....	65
3.4.1. Altura da camada (<i>Layer height</i>)	67
3.4.2. Densidade de preenchimento (<i>Infill</i>).....	68
3.4.3. Velocidade de impressão	69
3.4.4. Temperatura do bico extrusor	70
3.4.5. Fluxo de impressão.....	71
3.4.6. Retração	71
3.5. Tipos de impressoras 3D por FFF.....	72
3.6. Filamentos mais comuns utilizados na impressão 3D por FFF.....	77
Seção 4 - Sistemas de Informação Tátil impressos por <i>Fused Filament</i>	
<i>Fabrication</i> (FFF) para PcDVs.....	79
4.1 Sistemas de informação tátil: mapas, gráficos, símbolos e pictogramas	79
4.2 Abordagens do design e da ergonomia para o desenvolvimento de sistemas de informação para PcDVs.....	80
4.3 Aplicações da impressão 3D por FFF na produção de sistemas de informação tátil.....	83
4.3.1 Área de ensino	83
4.3.2 Cultura e lazer.....	88
4.3.3. Orientação e mobilidade	96
Seção 5 - Materiais e métodos.....	105
5.1. Características do estudo e cuidados éticos	105
5.2. Amostragem	107
5.3. Equipamentos e instrumentos de pesquisa	108
5.3.1. Amostras impressas em 3D.....	108
5.3.2. Plataformas.....	115

5.3.3. Mapa tátil.....	116
5.4. Procedimentos Metodológicos	117
5.4.1. Entrevista estruturada.....	118
5.4.2. Experimento 01 - Teste de ordenação	120
5.4.3. Experimento 02 - Teste de busca.....	123
5.5. Análise dos dados	126
5.5.1 Experimento 01: Teste de ordenação	130
5.5.2 Experimento 02: Teste de localização	132
5.5.3 Validação metodológica	135
5.6. Ajustes metodológicos: testes materiais e estudo piloto	138
5.6.1 Dificuldades técnicas relacionadas a impressão 3D por FFF	138
5.6.2 Estudo piloto - adequação dos instrumentos de pesquisa	140
5.6.3 Redesenho metodológico do experimento 2	142
Seção 6 - Resultados e discussão.....	144
6.1. Experimento 1 – Teste de ordenação	144
6.1.1. Grupo Controle – Caracterização da amostra.....	144
6.1.2. Bloco A – Influência do material na clareza geométrica das texturas.....	145
6.1.2.1. Eficácia X Eficiência	145
6.1.2.2. Diferença Mínima Significativa (DMS)	147
6.1.3. Bloco B - Influência da variação na dimensão dos pontos na percepção tátil....	149
6.1.3.1. Eficácia X Eficiência	149
6.1.3.2. Diferença Mínima Significativa (DMS)	152
6.1.4. Grupo Experimental – Caracterização da amostra	154
6.1.5. Bloco A - Influência do material na clareza geométrica das texturas	156
6.1.5.1. Eficácia X Eficiência	156
6.1.5.2. Diferença Mínima Significativa (DMS)	157
6.1.6. Bloco B: Influência da variação na dimensão dos pontos na percepção tátil....	159
6.1.6.1. Eficácia X Eficiência	159
6.1.6.2. Diferença Mínima Significativa (DMS)	162
6.1.7. Análise comparativa: grupo controle × grupo experimental	165
6.2. Experimento 2 – Teste de busca tátil.....	167

6.2.1. Grupo Controle – Caracterização da amostra.....	167
6.2.2. Bloco A: Influência do material na clareza geométrica das texturas.....	168
6.2.2.1. Eficácia X Eficiência	168
6.2.2.2. Matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS)....	170
6.2.3. Bloco B: Influência da variação na dimensão dos pontos na percepção tátil....	172
6.2.3.1. Eficácia X Eficiência	172
6.2.3.2. Matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS).....	176
6.2.4. Grupo Experimental – Caracterização da amostra	179
6.2.5. Bloco A: Influência do material na clareza geométrica das texturas.....	179
6.2.5.1. Eficácia X Eficiência	179
6.2.5.2. Matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS) ..	181
6.2.6. Bloco B: Influência da variação na dimensão dos pontos na percepção tátil....	184
6.2.6.1. Eficácia X Eficiência	184
6.2.6.2. Matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS) ...	187
6.2.7. Análise comparativa: grupo controle × grupo experimental	190
6.3. Validação Metodológica.....	192
6.3.1. Validação Metodológica – Grupo Controle.....	193
6.3.2. Validação Metodológica – Grupo Experimental.....	199
6.3.3. Comparação Estrutural entre Grupo Controle e Grupo Experimental.....	206
6.4. Discussão dos resultados	207
Seção 7 - Conclusão.....	215
Referências	219
Apêndice I	227
Apêndice II.....	229
Apêndice III	231
Apêndice IV	233
Apêndice V.....	242
Apêndice VI	243
Apêndice VII.....	244
Anexo I.....	246
Anexo II.....	247

INTRODUÇÃO

A participação social e a independência de pessoas com deficiência visual (PcDVs) dependem de iniciativas que promovam a orientação e mobilidade, como a eliminação de barreiras físicas e o desenvolvimento de Tecnologias Assistivas. Entre essas, destacam-se os sistemas de informação tátil, como mapas táteis, que possibilitam o acesso a produtos, serviços e ambientes inclusivos. Esses sistemas enfatizam a legibilidade e decodificação de informações, priorizando uma lógica de uso que inclui sinalização, manuais e avisos em embalagens (Moraes, 2002).

Para PcDVs, a superfície dos materiais funciona como uma interface de comunicação, sendo a textura um elemento essencial para a transmissão de informações hápticas. Assim, a escolha do material impacta diretamente na percepção tátil, afetando propriedades como textura, rigidez e durabilidade (Manzini, 1989; Phutane et al., 2022). No entanto, por muitos anos, a produção de sistemas táteis dependia de técnicas artesanais, limitando a escala de reprodução e a precisão dos símbolos representados. Com o avanço do movimento maker, as tecnologias de prototipagem rápida, como a impressão 3D, tornaram-se mais acessíveis, democratizando o desenvolvimento desses sistemas (Frosch, 2021).

A impressão 3D, particularmente a tecnologia Fused Filament Fabrication (FFF), é amplamente utilizada devido ao custo acessível e à flexibilidade na produção. Esse método utiliza sistemas CAD (Computer-Aided Design) para modelar peças geométricas, que são construídas camada por camada com materiais como PLA, ABS, PETG e TPU, cada um com características específicas que influenciam sua aplicabilidade e desempenho tátil (ISO, 2016; Volpato; Carvalho, 2017).

No desenvolvimento de produtos assistivos, a impressão 3D apresenta vantagens significativas, incluindo personalização, precisão geométrica e conforto, características que promovem maior aceitação e satisfação entre os usuários (Ferrari et al., 2019). Modelos 3D superam técnicas tradicionais por oferecerem maior clareza dos símbolos e melhor percepção háptica,

facilitando a memorização de códigos táteis e a construção de modelos mentais precisos dos ambientes (Gual; Puyuelo; Lloveras, 2015; Holloway; Marriott; Butler, 2018). Tais características tornam essa tecnologia promissora para o desenvolvimento de sistemas de informação inclusivos voltados a PcDVs, especialmente quando se considera a necessidade de recursos táteis mais consistentes, reproduzíveis e ajustados às demandas específicas dos usuários.

1.1 Jutificativa

Apesar dos avanços no uso de impressão 3D para a produção de sistemas de informação inclusivos, a literatura ainda carece de estudos que abordem diretamente a influência dos materiais utilizados no desempenho háptico de PcDVs. Na maior parte das pesquisas que empregam a tecnologia FFF, o PLA (ácido polilático) é o material mais comumente utilizado, sendo valorizado por sua facilidade de uso, custo acessível, adequação para iniciantes em impressão 3D e características biodegradáveis (Singhal; Balaji, 2020; Jablonka; Lambert; Lister, 2024; Zolek-Tryznowska; Brzezinska; Bednarczyk, 2024). No entanto, essas justificativas não consideram aspectos específicos relacionados ao desempenho tátil dos usuários nas tarefas solicitadas.

Nesse sentido, estudos como o de Wu et al. (2022) indicam que o material do filamento influencia diretamente a interpretação de gráficos táteis, enfatizando a necessidade de critérios técnicos mais rigorosos para a seleção de materiais. Tais achados ressaltam a importância de investigar não apenas a viabilidade técnica dos materiais, mas também sua adequação ao desempenho háptico em sistemas de informação acessíveis.

A relevância desta pesquisa, portanto, situa-se em dois níveis complementares. No plano científico, o estudo busca contribuir para o avanço do conhecimento na interface entre design inclusivo, percepção háptica, tecnologia assistiva e manufatura aditiva, propondo parâmetros de análise voltados à relação entre materialidade e desempenho tátil. No plano social e prático, a pesquisa responde a uma demanda concreta por recursos táteis mais eficazes, considerando que a popularização das impressoras 3D por FFF amplia a possibilidade de que usuários, instituições especializadas, escolas, laboratórios e profissionais desenvolvam seus próprios sistemas de informação tátil. Nesse cenário, compreender quais materiais favorecem melhor desempenho perceptivo pode subsidiar decisões projetuais mais qualificadas e contribuir para o desenvolvimento de soluções mais acessíveis, legíveis e adequadas às necessidades de pessoas com deficiência visual.

1.2 Questão de Pesquisa

Considerando a crescente utilização da impressão 3D na produção de sistemas de informação tátil e a necessidade de parâmetros mais consistentes para orientar a escolha de materiais, esta pesquisa parte da seguinte questão: Os materiais utilizados em impressoras 3D por FFF impactam o desempenho háptico de texturas e sistemas de informação inclusivos destinados a pessoas com deficiência visual (PcDVs)?

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente estudo é propor uma metodologia para análise da influência de materiais utilizados em impressoras 3D FFF (como PLA, PETG e TPU) na percepção háptica de texturas aplicadas em sistemas de informação inclusivos para PcDVs.

1.4 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pode-se apontar: investigar as diferenças na percepção tátil proporcionadas por materiais como PLA, PETG e TPU, a partir da variação da densidade da textura impressa e da variação da dimensão dos pontos impressos nas texturas; avaliar a relação entre os materiais e a clareza geométrica das peças impressas; compreender as diferenças de percepção tátil com base em habilidades visuais e táteis prévias.

1.5 Hipótese principal e sub-hipóteses

Com base na questão de pesquisa e nos objetivos delineados, foram formuladas a hipótese principal (H1):

- H1 – Os materiais utilizados na impressão 3D por FFF (PLA, PETG e TPU) influenciam o desempenho háptico na percepção de texturas e na interpretação de sistemas de informação inclusivos por PcDVs, uma vez que suas propriedades físico-mecânicas; como rigidez, elasticidade, acabamento superficial e precisão dimensional; podem impactar diretamente a saliência dos relevos, a distinção de padrões e a facilidade de exploração tátil.

Além de sub-hipóteses (SH1, SH2, SH3 e SH4) que nortearão a investigação:

- SH1 – Há diferenças significativas na percepção háptica de texturas entre indivíduos com visão e indivíduos com deficiência visual (congenita ou adquirida) sem treinamento prévio, considerando que o repertório visual pode fornecer estratégias cognitivas complementares na interpretação tátil de formas e texturas, enquanto a ausência desse repertório pode ser compensada por uma maior acurácia tátil adquirida por uso frequente do sentido do tato;
- SH2 – O processo de aprendizado perceptivo durante a exposição às texturas ocorre de forma distinta entre os grupos controle (pessoas com visão) e experimental (PcDVs), especialmente no que se refere à memorização de códigos táteis e à interpretação espacial, sendo esperado que indivíduos com deficiência visual desenvolvam estratégias exploratórias mais refinadas ao longo dos experimentos, enquanto os que enxergam podem depender inicialmente de uma visualização mental do estímulo para interpretar o relevo tátil;
- SH3 – O material com maior rigidez e definição geométrica, como o PLA, proporciona melhor clareza tátil na identificação de padrões e texturas devido à maior estabilidade dimensional e à nitidez dos relevos impressos. Em contrapartida, materiais mais flexíveis como o TPU, embora ofereçam conforto ao toque, podem comprometer a definição dos pontos táteis e dificultar a distinção de detalhes finos, impactando negativamente o desempenho perceptivo em tarefas que exigem discriminação precisa de formas e símbolos táteis;
- SH4 – A variação da densidade e da dimensão dos pontos táteis influencia de maneira diferente a percepção tátil entre os materiais testados, considerando que determinadas combinações de altura, largura e espaçamento podem ser mais ou menos eficazes para a detecção tátil em função das propriedades físico-mecânicas dos filamentos utilizados.

1.6 Características do estudo e cuidados éticos

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem predominantemente quantitativa e delineamento experimental, desenvolvido por meio de dois experimentos complementares voltados à investigação da influência de materiais utilizados na impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF) na percepção tátil de texturas aplicadas a sistemas de informação inclusivos. Para tanto, participaram do estudo um grupo controle, composto por indivíduos com visão sem treinamen-

to tátil prévio, e um grupo experimental, formado por pessoas com deficiência visual, permitindo a comparação entre diferentes repertórios perceptivos e estratégias exploratórias.

Por envolver a participação de seres humanos, a pesquisa foi conduzida em conformidade com os princípios éticos aplicáveis, com garantia de participação voluntária, uso do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, preservação do anonimato e proteção dos dados coletados. O detalhamento do tipo de pesquisa, dos procedimentos metodológicos, da composição da amostra e das questões éticas adotadas é apresentado na seção 5.

1.7 Estrutura da Tese

A seção 1 “Introdução”, apresenta o contexto e a relevância da pesquisa, destacando a crescente demanda por sistemas de informação tátil para pessoas com deficiência visual (PcDVs). A introdução aborda os desafios enfrentados por esse público no acesso a informações e a importância do design inclusivo. Também justifica o uso da impressão 3D como ferramenta acessível e versátil na produção de materiais assistivos. São apresentados o problema de pesquisa, as hipóteses, os objetivos geral e específicos, bem como a delimitação do estudo.

A estrutura das seções 2, 3 e 4, referentes à fundamentação teórica, segue uma ordem lógica e progressiva, que parte das particularidades do público-alvo, avança para aspectos técnicos fundamentais da impressão 3D por FFF e termina com a apresentação de aplicações na prática desta tecnologia de impressão.

Inicialmente, a seção 2 é dedicada às características perceptivas do usuário, abordando a deficiência visual sob a perspectiva da percepção tátil, com ênfase nas estratégias de exploração e nas variáveis que influenciam a interpretação de texturas e formas. Também trata de questões como acessibilidade, inclusão e classificação da deficiência visual, além de apresentar um panorama das pesquisas com PcDVs no Brasil. Faz uma análise de como esses usuários interagem com o ambiente e acessam informações espaciais para garantir sua mobilidade e autonomia.

Em seguida, a seção 3, apresenta a base tecnológica que sustenta a pesquisa — a impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF) — com o objetivo de contextualizar os recursos e limitações do meio produtivo. Detalha o processo de Fused Filament Fabrication (FFF), amplamente utilizado por sua acessibilidade e versatilidade. São abordados os softwares de modelagem (CAD), os de fatiamento (*slicers*) e os diferentes tipos de impressoras 3D disponíveis no

mercado. Além de explicar como esses elementos influenciam a qualidade final dos produtos, especialmente aqueles voltados para sistemas de informação tátil.

Enquanto que a seção 4 tem como foco os sistemas informacionais táteis voltados às pessoas com deficiência visual, onde são analisadas as possibilidades de aplicação da impressão 3D no desenvolvimento de sistemas de informação inclusivos para PcDVs. Discute como o método de FFF têm sido aplicados; além dos segmentos em destaque na área, como mapas táteis, sinalização acessível e objetos educacionais. Inclui uma revisão de literatura sobre estudos prévios com a utilização dessa tecnologia para promover acessibilidade, destacando as vantagens e limitações associadas a cada material e método de fabricação, bem como uma análise a respeito da amostra, objetivos e metodologias empregadas.

A seção 5 detalha o delineamento metodológico da pesquisa, descreve os métodos e instrumentos utilizados para coleta e análise de dados, como o teste de ordenação aplicado às amostras de materiais impressos em 3D. Explica o processo de seleção dos participantes, os critérios de inclusão e exclusão, e a forma como os dados serão tratados. Também aborda a justificativa para a escolha do método e a validação das ferramentas utilizadas.

Na seção 6 são apresentados os resultados obtidos. Os dados serão analisados para validar ou refutar as hipóteses propostas, destacando contribuições práticas e teóricas, comparando-os com a literatura existente e discutindo suas implicações no contexto do design inclusivo e da impressão 3D.

Por fim, a seção 7, apresenta a conclusão, com uma síntese das principais descobertas, limitações do estudo e desdobramentos para pesquisas futuras.

PERCEPÇÃO HÁPTICA E ACESSIBILIDADE

O desenvolvimento de produtos inclusivos requer o conhecimento aprofundado das características, necessidades e contextos de uso das pessoas para quem se projeta. No caso de usuários com deficiência visual, esse entendimento envolve aspectos sensoriais, ambientais, sociais e cognitivos que influenciam diretamente sua interação com os sistemas de informação.

2.1. Deficiência visual e inclusão: conceitos e classificações

A deficiência e a inclusão têm sido discutidas sob diferentes perspectivas ao longo da história, resultando em modelos interpretativos que refletem transformações sociais, científicas e culturais. O modelo médico, consolidado no século XVIII por influência dos avanços da medicina e do foco na reabilitação, entende a deficiência como uma patologia localizada no indivíduo. Nesse enquadramento, a condição orgânica é central e o sujeito assume um papel predominantemente passivo, visto como paciente em busca de cura ou tratamento. Consequentemente, instala-se uma relação de dependência, em que a pessoa com deficiência é condicionada a superar sua limitação individual (Bonfim, 2009).

A partir da segunda metade do século XX, especialmente entre as décadas de 1960 e 1970, os movimentos sociais de direitos humanos e diversidade impulsionaram mudanças para um modelo social que desloca a deficiência do corpo para o ambiente. Nesse paradigma, a exclusão é compreendida como produto direto das barreiras impostas pela organização social — barreiras arquitetônicas, comunicacionais, atitudinais e institucionais — e não como consequência da condição individual. Shakespeare (2018) destaca que essa mudança decorre de um processo

histórico em que pessoas com deficiência passaram a reivindicar igualdade de direitos, contestando visões caritativas e medicalizadas que predominavam até então. A deficiência passa, assim, a ser entendida como uma experiência moldada pelo contexto social e não como atributo intrínseco ao indivíduo.

Mais recentemente, essa discussão tem se expandido para campos como o design, com abordagens que reconhecem que produtos, sistemas e serviços também podem funcionar como barreiras quando não contemplam a diversidade humana. Nesse cenário, o Inclusive Design Research Center (IDRC, 2015) propõe compreender a deficiência como um “descompasso entre as necessidades do indivíduo e o produto durante o uso”. Essa visão aproxima-se dos debates contemporâneos sobre design inclusivo, que enfatizam que decisões projetuais têm o potencial de incluir ou excluir usuários. Waller et al. (2015), ao discutirem o caso do design inclusivo no contexto de produtos e sistemas, reforçam que compreender a diversidade humana e reduzir as demandas de capacidade dos artefatos é essencial para mitigar exclusões criadas pelo próprio design.

Desse modo, a responsabilidade pela inclusão desloca-se do usuário para o projeto, compreendendo que o desajuste perceptivo, funcional ou operacional não é atributo da pessoa, mas do produto, objeto ou material que falha em atender às suas necessidades (Guimarães; Moura; Domiciano, 2021). Em consonância com essa perspectiva, Shakespeare (2018) reitera que a deficiência não deve ser tratada como um problema individual a ser corrigido, mas como uma relação dinâmica entre sujeitos e contextos — relação essa que pode ser transformada por políticas, práticas e decisões projetuais sensíveis à diversidade humana.

2.1.1. Classificação da deficiência visual

A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2019) classifica a deficiência visual a partir de parâmetros funcionais da visão definidos por duas referências normativas centrais: a Classificação Estatística Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde (CID-11) e a Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde (CIF). Ambas contribuem para a compreensão da deficiência visual não apenas como uma condição clínica, mas como um fenômeno que envolve interações entre funções corporais, atividades, participação social e fatores ambientais.

Com base na acuidade visual — medida fundamental para avaliar a capacidade de resolu-

ção espacial do sistema visual — a OMS (2019) estabelece quatro categorias funcionais: visão normal, deficiência visual moderada, deficiência visual grave e cegueira (Tabela 1). Essa classificação possibilita delimitar não apenas o grau de perda sensorial, mas também as implicações dessa perda para o desempenho cotidiano.

No caso específico da cegueira, a literatura distingue diferentes impactos sobre o desenvolvimento perceptivo e cognitivo de acordo com a idade de ocorrência. Pessoas que nascem cegas ou perdem a visão até aproximadamente cinco anos de idade são consideradas cegas congênitas (Ormelezi, 2000), uma vez que, nesse período, ainda não há uma consolidação definitiva de memórias visuais que contribuam para a representação mental do espaço e dos objetos. A perda da visão após essa faixa etária caracteriza a cegueira adquirida (Machado, 2003), situação em que o indivíduo mantém algum repertório visual prévio, o qual pode influenciar, de modo variável, as estratégias de aprendizagem, orientação espacial e construção de imagens mentais.

Cabe destacar que a CIF enfatiza que a deficiência visual deve ser entendida como uma condição contextual, em que as limitações funcionais decorrem tanto das características sensoriais quanto das barreiras impostas pelo ambiente físico, social e informacional (OMS, 2001). Essa perspectiva amplia a análise para além das métricas oftalmológicas, permitindo compreender como diferentes graus e momentos de instalação da deficiência impactam a forma como os sujeitos interagem, significam e constroem conhecimento sobre o mundo.

Tabela 1 - Classificação da função visual a partir da acuidade visual.

Classificação	Acuidade visual no melhor olho	
	Pior que:	Melhor que:
Deficiência Visual Suave	6/12	6/18
Deficiência Visual Moderada	6/18	6/60
Deficiência Visual Grave	6/60	3/60
Cegueira	3/60	

Fonte: OMS, 2019.

A acuidade visual é medida como uma fração, onde o primeiro número corresponde a distância em metros, enquanto que o segundo número indica a distância em que uma pessoa com visão normal enxergaria. Portanto, uma acuidade visual de 6/12, por exemplo, representa que o indivíduo enxerga a 6 metros o que uma pessoa com visão normal é capaz de enxergar a 12 metros. Dessa forma, quanto maior o segundo número da fração, menor é a acuidade visual detectada.

A discussão sobre deficiência visual e inclusão, ao evidenciar que as limitações não decorrem exclusivamente da condição sensorial, mas também das barreiras impostas pelos sistemas e ambientes, conduz diretamente à necessidade de compreender como a informação pode ser reorganizada para se tornar acessível. No caso das pessoas com deficiência visual, essa reorganização exige considerar os modos específicos pelos quais o mundo é percebido, interpretado e significado por meio do tato. Assim, após delimitar os aspectos conceituais e funcionais da deficiência visual, cabe aprofundar a compreensão da percepção háptica como base para a transcrição de códigos visuais em informações táteis.

2.2. Percepção háptica: transcrição de códigos visuais em informações táteis

A transcrição de códigos visuais em informações acessíveis ao toque constitui um processo complexo, uma vez que os modos de apreensão do mundo diferem de forma significativa entre pessoas com visão e pessoas com deficiência visual. Diferentemente da visão, cuja capacidade de operar à distância permite uma leitura global, simultânea e imediata do campo perceptivo, o tato configura-se como uma modalidade de contato direto, sustentada por receptores distribuídos ao longo de toda a superfície corporal. Enquanto o sistema visual é projetado para extrair rapidamente a configuração global dos objetos e do espaço, como forma geral, proporção e organização espacial, antes mesmo que a atenção se volte aos detalhes, o tato parte de um campo perceptivo inicial restrito, que precisa ser progressivamente ampliado por meio da ação coordenada de movimentos dos dedos, mãos e braços.

Do ponto de vista perceptivo, a visão opera de maneira essencialmente totalizadora. Estudos clássicos da percepção visual indicam que o observador tende a captar, em um primeiro momento, a configuração global da cena, organizando automaticamente estímulos dispersos

em estruturas coerentes (Gibson, 1979; Goldstein, 2018). Nesse contexto, os princípios da Gestalt — como proximidade, semelhança, continuidade e fechamento — descrevem mecanismos cognitivos que favorecem a percepção do todo antes das partes, permitindo uma compreensão imediata das relações espaciais entre os elementos visuais (Gomes Filho, 2013). Essa característica confere à visão uma eficiência particular na leitura de sistemas gráficos, mapas, diagramas e representações bidimensionais complexas.

Em contraste, a percepção háptica não oferece acesso simultâneo ao conjunto. A informação tátil é adquirida de forma fragmentada, sucessiva e dependente da exploração ativa, exigindo que o indivíduo construa o significado a partir de uma sequência de contatos parciais. Cada gesto exploratório revela apenas uma fração do objeto ou da superfície investigada, que precisa ser mantida temporariamente na memória de trabalho e integrada às informações previamente coletadas para a formação de uma representação coerente (Lederman; Klatzky, 1987, 2009). Trata-se, portanto, de um processo construtivo, no qual percepção e ação se encontram indissociavelmente articuladas.

Nesse sentido, Loomis e Lederman (1986) definem a percepção háptica como um sistema que integra informações cutâneas e proprioceptivo-cinestésicas, permitindo ao indivíduo apreender não apenas propriedades materiais dos objetos, como forma, dimensão, textura e temperatura, mas também pistas perceptivas associadas à dinâmica da exploração. Essas pistas incluem vibrações, resistência, deslocamento e ausência de contato, que quando interpretadas em conjunto, informam propriedades espaciais e texturais do objeto e do ambiente, mesmo quando tais propriedades são inacessíveis ou invisíveis a outros sentidos.

Um exemplo desse processo pode ser observado na exploração tátil de um objeto oco, como uma caixa. Ao deslizar os dedos sobre sua superfície, não se percebe apenas a textura ou a temperatura do material no ponto de contato, mas também é possível perceber pequenas vibrações e variações de resistência que ajudam a perceber se o objeto é maciço ou oco. Da mesma forma, ao pressionar determinadas áreas, a flexão ou a rigidez do objeto fornece indícios sobre sua espessura e estrutura. A ausência momentânea de contato ao contornar suas bordas, identifica onde o objeto começa e termina e se há aberturas ou desníveis. A partir da integração dessas pistas — vibração, resistência, deslocamento e ausência de contato —, constrói-se uma compreensão espacial do objeto como um todo, mesmo sem acesso visual à sua forma interna ou organização estrutural.

A compreensão desse sistema requer, portanto, considerar a articulação entre essas duas dimensões sensoriais complementares. A sensibilidade cutânea fornece informações sobre qualidades externas que incidem diretamente sobre a superfície do corpo, por meio de receptores localizados na pele e integrados ao sistema nervoso. Já a sensibilidade cinestésica informa ao observador a posição e o movimento do corpo, tanto em sua configuração estática quanto dinâmica, a partir da combinação entre sinais aferentes — provenientes dos músculos, das articulações e da própria pele — e a cópia eferente, que corresponde ao registro interno dos comandos motores enviados pelo cérebro (Owem; Brown, 1970). Essa integração permite que o organismo monitore e ajuste continuamente seus movimentos, articulando o que o corpo sente com o que o corpo faz.

Como consequência, a percepção háptica caracteriza-se pela exploração ativa e intencional, na qual são processadas simultaneamente informações relativas ao contato físico com objetos — como peso, rigidez e condutividade térmica — e informações sobre o próprio movimento corporal, como posição, orientação e trajetória das mãos e articulações (Klatzky; Lederman, 1987). Em oposição ao tato passivo, no qual o estímulo incide sobre a pele sem movimento voluntário, a ausência de ação exploratória reduz significativamente o campo perceptivo e limita as discriminações possíveis, ainda que algumas distinções básicas permaneçam viáveis (Gentaz; Hatwell, 2004).

No contexto das PcDVs, a percepção háptica assume papel central na construção do conhecimento espacial e material. A exploração sequencial e controlada amplia o acesso a indícios táteis, possibilitando a formação progressiva de representações mentais do objeto investigado. Esse processo ocorre por fragmentos: uma sucessão de contatos parciais que, ao mobilizar atenção e memória de trabalho, são gradualmente sintetizados em uma percepção coerente (Hatwell, 2003). Ao contrário de representar uma limitação, essa dinâmica constitui um modo próprio de conhecer, no qual tanto as qualidades físicas dos objetos quanto às informações relativas à organização corporal no espaço são apreendidas de forma integrada.

A dimensão cinestésica revela-se, nesse contexto, particularmente relevante. Ao estender a mão, deslocar o braço ou explorar uma superfície, o indivíduo não percebe apenas o objeto, mas também a maneira como seu corpo se organiza e se posiciona no ambiente. Essa informação é decisiva para atividades que envolvem controle motor refinado e orientação espacial, como o deslocamento autônomo em ambientes conhecidos ou desconhecidos, especialmente

no caso de pessoas cegas.

Heller e Gentaz (2014) aprofundam essa compreensão ao questionarem a separação rígida entre tato e percepção háptica. Para os autores, o tato não deve ser entendido como um sentido isolado ou restrito à estimulação cutânea, mas como um sistema perceptivo integrado que envolve contato, propriocepção, movimento e ritmo. Com base nessa definição, pode-se concluir que o tato é capaz de informar forma, tamanho, textura, pressão, vibração, temperatura e, sobretudo, relações espaciais, configurando-se como um sistema perceptivo completo e funcional.

Por fim, a percepção háptica também incorpora dimensões psicofísicas e afetivas, articulando dados objetivos sobre as propriedades materiais a avaliações subjetivas, como sensações de conforto, limpeza ou beleza (Okamoto; Nagano; Yamada, 2013; Lederman; Klatzky, 2009a). O papel decisivo do movimento e da ação exploratória confere à percepção háptica um caráter dinâmico, ativo e construído, consolidando-se como um modo próprio de conhecer, interpretar e interagir com o mundo. Tal compreensão é particularmente relevante para o desenvolvimento de sistemas de informação tátil, uma vez que evidencia que a transcrição de códigos visuais para o tato não consiste em apenas conversão formal, mas em um processo que exige reorganização estrutural da informação, compatível com as estratégias perceptivas e cognitivas próprias da exploração háptica.

2.3. Sistemas de informação táteis: variáveis relativas ao estudo do toque

A compreensão do papel da natureza dos estímulos apresentados, do repertório visual no processo de busca tátil e das condições em que a exploração manual é realizada, são variáveis centrais no estudo do toque. Todas esses fatores contribuem para a compreensão das diferenças e também das semelhanças entre o toque e outras modalidades, como a exploração dos modos de processamento independentes do tato, que permite o intercâmbio de informações entre as modalidades sensoriais.

2.3.1. Estímulos

O sistema tátil utiliza informações sensoriais derivadas de mecanorreceptores, que respondem à pressão ou quaisquer outros estímulos mecânicos, e termorreceptores, que captam estímulos de natureza térmica. Esses receptores sensoriais estão localizados na pele, músculos, tendões e juntas (Lederman; Klatzky, 2009b). Dessa forma, os estímulos táteis percebidos são transmitidos para o córtex somatossensorial primário, onde as áreas do corpo com maior inervação tátil e, conseqüentemente maior sensibilidade e acuidade tátil, estão representadas em grandes porções (Bremner; Spence, 2017), permitindo a obtenção de informações sobre objetos e superfícies (Kahrimanovic; Bergmann; Kappers, 2010).

Pode-se dividir as propriedades dos objetos acessíveis ao tato em duas classes: materiais e geométricas. As propriedades materiais são definidas como aquelas independentes da estrutura do objeto, estão relacionadas a características tecnológicas de sua superfície como temperatura, dureza, textura e rugosidade. Por outro lado, as propriedades geométricas descrevem a estrutura do objeto como forma, tamanho e volume (Kunzler, 2003; Lederman; Klatzky, 2009a; Sathian; Lacey, 2008; Whitaker; Simões-Franklin; Newell, 2008).

2.3.2. Repertório visual

Na pesquisa tátil, pessoas cegas têm se mostrado um grupo especialmente relevante para o estudo da percepção háptica, uma vez que investigações realizadas apenas com indivíduos com visão tendem a subestimar as capacidades táteis. Há evidências de que indivíduos cegos apresentam sensibilidade háptica aumentada, o que tem contribuído para a geração de resultados qualitativamente expressivos nesse campo (Heller; Ballesteros, 2006).

Contudo, a influência do repertório visual sobre a percepção háptica deve ser analisada considerando-se, como mencionado no tópico 2.3.3 (p. 43), dois domínios distintos: a identificação de formas geométricas e a discriminação de texturas materiais (Kunzler, 2003; Lederman; Klatzky, 2009a; Sathian; Lacey, 2008; Whitaker; Simões-Franklin; Newell, 2008).

No caso das formas tridimensionais, diversos estudos apontam que a memória visual pode conferir vantagem cognitiva, especialmente entre pessoas com cegueira adquirida. De acordo com Klatzky (1998), a percepção háptica está associada à exploração ativa do objeto por meio do movimento. Nesse sentido, indivíduos com experiência visual anterior podem utilizar me-

mórias visuais dos movimentos das mãos durante a exploração, o que facilitaria a identificação de propriedades espaciais dos objetos (Heller, 1985). Norman e Bartholomew (2011) reforçam essa hipótese ao constatarem que pessoas com cegueira tardia superaram cegos congênitos na identificação de formas tridimensionais, evidenciando o papel facilitador da experiência visual prévia no reconhecimento formal.

Entretanto, quando se trata da percepção de texturas, os resultados da literatura apontam para um cenário distinto. Estudos comparativos entre cegos congênitos e pessoas com visão, como o de Baumgartner, Wiebel e Gegenfurtner (2015), demonstraram desempenhos semelhantes na categorização e ordenação de materiais por aspereza, sugerindo que a experiência visual não traz benefícios significativos nesse tipo de tarefa. A partir desses resultados, os autores levantam duas hipóteses: que a visão não contribui para a percepção de texturas ou que sua ausência é compensada por uma maior acurácia tátil entre cegos congênitos.

Em relação ao treinamento tátil, Hatwell (2003) e Millar (1994) argumentam que a compensação sensorial resulta menos de um aumento da sensibilidade bruta do tato e mais da adoção de estratégias exploratórias sistemáticas, capazes de extrair do ambiente exatamente os elementos necessários para formar uma representação mental coerente. No caso dos sistemas de informação tátil, estratégias de busca tátil como a cognição de padrões espaciais, movimentos sistemáticos e divisão em áreas (ver tópico 2.3.2, p. 44) podem auxiliar na compreensão de informações presentes em mapas e gráficos táteis.

O aprendizado do braille também pode influenciar no desempenho tátil, como apontam Bhirud e Chandan (2018) em uma pesquisa onde indivíduos cegos congênitos fluentes em braille apresentaram desempenho superior ao dos com visão na discriminação de diferentes granulações de lixas, indicando que o uso frequente e sistemático do tato pode aprimorar a sensibilidade tátil.

Do ponto de vista neurofuncional, a ausência de visão — sobretudo em casos congênitos — desencadeia uma reorganização cortical em que áreas tradicionalmente visuais passam a ser recrutadas para tarefas táteis, auditivas e de processamento simbólico, como apontado por estudos de De Borst e De Gelder (2019). Em pesquisa com indivíduos cegos congênitos, os autores apontam que a percepção tátil e auditiva ativa regiões tradicionalmente visuais, como o córtex V4, evidenciando um processo de reorganização funcional conhecido como plasticidade intermodal. Essa plasticidade amplia a capacidade de PcDVs de extrair informações estruturais por meio do tato e do som, contribuindo para uma percepção espacial que, ainda que fragmentada,

torna-se altamente eficaz quando apoiada por artefatos adequadamente projetados.

Contudo, durante a mesma pesquisa, De Borst e De Gelder (2019) observaram que, no decorrer de tarefas de imagética mental essas mesmas áreas não são ativadas, ao contrário do que se observa em indivíduos com visão. Isso sugere que a experiência visual não é essencial para o desenvolvimento de uma percepção háptica eficaz, embora influencie o tipo de estratégia cognitiva utilizada durante a exploração sensorial — como o uso de imagens mentais em tarefas visuo-espaciais.

Da mesma forma, Karim et al. (2022), ao compararem cegos congênitos, adquiridos e pessoas com visão na discriminação de texturas vibrotáteis artificiais, observaram que todos os grupos foram capazes de realizar a tarefa, mas os cegos congênitos apresentaram maior consistência e precisão nas respostas. As escalas perceptivas formadas foram semelhantes entre os grupos, mas as correlações mais fortes ocorreram entre cegos congênitos e adquiridos, o que também reforça a ideia de que o repertório visual prévio não oferece vantagens significativas na percepção de texturas, e que a privação visual pode, inclusive, favorecer a acurácia perceptiva tátil por meio da intensificação do uso do tato no cotidiano.

Sathian (2005), destaca que a plasticidade neural está vinculada a períodos críticos do desenvolvimento e tende a ser mais pronunciada em casos de privação visual congênita. Esse padrão é confirmado por Jiao et al. (2023) ao demonstrarem, por meio de neuroimagem funcional e estrutural, a reorganização do córtex occipital de adultos cegos congênitos. Essa reorganização estaria associada à percepção tátil refinada, resultante da adaptação funcional de áreas tradicionalmente visuais a tarefas táteis. Os autores reforçam que essa reorganização é dependente da experiência e da utilização constante do tato, permitindo o desenvolvimento de habilidades perceptivas táteis avançadas, mesmo na ausência total de repertório visual.

Assim, enquanto a memória visual pode oferecer suporte na identificação tátil de formas geométricas, principalmente em pessoas com experiência visual prévia, a percepção de texturas revela-se menos dependente da visão. Nesses casos, a ausência de repertório visual não constitui uma limitação, mas sim uma condição que favorece a especialização tátil, mediada tanto por treinamento quanto por reorganização funcional do cérebro.

A compensação sensorial decorrente da perda total ou parcial da visão é importante para o campo do design porque influencia diretamente a forma como PcDVs interagem com artefatos, ambientes e sistemas de informação. Distante de consistir em uma simples intensificação auto-

mática dos demais sentidos, esse processo envolve uma combinação complexa de plasticidade neural, aprendizagem perceptiva e estratégias cognitivas que organizam a experiência de uso. De maneira geral, o mecanismo de compensação evidencia que a experiência perceptiva de Pc-DVs é ativa, exploratória e construída, e não apenas receptiva. Para o design, essa constatação é crucial: a qualidade de um sistema de informação tátil ou recurso assistivo depende da capacidade do artefato de acolher e potencializar essas estratégias compensatórias, e não de exigir habilidades táteis que o próprio usuário não possui ou que ultrapassem sua capacidade cognitiva em contexto real de uso.

2.3.3. Procedimentos exploratórios

Klatzky e Lederman (1987) descreveram a relação sistemática entre a exploração manual e as propriedades dos objetos em uma série de procedimentos exploratórios (PEs), que são padrões estereotipados de exploração manual, observados quando solicitado às pessoas que identifiquem uma propriedade particular ao explorar voluntariamente um objeto sem utilizar a visão (Figura 1).

Figura 1 - Interação das variáveis relativas ao estudo do toque na percepção das propriedades dos objetos.



Fonte: Adaptado pelo autor de Klatzky e Lederman (1987).

Por exemplo, o PE associado à consultas sobre calor ou frieza aparente de uma amostra é o “contato estático”, que envolve colocar a superfície da pele contra um objeto sem movimento. Outros PEs que receberam mais atenção na literatura incluem “pressão” (dureza), “apoio sem suporte” (peso), “envolver” (volume e formato grosseiro), “movimento lateral” (textura) e “contorno da forma” (forma exata) (Klatzky; Lederman, 1987).

Assim, ao empregar o procedimento exploratório (PE) mais adequado a uma determinada propriedade durante a exploração tátil livre, a capacidade do indivíduo em discriminar tal característica melhora significativamente. Por exemplo, ao julgar a temperatura de um objeto metálico, tende-se naturalmente a posicionar a mão em contato estático com a superfície, uma vez que essa ação potencializa a percepção térmica. De modo análogo, para avaliar a textura de um tecido, é comum o movimento lateral dos dedos sobre o material. Esses padrões de exploração são observados tanto em pessoas com visão quanto em pessoas cegas, o que sugere que o sistema cognitivo-háptico humano aprendeu, ao longo da evolução e da experiência, a associar determinados movimentos a percepções táteis mais eficazes (Klatzky; Lederman, 1987).

No contexto de materiais táteis informacionais — como maquetes, relevos e gráficos em alto-relevo, utilizados por pessoas cegas —, orientar o usuário quanto ao uso de procedimentos exploratórios apropriados pode favorecer uma extração mais eficiente das informações. Nesse sentido, por exemplo, instruir um estudante cego a seguir com o dedo o contorno de um desenho, em vez de tocar aleatoriamente sua superfície, pode facilitar a compreensão da forma representada.

2.3.2. Estratégias de busca tátil

Enquanto os procedimentos exploratórios referem-se a padrões de movimento vinculados à percepção de propriedades específicas, as técnicas de busca tátil abrangem estratégias mais amplas de exploração, empregadas para varrer, reconhecer e organizar informações espaciais presentes em um objeto ou representação tátil. Essas técnicas são especialmente relevantes na interação com materiais táteis informacionais – como mapas em relevo, desenhos táteis, diagramas e outros recursos usados por pessoas com deficiência visual para acessar conteúdo visual. A seguir, discutem-se três aspectos importantes da exploração tátil estratégica: a cognição de padrões espaciais, os movimentos sistemáticos de varredura e a divisão da exploração em áreas.

2.3.2.1. Cognição de padrões espaciais

A cognição de padrões espaciais por meio do tato diz respeito à capacidade de formar imagens mentais e compreender relações espaciais (como forma, direção, localização e configuração) a partir da informação tátil fragmentada. Conforme mencionado, a percepção tátil é intrinsecamente sequencial – somente partes do estímulo são captadas de cada vez –, o que exige do indivíduo processos cognitivos para integrar essas partes e reconhecer o padrão global.

Pessoas com deficiência visual desenvolvem habilidades notáveis nesse sentido, construindo mapas cognitivos táteis e entendendo figuras em relevo ou maquetes através da exploração ativa. Há evidências de que, em certas tarefas espaciais, indivíduos cegos podem atingir desempenho semelhante ou superior ao daqueles com visão, valendo-se de estratégias táteis eficazes. Por exemplo, em um estudo de Rovira et al. (2011) sobre reconhecimento de formas geométricas bidimensionais (em relevos simples e compostos), adolescentes cegos superaram seus pares com visão em tarefas de rotação mental de figuras simples. Os participantes cegos tiraram proveito de exploração bimanual e do uso de múltiplos dedos simultaneamente, recolhendo mais informação espacial em menos tempo, enquanto muitos com visão vendados adotaram uma abordagem mais limitada (seguindo o contorno apenas com um dedo da mão dominante).

Outro estudo, de Vinter et al. (2012), analisou os tipos de procedimentos exploratórios empregados por crianças cegas, com baixa visão e com visão vendadas ao examinarem desenhos táteis. Constatou-se que as crianças com deficiência visual utilizavam uma maior variedade de estratégias (por exemplo, seguir contornos dinamicamente com o dedo e varrer superfícies com a palma ou vários dedos) em comparação às com visão, o que sugere um engajamento cognitivo mais amplo na construção da representação do padrão. Estratégias como “pinçar” partes do desenho (segurando bordas com o polegar e outro dedo) ou “enclosure” local (moldar os dedos a porções da figura) foram observadas nos participantes cegos para extrair detalhes locais, combinadas com movimentos amplos para apreender a forma global.

Esses achados indicam que a cognição espacial tátil envolve tanto visão do todo quanto atenção aos detalhes, através de múltiplas operações mentais e motoras. Em suma, para reconhecer padrões espaciais (como figuras geométricas, gráficos ou mapas) pelo tato, a pessoa cega mobiliza habilidades de integração espacial, memória e até inferências com base em experiência prévia (tátil e, se houver, visual). Salientar características-chave – como contornos principais, mudanças de textura que delimitam regiões, ou pontos de referência em um mapa tátil – pode

auxiliar na formação mais rápida de um modelo mental do padrão explorado.

De fato, quando PCDVs concentram a exploração nas áreas mais relevantes de um gráfico em relevo (por exemplo, linhas ou símbolos salientes), tendem a compreender a informação de maneira mais eficiente do que aqueles que tentam examinar todos os pontos indiscriminadamente. Em conclusão, a cognição de padrões espaciais pelo tato é um processo ativo e construído passo a passo, que pode ser otimizado por meio de estratégias e pela experiência do explorador em extrair significado de informações táteis.

2.3.2.2. Movimentos sistemáticos

A exploração sistemática consiste em aplicar movimentos ordenados e consistentes ao percorrer um material tátil, de modo a cobrir toda a extensão relevante sem omissões ou redundâncias. Para um indivíduo cego diante de um diagrama tátil complexo (como um mapa ou gráfico, por exemplo), explorar de forma aleatória pode resultar em partes importantes não sendo percebidas ou na dificuldade de relacionar os elementos que compõem a informação. Por isso, recomenda-se adotar padrões de varredura estruturados.

Um padrão comum é o escaneamento sequencial em linhas – similar à leitura de um texto –, no qual a pessoa passa os dedos da esquerda para a direita ao longo de uma faixa, depois desloca a mão para a faixa abaixo e repete o movimento, cobrindo toda a superfície do material. Essa técnica de “varredura horizontal seguida de varredura vertical” foi observada por Tekli et al. (2018) em usuários cegos explorando formas simples em telas táteis com vibração: muitos participantes navegaram o dedo primeiro lateralmente por toda a largura da figura e, em seguida, moviam-no para baixo e repetiam o percurso lateral, sistematicamente, até varrer toda a área da imagem.

Movimentos sistemáticos também podem assumir a forma de um zigue-zague contínuo, cobrindo progressivamente a superfície, ou de um movimento circular expansivo (começando no centro e aumentando o raio) no caso de busca de um ponto específico. O elemento chave é a padronização do percurso, que auxilia na memorização do que já foi examinado e do que ainda falta examinar.

Outra abordagem sistemática envolve a exploração ordenada de elementos estruturais da imagem tátil. Por exemplo, em um gráfico de linhas cruzando-se, após detectar uma linha,

alguns participantes preferem segui-la até encontrar a interseção e então circular em torno do ponto de cruzamento para determinar a orientação relativa das linhas . Esse procedimento, relatado por Tennison e Gorlewicz (2019) em estudo sobre gráficos táteis virtuais, demonstra uma estratégia sistemática focada: primeiro, identificar um componente (a linha), depois explorar metodicamente ao redor de uma característica saliente (a interseção) para compreender a estrutura global .

De modo geral, movimentos sistemáticos aumentam a eficácia da busca tátil, pois garantem cobertura completa e reduzem a chance de informações passarem despercebidas. Para educadores e designers de materiais táteis, é útil incentivar usuários cegos a adotarem essas estratégias – por exemplo, utilizando pistas táteis (como linhas-guia ou margens em relevo) que fomentem a exploração ordenada de cima para baixo e da esquerda para a direita, facilitando a varredura lógica do conteúdo.

2.3.2.3. Divisão em áreas

A divisão em áreas é uma técnica complementar à exploração sistemática, na qual o explorador segmenta mentalmente o material tátil em partes ou regiões para examiná-las em separado e depois integrá-las. Diante de um desenho tátil complexo, por exemplo, pode-se dividir a figura em quadrantes ou seções (superior/inferior, esquerda/direita) e focar em uma seção de cada vez. Essa abordagem reduz a carga cognitiva, pois o indivíduo concentra-se em pequenos conjuntos de informação sequencialmente, em vez de tentar apreender todos os detalhes de uma só vez.

Estudos sobre exploração háptica sugerem que essa estratégia está implícita em certos comportamentos observados. Tekli et al. (2018) notaram que alguns participantes cegos, ao explorar imagens táteis em tablet com feedback vibratório, seguiam um padrão semelhante à leitura em colunas e linhas – o que essencialmente corresponde a percorrer áreas delimitadas do estímulo de forma ordenada. De forma análoga, no caso dos mapas táteis, é comum orientar o usuário a primeiro encontrar pontos de referência (como o norte ou um ponto central), depois explorar regiões específicas (quadrantes noroeste, nordeste etc.), garantindo que toda a informação geográfica seja coberta de maneira sistemática.

A divisão em áreas também se manifesta quando o explorador alterna entre visão global e visão local de um objeto tátil. Por exemplo, ao ler um diagrama em relevo, um aluno cego pode

primeiramente percorrer todo o contorno externo para ter uma ideia do tamanho e forma geral (dividindo conceitualmente a tarefa em “obter o contorno”), em seguida subdividir o interior em regiões menores e examinar cada uma detalhadamente (área por área), talvez utilizando os dois dedos indicadores simultaneamente em partes diferentes do material. Esse método de “explorar em blocos” permite que as informações de cada bloco sejam mentalmente armazenadas e depois combinadas para formar um entendimento completo do todo.

Vale destacar que indivíduos com experiência em leitura tátil frequentemente aplicam intuitivamente essa técnica de segmentação. Bardot et al. (2017) observaram que participantes com deficiência visual, ao analisar gráficos em relevo, tendiam a focar rapidamente nas áreas mais relevantes do gráfico (por exemplo, regiões com barras ou picos, no caso de gráficos de barras ou linhas) em vez de explorar ponto por ponto uniformemente. Ou seja, eles subdividiam o gráfico em “áreas de interesse” e priorizavam aquelas de maior significado informacional, o que tornava a exploração mais eficiente.

Em conclusão, dividir um material tátil em áreas lógicas – seja para cobrir sistematicamente cada seção, seja para priorizar regiões de interesse – é uma técnica que melhora a organização da busca tátil e a compreensão final das informações pelo usuário cego. Quando combinada a movimentos sistemáticos e a uma boa cognição espacial, a divisão em áreas contribui para uma exploração tátil mais produtiva e confiante em materiais educacionais e de orientação para deficientes visuais.

IMPRESSÃO 3D POR *FUSED FILAMENT FABRICATION* (FFF) NO DESIGN DE PRODUTOS TÁTEIS

A manufatura aditiva (AM - *Additive Manufacturing*), popularmente conhecida como impressão 3D (*3D printing* - 3DP), revolucionou a produção de objetos físicos ao permitir a construção de peças tridimensionais camada por camada a partir de um modelo digital (Volpato & Carvalho, 2017). Desde sua concepção na década de 1980, essa tecnologia evoluiu significativamente, abrangendo diversos setores, como a indústria automobilística, aeroespacial, biomédica e educacional. Esta seção abordará os principais tipos de impressão 3D, destacando suas características, vantagens e desafios, com ênfase no processo de *Fused Filament Fabrication* (FFF).

3.1. Manufatura aditiva e impressão 3D: definição dos conceitos

Historicamente, os processos modernos de manufatura aditiva passaram por diversas fases em relação à sua aplicação, o que resultou em mudanças terminológicas. Em um primeiro momento, essa tecnologia foi amplamente utilizada na prototipagem rápida (*Rapid Prototyping* – RP), termo empregado em diversas indústrias para descrever um processo de criação acelerada de peças antes da produção final ou comercialização, sem exigências rigorosas quanto à resistência ou precisão dimensional (Gibson et al., 2021).

Posteriormente, os processos aditivos passaram a ser aplicados na fabricação de ferramentas e moldes em polímeros, cerâmica ou metais (*Rapid Tooling* – RT), nos quais o princípio de construção em camadas permite reduzir significativamente o tempo de produção das partes mais complexas desses componentes. Com o avanço dos materiais utilizados, tornou-se viável

a produção direta de pequenas séries ou de produtos finais individualizados (*Rapid Manufacturing* – RM), sem a necessidade de ferramentas adicionais, o que, em muitos casos, configurou-se como a única solução viável para produções unitárias ou de baixa escala (Gibson et al., 2021).

Assim, as melhorias nos equipamentos implicaram o aprimoramento da qualidade dos produtos obtidos, os quais passaram a se aproximar significativamente das versões finais, tornando inadequada sua classificação como “protótipos”. Adicionalmente, embora o termo “rápido” se referisse ao tempo decorrido entre a modelagem geométrica tridimensional e a materialização (impressão) do componente, o processo de construção é, na prática, relativamente lento quando comparado aos métodos tradicionais de fabricação. Dessa forma, a nomenclatura inicial não refletia adequadamente os princípios da manufatura aditiva (Neri Volpato, 2024).

Diante desse contexto, em 2009 foi instituído um comitê técnico no âmbito da *American Society for Testing and Materials International* (ASTM F42), com o objetivo inicial de padronizar a terminologia empregada nesses processos. A partir de então, estabeleceu-se o termo manufatura aditiva (*Additive Manufacturing* – AM) como designação mais abrangente. Assim, manufatura aditiva passou a referir-se a um processo de união de materiais para fabricação de objetos diretamente a partir de modelos tridimensionais computacionais (*Computer-Aided Design* – CAD), geralmente construídos camada por camada, em que cada uma representa uma fina seção transversal da peça, derivada dos dados originais do modelo. No mundo físico, cada camada possui espessura finita, de modo que a peça final é uma aproximação do modelo digital. Quanto mais finas forem as camadas, maior será a fidelidade da peça em relação ao modelo original (Gibson et al., 2015; Sachs et al., 1992).

Apesar da padronização formal, popularmente as técnicas de AM são amplamente conhecidas pelo termo “impressão 3D”, cuja origem remonta à tecnologia de jato de tinta desenvolvida pela Teletype Corporation na década de 1960, base do equipamento Inktronic Teleprinter (1965), capaz de imprimir até 120 caracteres por segundo, e que abriu caminho para a impressão de mesa no ambiente doméstico. Tal tecnologia baseava-se na emissão controlada de gotas de tinta a partir de um bocal, operado por componentes eletrônicos.

Em 1971, Johannes F. Gottwald, funcionário da Teletype, registrou a patente de um dispositivo experimental denominado *Liquid Metal Recorder*, o qual utilizava o mesmo princípio do jato de tinta para produzir objetos metálicos liquefeitos, solidificados em formas determinadas pelo movimento do jato em cada nova camada. Esse dispositivo foi um dos vários projetos

que emergiram entre as décadas de 1950 e 1970 e que forneceram a base para a evolução das tecnologias modernas de manufatura aditiva (Autodesk, 2024).

Outro fator que contribuiu para a consolidação do termo “impressão 3D” como rótulo genérico foi a patente registrada, em 1992, por pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) para um processo específico denominado 3DP (*3D Printing*). Esse processo foi posteriormente licenciado para diversos fabricantes, o que favoreceu a ampla disseminação do termo, reforçando a associação popular entre as tecnologias de manufatura aditiva e os processos tradicionais de impressão bidimensional. Em razão dessa origem técnica e conceitual compartilhada, o termo “impressão 3D” permanece amplamente adotado na atualidade para designar um amplo espectro de tecnologias baseadas na fabricação camada por camada de objetos físicos tridimensionais (Kennedy, [s.d.]).

3.2. Panorama histórico sobre as tecnologias de impressão 3D

Embora tenha ganhado grande popularidade apenas nas últimas décadas, suas origens remontam aos anos 1980. Desde então, a tecnologia evoluiu de protótipos experimentais para uma variedade de processos maduros, abrangendo materiais que vão de polímeros a metais e até células biológicas. Este texto apresenta um panorama histórico-técnico da evolução da manufatura aditiva, desde as primeiras inovações em estereolitografia (SLA) até a diversificação atual em processos como sinterização seletiva a laser (SLS) e *Fusion Deposition Modeling* (FDM), destacando os principais desenvolvedores, patentes pioneiras e como essas tecnologias se tornaram mais acessíveis ao longo do tempo.

O desenvolvimento da manufatura aditiva (AM) remonta a dispositivos experimentais patenteados entre as décadas de 1950 e 1970, como o *Liquid Metal Recorder*. Contudo, foi somente com o avanço das tecnologias complementares — especialmente computadores, sistemas de controle e fontes de energia como lasers — a partir do início da década de 1980, que se tornou possível impulsionar significativamente a construção de equipamentos voltados à AM (Autodesk, 2025).

O ano de 1984 representou um marco fundamental com o registro de múltiplas patentes relacionadas à produção tridimensional por deposição seletiva de material em camadas. Nesse período, inventores no Japão, França e Estados Unidos reivindicaram métodos distintos de fabricação aditiva. Dentre essas iniciativas, a patente de Charles Hull, registrada em agosto da-

quele ano, foi particularmente influente, pois deu origem à empresa 3D Systems e ao primeiro aparelho comercial de estereolitografia (SLA), consolidando um modelo técnico e empresarial de grande repercussão (Gibson et al., 2021; (Kennedy, [s.d.])).

Nos anos subsequentes, outras tecnologias foram patenteadas, ampliando o repertório da AM. Em 1986 surgiram processos como o *Laminated Object Manufacturing* (LOM), o *Solid Ground Curing* (SGC) e a sinterização seletiva a laser (SLS), desenvolvidos por empresas como Helisys, Cubital e DTM, respectivamente. Dentre essas, apenas a DTM obteve consolidação de mercado, tendo sido posteriormente incorporada pela 3D Systems em 2001. No ano de 1989, Scott Crump registrou a patente do processo *Fused Deposition Modeling* (FDM), estabelecendo a Stratasys como principal referência no segmento. No mesmo ano, um grupo do MIT patenteou o processo denominado impressão 3D (3DP), que, ao ser licenciado para diversos fabricantes, deu origem a variantes como a ZCorp, voltada à produção de equipamentos de baixo custo (Gibson, 2021).

Outras soluções surgiram na década de 1990 e início dos anos 2000, com destaque para a técnica de jato de tinta empregada pela Sanders (1994) e, posteriormente, pela Objet (2001), esta última responsável por imprimir resinas fotossensíveis em forma de gotículas.

Um fator decisivo para a popularização recente da AM foi a expiração de patentes fundamentais a partir da década de 2010, em especial as relacionadas ao FDM. Isso favoreceu o surgimento de novos fornecedores e a democratização de sistemas baseados em extrusão de termoplásticos. Com a liberação de patentes em outras tecnologias, como SLA, SLS e LOM, há tendência de expansão ainda mais significativa do setor, com diversificação de aplicações e equipamentos (Gibson, 2021).

Até meados dos anos 2000, as impressoras 3D eram restritas a ambientes industriais, em razão de seu custo elevado. Contudo, com a expiração de patentes, surgiram impressoras acessíveis como a *RepRap*, baseada em código aberto, cujo projeto previa a replicação de suas próprias partes. Essa perspectiva descentralizada e colaborativa estimulou um ecossistema de inovação que possibilitou a entrada de impressoras FDM e SLA no mercado de consumo, favorecendo a disseminação da impressão 3D como recurso técnico e pedagógico em contextos variados (Kennedy, [s.d.])).

O percurso histórico da manufatura aditiva evidencia um processo de consolidação tecnológica impulsionado tanto pela inovação quanto pela abertura do conhecimento técnico ao domínio público, com destaque para o FDM como a técnica mais difundida e acessível. Esse contexto viabilizou o uso crescente da impressão 3D não apenas na prototipagem industrial, mas também em

iniciativas voltadas à acessibilidade, especialmente na criação de recursos informacionais táteis. Nesse sentido, o tópico seguinte abordará como a técnica de *Fused Filament Fabrication* (FFF) vem sendo empregada na produção de sistemas de informação inclusivos para pessoas com deficiência visual, destacando estratégias de design, seleção de materiais e metodologias participativas.

3.3. Fused Filament Fabrication (FFF)

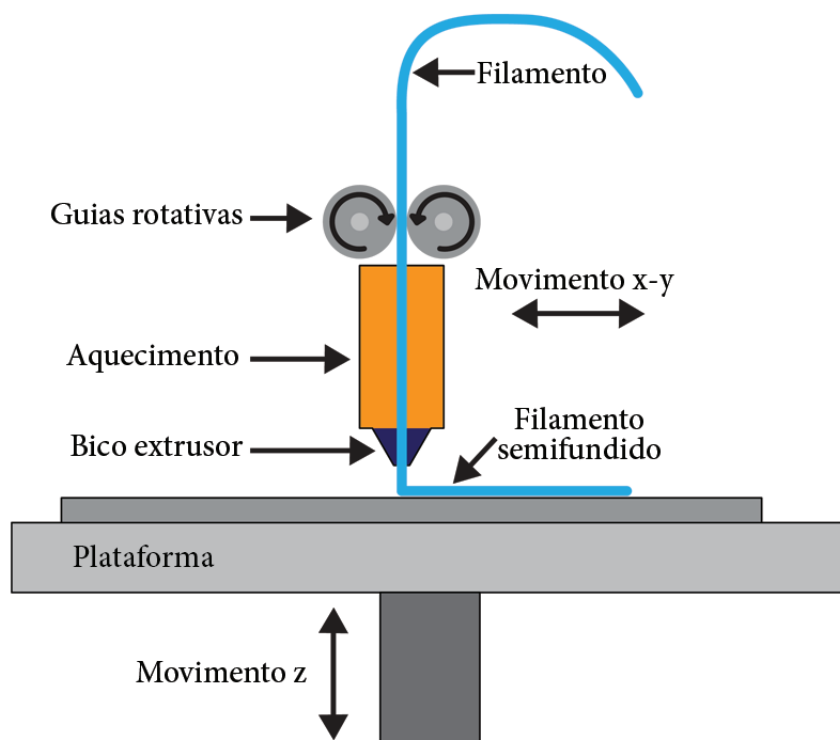
A manufatura aditiva tem revolucionado a produção de dispositivos acessíveis, especialmente devido à sua capacidade de personalização e ao baixo custo operacional. Entre as tecnologias de impressão 3D disponíveis, destaca-se a *Fused Filament Fabrication* (FFF), também conhecida como *Fused Deposition Modeling* (FDM). A modelagem por deposição fundida é atualmente a tecnologia de extrusão de materiais mais amplamente utilizada no contexto da impressão 3D, motivo pelo qual muitos consideram a extrusão sinônima de FDM. No entanto, é importante observar que o termo FDM foi criado e registrado por Scott Crump, inventor e cofundador da empresa Stratasys, sendo, portanto, uma marca comercial de uso exclusivo dessa companhia (Dave; Patel, 2021).

Em resposta a essa restrição legal, pesquisadores da Universidade de Bath introduziram, em 2005, o termo Fabricação por Filamento Fundido (FFF) como uma alternativa de uso livre, voltada à promoção de sistemas de impressão 3D de código aberto e baixo custo, que culminou na criação do Projeto RepRap. Desde então, o termo FFF tem sido amplamente adotado por membros da comunidade maker e por pesquisadores da área como sinônimo funcional de FDM, especialmente em contextos acadêmicos ou colaborativos que visam evitar conflitos relacionados à propriedade intelectual (Dave; Patel, 2021).

3.3.1. Princípio de funcionamento do método de impressão 3D por FFF

Este método consiste na extrusão de um filamento termoplástico aquecido por um bico extrusor, depositado camada por camada até formar o objeto final (Figura 2). Sua ampla acessibilidade o torna uma das técnicas mais utilizadas em contextos educacionais, laboratórios de baixo custo e projetos de acessibilidade (Puerta et al., 2024).

Figura 2 - Esquema básico do funcionamento de impressoras FFF.



Fonte: Adaptado pelo autor de Lira (2021).

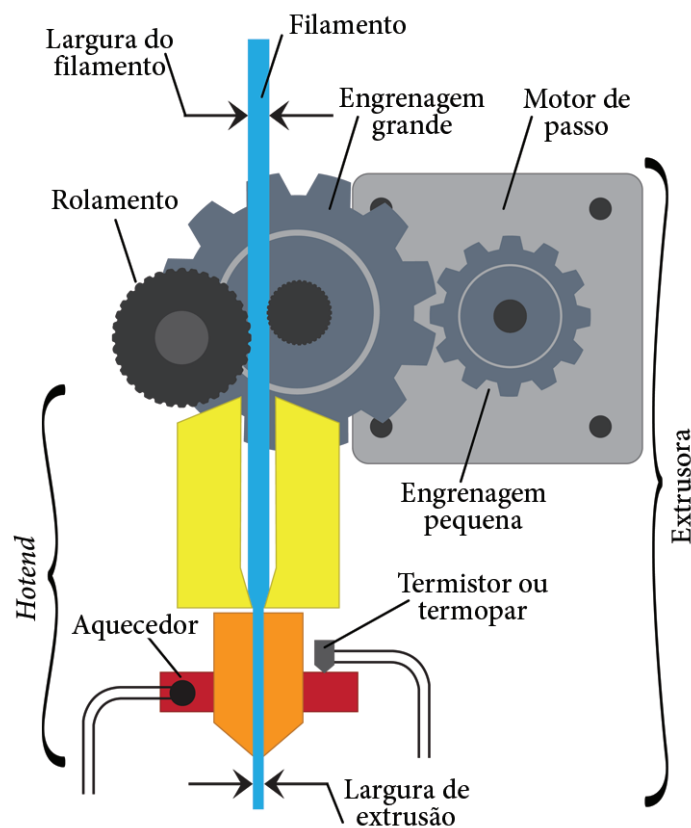
A forma mais comum de alimentação do cabeçote de impressão no processo por FFF consiste no uso de um filamento termoplástico contínuo, geralmente de maior diâmetro, que é empurrado por um conjunto de roletes até o interior do cabeçote. Ao ingressar na câmara de aquecimento, e antes de se fundir completamente, o filamento atua como um êmbolo, exercendo pressão sobre o material já aquecido à frente, o que resulta em sua extrusão controlada por meio do bico calibrado (Volpato, 2017).

Um aspecto essencial desse processo é a solidificação imediata do material extrudado após sua deposição. Para garantir a qualidade estrutural da peça, o material deve aderir rapidamente à camada anterior ou à plataforma de construção, no caso da primeira camada, e ao mesmo tempo manter-se plástico o suficiente para favorecer uma boa fusão entre as camadas seguintes. Essa condição de equilíbrio térmico é crucial para assegurar a resistência mecânica e a integridade da peça como um todo (Volpato, 2017).

Entre os principais componentes de uma impressora por FFF, o cabeçote de impressão pode ser dividido em duas partes: a extrusora e o *hotend*. A extrusora tem a função de puxar o filamento termoplástico ainda frio para o *hotend*, que é responsável pelo aquecimento e a fusão do

insumo, permitindo sua extrusão controlada por meio de um bico direcionador, sendo depositado camada a camada sobre a mesa de impressão. Estruturalmente, a extrusora é composta por um conjunto de engrenagens e um motor de passo. Em geral, o *hotend* é composto por um bloco de aquecimento, um bico de extrusão, um sensor térmico (termistor ou termopar) para monitoramento da temperatura, além de um dissipador de calor, que contribui para a estabilidade térmica do sistema (Froch, 2021) (Figura 3).

Figura 3 - Esquema da estrutura do *hotend* de impressoras FFF.



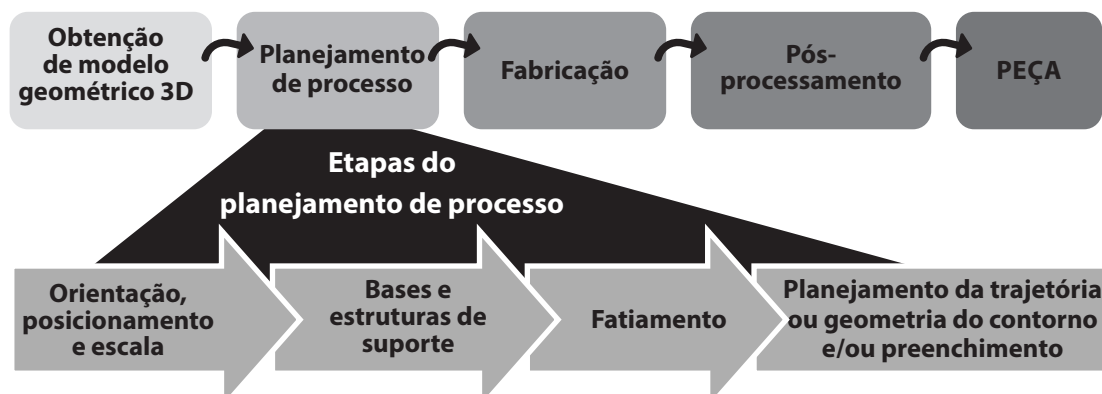
Fonte: Autor (2025)

3.3.2. Etapas do processo de impressão 3D por (FFF)

O processo de impressão 3D por FFF é composto por um conjunto de etapas interdependentes, e sua compreensão é fundamental para o controle da qualidade dimensional, superficial e funcional dos artefatos produzidos, bem como para a adequação do processo às exigências específicas de cada aplicação. De modo geral, o fluxo do processo pode ser organizado em quatro

grandes fases: obtenção do modelo geométrico; planejamento do processo; impressão da peça; e pós-processamento (Volpato, 2017) (Figura 4).

Figura 4 - Etapas do processo de impressão por FFF.



Fonte: Adaptado pelo autor de Volpato (2017).

3.3.2.1. Obtenção do modelo geométrico 3D

A obtenção do modelo geométrico constitui a etapa inicial do processo e pode ocorrer por meio do download de um modelo 3D em um repositório digital, da digitalização por escaneamento 3D de um objeto já existente e da modelagem tridimensional em softwares CAD. Nessa fase, decisões projetuais relacionadas à geometria, tolerâncias, resolução de detalhes e organização volumétrica impactam diretamente as etapas subsequentes do processo de fabricação (Volpato, 2017).

O download de modelos tridimensionais a partir de repositórios digitais, que oferecem arquivos prontos ou adaptáveis, é uma possibilidade amplamente difundida, pois favorecem a rápida prototipagem e a disseminação de soluções open source, especialmente em contextos educacionais e de acessibilidade. No caso do uso de repositórios digitais, Slocumb (2025) e Frosh (2021) apontam alguns em destaque para uso, apresentadas no quadro 1, a seguir:

Quadro 1 - Principais bibliotecas digitais para modelos 3D.

Website	URL	Descrição	Disponibilidade
Printables	https://www.printables.com/	Repositório da Prusa Research. Concentra-se em projetos de peças práticas.	Gratuito
Thingiverse	https://www.thingiverse.com/	Repositório da UltiMaker (criador do Cura). Concentra-se em brinquedos e diversos itens de consumo.	Gratuito
Thangs	https://www.thangs.com/	Repositório em parceria com Shapeways com foco em brinquedos e itens decorativos.	Gratuito
STL Flix	https://www.stlflix.com/	Repositório para modelos de impressão premium.	Com subscrição
MakerWorld	https://www.makerworld.com/	Repositório da BambuLabs com foco em conteúdo aplicável às impressoras Bambu.	Gratuito

Fonte: Adaptado pelo autor de Slocumb (2025).

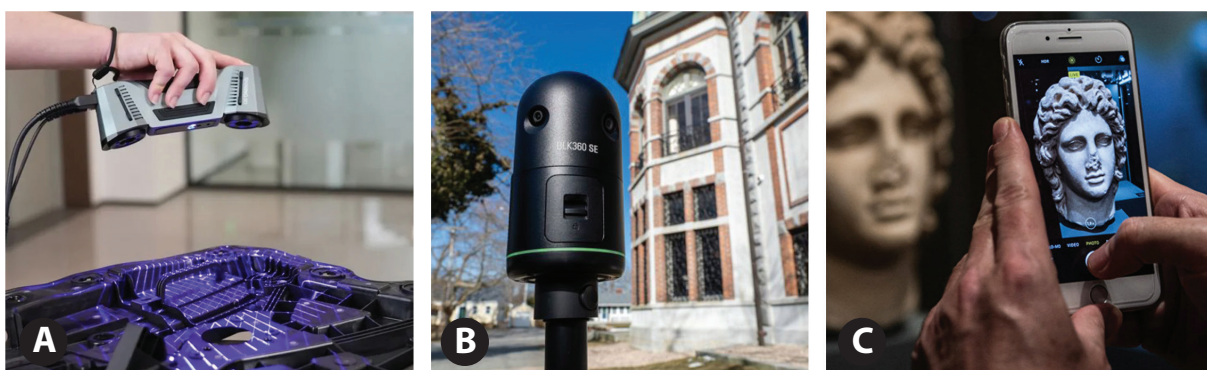
Outra alternativa para a obtenção do modelo geométrico consiste na digitalização de objetos físicos por meio de técnicas de escaneamento 3D, que possibilitam a captura da forma e das dimensões de artefatos já existentes a partir da coleta de dados espaciais de sua superfície. Esse processo pode empregar diferentes tecnologias, como scanners a laser, luz estruturada ou fotogrametria, resultando em uma malha tridimensional que representa com fidelidade a geometria original do objeto. A digitalização por scanners a laser funciona a partir da projeção de uma linha ou faixa de luz laser sobre a superfície de um objeto físico. Essa luz refletida é capturada por uma câmera, que registra como o traço luminoso se deforma ao acompanhar os relevos e contornos do objeto. A partir dessa deformação, o sistema calcula a forma da superfície e constrói um modelo digital tridimensional. Por esse motivo, oferecem elevada precisão dimensional e são especialmente adequados para registrar bordas, relevos e detalhes geométricos (Figura 5A). No entanto, esse tipo de escaneamento pode apresentar limitações em superfícies muito brilhantes, transparentes ou altamente reflexivas, que dificultam a leitura correta do retorno do

feixe de laser (Nappi; Ricciardi; Tistarelli, 2017).

Na digitalização por luz estruturada, o equipamento projeta um conjunto de padrões luminosos — como linhas ou pontos — sobre a superfície do objeto (Figura 5B). À medida que esses padrões se adaptam aos relevos e irregularidades da forma, câmeras registram suas deformações e, a partir delas, o sistema reconstrói o modelo tridimensional. Essa técnica permite captar com precisão detalhes finos da superfície, como texturas e grafismos, sendo especialmente adequada para objetos pequenos ou com relevos delicados. No entanto, seu funcionamento exige controle da iluminação do ambiente, pois a luz externa excessiva pode comprometer a qualidade da digitalização (Szymon et al., 2007).

A fotogrametria é uma técnica que cria modelos tridimensionais a partir de um conjunto de fotografias comuns, feitas de diferentes ângulos ao redor de um objeto. O sistema identifica pontos semelhantes entre as imagens e utiliza essas informações para reconstruir a forma em três dimensões (Figura 5C). Por ser baseada apenas em fotografias, trata-se de uma alternativa de baixo custo e fácil acesso. No entanto, a precisão do modelo gerado costuma ser inferior à de outras técnicas de escaneamento, exigindo etapas adicionais de correção e ajustes antes do uso em processos de impressão 3D (Vizioli et al., 2020).

Figura 5 - Técnicas de escaneamento 3D.



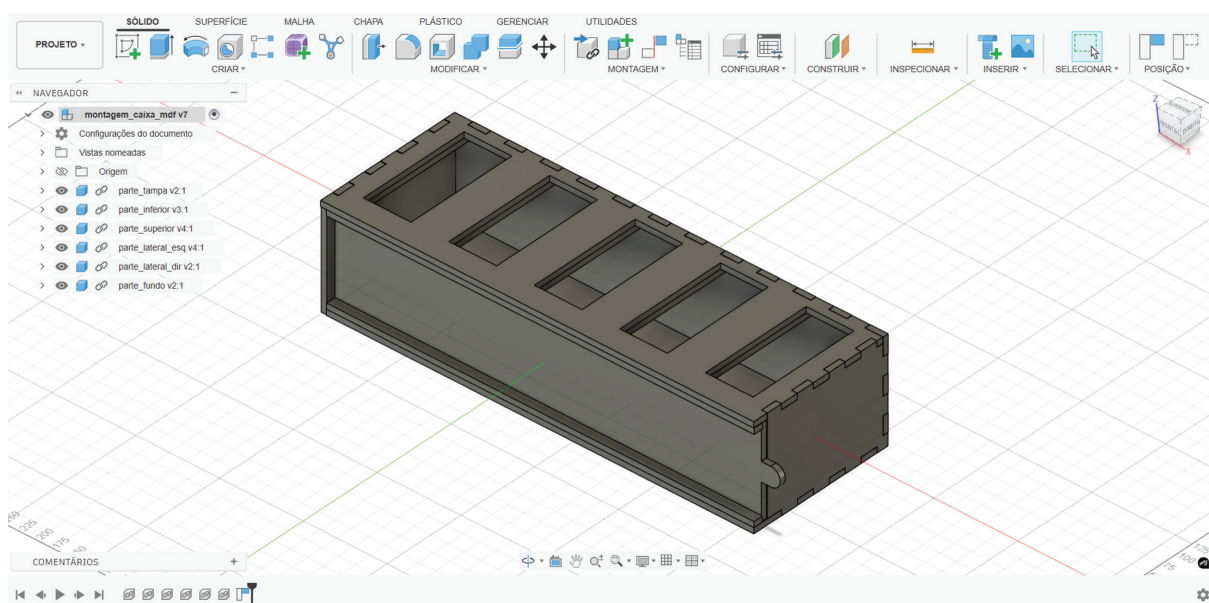
Fonte: Szymon et al. (2007)

O escaneamento 3D mostra-se particularmente útil em situações nas quais se busca a reprodução de peças físicas, a adaptação de artefatos previamente consolidados ou a análise de formas complexas de difícil modelagem manual em softwares CAD (*Computer-Aided Design*, ou Projeto Assistido por Computador). No entanto, os modelos obtidos por escaneamento fre-

quentemente demandam etapas adicionais de tratamento, como correção de ruídos, fechamento de superfícies e simplificação da malha, para garantir sua compatibilidade com o processo de fatiamento e impressão por FFF (Lira, 2021).

Por fim, a modelagem tridimensional em softwares de CAD possibilita maior controle dimensional para reprodução de detalhes geométricos, configurando-se como a abordagem mais adequada para o desenvolvimento de sistemas de informação tátil para PcDVs. Esses softwares são baseados em dimensões, relações geométricas e parâmetros numéricos que permitem alterar medidas sem refazer o modelo do zero (Figura 6).

Figura 6 - Interface de software CAD.



Fonte: Autor (2025)

Em comparação com a maioria das tecnologias tradicionais de fabricação, a manufatura aditiva apresenta um conjunto significativamente menor de restrições produtivas, o que amplia a liberdade projetual e favorece abordagens de design orientadas à otimização funcional e material (Wiberg; Persson; Ölvander, 2019). Diferentemente dos processos subtrativos, nos quais a eficiência está associada à remoção mínima de material para reduzir o tempo de usinagem, na manufatura aditiva a lógica se inverte: o projeto deve buscar a construção da peça com a menor quantidade possível de material, de modo a reduzir o volume processado pela fonte de energia e, conseqüentemente, o tempo e o custo de fabricação (Diegel et al., 2020). Nesse sentido, a liber-

dade formal característica da manufatura aditiva não implica ausência de critérios projetuais, mas exige decisões relacionadas à geometria, orientação, espessura e distribuição de material, que garantam não apenas a viabilidade do processo, mas também a qualidade e o desempenho do produto final.

3.3.2.2. Planejamento de processo

A etapa de planejamento do processo envolve a preparação do modelo geométrico para a impressão em um software fatiador, sendo considerada uma das fases mais críticas do FFF. Entre as decisões centrais estão a orientação, o posicionamento e a escala do modelo na mesa de impressão. A orientação influencia diretamente a resistência mecânica, a qualidade superficial, a visibilidade das camadas e a necessidade de estruturas de suporte. O posicionamento e a escala, por sua vez, afetam a aderência à mesa, o tempo de impressão e o aproveitamento do volume útil do equipamento (Boschetto; Bottini, 2014).

Segundo Volpato (2017), a escolha da orientação deve equilibrar resistência, qualidade da textura e tempo de impressão:

- Posição horizontal: Superfícies superiores tendem a ser mais lisas, enquanto superfícies laterais podem apresentar irregularidades perceptíveis devido ao efeito das camadas.
- Posição vertical: Pode resultar em detalhes mais nítidos, mas aumenta a fragilidade estrutural devido à menor adesão entre camadas.

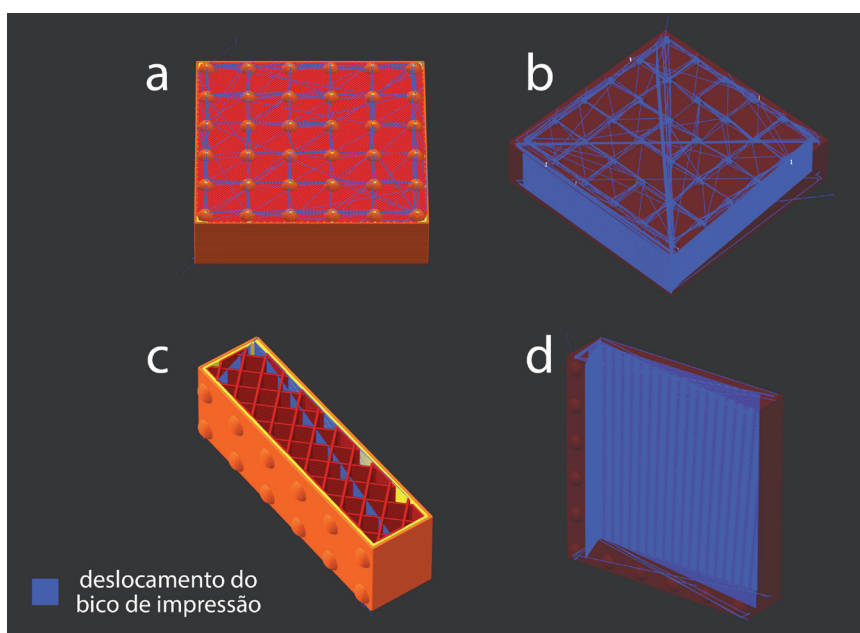
Em relação aos aspectos de qualidade, um ponto importante a ser considerado no posicionamento da peça na mesa de impressão diz respeito ao deslocamento do bico impressor durante o processo. Com filamentos de alta viscosidade e valores de retração próximos à zero, como no caso do TPU, o material continua a ser extrudado durante o deslocamento, o que acaba por provocar interferências significativas em peças com detalhes finos, como as texturas utilizadas em sistemas de informação inclusivos.

No contexto do projeto de produtos táteis para pessoas com deficiência visual, a orientação da peça na mesa de impressão assume papel ainda mais crítico, pois impacta diretamente a legibilidade, o conforto e a segurança durante a exploração háptica. Puerta et al. (2024) demonstram que, em peças impressas por FFF, a orientação influencia de maneira significativa a qualidade superficial e a formação de defeitos decorrentes do início e do término do percurso

do bico extrusor, como rebarbas, irregularidades e acúmulos localizados de material. No caso específico de textos e padrões táteis, como o braille e relevos informacionais, a impressão com orientação próxima à vertical tende a ocultar esses pontos de início e fim das camadas, reduzindo a aspereza percebida pelos dedos e resultando em superfícies mais contínuas e confortáveis à leitura tátil. Em contraste, orientações horizontais concentram esses defeitos nas áreas diretamente exploradas pelos usuários, o que pode gerar sensação de aspereza excessiva, interferir na discriminação dos elementos táteis e causar desconforto durante o uso prolongado.

Na figura 7 é possível observar que essa alteração causada pelo deslocamento do bico fica concentrada justamente na parte superior das peças – quando impressa horizontalmente (figura 7a e 7b), onde ficam as texturas projetadas prejudicando o resultado final; enquanto que quando posicionadas verticalmente sob a mesa de impressão (figura 7c e 7d) essas mesmas interferências ficam concentradas no preenchimento das peças, o que proporciona um melhor resultado dimensional.

Figura 7 - Comparação entre as interferências ocasionadas pelo deslocamento do bico impressor em peças posicionadas horizontal e verticalmente na mesa de impressão.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados apresentados por Puerta et al. (2024) reforçam que decisões tomadas na etapa de planejamento do processo, particularmente a orientação da peça na mesa de impressão, têm

implicações diretas sobre a usabilidade de sistemas de informação tátil produzidos por FFF. Ao demonstrar que textos em braille impressos em orientações próximas à vertical — especialmente em ângulos de 75° e 90° — foram lidos mais rapidamente e percebidos como mais confortáveis pelos participantes, o estudo evidencia que a redução de defeitos superficiais associados ao início e ao término do percurso do bico extrusor contribui para superfícies táteis mais contínuas e menos agressivas ao toque. No contexto do projeto de artefatos para pessoas com deficiência visual, esses achados indicam que a orientação vertical não apenas melhora a qualidade dimensional e superficial das texturas informacionais, mas também atua como um fator de segurança e conforto durante a exploração háptica prolongada. Assim, a orientação da peça deixa de ser uma decisão meramente técnica e passa a integrar o conjunto de estratégias projetuais que impactam diretamente a legibilidade, o desempenho e a experiência de uso de sistemas de informação tátil voltados a PcDVs.

A orientação impacta, também, na necessidade do uso de estruturas de suporte, essenciais para garantir a estabilidade da peça durante a deposição do material e viabilizar a impressão de geometrias com balanços, cavidades ou descontinuidades (Figura 8).

Figura 8 - Orientação de peças com balanços, cavidades ou descontinuidades e o uso de estruturas de suporte.



Fonte: Autor (2025)

A escolha adequada do tipo de suporte, de sua densidade e de sua interface com a peça é determinante para minimizar defeitos superficiais e reduzir o esforço de pós-processamento, sobretudo em aplicações que demandam precisão geométrica e qualidade tátil (Slocumb, 2025).

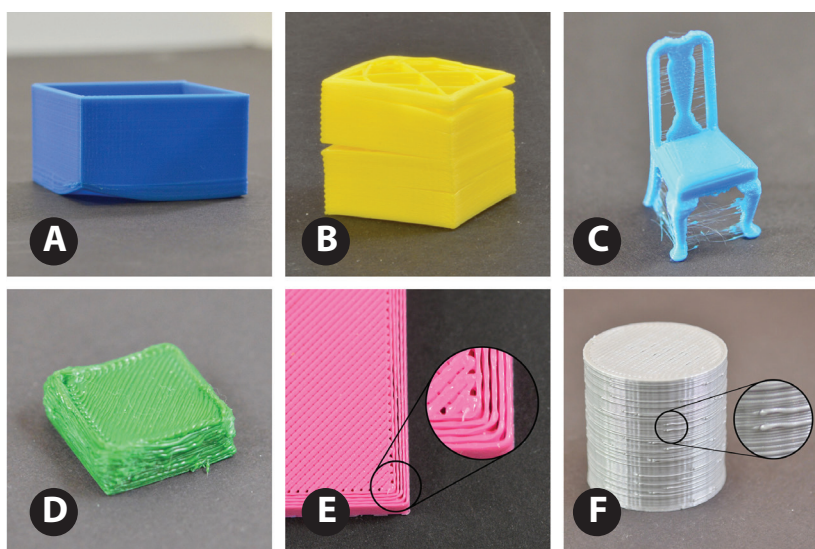
O fatiamento constitui a etapa em que o modelo tridimensional é convertido em um conjunto de instruções que é lido pela impressora 3D e determina a execução dos movimentos nos eixos cartesianos e aplica os parâmetros de impressão pré-definidos, normalmente codificadas

em *G-code* (Slocumb, 2025). Os parâmetros definidos nesta etapa, como altura de camada, largura de extrusão, velocidade de impressão, temperatura do bico e da mesa, padrões de preenchimento e retração (ver tópico 3.4), exercem influência direta sobre propriedades mecânicas, acabamento superficial e fidelidade geométrica das peças, sendo o fatiamento um momento decisivo para a adaptação do processo às características do material e às exigências da aplicação final (Ngo et al., 2018).

3.3.2.3. Fabricação

A impressão da peça corresponde à execução física do processo, na qual o filamento termoplástico é aquecido, extrudado e depositado camada a camada conforme as instruções geradas no fatiamento. Durante essa etapa, fatores como estabilidade térmica, precisão dos movimentos do sistema mecânico e controle do fluxo de material (ver tópico 3.4.5) determinam a qualidade do resultado final. Embora o processo seja amplamente automatizado, variações ambientais e limitações do equipamento podem introduzir imperfeições (Figura 9), exigindo monitoramento e ajustes ao longo da impressão, especialmente em impressoras FFF de pequeno e médio porte (Dave; Patel, 2021).

Figura 9 - Principais imperfeições na impressão 3D por FFF.



Fonte: Autor (2025)

No processo de impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF), a qualidade final das peças está diretamente relacionada à estabilidade térmica, ao controle do fluxo de material e à correta adesão entre camadas. Desvios nesses parâmetros resultam em defeitos recorrentes que afetam tanto a integridade estrutural quanto a qualidade superficial dos artefatos impressos, com impactos diretos sobre a legibilidade tátil e o conforto háptico — aspectos críticos no desenvolvimento de sistemas de informação tátil.

O *warping* (Figura 9A) refere-se à deformação das bordas da peça durante o resfriamento, causada pela contração desigual do material. Esse fenômeno ocorre, sobretudo, quando há baixa adesão à mesa de impressão, diferenças abruptas de temperatura entre a base e as camadas superiores ou ausência de controle térmico ambiental. Em peças táteis, o *warping* compromete a planaridade e a coerência geométrica das superfícies, prejudicando a exploração manual.

A separação de camadas (*layer separation*) (Figura 9B) caracteriza-se pela perda de adesão entre camadas sucessivas, resultando em fissuras ou fraturas horizontais. Esse defeito está associado, principalmente, a temperaturas de extrusão insuficientes, resfriamento excessivo ou baixa compatibilidade entre parâmetros de velocidade e fluxo. Em sistemas táteis, a separação de camadas afeta a robustez e gera discontinuidades perceptíveis ao toque.

O *stringing* (Figura 9C) ocorre quando fios finos de material são depositados inadvertidamente entre regiões distintas da peça, em movimentos de deslocamento do bico extrusor. Esse problema está relacionado a temperaturas elevadas, retração inadequada e filamentos com alta fluidez. Embora frequentemente considerado um defeito estético, o *stringing* interfere negativamente na leitura tátil, introduzindo ruídos não intencionais na superfície.

A sobre-extrusão (*over-extrusion*) (Figura 9D) manifesta-se pelo excesso de material depositado, resultando em superfícies irregulares, bordas imprecisas e perda de definição geométrica. Suas causas incluem calibração incorreta do fluxo, diâmetro nominal do filamento impreciso ou pressão excessiva no sistema de extrusão. Em aplicações táteis, a sobre-extrusão reduz o contraste entre relevos e compromete a distinção entre elementos informacionais.

A sub-extrusão (*under-extrusion*) (Figura 9E), por sua vez, ocorre quando a quantidade de material extrudado é insuficiente, gerando falhas, vazios e linhas descontínuas. Esse defeito pode ser provocado por entupimentos parciais do bico, temperaturas inadequadas ou alimentação irregular do filamento. Do ponto de vista háptico, a sub-extrusão compromete a continuidade das texturas e enfraquece a saliência tátil dos padrões.

Por fim, os *blobs* ou *zits* (Figura 9F) correspondem a pequenos acúmulos localizados de material na superfície da peça, geralmente associados a variações momentâneas de pressão no bico extrusor.

Esses defeitos estão relacionados a configurações inadequadas de retração, controle impreciso de aceleração e desaceleração, ou oscilações na vazão do filamento. Em sistemas de informação tátil, *blobs* e *zits* introduzem irregularidades pontuais que podem ser interpretadas erroneamente como elementos informacionais, interferindo na leitura e aumentando a carga cognitiva durante a exploração tátil (Slocumb, 2025).

3.3.2.4. Pós-processamento

Por fim, as etapas de pós-processamento englobam a remoção de suportes, o acabamento superficial, eventuais tratamentos térmicos e ajustes dimensionais. Essas operações visam melhorar a aparência, a funcionalidade e a adequação da peça ao uso pretendido (Volpato, 2017). No contexto do design e de aplicações sensoriais ou funcionais específicas, o pós-processamento assume papel estratégico, uma vez que pode influenciar significativamente propriedades como textura superficial, precisão de detalhes e desempenho no uso.

3.4. Parâmetros de Impressão

A qualidade dos produtos fabricados por impressão 3D é determinada por um conjunto de parâmetros técnicos que influenciam diretamente a precisão geométrica, a resistência mecânica, o acabamento superficial e a funcionalidade das peças. No contexto da produção de sistemas de informação tátil para pessoas com deficiência visual (PcDVs), esses parâmetros tornam-se ainda mais relevantes, pois afetam diretamente a legibilidade dos relevos, a clareza das texturas e a percepção háptica dos elementos impressos. Entre os principais parâmetros considerados nesta pesquisa, destacam-se a altura da camada, a densidade de preenchimento, a velocidade de impressão, a temperatura do bico extrusor, o fluxo de impressão e a retração. Cada um deles interfere de maneira específica na definição formal, na estabilidade dimensional e na qualidade tátil das amostras, razão pela qual serão apresentados e discutidos nos tópicos a seguir.

Segundo Żołek-Tryznowska et al. (2024), a tecnologia FFF/FDM permite a criação de estruturas táteis personalizadas para pessoas com deficiência visual. Entretanto, os autores obser-

varam que a qualidade final dos elementos em relevo pode não atender plenamente aos padrões internacionais de legibilidade tátil, especialmente no caso de textos em braille, cujo formato e altura exigem precisão milimétrica. Em testes experimentais com placas de braille impressas em 3D, foram observadas divergências entre os parâmetros teóricos e os resultados físicos obtidos. O modelo CAD projetava pontos com altura de 0,5 mm e diâmetro de 1,3 mm, mas as medidas reais atingiram apenas $0,38 \pm 0,03$ mm de altura e $1,0 \pm 0,07$ mm de diâmetro, indicando limitações na precisão dimensional da FFF (Żołek-Tryznowska et al., 2024).

Em contrapartida, em estudo conduzido por Papis et. al (2025), verificou-se que parâmetros como a altura de camada e o tipo de material influenciam a qualidade, porém são secundários frente à adequação global da experiência tátil proporcionada, assim pequenas variações de acabamento são toleráveis desde que o objeto cumpra sua função de transmitir informação tátil de forma clara. Portanto, ao projetar um recurso tátil impresso em 3D, deve-se priorizar que as características em relevo sejam facilmente distinguíveis, ainda que isso eventualmente signifique sacrificar um pouco de fidelidade visual ou estética.

Ao analisar a literatura observa-se uma ampla diversidade nas configurações adotadas para impressão por FDM/FFF, com implicações diretas na qualidade háptica dos modelos gerados, sua durabilidade e reprodutibilidade. Em vários estudos, os parâmetros técnicos são mencionados de forma incompleta ou ausentes, dificultando a replicabilidade e a comparação entre abordagens (Hüttner et al., 2024; Benhamida et al., 2024; Caporusso et al., 2024).

A padronização dos parâmetros técnicos de impressão em estudos voltados ao desenvolvimento de sistemas de informação inclusivos para pessoas com deficiência visual é fundamental para a precisão dimensional das texturas produzidas. A qualidade final de uma peça impressa em FDM é resultado direto dos parâmetros técnicos adotados no processo. Diversos estudos destacam que a escolha adequada desses parâmetros é crucial para atender aos requisitos de desempenho e acabamento das peças (Gao et al., 2022).

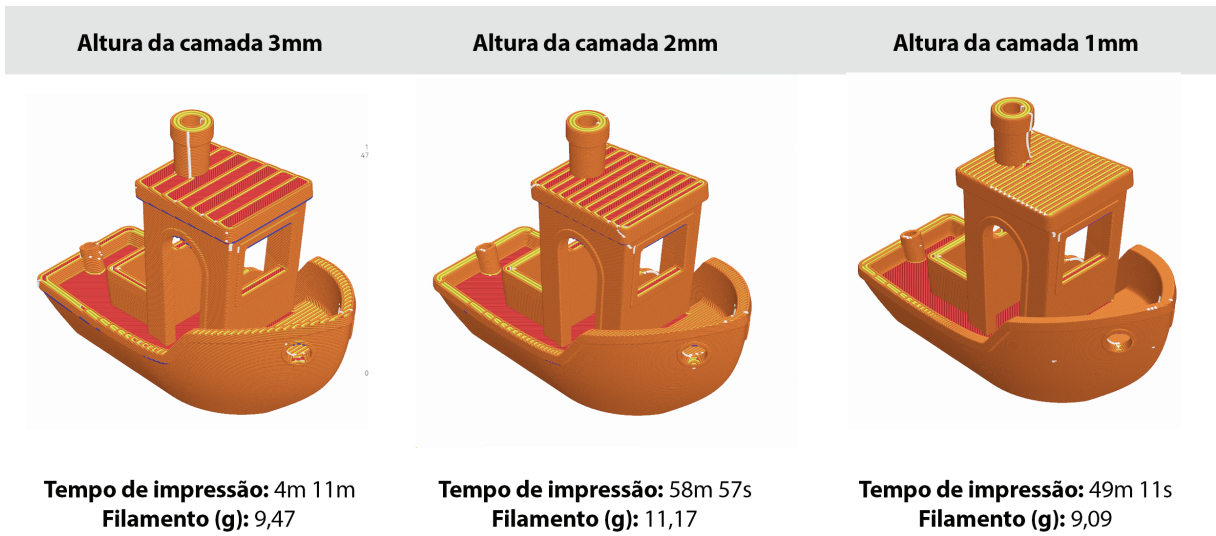
Segundo Gao et al. (2022), os parâmetros de impressão 3D FDM/FFF podem ser classificados em três categorias principais: parâmetros de processo, parâmetros ambientais e parâmetros de hardware. Os parâmetros de processo incluem, por exemplo, a orientação da peça, a altura de camada, a largura de extrusão, a velocidade de impressão, a densidade e o padrão de preenchimento (*infill*), o ângulo de deposição (rasteamento) e a temperatura de extrusão mdpi.com. Já os parâmetros ambientais envolvem condições como a temperatura da base (mesa aquecida),

a temperatura ambiente ou do enclausuramento (envelope), a umidade do ar e outros fatores que podem afetar a deposição do material. Por fim, entre os parâmetros de hardware podem-se citar o diâmetro do bico extrusor, o diâmetro e qualidade do filamento e até mesmo características do material (por exemplo, cor ou lote de fabricação do filamento). Todos esses parâmetros influenciam a qualidade do componente produzido, embora em graus distintos, sendo que os parâmetros de processo costumam ter impacto mais significativo no desempenho mecânico e no acabamento do que fatores como cor do material.

3.4.1. Altura da camada (*Layer height*)

Refere-se à altura de cada camada depositada durante a impressão. Neste sentido, durante o processo de fatiamento do modelo 3D a ser impresso é importante planejar a altura de cada camada, a fim de evitar divergências nas dimensões entre o modelo 3D e a peça impressa (Ngo et al., 2018). Camadas mais finas (0,1 mm a 0,2 mm) proporcionam maior nível de detalhe e suavidade superficial, enquanto camadas mais espessas (0,3 mm ou mais) reduzem o tempo de impressão, mas podem comprometer a legibilidade tátil (Figura 10). Estudos indicam que texturas táteis são mais perceptíveis quando impressas com camadas entre 0,15 mm e 0,2 mm (Gual et al., 2015). Destaca-se o uso predominante de camadas com altura entre 0,1 mm e 0,2 mm, consideradas ideais para a reprodução de detalhes finos perceptíveis ao tato (Żołek-Tryznowska et al., 2024; Kaplan; Pyayt, 2022; Pistofidis et al., 2021).

Figura 10 - Altura de camada e relação entre qualidade e tempo de impressão.

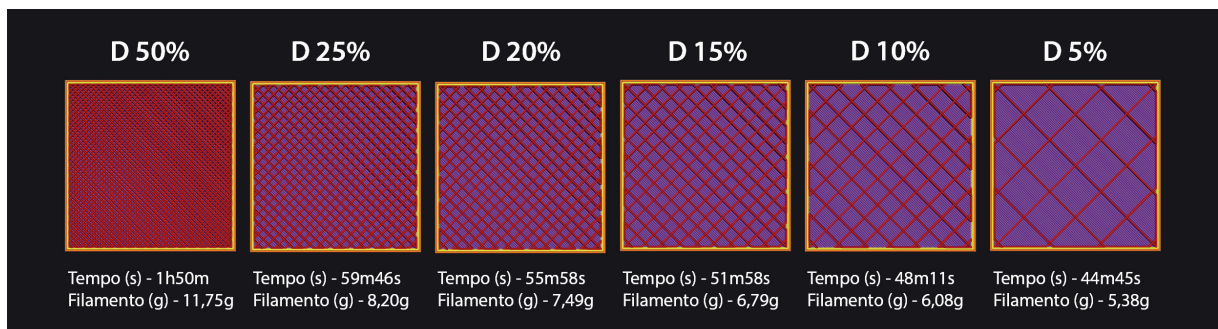


Fonte: Autor (2025)

3.4.2. Densidade de preenchimento (*Infill*)

Define a quantidade de material depositado no interior da peça (Figura 11). Para modelos táteis, um preenchimento entre 40% e 60% é recomendado para garantir resistência sem comprometer a percepção das texturas (Santana et al., 2018). Contudo, a densidade de preenchimento pode oscilar entre 15% e 20%, como estratégia para balancear tempo de impressão e resistência estrutural dos objetos, especialmente em peças destinadas à manipulação frequente (Pistofidis et al., 2021). Em materiais flexíveis, como o TPU, este parâmetro influencia diretamente na rigidez da peça, quanto maior o valor mais rígida enquanto que quanto menor o valor mais flexível ao toque.

Figura 11 - Variação na densidade de preenchimento e relação em função do tempo de impressão e consumo de material, considerando os mesmos parâmetros para impressão.

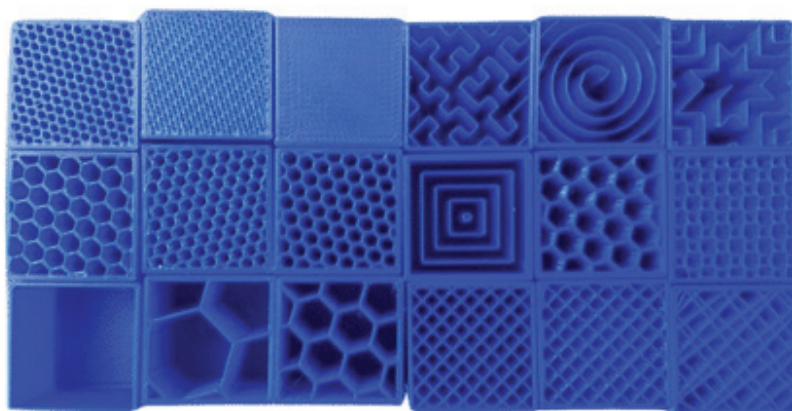


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nos softwares fatiadores várias opções de padrões estão disponíveis (Figura 12), e podem ser divididos em três categorias principais:

- Bidimensionais ou planos: são os mais comuns, tais como retilíneos, grade ou triangulares. São geralmente os mais rápidos, mas produzem uma alta anisotropia da peça.
- Tridimensionais: tal como gyroid ou cúbico. Fornecem menos anisotropia da peça, mas normalmente envolvem tempos de impressão mais longos.
- Concêntrico: Estes são adequados para a máxima flexibilidade em peças flexíveis. Nas peças rígidas, normalmente proporcionam melhores acabamentos, uma vez que não há sobreposição com os perímetros, mas implicam em propriedades mecânicas mínimas das peças impressas. Podem ser adequados para modelos visuais e maquetes.

Figura 12 - Padrões de preenchimento mais comuns nos softwares fatiadores.



Fonte: All3DP.com

3.4.3. Velocidade de impressão

A velocidade de impressão constitui um dos parâmetros mais sensíveis do processo de FFF, uma vez que influencia diretamente a precisão geométrica, a qualidade superficial e a fidelidade dos detalhes impressos. Velocidades elevadas reduzem o tempo de fabricação, porém aumentam a probabilidade de defeitos relacionados à deposição irregular do material, como vibrações mecânicas, perda de aderência entre camadas e imprecisão na definição de contornos e relevos. Em contrapartida, velocidades reduzidas favorecem maior controle da extrusão, melhor adesão entre

camadas e maior estabilidade dimensional, aspectos particularmente relevantes quando o objetivo é a produção de superfícies com relevo tátil bem definido.

No contexto de recursos táteis para PcDVs — como mapas, gráficos ou superfícies texturizadas —, a clareza e a regularidade do relevo são fundamentais para a discriminação háptica. Estudos indicam que irregularidades superficiais não intencionais, resultantes de velocidades excessivas, podem introduzir ruído perceptivo e comprometer a leitura tátil, especialmente em tarefas de exploração sequencial (Boschetto; Bottini, 2014; Lederman; Klatzky, 2009). Assim, a adoção de velocidades moderadas ou reduzidas é recomendada para maximizar a qualidade tátil das superfícies impressas.

3.4.4. Temperatura do bico extrusor

A temperatura do bico extrusor afeta diretamente a viscosidade do material fundido, o grau de coesão entre camadas e a qualidade superficial da peça impressa. Temperaturas insuficientes podem resultar em subextrusão, quando o filamento extrudado não é suficiente, a deposição de filamento ausente ou fina significa que as camadas não estão totalmente ligadas, e a estrutura interna pode ser frágil. Isso resulta em impressões que se esfrelam, racham ou rasgam mais facilmente sob estresse, já que o filamento insuficiente compromete a integridade mecânica do objeto, falhas de adesão intercamadas e superfícies ásperas. Enquanto temperaturas excessivas tendem a provocar escorrimento do material, perda de definição geométrica e degradação térmica do polímero, características que configuram a sobreextrusão. Quando é extrudado filamento em excesso, frequentemente vê-se sinais óbvios como bolhas, *stringing* (fios) ou camadas excessivamente grossas onde o filamento parece derramar ou vazar além dos limites pretendidos.

Para a produção de recursos táteis, a temperatura de extrusão assume papel crítico, pois está associada à continuidade do relevo, à uniformidade da deposição e à nitidez das transições geométricas. Trabalhos voltados à caracterização mecânica e superficial de peças produzidas por FFF demonstram que pequenas variações na temperatura do bico podem alterar significativamente a rugosidade superficial e a resposta mecânica local, impactando diretamente a percepção tátil (Popescu et al., 2018). Dessa forma, a definição da temperatura deve considerar não apenas a faixa recomendada pelo fabricante do filamento, mas também os requisitos perceptivos da aplicação final.

3.4.5. Fluxo de impressão

O fluxo de impressão corresponde ao ajuste da quantidade de material extrudado em relação ao volume calculado pelo software fatiador para a formação de cada camada. Esse parâmetro atua como um fator de correção, permitindo compensar variações no diâmetro real do filamento, no desempenho do sistema de extrusão e nas condições térmicas do processo. Valores de fluxo inferiores ao ideal podem resultar em subextrusão, caracterizada por falhas entre as linhas depositadas e menor coesão entre camadas, enquanto valores excessivos tendem a provocar sobre-extrusão, com acúmulo de material, perda de definição geométrica e alterações dimensionais da peça (Volpato, 2017; Boschetto; Bottini, 2014).

No contexto do desenvolvimento de sistemas de informação tátil para pessoas com deficiência visual, o controle adequado do fluxo de impressão assume papel central, uma vez que pequenas variações na quantidade de material extrudado impactam diretamente a definição de relevos, bordas e texturas. O desempenho em tarefas de discriminação tátil, busca e ordenação pode ser influenciado por variações sutis nessas dimensões (Lederman; Klatzky, 2009; Gentaz; Hatwell, 2004). Assim, o ajuste fino do fluxo de impressão torna-se um fator determinante para assegurar consistência entre o projeto digital e o artefato físico produzido.

3.4.6. Retração

A retração consiste no recuo controlado do filamento durante os deslocamentos do bico extrusor sem deposição de material, tendo como principal objetivo evitar o surgimento de fios (*stringing*), gotículas e contaminações entre regiões distintas da peça. Embora seja um parâmetro amplamente associado à estética visual da impressão, sua relevância se estende ao domínio tátil.

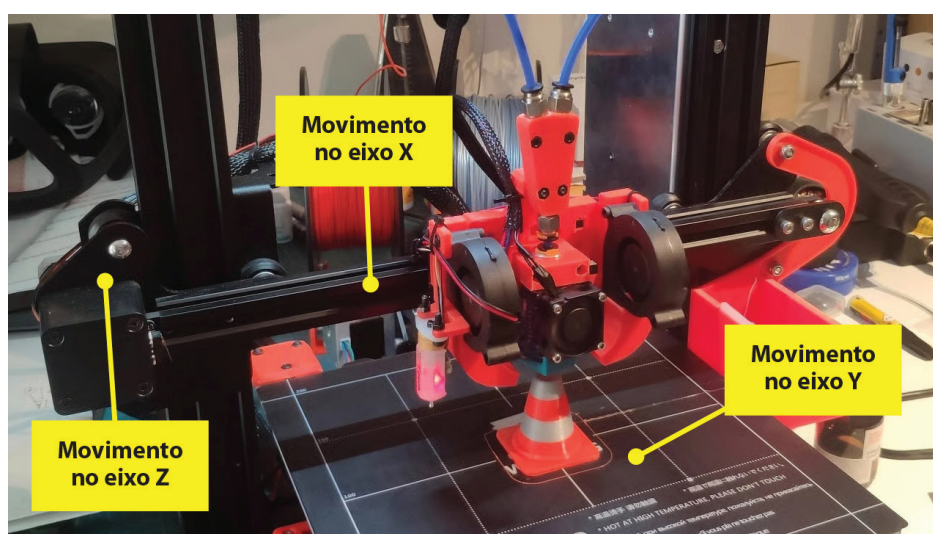
Em superfícies destinadas à exploração háptica, resíduos decorrentes de retração inadequada podem introduzir artefatos não planejados, interferindo na leitura tátil e dificultando a identificação de padrões, bordas e texturas. Esse aspecto é particularmente crítico em materiais flexíveis, como o TPU, nos quais a retração excessiva pode gerar instabilidade no fluxo (subextrusão), enquanto a retração insuficiente resulta em acúmulo de material entre elementos do relevo (*stringing*) (Dave; Patel, 2021). Portanto, o ajuste da retração deve equilibrar a limpeza da impressão com a estabilidade do processo, considerando sempre os requisitos perceptivos do objeto final.

3.5. Tipos de impressoras 3D por FFF

As impressoras 3D baseadas na tecnologia FFF podem ser classificadas a partir de um conjunto de características técnicas que influenciam diretamente seu desempenho, precisão, confiabilidade e adequação a diferentes contextos de uso. Entre esses aspectos, destacam-se o sistema de coordenadas empregado para o controle do movimento do cabeçote de extrusão, o mecanismo de tração do filamento, o tipo de bico extrusor utilizado e a configuração da câmara e da mesa de impressão. A compreensão dessas variáveis é fundamental tanto para o uso técnico do equipamento quanto para decisões projetuais relacionadas à escolha da impressora mais adequada a uma aplicação específica.

No que se refere ao sistema de coordenadas para controle do movimento do cabeçote de extrusão, as impressoras 3D por FFF mais comuns podem adotar arquiteturas cartesianas, coreXY, delta ou híbridas (Frosch, 2021). Os sistemas cartesianos, amplamente utilizados em impressoras de entrada, caracterizam-se pela movimentação independente dos eixos X, Y e Z, oferecendo maior simplicidade construtiva, facilidade de calibração e manutenção, embora possam apresentar limitações em termos de velocidade e aceleração. Nas impressoras cartesianas a movimentação no eixo Y é feita pela própria mesa de impressão, enquanto que os movimentos nos eixos X e Z são realizados pelo cabeçote extrusor por meio dos fusos (Figura 13).

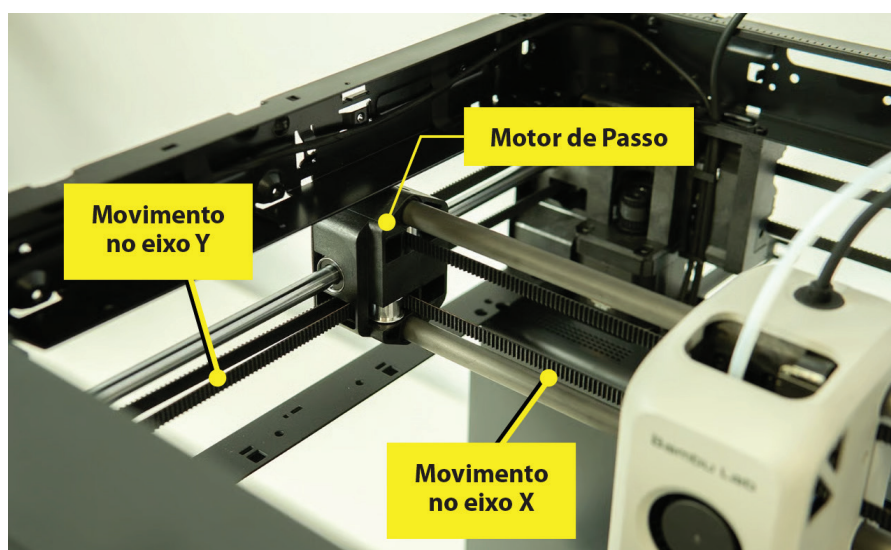
Figura 13 - Sistema de movimentação nas impressoras cartesianas.



Fonte: Adaptado pelo autor de All3DP.com.

Nas impressoras coreXY (Figura 14), a mesa de impressão desloca-se apenas no eixo Z. Os movimentos nos eixo X e Y são controlados por dois motores de passo ligados por correias longas que se cruzam para movimentar o cabeçote extrusor. Portanto, ao contrário das impressoras cartesianas, os motores são fixos na estrutura e não no cabeçote extrusor, proporcionando maior estabilidade e velocidade de impressão.

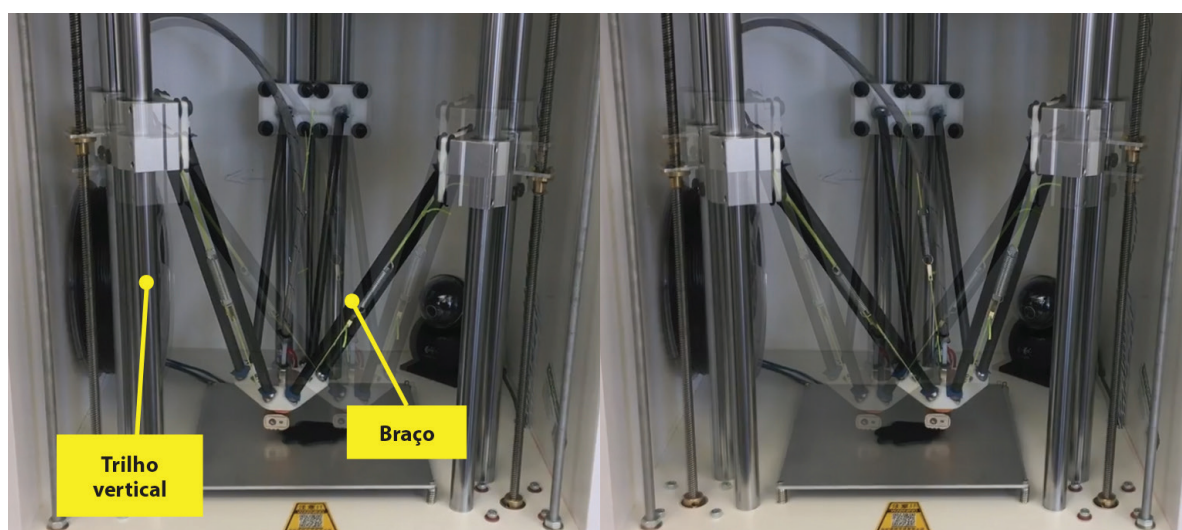
Figura 14 - Sistema de movimentação nas impressoras core XY.



Fonte: Adaptado pelo autor de All3DP.com.

As impressoras delta (Figura 15) utilizam arranjos cinemáticos mais complexos, permitindo maiores velocidades de impressão e redução de massas móveis, ao custo de maior complexidade mecânica e necessidade de calibração mais rigorosa. Neste tipo de impressora a movimentação ocorre por meio de três braços fixados a trilhos verticais. A cabeça de impressão é conectada à extremidade de cada braço por meio de dobradiças, e os braços trabalham em conjunto para ajustar a posição da cabeça de impressão. O movimento coordenado dos braços controla a altura (eixo Z) e a posição (eixos X e Y) da cabeça de impressão em relação à mesa de impressão (Frosch, 2021).

Figura 15 - Sistema de movimentação impressoras delta.

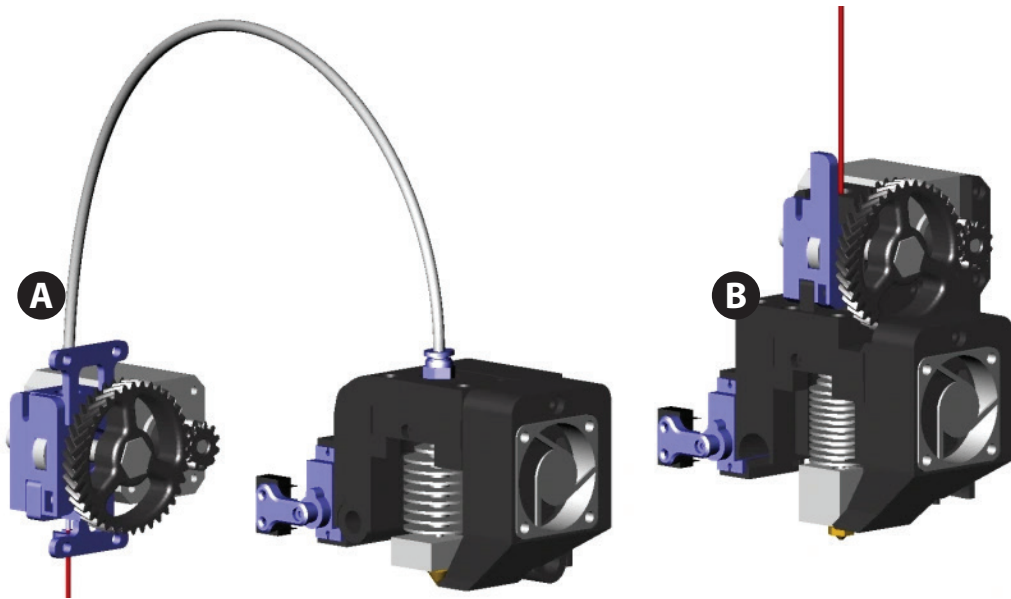


Fonte: Adaptado pelo autor de Troy Mackay - <https://www.youtube.com/watch?v=wAzyZs520Uk&t=18s>.

Outro critério relevante diz respeito ao mecanismo de tração do filamento, geralmente classificado como bowden ou direct drive. Nos sistemas bowden, o motor responsável pela alimentação do filamento encontra-se afastado do cabeçote de impressão, reduzindo o peso do conjunto móvel e favorecendo velocidades mais elevadas, como nas impressoras delta. Contudo, essa configuração tende a apresentar maior dificuldade no controle preciso da extrusão, especialmente ao trabalhar com filamentos flexíveis, como são moles, a força do motor faz com que eles se expandam e se curvem dentro do tubo.

Em contraste, os sistemas direct drive posicionam o motor próximo ao bico extrusor, proporcionando maior controle sobre o fluxo de material, melhor desempenho com filamentos flexíveis e maior precisão em detalhes finos, ainda que com aumento da massa em movimento e, consequentemente, possíveis limitações de velocidade (Ngo et al., 2018).

Figura 16 - Sistemas de tração bowden e direct drive.



Fonte: Filamentos3dbrasil.com.wordpress.com

A tipologia do extrusor também constitui um fator determinante na classificação das impressoras FFF. Extrusores de bico único são os mais comuns e atendem a uma ampla gama de aplicações, enquanto extrusores duplos ou múltiplos ampliam as possibilidades de impressão com materiais e cores distintas ao mesmo tempo (Figura 17) (Boschetto; Bottini, 2014; Frosch, 2021).

Figura 17 - Bicos extrusores duplo e triplo.



Fonte: Amazon.com.

Frosch (2021) aponta que uma das vantagens do uso de diferentes materiais está na impressão de peças que necessitam de suportes para sustentação durante a impressão. Com apenas um bico extrusor tanto a peça quanto o suporte são impressos com o mesmo material, assim ao final da impressão é preciso quebrar esses apoios mecanicamente. Por outro lado, quando utilizado um bico extrusor duplo, por exemplo, a impressão da peça pode ser feita utilizando PLA em um bico, e no outro, um filamento solúvel em água, dessa forma ao final da impressão, basta mergulhar a peça em água para remoção dos suportes (Figura 18).

Figura 18 - Impressão de suportes do modelo utilizando filamento solúvel.



Fonte: 3Dlab.com.br

Por fim, a configuração da câmara de construção, que pode ser aberta ou fechada, impacta significativamente a estabilidade térmica do processo. Impressoras com câmara aberta são mais acessíveis e facilitam a operação. No entanto, apresentam maior suscetibilidade a variações térmicas e correntes de ar, o que pode afetar a qualidade da impressão de determinados materiais, como ABS e ASA. Já impressoras com câmara fechada ou aquecida oferecem maior controle ambiental, favorecendo a impressão de polímeros mais sensíveis a contrações térmicas, embora impliquem maior custo e complexidade estrutural (Ashby; Shercliff; Cebon, 2014; Gibson; Rosen; Stucker, 2015). As impressoras do tipo cartesiana são abertas e as do tipo coreXY, geralmente, são fechadas.

Para além das características apresentadas anteriormente, é importante destacar configurações presentes na mesa de impressão, como aquecimento e nivelamento. A mesa aquecida

amplia a possibilidade de uso de maior número de filamentos, visto que o aquecimento garante que os materiais esfriem de um modo mais demorado, sem deformações, contribuindo com a diminuição da diferença de temperatura. Existem filamentos, como o PLA e TPU, em que o aquecimento não influencia na qualidade da peça impressa. Por outro lado, o PETG e ABS exigem a mesa de impressão aquecida para evitar o empenamento da peça, também conhecido como warping (Frosch, 2021).

Em relação ao sistema de nivelamento da mesa de impressão, são encontrados dois tipos: manual e automático. O nivelamento manual, consiste em um sistema de roscas que ajusta o nível da mesa de impressão por meio do aperto. Enquanto que no nivelamento automático, a impressora possui um sensor no cabeçote extrusor que faz a leitura dos desníveis presentes na mesa de impressão e compensa essas diferenças no momento da produção da peça ajustando o nível do eixo z em relação à mesa.

3.6. Filamentos mais comuns utilizados na impressão 3D por FFF

A escolha do filamento na impressão 3D por FFF constitui um fator determinante para o desempenho funcional, a qualidade geométrica e a legibilidade tátil dos artefatos produzidos, especialmente quando se trata do desenvolvimento de sistemas de informação acessíveis para PcDVs. As propriedades físico-mecânicas dos materiais — tais como rigidez, resistência mecânica, estabilidade dimensional e resposta superficial ao toque — influenciam diretamente a percepção háptica, a durabilidade e a confiabilidade dos relevos e texturas impressos.

Entre os filamentos mais amplamente utilizados no contexto do FFF destacam-se o PLA (ácido polilático), o ABS (acrilonitrila butadieno estireno), o PETG (polietileno tereftalato glicol), o TPU (poliuretano termoplástico) e o Nylon (poliamida). A seguir, o quadro 2 sintetiza as principais limitações desses filamentos com base em Frosch (2021), Slocumb (2025) e Dave e Patel (2021).

Quadro 2 - Principais filamentos e suas características.

	PLA	ABS	PETG	TPU	Nylon
Visão geral	Rígido, boa estabilidade dimensional, baixa resistência térmica	Alta resistência mecânica e térmica, rígido	Boa resistência mecânica, leve flexibilidade e resistente a umidade	Altamente flexível, boa elasticidade	Alta resistência mecânica, durável e flexível
Limitações	Frágil, sensível ao calor	Alta retração térmica, empenamento, emissão de vapores	Stringing, detalhes finos menos definidos	Impressão lenta, difícil controle geométrico	Higroscópico, exige controle ambiental
Dificuldade de impressão	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta
Compatível com impressora de entrada	Sim	Não (necessita de câmara fechada)	Sim (com ajustes)	Sim (de preferência com extrusor direct drive)	Não
Valor médio por kg (R\$)	80 - 130	90 - 150	120 - 180	180 - 300	250 - 450

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Frosch (2021), Slocumb (2025) e Dave e Patel (2021).

A análise comparativa dos filamentos apresentados no quadro 2 evidencia que as diferenças entre os materiais extrapolam aspectos puramente técnicos, impactando diretamente a viabilidade de uso em contextos educacionais, laboratoriais e no desenvolvimento de sistemas de informação táteis. Observa-se que materiais classificados com baixa ou média dificuldade de impressão, como o PLA e o PETG, apresentam maior compatibilidade com impressoras de entrada, o que os torna particularmente relevantes em ambientes acadêmicos e projetos voltados à acessibilidade, nos quais a reprodutibilidade, a previsibilidade do processo e a redução de custos operacionais constituem critérios fundamentais.

SISTEMAS DE INFORMAÇÃO TÁTIL IMPRESSOS POR *FUSED FILAMENT FABRICATION* (FFF) PARA PcDVS

A informação acessível é um dos pilares da inclusão de PcDVs nos mais diversos contextos sociais, educacionais e culturais. Nesse cenário, os sistemas de informação tátil desempenham papel fundamental ao permitir que conteúdos tradicionalmente visuais sejam transpostos para formatos exploráveis pelo tato. A ascensão de tecnologias de fabricação digital, como a impressão 3D por FFF, tem ampliado significativamente as possibilidades de produção desses recursos, oferecendo personalização e redução de custos quando comparadas aos meios de produção tradicionais. Esta seção explora os fundamentos, aplicações e desafios envolvidos na criação de sistemas informacionais táteis destinados a PcDVs, com ênfase no uso da impressão 3D como meio produtivo.

4.1 Sistemas de informação tátil: mapas, gráficos, símbolos e pictogramas

Os sistemas de informação táteis podem ser compreendidos como artefatos informacionais projetados para traduzir conteúdos predominantemente visuais em estruturas acessíveis por meio do tato. Em diálogo com a noção de sistemas de informação proposta por Moraes (2002), esses sistemas priorizam aspectos como legibilidade, decodificação e lógica de uso. No caso das pessoas com deficiência visual, incluem recursos como mapas táteis, gráficos em relevo, símbolos e pictogramas táteis, organizados de modo a favorecer a compreensão espacial, funcional e simbólica das informações (Edman, 1992; Vasconcellos, 1993). Sua configuração projetual, entretanto, deve considerar as especificidades da percepção háptica, marcada por

exploração sequencial, fragmentada e ativa, o que exige simplificação formal, hierarquização dos conteúdos e clareza tátil dos elementos informacionais (Hatwell; Streri; Gentaz, 2003; Lederman; Klatzky, 2009).

Os mapas táteis constituem sistemas de informação tridimensionais desenvolvidos para permitir o acesso, por meio do tato, a informações espaciais e geográficas que, tradicionalmente, são comunicadas de forma visual. Seu objetivo principal é apoiar a orientação, a mobilidade e a compreensão espacial de pessoas com deficiência visual, traduzindo relações de forma, distância, hierarquia e localização em elementos perceptíveis ao toque, como relevos, texturas, símbolos e códigos táteis (Edman, 1992; Vasconcellos, 1993). Diferentemente de representações visuais convencionais, os mapas táteis exigem uma organização informacional que considere a exploração sequencial e fragmentada característica da percepção háptica, demandando simplificação formal e hierarquização rigorosa dos conteúdos apresentados (Hatwell; Streri; Gentaz, 2003).

Os gráficos táteis, diagramas em relevo e modelos tridimensionais, por sua vez, destinam-se à representação de dados quantitativos, estatísticos ou científicos e apresentam desafios específicos, como representar conceitos abstratos, relações estruturais e fenômenos espaciais que não podem ser plenamente comunicados por descrições verbais. Estudos demonstram que representações táteis tridimensionais favorecem a compreensão conceitual e reduzem a carga cognitiva, especialmente em áreas como matemática, ciências e tecnologia, nas quais a organização espacial é central para a aprendizagem (Edman, 1992; Lederman; Klatzky, 2009).

Os símbolos e pictogramas táteis desempenham papel fundamental na sinalização e identificação de funções, espaços e serviços. Sua eficiência depende da consistência formal, do contraste tátil e da familiaridade cultural dos usuários (Ramos; Amaral; Mazzoni, 2020). O sistema braille, embora permaneça como base da alfabetização tátil, apresenta limitações em contextos de informação rápida ou espacial, sendo frequentemente complementado por códigos em relevo e sistemas híbridos que combinam texto, forma e textura (Millar, 1997; Ferrell; Mason; Young, 2021).

4.2 Abordagens do design e da ergonomia para o desenvolvimento de sistemas de informação para PcDVs

O desenvolvimento de sistemas de informação para pessoas com deficiência visual (PcDVs) exige a articulação de diferentes abordagens teóricas e metodológicas, capazes de orientar,

de forma integrada, aspectos como acessibilidade, legibilidade, usabilidade e percepção. Nesse sentido, esta pesquisa baseia-se principalmente no Design Universal, no Design Inclusivo, no Design da Informação e na ergonomia informacional, entendidos como referenciais complementares para a criação de sistemas mais acessíveis, compreensíveis e adequados à diversidade humana.

O Design Universal constitui uma abordagem projetual orientada à concepção de produtos, ambientes e sistemas que possam ser utilizados pelo maior número possível de pessoas, independentemente de idade, habilidades ou condições sensoriais. Consolidado a partir dos trabalhos do Center for Universal Design na Universidade Estadual da Carolina do Norte, o conceito estrutura-se em sete princípios fundamentais — uso equitativo, flexibilidade de uso, uso simples e intuitivo, informação perceptível, tolerância ao erro, baixo esforço físico e dimensão e espaço adequados para aproximação e uso — que funcionam como diretrizes para a tomada de decisão ao longo do processo de projeto (Mace; Hardie; Place, 1991; Story; Mueller; Mace, 1998).

Quando aplicado ao campo do Design da Informação, o Design Universal desloca o foco do projeto da forma para a organização, a estrutura e a clareza da informação, reconhecendo que muitas das barreiras enfrentadas por pessoas com deficiência visual resultam de sistemas informacionais concebidos prioritariamente para a percepção visual. Nesse contexto, a acessibilidade não se limita à adaptação pontual de conteúdos, mas envolve a revisão dos próprios códigos, linguagens e suportes que mediam a relação entre o usuário e a informação. Bonsiepe (2011) destaca que o design atua como uma interface entre o sujeito e os sistemas técnicos e simbólicos, sendo responsável por tornar a informação compreensível e utilizável. De modo complementar, Frascara (2015) enfatiza que a eficácia da comunicação depende da adequação dos sistemas informacionais às capacidades perceptivas, cognitivas e ao contexto de uso dos usuários.

Essa perspectiva é aprofundada pelo Design Inclusivo, que enfatiza a variabilidade humana e reconhece que não existe uma solução única capaz de atender plenamente a todos os usuários. Ao contrário, propõe estratégias projetuais flexíveis, capazes de acomodar diferentes capacidades sensoriais, cognitivas e motoras, considerando contextos específicos de uso e perfis diversos de usuários (Clarkson et al., 2013; Waller et al., 2015). Para PcDVs, essa abordagem é particularmente relevante, uma vez que as experiências perceptivas variam significativamente entre PcDVs congênicas e adquiridas, demandando soluções que contemplem múltiplas estratégias de acesso à informação.

Neste sentido, a ergonomia informacional contribui para a adequação entre sistemas de informação ao investigar os processos de comunicação humano–tarefa–interface, considerando os aspectos sensoriais, cognitivos e decisórios envolvidos na execução de uma atividade. A interação eficaz depende da clareza, da organização e da ausência de ambiguidade na informação apresentada; caso contrário, a realização da tarefa pode ser comprometida (Iida, 2005; Silva; Paschoarelli, 2018). Nesse sentido, a ergonomia informacional se apoia nos princípios da teoria da informação, segundo os quais a satisfação do usuário está associada ao envio da informação correta, de forma eficiente, à pessoa certa e no momento adequado, envolvendo linguagens verbais e não verbais (Martins; Moraes, 2002). Para PcDVs, essa adequação significa compreender os limites e potencialidades da percepção háptica, bem como as estratégias cognitivas envolvidas na leitura sequencial e na integração progressiva de fragmentos informacionais.

Entre os princípios do Design Universal, o da informação perceptível apresenta particular relevância nesse contexto, ao enfatizar que conteúdos essenciais devem ser comunicados de forma eficaz por diferentes canais sensoriais, independentemente das condições ambientais ou das habilidades do usuário. No caso das PcDVs, isso se traduz na necessidade de transcrever códigos visuais em estruturas táteis legíveis, explorando relevo, textura, ritmo e organização espacial como elementos informacionais, e não apenas como atributos formais.

Do mesmo modo, os princípios da flexibilidade de uso e do uso simples e intuitivo reforçam a importância de sistemas informacionais capazes de acomodar diferentes perfis de usuários — incluindo pessoas cegas congênitas, cegas adquiridas e pessoas com baixa visão — cujas experiências perceptivas, repertórios simbólicos e estratégias exploratórias podem variar significativamente (Millar, 1997; Hatwell; Streri; Gentaz, 2003). Nessa perspectiva, o projeto de sistemas de informação tátil deve considerar não apenas a legibilidade isolada dos elementos, mas também a coerência do conjunto, a previsibilidade das relações espaciais e a possibilidade de aprendizagem progressiva.

Assim, no desenvolvimento de sistemas de informação para PcDVs, a articulação entre Design Universal, Design Inclusivo, Design da Informação implica repensar hierarquias, codificações e estratégias de apresentação da informação, com o objetivo de favorecer a compreensão, a autonomia e o uso efetivo dos sistemas, e não apenas o acesso formal.

4.3 Aplicações da impressão 3D por FFF na produção de sistemas de informação tátil

A impressão 3D por FFF tem se consolidado como uma alternativa técnica e projetual relevante para o desenvolvimento de recursos educacionais táteis. Ao permitir a criação de artefatos tridimensionais manipuláveis, ajustáveis em escala, textura e complexidade formal, essa tecnologia possibilita a conversão direta de informações visuais em suportes táteis mais adequados à exploração háptica. Conforme discutido por See e Advincula (2021), a impressão 3D viabiliza a produção sob demanda de materiais como mapas táteis, modelos tridimensionais, ícones e quebra-cabeças táteis em prazos significativamente menores do que os métodos tradicionais. A combinação entre baixo custo relativo, flexibilidade projetual e facilidade de personalização torna essa tecnologia particularmente adequada para a criação de recursos táteis aplicados a diferentes contextos de uso.

Nesse cenário, observa-se o crescimento de aplicações da impressão 3D em áreas como ensino, cultura e lazer, e orientação e mobilidade, nas quais artefatos táteis desempenham papel central na mediação informacional e no apoio às atividades cotidianas de PcDVs. A análise dessas áreas permite compreender não apenas o potencial técnico da impressão 3D por FFF, mas sobretudo seu impacto social e informacional.

4.3.1 Área de ensino

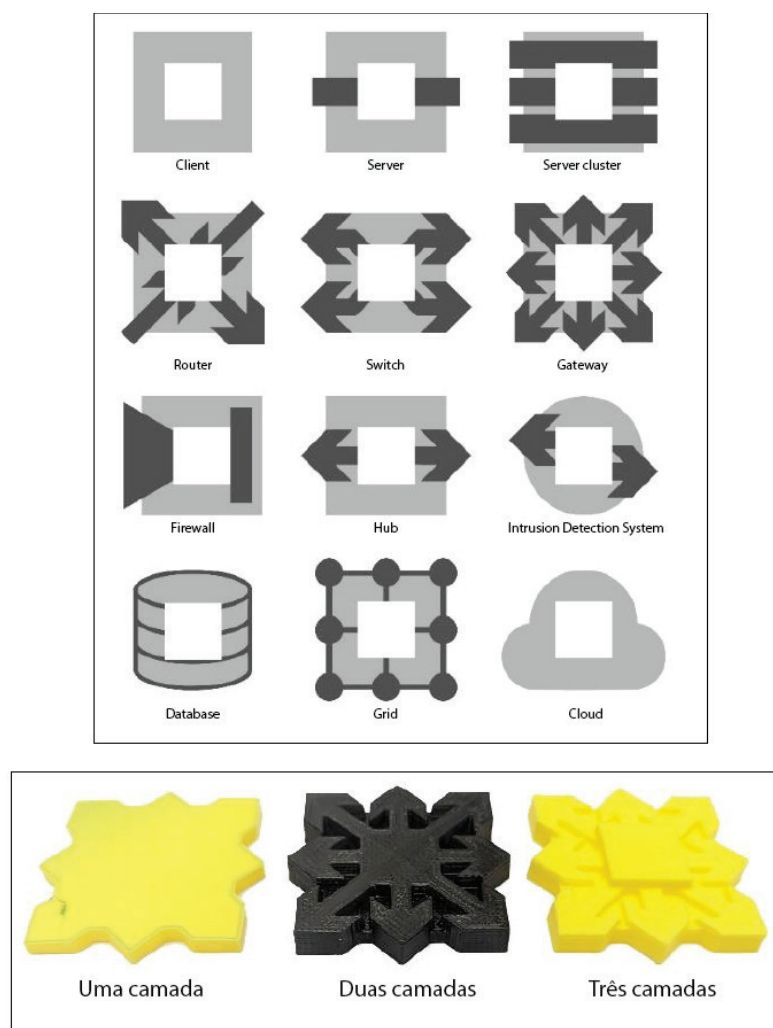
No contexto educacional, a produção de recursos didáticos acessíveis a pessoas com deficiência visual enfrenta desafios recorrentes, especialmente em áreas do conhecimento fortemente baseadas em linguagens visuais, como matemática, geografia, ciências e tecnologia. Diagramas, esquemas, gráficos e representações espaciais são amplamente utilizados como mediadores do aprendizado e, quando não traduzidos adequadamente para o tato, comprometem a compreensão conceitual e a autonomia dos estudantes cegos ou com baixa visão (See; Advincula, 2021). Nesse cenário, a impressão 3D por FFF tem se consolidado como uma estratégia relevante para a conversão desses conteúdos em artefatos táteis manipuláveis, capazes de apoiar a exploração háptica e a construção de representações mentais mais consistentes.

Em termos técnicos e de projeto, a impressão 3D por FFF permite controle rigoroso sobre parâmetros como altura de camada, densidade de preenchimento, orientação da peça e esca-

la, aspectos que influenciam diretamente a legibilidade tátil e o conforto durante a exploração manual. Além disso, a possibilidade de produzir rapidamente múltiplas versões de um mesmo recurso favorece processos iterativos de avaliação e refinamento, nos quais ajustes formais e informacionais podem ser realizados com base no desempenho e no feedback dos usuários. Como observa Frosch (2021), a fabricação aditiva no contexto educacional não se limita à reprodução de objetos, mas passa a integrar o próprio processo de aprendizagem, ao permitir adaptação contínua dos materiais às necessidades dos estudantes.

Esse potencial é evidenciado no estudo de Caporusso et al. (2024), que propõem um sistema de recursos táteis tridimensionais impressos em 3D para o ensino de topologias de redes de computadores. Os autores partem do reconhecimento de que estruturas abstratas, como nós, conexões e hierarquias de rede, são de difícil apreensão quando apresentadas apenas por descrições verbais ou conteúdos auditivos. No sistema desenvolvido, esses elementos são traduzidos em símbolos táteis tridimensionais (Figura 19), projetados para serem facilmente reconhecidos pelo tato e, simultaneamente, compreensíveis para usuários com visão, promovendo um ambiente de aprendizagem inclusivo. Segundo os autores, a exploração física dos modelos permite que os estudantes compreendam a organização relacional e hierárquica da rede de forma mais direta e intuitiva do que em representações bidimensionais.

Figura 19 - Sistema de ícones táteis para ensino de topologia de redes de computadores.



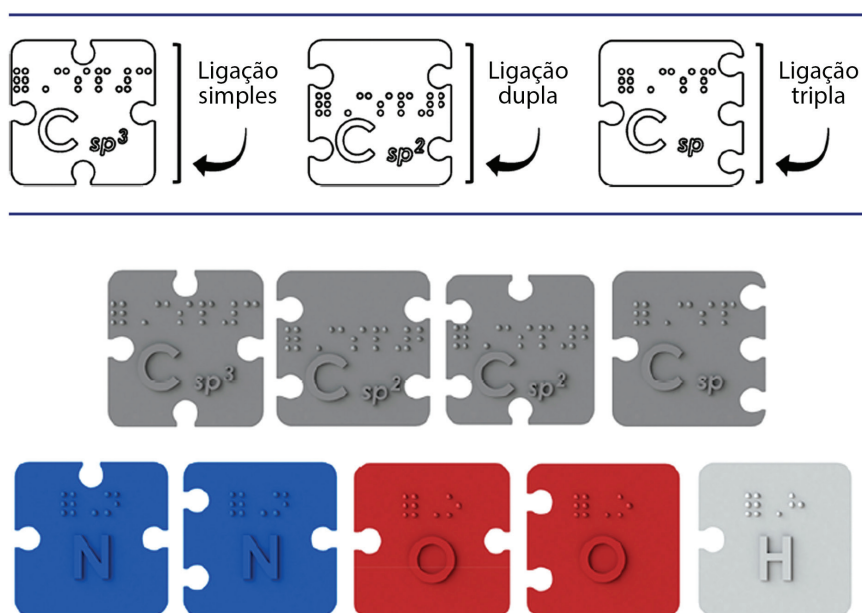
Fonte: Adaptado pelo autor de Caporusso et al. (2024)

Outro aspecto relevante do estudo é a integração entre os artefatos táteis físicos e interfaces digitais acessíveis, por meio do uso de códigos QR associados às peças impressas. Essa estratégia possibilita o acesso complementar a descrições auditivas e informações técnicas, ampliando o caráter informacional dos objetos sem sobrecarregar a leitura tátil. Trata-se de uma abordagem alinhada aos princípios do Design Universal, na medida em que beneficia simultaneamente estudantes com e sem deficiência visual, preservando o fluxo das atividades em sala de aula e evitando soluções segregadas.

A impressão 3D por FFF também se mostra eficaz no ensino de conteúdos científicos altamente abstratos, como evidenciado no estudo de Singhal e Balaji (2022), que desenvolvem um sistema open source de modelos táteis tridimensionais para o ensino de química a estu-

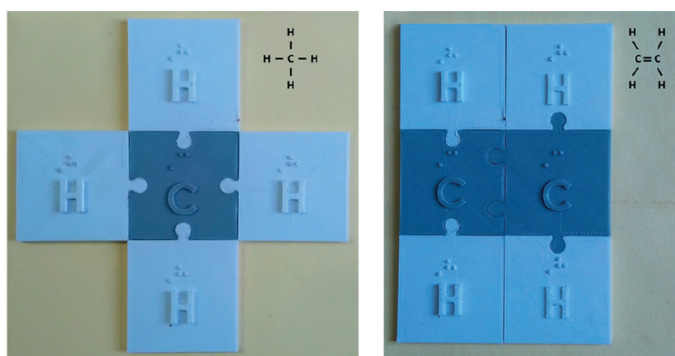
dantes cegos e com baixa visão. O sistema é composto por peças intertraváveis que representam elementos químicos, suas valências e possibilidades de ligação, incorporando inscrições em braille e caracteres alfanuméricos em relevo (Figura 20 e 21). A lógica construtiva impede combinações incorretas entre os elementos, uma vez que o número e a posição dos encaixes correspondem diretamente às propriedades químicas representadas. Segundo os autores, esse tipo de restrição projetual favorece a aprendizagem autônoma e reduz a incidência de erros conceituais durante a exploração.

Figura 20 - Representações das maneiras que o carbono tetravalente pode formar suas ligações.



Fonte: Adaptado pelo autor de Singhal e Balaji (2022)

Figura 21- Demonstração do encaixe das peças impressas para formação das ligações químicas.



Fonte: Singhal e Balaji (2022)

Os resultados obtidos indicam elevada aceitação por parte dos participantes, que relataram maior clareza na compreensão de conceitos como ligação química, estrutura molecular e hibridização. Os autores destacam ainda que os modelos foram impressos em PLA, material de baixo custo, fácil processamento e compatível com impressoras FFF de médio porte, o que reforça a viabilidade de adoção da tecnologia em contextos educacionais com infraestrutura limitada. Nesse sentido, o estudo demonstra que a impressão 3D, quando orientada por princípios de acessibilidade tátil e design da informação, pode contribuir de forma concreta para a inclusão de PcDVs no ensino de disciplinas que demandam alto grau de abstração espacial.

Essa perspectiva é reforçada pelo estudo de See e Advincula (2021), que analisam o uso da impressão 3D na produção de materiais educacionais táteis personalizados, como mapas, cartões educativos, modelos tridimensionais e quebra-cabeças táteis. Os autores destacam que a principal contribuição da tecnologia reside na produção sob demanda, capaz de reduzir significativamente o tempo de desenvolvimento dos recursos — de semanas para poucas horas — e permitir ajustes conforme o nível de experiência tátil, a idade e o contexto pedagógico dos estudantes. Além disso, o envolvimento direto de professores e alunos no processo de criação dos materiais favorece o engajamento, a motivação e a retenção do conteúdo, especialmente entre estudantes com menor confiança acadêmica.

Entretanto, os autores também apontam limitações importantes, sobretudo relacionadas à formação técnica dos docentes. Dificuldades no uso de softwares de modelagem tridimensional e na configuração adequada dos parâmetros de impressão podem restringir o potencial da tecnologia e comprometer a qualidade dos recursos produzidos. Ainda assim, iniciativas baseadas em plataformas automatizadas e repositórios *open source*, que integram processamento de imagens, geração de braille e preparação dos arquivos para impressão, mostram-se eficazes na redução dessas barreiras e na ampliação do acesso à impressão 3D em ambientes educacionais diversos (See; Advincula, 2021).

De modo geral, os estudos analisados indicam que a impressão 3D por FFF, quando aplicada à produção de recursos educacionais táteis, não deve ser compreendida apenas como uma solução técnica de fabricação, mas como um elemento estruturante de práticas pedagógicas mais inclusivas, participativas e multissensoriais. Ao permitir a materialização de conceitos abstratos, a personalização dos materiais e a validação empírica com usuários reais, essa tecnologia contribui para a democratização do acesso ao conhecimento e para a construção de ambientes

educacionais mais equitativos, beneficiando PcDVs e estudantes com visão de forma integrada.

4.3.2 Cultura e lazer

No campo cultural, a impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF) tem sido empregada como estratégia central para o desenvolvimento de sistemas de informação tátil voltados à ampliação do acesso de pessoas com deficiência visual a museus, exposições, espaços patrimoniais e atividades artísticas. Nesses contextos, as barreiras de acesso não se restringem à ausência de informação verbal ou textual, mas estão fortemente associadas à impossibilidade de exploração tátil direta dos objetos originais, uma vez que o toque é, em geral, proibido por razões de conservação e preservação dos acervos. Essa restrição compromete a apreensão de qualidades formais, espaciais e materiais das obras, especialmente para usuários cuja principal via de acesso à informação é o tato.

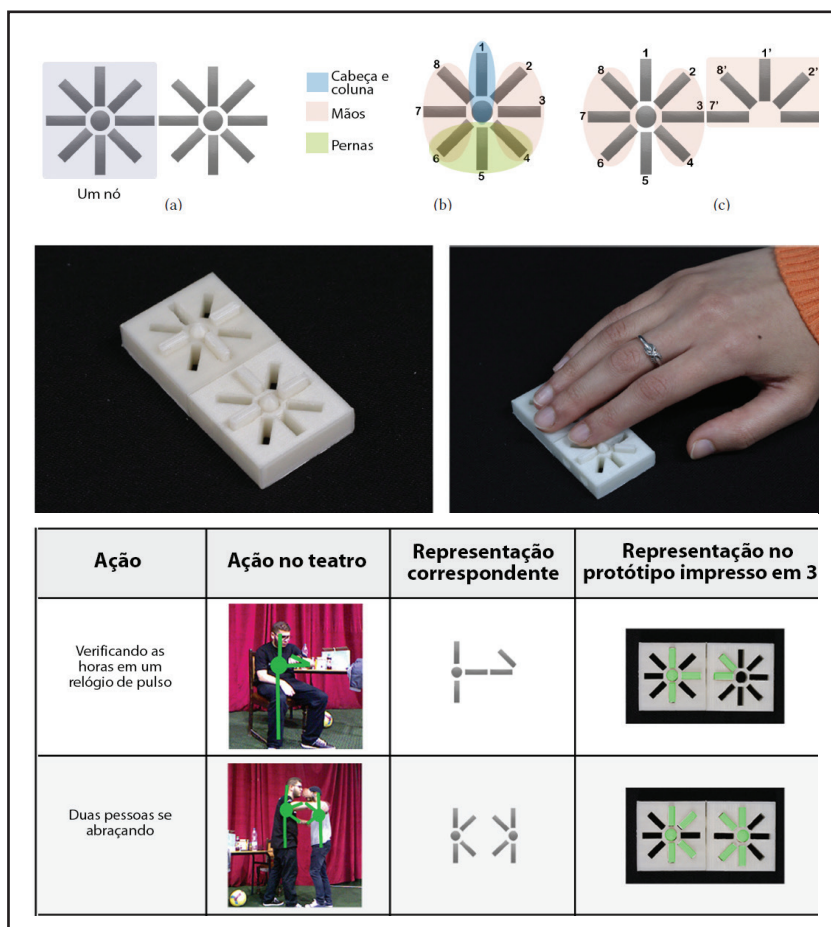
Sob a perspectiva da percepção háptica, a compreensão de artefatos culturais ocorre de maneira sequencial, fragmentada e progressiva, exigindo que o usuário construa uma representação mental global a partir de sucessivos contatos parciais com o objeto. Diferentemente da percepção visual, que possibilita uma apreensão simultânea do todo, a exploração tátil depende de estratégias sistemáticas de varredura, comparação e integração temporal das informações coletadas (Lederman; Klatzky, 1987, 2009). Nesse sentido, o design de sistemas de informação tátil no contexto cultural demanda decisões projetuais rigorosas quanto à seleção, hierarquização e fragmentação da informação, de modo a evitar sobrecarga cognitiva e favorecer a construção de imagens mentais coerentes.

A impressão 3D por FFF contribui de forma significativa para esse cenário ao permitir a materialização de réplicas táteis que enfatizam aspectos essenciais da forma, da escala e da estrutura dos objetos culturais, ao mesmo tempo em que viabiliza adaptações projetuais voltadas à legibilidade tátil, como a simplificação geométrica, o reforço de contornos e a introdução de texturas diferenciadas. Além disso, trata-se de uma tecnologia compatível com ambientes de uso coletivo, possibilitando a produção de peças robustas, seguras para o manuseio contínuo, de fácil replicação e passíveis de substituição ou atualização conforme o desgaste decorrente do uso intenso (Benhamida; Larabi; Metatla, 2024; Pistofidis et al., 2021).

Um primeiro conjunto de estudos evidencia o uso da impressão 3D como mediadora da experiência estética e narrativa em contextos artísticos, com destaque para o teatro. Benhamida, Larabi e Metatla (2024) partem do reconhecimento de que as artes cênicas dependem fortemente de componentes visuais — como gestos, posturas corporais e deslocamentos espaciais dos atores — que tendem a permanecer inacessíveis para pessoas com deficiência visual, mesmo quando recursos como a audiodescrição estão disponíveis. A partir de entrevistas formativas com pessoas cegas e com baixa visão, os autores identificam limitações recorrentes na compreensão da ação cênica e propõem alternativas não visuais para a representação desses elementos.

Como resposta projetual, o estudo desenvolve o Hapstick-Figure, um dispositivo tátil impresso em 3D concebido para traduzir gestos humanos em configurações táteis exploráveis manualmente (Figura 22).

Figura 22 - Hapstick-Figure e a dinâmica de representação de gestos humanos.



Fonte: Adaptada pelo autor de Benhamida, Larabi e Metatla (2024)

O protótipo não busca reproduzir fielmente o corpo humano, mas sintetizar poses e movimentos em uma linguagem tátil inteligível, considerando as capacidades e estratégias exploratórias do tato. O protótipo é composto por dois nós, que podem representar a interação entre duas pessoas. O bastão (1) e o ponto são sempre levantados para representar a cabeça e a coluna, respectivamente. Os movimentos das mãos podem ser representados pelos bastões: (2), (3), (4), (8), (7) e (6). Os movimentos das pernas podem ser representados pelos bastões: (4), (5) e (6). Além disso, no caso de ações de uma pessoa, os bastões (7), (8), (1), (2) e (3) do segundo nó podem ser usados como uma extensão dos movimentos das mãos do primeiro nó, sem elevar seu pino no meio (Figura 22).

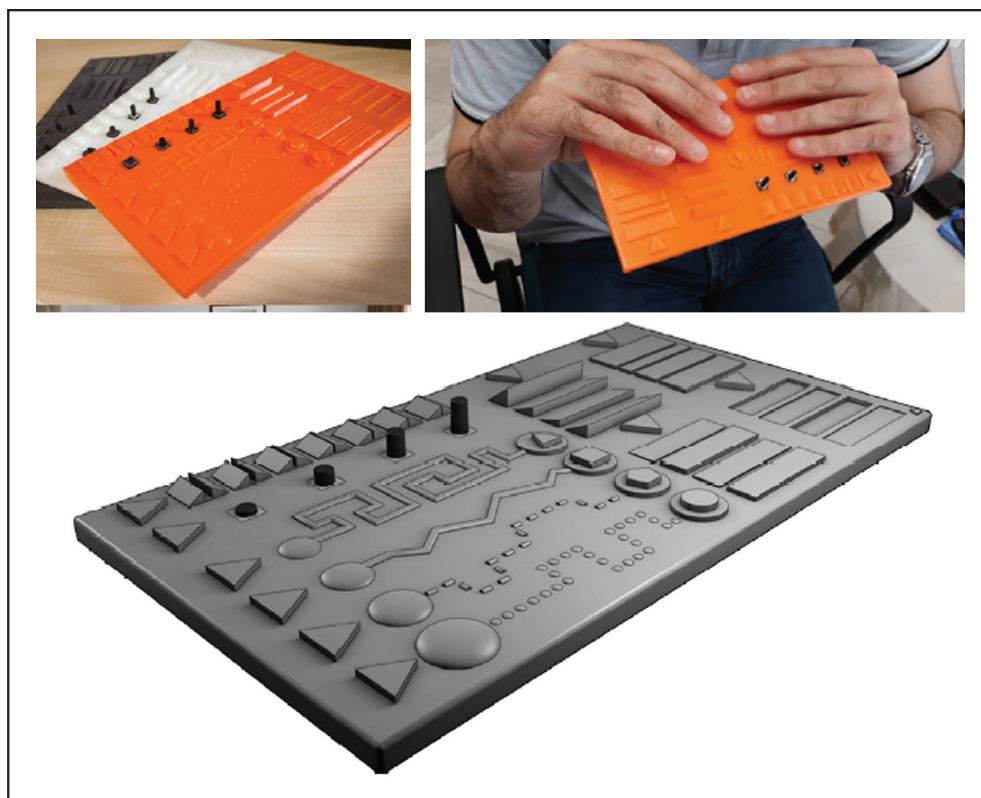
A avaliação qualitativa com usuários indica que a representação tátil de gestos, quando explorada previamente à apresentação teatral, contribui para a construção de uma imagem mental da encenação, favorecendo o acompanhamento da narrativa e reduzindo a dependência de mediações externas durante o espetáculo. O estudo evidencia, assim, o potencial da impressão 3D por FFF como ferramenta para a criação de sistemas de informação tátil que ampliam o acesso a experiências culturais fortemente visuais, sem substituir, mas complementando outras estratégias de acessibilidade.

Outro conjunto de pesquisas concentra-se no contexto museológico, no qual a impressão 3D tem sido explorada como alternativa para superar o conflito entre preservação patrimonial e acessibilidade tátil. O estudo desenvolvido por Pistofidis et al. (2021) desloca o foco das propostas meramente tecnológicas para a construção de uma base metodológica rigorosa destinada à avaliação da qualidade tátil de artefatos impressos em 3D voltados a pessoas com deficiência visual. Inserido no contexto do projeto APTOS, o artigo parte do reconhecimento de que a introdução de tecnologias interativas em ambientes museológicos só se torna efetivamente inclusiva quando baseada em critérios objetivos de legibilidade háptica, conforto exploratório e adequação cognitiva, especialmente em sistemas que combinam exploração tátil e mediação sonora.

Diferentemente de abordagens que priorizam a reprodução formal de objetos ou a incorporação imediata de recursos digitais, o estudo propõe a criação de um instrumento específico de avaliação do desempenho háptico, concebido para investigar como usuários cegos e com visão exploram, discriminam e interpretam diferentes parâmetros táteis aplicáveis a sistemas culturais acessíveis. Esse instrumento, impresso em 3D por FFF, foi projetado para concentrar, em uma única superfície, um conjunto estruturado de tarefas táteis que avaliam dimensões críticas do

design informacional, como espaçamento mínimo entre elementos, alturas e profundidades de relevo, variações de textura, padrões de linhas, diferenciação geométrica e reconhecimento de formas básicas (Pistofidis et al., 2021), como apresentado na figura 23.

Figura 23 - Instrumento para avaliação de variáveis em sistemas táteis para exposições interativas.



Fonte: Pistofidis et al. (2021)

A metodologia adotada articula dois eixos complementares: um questionário estruturado, voltado à compreensão das experiências, preferências e expectativas de pessoas com deficiência visual em contextos museológicos, e a aplicação do objeto de avaliação tátil, que permite mensurar empiricamente o desempenho exploratório dos usuários. As tarefas incorporadas ao instrumento foram concebidas para simular situações recorrentes em mapas táteis, modelos tridimensionais e superfícies interativas, como o seguimento de percursos, a identificação de pontos de interesse, a leitura de hierarquias espaciais e a distinção entre elementos adjacentes. Dessa forma, o estudo não apenas coleta percepções subjetivas, mas produz dados comparáveis sobre limites perceptivos, estratégias exploratórias e níveis de complexidade aceitáveis na leitura tátil.

Os resultados evidenciam que parâmetros frequentemente tratados de forma intuitiva em projetos de acessibilidade, como altura mínima de relevo, largura de linhas, densidade informacional e complexidade geométrica, exercem impacto direto sobre a eficiência da exploração tátil e sobre a carga cognitiva envolvida no processo de interpretação (Pistofidis et al., 2021). Nesse sentido, a principal contribuição do estudo para o campo dos sistemas de informação tátil culturais não reside apenas na proposição do conceito de *smart exhibit*¹ (exposição inteligente), mas na formulação de diretrizes projetuais baseadas em evidências empíricas, capazes de orientar o desenvolvimento futuro de artefatos interativos.

Outro ponto de grande importância no desenvolvimento de sistemas de informação para museus, diz respeito à fragmentação e hierarquização da informação. Neste sentido, o estudo de Verdiani, Charalambous e Algostino (2023), descreve o desenvolvimento de um sistema tátil impresso em 3D aplicado a uma exposição museológica, *The Earlier Mona Lisa*, em Florença. Diferentemente de abordagens centradas em uma única réplica tátil, o projeto adota o conceito de *learning desktop*, composto por múltiplos modelos tridimensionais organizados de forma sequencial e temática (Figura 24). Essa estratégia permite explorar diferentes camadas informacionais da obra, como composição, espacialidade, detalhes do fundo e variações expressivas, favorecendo uma aprendizagem transversal compartilhada entre pessoas cegas, com baixa visão e pessoas com visão.

1. O conceito de *smart exhibit* (exposição inteligente) diz respeito a ambientes expositivos que utiliza tecnologias avançadas — como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA), realidade aumentada (AR), realidade virtual (VR) e sensores de movimento — para criar experiências imersivas, interativas e personalizadas. Elas conectam o visitante ao acervo de forma dinâmica, prática e inclusiva (Pistofidis et al., 2021).

Figura 24 - Peças que compõem o conceito de learning desktop utilizado na exposição.



Fonte: Verdiani, Charalambous e Algostino (2023)

Do ponto de vista técnico e projetual, o estudo destaca o papel da impressão 3D por FFF na viabilização de modelos robustos, de fácil manutenção e adequados ao uso intensivo em ambientes expositivos. A escolha de parâmetros de impressão, como altura de camada reduzida e densidade interna elevada, é orientada pelo conforto tátil e pela durabilidade das peças. A presença de estruturas de suporte no processo de impressão FDM recebeu atenção especial. Embora essas estruturas sejam, em muitos casos, necessárias para assegurar a correta fabricação das peças e evitar falhas durante a impressão, sua utilização pode resultar em marcas irregulares na superfície final, além de demandar etapas adicionais e complexas de limpeza e acabamento. As estruturas de suporte foram então reduzidas ao mínimo, e a divisão em partes contribuiu de forma significativa para essa otimização (Figura 25). Os modelos de maior complexidade superficial foram produzidos em outros materiais à base de resina e pó mineral, sempre considerando o conforto tátil e a durabilidade no contexto expositivo.

Figura 25 - Detalhe da impressão das peças em partes e montagem.

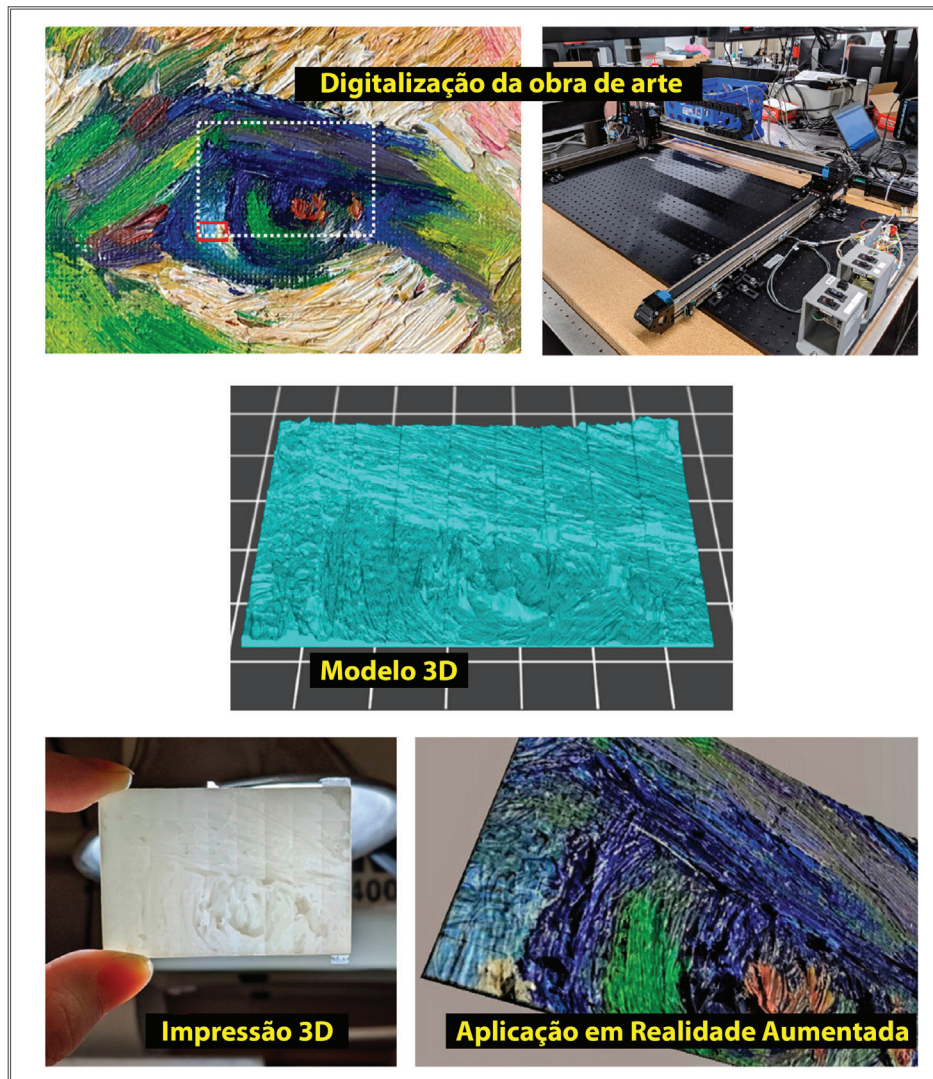


Fonte: Verdiani, Charalambous e Algostino (2023)

Os autores também realizaram testes táteis realizados com usuários cegos ao longo do processo que permitiram ajustar níveis de detalhamento e acabamento superficial, reforçando a importância da validação empírica como parte constitutiva do projeto de sistemas de informação tátil no campo cultural.

Complementarmente, Zhou et al. (2023) amplia a discussão ao integrar processos avançados de digitalização tridimensional à produção de réplicas táteis para museus. O estudo apresenta o uso de Tomografia de Coerência Óptica em escala macroscópica (macro-OCT), um exame oftalmológico de alta resolução que cria imagens transversais, tridimensionais e detalhadas das camadas da retina e do nervo óptico através de ondas de luz. A tecnologia é perfeita para capturar não apenas a topografia superficial de obras de arte, mas também informações subsuperficiais, como camadas de tinta e marcas de pinceladas (Figura 26). A conversão desses dados em modelos impressos em 3D permite a exploração háptica de características tradicionalmente inacessíveis, promovendo uma experiência estética baseada no toque.

Figura 26 - Processo de digitalização e impressão utilizando macro-OCT.



Fonte: Zhou et al. (2023)

Os autores destacam que a impressão 3D das superfícies digitalizadas pode ser adaptada conforme os objetivos expositivos, por meio da ampliação da escala vertical dos relevos, da simplificação geométrica ou da escolha de materiais que favoreçam a resistência e a legibilidade tátil. Embora o estudo aponte limitações relacionadas à fragilidade de detalhes muito finos, essas restrições são mitigadas por ajustes de espessura e estratégias de pós-processamento, reforçando a flexibilidade projetual da manufatura aditiva no contexto cultural.

Por fim, estudos voltados à otimização de representações táteis bidimensionais e tridimensionais reforçam a importância de critérios objetivos de legibilidade e eficiência informacional. Tzvetkova-Arsova et al. (2022) e Wabiński, Mościcka e Kuźma (2021) demonstram que a im-

pressão 3D permite explorar variáveis táteis, como altura, largura de contornos e diferenciação volumétrica, de forma mais sistemática do que técnicas tradicionais de produção de mapas e imagens em relevo. Os resultados indicam que a adoção de múltiplos níveis de relevo e a hierarquização clara dos elementos contribuem para maior velocidade de reconhecimento e menor esforço cognitivo durante a exploração tátil.

Em síntese, os estudos analisados evidenciam que a impressão 3D por FFF desempenha um papel estratégico na produção de sistemas de informação tátil no campo da cultura e do lazer, ao possibilitar a tradução de conteúdos visuais complexos em estruturas táteis compreensíveis, robustas e informacionalmente eficazes. Mais do que reproduzir objetos, essas iniciativas demonstram a necessidade de abordagens projetuais que considerem a percepção háptica como eixo central, articulando decisões formais, técnicas e informacionais desde as etapas iniciais do projeto. Dessa forma, a impressão 3D atua como ferramenta de mediação cultural capaz de promover experiências mais inclusivas, autônomas e significativas para pessoas com deficiência visual.

4.3.3. Orientação e mobilidade


No campo da orientação e mobilidade, a impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF) tem se consolidado como uma tecnologia estratégica para o desenvolvimento de sistemas de informação tátil voltados ao apoio da navegação, do deslocamento autônomo e da compreensão espacial por pessoas cegas e com baixa visão. Esses sistemas atuam como mediadores entre o usuário e o ambiente construído, ao traduzirem estruturas espaciais complexas — como redes viárias, hierarquias de percurso, relações de proximidade e pontos de referência — em representações táteis passíveis de exploração sistemática e cognitivamente organizada.

































































Diferentemente dos mapas táteis tradicionais baseados predominantemente em linhas em relevo e simbologias bidimensionais abstratas, pesquisas recentes indicam que a incorporação de elementos volumétricos tridimensionais favorece a construção de representações mentais mais consistentes do espaço. A tridimensionalidade possibilita explicitar relações de escala, altura, profundidade e continuidade espacial, aspectos centrais para a orientação que tendem a ser sub-representados em mapas bidimensionais. Além disso, o uso de volumes contribui para o reconhecimento de marcos espaciais e para a diferenciação funcional entre elementos do ambiente, como edificações, áreas abertas, obstáculos e pontos de interesse.

Mapas táteis baseados exclusivamente em simbologias bidimensionais abstratas, compostas por linhas em relevo, pontos e códigos convencionais, tendem a impor elevada demanda cognitiva aos usuários, especialmente quando aplicados a ambientes complexos, como edificações públicas, áreas urbanas e sistemas de circulação interna. Holloway, Butler e Marriott (2023) evidenciam esse problema ao analisar mapas táteis tradicionais empregados em contextos urbanos e de lazer, nos quais a leitura depende fortemente da consulta constante à legenda e da memorização de códigos simbólicos pouco intuitivos. Os autores demonstram que essa estratégia compromete a fluidez da leitura espacial e dificulta a identificação rápida de elementos relevantes para a orientação, como percursos, acessos, áreas de circulação e pontos de referência.

Como alternativa a esse modelo, o estudo propõe a utilização de ícones táteis tridimensionais representacionais (TactIcons), produzidos por impressão 3D (Figura 27), como forma de tornar a informação espacial mais direta e imediatamente reconhecível.

Figura 27 - Teste de toque em ícones táteis impressos em 3D para mapas de parques, playgrounds e lojas.



	PARQUES E PLAYGROUNDS	LOJAS
IDENTIFICÁVEL	 Esporte  Ciclovía  Ponte  Bebedouro	 Livros  Joalheiro  Café  Estacionamento  Fruta
	 Entrada  Fonte  Piquenique  Rotunda	 Portão da frente  McDonald's  Artigos para casa  Música
	 Assentos  Degraus  Escorregador  Banheiros	 Sorvete  Supermercado  Veterinário/pet shop  Restaurante
	 Árvores  Túnel	 Sapataria  Móveis  Confeitaria
APRENDÍVEL	 Construção  Churrasco  Carro  Caixa de areia  Flores	 Bebidas  Imobiliária  Médico  Salão de beleza  Presentes
	 Lago  Esporte  Mesas  Lixo  Balanço	 Padaria  Frango  Donut  Ferragens  Correio
	 Skate  Escalada  Jardinagem  Água	 Banco  Álcool  Açougue  Computadores  Eletrônicos
		 Peixe  Mercearia  Farmácia  Pizza  Brinquedos

A adoção de formas volumétricas associadas a referências do cotidiano possibilita que o significado do elemento seja apreendido de maneira mais rápida durante a exploração háptica, reduzindo a dependência de legendas e a necessidade de decodificação simbólica abstrata. Os testes conduzidos com usuários cegos congênitos e leitores táteis experientes indicam que a eficácia desses ícones está diretamente relacionada a decisões projetuais envolvendo escala, volumetria, diferenciação formal e clareza tátil, aspectos que são potencializados pelas possibilidades técnicas da impressão 3D por FFF.

Essa relação entre tridimensionalidade, legibilidade tátil e construção de representações mentais do espaço também é aprofundada por Kaplan e Pyayt (2022), que investiga o desenvolvimento de mapas táteis arquitetônicos impressos em 3D para apoio à orientação em ambientes internos. O estudo parte do pressuposto de que, para pessoas cegas, a navegação espacial depende menos da representação geométrica exata do ambiente e mais da identificação clara de elementos estruturantes, como percursos contínuos, mudanças de direção, transições espaciais e variações de nível. Nesse sentido, os autores introduzem o conceito de escala contaminada, amplamente adotado no design de mapas táteis, no qual determinadas proporções geométricas são intencionalmente distorcidas para favorecer a legibilidade e a compreensão háptica.

A aplicação desse princípio permite, por exemplo, o alargamento de corredores estreitos, o aumento da distância entre paredes paralelas ou a amplificação de elementos de circulação, de modo a garantir espaço suficiente para a exploração manual e evitar ambiguidades perceptivas. Com base no feedback dos participantes, foi possível desenvolver uma codificação específica para elementos arquitetônicos como paredes, portas, escadas e rampas, além de reformular a lógica geral de representação do mapa, passando a priorizar caminhos táteis contínuos como elemento central da leitura espacial (Quadro 3).

Quadro 3 - Codificação para elementos arquitetônicos em mapas táteis para ambientes internos.

Codificação	Representação
	Dentro da Sala/ Ponto de Interesse
	Porta (Manual)
	Porta automática (Pirâmide) com transição do interior para o exterior
	Transição do interior para o exterior. Para ser usada com a codificação de porta
	Escadas e/ou rampa (com hemisférios é a rota de evacuação)
	Caminho (Navegação/Rota de viagem)
	Parede
	Área segura
	Indicador de canto esquerdo / canto inferior esquerdo do mapa
	Pontos da rota de evacuação (devem estar na codificação do caminho) Não é braille

Fonte: Adaptado pelo autor de Kaplan e Pyayt (2022)

Os resultados apresentados no artigo demonstram que mapas produzidos com esse tipo de ajuste são mais facilmente interpretados pelos usuários, favorecendo a identificação de rotas, co-

nexões espaciais e pontos de decisão durante a navegação. A impressão 3D por FFF é apontada como tecnologia particularmente adequada para esse tipo de abordagem, uma vez que possibilita controle preciso sobre alturas, larguras e espaçamentos, além de permitir ajustes rápidos e interativos com base no feedback dos usuários.

A exploração de sistemas orientacionais, no campo da percepção háptica, ocorre de forma sequencial e progressiva, exigindo do usuário a integração temporal das informações coletadas por meio do toque. Nesse contexto, a organização hierárquica da informação, a simplificação geométrica e a diferenciação clara entre camadas tornam-se decisões projetuais centrais para reduzir a carga cognitiva e favorecer a eficiência da leitura espacial. A impressão 3D por FFF contribui diretamente para esse processo ao permitir controle preciso sobre parâmetros como altura de relevo, separação entre camadas, espessura de contornos e robustez estrutural, possibilitando ajustes iterativos com base no desempenho dos usuários.

Nesse cenário, o estudo desenvolvido por Barvir, Vondrakova e Brus (2021) aprofunda a integração entre mapas táteis físicos impressos em 3D e sistemas interativos multimodais, por meio da tecnologia *TouchIt3D*². Os autores partem do reconhecimento de que, embora mapas táteis convencionais sejam fundamentais para a orientação de PcDVs, apresentam limitações significativas quando se busca ampliar a quantidade de informação disponível, especialmente devido às restrições físicas do braille e aos custos elevados de soluções interativas tradicionais. Para enfrentar essas limitações, o trabalho propõe um fluxo de produção semi-automatizado que integra dados do *OpenStreetMap*³, modelagem tridimensional e impressão 3D por FFF, associado a um sistema de audiodescrição acionada pelo toque.

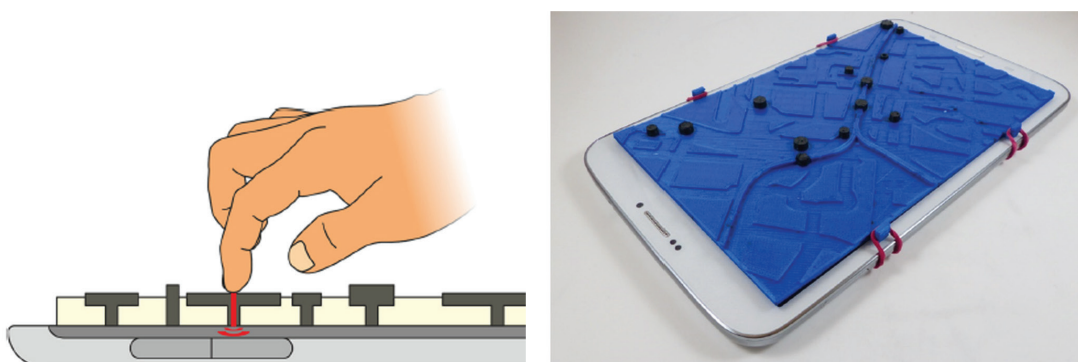
O princípio central do sistema consiste na combinação de um mapa tátil físico com a tela capacitiva de um dispositivo móvel, permitindo que elementos impressos com material condutivo acionem descrições sonoras quando tocados pelo usuário (Figura 28). Dessa forma, o mapa concentra-se na representação espacial e na exploração háptica, enquanto informações adicionais são transferidas para o canal auditivo, reduzindo a sobrecarga tátil e ampliando a

2. A tecnologia *TouchIt3D* baseia-se na integração entre objetos tridimensionais — como mapas táteis, modelos físicos e dispositivos de controle — e dispositivos móveis, como tablets e smartphones, por meio da combinação de filamentos condutores e não condutores incorporados ao processo de fabricação. Cada objeto impresso é associado a um layout específico de aplicação móvel, capaz de reconhecer as interações realizadas pelo usuário durante a exploração tátil e, a partir dessas entradas, acionar previamente ações ou conteúdos informacionais, conforme os gestos e pontos de contato estabelecidos sobre o modelo (Bavir; Vondrakova; Brus, 2019).

3. O *OpenStreetMap* (OSM) consiste em uma iniciativa colaborativa de alcance global voltada à construção de uma base cartográfica livre e editável, na qual voluntários contribuem com a coleta, verificação e inserção de dados geoespaciais — como vias, edificações, equipamentos urbanos e elementos de interesse — a partir do uso de dispositivos GPS, conhecimento local e imagens de satélite. Os dados gerados são disponibilizados de forma aberta, permitindo seu uso, modificação e redistribuição por qualquer usuário.

acessibilidade informacional. Essa estratégia evidencia uma compreensão ampliada do sistema de informação tátil, no qual o artefato físico não atua de forma isolada, mas integrado a uma ecologia multimodal de interação.

Figura 28 - Princípio de funcionamento da tecnologia *TouchIt3D*.



Fonte: Barvir, Vondrakova e Brus (2021)

Do ponto de vista projetual, o estudo demonstra que a definição do conteúdo do mapa deve estar diretamente relacionada ao contexto de uso e ao perfil do usuário. A partir de entrevistas e testes com pessoas cegas, os autores identificam diferentes demandas informacionais para situações de deslocamento a pé, uso de transporte público e turismo, o que resulta na proposição de mapas com distintos níveis de complexidade e hierarquização espacial. Mapas mais simples, com menor número de camadas e foco em vias e pontos essenciais, mostraram-se mais eficazes para tarefas de orientação básica, enquanto mapas mais complexos foram considerados adequados apenas para usuários com maior experiência em leitura tátil.

A pesquisa também evidencia a importância da correspondência entre a organização vertical das camadas e a lógica espacial do ambiente real (Quadro 4). Os participantes relataram maior facilidade de interpretação quando as alturas dos relevos respeitavam a hierarquia percebida no espaço urbano, como vias em níveis inferiores, edificações em níveis intermediários e pontos de interesse (PIs) em níveis mais elevados. Esse achado reforça a relevância da tridimensionalidade não apenas como recurso formal, mas como estratégia cognitiva alinhada à construção de mapas mentais⁴.

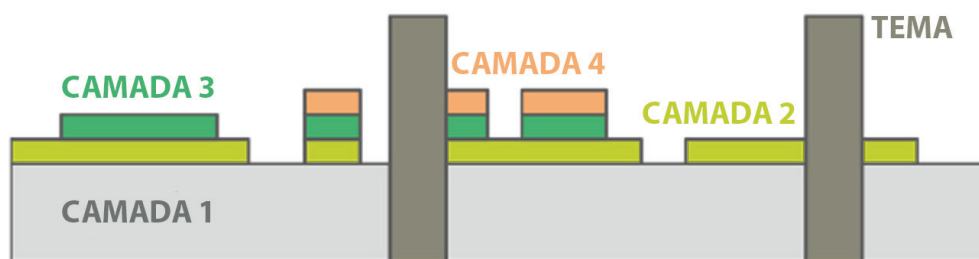
4. Na orientação e mobilidade de pessoas com deficiência visual, os mapas mentais correspondem a representações cognitivas do espaço construídas a partir de experiências táteis, auditivas e cinestésicas, organizadas hierarquicamente conforme pontos de referência e relações espaciais relevantes, podendo ser transpostas para representações gráficas e táteis (KOZEL, 2006)

Quadro 4 - Organização vertical das camadas na hierarquização das informações.

TEMA	0 - 2 mm	2 - 2,5 mm	2,5 - 3 mm	2,5/3 - 3,5 mm	0 - 5 mm
Transporte público	Ruas	Espaços abertos e quarteirões	---	Linha férrea	PIs
Caminhada	Ruas	Espaços abertos	---	Construções	PIs
Turismo	Ruas	Espaços abertos	Florestas/ parques	Construções	PIs

Fonte: Adaptado pelo autor de Barvir, Vondrakova e Brus (2021).

Figura 29 - Exemplo de distribuição das camadas em um mapa do tipo turismo: camada 1= ruas, camada 2= espaços abertos, camada 3= florestas/ parques, camada 4= construções, e tema= camada temática de PIs.



Fonte: Adaptado pelo autor de Barvir, Vondrakova e Brus (2021).

Outro aspecto relevante diz respeito à integração entre interatividade e exploração háptica. Os testes indicaram que a ativação imediata de audiodescrição durante a exploração inicial do mapa pode gerar confusão, especialmente quando o usuário utiliza ambas as mãos simultaneamente. A solução adotada, o acionamento da descrição sonora após um tempo mínimo de contato contínuo com o elemento interativo, revela a necessidade de sincronizar cuidadosamente os ritmos da percepção tátil e auditiva. Essa observação destaca que a eficiência de sistemas multimodais depende não apenas da presença de múltiplos canais informacionais, mas da articulação temporal e cognitiva entre eles.

Complementarmente, estudos voltados à avaliação da qualidade informacional de mapas táteis impressos em 3D, como o trabalho de Wabiński, Mościcka e Kuźma (2021), reforçam que a variável “altura” assume papel central na comunicação tátil tridimensional. Ao comparar mapas tradicionais em relevo e mapas produzidos por impressão 3D FFF, os autores demonstram que a possibilidade de múltiplos níveis de relevo amplia significativamente a densidade infor-

macional sem comprometer a legibilidade, desde que acompanhada de critérios rigorosos de hierarquização e diferenciação formal. Esses resultados corroboram a noção de que a impressão 3D não apenas reproduz mapas existentes, mas expande o repertório projetual disponível para a cartografia tátil.

De modo geral, os estudos analisados indicam que a aplicação da impressão 3D por FFF na produção de sistemas de informação tátil para orientação e mobilidade exige uma abordagem centrada no usuário, na qual decisões técnicas e formais estejam diretamente relacionadas às estratégias de exploração háptica e às demandas cognitivas do deslocamento autônomo. A tecnologia se mostra particularmente eficaz quando empregada não apenas como meio de fabricação, mas como parte integrante do processo projetual, permitindo experimentação, validação empírica e refinamento contínuo das soluções desenvolvidas.

Ao integrar tridimensionalidade, interatividade e produção digital acessível, os sistemas de informação tátil impressos por FFF contribuem para ampliar a autonomia, a segurança e a compreensão espacial de PcDVs em ambientes urbanos e culturais. Nesse sentido, a impressão 3D consolida-se como uma tecnologia-chave para o avanço de práticas inclusivas no campo da orientação e mobilidade, ao possibilitar a criação de sistemas informacionais mais flexíveis, atualizáveis e alinhados às especificidades da percepção háptica.

MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Características do estudo e cuidados éticos

O presente estudo adota um delineamento experimental, de abordagem predominantemente quantitativa, estruturado em dois experimentos complementares voltados à investigação da influência de materiais empregados na impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF) na percepção tátil de texturas. Tal delineamento justifica-se pela necessidade de isolar e manipular variáveis específicas — em especial o tipo de material, a densidade da textura e a dimensão dos pontos — de modo a observar seus efeitos sobre o desempenho perceptivo em tarefas táteis, considerando tanto situações controladas de laboratório quanto um contexto aplicado, mais próximo das condições reais de uso de sistemas de informação tátil.

A opção pela abordagem quantitativa fundamenta-se na possibilidade de mensuração objetiva do desempenho dos participantes, por meio de indicadores de eficácia e eficiência, bem como na aplicação de procedimentos estatísticos capazes de evidenciar padrões de similaridade e distinção perceptiva entre os estímulos. Esse enquadramento metodológico está alinhado a pesquisas no campo da percepção háptica que buscam compreender de que modo propriedades físico-mecânicas das superfícies influenciam respostas sensoriais observáveis, especialmente em investigações que articulam design, acessibilidade e sistemas de informação tátil (Culbertson; Schorr; Okamura, 2018).

O primeiro experimento, de caráter exploratório, consistiu em testes de ordenação tátil de amostras produzidas com três materiais distintos — PLA, PETG e TPU —, variando sistematicamente a densidade das texturas e o espaçamento entre os pontos que compõem os padrões

táteis. Essa etapa teve como finalidade verificar se as amostras desenvolvidas apresentavam diferenças perceptíveis e estatisticamente significativas no que se refere à discriminação tátil das texturas. Ao empregar tarefas de ordenação, o experimento permitiu avaliar a saliência relativa dos estímulos e a sensibilidade dos participantes às variações geométricas introduzidas, constituindo uma base analítica para a comparação entre materiais e configurações.

O segundo experimento, de natureza aplicada, utilizou as mesmas amostras em um contexto simulado de uso, configurado como um mapa tátil fictício. Nessa etapa, a tarefa de busca por uma amostra-alvo exigiu não apenas a discriminação tátil dos padrões, mas também o acionamento de processos cognitivos associados à memória, à orientação espacial e à organização das estratégias exploratórias. Esse procedimento possibilitou avaliar a funcionalidade dos materiais e das configurações geométricas em uma situação mais complexa e próxima da realidade de uso de sistemas de informação tátil, especialmente no que diz respeito à leitura e interpretação por pessoas com deficiência visual.

A condução dos experimentos contemplou dois grupos distintos: um grupo controle, composto por participantes com visão sem treinamento tátil prévio, e um grupo experimental, formado por pessoas com deficiência visual, com diferentes perfis de experiência na exploração háptica. Essa configuração permitiu não apenas examinar o impacto das variáveis materiais e geométricas, mas também observar de que modo o repertório perceptivo e as estratégias exploratórias influenciam o desempenho tátil. No caso do grupo experimental, em função das limitações inerentes ao recrutamento de PcDVs, adotou-se um delineamento de estudo clínico randomizado, com aplicação de procedimentos de crossover e washout, buscando minimizar efeitos de aprendizado e aumentar a robustez das comparações entre condições experimentais.

O controle experimental foi reforçado por decisões metodológicas que visaram reduzir vieses perceptivos e assegurar a comparabilidade entre as condições testadas, como a padronização dimensional das amostras, o uso de filamentos de coloração uniforme, minimizando pistas visuais residuais, e a definição de parâmetros geométricos coerentes com características ergonômicas da exploração manual. A escolha dos materiais também foi intencional, contemplando classes distintas de comportamento mecânico, o que permitiu analisar comparativamente os efeitos da rigidez, da estabilidade dimensional e da deformabilidade na percepção tátil de texturas.

Por envolver a participação de seres humanos adultos e independentes, o estudo foi conduzido em conformidade com os pressupostos éticos estabelecidos pela Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde (Brasil, 2016), que regulamenta pesquisas em Ciências Humanas e Sociais. Além disso, foi elaborado e implementado um plano de gestão de dados da pesquisa (Apêndice II), com o objetivo de garantir o armazenamento seguro, a confidencialidade das informações coletadas, o controle de acesso aos dados sensíveis e a rastreabilidade dos procedimentos analíticos, em consonância com princípios de integridade científica e boas práticas de pesquisa. Todos os participantes foram devidamente informados sobre os objetivos, procedimentos e implicações do estudo, por meio da aplicação do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), assegurando a voluntariedade, o anonimato e a integridade dos envolvidos. O projeto foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa e aprovado sob o parecer nº 7.454.054 (Anexo II).

5.2. Amostragem

Participaram do estudo dois grupos, o primeiro foi o grupo de controle (comparação), composto por 63 indivíduos adultos, universitários, matriculados em cursos de graduação da Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, da Unesp do campus de Bauru/SP, garantindo a randomização nos experimentos. O número elevado de participantes nesse grupo visou garantir a robustez estatística, aumentar a precisão das análises comparativas e viabilizar a randomização dos testes (ver tópico 5.4.2 - Quadro 6), assegurando a diversidade perceptiva dentro de uma população com repertório visual preservado. Os critérios de inclusão para este grupo foram: indivíduos videntes, que não tenham qualquer tipo de treinamento tátil; e que não tenham tido contato visual anterior com as texturas empregadas no presente estudo.

Enquanto que o segundo, denominado grupo experimental (intervenção), foi composto por 9 indivíduos com cegueira congênita, adquirida e baixa visão do Projeto Vida Iluminada na cidade de Lençóis Paulista/SP, onde os seguintes critérios foram observados para análise dos dados: fluência em braille, experiência prévia com mapas ou outros sistemas de informação táteis e, para o caso dos participantes com deficiência adquirida, a data em que perderam a visão. O tamanho da amostra foi definido respeitando as limitações inerentes ao recrutamento dessa população específica e a randomização necessária para aplicação dos experimentos propostos (ver tópico 5.4.3 - Quadro 7).

O recrutamento de pessoas com deficiência visual (PcDVs) constituiu uma das etapas mais sensíveis e complexas da presente pesquisa, evidenciando desafios frequentemente relatados em investigações que envolvem públicos específicos. Inicialmente, foram estabelecidos diversos contatos com instituições localizadas no município de Bauru/SP, com o objetivo de facilitar os deslocamentos dos participantes e viabilizar a realização da coleta de dados. Contudo, diante da ausência de retorno institucional, tornou-se necessário ampliar o recorte territorial da pesquisa, estendendo a busca por parcerias às cidades de Marília/SP, Jaú/SP e Lençóis Paulista/SP, onde a coleta foi, de fato, concretizada.

A proposta inicial previa a participação de um número mais amplo de voluntários, de modo a minimizar a necessidade de randomização das condições experimentais no grupo experimental. No contexto do Projeto Vida Iluminada, que atende aproximadamente vinte pessoas com deficiência visual, foram realizadas visitas preliminares com a finalidade de apresentar os objetivos do estudo e favorecer a construção de um vínculo de confiança com os participantes. Ainda assim, a coleta foi realizada com apenas nove voluntários, em grande medida em função de manifestações de insegurança, receio de não corresponder às expectativas da pesquisa e medo de não conseguir concluir as tarefas propostas. Esse cenário reforça a compreensão de que, em pesquisas com públicos em situação de vulnerabilidade, aspectos relacionais — como empatia, escuta e sensibilidade às experiências prévias dos participantes — assumem papel central e devem ser considerados como parte integrante do delineamento metodológico.

5.3 Equipamentos e instrumentos de pesquisa

Para a realização da pesquisa, foram utilizados equipamentos e instrumentos de pesquisa. Como equipamentos, empregaram-se câmera fotográfica com tripé, notebook, amostras impressas em 3D, tags numéricas para identificação dos participantes, plataforma de testes, base para mapa tátil e venda para os olhos dos participantes videntes. Como instrumentos de pesquisa, utilizaram-se ficha com instruções para o avaliador, entrevista estruturada e Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

5.3.1. Amostras impressas em 3D

Foram desenvolvidas e confeccionadas 270 amostras, com dimensões de 40 mm × 40 mm

de área de contato e 10 mm de altura, contemplando cinco diferentes densidades de textura e três variações na dimensão dos pontos. As amostras foram impressas utilizando três materiais de filamento — PLA, PETG e TPU — selecionados de forma intencional por representarem classes distintas de comportamento mecânico e tátil amplamente empregadas na impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF).

O PLA (ácido polilático) caracteriza-se por elevada rigidez, boa estabilidade dimensional e facilidade de processamento, sendo amplamente adotado na produção de sistemas de informação tátil e modelos educacionais devido à sua previsibilidade de impressão e baixo custo operacional. Enquanto que o PETG (politereftalato de etileno modificado com glycol), por sua vez, apresenta propriedades intermediárias entre rigidez e flexibilidade, maior resistência mecânica e térmica em comparação ao PLA, além de superfície menos frágil, o que permite investigar como variações sutis de deformabilidade e atrito influenciam a percepção tátil (Santana et al., 2018). Já o TPU (poliuretano termoplástico), por se tratar de um material flexível e elastomérico, introduz um comportamento mecânico contrastante, possibilitando a análise do impacto da deformação, absorção de energia e resposta elástica na discriminação tátil de texturas (Del Toro et al., 2025).

A escolha desse conjunto de materiais fundamenta-se em estudos já citados que indicam que propriedades como rigidez, elasticidade, fricção e resposta mecânica ao toque exercem influência direta sobre a percepção háptica e o desempenho em tarefas de exploração tátil, especialmente em contextos de design inclusivo e sistemas de informação tátil impressos em 3D (Lederman; Klatzky, 2009; Okamoto; Nagano; Yamada, 2013; Gual; Puyuelo; Lloveras, 2015).

Além disso, a seleção dos filamentos considerou aspectos técnicos relacionados à viabilidade de impressão em ambientes educacionais e laboratoriais não especializados. Como as impressoras FFF de entrada no mercado são abertas e possuem a temperatura máxima do bico extrusor próximo à 260°C, o PLA, o PETG e o TPU são materiais amplamente disponíveis no mercado, compatíveis com este tipo de impressoras. Embora o TPU exija maior controle de parâmetros e apresente maior complexidade de impressão, sua inclusão foi considerada relevante para ampliar o espectro de propriedades materiais analisadas e refletir situações reais de projeto em que diferentes comportamentos mecânicos são desejáveis (Slocumb, 2025).

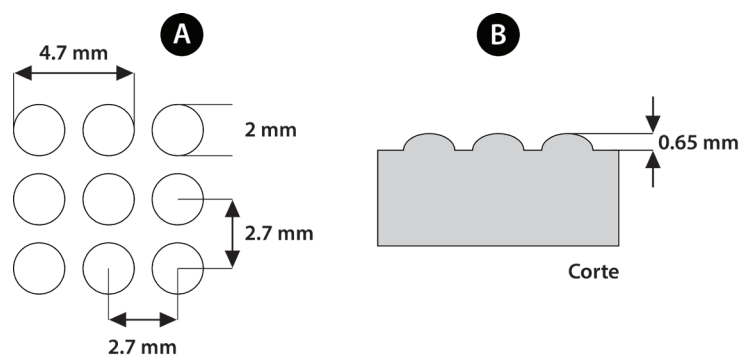
Outros materiais que podem ser impressos por FFF como o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e o ASA (Acrilonitrila Estireno Acrilato) não foram escolhidos na seleção realizada, pois exigem impressoras fechadas, com custo e complexidade maiores, devido à necessidade de

temperatura estável durante a impressão. Ambos liberam vapores com odor forte e tóxico durante o processo de impressão, que deve ocorrer em ambientes bem ventilados (Slocumb, 2025).

No que se refere à cor das amostras, optou-se pela utilização do filamento branco como estratégia de controle experimental. Considerando que parte dos participantes pode apresentar resíduo visual, a escolha por uma cor neutra e de alto valor de luminância teve como objetivo minimizar contrastes cromáticos ou visuais que pudessem oferecer vantagens indevidas durante a execução das tarefas. Estudos em percepção sensorial indicam que pistas visuais residuais, como cor e contraste, podem influenciar o desempenho em atividades predominantemente táteis, especialmente em indivíduos com baixa visão, interferindo na interpretação dos estímulos e nos resultados experimentais. Dessa forma, a adoção da cor branca contribuiu para reduzir possíveis vieses visuais e assegurar que o desempenho observado estivesse associado às características táteis das amostras, e não a estímulos visuais secundários (Goldstein, 2018; Gentaz; Hatwell, 2004).

As texturas foram desenvolvidas a partir das especificações apresentadas pela norma técnica da Resolução nº 4/SEHAB/CPA (São Paulo, 2000), que diz respeito à aplicação da linguagem braille em botoeiras de elevadores (Figura 30). O sistema braille foi escolhido com base para as texturas pois é amplamente utilizado por PcDVs para leitura e escrita, além de apresentar dimensões cuidadosamente projetadas para otimizar a percepção tátil, tornando-se uma referência consolidada em acessibilidade tátil. Essas dimensões, padronizadas internacionalmente pela ISO 17049:2013, consideram a sensibilidade dos dedos e os limites anatômicos da percepção tátil, garantindo ergonomia, funcionalidade e padronização.

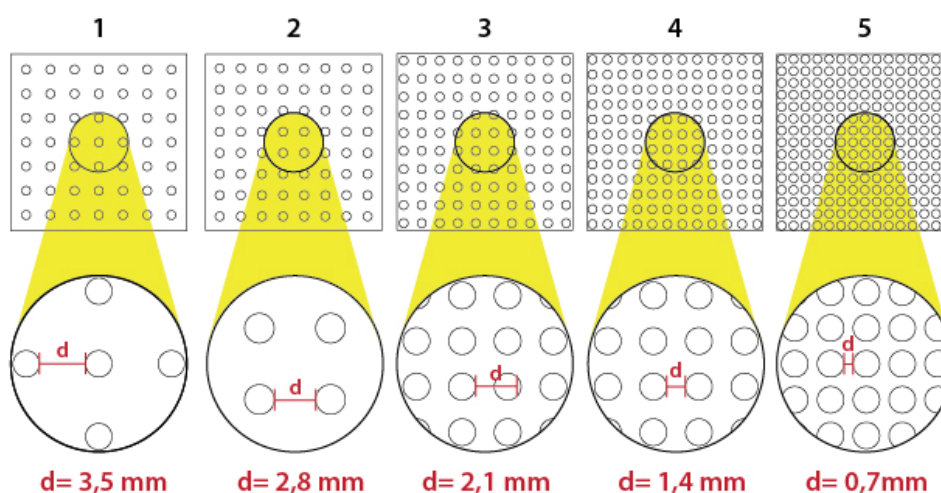
Figura 30 - Padrão braille Resolução nº 4/SEHAB/CPA (2000) - Dimensões entre os pontos (A) e altura dos pontos (B).



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

As densidades das texturas foram definidas pelo aumento das distâncias entre os pontos (Figura 31). Na amostra de número 5 seguiu-se a distância padrão entre pontos de 0,7 mm, especificada pela Resolução nº 4/SEHAB/CPA (2000), para as demais amostras a distância entre os pontos foi aumentada em 0,7 mm a partir da distância da amostra anterior. Assim as amostras foram numeradas de 1 a 5, onde a de número 1 apresenta a menor densidade da textura (3,5 mm de intervalo entre os pontos), enquanto que a número 5 apresenta a maior densidade (0,7 mm de intervalo entre os pontos).

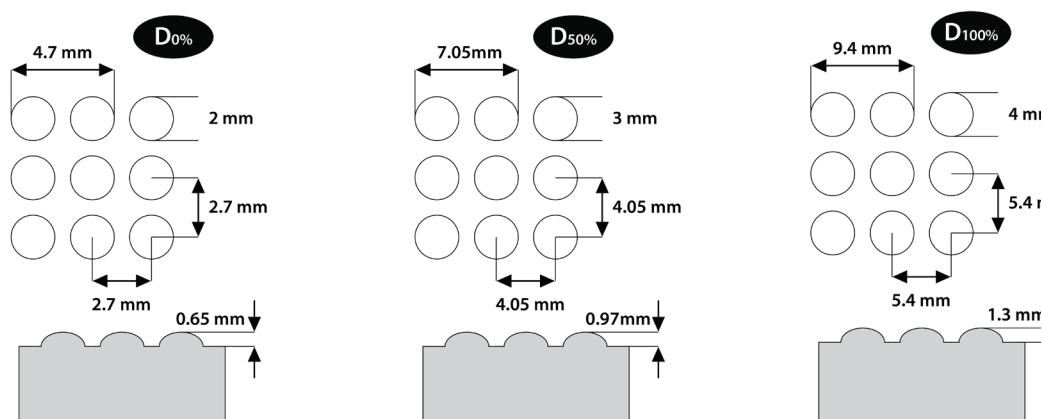
Figura 31 - Amostras impressas em 3D: detalhamento das densidades das texturas.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Em relação à variação na dimensão dos pontos, foram compostos 3 grupos (“D0%”, “D50%” e “D100%”), onde D0% seguiu as medidas nas especificações padrão da Resolução nº 4/SEHAB/CPA (São Paulo, 2000), enquanto que os grupos D50% e D100% tiveram as medidas aumentadas proporcionalmente em 50% e 100% em relação ao grupo D0% respectivamente (Figura 32).

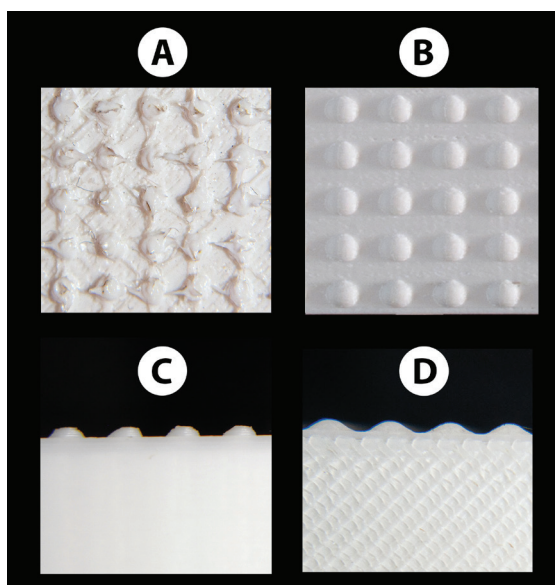
Figura 32 - Variação das dimensões dos pontos com os grupos D0%, D50% e D100%.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A variação na dimensão dos pontos permitiu avaliar a capacidade de reprodução de detalhes com os materiais selecionados, isso porque segundo Zolek-Tryznowska, Brzezińska e Bednarczyk (2022) a impressão do braille por FFF apresenta variações quanto às dimensões finais dos pontos impressos, especialmente no que diz respeito às contaminações e deformações que podem ocorrer a depender do material utilizado, além da limitação relacionada à altura da camada (Figura 33).

Figura 33 - Variação dimensional e deformações na impressão do braille por FFF.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

As Figuras 33A e 33B ilustram as diferenças quanto à ocorrência de contaminações e deformações na impressão da amostra de TPU D0%. Na Figura 33A, a impressão foi realizada com a base da amostra alinhada horizontalmente à mesa de impressão, o que permite observar deformações relacionadas ao deslocamento do bico de impressão ao longo do processo. Já na Figura 33B, a impressão ocorreu com a base da amostra alinhada verticalmente à mesa, configuração que concentra as deformações causadas pelo bico de impressão no interior da peça, resultando em uma amostra praticamente isenta de deformações superficiais.

Por sua vez, as Figuras 33C e 33D evidenciam variações na geometria do ponto impresso, também associadas ao alinhamento da base da amostra durante o processo de impressão. Na Figura 33C, observa-se, no desenho do ponto, o serrilhamento provocado pela sobreposição das camadas de impressão quando a base da amostra é posicionada horizontalmente em relação à mesa. Em contraste, na Figura 33D, o desenho do ponto apresenta-se mais suavizado e mais próximo do modelo original, em decorrência do alinhamento vertical da base da amostra em relação à mesa de impressão.

Dessa forma, na produção das amostras os parâmetros de impressão foram otimizados a fim de obter a melhor qualidade possível das texturas (Quadro 5), considerando as limitações de cada material selecionado, portanto todas as peças foram impressas com altura de camada no valor de 0,1 mm, com a base das amostras posicionadas no sentido vertical em relação à mesa de impressão.

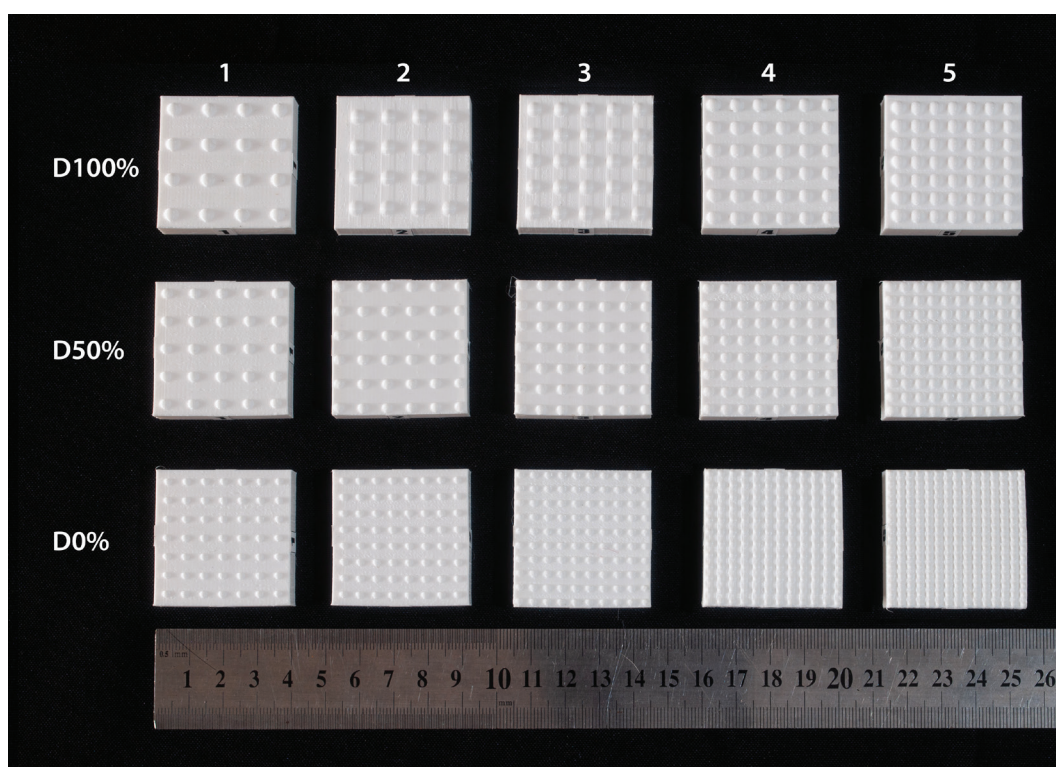
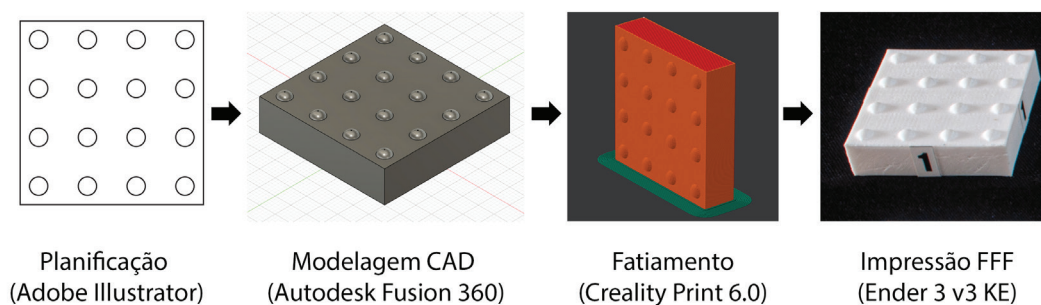
Quadro 5 - Parâmetros de impressão utilizados na produção das amostras.

Parâmetros de Resistência	PLA	PETG	TPU
Perímetros	2	2	2
Camadas de topo	4	4	4
Camadas de base	4	4	4
Densidade do preenchimento	15%	15%	15%
Padrão do preenchimento	Retilíneo	Retilíneo	Retilíneo
Parâmetros de Resistência	PLA	PETG	TPU
Perímetros	2	2	2
Camadas de topo	4	4	4
Camadas de base	4	4	4
Densidade do preenchimento	15%	15%	15%
Padrão do preenchimento	Retilíneo	Retilíneo	Retilíneo
Parâmetros de Qualidade	PLA	PETG	TPU
Altura da camada	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm
Diâmetro do bico	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm
Temperatura do bico	210° C	240° C	230°C
Posição da costura	Atrás	Atrás	Atrás
Fluxo de impressão	87%	91%	105%
Limitação do fluxo volumétrico	14 mm ³ /s	9 mm ³ /s	3 mm ³ /s
Retração	0,5 mm	0,5 mm	0 mm
Parâmetros de Velocidade	PLA	PETG	TPU
Primeira camada	10 mm/s	10 mm/s	25 mm/s
Preenchimento primeira camada	30 mm/s	30 mm/s	80 mm/s
Perímetro externo e interno	80 mm/s	80 mm/s	80 mm/s
Preenchimento demais camadas	240 mm/s	240 mm/s	240 mm/s
Superfície superior	240 mm/s	240 mm/s	240 mm/s
Parâmetros de estabilidade na mesa de impressão (Saia)	PLA	PETG	TPU
Voltas	10	10	10
Altura	3 camadas	3 camadas	3 camadas
Velocidade	10 mm/s	10 mm/s	50 mm/s
Temperatura mesa	60° C	75° C	60°C

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As amostras foram inicialmente planejadas no software Adobe Illustrator e, após os ajustes necessários na disposição dos pontos para criação das texturas, modeladas utilizando o software Autodesk Fusion. Por fim, os arquivos finais para impressão 3D foram configurados no software Creality Print 6.0 com os parâmetros otimizados para cada material, segundo as recomendações do fabricante de cada filamento. Para a impressão 3D das amostras dos materiais, foi utilizada a impressora Creality Ender 3 v3 KE (Figura 34).

Figura 34 - Processo de produção e resultado das amostras impressas.



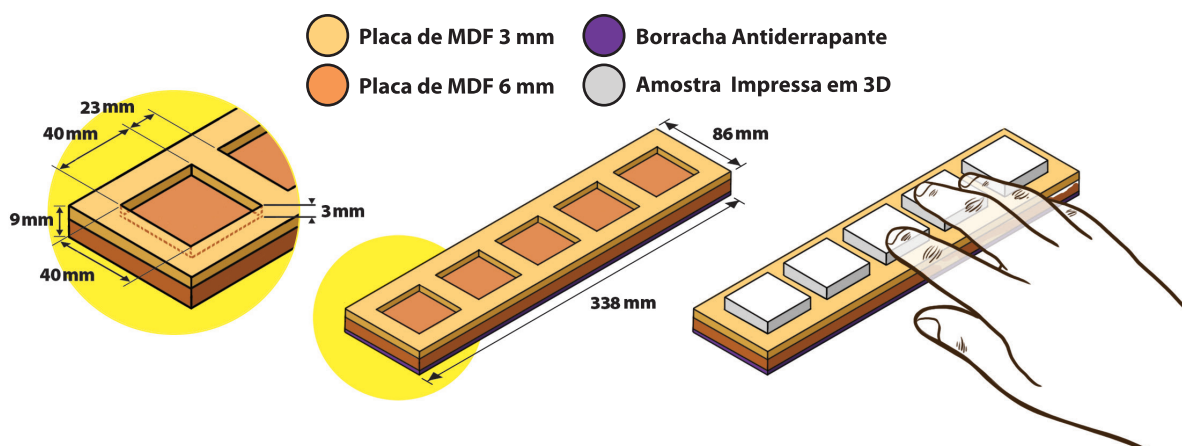
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

5.3.2. Plataformas

Para os experimentos 1 e 2, foram confeccionadas duas plataformas em MDF de 10 mm e com dimensões de 338 mm x 86 mm. As marcações referentes às posições das amostras foram cortadas a laser em uma placa de MDF de 3mm, com dimensões de 40 mm x 40 mm, e dispostas de forma centralizada na plataforma, com espaçamento de 23 mm entre cada amostra, coerente com as dimensões médias do dedo humano (ABNT NBR 16058:2012). Esse espaçamento foi definido de modo a permitir que os participantes percebessem os intervalos entre as amostras sem dificulda-

des durante a exploração tátil, reduzindo interferências que pudessem comprometer a discriminação entre as amostras. A base da plataforma, uma placa de MDF de 6 mm, foi revestida com material antiderrapante de 2 mm (Figura 35) para evitar o deslizamento durante os experimentos.

Figura 35 - Plataforma para teste de ordenação.

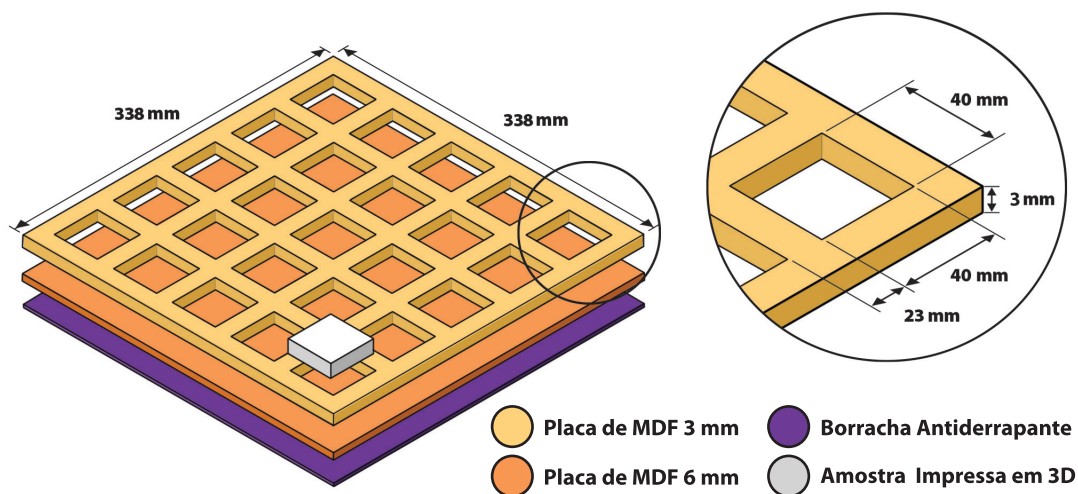


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

5.3.3. Mapa tátil

O mapa tátil, que foi utilizado no experimento 2, tem o tamanho de 338 x 338 mm, e foi produzido em uma MDF de 3 mm para que a altura das peças móveis (10 mm) fique em destaque, facilitando a troca das peças durante o experimento com os encaixes para as 25 amostras (com as mesmas dimensões utilizadas na plataforma de tarefas) cortados a laser. O espaçamento entre as amostras foi de 23 mm de largura (Figura 36), da mesma forma que na plataforma de tarefas. A configuração do mapa foi planejada a fim de minimizar a interferência do nível de treinamento tátil no desempenho dos participantes.

Figura 36 - Esquema de montagem do mapa tátil.



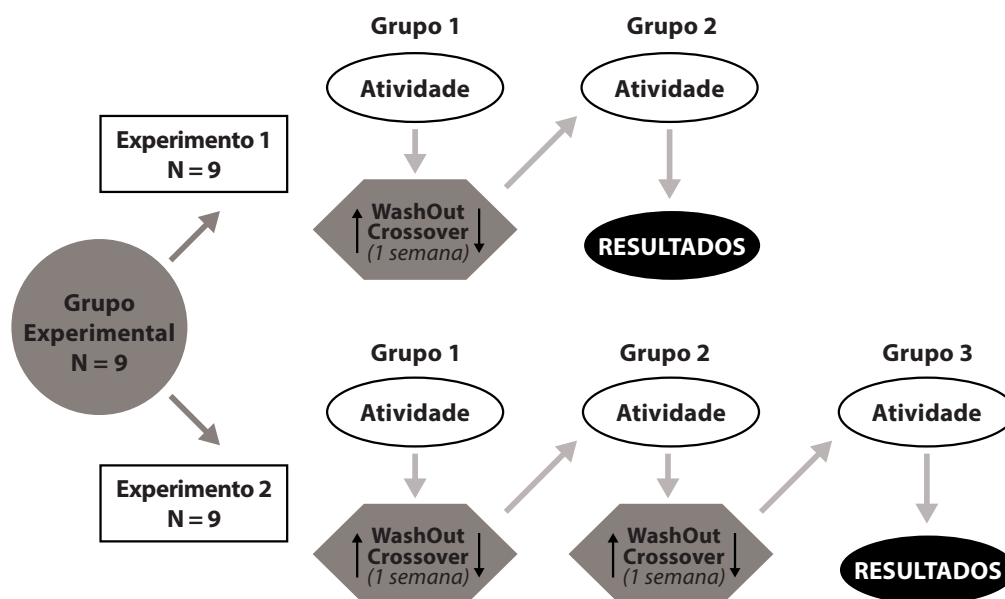
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Para finalizar a montagem do mapa tátil, foi colada na base da estrutura principal com os encaixes para as amostras, uma placa MDF de 6 mm revestida com material antiderrapante de 2 mm, para evitar o deslizamento sobre a mesa durante o experimento.

5.4. Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos compreenderam dois experimentos - ordenação tátil (experimento 1) e busca tátil (experimento 2) - a fim de observar a percepção háptica em situações de exigência cognitiva distintas. Devido à limitada disponibilidade de participantes com deficiência visual, no grupo experimental, os participantes atuaram em múltiplas avaliações. Portanto, foi adotado um desenho de estudo clínico randomizado (ECR) (Jadad; Enkin, 2007). Assim os experimentos envolvendo o grupo experimental serão realizados sob controle dos procedimentos *Crossover* e *Washout*, conforme ilustrado na figura 37, a fim de minimizar o fator do aprendizado tátil durante as tarefas. Enquanto que no grupo controle, os participantes atuaram uma única vez durante os experimentos.

Figura 37 - Abordagem para os experimentos do Grupo Experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

5.4.1. Entrevista Estruturada

Para garantir a adequação da amostra e a validade dos dados coletados no estudo, foi elaborada uma entrevista estruturada composta por questões que avaliam critérios de inclusão e exclusão previamente definidos (Apêndice I). Esses critérios foram concebidos para assegurar a homogeneidade dos grupos, tanto controle quanto experimental, e para garantir que as variáveis relevantes fossem controladas adequadamente.

A entrevista foi organizada em quatro seções, a primeira diz respeito à identificação dos participantes, com questões como nome, idade e curso de graduação (apenas para o grupo controle), contribuindo para a descrição demográfica dos participantes e para a contextualização dos resultados. Essas informações são particularmente importantes para garantir a representatividade e para a interpretação dos dados em função de variáveis sociodemográficas.

A segunda seção considera os critérios de inclusão e exclusão adotados no estudo, que incluem: treinamento tátil, contato prévio com as texturas utilizadas, tipo de cegueira (congenita ou adquirida), fluência em braille, experiência com mapas táteis ou outros dispositivos táteis

e data de perda da visão. A exclusão de indivíduos com qualquer tipo de treinamento tátil foi estabelecida para assegurar que os participantes do grupo controle representem pessoas sem habilidades específicas de exploração tátil, evitando vieses que poderiam resultar em um desempenho superior neste grupo. Tal medida foi fundamental para garantir uma comparação mais equilibrada e confiável com o grupo experimental (Heller; Ballesteros, 2006).

O controle sobre a exposição prévia às texturas utilizadas no experimento também foi essencial, pois buscou evitar que a familiaridade com as amostras interferisse na capacidade de discriminação tátil, assegurando que os resultados fossem atribuídos exclusivamente às propriedades dos materiais testados, e não à memória visual ou tátil dos participantes (Lederman; Klatzky, 2009).

A distinção entre cegueira congênita e adquirida foi necessária devido às diferenças no repertório visual dos participantes. Indivíduos com cegueira adquirida podem conservar memórias visuais que influenciam a percepção tátil, enquanto participantes com cegueira congênita dependem exclusivamente da exploração tátil para a interpretação de informações (Norman; Bartholomew, 2011). Além disso, a inclusão de participantes fluentes em braille visou garantir um nível mínimo de habilidade tátil, indispensável para avaliar o desempenho nas tarefas de discriminação de texturas. Estudos indicam que a fluência em braille está fortemente associada a uma maior sensibilidade tátil, o que pode impactar os resultados experimentais (Bhirud; Chandan, 2018).

A experiência prévia com sistemas de informação táteis também foi avaliada na terceira seção, pois essa variável pode influenciar os resultados, especialmente pela familiaridade com texturas similares ou métodos específicos de exploração tátil (Holloway; Marriott; Butler, 2018). Por fim, para indivíduos com cegueira adquirida, a data de perda da visão foi considerada relevante, uma vez que o período de adaptação ao uso exclusivo da percepção tátil pode influenciar significativamente a capacidade de discriminação háptica (Baumgartner; Wiebel; Gegenfurtner, 2015).

As questões relacionadas à frequência de uso do tato no cotidiano e à experiência com produtos impressos em 3D buscaram contextualizar o nível de interação dos participantes com materiais táteis e foram abordadas na terceira seção. Essas informações ajudaram a identificar fatores que poderiam influenciar o desempenho durante as atividades do experimento, como familiaridade com superfícies impressas ou exploração tátil avançada.

Por fim, na quarta seção, a inclusão de uma escala VAS (*Visual Analogue Scale*) para medir a ansiedade ou estresse dos participantes pré-teste, teve como objetivo identificar possíveis influências emocionais que poderiam afetar o desempenho nas tarefas. A ansiedade pode in-

terferir na capacidade de concentração e exploração tátil, especialmente em tarefas de alta demanda cognitiva (Spielberger, 1983). A escala VAS é amplamente utilizada por sua simplicidade, confiabilidade e sensibilidade para avaliar estados emocionais em diferentes contextos (Lesage; Berjot; Deschamps, 2012).

5.4.2. Experimento 01 - Teste de ordenação

Este experimento adotou métodos previamente validados na área de Análise Sensorial de Alimentos para a condução dos testes. De acordo com Kemp et al. (2009), os métodos sensoriais podem ser classificados em objetivos e subjetivos. Os métodos objetivos fornecem dados diretos sobre as propriedades sensoriais dos produtos, sendo representados, principalmente, pelos métodos discriminativos e descritivos. Por sua vez, os métodos subjetivos, também denominados testes afetivos ou de consumidor, produzem informações relacionadas à aceitabilidade, à preferência ou ao grau de agrado dos participantes. Considerando os objetivos e as necessidades deste estudo, optou-se, dentre os métodos discriminativos, pela aplicação do teste de ordenação. A seguir, descrevem-se os procedimentos adotados para a aplicação do teste de ordenação no contexto da percepção tátil.

Para auxiliar na condução do experimento foi elaborada uma tabela de randomização referentes à organização e à disposição das amostras e materiais (Quadro 6). As colunas 1 e 2 apresentam os grupos amostrais, que foram subdivididos em duas configurações de disposição das amostras (A e B), apresentadas na coluna 3. Na configuração A (3, 1, 5, 2 e 4) as amostras com densidades de texturas menos similares foram apresentadas de maneira que ficassem próximas na plataforma de avaliação, enquanto na configuração B (2, 1, 3, 5 e 4) as amostras com maior similaridade de densidade foram posicionadas de modo mais próximo. A ordem de apresentação dos materiais também foi aleatorizada, de modo que cada material foi apresentado uma vez em cada posição (colunas 5, 6 e 7), de modo a minimizar os efeitos de possível aprendizado durante o experimento.

Quadro 6 - Organização e disposição das amostras para o experimento 1.

Grupos	Participantes		Disposição das Amostras	Material 1	Material 2	Material 3
	Videntes	PcDVs				
G1	1	1	A	PLA (D0%)	PETG (D0%)	TPU (D0%)
	2	2	A	PETG (D0%)	TPU (D0%)	PLA (D0%)
	3	3	A	TPU (D0%)	PLA (D0%)	PETG (D0%)
	4	4	A	PLA (D50%)	PETG (D50%)	TPU (D50%)
	5	5	A	PETG (D50%)	TPU (D50%)	PLA (D50%)
	6	6	A	TPU (D50%)	PLA (D50%)	PETG (D50%)
	7	7	A	PLA (D100%)	PETG (D100%)	TPU (D100%)
	8	8	A	PETG (D100%)	TPU (D100%)	PLA (D100%)
	9	9	A	TPU (D100%)	PLA (D100%)	PETG (D100%)
G2	10	5	B	PLA (D0%)	PETG (D0%)	TPU (D0%)
	11	6	B	PETG (D0%)	TPU (D0%)	PLA (D0%)
	12	7	B	TPU (D0%)	PLA (D0%)	PETG (D0%)
	13	8	B	PLA (D50%)	PETG (D50%)	TPU (D50%)
	14	9	B	PETG (D50%)	TPU (D50%)	PLA (D50%)
	15	1	B	TPU (D50%)	PLA (D50%)	PETG (D50%)
	16	2	B	PLA (D100%)	PETG (D100%)	TPU (D100%)
	17	3	B	PETG (D100%)	TPU (D100%)	PLA (D100%)
	18	4	B	TPU (D100%)	PLA (D100%)	PETG (D100%)

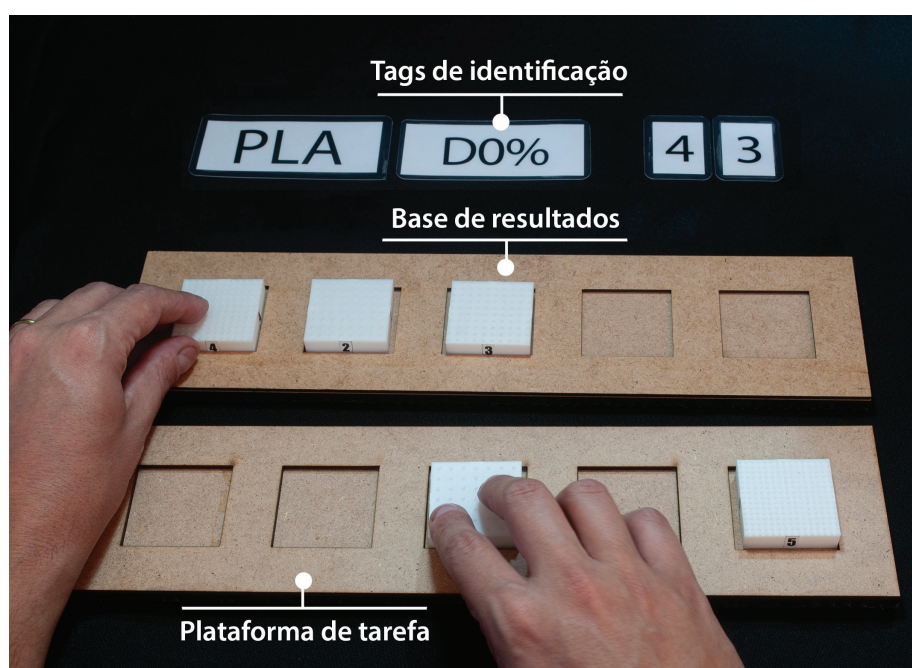
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Neste experimento o objetivo dos participantes foi ordenar as amostras apresentadas de cada material (PLA D0%, PLA D50%, PLA D100%, PETG D0%, PETG D50%, PETG D100%, TPU D0%, TPU D50% e TPU D100%) em função da densidade da textura na face superior da amostra (Kemp et al., 2009; Dutcosky, 2011). Foram utilizadas cinco amostras para cada variação dos materiais e o experimento foi realizado individualmente.

Inicialmente, o participante realizou a leitura e manifestou concordância com o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), seguida da aplicação da entrevista estruturada. Para os participantes do grupo experimental, a concordância com o TCLE se deu com a gravação em áudio pelo avaliador. Na sequência, o participante foi posicionado na mesa de testes e, no caso dos integrantes do grupo controle, foi solicitado o uso de venda ocular, a fim de eliminar qualquer influência visual durante a tarefa. Antes do início do experimento propriamente dito,

o avaliador apresentou e explicou os procedimentos experimentais, sem o posicionamento das amostras na plataforma de tarefa, com o objetivo de familiarizar o participante com a dinâmica do experimento. Durante o posicionamento das tags de identificação do participante e das amostras, previamente aleatorizadas, o participante permaneceu com as mãos sob a mesa, aguardando o sinal do avaliador para iniciar a atividade. A tarefa consistiu na retirada das amostras da plataforma e na sua ordenação na base de resultados, de acordo com a densidade da textura presente na superfície das amostras, partindo da menos densa para a mais densa. Ao longo do procedimento, o participante pôde revisar e modificar sua resposta quantas vezes julgasse necessário. Ao término da tarefa, foi solicitado que o participante colocasse novamente as mãos sob a mesa, sinalizando a finalização do experimento (Figura 38).

Figura 38 - Layout do experimento 01.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os dados coletados neste experimento foram: o tempo para conclusão da tarefa e a ordem final das amostras pelos participantes. A análise do tempo considerou como início da atividade o momento em que o participante tocava as amostras para iniciar a ordenação. Enquanto que a ordem final das amostras foi utilizada tanto para determinar a eficácia da tarefa quanto para a comparação das diferenças entre os pares das amostras. Todo o procedimento foi gravado em

vídeo a fim de aferir posteriormente o tempo correto da tarefa e se todas as amostras dispostas foram tocadas durante a exploração tátil.

5.4.3. Experimento 02 - Teste de busca

Assim como no experimento 1, a fim de auxiliar na condução do experimento foi elaborada uma tabela de randomização referentes à organização e à disposição das amostras alvo e materiais (Quadro 7). Os participantes pertencentes aos grupos amostrais controle e experimental, apresentados nas colunas 2 e 3, foram distribuídos em três condições de material (coluna 1), correspondentes aos três filamentos avaliados: G1 (PLA), G2 (PETG) e G3 (TPU). A ordem de apresentação das amostras alvo também foi aleatorizada em cinco conjuntos (I, II, III, IV e V), de modo que para cada material as amostras alvo foram apresentadas uma vez em cada posição (coluna 4), a fim de minimizar a questão do aprendizado durante o experimento. Por fim, a coluna 5 apresenta a variação das dimensões dos pontos de cada material avaliado.

Quadro 7 - Organização e disposição das amostras para o experimento 2 (continua).

Grupos	Participantes		Ordem das Amostras Alvo	Material
	Com visão	PcDVs		
G1	1	1	I - 1, 2, 3, 4 e 5	PLA (D0%)
	2	2	II - 2, 3, 4, 5 e 1	PLA (D0%)
	3	3	III - 3, 4, 5, 1 e 2	PLA (D0%)
	4	4	IV - 4, 5, 1, 2 e 3	PLA (D0%)
	5	5	V - 5, 1, 2, 3 e 4	PLA (D0%)
	6	6	I - 1, 2, 3, 4 e 5	PLA (D50%)
	7	7	II - 2, 3, 4, 5 e 1	PLA (D50%)
	8	8	III - 3, 4, 5, 1 e 2	PLA (D50%)
	9	9	IV - 4, 5, 1, 2 e 3	PLA (D50%)
	10	1	V - 5, 1, 2, 3 e 4	PLA (D50%)
	11	2	I - 1, 2, 3, 4 e 5	PLA (D100%)
	12	3	II - 2, 3, 4, 5 e 1	PLA (D100%)
	13	4	III - 3, 4, 5, 1 e 2	PLA (D100%)
	14	5	IV - 4, 5, 1, 2 e 3	PLA (D100%)
	15	6	V - 5, 1, 2, 3 e 4	PLA (D100%)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro 7 - Organização e disposição das amostras para o experimento 2 (continuação).

Grupos	Participantes		Ordem das Amostras Alvo	Material
	Com visão	PcDVs		
G2	16	7	I - 1, 2, 3, 4 e 5	PETG (D0%)
	17	8	II - 2, 3, 4, 5 e 1	PETG (D0%)
	18	9	III - 3, 4, 5, 1 e 2	PETG (D0%)
	19	1	IV - 4, 5, 1, 2 e 3	PETG (D0%)
	20	2	V - 5, 1, 2, 3 e 4	PETG (D0%)
	21	3	I - 1, 2, 3, 4 e 5	PETG (D50%)
	22	4	II - 2, 3, 4, 5 e 1	PETG (D50%)
	23	5	III - 3, 4, 5, 1 e 2	PETG (D50%)
	24	6	IV - 4, 5, 1, 2 e 3	PETG (D50%)
	25	7	V - 5, 1, 2, 3 e 4	PETG (D50%)
	26	8	I - 1, 2, 3, 4 e 5	PETG (D100%)
	27	9	II - 2, 3, 4, 5 e 1	PETG (D100%)
	28	1	III - 3, 4, 5, 1 e 2	PETG (D100%)
	29	2	IV - 4, 5, 1, 2 e 3	PETG (D100%)
	30	3	V - 5, 1, 2, 3 e 4	PETG (D100%)
G3	31	4	I - 1, 2, 3, 4 e 5	TPU (D0%)
	32	5	II - 2, 3, 4, 5 e 1	TPU (D0%)
	33	6	III - 3, 4, 5, 1 e 2	TPU (D0%)
	34	7	IV - 4, 5, 1, 2 e 3	TPU (D0%)
	35	8	V - 5, 1, 2, 3 e 4	TPU (D0%)
	36	9	I - 1, 2, 3, 4 e 5	TPU (D50%)
	37	1	II - 2, 3, 4, 5 e 1	TPU (D50%)
	38	2	III - 3, 4, 5, 1 e 2	TPU (D50%)
	39	3	IV - 4, 5, 1, 2 e 3	TPU (D50%)
	40	4	V - 5, 1, 2, 3 e 4	TPU (D50%)
	41	5	I - 1, 2, 3, 4 e 5	TPU (D100%)
	42	6	II - 2, 3, 4, 5 e 1	TPU (D100%)
	43	7	III - 3, 4, 5, 1 e 2	TPU (D100%)
	44	8	IV - 4, 5, 1, 2 e 3	TPU (D100%)
	45	9	V - 5, 1, 2, 3 e 4	TPU (D100%)

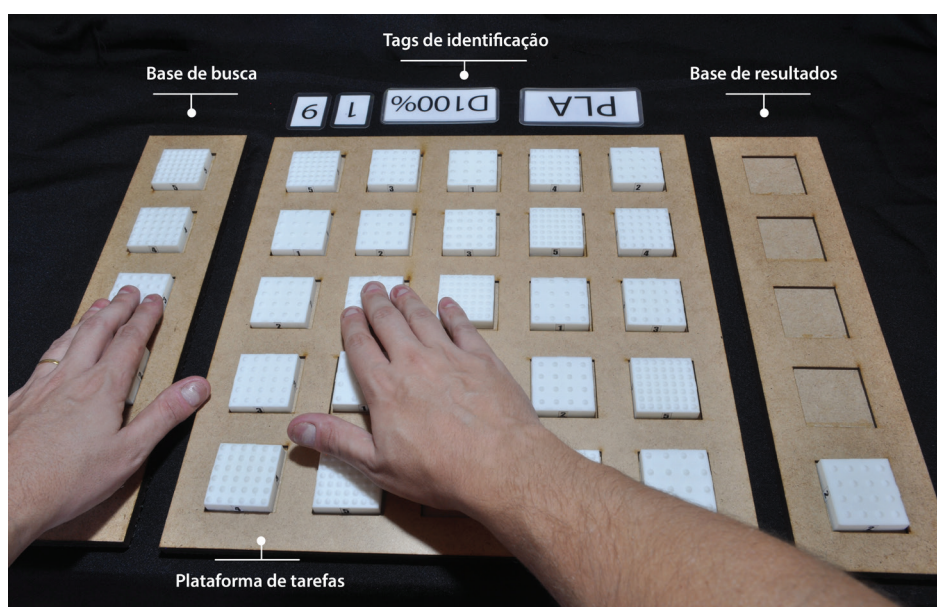
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Neste experimento o objetivo foi de simular uma atividade em contexto real de uso de um mapa tátil, onde os participantes deveriam localizar no mapa tátil as amostras correspondentes às amostras-alvo. Todos os materiais foram avaliados (PLA D0%, PLA D50%, PLA D100%, PETG D0%, PETG D50%, PETG D100%, TPU D0%, TPU D50% e TPU D100%).

Os participantes deveriam localizar 5 peças iguais as 5 amostras-alvo, que foram posicionadas em uma base de busca, disposta do lado esquerdo do mapa tátil com 25 peças. Em cada linha do mapa, o participante deveria encontrar a amostra-alvo correspondente, retirá-la da plataforma e posicioná-la na base de respostas, disposta do lado direito do mapa, conforme ilustrado na Figura 39. As estratégias de exploração tátil foram livres, respeitando as abordagens individuais adotadas pelos participantes. Ao final da tarefa, o participante foi orientado a posicionar novamente as mãos sob a mesa, indicando o encerramento do experimento.

Após os procedimentos iniciais já descritos no Experimento 1, incluindo consentimento ético, posicionamento do participante e o uso de venda ocular, deu-se início à etapa experimental. Antes da execução da tarefa, o avaliador apresentou as instruções específicas do experimento, sem a disposição prévia das amostras no mapa tátil e na base de busca, a fim de assegurar a compreensão dos procedimentos. Durante a organização das amostras, previamente aleatorizadas, tanto no mapa tátil quanto na base de busca, o participante permaneceu com as mãos sob a mesa, aguardando autorização para iniciar a atividade.

Figura 39 - Layout do experimento 2.

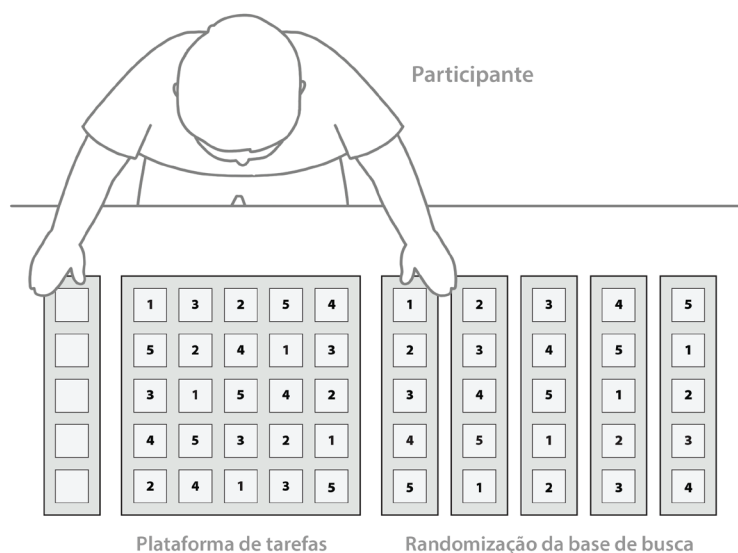


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A disposição das amostras no mapa tátil seguiu alguns critérios para garantir dentro do possível a aleatorização do experimento: em cada linha da plataforma de tarefas as amostras

ocupam posições distintas, e para cada participante a posição das amostras-alvo na base de busca também foi randomizada (Figura 40).

Figura 40 - Randomização e contrabalanço das amostras.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os dados coletados neste experimento foram o tempo para a execução da tarefa, e a ordem das amostras posicionadas na base de respostas. A atividade foi gravada em vídeo a fim de conferir possíveis anormalidades durante a exploração tátil, bem como aferir o tempo exato para a conclusão da tarefa. A fim de facilitar a análise dos vídeos foram posicionadas *tags* de identificação próximas ao mapa tátil.

5.5. Análise dos dados

No âmbito da usabilidade, eficácia e eficiência constituem dimensões centrais para a avaliação da interação entre usuário e sistema. Conforme a ABNT NBR ISO 9241-11, a usabilidade corresponde ao grau em que um sistema, produto ou serviço pode ser utilizado por usuários específicos para alcançar objetivos específicos com eficácia, eficiência e satisfação, em um contexto de uso específico. Nesse enquadramento, a eficácia está relacionada à precisão e à completude com que os objetivos são atingidos, ao passo que a eficiência se refere à relação entre os resulta-

dos obtidos e os recursos empregados para alcançá-los, como tempo e esforço. Nesta pesquisa, tais conceitos orientam a análise do desempenho dos participantes, sendo a eficácia observada a partir do percentual de acertos e a eficiência examinada com base no tempo despendido para a realização das tarefas, articulado ao desvio padrão.

A análise dos dados dos experimentos foi estruturada a partir de dois blocos principais de investigação: (A) o desempenho considerando exclusivamente o tipo de material (PLA, PETG e TPU) e (B) o desempenho considerando a variação dimensional dos pontos (D0%, D50% e D100%) dentro de cada material. Essa divisão metodológica teve como objetivo distinguir o efeito do tipo de material do efeito da dimensão geométrica dos pontos, evitando que diferenças relacionadas à superfície sejam confundidas com aquelas decorrentes do tamanho dos elementos. Ao analisar inicialmente os materiais de maneira agregada e, em seguida, as dimensões dentro de cada material, torna-se possível identificar padrões específicos de interação entre propriedades físicas e estrutura dimensional.

No primeiro bloco (A), a análise concentrou-se na comparação entre materiais, independentemente da variação dimensional. Nessa etapa, buscou-se identificar como as propriedades físicas e superficiais específicas de cada polímero influenciam a clareza geométrica das texturas impressas. Foram considerados dois indicadores principais comuns aos dois experimentos: (I) eficácia, expressa pelo percentual de acertos e erros; (II) eficiência, avaliada a partir do tempo médio de execução da tarefa e do desvio padrão. E indicadores específicos para cada experimento: Diferença Mínima Significativa (DMS) no experimento 1; e matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS) no experimento 2 (Quadro 8).

Quadro 8 - Síntese metodológica das etapas de análise para os experimentos 1 e 2.

Indicador	Como foi calculado	O que permite interpretar	Natureza da análise
(I)Eficácia	Percentual de ordenações corretas por material	Grau de clareza discriminativa do material; precisão da leitura tátil	Descritiva comparativa
(II)Eficiência	Tempo total de execução (s) + desvio padrão	Rapidez de decisão e estabilidade do desempenho entre participantes	Descritiva comparativa
Experimento 1 Diferença Mínima Significativa (DMS)	Cálculo do limiar estatístico de diferenças médias	Verificação de significância das diferenças observadas	Inferencial
Experimento 2 Matriz de confusão	Frequência de correspondências corretas e incorretas entre amostra-alvo e resposta escolhida, organizadas em tabela de contingência por nível da escala	Padrões de erro e proximidade perceptiva entre níveis; identificação de zonas de confusão e colapso discriminativo na escala	Descritiva estrutural
Experimento 2 Escalonamento Multidimensional (MDS)	Conversão da matriz de confusão em matriz de dissimilaridade e projeção espacial bidimensional	Organização relacional do espaço perceptivo; coerência incremental da escala; estabilidade estrutural das distâncias entre níveis	Exploratória estrutural

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação aos indicadores comuns aos dois experimentos, a eficácia foi calculada por meio do percentual de acertos e erros na tarefa de ordenação. Considerou-se como acerto cada amostra ordenada na posição correta. Quanto maior o percentual de acertos, maior a eficácia do material na sustentação da discriminação tátil requerida pela tarefa.

A eficiência, por sua vez, foi analisada a partir do tempo médio de execução da tarefa (em segundos), considerando-se o tempo total necessário para a ordenação das cinco amostras. Entretanto, o tempo médio não foi interpretado de forma isolada. O desvio padrão (DP) foi utilizado como parâmetro complementar, permitindo avaliar a estabilidade do desempenho entre participantes. O tempo de execução da tarefa compreendeu o intervalo entre o momento que o participante iniciou o toque ativo das amostras e quando a última amostra foi colocada na plataforma de respostas.

Parte-se do pressuposto de que não basta identificar qual material foi, em média, mais rápido.

Um material considerado eficiente deve também apresentar comportamento relativamente previsível, isto é, menor dispersão temporal entre os usuários. Materiais com baixo tempo médio, mas alto desvio padrão, indicam rapidez associada a instabilidade; por outro lado, materiais com tempo moderado e baixa dispersão podem revelar maior consistência operacional (Quadro 9).

Quadro 9 -Relação entre tempo médio (s) e desvio padrão (DP).

Situação	O que indica
Tempo médio baixo + DP baixo	Exploração rápida e consistente - alta legibilidade tátil
Tempo médio baixo + DP alto	Alguns entenderam rápido, outros não - legibilidade desigual
Tempo médio alto + DP baixo	Tarefa difícil, mas igualmente difícil para todos
Tempo médio alto + DP alto	Alta incerteza perceptiva e estratégias exploratórias instáveis

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A articulação desses indicadores permitiu compreender não apenas qual material apresentou melhor desempenho, mas também de que modo a precisão se relaciona com a estabilidade e o custo exploratório. A relação entre eficácia e eficiência ajuda a explicar o desempenho quantitativo dos experimentos. Enquanto a integração com a DMS (para o experimento 1) e com as matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS) (para o experimento 2), contribuem para explicar a organização perceptiva dos conjuntos avaliados. Como última etapa, foi integrada a análise as variáveis relacionadas à amostras, a fim de interpretar os dados sob a perspectiva do perfil avaliado.

No segundo bloco (B), a análise foi reorganizada considerando a variação dimensional dos pontos (D0%, D50% e D100%) dentro de cada material. Essa etapa teve como finalidade investigar se a ampliação geométrica promove aumento da clareza discriminativa e se tal efeito se ma-

nifesta de forma linear ou não linear. Assim como no primeiro bloco, foram mantidos os mesmos indicadores em comum, (I) eficácia, (II) eficiência; e os mesmos indicadores específicos para cada experimento, Diferença Mínima Significativa (DMS) no experimento 1 e matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS) no experimento 2, assegurando simetria analítica e comparabilidade interna. A manutenção dos critérios estatísticos e interpretativos ao longo das duas etapas permite que as diferenças observadas sejam atribuídas às variáveis investigadas, e não a alterações metodológicas na forma de análise.

Posteriormente, os resultados desses dois eixos foram integrados em análise comparativa entre grupo controle e grupo experimental, permitindo examinar como o repertório perceptivo modula a interação entre substrato material e amplitude estrutural das diferenças geométricas. Assim, a forma de análise adotada organiza-se em camadas sucessivas: efeito do material, efeito da variação dimensional e integração comparativa entre grupos.

Em relação aos valores extremos identificados nos tempos de execução ou nos indicadores de desempenho, embora determinadas condições tenham apresentado maior dispersão interindividual, optou-se por manter integralmente os registros. A presente pesquisa parte do pressuposto de que diferentes estratégias exploratórias, ritmos perceptivos e modos de organização sensório-motora fazem parte da heterogeneidade legítima da amostra, especialmente no grupo experimental.

A exclusão de valores elevados com base exclusivamente em critérios estatísticos poderia reduzir artificialmente a amplitude do comportamento observado, obscurecendo a diversidade de perfis perceptivos que compõem o campo empírico. Assim, os dados foram analisados em sua totalidade, sendo a dispersão interpretada como componente constitutivo da experiência tátil e não como erro de mensuração.

5.5.1. Experimento 01: Teste de ordenação

Os dados coletados no teste de ordenação foram organizados em uma tabela (Figura 41A), com cada participante representando uma linha e as ordens atribuídas as cinco amostras registradas em colunas consecutivas. Os valores de cada coluna foram somados e aplicados na matriz para cálculo da diferença mínima significativa (Koziol., 2013).

Em seguida, foram verificadas com base na tabela de Koziol (2013) (Anexo I), entre quais

amostras tiveram diferenças significativas, considerando o valor crítico para $p \leq 0,05$ (Figura 41B). Se as diferenças entre as somas das ordens de duas amostras (Figura 41C) divergem por um valor maior ou igual ao valor crítico tabelado, confirma-se a diferença significativa entre elas ao nível testado (Carmo, 2018). De acordo com Dutcosky (2011), e com o nível de confiabilidade estabelecido para o presente estudo ($p \geq 0,05$), o valor da DMS deve ser observado a partir da relação entre o número de participantes e a quantidade de amostras. Portanto, qualquer valor menor que o indicado, aponta que a diferença entre as amostras não é significativa (ns). O processo de análise dos dados nesta segunda etapa está ilustrado na figura 41, com dados fictícios.

Figura 41 - Tabulação e cálculo da DMS com valores fictícios para uma coleta com 20 participantes.

A Tabulação dos dados coletados						B Cálculo da DMS					
Participantes	Ordem das amostras					1	2	3	4	5	
	1	2	3	4	5	$\Sigma 1$	$\Sigma 2$	$\Sigma 3$	$\Sigma 4$	$\Sigma 5$	
1	2	1	3	5	4	1	-	$\Sigma 2 - \Sigma 1$	$\Sigma 3 - \Sigma 1$	$\Sigma 4 - \Sigma 1$	$\Sigma 5 - \Sigma 1$
...	2	-	-	$\Sigma 3 - \Sigma 2$	$\Sigma 4 - \Sigma 2$	$\Sigma 5 - \Sigma 2$
20	1	2	3	4	5	3	-	-	-	$\Sigma 4 - \Sigma 3$	$\Sigma 5 - \Sigma 3$
						4	-	-	-	-	$\Sigma 5 - \Sigma 4$
							$\Sigma 1 = 25$	$\Sigma 2 = 50$	$\Sigma 3 = 56$	$\Sigma 4 = 86$	$\Sigma 5 = 95$

C Comparação dos resultados com o valor crítico (Christensen et al., 2006)											
Nº de Participantes	Nº de amostras ($p=0.01$)					1	2	3	4	5	
	3	4	5	6	7	25	50	56	86	95	
20	18	25	31	39	46	1	-	25 ns	31	61	70
21	19	26	32	40	47	2	-	-	6 ns	36	45
22	19	27	32	41	48	3	-	-	-	30 ns	39
23	20	29	34	41	49	4	-	-	-	-	9 ns

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Assim, a estrutura de análise dos dados seguiu o que foi proposto no tópico 5.5, com a organização em dois blocos analíticos: investigação concentrada exclusivamente na influência do material, desconsiderando as variações dimensionais internas; e influência da variação dimensional dos pontos, considerando as três condições estruturais (D0%, D50% e D100%) dentro de cada material. Para análise em cada eixo, foi empregado a DMS como indicador específico, com o objetivo de identificar as diferenças significativas entre as amostras.

5.5.2. Experimento 02: Teste de localização

Para avaliar as diferenças táteis entre as amostras, foi empregada a construção de uma matriz de confusão como ferramenta estatística para análise do desempenho dos participantes (Okamoto; Yamada, 2012), em que as linhas representam as amostras-alvo apresentadas aos participantes (valor real) e as colunas correspondem às amostras identificadas pelos participantes (valor previsto). Cada célula da matriz registra o número de escolhas feitas pelos participantes para uma combinação de amostra-alvo e amostra identificada. Os valores na diagonal principal indicam acertos, enquanto os valores fora da diagonal representam erros de identificação (Quadro 10). Assim o valor d_{ij} representa a dissimilaridade da amostra i para a amostra j , ou quantas vezes a amostra i foi confundida com a amostra j durante a exploração tátil. A representação dos valores na matriz foi representada em forma decimal de porcentagem.

Quadro 10 - Modelo da estruturação da matriz de confusão.

Valor previsto/ Valor real	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Amostra 1	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{15}
Amostra 2	d_{21}	d_{22}	d_{23}	d_{24}	d_{25}
Amostra 3	d_{31}	d_{32}	d_{33}	d_{34}	d_{35}
Amostra 4	d_{41}	d_{42}	d_{43}	d_{44}	d_{45}
Amostra 5	d_{51}	d_{52}	d_{53}	d_{54}	d_{55}

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para avaliar as diferenças táteis entre as cinco amostras dos materiais aplicados na impressão 3D, foi utilizada uma abordagem de Escalonamento Multidimensional (MDS) para construir uma distribuição espacial de estímulos (Picard et al., 2003; Borg; Groenen, 2005; Yoshioka et al., 2007).

Dessa forma, a matriz de confusão foi convertida em uma matriz de dissimilaridade, que representa as diferenças perceptuais entre as amostras. Os valores de dissimilaridade foram normalizados em um intervalo de 0 a 1, onde 0 indica alta similaridade entre as amostras, e 1 representa alta dissimilaridade.

Em abordagens como o MDS a matriz de dissimilaridade deve ser simétrica (as distâncias entre dois pontos devem ser as mesmas em ambos os sentidos, $d_{ij} = d_{ji}$); e a diagonal deve estar

zerada, isto porque a dissimilaridade entre uma mesma classe e ela mesma deve ser 0. Se os valores de d_{ij} e de d_{ji} são diferentes na matriz original, como ocorre em uma matriz de confusão, é necessário torná-los simétricos antes de aplicar o MDS. Neste caso, utilizou-se uma abordagem de simetrização, que consiste em substituir os valores dos pares d_{ij} e d_{ji} pela média dos dois valores (Figura 42A). Em seguida, realizou-se o cálculo dos valores da dissimilaridade entre os pares das amostras (Figura 42B).

Figura 42 - Cálculos para estruturação da matriz de dissimilaridade.

A Simetrização dos valores de dissimilaridade

$$d_{ij} = d_{ji} = \frac{\text{valor original de } d_{ij} + \text{valor original de } d_{ji}}{2}$$

B Cálculo dos valores de dissimilaridade

$$d_{ij} = 1 - \frac{\text{correta identificação de i como j}}{\text{total de identificações de i}}$$

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

As matrizes de dissimilaridade foram submetidas ao Escalonamento Multidimensional (MDS) métrico, com utilização de distâncias pré-computadas e redução para duas dimensões principais. A escolha pelo modelo métrico fundamenta-se na compreensão de que as dissimilaridades derivadas das matrizes de confusão preservam relações intervalares relativas entre estímulos, possibilitando interpretação geométrica das distâncias no espaço bidimensional. Estudos em percepção tátil demonstram que representações espaciais obtidas por MDS permitem evidenciar dimensões implícitas da organização háptica, tais como rugosidade, dureza ou granularidade (Yoshioka et al., 2007; Okamoto; Nagano; Yamada, 2013).

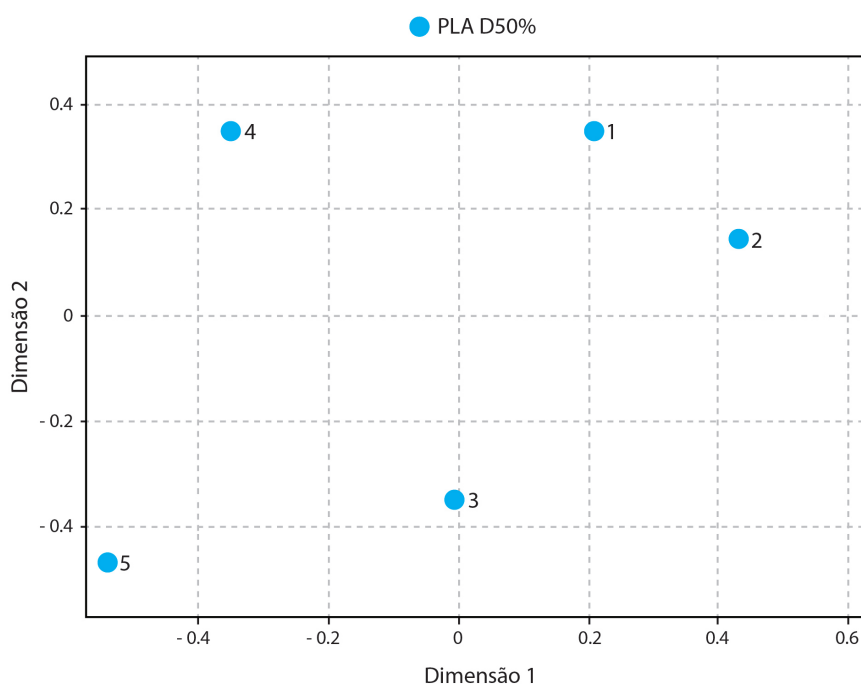
A adequação da solução bidimensional foi verificada por meio do Stress-1 de Kruskal (normalizado), calculado como a raiz da razão entre o erro quadrático das distâncias reconstruídas e a soma dos quadrados das dissimilaridades originais. A análise complementar do “*mini scree*”⁵ (1D, 2D e 3D) permitiu fundamentar, com base nos dados, a escolha da representação em duas

5. O termo “*mini scree*”, no contexto do Escalonamento Multidimensional (MDS) refere-se a um procedimento que consiste em comparar os valores de stress obtidos em soluções com diferentes números de dimensões — por exemplo, uma, duas ou três dimensões — para identificar o ponto a partir do qual a redução do erro passa a ser pouco significativa (Borg; Groenen, 2005).

dimensões como forma mais simples e adequada de visualizar a organização perceptiva (Apêndice IV, p. 191). Tal procedimento encontra apoio na literatura psicofísica, que recomenda a avaliação do ajuste global antes da interpretação substantiva das dimensões extraídas (Picard et al., 2003). Os scripts para a produção do MDS foram desenvolvidos com auxílio de Inteligência Artificial e encontram-se disponíveis na seção de apêndices (ver Apêndice IV).

A visualização resultante apresenta as amostras em um plano cartesiano (Figura 43), onde a proximidade entre os pontos reflete a similaridade tátil percebida entre as amostras, enquanto distâncias maiores sugerem maior dissimilaridade.

Figura 43 - Modelo de visualização dos dados utilizando a MDS.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A análise dos dados também seguiu a estrutura descrita no tópico 5.5, organizada em dois blocos analíticos. Em ambos os blocos, foram empregados dois indicadores específicos de análise que complementam os três indicadores principais comuns aos dois experimentos: as matrizes de confusão para o exame da distribuição dos erros, com foco na identificação de compressões centrais, ambiguidades adjacentes e reorganizações não incrementais; e o Escalonamento Multidimensional (MDS) para a representação bidimensional das relações de proximidade percep-

tiva, permitindo visualizar a arquitetura espacial construída durante a exploração tátil.

5.5.3. Validação metodológica

A validação metodológica foi realizada por meio da comparação estrutural entre os Experimentos 1 e 2. As matrizes de confusão foram analisadas para verificar a consistência dos padrões de erro e da hierarquia incremental da escala. As configurações espaciais obtidas por MDS foram sobrepostas com alinhamento por Procrustes, permitindo mensurar a correspondência entre os experimentos por meio do índice de disparidade. E os gráficos de dispersão complementaram a análise ao evidenciar a convergência ponto a ponto entre os níveis (Quadro 11).

Quadro 11 - Síntese metodológica das etapas de análise para a validação metodológica.

Indicador	Como foi calculado	O que permite interpretar	Natureza da análise
Matrizes de confusão comparativas (Exp1 x Exp 2)	Comparação das tabelas de contingência dos dois experimentos, analisando a frequência de acertos e erros em cada nível da escala e a forma como esses erros se distribuem e se concentram.	Estabilidade dos padrões de erro entre experimentos; consistência da hierarquia incremental; presença ou ausência de reorganizações estruturais na escala	Descritiva estrutural comparativa
Sobreposição dos gráficos do MDS (Exp1 x Exp 2)	Geração de representações bidimensionais por MDS em cada experimento, seguida de alinhamento por Procrustes para ajustar rotação, escala e posição, com cálculo da disparidade residual entre as configurações.	Correspondência entre as configurações espaciais, da estabilidade do espaço perceptivo entre os experimentos e da consistência da organização incremental.	Inferencial estrutural
Disparidade Procrustes	Cálculo da soma dos quadrados das distâncias entre pontos correspondentes após alinhamento; obtenção de índice global de similaridade espacial	Avaliação do grau de convergência entre os experimentos, da diferença estrutural remanescente e da consistência da configuração obtida.	Inferencial comparativa
Gráficos de dispersão comparativos (Exp1 x Exp 2)	Plotagem das coordenadas dos dois experimentos, com análise visual da distribuição, do alinhamento e do afastamento entre os pontos.	Comparação direta entre os níveis da escala, identificando compressões ou deslocamentos locais e verificando visualmente a estabilidade ou variação da estrutura.	Exploratória comparativa
Análise integrada da convergência estrutural	Integração entre as matrizes, o MDS alinhado e os gráficos de dispersão, com interpretação conjunta dos índices quantitativos e da configuração espacial.	Validação metodológica da replicabilidade dos resultados; confirmação da coerência incremental entre experimentos; robustez do modelo perceptivo	Sintética integrativa

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para uniformizar os resultados do experimento 1 os dados obtidos foram convertidos em uma matriz de confusão processada utilizando o MDS, como descrito no tópico anterior, reduzindo as representações para duas dimensões principais (Dimensão 1 e Dimensão 2).

Considerando que os gráficos de MDS são invariantes a rotações, reflexões e mudanças de escala, a comparação entre configurações perceptivas oriundas de diferentes condições experi-

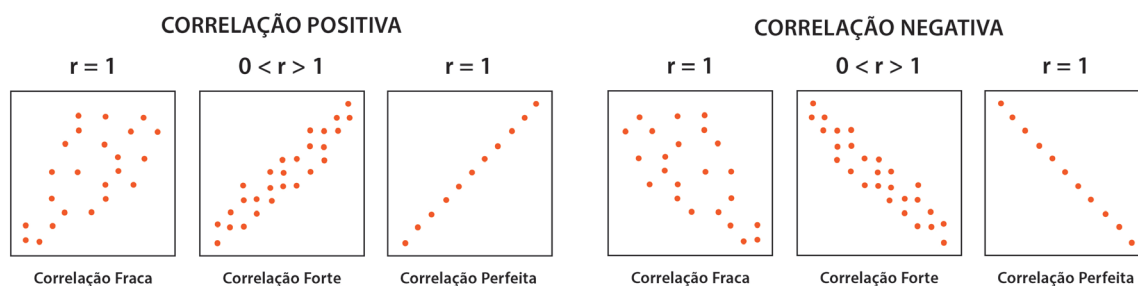
mentais foi realizada por meio de alinhamento por Procrustes (Apêndice IV, p. 197), procedimento que realiza superposição ótima entre configurações, minimizando a soma dos quadrados das distâncias entre pontos correspondentes e fornecendo medida global de discrepância (disparidade). Essa estratégia é amplamente adotada em estudos comparativos de mapas perceptivos, assegurando que diferenças estruturais observadas não decorram de artefatos geométricos do algoritmo, mas de variações efetivas na organização relacional dos estímulos (Yoshioka et al., 2007; Okamoto; Nagano; Yamada, 2013).

Os gráficos da MDS dos dois experimentos foram utilizados para gerar os gráficos de dispersão. De forma complementar, realizou-se análise de correlação (coeficientes de Pearson e Spearman) entre matrizes de confusão vetorizadas, com exclusão opcional da diagonal principal. Essa etapa não substitui a avaliação estrutural promovida pelo Procrustes, mas oferece medida adicional de associação linear e monotônica entre padrões de confusão, contribuindo para a triangulação analítica dos resultados.

A interpretação dos gráficos de dispersão (Figura 44) baseia-se na relação dos valores do coeficiente de Pearson (r) e Spearman (p) obtidos (Cox; Cox, 2001; Borg; Groenen, 2005), onde:

- Valores de r próximos de 1 ou -1 indicam uma correspondência forte entre as dimensões principais das matrizes, sugerindo alta consistência estrutural;
- Valores de r próximos de 0 indicam baixa ou nenhuma correspondência entre as dimensões;
- Valores p inferiores a 0,05 indicam que a correlação observada é estatisticamente significativa, rejeitando a hipótese nula de ausência de associação;
- A correlação positiva mostra que as duas variáveis crescem no mesmo sentido. Ou seja, enquanto uma aumenta, a outra também aumenta;
- A correlação negativa mostra que as duas variáveis são alteradas em sentidos contrários. Ou seja, quando uma aumenta, a outra diminui.

Figura 44 - Gráficos de dispersão.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os gráficos de dispersão gerados para cada dimensão ilustram visualmente a relação entre as coordenadas obtidas das duas matrizes. Essa análise complementar oferece uma visualização intuitiva da consistência estrutural entre as matrizes de dissimilaridade. Os resultados desta abordagem são úteis para validar a hipótese de similaridade estrutural entre matrizes, sendo amplamente utilizados em estudos que envolvem dados perceptuais e táteis (Picard et al., 2003; Yoshioka et al., 2007; Okamoto; Yamada, 2012).

Os procedimentos foram reproduzidos nos grupos controle e experimental com todas as amostras dos materiais analisados (PLA D0%, PLA D50%, PLA D100%, PETG D0%, PETG D50%, PETG D100%, TPU D0%, TPU D50% e TPU D100%).

5.6. Ajustes metodológicos: testes materiais e estudo piloto

5.6.1. Dificuldades técnicas relacionadas a impressão 3D por FFF

Para além das questões relativas ao desempenho tátil de cada material, tornou-se necessário compreender as dificuldades técnicas inerentes ao processo de impressão dos diferentes filamentos quando operado por um usuário sem domínio avançado dos ajustes e das configurações característicos da tecnologia FFF. Por essa razão, a produção das amostras foi conduzida pelo próprio pesquisador, assumidamente iniciante no uso de impressoras 3D. O percurso de aprendizagem, ainda que marcado por tentativas e erros, revelou-se fundamental para apreender, de modo situado, os desafios e limitações associados a cada material.

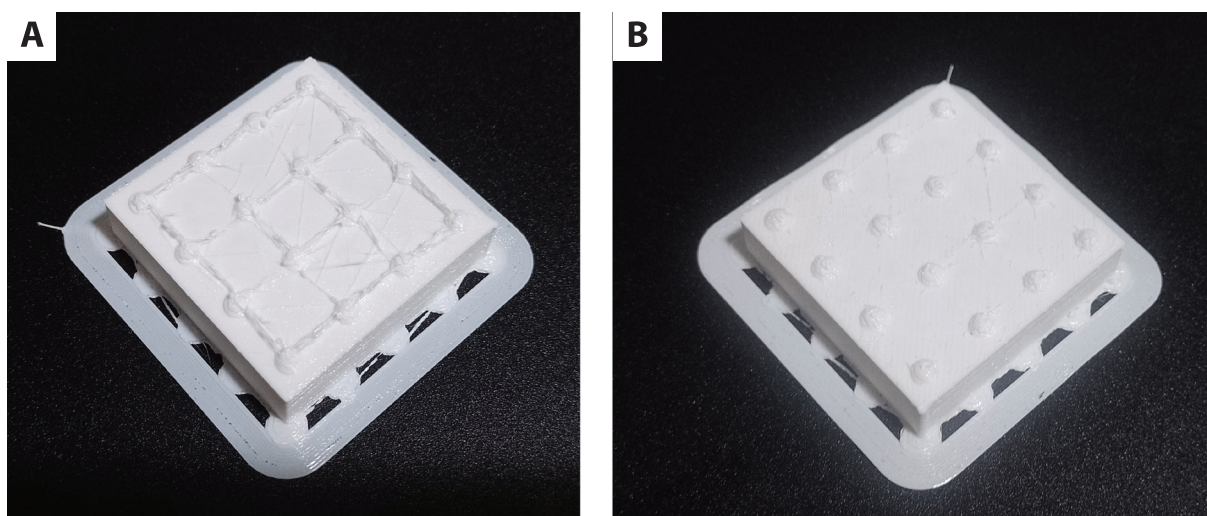
Para os três filamentos selecionados, procedeu-se às calibrações de temperatura, fluxo, pres-

sure advance, retração e fluxo máximo. Como a impressora utilizada dispunha de nivelamento automático, o único ajuste estrutural necessário foi a definição da distância entre o bico extrusor e a mesa de impressão. Entretanto, mesmo com o nivelamento automatizado, determinadas regiões da mesa apresentaram baixa aderência do material, problema que somente foi solucionado após o ajuste fino do eixo Z.

Embora o objetivo central da pesquisa fosse propor um método de análise dos materiais – e não estabelecer qual filamento seria superior –, o fato de as impressões terem sido realizadas por um operador inexperiente configura uma limitação metodológica, sobretudo no caso do TPU, material que concentrou as maiores dificuldades durante a fabricação das amostras.

Inicialmente, optou-se por imprimir as peças em PLA, considerado o material mais simples para obtenção de resultados consistentes. As amostras em TPU foram deixadas para o final, justamente por demandarem maior controle do processo devido à flexibilidade do filamento. A expectativa era manter um padrão de qualidade equivalente entre as três séries de amostras, de modo que a impressão não constituísse uma variável interferente na etapa experimental. Contudo, ao final da produção em TPU, constatou-se um número significativo de rebarbas e imperfeições superficiais, o que prolongou o acabamento pós-impressão e resultou em relevos visivelmente distintos em comparação ao PLA e ao PETG (Figura 75).

Figura 45 - Imperfeições superficiais na impressão das amostras de TPU: (A) amostra impressa com rebarbas e (B) amostra depois da etapa de pós-processamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Diante desse problema, investigou-se uma alternativa: modificar a orientação das peças na mesa de impressão. O primeiro conjunto havia sido impresso com a face maior em contato com a mesa, conforme recomendava a bibliografia. Nesse arranjo, entretanto, os deslocamentos do bico – particularmente críticos no TPU – incidiam diretamente sobre os relevos, agravando a formação das rebarbas. A solução testada consistiu em posicionar a peça lateralmente, de modo que os movimentos mais intensos do extrusor ocorressem na região interna do corpo da amostra, reduzindo significativamente as imperfeições superficiais.

É certo que a orientação vertical pode comprometer a resistência estrutural ao longo do tempo, dado que o esforço exercido na manipulação recai sobre a direção das camadas impressas. Ainda assim, essa configuração apresentou o melhor equilíbrio entre qualidade das peças e exigência de retrabalho, tornando-se a opção mais adequada para fins experimentais.

A vivência prática do processo permitiu compreender com maior clareza por que a maioria dos sistemas de informação tátil destinados a PcDVs é produzida em PLA: trata-se do filamento com maior previsibilidade de calibração, menor custo e melhor desempenho geral na impressão. No quesito velocidade, o PLA novamente demonstrou vantagens, exigindo temperaturas menores de mesa para aderência adequada, o que reduz o aquecimento e, por consequência, o tempo total do processo. Ainda que todos os materiais tenham sido impressos em velocidades reduzidas para maximizar a qualidade, o PLA mostrou-se consistentemente mais estável.

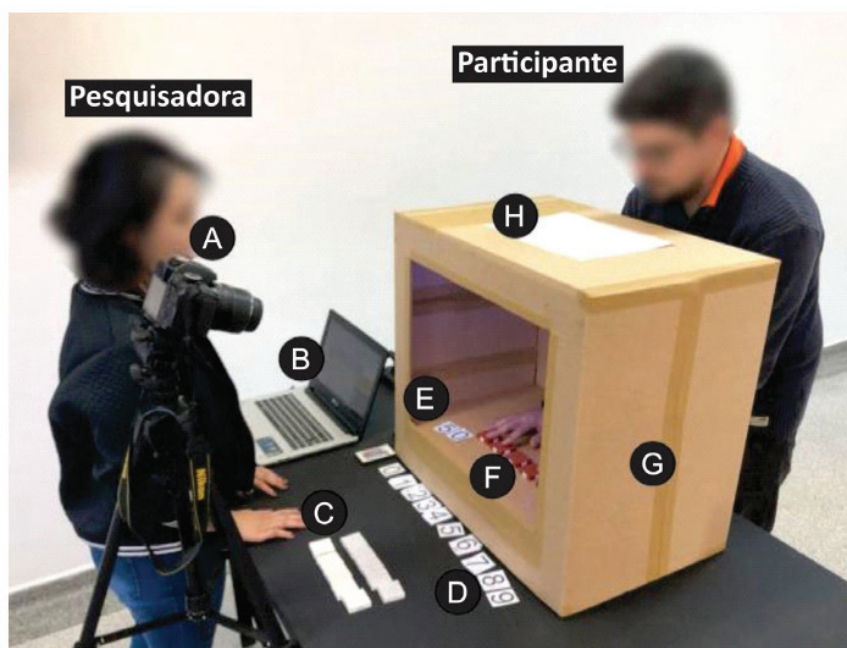
Outro aspecto crítico no contexto da FDM é a higroscopicidade dos filamentos, isto é, a capacidade de absorver umidade do ambiente. Tal característica afeta diretamente a qualidade da impressão e exige cuidados adicionais de armazenamento. Nesse ponto, novamente o PLA se destaca como o menos higroscópico entre os materiais testados, ao passo que o TPU apresentou o maior grau de absorção, tornando-se particularmente sensível às condições ambientais.

5.6.2. Estudo piloto - adequação dos instrumentos de pesquisa

Em relação à metodologia, foi conduzido um estudo piloto (Spirandelli et al., 2024) com o objetivo de refinar o desenho experimental. O estudo foi realizado exclusivamente com participantes com visão, todos estudantes da FAAC. Os materiais testados foram PLA, PETG e TPU, e o procedimento experimental consistiu apenas no teste de ordenação das amostras. A observa-

ção detalhada do piloto permitiu avaliar os instrumentos e os procedimentos de coleta de dados, identificando aspectos que necessitavam de ajustes. Na ocasião, as amostras eram posicionadas dentro de uma caixa, e os participantes manipulavam os estímulos por meio de dois orifícios localizados na parte frontal do dispositivo (Figura 76).

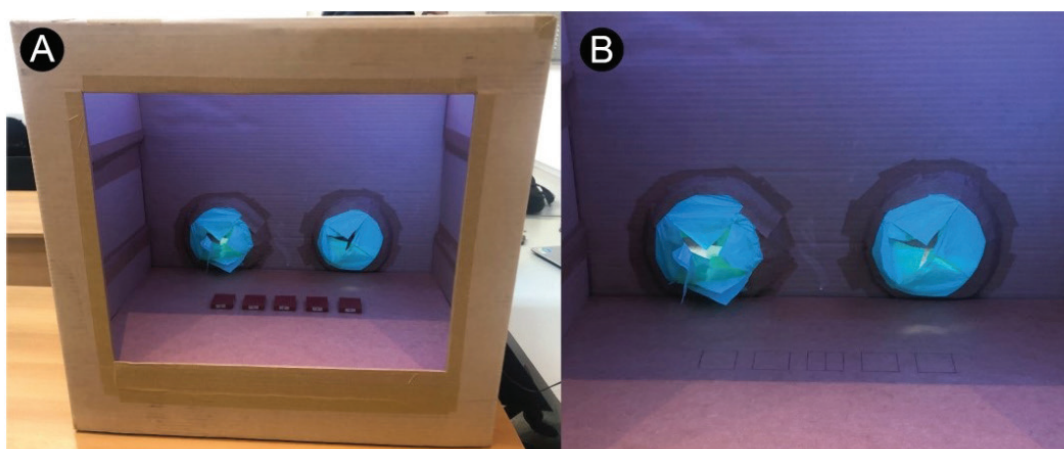
Figura 46 - Coleta de dados no estudo piloto, com uma pesquisadora, um participante e os instrumentos: câmera fotográfica com tripé (A); notebook (B); amostras impressas em 3D (C e F); fichas com números para identificação dos participantes (D e E); cabine de avaliação de percepção háptica (G); ficha com instruções para os avaliadores (H).



Fonte: Spirandelli et al., 2024.

Alguns problemas foram identificados. A base onde as amostras eram apoiadas consistia em uma placa lisa de MDF, sem encaixes em baixo relevo, apresentando apenas marcações gráficas para orientação. Durante a manipulação, muitas amostras eram deslocadas involuntariamente, o que fazia com que os participantes perdessem tempo tentando reencontrá-las. Esse fator interferia diretamente no tempo de execução e comprometia a precisão da medida de eficiência (Figura 77).

Figura 47 - Cabine de avaliação, com abertura retangular na parte anterior (A); e interior com marcação de posicionamento das amostras (B).



Fonte: Spirandelli et al., 2024.

Outro aspecto observado foi o posicionamento dos orifícios da caixa (Figura XB), que exigia que os participantes permanecessem em pé durante a avaliação. Essa postura gerou desconforto, pois muitos precisavam se inclinar para alcançar e manipular as amostras de forma adequada. Além disso, os participantes não foram vendados, o que possibilitou distrações visuais ao longo do teste. Em algumas situações, o próprio formato da caixa permitia tentativas de observação prévia das amostras pelos orifícios, o que comprometia o controle experimental.

Por fim, verificou-se que o desenho metodológico ainda apresentava limitações quanto à simulação de um contexto real de uso, especialmente no que se refere à naturalidade da postura corporal e à organização espacial dos estímulos.

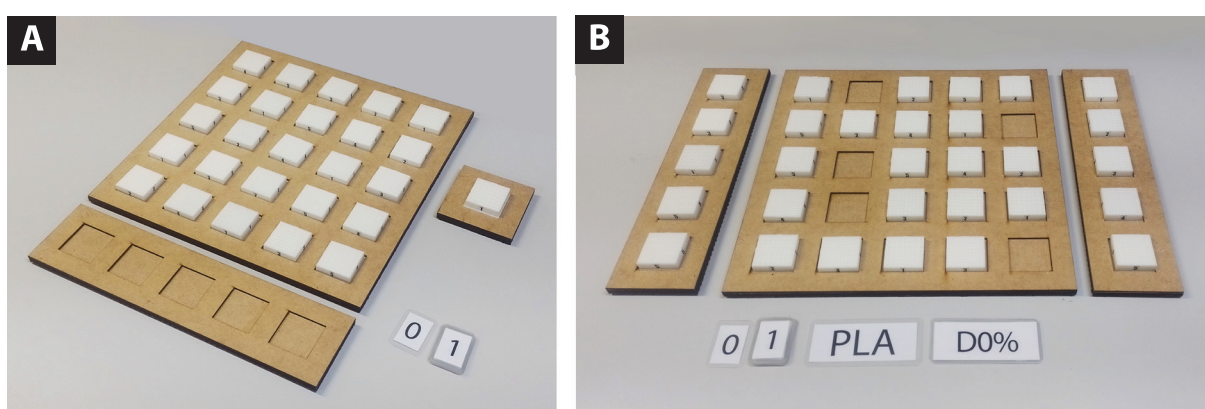
5.6.3. Redesenho metodológico do experimento 2

No desenho metodológico aplicado nesta pesquisa, foi inserido então, o experimento 2 (tarefa de busca tátil), que também passou por ajustes após o início das avaliações com participantes da amostra. No formato original (Figura 78A0, os sujeitos eram instruídos a localizar, em toda a plataforma de tarefa, cinco amostras idênticas à amostra-alvo, repetindo o procedimento para cada uma das cinco amostras selecionadas para a coleta, o que representava a exploração de cinco mapas para cada participante.

Logo se identificaram dois problemas significativos. O primeiro dizia respeito ao tempo

total de execução, que alcançava aproximadamente trinta minutos e gerava fadiga e perda de engajamento por parte dos participantes. O segundo problema surgiu durante a exploração tátil: observou-se que muitos sujeitos não percorreram integralmente a plataforma, selecionando suas respostas sem tocar todas as amostras disponíveis. Esse comportamento pareceu decorrer de dois fatores combinados: a ausência de treinamento tátil prévio — critério previsto na seleção da amostra — e o cansaço provocado pela duração excessiva da tarefa.

Figura 48 - Comparação entre os desenho metodológico do experimento 2: (A) desenho original e (B) desenho com as modificações.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Diante desse cenário, e com o objetivo de tornar o procedimento mais eficiente sem comprometer sua validade, adaptações foram implementadas e resultaram no desenho experimental aplicado no Experimento 2 (Tópico 5.4.3). As análises foram consolidadas em um único mapa, organizado em linhas, sendo que cada linha correspondia a uma amostra-alvo distinta (Figura 78 B).

Com essas modificações, o tempo total do experimento aproximou-se daquele observado no experimento 1, reduzindo substancialmente o desgaste dos participantes e evitando que a falta de experiência tátil interferisse de forma desproporcional no desempenho. Ao mesmo tempo, preservou-se a intenção central do estudo: simular uma situação realista de busca tátil, na qual o usuário precisa identificar diferenças materiais em um conjunto de amostras sob condições controladas, porém próximas do uso cotidiano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Experimento 1 – Teste de ordenação

6.1.1 Grupo Controle – Caracterização da amostra

A entrevista estruturada aplicada ao grupo controle teve como objetivo caracterizar o perfil dos participantes e identificar variáveis contextuais potencialmente associadas ao desempenho na tarefa experimental. A análise dos dados (Apêndice V) permite compreender o pano de fundo formativo, experiencial e emocional dos participantes, contribuindo para qualificar a interpretação dos resultados comportamentais.

A amostra foi composta majoritariamente por estudantes de cursos da área projetual, distribuídos entre Design (55,5%) e Artes (44,5%), indicando perfil acadêmico voltado à prática visual e material. A proximidade percentual entre os cursos sugere composição relativamente equilibrada, embora com leve predominância de estudantes de Design. Tal característica pode ter implicações na familiaridade com processos materiais e sistemas tridimensionais, ainda que não configure experiência específica em leitura tátil estruturada.

A idade média dos participantes foi de 21,88 anos, com desvio padrão de 2,47 anos, evidenciando grupo etariamente homogêneo e concentrado na fase inicial da formação universitária. Essa homogeneidade reduz a probabilidade de variações significativas associadas a diferenças geracionais ou a experiências profissionais consolidadas.

No que se refere ao uso do tato no cotidiano, observa-se distribuição heterogênea. Nenhum participante declarou nunca utilizar o tato como estratégia relevante, contudo 39% relataram

uso raro, 28% ocasional, 16,5% frequente e 16,5% constante (“sempre”). Esse dado indica que, embora o tato esteja presente no cotidiano, sua utilização como ferramenta ativa de exploração não é predominante na maioria dos participantes. A concentração nas categorias “raramente” e “ocasionalmente” (67%) sugere que o grupo controle não apresenta treinamento específico ou dependência sistemática da exploração tátil, o que reforça a condição experimental de privação visual como fator central na tarefa.

Em relação ao contato prévio com impressão 3D, 72% dos participantes relataram já ter tido contato com produtos impressos, enquanto 28% declararam não possuir experiência prévia. Esse dado é particularmente relevante, considerando que a tarefa envolveu materiais produzidos por manufatura aditiva. A maioria da amostra, portanto, possuía algum grau de familiaridade com a textura e acabamento típicos desse processo, o que pode ter contribuído para reduzir o estranhamento inicial durante a exploração.

A avaliação do estado emocional pré-teste, medida por meio da escala visual analógica (VAS), indica que 83,5% dos participantes apresentaram níveis baixos de ansiedade (0 a 4), enquanto apenas 5,5% registraram valor 5, e 11% situaram-se entre 6 e 10. Esses resultados sugerem que a maioria dos participantes iniciou o experimento em condição emocional estável, minimizando a probabilidade de interferência significativa da ansiedade no desempenho.

De forma geral, a caracterização da amostra revela grupo jovem, com formação predominantemente visual, uso tátil cotidiano não sistemático e contato relativamente frequente com impressão 3D. A baixa incidência de ansiedade pré-teste reforça a estabilidade emocional da condição experimental. Esses elementos configuram um perfil compatível com a função do grupo controle: participantes sem dependência estrutural do tato funcional, submetidos à privação visual temporária, permitindo analisar o desempenho tátil sob condição adaptativa e não especializada.

6.1.2 Bloco A – Influência do material na clareza geométrica das texturas

6.1.2.1 Eficácia X Eficiência

O presente subtópico examina a relação entre percentual de acertos e desempenho temporal no grupo controle, buscando compreender de que maneira os diferentes materiais

influenciam simultaneamente a precisão discriminativa e o custo exploratório da tarefa. A articulação entre esses dois indicadores permite observar não apenas o acerto final, mas a dinâmica decisória subjacente à ordenação das amostras.

Tabela 2 - Eficácia (em %) dos materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PLA	PETG	TPU
Acertos (%)	93%	89%	89%
Erros (%)	7%	11%	11%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 3 - Eficiência (em segundos) dos materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. O valor destacado em amarelo representa o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PLA	PETG	TPU
Tempo médio (s)	101,55 (DP= 47,50)	86,5 (DP= 39,67)	97,72 (DP= 51,80)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O PLA apresentou o maior percentual de acertos (93%), configurando o desempenho mais preciso entre os materiais investigados (Tabela 2). No entanto, quando esse resultado é analisado em conjunto com os indicadores de eficiência, observa-se que o PLA registrou o maior tempo médio de execução (101,55 s), acompanhado de desvio padrão de 47,50 s (Tabela 2). A associação entre tempo médio e desvio padrão elevados, pode estar associada a maior incerteza perceptiva e a estratégias exploratórias menos estáveis. Embora o material tenha favorecido elevada precisão, esse desempenho parece ter exigido maior tempo de exploração e comparação, além de apresentar variação considerável entre os participantes.

O PETG e o TPU apresentaram percentual idêntico de acertos (89%) e erros (11%) (Tabela 2). Trata-se de desempenho ligeiramente inferior ao do PLA, mas ainda elevado em termos absolutos. A análise do tempo médio, entretanto, diferencia claramente esses dois materiais.

O PETG registrou o menor tempo médio (86,5 s) e o menor desvio padrão (39,67 s) (Tabela

3). A combinação entre tempo médio e DP reduzidos, aponta para exploração rápida e consistente, indicativa de alta legibilidade tátil. Mesmo com percentual de acertos discretamente inferior ao do PLA, o PETG demonstrou maior homogeneidade no desempenho entre os participantes, sugerindo decisões mais fluídas e previsíveis.

O TPU apresentou tempo médio intermediário (97,72 s), porém o maior desvio padrão entre os materiais (51,80 s) (Tabela 3). Esse padrão se aproxima da condição observada no PLA, com os valores de tempo médio e DP elevados. Embora o percentual de acertos tenha sido equivalente ao do PETG, a elevada dispersão indica que o desempenho não se distribuiu de forma homogênea entre os participantes, revelando maior variabilidade na condução da tarefa.

A análise integrada evidencia, portanto, três perfis distintos no grupo controle. O PLA destacou-se pela maior precisão, mas apresentou maior tempo médio e dispersão, sugerindo exploração mais cautelosa e menos uniforme. O PETG revelou o melhor equilíbrio entre rapidez e estabilidade, configurando o padrão mais consistente segundo a matriz tempo \times DP. O TPU, ainda que eficaz em termos percentuais, mostrou maior instabilidade temporal, indicando diferenças mais acentuadas nas estratégias individuais.

6.1.2.2 Diferença Mínima Significativa (DMS)

Adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), calculou-se o valor crítico da DMS com base no número de condições e no tamanho da amostra, resultando em 19 (Koziol, 2013). Assim, diferenças iguais ou superiores a esse valor foram consideradas estatisticamente significativas, enquanto valores inferiores a esse limiar indicam ausência de distinção estatística entre os pares comparados. A análise permite identificar em quais comparações a distinção entre níveis ultrapassa o limiar de significância, qualificando a interpretação do desempenho para além do percentual global de acertos.

Tabela 4 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p=0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas.

	PLA					PETG					TPU				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	22	37	51	71	89	23	35	53	71	88	18	37	54	72	89
1	-	15	29	49	67	-	12	30	48	65	-	19	36	54	71
2	-	-	14	34	52	-	-	18	36	53	-	-	17	35	52
3	-	-	-	20	38	-	-	-	18	35	-	-	-	18	35
4	-	-	-	-	18	-	-	-	-	17	-	-	-	-	17

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Observa-se que as comparações entre posições consecutivas apresentam comportamento heterogêneo no PLA (Tabela 4). As diferenças entre 1-2 (15), 2-3 (14) e 4-5 (18) situam-se abaixo do valor crítico, não sendo estatisticamente significativas. Apenas a comparação 3-4 (20) ultrapassa o limiar estabelecido. Em contrapartida, todas as comparações entre posições não adjacentes apresentam valores significativamente superiores a 19 (por exemplo, 1-3 = 29; 1-4 = 49; 1-5 = 67; 2-4 = 34; 2-5 = 52; 3-5 = 38), evidenciando separação estatística consistente entre níveis mais distantes na escala. Esse padrão indica que, embora o material sustente diferenças perceptivas consistentes entre extremos, a percepção gradual das diferenças em parte da sequência apresenta proximidade perceptiva.

No PETG, o comportamento é ainda mais uniforme no que se refere às comparações adjacentes (Tabela 4). As diferenças entre 1-2 (12), 2-3 (18), 3-4 (18) e 4-5 (17) permanecem abaixo do valor crítico, não configurando distinção estatisticamente significativa entre níveis consecutivos. Entretanto, assim como no PLA, as comparações entre posições mais afastadas são todas significativas (1-3 = 30; 1-4 = 48; 1-5 = 65; 2-4 = 36; 2-5 = 53; 3-5 = 35). A escala, portanto, sustenta separação robusta em contrastes de maior amplitude, mas não confirma discriminação estatística passo a passo.

O TPU apresenta comportamento intermediário (Tabela 4). A comparação 1-2 (19) atinge exatamente o valor crítico, sendo considerada significativa no limiar. Todavia, as demais comparações consecutivas — 2-3 (17), 3-4 (18) e 4-5 (17) — permanecem abaixo de 19, não atingindo significância estatística. Assim como nos demais materiais, todas as comparações

entre posições não adjacentes apresentam diferenças expressivas e estatisticamente significativas (por exemplo, 1–5 = 71; 2–5 = 52; 3–5 = 35), confirmando diferenças perceptivas consistentes entre níveis mais distantes.

De forma geral, a análise da DMS indica que, no grupo controle, a escala de densidade foi eficaz para garantir separação estatística entre posições mais afastadas, permitindo a ordenação correta da sequência como um todo. Entretanto, a discriminação fina entre níveis consecutivos não se confirma de maneira consistente nos três materiais, sobretudo no PETG e no TPU. Tal resultado sugere que as mudanças progressivas ao longo da escala constituem o ponto de maior proximidade perceptiva, podendo explicar eventuais oscilações comportamentais observadas na tarefa.

6.1.3 Bloco B - Influência da variação na dimensão dos pontos na percepção tátil

6.1.3.1 Eficácia X Eficiência

Neste bloco, a relação entre eficácia e eficiência é examinada considerando a variação dimensional dos pontos. O objetivo é verificar de que modo a ampliação estrutural da textura impacta simultaneamente a precisão das respostas e o tempo necessário para consolidar a ordenação.

Tabela 5 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PLA D0%	PLA D50%	PLA D100%
Acertos (%)	87%	93%	100%
Erros (%)	13%	7%	0%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 6 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. O valor destacado em amarelo representa o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PLA D0%	PLA D50%	PLA D100%
Tempo médio (s)	83 (DP= 20,91)	81,5 (DP= 52)	119 (DP= 48,62)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No PLA, verifica-se progressão contínua da eficácia à medida que aumenta a dimensão: 87% de acertos em D0%, 93% em D50% e 100% em D100% (Tabela 5). A ampliação dos pontos promove, portanto, melhoria consistente da clareza discriminativa, culminando em ausência total de erros na condição de maior escala. Entretanto, essa evolução não é acompanhada por redução proporcional do tempo médio (Tabela 6). Enquanto D0% apresenta tempo de 83 s com baixo desvio padrão (20,91s), configurando exploração relativamente rápida e consistente, a condição D100% registra tempo significativamente maior (119 s) e desvio padrão elevado (48,62 s). Assim, o ganho máximo de eficácia associa-se a maior investimento temporal e a maior variabilidade interindividual, sugerindo que a consolidação das distinções mais salientes pode ter demandado comparação mais cuidadosa entre as amostras.

Tabela 7 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PETG (D0%)	PETG (D50%)	PETG D100%
Acertos (%)	80%	93%	93%
Erros (%)	10%	7%	7%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 8 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PETG D0%	PETG D50%	PETG D100%
Tempo médio (s)	86 (DP= 31,05)	71,5 (DP= 59,78)	83 (DP= 23,65)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No PETG, o comportamento revela dinâmica distinta. A eficácia evolui de 80% em D0% para 93% em D50%, mantendo-se no mesmo patamar em D100% (Tabela 7). A ampliação intermediária mostra-se suficiente para elevar a taxa de acertos, não havendo ganho adicional na condição máxima. Em termos de eficiência (Tabela 8), D50% apresenta o menor tempo médio (71,5 s), porém acompanhado de desvio padrão elevado (59,78 s), indicando exploração rápida, mas heterogênea entre participantes. Já D100% apresenta tempo intermediário (83 s) e o menor desvio padrão (23,65 s), sugerindo maior previsibilidade exploratória. Nesse material, portanto, a dimensão intermediária maximiza a rapidez, enquanto a dimensão ampliada maximiza a estabilidade, revelando troca compensatória entre fluidez e consistência.

Tabela 9 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	TPU D0%	TPU D50%	TPU D100%
Acertos (%)	67%	100%	100%
Erros (%)	33%	0%	0%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 10 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	TPU D0%	TPU D50%	TPU D100%
Tempo médio (s)	73,5 (DP= 18,95)	84 (DP= 62,92)	99,5 (DP= 58,01)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O TPU evidencia o contraste mais acentuado entre precisão e eficiência. Na condição D0%, o percentual de acertos é o mais baixo (67%), mas o tempo médio é o menor (73,5 s), com desvio padrão reduzido (18,95), configurando exploração rápida e homogênea (Tabela 9). Contudo, nas condições D50% e D100%, a eficácia atinge 100%, eliminando a taxa de erro, enquanto o tempo médio aumenta (84 s e 99,5 s, respectivamente) e o desvio padrão se eleva substancialmente (62,92 s e 58,01 s) (Tabela 10). Assim, no TPU, a ampliação dimensional é determinante para a precisão, mas implica maior custo exploratório e maior variabilidade entre participantes.

De forma geral, os resultados indicam que a ampliação dos pontos fortalece a clareza discriminativa nos três materiais, reduzindo a proximidade perceptiva entre níveis consecutivos e elevando o percentual de acertos. Entretanto, esse ganho de precisão não se traduz automaticamente em maior eficiência temporal. Em diversas condições, a ampliação dimensional associa-se a aumento do tempo médio e da dispersão, sugerindo que o incremento de saliência geométrica pode demandar estratégias exploratórias mais cautelosas ou diferenciadas entre indivíduos.

Portanto, a relação entre dimensão e desempenho é mediada pela interação entre escala geométrica e propriedades materiais. O efeito da ampliação não é uniforme: no PLA, produz melhoria progressiva acompanhada de maior custo temporal; no PETG, estabiliza-se já na condição intermediária; e no TPU, exerce impacto decisivo sobre a eficácia, embora com aumento da variabilidade. Esses achados reforçam que a otimização de sistemas táteis não depende exclusivamente do aumento dimensional, mas do equilíbrio entre clareza informacional e regularidade da experiência exploratória.

6.1.3.2 Diferença Mínima Significativa (DMS)

Mantendo-se o critério estatístico previamente estabelecido para $p \leq 0,05$, a análise da Diferença Mínima Significativa foi aplicada às condições dimensionais do grupo controle, com valor crítico de 11. Esse procedimento permite examinar se a ampliação dos pontos altera a robustez das separações estatísticas entre posições da escala.

Tabela 11 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas.

	PETG D0%					PETG D50%					PETG D100%				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	11	11	17	21	30	6	12	18	25	29	6	12	18	25	29
1	-	0	6	10	19	-	6	12	19	23	-	6	12	19	23
2	-	-	6	10	19	-	-	6	13	17	-	-	6	13	17
3	-	-	-	4	13	-	-	-	7	11	-	-	-	7	7
4	-	-	-	-	9	-	-	-	-	4	-	-	-	-	4

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No PETG (Tabela 11), observa-se que, já na condição D0%, a comparação 1–5 (19) ultrapassa o limiar crítico, enquanto parte das comparações intermediárias permanece abaixo (por exemplo, 1–4 = 10). As comparações consecutivas 1–2 (0) e 2–3 (6) não atingem significância, indicando proximidade perceptiva nas transições iniciais. Entretanto, em D50% e D100%, a ampliação dimensional eleva diversas comparações ao patamar de significância, inclusive 1–3 (12), 1–4 (19) e 1–5 (23). Ainda assim, as comparações estritamente consecutivas continuam majoritariamente abaixo do limiar, sugerindo que a ampliação fortalece os contrastes intermediários e amplos, mas não elimina completamente a proximidade incremental entre todos os níveis sucessivos.

Tabela 12 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p=0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas.

	PLA D0%					PLA D50%					PLA D100%				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	6	13	18	23	30	6	12	18	25	29	6	12	18	24	30
1	-	7	12	17	24	-	6	12	19	23	-	6	12	18	24
2	-	-	5	10	17	-	-	6	13	17	-	-	6	12	18
3	-	-	-	5	12	-	-	-	7	11	-	-	-	6	12
4	-	-	-	-	7	-	-	-	-	4	-	-	-	-	6

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No PLA (Tabela 12), a condição D0% já apresenta algumas comparações significativas, como 1–3 (12) e 1–5 (24), embora 1–2 (7) e 2–3 (5) permaneçam não significativas. Com a ampliação para D50% e D100%, observa-se consolidação de significância em maior número de comparações, incluindo 1–3 (12), 1–4 (19) e 1–5 (23 ou 24). Ainda assim, as transições consecutivas mais próximas mantêm valores abaixo de 11 em parte das condições, indicando que a ampliação amplia a separação entre níveis não adjacentes com maior consistência do que entre níveis imediatamente sucessivos.

Tabela 13 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas.

	TPU D0%					TPU D50%					TPU D100%				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	10	13	15	23	29	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30
1	-	3	5	13	19	-	6	12	18	24	-	6	12	18	24
2	-	-	2	10	16	-	-	6	12	18	-	-	6	12	18
3	-	-	-	8	14	-	-	-	6	12	-	-	-	6	12
4	-	-	-	-	6	-	-	-	-	6	-	-	-	-	6

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No TPU (Tabela 13), o efeito da ampliação torna-se particularmente evidente. Em D0%, apenas 1–5 (19) ultrapassa o limiar crítico, enquanto as demais comparações permanecem abaixo. Já em D50% e D100%, diversas comparações intermediárias passam a atingir ou superar 11 (como 1–3 = 12 e 2–4 = 12), ampliando significativamente a estrutura discriminativa da escala. Apesar disso, as comparações consecutivas imediatas (como 1–2 e 2–3) continuam predominantemente abaixo do valor crítico, indicando manutenção de proximidade perceptiva nas transições mais finas.

De forma geral, a análise com critério $DMS \geq 11$ revela que a ampliação dimensional fortalece progressivamente a separação estatística entre níveis não adjacentes e intermediários, sobretudo em D50% e D100%. Entretanto, mesmo nas condições ampliadas, as comparações estritamente consecutivas permanecem, em sua maioria, abaixo do limiar crítico. Isso indica que o aumento da dimensão reduz a proximidade perceptiva global da escala, mas não transforma integralmente as transições incrementais mais sutis em distinções estatisticamente consolidadas.

6.1.4 Grupo Experimental – Caracterização da amostra

Diferentemente do grupo controle, o grupo experimental é composto por pessoas com deficiência visual, cujas trajetórias perceptivas são marcadas por reorganização funcional do sistema sensorial e por diferentes graus de experiência tátil estruturada (Apêndice VI).

No que se refere ao tipo de deficiência, o grupo distribuiu-se entre cegueira (44,5%) e

baixa visão (55,5%), revelando composição relativamente equilibrada entre ausência total e presença residual de visão funcional. Essa distribuição implica diversidade nas estratégias de exploração, uma vez que participantes com baixa visão podem integrar pistas visuais residuais ao processamento tátil, enquanto participantes cegos dependem exclusivamente do tato para a organização espacial da informação.

Quanto à origem da deficiência, observou-se igualmente distribuição equilibrada entre congênita (44,5%) e adquirida (55,5%). Essa variável é particularmente relevante, pois trajetórias congênitas tendem a envolver reorganização cortical mais precoce e consolidação de estratégias táteis ao longo do desenvolvimento, enquanto casos adquiridos implicam adaptação progressiva após período de experiência visual. A coexistência desses perfis no grupo amplia a diversidade de repertórios perceptivos presentes na amostra.

A fluência em braille foi declarada por 33% dos participantes, enquanto 67% indicaram não possuir fluência formal. Esse dado é significativo, pois demonstra que a experiência tátil estruturada não é homogênea no grupo. Ainda assim, mesmo entre aqueles que não utilizam braille de forma sistemática, a vivência cotidiana com o tato como principal via de exploração ambiental sugere repertório funcional consolidado, ainda que não formalizado em sistemas codificados.

No que diz respeito à experiência com sistemas de informação táteis (como jogos de tabuleiro adaptados), 44,5% relataram experiência prévia, enquanto 55,5% não possuíam contato sistemático com esse tipo de recurso. Esse dado indica que parte do grupo possui familiaridade com representações táteis organizadas espacialmente, o que pode influenciar a forma como a gradação geométrica é estruturada perceptivamente.

Destaca-se que 100% dos participantes declararam não possuir contato prévio com impressão 3D. Esse aspecto é metodologicamente relevante, pois elimina a possibilidade de viés decorrente de familiaridade técnica com o processo produtivo ou com a textura típica dos objetos impressos. O desempenho observado pode, portanto, ser atribuído à interação direta entre propriedades físicas do material e experiência háptica geral, e não à experiência específica com manufatura aditiva.

A análise da escala VAS (ansiedade pré-teste) revelou distribuição heterogênea: 44,5% indicaram níveis baixos de ansiedade (0–4), 22% nível intermediário (5) e 33,5% níveis elevados (6–10). Essa variação sugere que os participantes iniciaram a tarefa sob condições emocionais distintas. Contudo, quando comparados aos dados de eficiência, não se observou instabilidade temporal acentuada, indicando que níveis mais elevados de ansiedade não se traduziram neces-

sariamente em desorganização exploratória significativa. Tal resultado sugere maior autorregulação perceptiva no grupo experimental.

6.1.5 Bloco A - Influência do material na clareza geométrica das texturas

6.1.5.1 Eficácia X Eficiência

No grupo experimental, a articulação entre eficácia e eficiência é analisada com o propósito de compreender como os diferentes materiais influenciam a organização da tarefa em participantes com experiência tátil funcional consolidada. A observação conjunta do percentual de acertos, do tempo médio e da variabilidade interindividual permite examinar a consistência do desempenho sob diferentes condições materiais.

Tabela 14 - Eficácia (em %) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PLA	PETG	TPU
Acertos (%)	74%	61%	63%
Erros (%)	26%	29%	27%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 15 - Eficiência (em segundos) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. O desvio padrão (DP) é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PLA	PETG	TPU
Tempo médio (s)	95,93 (DP= 53,63)	87,26 (DP= 50,27)	98,40 (DP= 55,48)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O PLA apresentou o maior percentual de acertos (74%), configurando-se como o material mais eficaz no grupo experimental (Tabela 14). Entretanto, esse desempenho esteve associado a tempo médio relativamente elevado (95,93 s) e desvio padrão de 53,63 s (Tabela 15), indicando variação significativa entre os participantes. Essa combinação sugere que a maior precisão pode

ter sido alcançada com maior tempo de exploração e com estratégias menos consistentes entre os participantes. Assim, o PLA configura-se como material mais eficaz, porém não o mais eficiente em termos de rapidez ou estabilidade.

O PETG, por sua vez, apresentou o menor tempo médio (87,26 s), sendo o material mais rápido entre PcDVs. Contudo, registrou o menor percentual de acertos (61%) e desvio padrão ainda elevado (50,27 s) (Tabelas 14 e 15). Esse padrão indica que a maior rapidez não se traduziu em maior precisão, tampouco em estabilidade consistente entre participantes. A combinação entre tempo médio baixo e DP elevado sugere que alguns indivíduos exploraram o material de forma mais fluida, enquanto outros demandaram maior tempo, o que demonstra diferenças na experiência perceptiva dos participantes.

O TPU apresentou desempenho intermediário em eficácia (63%), porém com o maior tempo médio (98,40 s) e maior desvio padrão (55,48 s) (Tabelas 14 e 15). Esse padrão indica maior duração da tarefa e maior variação entre os participantes. Diferentemente do PLA, cuja maior duração esteve associada a melhor precisão, no TPU o aumento do tempo não resultou em ganho proporcional de acertos.

A análise conjunta mostra que, no grupo experimental, maior eficácia não esteve associada a maior eficiência. O material mais preciso (PLA) não foi o mais rápido; o mais rápido (PETG) não foi o mais preciso; e o TPU apresentou simultaneamente menor estabilidade e maior duração. Essa diferença entre precisão e fluidez na tomada de decisão sugere que, para PcDVs, a forma como a exploração ocorre exerce influência mais determinante sobre o desempenho do que a separação dimensional considerada isoladamente.

Portanto, a relação entre eficácia e eficiência no grupo experimental revela maior sensibilidade às propriedades materiais e maior variação no comportamento dos participantes quando comparada ao grupo controle. Nenhum material reuniu simultaneamente alta precisão, baixo tempo médio e baixa dispersão. Esse resultado reforça a necessidade de interpretar o desempenho de forma conjunta, considerando não apenas a clareza das informações, mas também a regularidade da experiência tátil.

6.1.5.2 Diferença Mínima Significativa (DMS)

A análise da DMS foi conduzida adotando-se como valor crítico o índice ≥ 19 para nível de

significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Assim, diferenças iguais ou superiores a 19 foram consideradas estatisticamente significativas, enquanto valores inferiores a esse limiar indicam ausência de distinção estatística entre os pares comparados (Tabela 15). A aplicação desse critério possibilita identificar a estrutura das distinções incrementais sob cada material no grupo experimental.

Tabela 16 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p = 0,05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas.

	PLA					PETG					TPU				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	28	30	50	78	84	27	33	51	79	80	28	35	46	79	82
1	-	2	22	50	56	-	6	24	52	53	-	7	18	51	54
2	-	-	20	48	54	-	-	18	46	47	-	-	11	44	47
3	-	-	-	28	28	-	-	-	28	28	-	-	-	33	33
4	-	-	-	-	6	-	-	-	-	1	-	-	-	-	3

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No PLA, a comparação entre as duas primeiras posições ($1-2 = 2$) não atinge o valor crítico, indicando ausência de diferença significativa entre esses níveis. Entre as posições consecutivas, observa-se comportamento distinto: as comparações $2-3$ (20) e $3-4$ (28) ultrapassam o limiar de 19, enquanto $4-5$ (6) não apresenta diferença significativa. As comparações entre posições mais distantes — como $1-3$ (22), $1-4$ (50), $1-5$ (56), $2-4$ (48), $2-5$ (54) e $3-5$ (28) — superam consistentemente o critério estabelecido, indicando diferenças estatisticamente significativas. Esse conjunto de resultados mostra que, no PLA, a separação estatística torna-se mais evidente a partir do segundo nível da escala. As transições inicial ($1-2$) e final ($4-5$), por sua vez, revelam maior proximidade perceptiva, sugerindo menor distinção entre esses níveis específicos (Tabela 16).

Para o PETG, as comparações $1-2$ (6), $2-3$ (18) e $4-5$ (1) não atingem o valor crítico e, portanto, não são estatisticamente significativas. Apenas a comparação $3-4$ (28) ultrapassa o limiar, indicando diferença significativa nesse ponto específico da escala. Assim como no PLA, as comparações entre posições não adjacentes apresentam valores elevados e significativos, como em $1-3$ (24), $1-4$ (52), $1-5$ (53), $2-4$ (46), $2-5$ (47) e $3-5$ (28). Esse padrão mostra que as diferenças entre níveis consecutivos não se mantêm de forma uniforme ao longo da escala, sobretudo nas

posições iniciais e finais, onde se observa maior proximidade perceptiva (Tabela 16).

O padrão, no TPU, mostra menor diferenciação entre posições consecutivas. As comparações 1–2 (7), 2–3 (11) e 4–5 (3) não atingem o valor crítico, e apenas 3–4 (33) apresenta diferença significativa entre níveis adjacentes. As comparações entre posições mais distantes — como 1–4 (51), 1–5 (54), 2–4 (44), 2–5 (47) e 3–5 (33) — superam amplamente o limiar de 19, indicando diferenças significativas quando os contrastes envolvem níveis mais afastados da escala. Esse resultado sugere que, no TPU, a distinção perceptiva torna-se mais evidente apenas em diferenças mais amplas, enquanto as transições consecutivas permanecem menos diferenciadas (Tabela 16).

De forma geral, a análise da DMS no grupo experimental revela padrão semelhante ao observado no grupo controle quanto à concentração de significância em comparações não adjacentes. Entretanto, a ausência de significância entre níveis consecutivos mostra-se ainda mais evidente entre PcDVs, especialmente nas extremidades da escala (1–2 e 4–5), onde as diferenças são sistematicamente inferiores ao limiar crítico.

Esse resultado indica que, embora a escala sustente distinções estatísticas claras entre níveis distantes, a distinção entre pequenas mudanças graduais apresenta maior proximidade perceptiva no grupo experimental. Tal configuração contribui para compreender a redução observada nos percentuais de acerto e a maior dispersão temporal, uma vez que a ordenação depende justamente da consolidação dessas transições sucessivas.

6.1.6. Bloco B: Influência da variação na dimensão dos pontos na percepção tátil

6.1.6.1 Eficácia X Eficiência

Considerando as variações dimensionais (D0%, D50% e D100%), este subtópico examina como a ampliação estrutural dos pontos afeta simultaneamente a precisão e a estabilidade temporal no grupo experimental. A análise busca compreender se a dimensão atua como fator de reorganização perceptiva ou apenas como modulador fino da exploração.

Tabela 17 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PETG (D0%)	PETG (D50%)	PETG D100%
Acertos (%)	67%	73%	70%
Erros (%)	33%	27%	30%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 18 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parêntese, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PETG D0%	PETG D50%	PETG D100%
Tempo médio (s)	138 (DP= 55,89)	148,4 (DP= 42,65)	177,6 (DP= 93,06)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No PETG, a eficácia aumenta de 67% em D0% para 73% em D50%, reduzindo levemente para 70% em D100% (Tabela 17). Esse comportamento indica que a ampliação intermediária favorece a discriminação tátil, mas que a ampliação máxima não produz ganho adicional de precisão. Sob a perspectiva da eficiência, observa-se aumento progressivo do tempo médio (138 s em D0%, 148,4 s em D50% e 177,6 s em D100%), acompanhado de variação significativa no desvio padrão, que atinge seu valor mais elevado em D100% (93,06) (Tabela 18). Assim, o ganho moderado de eficácia em D50% ocorre sem redução do tempo médio, enquanto D100% associa menor precisão relativa a maior custo exploratório e elevada variabilidade interindividual. A ampliação máxima, portanto, não otimiza o equilíbrio entre precisão e eficiência no PETG.

Tabela 19 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PLA D0%	PLA D50%	PLA D100%
Acertos (%)	47%	73%	63%
Erros (%)	53%	27%	37%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 20 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PLA D0%	PLA D50%	PLA D100%
Tempo médio (s)	159,6 (DP= 67,73)	161,4 (DP= 2,71)	181,2 (DP= 70,63)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No PLA, o impacto da dimensão é mais pronunciado na eficácia. A condição D0% apresenta desempenho reduzido (47%), seguido de salto expressivo em D50% (73%), e nova redução em D100% (63%) (Tabela 19). A ampliação intermediária mostra-se decisiva para a consolidação da ordenação, enquanto a ampliação máxima não mantém o mesmo patamar de precisão. Em termos de eficiência, verifica-se aumento progressivo do tempo médio (159,6 s em D0%, 161,4 s em D50% e 181,2 s em D100%), com desvios padrão elevados em todas as condições. Observa-se, portanto, que a dimensão D50% oferece melhor relação entre eficácia e eficiência, combinando maior taxa de acertos com tempo médio inferior ao de D100% (Tabela 20). A ampliação máxima, embora aumente a saliência geométrica, não favorece nem a precisão nem a estabilidade exploratória.

Tabela 21 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	TPU D0%	TPU D50%	TPU D100%
Acertos (%)	67%	63%	67%
Erros (%)	33%	37%	33%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 22 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	TPU D0%	TPU D50%	TPU D100%
Tempo médio (s)	141,2 (DP= 92,62)	148,2 (DP= 92,81)	122,2 (DP= 34,46)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No TPU, o padrão é distinto. A eficácia mantém-se relativamente estável entre as três condições (67% em D0%, 63% em D50% e 67% em D100%), indicando que a variação dimensional exerce impacto limitado sobre a taxa de acertos (Tabela 21). Entretanto, a eficiência revela comportamento diferenciado: enquanto D0% e D50% apresentam tempos elevados (141,2 s e 148,2 s, respectivamente) e desvios padrão extremamente altos (superiores a 92 s), a condição D100% apresenta redução significativa do tempo médio (122,2 s) e queda expressiva do desvio padrão (34,46 s) (Tabela 22). Nesse material, a ampliação máxima não aumenta a precisão, mas favorece maior regularidade exploratória e menor custo temporal relativo.

A análise conjunta evidencia que, no grupo experimental, não há correspondência direta entre ampliação dimensional e otimização simultânea de eficácia e eficiência. Em alguns casos, como no PLA, a dimensão intermediária configura melhor equilíbrio; no PETG, a ampliação máxima implica maior custo sem ganho proporcional de acertos; e no TPU, a dimensão máxima melhora a estabilidade, mas não a precisão.

Em síntese, diferentemente do grupo controle — no qual a ampliação dimensional tendeu a fortalecer progressivamente a eficácia —, no grupo experimental o melhor desempenho emerge de combinações específicas entre material e escala intermediária, evidenciando que a otimização de sistemas táteis deve considerar não apenas o aumento da dimensão física, mas sua adequação ao modo de exploração tátil consolidado dos usuários.

6.1.6.2 Diferença Mínima Significativa (DMS)

As comparações múltiplas foram conduzidas adotando-se nível de significância de 5%. Em função do número de participantes e das condições analisadas, o valor crítico correspondente à

Diferença Mínima Significativa foi calculado em 11 (Koziol, 2013). Valores iguais ou superiores a esse limiar indicam significância estatística entre os pares avaliados. O procedimento examina se a separação entre níveis se fortalece de maneira consistente ou apresenta variações dependentes do material.

Tabela 23 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas.

	PETG D0%					PETG D50%					PETG D100%				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	10	11	16	27	26	7	12	17	26	28	10	10	18	26	26
1	-	1	6	17	16	-	5	10	19	23	-	0	8	16	16
2	-	-	5	16	15	-	-	5	14	16	-	-	8	16	16
3	-	-	-	11	11	-	-	-	9	9	-	-	-	8	8
4	-	-	-	-	-1	-	-	-	-	2	-	-	-	-	0

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No PETG, a condição D0% apresenta significância apenas nas comparações envolvendo maior distanciamento na escala, como 1–4 (17 não significativo) e 1–5 (16 não significativo), indicando que poucas comparações ultrapassam o limiar crítico. Em D50%, observa-se fortalecimento parcial da separação estatística, com comparações como 1–4 (19) e 1–5 (23) atingindo significância, enquanto as transições consecutivas permanecem predominantemente abaixo do limiar. Em D100%, há redução das diferenças estatísticas em relação à condição intermediária, mantendo-se significativas apenas comparações mais amplas (Tabela 23). Assim, no PETG, a ampliação intermediária favorece maior consolidação estatística da escala, enquanto a ampliação máxima não amplia proporcionalmente essa separação.

Tabela 24 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas.

	PLA D0%					PLA D50%					PLA D100%				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	11	10	15	27	27	6	12	18	25	29	11	8	17	26	28
1	-	-1	4	16	16	-	6	12	19	23	-	-3	6	15	17
2	-	-	5	17	17	-	-	6	13	17	-	-	9	18	20
3	-	-	-	12	12	-	-	-	7	11	-	-	-	9	11
4	-	-	-	-	0	-	-	-	-	4	-	-	-	-	2

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No PLA, a condição D0% apresenta poucas comparações significativas, limitadas sobretudo a contrastes amplos. Em D50%, observa-se ampliação do número de comparações que atingem o valor crítico, incluindo 1–3 (12), 1–4 (19) e 1–5 (23), indicando maior robustez estatística na estrutura da escala. Contudo, em D100% há redução dessa consolidação, com diversas comparações consecutivas permanecendo abaixo do valor crítico (Tabela 24). O padrão confirma que, para PcDVs, a dimensão intermediária promove maior separação estatística do que a ampliação máxima, em consonância com o comportamento observado na eficácia.

Tabela 25 - Comparação da Diferença Mínima Significativa (DMS) entre as variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam pares de amostras com diferenças significativas ($p= 0.05$), enquanto que os valores em azul indicam diferenças não significativas entre as amostras comparadas.

	TPU D0%					TPU D50%					TPU D100%				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	9	11	16	27	27	6	12	18	26	28	13	12	12	26	27
1	-	2	7	18	18	-	6	12	20	22	-	-1	-1	13	14
2	-	-	5	16	16	-	-	6	14	16	-	-	0	14	15
3	-	-	-	11	11	-	-	-	8	8	-	-	-	14	14
4	-	-	-	-	0	-	-	-	-	2	-	-	-	-	1

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No TPU, a condição D0% apresenta separação estatística restrita, com poucas comparações ultrapassando o limiar. Em D50%, observa-se incremento na magnitude das diferenças, com

comparações como 1–4 (20) e 1–5 (22) atingindo significância, embora as transições consecutivas permaneçam majoritariamente não significativas. Em D100%, verifica-se leve reorganização da estrutura estatística, com manutenção de significância apenas nos contrastes mais amplos e permanência da proximidade incremental entre níveis consecutivos (Tabela 25).

De forma geral, a análise da DMS considerando as dimensões no grupo experimental revela que a ampliação intermediária (D50%) tende a produzir maior número de comparações estatisticamente significativas, especialmente no PLA e no PETG. A ampliação máxima (D100%), embora aumente a saliência geométrica, não consolida adicionalmente a separação estatística entre níveis consecutivos, e em alguns casos reduz a robustez observada na dimensão intermediária.

Esse comportamento dialoga diretamente com a análise integrada de eficácia e eficiência. Nos materiais em que D50% apresentou melhor desempenho percentual (como no PLA e no PETG), observa-se também maior consolidação estatística da escala. Já em D100%, o aumento da dimensão não corresponde a ampliação proporcional da separação estatística incremental, o que pode contribuir para o aumento do tempo médio e da variabilidade observados na eficiência.

Em síntese, no grupo experimental, a ampliação dimensional não opera de forma linear sobre a estrutura estatística da escala. A dimensão intermediária tende a otimizar a separação entre níveis, enquanto a ampliação máxima não garante consolidação adicional das transições incrementais. A discriminação tátil entre PcDVs mostra-se, portanto, mais sensível ao equilíbrio entre proporção geométrica e organização perceptiva do que ao aumento absoluto da dimensão dos pontos.

6.1.7 Análise comparativa: grupo controle × grupo experimental

A comparação integrada entre os grupos, considerando simultaneamente a influência do material (Bloco A) e da variação dimensional (Bloco B), mostra que o desempenho não pode ser explicado por uma relação direta entre propriedade física e resultado perceptivo. Em ambos os grupos, material e dimensão atuam de forma interdependente. No entanto, a maneira como essa interação se organiza depende do repertório exploratório dos participantes.

No grupo controle, a ampliação dimensional funcionou como mecanismo relativamente consistente de fortalecimento da eficácia, sobretudo quando associada a materiais com maior estabilidade geométrica. O aumento da saliência física favoreceu a consolidação de distinções de

médio e longo alcance, embora as transições consecutivas permanecessem como zona sensível da escala. Esse ganho discriminativo, contudo, frequentemente implicou maior custo exploratório, evidenciado pelo aumento do tempo médio e da variabilidade interindividual. Os dados sugerem que a ordenação foi sustentada por estratégias comparativas sucessivas, nas quais o participante precisou estabilizar cognitivamente as diferenças incrementais por meio de verificação reiterada. Assim, no grupo controle, a clareza geométrica resulta da ampliação da saliência física combinada a um esforço organizativo progressivo.

No grupo experimental, a interação entre material e dimensão apresentou dinâmica menos linear. A ampliação intermediária mostrou-se mais eficiente para organizar a escala em materiais como PLA e PETG, enquanto a ampliação máxima não consolidou, de forma sistemática, a robustez estatística das transições incrementais. Em vez de intensificação cumulativa da clareza, observou-se maior sensibilidade à proporção relacional entre níveis consecutivos. Isso indica que, para PcDVs, a clareza não se fortalece simplesmente pelo aumento absoluto do relevo, mas pela coerência estrutural da escala. Quando a ampliação altera de modo excessivo a proporção entre níveis, pode exigir reorganização comparativa mais complexa, elevando o custo temporal sem ganho proporcional de precisão.

A diferença entre os grupos não se reduz, portanto, a maior ou menor sensibilidade tátil. Ela se relaciona à arquitetura estratégica da exploração. O grupo controle, submetido à privação visual temporária e com repertório predominantemente visual-material, tende a responder positivamente ao aumento da saliência geométrica, ainda que com maior investimento exploratório. Já o grupo experimental, cuja experiência háptica é funcionalmente estruturante, demonstra maior dependência da coerência relacional da escala e maior sensibilidade à compatibilidade entre materialidade e proporção incremental.

A integração entre Blocos A e B confirma, assim, que material e dimensão não atuam como variáveis isoladas, mas como componentes de um sistema relacional. Sua eficácia depende do modo como cada perfil perceptivo organiza cognitivamente as transições incrementais. A clareza geométrica não constitui atributo intrínseco do objeto, mas fenômeno que emerge da interação entre saliência física, estrutura dimensional e repertório exploratório do usuário.

6.2 Experimento 2 – Teste de busca tátil

6.2.1 Grupo Controle – Caracterização da amostra

O grupo foi composto majoritariamente por estudantes de Design (73%), com participação complementar de estudantes de Arquitetura (27%), apresentando média de idade de 22 anos (DP = 4,68 anos) (Apêndice VII). Nenhum participante declarou possuir treinamento específico em discriminação tátil, conforme estabelecido nos critérios de exclusão (ver tópico 5.2).

Esse perfil caracteriza um grupo com repertório perceptivo não especializado, ainda que inserido em contexto formativo relacionado ao projeto e à materialidade. Trata-se de participantes potencialmente sensíveis à forma e às qualidades do objeto, mas sem experiência sistemática em estratégias exploratórias hápticas. Assim, o desempenho observado tende a refletir padrões perceptivos espontâneos, e não habilidades treinadas de discriminação tátil.

A variável “frequência do tato no dia a dia” apresentou distribuição diversificada, com predominância de respostas “Ocasional” (38%) e “Frequente” (29%), número menor de participantes indicando “Raramente” (18%) e “Sempre” e apenas um caso de “Nunca” (2%). Esse padrão indica que, embora os participantes não possuam treinamento formal em discriminação tátil, parte expressiva do grupo mantém contato sensorial relativamente ativo com objetos e superfícies em seu cotidiano. Trata-se de um uso funcional do tato, que pode contribuir para certa familiaridade perceptiva, mas não configura prática sistemática de exploração geométrica estruturada.

Observa-se que 58% dos participantes declararam já ter tido contato com produtos impressos em 3D, proporção ligeiramente superior à daqueles que não relataram esse tipo de experiência (42%). Esse dado indica certa familiaridade prévia com a tecnologia, ainda que não necessariamente com suas qualidades táteis específicas. O contato declarado se limitou à manipulação ocasional ou superficial de objetos, sem envolver exploração sistemática das variações geométricas.

Nesse sentido, o conhecimento prévio sobre impressão 3D pode ter influenciado expectativas quanto à textura ou à aparência material, mas não implica, por si só, maior capacidade de discriminação incremental entre níveis geométricos. A diferenciação fina observada na tarefa depende predominantemente da interação direta com os estímulos durante a exploração, e não de experiência técnica acumulada.

Os valores da VAS referem-se ao nível de ansiedade declarado antes da realização da tarefa,

em escala que varia de 0 (muito tranquilo) a 8. Observa-se que 69% dos participantes situam-se entre 0 e 4, indicando níveis baixos a moderados de ansiedade. Outros 11% assinalaram o valor 5, correspondente ao ponto médio da escala. Por fim, 20% registraram valores entre 6 e 8, indicando níveis mais elevados de ansiedade pré-teste. Essa distribuição evidencia variação relevante no estado emocional dos participantes antes da execução da tarefa, mostrando que o grupo não apresentava condição afetiva homogênea no momento da avaliação.

A dispersão observada sugere que os participantes iniciaram a atividade sob diferentes estados afetivo-atencionais. Níveis mais elevados de ansiedade podem influenciar a exploração tátil ao aumentar a cautela e prolongar o tempo de verificação, ou ainda ao comprometer a organização estável das informações percebidas. Por outro lado, níveis mais baixos de ansiedade podem favorecer exploração mais fluida, embora isso não implique, necessariamente, maior precisão.

Nesse contexto, a VAS não deve ser interpretada como medida da dificuldade da tarefa, mas como variável contextual capaz de modular o tempo de exploração e a estabilidade temporal do desempenho.

6.2.2 Bloco A: Influência do material na clareza geométrica das texturas

6.2.2.1 Eficácia X Eficiência

Neste bloco, a relação entre precisão e estabilidade temporal é analisada em função das propriedades materiais no grupo controle. A articulação entre percentual de acertos, tempo médio e variabilidade permite examinar como cada filamento influencia a dinâmica exploratória da ordenação.

Tabela 26 - Eficácia (em %) dos materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PLA	PETG	TPU
Acertos (%)	56%	53%	71%
Erros (%)	44%	47%	29%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 27 - Eficiência (em segundos) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PLA	PETG	TPU
Tempo médio (s)	213,25 (DP= 107,11)	229,26 (DP= 75,55)	281,8 (DP= 300,46)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O TPU apresentou a maior taxa de acertos (71%), superando o PLA (56%) e o PETG (53%). Esse resultado aponta maior precisão na identificação das variações geométricas sob esse material (Tabela 26). Contudo, essa vantagem não se manteve quando considerados os indicadores temporais. O TPU registrou o maior tempo médio (281,8 s) e desvio padrão extremamente elevado (DP = 300,46 s), evidenciando forte variação entre participantes. A maior precisão esteve associada à exploração mais prolongada e menos estável (Tabela 27).

O PLA apresentou desempenho intermediário, com 56% de acertos e o menor tempo médio (213,25 s), embora com dispersão ainda significativa (DP = 107,11 s). O PETG registrou a menor taxa de acertos (53%), tempo médio intermediário (229,26 s) e o menor desvio padrão (75,55 s), indicando maior homogeneidade temporal, porém sem ganho correspondente em precisão (Tabelas 26 e 27).

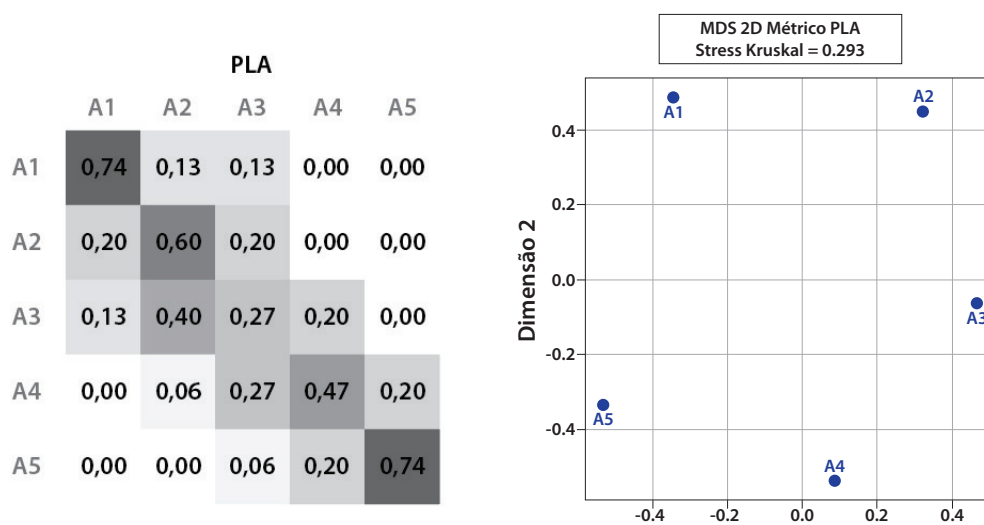
Sob a perspectiva da matriz que articula tempo médio e desvio padrão (ver quadro 9, p. 129), PLA e TPU se aproximam da condição caracterizada por tempo elevado e alta variabilidade, configuração associada a maior instabilidade exploratória entre participantes. Já o PETG se posiciona na faixa de tempo elevado e baixa variabilidade, indicando tarefa exigente em termos de duração, porém realizada de maneira mais homogênea pelo grupo.

Não se observa, portanto, alinhamento direto entre maior precisão e maior estabilidade temporal. O material mais eficaz (TPU) foi também o mais lento e variável; o mais estável (PETG) apresentou menor precisão; e o PLA ocupou posição intermediária. Esses resultados indicam que a clareza geométrica não se traduz automaticamente em eficiência, e que precisão e estabilidade decisória não evoluíram de forma convergente nessa condição experimental.

6.2.2.2 Matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS)

Para aprofundar a compreensão da organização perceptiva sob cada material, são examinadas conjuntamente as matrizes de confusão e os mapas de escalonamento multidimensional (MDS). Enquanto as matrizes explicitam a distribuição dos erros entre posições específicas, o MDS representa graficamente a configuração espacial resultante dessas relações.

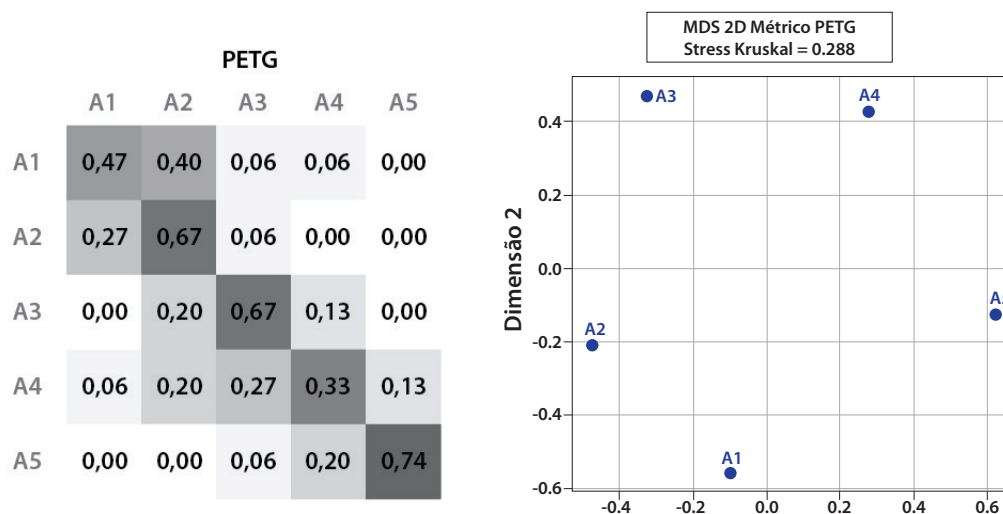
Figura 49 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o PLA do grupo controle.



Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No PLA (Figura 45), observa-se maior concentração de acertos nas extremidades (A1 e A5) e aumento de confusões nas posições centrais, especialmente entre A2 e A3. O MDS confirma essa configuração ao indicar proximidade espacial entre níveis intermediários e maior afastamento nos polos da escala. O espaço perceptivo assume, assim, formato com compressão central e expansão nas extremidades, sugerindo que as diferenças incrementais no núcleo da escala foram menos claramente diferenciadas.

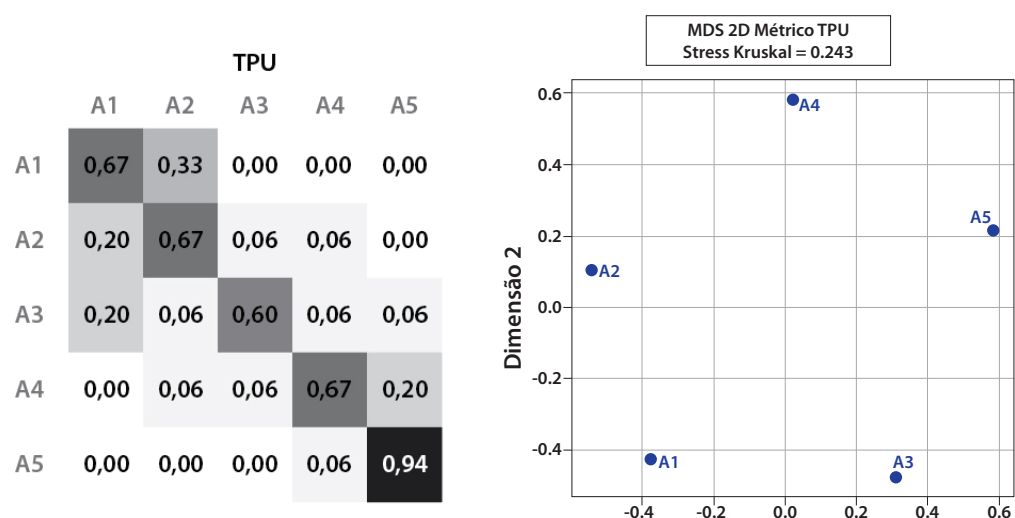
Figura 50 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o PETG do grupo controle.



Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No PETG, os erros distribuem-se principalmente entre posições adjacentes, sem hierarquia claramente definida (Figura 46). No MDS, essa característica se traduz em configuração menos linear e mais fragmentada, com ausência de eixo progressivo bem estabelecido. A gradação geométrica parece ter sido percebida como sequência contínua, porém com sobreposição suficiente para dificultar a consolidação de distinções estruturais entre níveis consecutivos.

Figura 51 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o TPU do grupo controle.



Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No TPU, observa-se redução de confusões não adjacentes e maior concentração de acertos nas extremidades, especialmente em A5 (Figura 47). O MDS revela maior distanciamento global entre posições e menor sobreposição espacial. Embora não se configure linearidade perfeita, há diferenciação estrutural mais evidente e menor compressão central, coerente com sua maior taxa de acertos.

A comparação entre os materiais evidencia três configurações perceptivas distintas: no PLA, contraste periférico com compressão central; no PETG, continuidade gradual com hierarquia limitada; e no TPU, maior separação estrutural global. A convergência entre matriz e representação espacial indica que o material influencia não apenas a precisão final, mas a própria organização relacional das posições no espaço perceptivo construído durante a exploração.

6.2.3. Bloco B: Influência da variação na dimensão dos pontos na percepção tátil

6.2.3.1 Eficácia X Eficiência

A análise a seguir investiga como a variação dimensional dos pontos influencia simultaneamente a precisão das respostas e o custo temporal da tarefa no grupo controle. Busca-se compreender se a ampliação estrutural produz reorganização consistente do desempenho ou efeitos diferenciados entre materiais.

Tabela 28 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PETG (D0%)	PETG (D50%)	PETG D100%
Acertos (%)	44%	52%	64%
Erros (%)	56%	48%	36%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 29 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores em amarelo indicam melhores índices; os valores em azul indicam os piores índices. Para eficiência, os valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

EFICIÊNCIA	PETG D0%	PETG D50%	PETG D100%
Tempo médio (s)	199,2 (DP= 58,65)	249,8 (DP= 75,55)	238,8 (DP= 63,17)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No PETG, observa-se progressão consistente da eficácia à medida que a variação dimensional aumenta: os acertos evoluem de 44% (D0%) para 52% (D50%) e atingem 64% (D100%) (Tabela 28). Esse crescimento indica que a ampliação da diferença geométrica favorece a distinção incremental entre os níveis da escala. Contudo, o comportamento temporal revela que esse ganho de precisão é acompanhado de reorganizações exploratórias específicas. O tempo médio aumenta de 199,2 s (DP = 58,65 s) em D0% para 249,8 s (DP = 75,55 s) em D50%, sugerindo maior custo exploratório na condição intermediária. Em D100%, embora o tempo médio permaneça elevado (238,8 s), observa-se redução tanto do tempo quanto da variabilidade em relação a D50%, indicando estabilização parcial do processo decisório (Tabela 29). Assim, no PETG, a ampliação máxima da variação dimensional parece produzir melhor equilíbrio entre precisão e estabilidade, enquanto a condição intermediária impõe maior exigência reorganizacional.

Tabela 30 - Eficácia das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam os materiais com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PLA D0%	PLA D50%	PLA D100%
Acertos (%)	40%	64%	64%
Erros (%)	60%	36%	36%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 31 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICÁCIA	PLA D0%	PLA D50%	PLA D100%
Acertos (%)	40%	64%	64%
Erros (%)	60%	36%	36%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

No PLA, o efeito dimensional apresenta configuração distinta. A eficácia salta de 40% em D0% para 64% em D50%, mantendo-se em 64% em D100% (Tabela 30). Esse aumento abrupto entre D0% e D50% sugere a existência de um limiar estrutural mínimo necessário para que a diferença geométrica se torne perceptivamente robusta. Entretanto, esse ganho de precisão é acompanhado por expressivo aumento do custo exploratório: o tempo médio passa de 159,8 s (DP = 47,91 s) em D0% para 284 s (DP = 113,73 s) em D50%, praticamente dobrando a variabilidade entre participantes (Tabela 31). A condição D100% reduz o tempo médio para 195,8 s (DP = 93,44 s), mantendo a eficácia elevada, o que indica estabilização relativa após a ampliação máxima da diferença estrutural. O padrão observado sugere que, no PLA, a variação intermediária exige maior reorganização perceptiva, enquanto a ampliação total consolida parcialmente a distinção incremental, reduzindo o esforço necessário para confirmação das diferenças.

Tabela 32 - Eficácia (em %) das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	TPU D0%	TPU D50%	TPU D100%
Acertos (%)	72%	60%	80%
Erros (%)	28%	40%	20%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 33 - Eficiência (em segundos) das variações dimensionais do (TPU D0%, D50% e D100%) para o grupo controle. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	TPU D0%	TPU D50%	TPU D100%
Tempo médio (s)	157,65 (DP= 41,02)	152 (DP= 55,15)	535,8 (DP= 434,84)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O TPU, por sua vez, apresenta comportamento mais complexo. A eficácia já se mostra elevada em D0% (72%), reduz-se em D50% (60%) e atinge o maior percentual do conjunto em D100% (80%) (Tabela 32). Contudo, essa elevação máxima da precisão é acompanhada por ruptura marcante na estabilidade temporal: o tempo médio salta para 535,8 s em D100%, com desvio padrão extremamente elevado (DP = 434,84 s), valor que se aproxima da própria magnitude do tempo médio. Esse padrão revela forte dispersão interindividual e indica que a ampliação máxima da variação estrutural, embora aumente a taxa de acertos, impõe custo exploratório significativamente maior e menos uniforme. Em contraste, D0% e D50% apresentam tempos médios semelhantes (157,65 s e 152 s, respectivamente) e variabilidade consideravelmente menor, sugerindo exploração mais estável, ainda que com precisão inferior em D50% (Tabela 33).

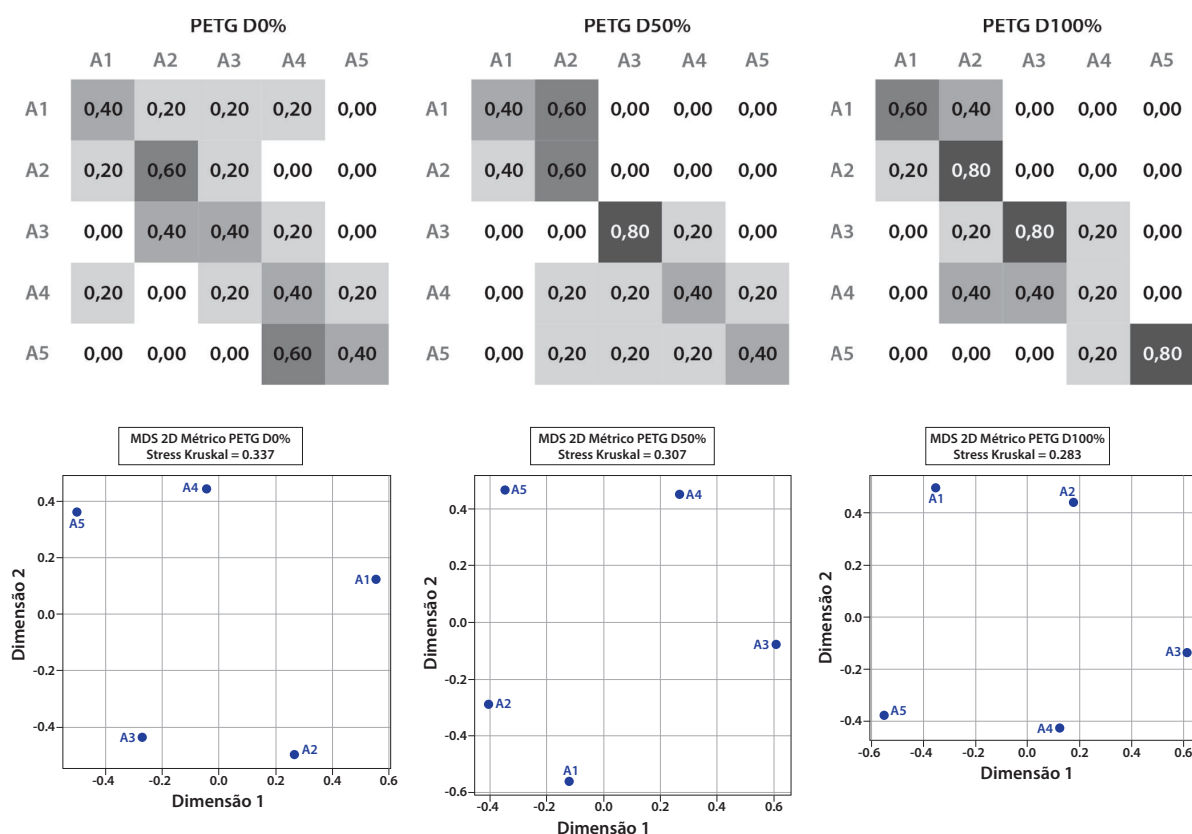
Considerados em conjunto, os dados demonstram que, no grupo controle, o aumento da variação dimensional tende a favorecer a precisão discriminativa, mas não garante maior eficiência temporal nem estabilidade entre participantes. Em alguns casos, como no PETG e no PLA, a ampliação máxima (D100%) contribui para estabilização relativa após fase intermediária mais exigente; em outros, como no TPU, a ampliação estrutural produz aumento expressivo da precisão ao custo de elevada variabilidade exploratória.

Esse padrão indica que, para participantes sem repertório háptico consolidado, a magnitude física da diferença geométrica desempenha papel decisivo na taxa final de acertos, mas sua internalização perceptiva pode demandar reorganização exploratória mais prolongada e menos uniforme. A clareza geométrica, portanto, não emerge apenas da ampliação estrutural em si, mas da interação entre diferença física, propriedades mecânicas do material e capacidade do sistema perceptivo de estabilizar incrementalmente as relações entre os níveis da escala.

6.2.3.2 Matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS)

A organização interna do desempenho sob variação dimensional é examinada por meio da integração entre matrizes de confusão e mapas de MDS. Essa abordagem permite observar como a ampliação dos pontos altera a distribuição dos erros e a arquitetura espacial da escala.

Figura 52 - Matriz de confusão e gráfico MDS (PETG D0%, D50% e D100%) do grupo controle.

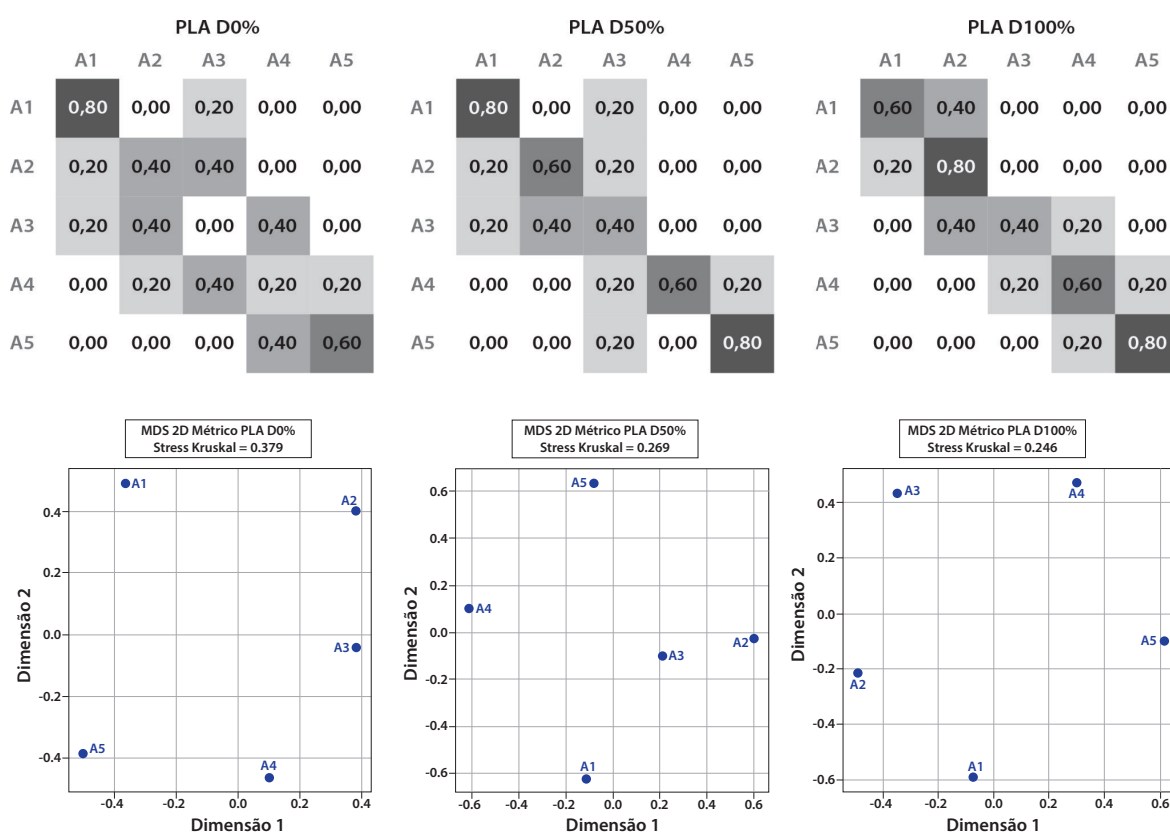


Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No PETG, a condição D0% apresenta matriz caracterizada por dispersão relativamente ampla nas posições centrais e presença de confusões que extrapolam relações estritamente adjacentes. Essa configuração se traduz no MDS por distribuição fragmentada, sem eixo incremental claramente definido (Figura 48). A escala não se organiza como sequência progressiva, mas como conjunto de relações parcialmente sobrepostas. Em D50%, a matriz revela redução das ambiguidades não consecutivas e concentração dos erros nas adjacências imediatas, especialmente entre A1–A2 e A3–A4. No espaço bidimensional, essa reorganização manifesta-se como

início de alinhamento estrutural, ainda que com assimetrias. Já em D100%, observa-se maior concentração dos acertos na diagonal e redução de dispersões não estruturadas; no MDS, as posições passam a ocupar regiões mais hierarquizadas, com maior separação entre extremidades e compressão restrita às transições consecutivas. A convergência entre matriz e mapa espacial indica que a ampliação dimensional promove progressiva linearização da escala.

Figura 53 - Matriz de confusão e gráfico MDS (PLA D0%, D50% e D100%) do grupo controle.

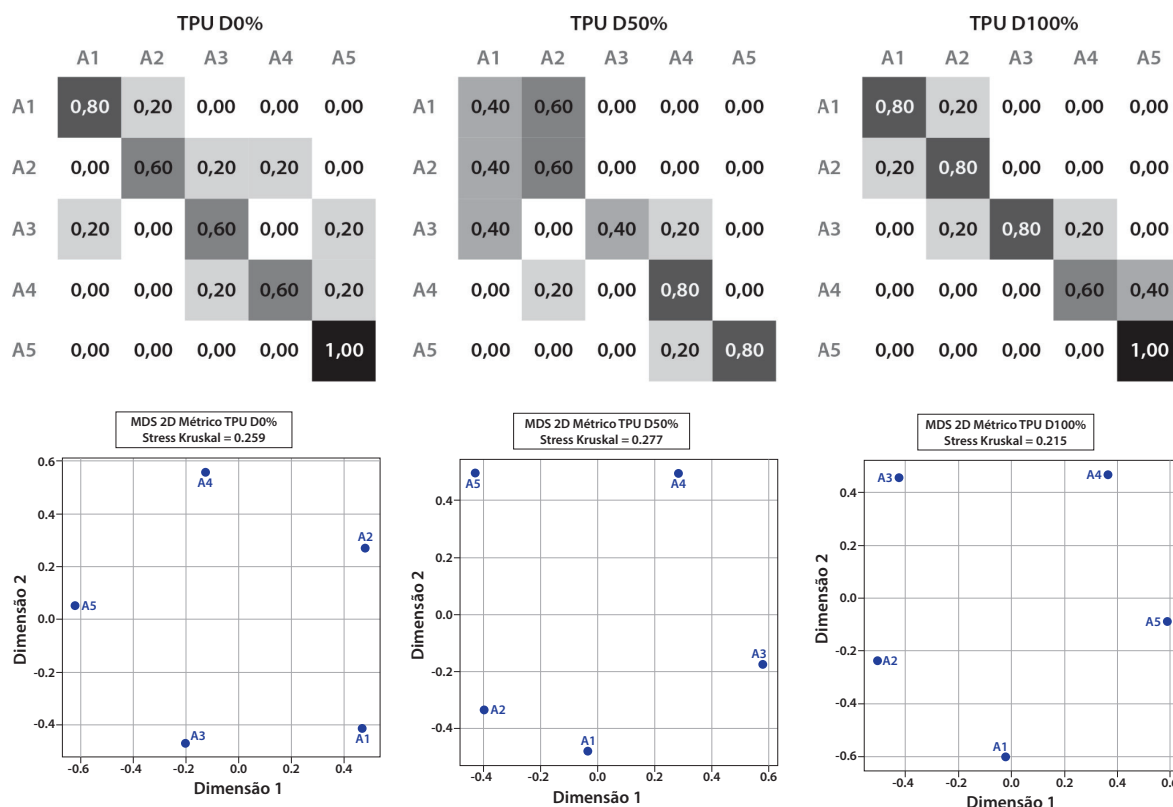


Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No PLA, o D0% evidencia forte compressão central: A3 apresenta baixo índice de acerto e redistribui-se entre A2 e A4, configurando colapso da região intermediária. O MDS confirma essa instabilidade por meio de aproximação espacial entre níveis centrais e maior stress da representação. Em D50%, a matriz mostra reorganização parcial, com aumento dos acertos nas extremidades e redução de dispersões amplas. O mapa bidimensional revela maior distanciamento entre polos e melhor definição incremental, ainda que a região central permaneça relativamente comprimida. Em D100%, consolida-se organização mais coerente: os erros concentram-se qua-

se exclusivamente entre posições consecutivas, e o MDS apresenta distribuição mais ordenada, com redução do stress e expansão espacial entre níveis mais distantes (Figura 49). A compressão central não desaparece totalmente, mas torna-se estruturalmente mais estável e previsível.

Figura 54 - Matriz de confusão e gráfico MDS (TPU D0%, D50% e D100%) do grupo controle.



Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No TPU, a reorganização assume caráter mais evidente. Em D0%, a matriz já indica boa definição nas extremidades e erros predominantemente adjacentes. O MDS confirma estrutura relativamente organizada, com separação clara dos polos da escala (Figura 50). Em D50%, observa-se leve reorganização intermediária, com pequenas compressões centrais, refletidas no mapa espacial por aproximação parcial entre posições intermediárias. Em D100%, contudo, a matriz revela concentração expressiva dos acertos na diagonal e eliminação de erros não adjacentes. No MDS, essa reorganização traduz-se em configuração mais linear, com maior distanciamento global entre níveis e menor sobreposição espacial (Figura 49). A redução do stress nessa condição indica representação bidimensional mais coerente e estruturalmente hierarquizada.

A integração entre matrizes de confusão e MDS evidencia que a variação dimensional atua como mecanismo de expansão do espaço perceptivo no grupo controle. À medida que a diferença física entre os níveis aumenta, reduz-se a ocorrência de reorganizações não incrementais e intensifica-se a hierarquização estrutural da escala. A compressão central, característica das condições D0%, tende a ser progressivamente substituída por configuração em que as ambiguidades se restringem às transições consecutivas, sugerindo internalização mais estável das diferenças geométricas.

6.2.4 Grupo Experimental – Caracterização da amostra

O grupo experimental que participou do Experimento 2 é composto pelos mesmos participantes do Experimento 1 (Apêndice VI), não tendo ocorrido inclusão, exclusão ou substituição de indivíduos entre as aplicações. Dessa forma, preserva-se a caracterização amostral anteriormente apresentada, sendo eventuais diferenças de desempenho atribuídas às especificidades estruturais da tarefa, e não a modificações no perfil dos participantes.

6.2.5 Bloco A: Influência do material na clareza geométrica das texturas

6.2.5.1 Eficácia X Eficiência

No grupo experimental, a análise conjunta da eficácia e da eficiência tem por objetivo examinar como os diferentes materiais modulam a relação entre precisão, tempo de execução e estabilidade interindividual. A investigação considera se os indicadores convergem para padrão integrado ou apresentam dissociações específicas.

Tabela 34 - Eficácia (em %) dos materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PLA	PETG	TPU
Acertos (%)	61%	70%	66%
Erros (%)	39%	30%	34%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Tabela 35 - Eficiência (em segundos) entre os materiais PLA, PETG e TPU para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PLA	PETG	TPU
Tempo médio (s)	172,73 (DP= 62,06)	154,66 (DP= 64,71)	137,2 (DP= 73,35)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O PETG apresentou o maior índice de acertos (70%), superando o TPU (66%) e o PLA (61%). Esse resultado indica que, nesse material, as variações geométricas das texturas foram identificadas com maior consistência final, sugerindo melhor sustentação da separação incremental ao longo da escala. Diferentemente do grupo controle, essa superioridade em eficácia não esteve associada a aumento expressivo do tempo de execução ou da variabilidade entre participantes (Tabela 34).

O PETG registrou tempo médio intermediário (154,66 s) e desvio padrão de 64,71 s, valores próximos aos observados nos demais materiais e consideravelmente inferiores aos padrões de dispersão identificados no grupo controle. Esse dado indica que a maior precisão discriminativa foi alcançada sem aumento do custo exploratório ou instabilidade temporal significativa (Tabela 35).

O TPU apresentou o segundo maior percentual de acertos (66%) e o menor tempo médio (137,2s), acompanhado de desvio padrão de 73,35 s (Tabelas 34 e 35). Esse padrão caracteriza desempenho simultaneamente rápido e relativamente preciso. Ao contrário do observado no grupo controle, o TPU não apresentou dispersão extrema, sugerindo que, para participantes com experiência tátil consolidada, a diferenciação estrutural oferecida pelo material pode ser processada de maneira mais fluida e uniforme.

O PLA apresentou o menor percentual de acertos (61%) e o maior tempo médio (172,73 s), com desvio padrão de 62,06 s (Tabelas 34 e 35). Esse perfil indica material menos eficiente e menos preciso no contexto do grupo experimental. A maior duração da tarefa, associada à menor taxa de acertos, sugere que a organização incremental das variações geométricas pode ter sido menos evidente nesse substrato.

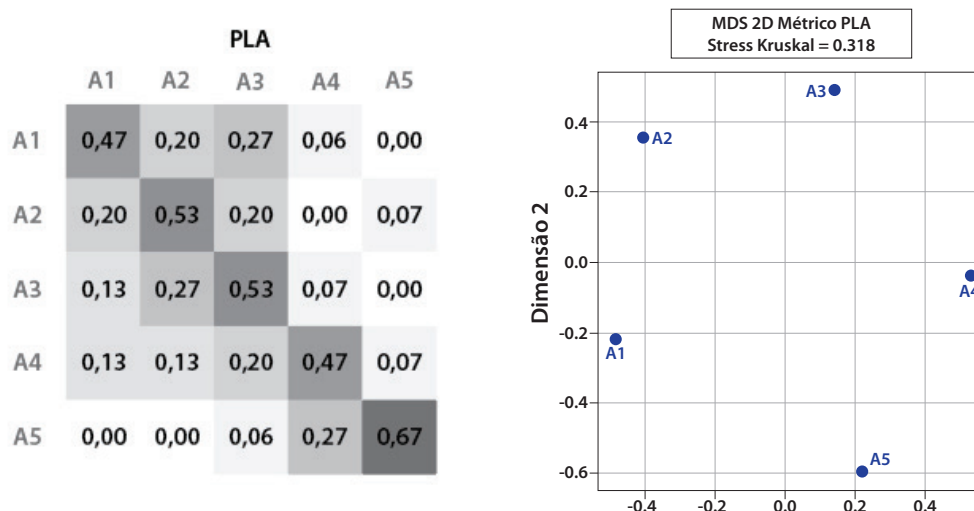
Considerados em conjunto, os resultados mostram que, no grupo experimental, maior precisão não implicou maior custo exploratório ou instabilidade temporal. Diferentemente do grupo controle — onde se observou dissociação entre precisão e estabilidade — aqui emerge padrão mais integrado entre eficácia e eficiência. O PETG revelou melhor equilíbrio entre precisão e

estabilidade; o TPU combinou rapidez com boa capacidade discriminativa; e o PLA apresentou desempenho relativamente inferior em ambos os indicadores.

6.2.5.2 Matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS)

A fim de examinar a organização relacional das posições sob cada material, procede-se à análise combinada das matrizes de confusão e dos mapas de escalonamento multidimensional. Essa integração permite avaliar a coerência entre padrões de erro e configuração espacial construída durante a exploração.

Figura 55 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o PLA do grupo experimental.



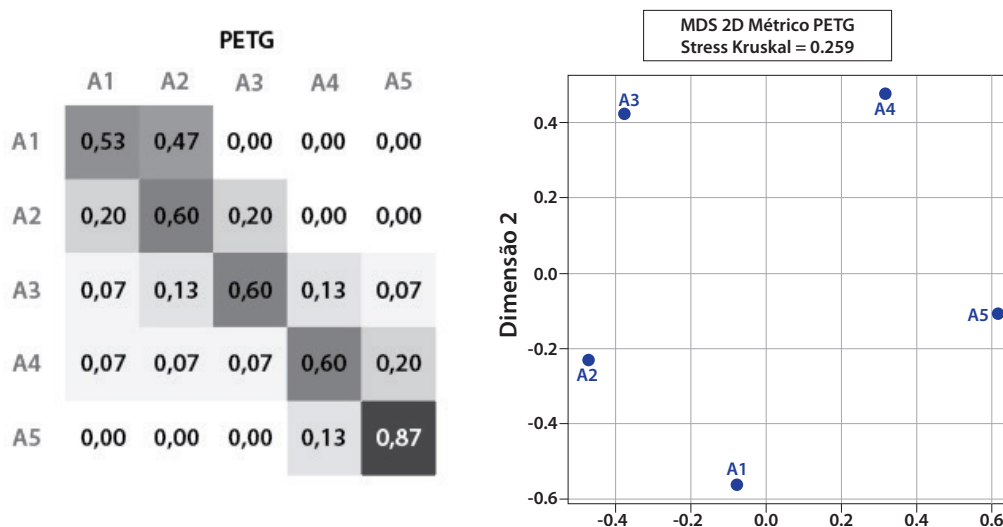
Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No PLA, a matriz indicou distribuição relativamente equilibrada dos acertos ao longo da escala, porém com compressão moderada nas posições centrais, especialmente entre A2 e A3, e entre A3 e A4. As confusões concentraram-se predominantemente entre posições consecutivas, sem dispersões para níveis distantes (Figura 51).

Essa organização incremental aparece de forma coerente no MDS, que mostra proximidade espacial entre as posições intermediárias e maior afastamento progressivo em direção às extremidades. O espaço perceptivo assume configuração relativamente contínua, com leve contração

na região central da escala. A correspondência entre erros consecutivos e proximidade espacial indica que a ambiguidade observada não decorre de instabilidade exploratória, mas da própria organização relacional das posições no espaço representado, onde os níveis intermediários ocupam regiões adjacentes e reduzem a separação incremental (Figura 51).

Figura 56 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o PETG do grupo experimental.

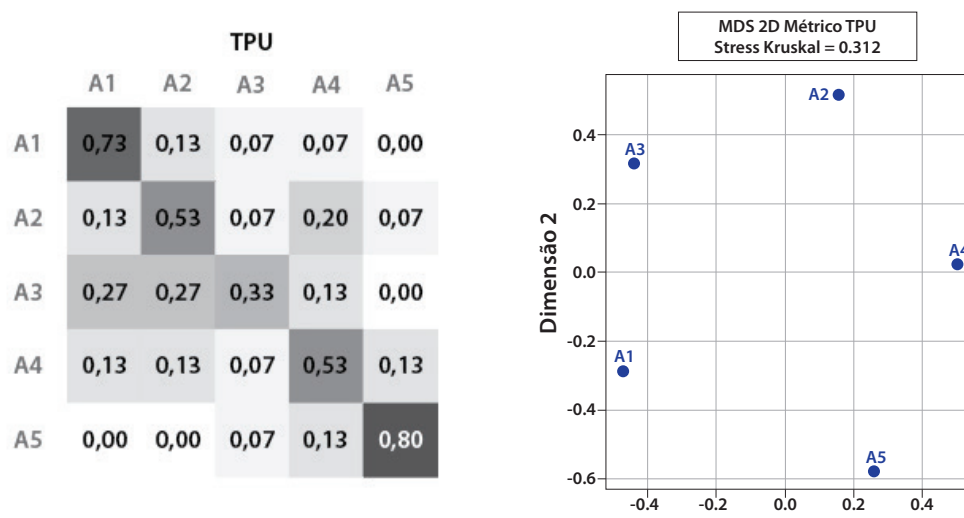


Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No PETG, a matriz revelou padrão mais hierarquizado, com maior concentração de acertos em A5 (0,87) e separação mais consistente entre níveis consecutivos. As ambiguidades mantiveram-se majoritariamente entre posições adjacentes, sem redistribuição significativa para extremos distantes (Figura 52).

No MDS, essa característica se traduz em configuração espacial mais estruturada, com distinção mais evidente das extremidades e progressão relativamente organizada ao longo dos eixos. Embora o stress seja moderado, o mapa evidencia menor compressão central quando comparado ao PLA (Figura 52). A disposição espacial sugere gradação mais consolidada, na qual as posições se organizam como sequência incremental relativamente estável. A convergência entre matriz e MDS indica que o PETG favoreceu organização perceptiva mais uniforme e hierarquizada no grupo experimental.

Figura 57 - Matriz de confusão e gráfico do MDS para o TPU do grupo experimental.



Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No TPU, a matriz mostrou boa distinção nas extremidades (A1 e A5), mas queda significativa de acerto na posição central (A3), com redistribuição relevante para níveis adjacentes. Essa compressão intermediária aparece de maneira consistente no MDS, onde A3 não ocupa posição equidistante entre os extremos, revelando reorganização espacial menos equilibrada no núcleo da escala. Embora não haja fragmentação estrutural ou dispersão não consecutiva, observa-se contração perceptiva na região central, contrastando com maior expansão nas extremidades. A correspondência entre matriz e configuração espacial indica que, no grupo experimental, o TPU favorece diferenciação clara dos polos da escala, mas apresenta menor uniformidade na separação incremental intermediária (Figura 53).

A integração entre matriz de confusão e MDS evidencia, portanto, três padrões perceptivos distintos no grupo experimental: no PLA, organização incremental relativamente contínua, porém com compressão moderada central; no PETG, estrutura mais hierarquizada e distinção progressiva mais consistente; e no TPU, boa diferenciação das extremidades acompanhada de compressão intermediária.

Diferentemente do grupo controle, não se observa fragmentação ou dispersão irregular significativa. As ambiguidades concentram-se quase exclusivamente entre posições consecutivas, indicando exploração sistemática e leitura sequencial da escala. A convergência entre estrutura dos erros e organização espacial sugere que, no grupo experimental, o repertório

háptico consolidado contribui para estabilização do espaço perceptivo, reduzindo reorganizações não estruturadas.

6.2.6. Bloco B: Influência da variação na dimensão dos pontos na percepção tátil

6.2.6.1 Eficácia X Eficiência

Este subtópico investiga como a ampliação dimensional influencia a articulação entre precisão e estabilidade temporal no grupo experimental. Busca-se compreender se a dimensão atua como fator estruturante da reorganização perceptiva ou como modulador incremental de desempenho já estabilizado.

Tabela 36 - Eficácia das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PETG (D0%)	PETG (D50%)	PETG D100%
Acertos (%)	67%	73%	70%
Erros (%)	33%	27%	30%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026.

Tabela 37 - Eficiência das variações dimensionais do PETG (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PETG D0%	PETG D50%	PETG D100%
Tempo médio (s)	138 (DP= 55,89)	148,4 (DP= 42,65)	177,6 (DP= 93,06)

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026.

No PETG, a eficácia apresentou leve aumento em D50% (73%) em relação a D0% (67%), com pequena redução em D100% (70%). O comportamento temporal acompanha essa progres-

são de forma relativamente linear: o tempo médio aumenta gradualmente de 138 s (DP = 55,89 s) em D0% para 148,4 s (DP = 42,65 s) em D50% e 177,6 s (DP = 93,06 s) em D100% (Tabela 36 e 37). Observa-se que o aumento dimensional está associado a crescimento moderado do tempo médio, mas sem explosão de variabilidade. Ainda que D100% apresente maior desvio padrão, este permanece dentro de faixa proporcional ao tempo médio, sugerindo estabilidade exploratória. O padrão indica que o grupo experimental internaliza as diferenças estruturais sem necessidade de reorganização prolongada.

Tabela 38 - Eficácia das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	PLA D0%	PLA D50%	PLA D100%
Acertos (%)	47%	73%	63%
Erros (%)	53%	27%	37%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026.

Tabela 39 - Eficiência das variações dimensionais do PLA (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	PLA D0%	PLA D50%	PLA D100%
Tempo médio (s)	159,6 (DP= 67,73)	161,4 (DP= 52,71)	181,2 (DP= 70,63)

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026.

No PLA, a eficácia cresce de 47% (D0%) para 73% (D50%), reduzindo-se para 63% (D100%). A eficiência acompanha esse comportamento de modo relativamente equilibrado: os tempos médios variam de 159,6 s (DP = 67,73 s) em D0% para 161,4 s (DP = 52,71 s) em D50% e 181,2 s (DP = 70,63 s) em D100%. Não se observa ruptura entre precisão e estabilidade; o aumento dimensional não produz instabilidade acentuada nem variações extremas no tempo de execução. O ganho de eficácia em D50% ocorre sem custo exploratório significativo, indicando ajuste incremental eficiente (Tabela 38 e 39).

Tabela 40 - Eficácia das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. Os valores destacados em amarelo representam os materiais com melhor eficácia, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficácia para os materiais.

EFICÁCIA	TPU D0%	TPU D50%	TPU D100%
Acertos (%)	67%	63%	67%
Erros (%)	33%	37%	33%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026.

Tabela 41 - Eficiência das variações dimensionais do TPU (D0%, D50% e D100%) para o grupo experimental. O desvio padrão é apresentado, entre parênteses, ao lado direito do tempo médio. Os valores destacados em amarelo representam o material com melhor eficiência, enquanto os valores destacados em azul representam pior eficiência para os materiais.

EFICIÊNCIA	TPU D0%	TPU D50%	TPU D100%
Tempo médio (s)	141,2 (92,62)	148,2 (92,81)	122,2 (34,46)

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026.

O TPU apresenta configuração particularmente reveladora. A eficácia mantém-se relativamente constante (67% em D0%, 63% em D50% e 67% em D100%), mas a eficiência melhora na condição de maior variação estrutural. O tempo médio reduz-se de 141,2 s (DP = 92,62 s) em D0% para 148,2 s (DP = 92,81 s) em D50% e atinge o menor valor em D100% (122,2 s, DP = 34,46 s) (Tabela 37). A queda expressiva do desvio padrão em D100% indica maior homogeneidade exploratória entre participantes. Diferentemente do grupo controle — no qual o TPU D100% gerou instabilidade extrema —, aqui a ampliação máxima favorece organização mais rápida e mais estável.

Considerando os três materiais, observa-se que a variação dimensional no grupo experimental não gera fase intermediária de instabilidade pronunciada. Os tempos médios aumentam moderadamente em algumas combinações, mas sem desvio padrão desproporcional. A relação entre eficácia e eficiência mantém-se relativamente integrada, sem ruptura estrutural entre precisão e estabilidade temporal.

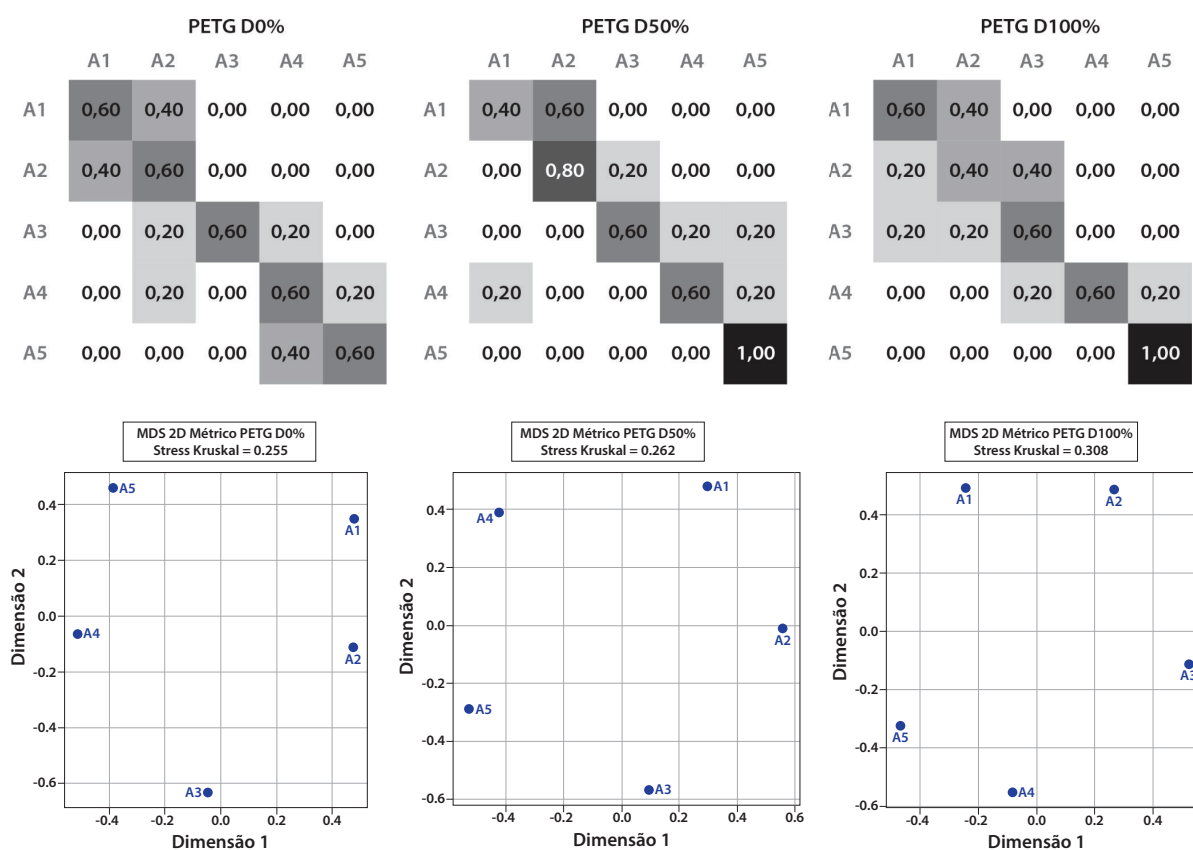
Esse padrão sugere que o repertório háptico consolidado do grupo experimental reduz a dependência da magnitude física da diferença estrutural. A ampliação dimensional não atua como condição necessária para organização incremental da escala, mas como elemento de re-

finamento que pode melhorar a fluidez exploratória — especialmente no TPU D100%, onde se observa simultaneamente tempo reduzido e menor variabilidade.

6.2.6.2 Matrizes de confusão e Escalonamento Multidimensional (MDS)

A análise integrada das matrizes de confusão e dos mapas de MDS permite examinar de que maneira a variação dimensional reorganiza o espaço perceptivo no grupo experimental. A correspondência entre proximidades estatísticas e configuração espacial é utilizada como indicador da coerência incremental da escala.

Figura 58 - Matriz de confusão e gráfico MDS (PETG D0%, D50% e D100%), grupo experimental.

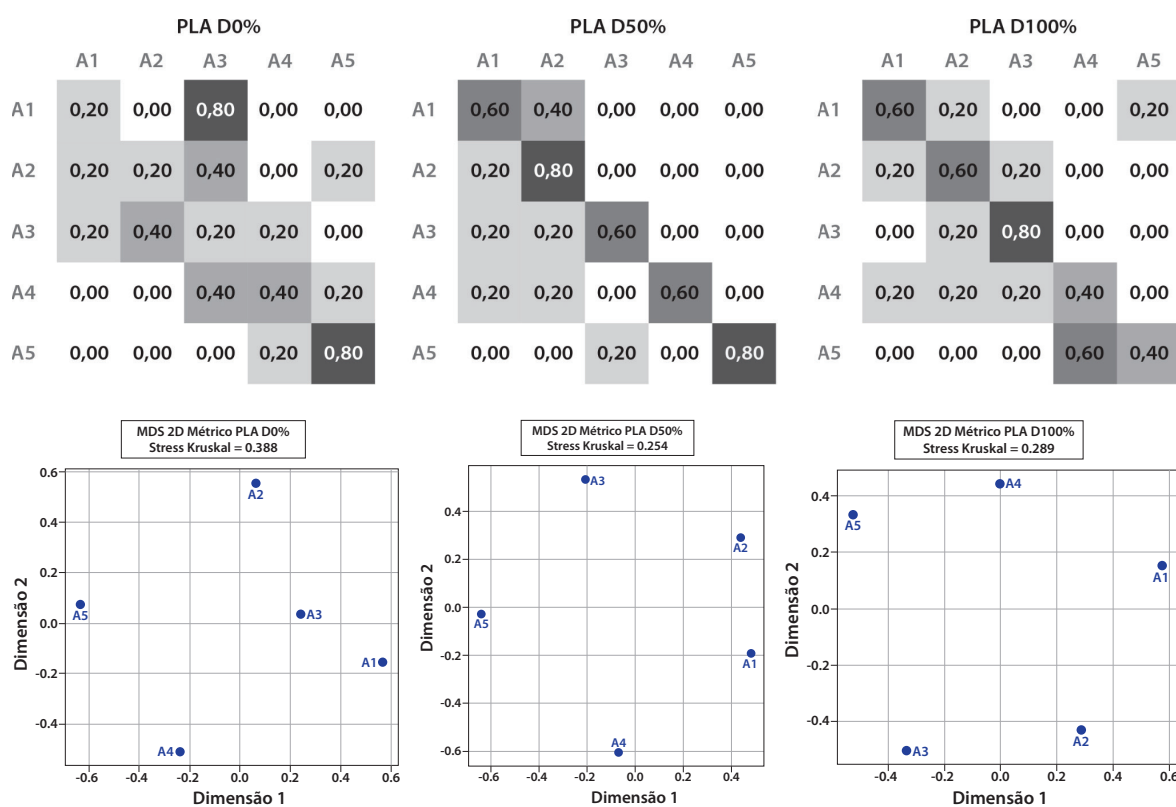


Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No PETG, a matriz em D0% revelou ambiguidades sobretudo entre posições adjacentes, com distinção relativamente estável das extremidades. No MDS correspondente, essa condição

manifesta-se como separação moderada entre polos e maior proximidade entre níveis centrais, sugerindo compressão intermediária. Em D50%, a matriz passa a indicar consolidação acentuada da extremidade superior (A5), e o MDS confirma essa reorganização ao posicionar A5 como polo espacialmente isolado. Em D100%, a estrutura torna-se mais progressiva: as posições distribuem-se de maneira mais hierarquizada ao longo do eixo principal, reduzindo sobreposições centrais (Figura 54). A convergência entre matriz e MDS indica que o aumento dimensional favorece organização incremental mais estável no PETG.

Figura 59 - Matrizes de confusão e gráficos de MDS (PLA D0%, D50% e D100%), grupo experimental.

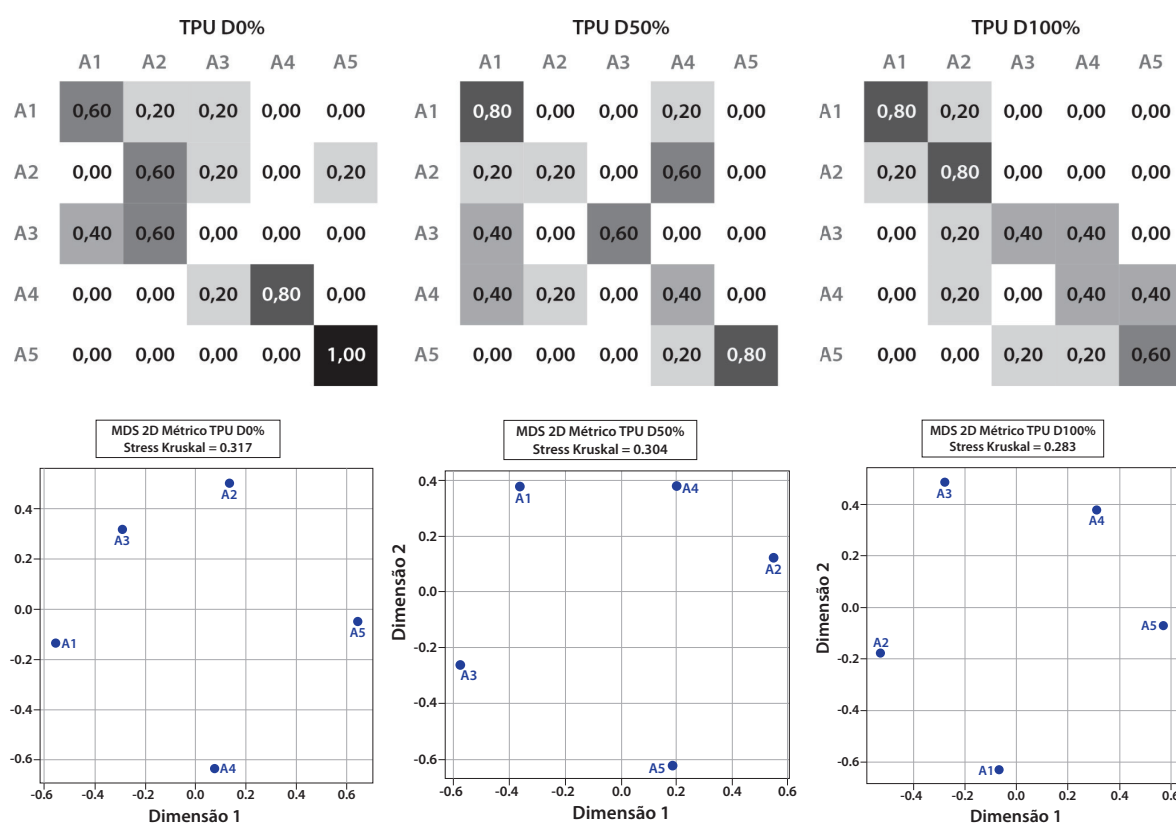


Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No PLA, a matriz em D0% mostrou padrão de compressão central mais pronunciado, com dispersões que ultrapassavam relações estritamente adjacentes. O MDS correspondente revela configuração espacial menos linear e mais fragmentada, confirmando reorganização perceptiva instável. Em D50%, observa-se na matriz aumento significativo de acertos e redução de ambiguidades não adjacentes; o MDS acompanha essa transformação ao apresentar distribuição

mais ordenada, com melhor separação entre blocos intermediários. Em D100%, a consolidação das extremidades torna-se mais evidente tanto na matriz quanto na organização espacial, indicando que o aumento dimensional corrige parcialmente a instabilidade estrutural observada na condição inicial (Figura 55).

Figura 60 - Matriz de confusão e gráfico MDS (TPU D0%, D50% e D100%, grupo experimental).



Fonte: Elaborados pelo autor (2026).

No TPU, a matriz em D0% já indicava forte consolidação das extremidades, especialmente A5, com erros concentrados predominantemente entre níveis consecutivos. O MDS confirma essa polarização ao posicionar as extremidades como polos bem definidos. Em D50%, ocorre redistribuição das ambiguidades centrais, refletida no MDS por leve reorganização do bloco intermediário, ainda que sem ruptura da hierarquia geral. Em D100%, a matriz evidencia consolidação simultânea das extremidades inferior e superior, e o MDS revela expansão espacial mais clara entre polos e níveis intermediários, sugerindo diferenciação incremental mais consistente (Figura 56).

A integração entre matriz e MDS demonstra que, no grupo experimental, as ambiguidades

não configuram desorganização estrutural, mas compressões localizadas entre níveis adjacentes. O espaço perceptivo mantém coerência incremental mesmo quando ocorrem erros. A variação dimensional atua, portanto, como moduladora da distância perceptiva entre níveis consecutivos: quando as diferenças físicas aumentam, a separação espacial tende a ampliar-se de maneira relativamente previsível.

Dessa forma, a análise conjunta confirma que a legibilidade geométrica não se expressa apenas pela taxa de acertos, mas pela estabilidade da arquitetura espacial construída durante a exploração. No grupo experimental, essa arquitetura mostra-se progressivamente mais estruturada à medida que a variação dimensional aumenta, indicando interação eficiente entre substrato material, magnitude dimensional e competência exploratória do participante.

6.2.7 Análise comparativa: grupo controle x grupo experimental

A integração dos Blocos A e B mostra que, na constituição da clareza geométrica, ambos compõem um mesmo sistema relacional, cuja efetividade depende da forma como o repertório perceptivo organiza a exploração incremental da escala. O material estabelece o potencial de diferenciação físico-mecânica, enquanto a dimensão regula a magnitude dessa diferença. No entanto, a transformação dessas propriedades em desempenho perceptivo assume dinâmicas distintas conforme o perfil dos participantes.

No grupo controle, tanto no Bloco A quanto no Bloco B, a organização perceptiva depende fortemente da materialidade objetiva. No Bloco A, as propriedades mecânicas dos filamentos modulam o esforço organizativo e produzem dissociação entre precisão e estabilidade temporal. No Bloco B, a ampliação dimensional atua como recurso compensatório diante da ausência de especialização háptica. À medida que a diferença física aumenta, o espaço perceptivo se expande e as compressões incrementais diminuem. Em ambos os casos, a clareza geométrica resulta da intensificação estrutural do estímulo: quanto maior a saliência física — seja pelo material, seja pela ampliação dimensional — maior a possibilidade de diferenciação, ainda que com aumento do custo exploratório.

Esse padrão se relaciona ao perfil do grupo, marcado por formação predominantemente visual e uso do tato como estratégia adaptativa. A organização incremental da escala depende, portanto, da ampliação objetiva das diferenças estruturais. Material e dimensão induzem uma

reorganização perceptiva progressiva, e a estabilidade espacial é alcançada por meio de comparação reiterada entre os níveis.

No grupo experimental, a dinâmica é distinta. Tanto no Bloco A quanto no Bloco B, a clareza geométrica se manifesta de forma mais integrada entre precisão, tempo e organização espacial. No caso do material, sua influência não gera oscilações acentuadas entre estabilidade e acerto, mas modula a coerência incremental da escala. No caso da dimensão, a ampliação física fortalece a hierarquia espacial, mas não constitui condição exclusiva para sua organização. A arquitetura perceptiva já se orienta para a leitura relacional das diferenças, de modo que material e dimensão funcionam como amplificadores — e não como estruturantes primários — da organização incremental.

A diversidade interna do grupo experimental — relacionada à trajetória sensorial, à origem da deficiência ou à fluência em sistemas codificados — não fragmenta o espaço perceptivo. As estratégias exploratórias convergem para uma organização relativamente estável. Esse resultado sugere que a experiência tátil cotidiana opera como mediadora entre diferença física e estrutura representacional. A ausência de familiaridade prévia com impressão 3D reforça que os efeitos observados decorrem da interação entre propriedades materiais, magnitude dimensional e repertório háptico geral.

A comparação entre os blocos revela, portanto, dois regimes distintos de relação entre estímulo e percepção. No grupo controle, material e dimensão atuam como elementos estruturantes centrais da clareza geométrica, e a ampliação física se mostra decisiva para a reorganização incremental da escala. No grupo experimental, esses mesmos parâmetros se integram a uma arquitetura perceptiva previamente consolidada, funcionando como moduladores de uma coerência espacial já estabilizada.

Em síntese, os resultados do Experimento 2 confirmam a natureza relacional da clareza geométrica. Ela não decorre isoladamente do material nem exclusivamente da ampliação dimensional, mas da articulação entre propriedades físico-mecânicas, magnitude da diferença e repertório perceptivo que organiza a exploração. No grupo controle, a clareza depende fortemente da intensificação objetiva do estímulo. No grupo experimental, ela emerge como coerência estrutural sustentada por experiência háptica consolidada. A interação entre Bloco A e Bloco B indica, assim, que a otimização de sistemas táteis por FFF exige não apenas ajuste técnico dos parâmetros físicos, mas também compreensão do perfil perceptivo para o qual a informação é projetada.

6.3 Validação Metodológica

A validação metodológica foi conduzida com o objetivo de verificar a consistência estrutural das configurações perceptivas obtidas nos dois experimentos, tanto no grupo controle quanto no grupo experimental. Considerando que a investigação não se limita à quantificação de acertos, mas busca compreender a organização relacional das amostras no espaço perceptivo, adotou-se um procedimento analítico voltado à transformação das respostas em representações espaciais comparáveis.

Inicialmente, as respostas do teste de ordenação foram organizadas em matrizes de confusão. Essas matrizes foram posteriormente normalizadas e convertidas em matrizes de dissimilaridade, que serviram como base para a aplicação do Escalonamento Multidimensional (MDS) métrico com distâncias pré-computadas. O objetivo desse procedimento foi representar, em um espaço bidimensional, as relações de proximidade e afastamento entre as amostras conforme percebidas pelos participantes.

A escolha pela solução bidimensional fundamentou-se na análise comparativa entre modelos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais (mini scree), bem como nos valores obtidos para o Stress-1 de Kruskal (normalizado), indicador que avalia o grau de preservação das distâncias originais na redução dimensional. Os valores observados indicaram ajuste satisfatório, legitimando a interpretação dos mapas bidimensionais como representação adequada da estrutura perceptiva derivada das respostas.

Para comparar as configurações perceptivas entre o Experimento 1 e o Experimento 2, aplicou-se o alinhamento por Procrustes. Esse procedimento elimina variações geométricas inerentes às soluções de MDS — como rotação, reflexão e escala — permitindo mensurar a discrepância estrutural entre mapas correspondentes. A partir deste alinhamento, foi possível avaliar o grau de preservação das relações espaciais entre as duas condições experimentais.

Além dos indicadores quantitativos, a análise visual dos mapas alinhados desempenhou papel interpretativo complementar, contribuindo para a identificação de padrões estruturais, deslocamentos relativos e possíveis reorganizações perceptivas entre experimentos.

No caso do grupo experimental, essa etapa assumiu relevância adicional, uma vez que a amostra era composta por pessoas com deficiência visual, cujas trajetórias sensoriais e estratégias exploratórias podem produzir configurações perceptivas mais diversas. Assim, a validação metodológica permitiu examinar não apenas o desempenho quantitativo, mas a estabilidade

estrutural das representações perceptivas em cada grupo.

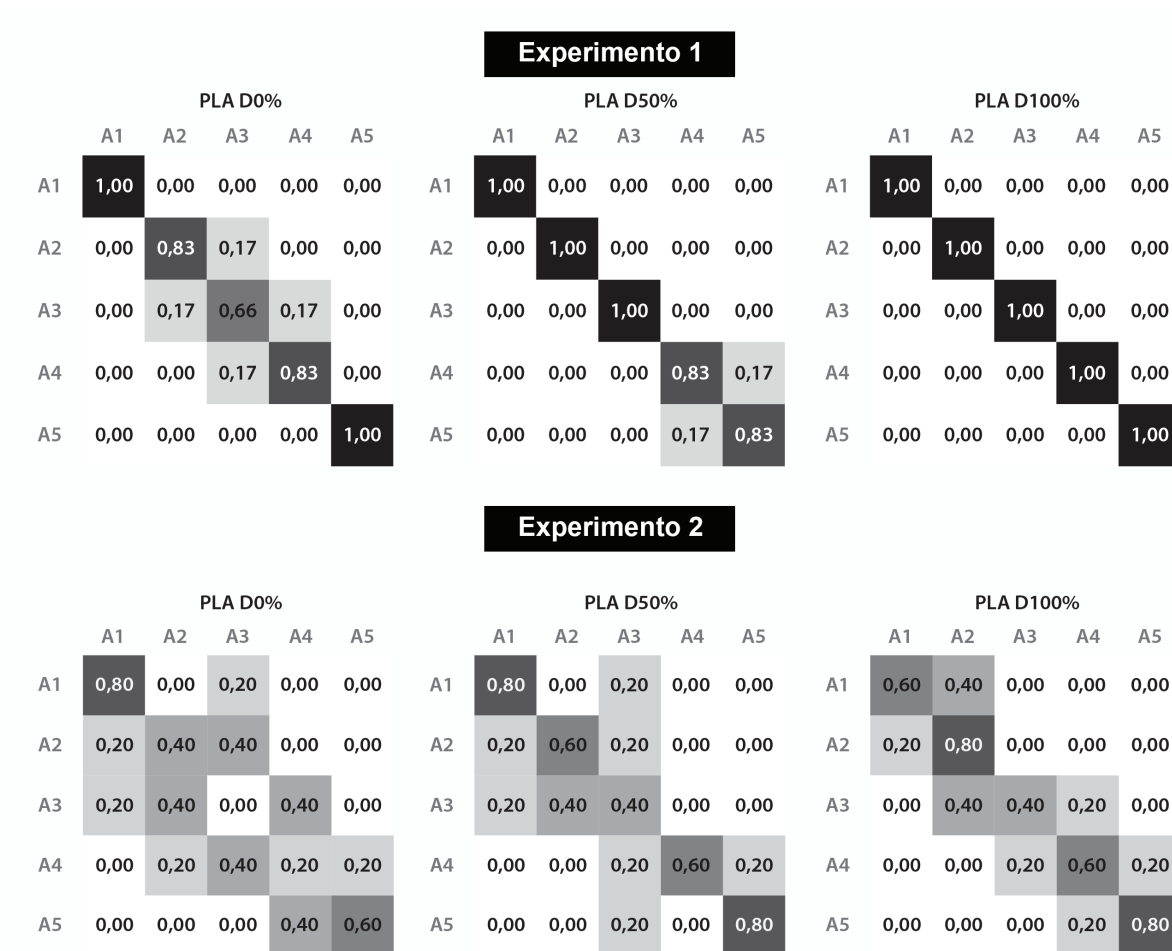
6.3.1 Validação Metodológica – Grupo Controle

A validação metodológica do presente estudo foi conduzida por meio da comparação sistemática entre os resultados obtidos no Experimento 1 (ordenação) e no Experimento 2 (busca), considerando o desempenho do grupo controle. Embora os experimentos envolvam demandas exploratórias distintas — uma centrada na comparação global entre estímulos e outra orientada à identificação de um alvo específico em contexto aplicado —, ambos compartilham a mesma base material e dimensional, o que possibilita a análise da estabilidade das configurações perceptivas geradas.

Para essa validação, foram analisadas de forma integrada as matrizes de confusão, as projeções espaciais obtidas por Escalonamento Multidimensional (MDS), os valores de estresse de Kruskal, bem como os alinhamentos Procrustes e as correlações entre matrizes, permitindo verificar o grau de convergência entre os padrões perceptivos observados nos dois experimentos.

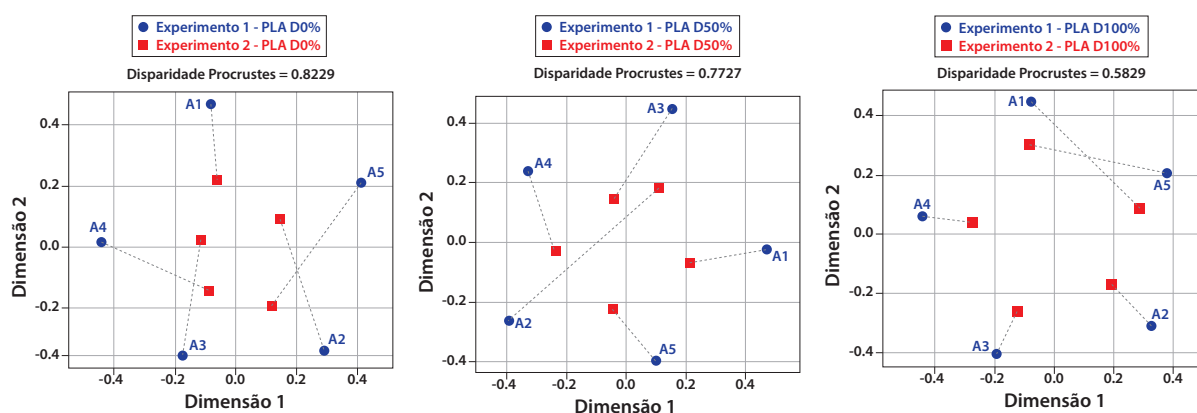
No caso do PLA, observa-se que, na configuração D0%, as matrizes de confusão dos Experimentos 1 e 2 apresentam distribuições distintas, indicando que a organização perceptiva dos estímulos varia de forma relevante entre tarefas (Figura 57). Essa diferença também se reflete nas projeções MDS, nas quais a disposição relativa das amostras apresenta baixa correspondência, corroborada por valores elevados de disparidade Procrustes (Figura 58 e 59). Esses resultados sugerem que, quando os pontos seguem estritamente as dimensões do braille, a estrutura perceptiva construída pelo grupo controle é fortemente dependente do tipo de tarefa executada. Já nas configurações D50% e D100%, observa-se uma maior convergência entre os experimentos, com redução progressiva da disparidade Procrustes e maior alinhamento espacial entre as configurações MDS. Esse comportamento indica que a ampliação dimensional dos pontos contribui para a formação de uma organização tátil mais estável e transferível entre diferentes contextos de uso.

Figura 61 - Comparação entre as matrizes de confusão do PLA (grupo controle).



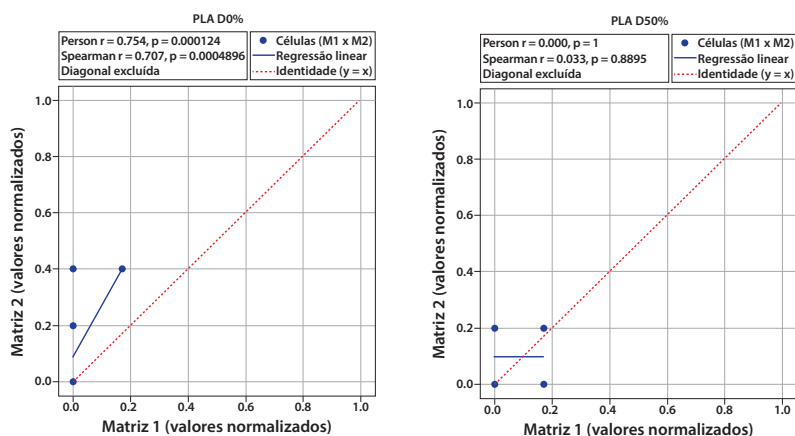
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 62 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o PLA (grupo controle).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

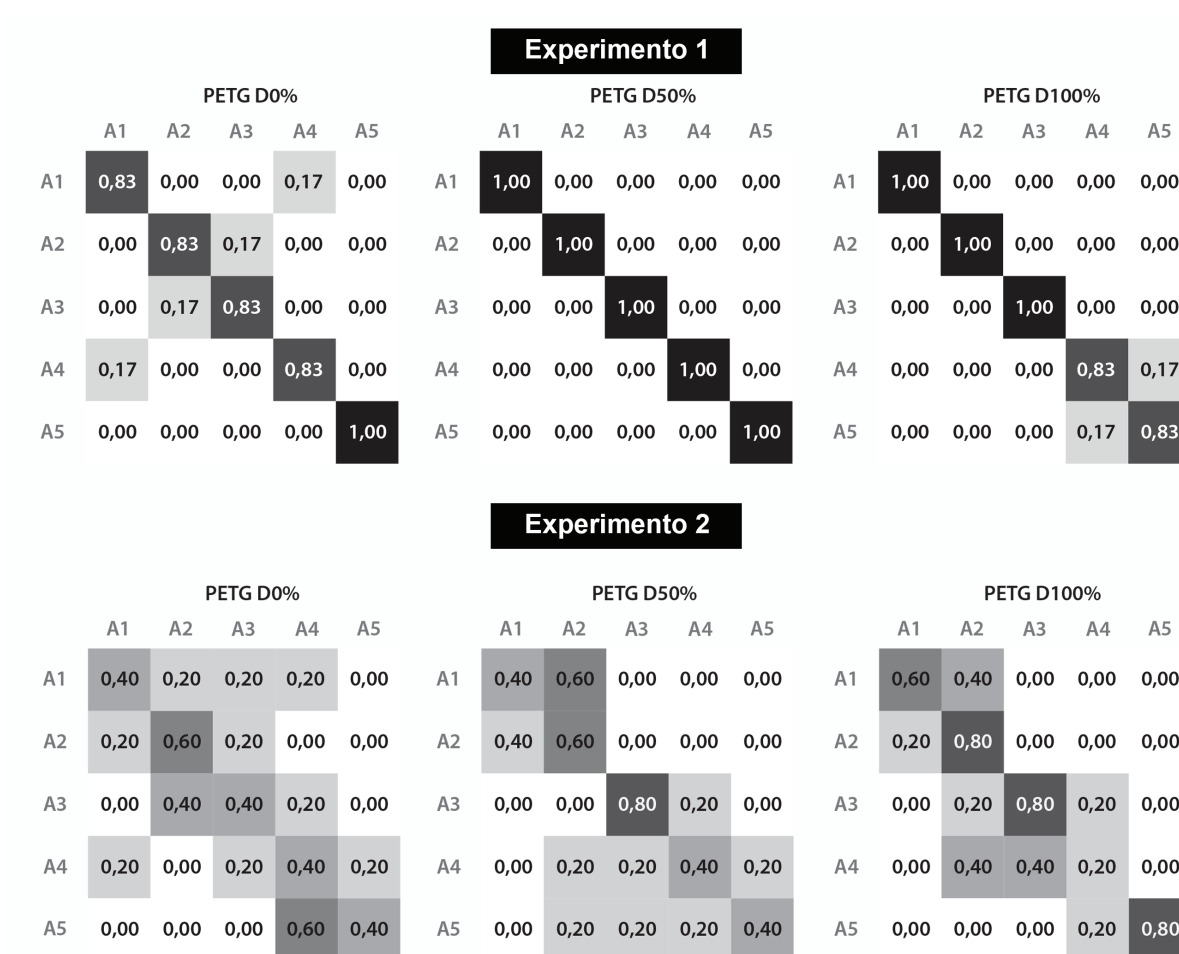
Figura 63 - Gráfico de dispersão para o PLA (grupo controle).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

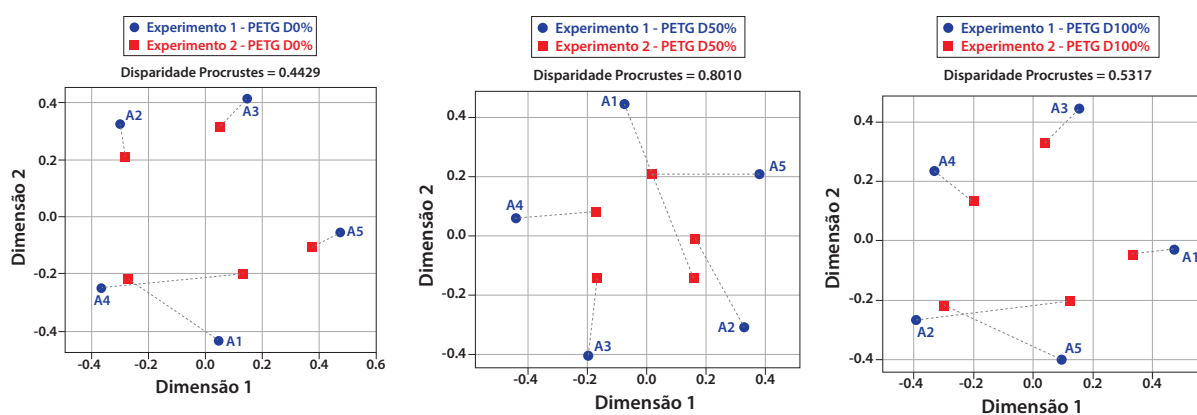
Para o PETG, a validação metodológica apresenta um padrão ainda mais consistente. Na condição D0%, apesar de algumas correspondências pontuais entre as matrizes de confusão, persistem ambiguidades perceptivas que se refletem em projeções MDS (Figura 60, 61 e 62) pouco alinhadas entre os experimentos. Contudo, a partir da configuração D50%, observa-se um aumento expressivo da convergência entre os resultados, com maior coincidência entre as relações de similaridade identificadas nos dois experimentos. Na configuração D100%, essa correspondência torna-se mais evidente: as matrizes de confusão apresentam padrões semelhantes, as projeções MDS revelam estruturas espaciais comparáveis e a disparidade Procrustes é substancialmente reduzida. Esses achados indicam que, para o PETG, a ampliação dimensional favorece não apenas a discriminação tátil, mas também a consistência metodológica entre diferentes tipos de tarefa.

Figura 64 - Comparação entre as matrizes de confusão do PETG (grupo controle).



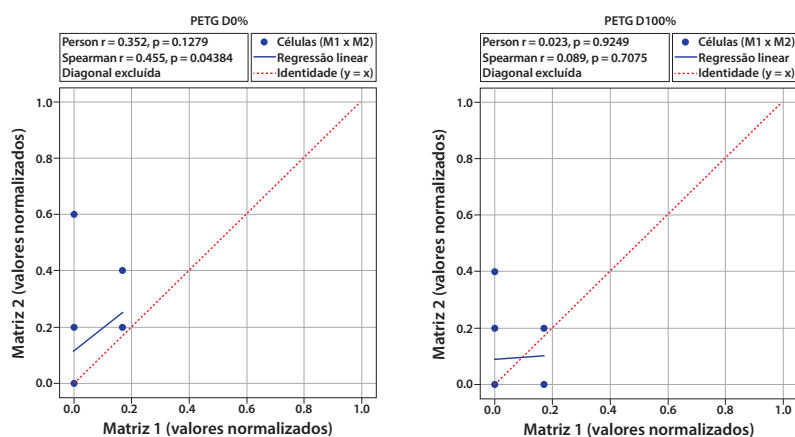
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 65 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o PETG (grupo controle).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

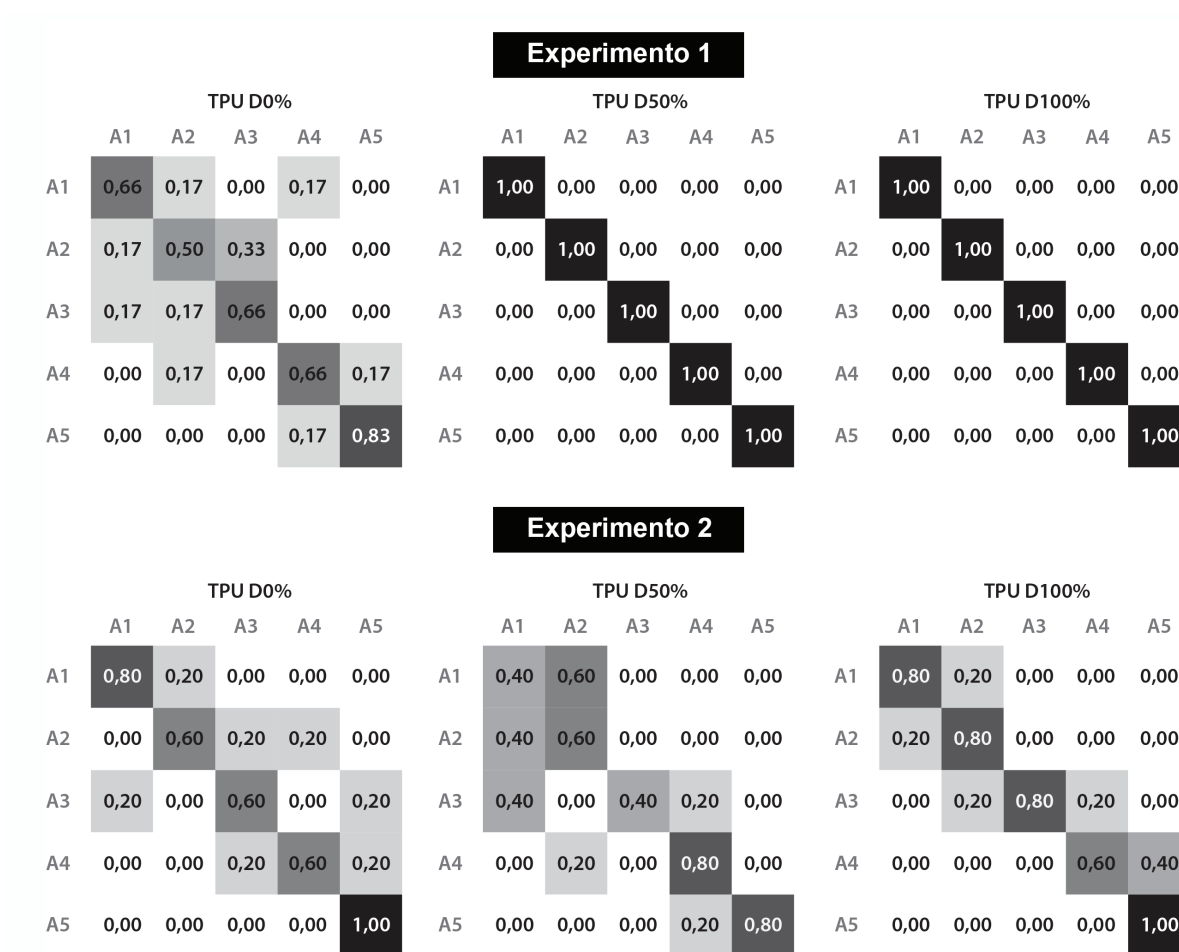
Figura 66 - Gráficos de dispersão para o PETG (grupo controle).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

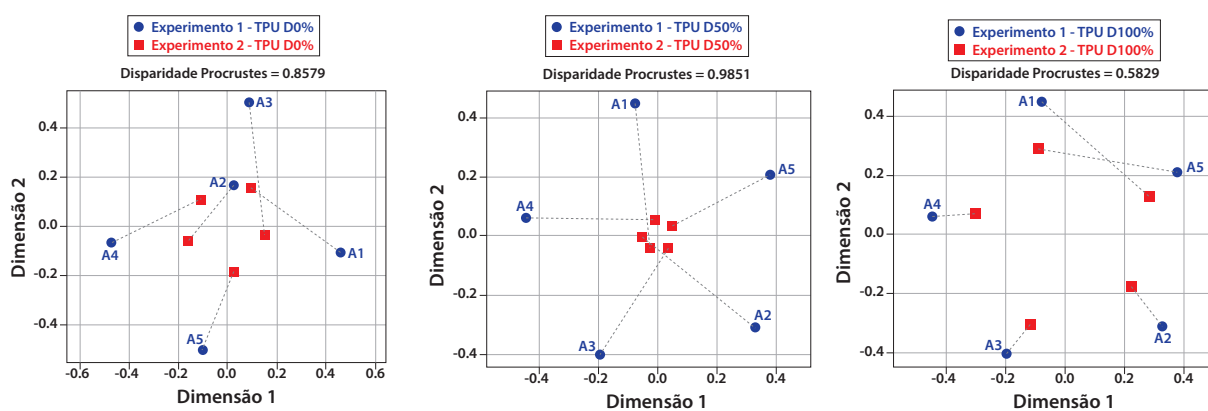
O TPU apresenta o cenário mais crítico do ponto de vista da validação metodológica. Na configuração D0%, as matrizes de confusão revelam elevada dispersão de respostas e baixa concordância entre os experimentos, refletida em projeções MDS significativamente distintas e nos maiores valores de disparidade Procrustes observados. Esse comportamento evidencia que a flexibilidade do material, associada à alta densidade de pontos, compromete a formação de uma estrutura perceptiva estável. Na configuração D50%, verifica-se uma melhora parcial, com alguma aproximação entre os padrões dos dois experimentos, embora ainda persistam diferenças relevantes. Apenas na condição D100% o TPU apresenta uma convergência mais consistente, com maior alinhamento entre as matrizes de confusão e redução da disparidade Procrustes, indicando que a ampliação máxima das dimensões dos pontos é fundamental para mitigar os efeitos da deformabilidade do material e garantir maior estabilidade perceptiva (Figuras 63, 64 e 65).

Figura 67 - Comparação entre as matrizes de confusão do TPU (grupo controle).



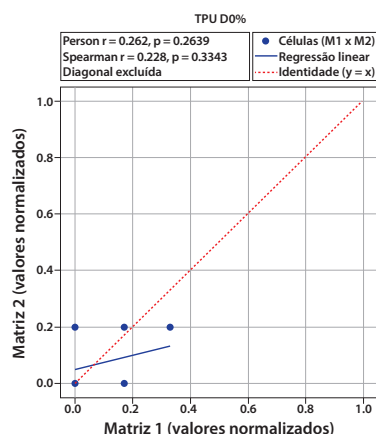
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 68 - Sobreposição dos gráficos de MDS e gráficos de dispersão TPU (grupo controle).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 69 - Gráfico de dispersão TPU (grupo controle).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

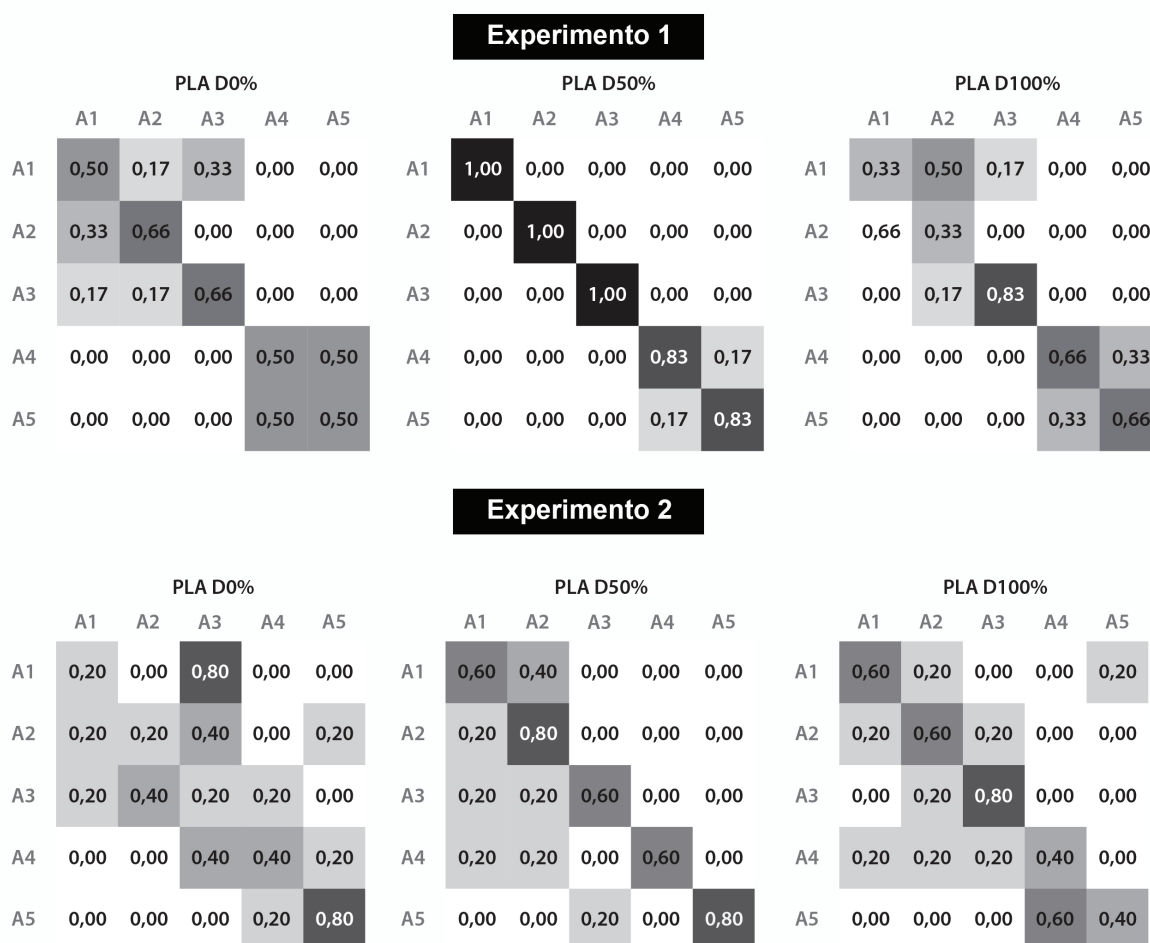
A comparação entre os Experimentos 1 e 2 demonstra que a convergência metodológica não é automática, mas depende diretamente da interação entre material, dimensão dos pontos e tipo de tarefa. Configurações que favoreceram maior clareza geométrica e estabilidade tátil — como PLA e PETG em D50% e D100%, e TPU em D100% — apresentaram estruturas perceptivas mais consistentes entre os experimentos. Esses resultados reforçam a força do protocolo metodológico adotado e indicam que a ampliação dimensional dos pontos desempenha papel central não apenas no desempenho perceptivo, mas também na confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos junto ao grupo controle.

6.3.2. Validação Metodológica – Grupo Experimental

A validação metodológica junto ao grupo experimental, assim como no grupo controle, foi conduzida por meio da comparação sistemática entre os resultados obtidos no Experimento 1 (ordenação) e no Experimento 2 (busca), considerando a consistência das estruturas perceptivas formadas por pessoas com deficiência visual. A análise integrou as matrizes de confusão, as projeções espaciais por Escalonamento Multidimensional (MDS), os valores de estresse de Kruskal, bem como os alinhamentos Procrustes e as correlações entre matrizes, possibilitando examinar o grau de convergência entre os padrões perceptivos observados nos dois experimentos no âmbito do grupo experimental.

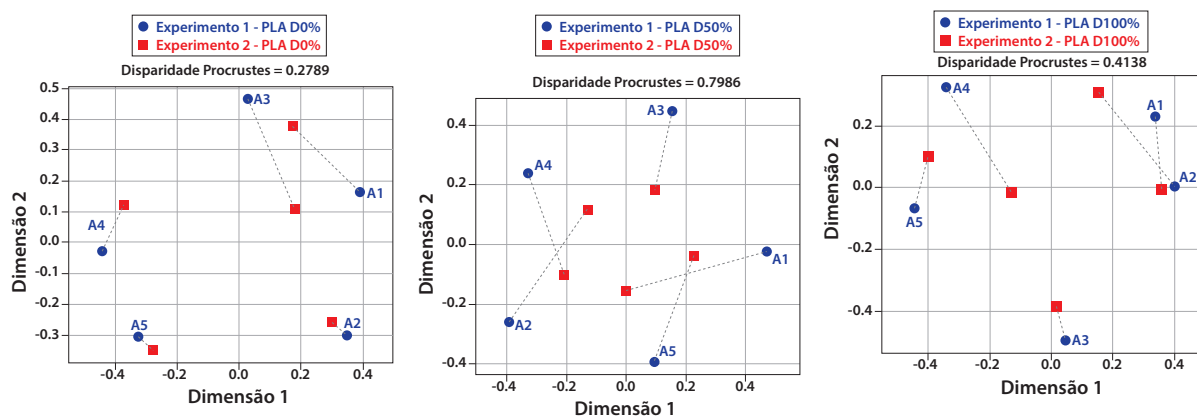
No caso do PLA, observa-se que, na configuração D0%, as matrizes de confusão dos Experimentos 1 e 2 apresentam baixa correspondência, com elevada dispersão das respostas e sobreposição perceptiva entre amostras adjacentes e intermediárias (Figura 66). As projeções MDS (Figura 67 e 68) reforçam esse comportamento, revelando configurações espaciais pouco alinhadas entre os experimentos, o que se reflete em valores elevados de disparidade Procrustes. Esse padrão indica que, para participantes com deficiência visual, a adoção estrita das dimensões do Braille não garante a formação de uma estrutura perceptiva estável quando as demandas da tarefa se alteram. Nas configurações D50% e D100%, observa-se uma melhora progressiva na convergência entre os experimentos, com maior coincidência nas relações de similaridade entre estímulos e redução da disparidade Procrustes, sugerindo que a ampliação dimensional favorece a consolidação de códigos táteis mais consistentes e transferíveis entre tarefas distintas.

Figura 70 - Comparação entre as matrizes de confusão do PLA (grupo experimental).



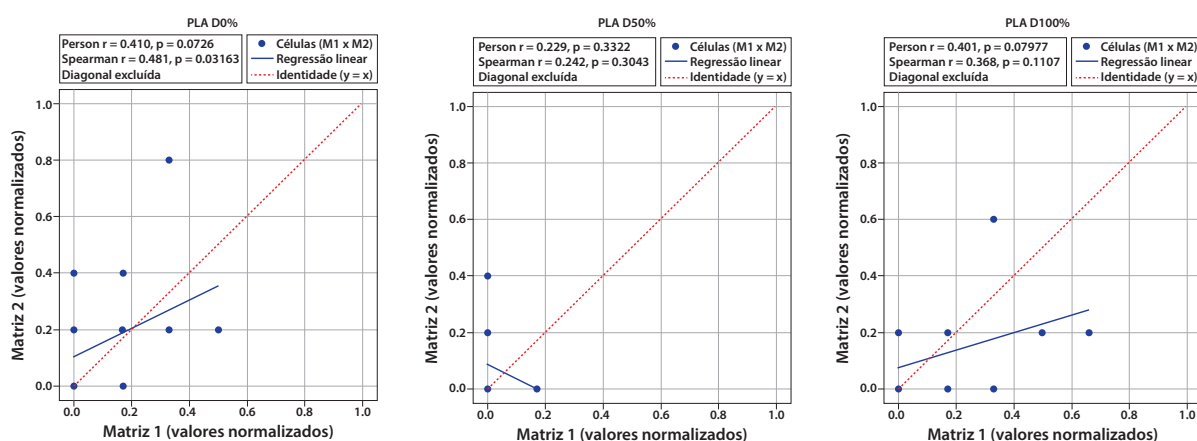
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 71 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o PLA (grupo experimental).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 72 - Gráfico de dispersão para o PLA (grupo experimental).

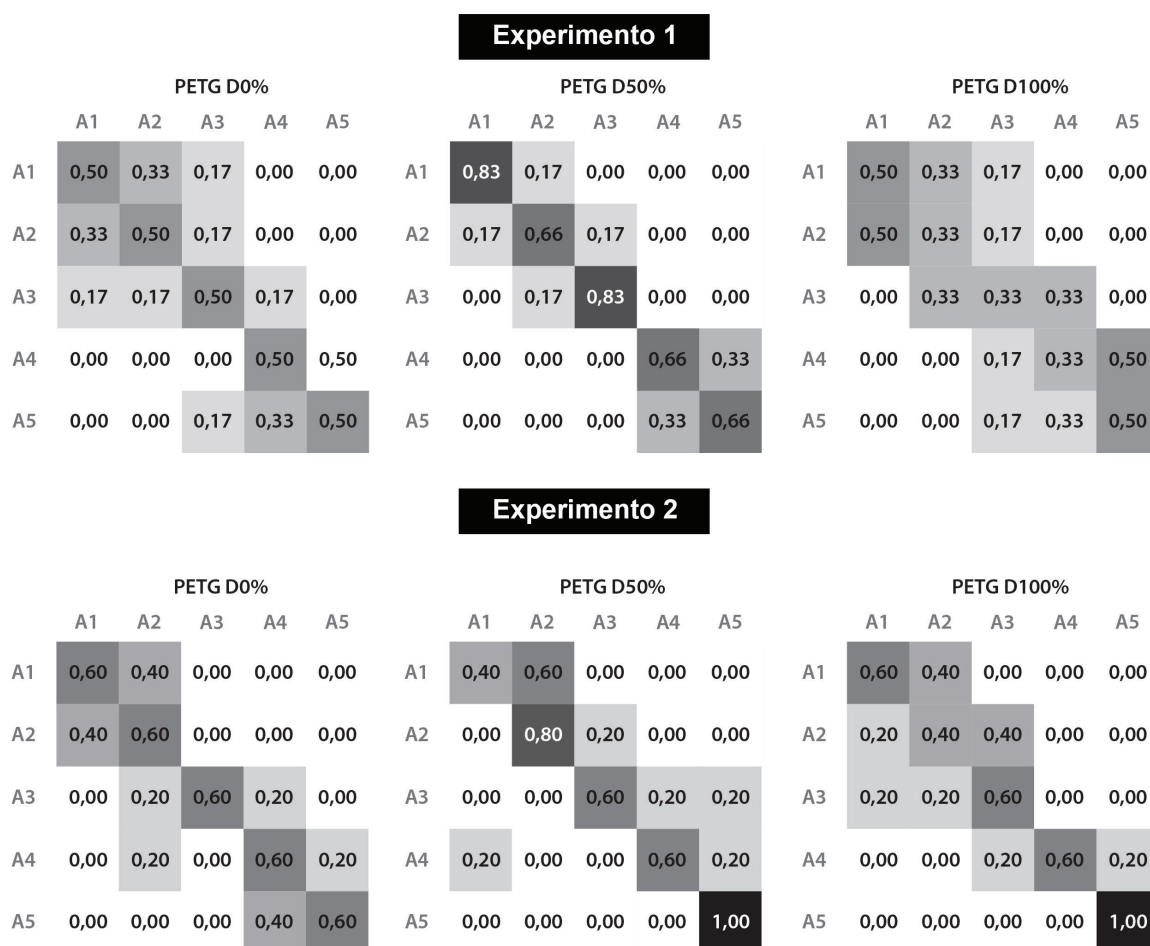


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para o PETG, os resultados do grupo experimental evidenciam um comportamento metodológico mais robusto em comparação ao PLA. Na condição D0%, embora persistam ambiguidades perceptivas, já se observa uma organização mais coerente das matrizes de confusão entre os dois experimentos. A partir da configuração D50%, a convergência metodológica torna-se mais evidente, com maior alinhamento entre as projeções MDS (Figuras 70) e redução significativa da disparidade Procrustes. Na configuração D100%, essa estabilidade se intensifica: as matrizes de confusão apresentam padrões semelhantes, as configurações espaciais no MDS mostram correspondência estrutural clara e os valores de disparidade indicam elevada proximidade.

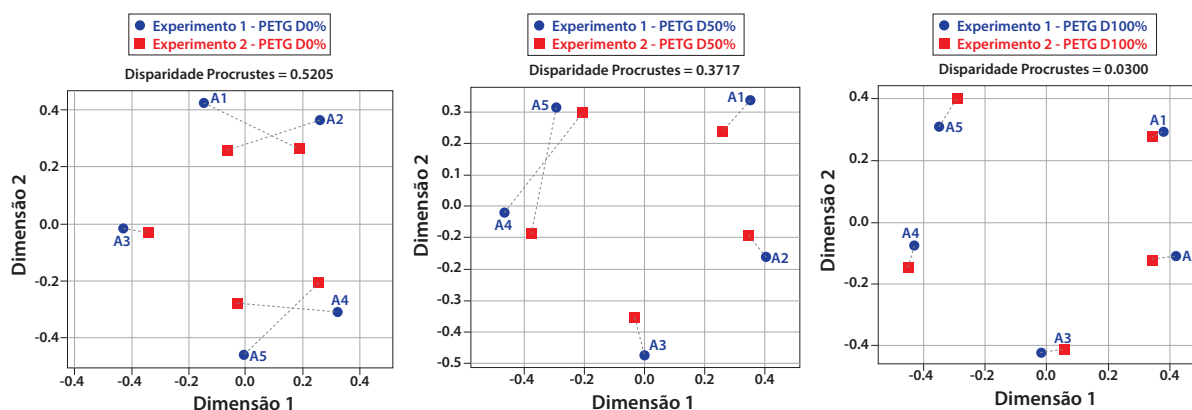
dade entre os experimentos (Figuras 69, 70 e 71). Esses resultados sugerem que, para o grupo experimental, o PETG associado à ampliação dimensional dos pontos favorece a construção de representações táteis mais estáveis, independentemente da natureza da tarefa.

Figura 73 - Comparação entre as matrizes de confusão do PETG (grupo controle).



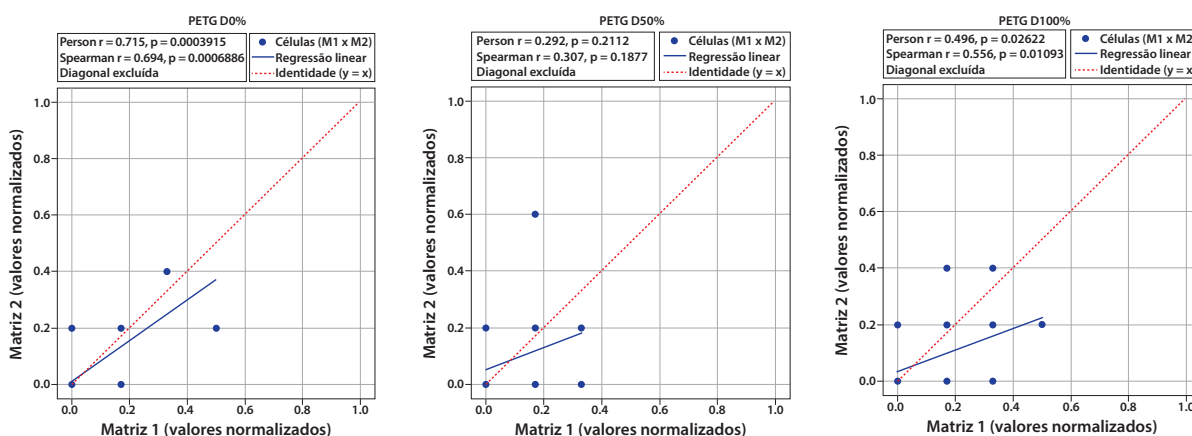
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 74 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o PETG (grupo experimental).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 75 - Gráfico de dispersão para o PETG (grupo experimental).

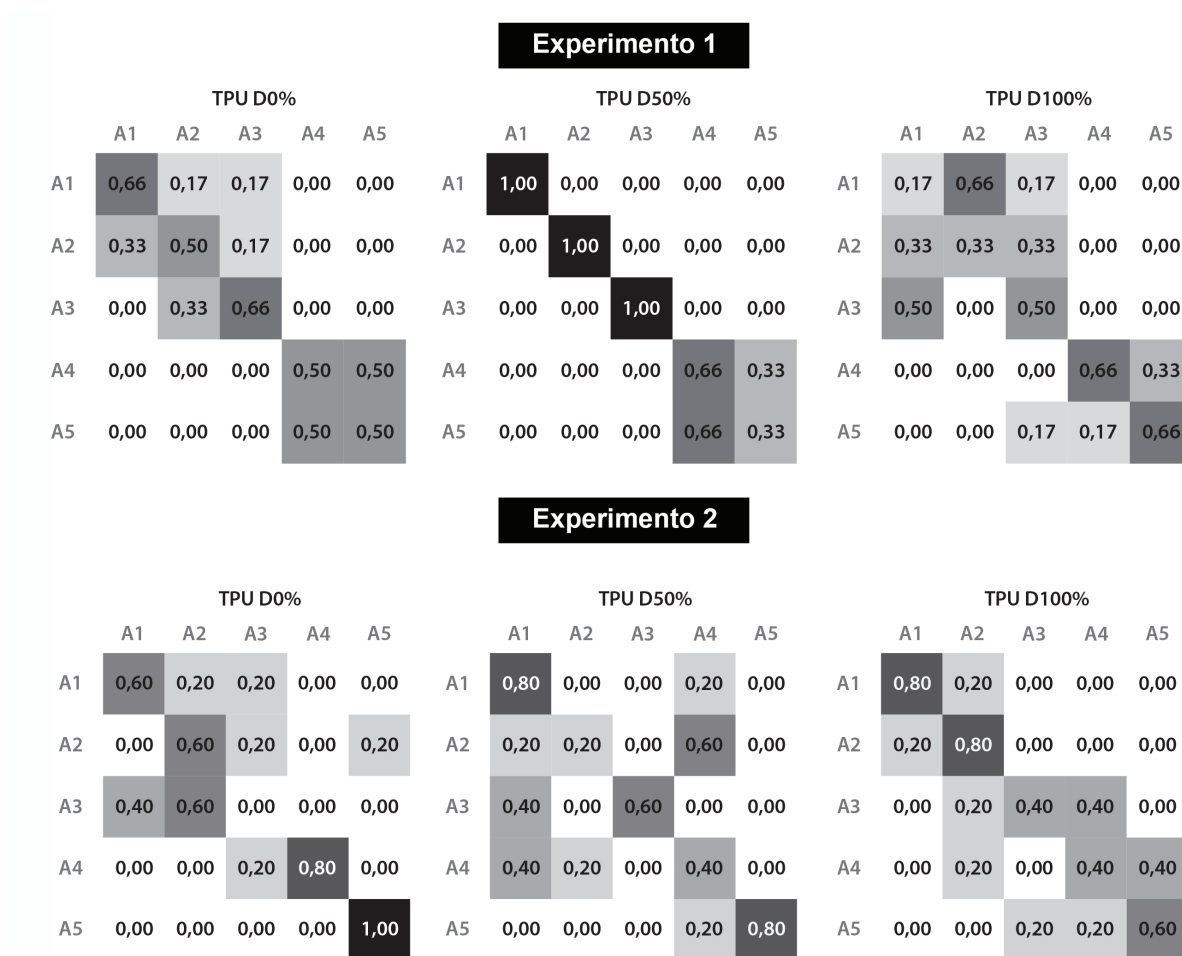


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O TPU apresenta o maior desafio em termos de validação metodológica no grupo experimental. Na configuração D0%, as matrizes de confusão revelam elevada taxa de confusões cruzadas e baixa consistência entre os experimentos, o que se reflete em projeções MDS significativamente divergentes e nos maiores valores de disparidade Procrustes observados (Figuras 72 e 73). Esse comportamento indica que a flexibilidade do material, aliada à alta densidade de pontos, compromete a estabilidade perceptiva, especialmente para usuários que dependem exclusivamente do tato para a construção espacial. Na configuração D50%, observa-se uma melhora parcial, com alguma aproximação entre os padrões dos dois experimentos, embora ainda persistam diferenças relevantes. Apenas na condição D100% o TPU apresenta uma convergên-

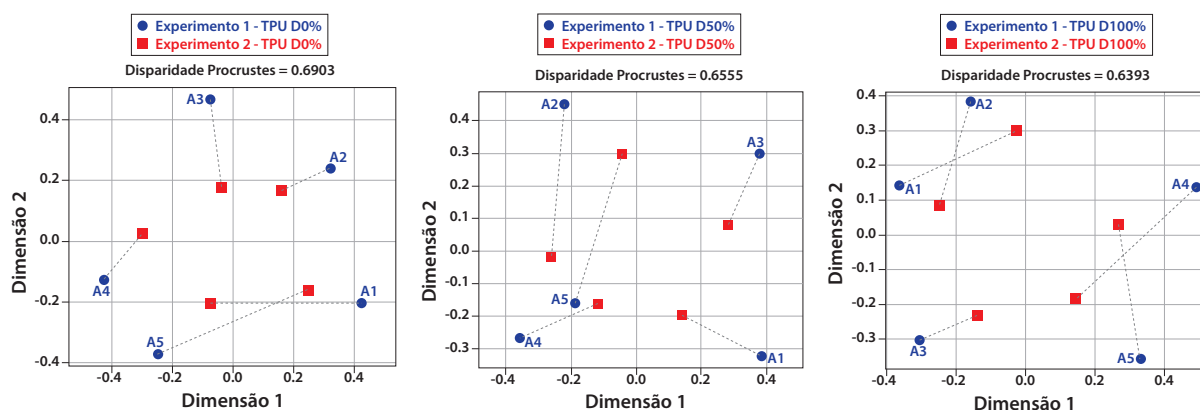
cia metodológica mais consistente, com maior alinhamento entre matrizes de confusão, redução da dispersão no MDS e diminuição da disparidade Procrustes, indicando que a ampliação máxima das dimensões dos pontos é fundamental para compensar os efeitos da deformabilidade do material durante a exploração tátil.

Figura 76 - Comparação entre as matrizes de confusão do TPU (experimental).



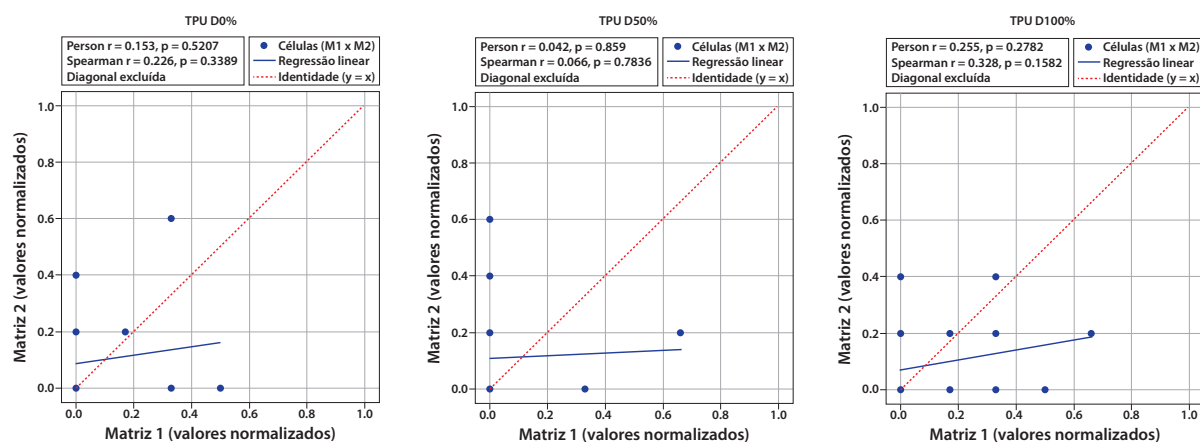
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 77 - Sobreposição dos gráficos de MDS para o TPU (grupo experimental).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 78 - Gráfico de dispersão para o TPU (grupo experimental).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A comparação entre os Experimentos 1 e 2 junto ao grupo experimental evidencia que a validação metodológica é fortemente condicionada pela interação entre material, dimensão dos pontos e tipo de tarefa. Configurações que favoreceram maior estabilidade geométrica e clareza tátil — como PETG em D50% e D100%, PLA em D100% e TPU exclusivamente em D100% — apresentaram estruturas perceptivas mais consistentes entre os experimentos. Esses achados reforçam a adequação do protocolo metodológico adotado e indicam que, para pessoas com deficiência visual, a ampliação dimensional dos pontos desempenha papel central não apenas no desempenho perceptivo, mas também na confiabilidade, transferibilidade e robustez dos resultados obtidos em diferentes contextos experimentais.

6.3.3. Comparação Estrutural entre Grupo Controle e Grupo Experimental

De modo geral, o grupo controle apresentou maior estabilidade estrutural entre os dois experimentos. Os mapas perceptivos demonstraram menor dispersão após alinhamento por Procrustes e correlações mais elevadas entre matrizes de confusão, indicando organização espacial mais consistente e reprodutível. Essa estabilidade sugere que, para participantes com visão, a discriminação tátil das texturas tende a produzir padrões organizacionais relativamente homogêneos.

Em contraste, o grupo experimental apresentou maior variabilidade estrutural entre experimentos. Observa-se maior dispersão espacial nos mapas MDS alinhados e maior deslocamento relativo entre pontos correspondentes, particularmente em determinadas combinações de material e variação dimensional. As correlações entre matrizes, embora positivas, revelam menor consistência global quando comparadas ao grupo controle.

Importa destacar que essa maior variabilidade reflete características próprias da amostra composta por pessoas com deficiência visual. A heterogeneidade quanto à origem da deficiência (congenita ou adquirida), ao uso de estratégias exploratórias e à reorganização sensorial pode contribuir para maior diversidade organizacional no espaço perceptivo. Assim, enquanto o grupo controle apresenta padrão mais estável, o grupo experimental evidencia organização estruturada, porém menos homogênea.

Entre os materiais analisados, o PLA demonstrou maior robustez estrutural em ambos os grupos, especialmente na variação dimensional D100%, sugerindo que determinadas combinações geométricas favorecem organização perceptiva mais estável independentemente do perfil sensorial. O TPU apresentou estabilidade intermediária, enquanto o PETG evidenciou maior variabilidade estrutural, particularmente no grupo experimental.

A convergência entre indicadores quantitativos (eficácia e eficiência), métricas estruturais (Stress-1 de Kruskal e disparidade de Procrustes) e análise visual dos mapas reforça que as diferenças observadas entre grupos não são aleatórias, mas sistematicamente associadas à interação entre material, variação dimensional e perfil perceptivo dos participantes.

Dessa forma, a comparação entre grupo controle e grupo experimental evidencia que a organização perceptiva das texturas impressas não depende exclusivamente das propriedades físicas do material, mas também da trajetória sensorial do usuário. Tal resultado tem implicações diretas para o design de sistemas de informação táteis, indicando a necessidade de considerar variabilidade perceptiva como variável projetual e não como ruído experimental.

6.4. Discussão dos resultados

A análise dos resultados evidencia que a influência dos materiais utilizados na impressão 3D por Fused Filament Fabrication (FFF) sobre o desempenho háptico não pode ser compreendida como fenômeno isolado, restrito à dimensão físico-mecânica dos filamentos. Ao contrário, os dados demonstram que o desempenho surge de uma articulação complexa entre propriedades materiais, organização geométrica da informação e repertório perceptivo dos usuários.

A hipótese principal (H1) — segundo a qual os materiais utilizados na impressão 3D por FFF (PLA, PETG e TPU) influenciam significativamente o desempenho háptico na percepção de texturas e na interpretação de sistemas de informação inclusivos por pessoas com deficiência visual — é confirmada pelos resultados obtidos. Contudo, essa confirmação não significa que o material determine sozinho o desempenho; o resultado depende da forma como ele interage com a tarefa e com o modo de exploração. O material não atua como suporte neutro da informação nem pode ser compreendido como variável meramente técnica. Suas propriedades físico-mecânicas — como rigidez, elasticidade, acabamento superficial e estabilidade dimensional — interferem na forma como os relevos são explorados, comparados e consolidados perceptivamente.

As diferenças observadas entre PLA, PETG e TPU evidenciam que a resposta mecânica sob pressão digital, a preservação dimensional dos pontos e o comportamento do material durante o movimento exploratório influenciam diretamente a saliência dos relevos e a distinção entre padrões. Esse resultado converge com a distinção estabelecida por Lederman e Klatzky (2009a) entre propriedades materiais e propriedades geométricas dos objetos, demonstrando que textura, dureza e rugosidade constituem dimensões perceptivas próprias, capazes de reorganizar a interpretação estrutural da informação.

Conforme argumentam Loomis e Lederman (1986), a percepção háptica não se restringe ao contato cutâneo, mas integra pistas cinestésicas relacionadas ao movimento, à resistência e à deformação do objeto sob exploração ativa. Nessa perspectiva, diferentes filamentos produzem distintas configurações de resposta durante varreduras laterais, compressões e contornos. O PLA, ao preservar maior estabilidade dimensional, tende a sustentar contornos mais definidos e relações incrementais mais estáveis. O TPU, ao introduzir deformabilidade, altera a resposta mecânica sob compressão e modifica o padrão de feedback tátil. O PETG, por sua vez, posiciona-se em condição intermediária. Assim, o material participa ativamente da constituição

da informação, configurando diferentes condições de leitura — o que pode ser compreendido como distintas “ecologias perceptivas”.

Entretanto, apesar da confirmação da hipótese não se pode afirmar que determinado material seja essencialmente superior em todas as situações. A maior eficácia observada para o PLA, por exemplo, não foi acompanhada de forma consistente por maior eficiência temporal. Essa dissociação evidencia que a saliência física, entendida como maior definição geométrica objetiva, não corresponde automaticamente à saliência perceptiva, isto é, à fluidez na consolidação relacional das diferenças ao longo da exploração.

A percepção háptica, como enfatizam Lederman e Klatzky (1987), constitui processo construtivo e sequencial, no qual a integração progressiva de fragmentos exige comparação contínua, manutenção de referências relativas e ajustes motores sucessivos. Nesse contexto, maior nitidez geométrica pode demandar exploração comparativa mais cuidadosa, ampliando o tempo de verificação sem comprometer a precisão final. O desempenho resulta, portanto, da interação entre materialidade, organização geométrica e dinâmica exploratória, e não da superioridade isolada de um filamento específico.

A sub-hipótese SH1 — que previa diferenças significativas na percepção háptica de texturas entre indivíduos com visão e indivíduos com deficiência visual, considerando a possível influência do repertório visual prévio e, por outro lado, o aprimoramento tátil decorrente do uso frequente do tato — também se confirma de forma consistente. Observou-se redução global da eficácia no grupo experimental, acompanhada de maior dispersão temporal e maior variabilidade estrutural nas configurações perceptivas.

Entretanto, interpretar tais diferenças como déficit implicaria simplificar excessivamente o fenômeno. Conforme discutido na Seção 2, a percepção háptica em pessoas com deficiência visual envolve reorganização funcional do sistema sensorial, associada a processos de plasticidade intermodal que recrutam áreas tradicionalmente visuais para tarefas táteis e auditivas (De Borst; De Gelder, 2019; Jiao et al., 2023). Essa reorganização não conduz à homogeneidade perceptiva, mas à construção de trajetórias exploratórias diversas, influenciadas pela origem da deficiência, pela experiência prévia e pelo uso sistemático do tato.

Os resultados da presente pesquisa dialogam diretamente com essa perspectiva. Enquanto o grupo controle, submetido à privação visual temporária, apresentou organização estrutural mais homogênea entre os experimentos, o grupo experimental revelou maior diversidade organiza-

cional. Tal variabilidade é coerente com a compreensão proposta por Hatwell (2003) e Millar (1994), segundo a qual o aprimoramento do desempenho tátil decorre menos de aumento bruto de sensibilidade e mais da adoção de estratégias exploratórias sistemáticas. A maior dispersão temporal observada entre participantes com deficiência visual pode refletir diferentes modos de segmentar a superfície, distribuir a exploração em áreas específicas ou alternar entre movimentos de contorno e varredura — procedimentos descritos por Lederman e Klatzky (1987) como padrões exploratórios associados a propriedades particulares do objeto.

Outro aspecto relevante refere-se à diferença de desempenho entre os grupos nos dois experimentos. No Experimento 1, o grupo controle apresentou maior percentual de acertos; no Experimento 2, essa diferença diminuiu, aproximando os resultados. À luz do referencial teórico da percepção háptica, poderia ser esperado que pessoas com deficiência visual apresentassem desempenho equivalente ou superior em tarefas de discriminação tátil, considerando a reorganização funcional decorrente da plasticidade intermodal e o uso sistemático do tato como principal via de acesso à informação (Lederman; Klatzky, 2009a; De Borst; De Gelder, 2019). Além disso, estudos indicam que a experiência prolongada com exploração háptica favorece estratégias refinadas de análise de textura e forma (Hatwell, 2003; Millar, 1994).

Contudo, o cenário observado no Experimento 1 sugere a influência de outro fator: o perfil formativo do grupo controle. Composto majoritariamente por estudantes de áreas com intensa prática manual, como Artes e Design, esse grupo possivelmente mobilizou repertórios exploratórios associados à comparação gradual de materiais e à organização sequencial de variações. Ainda que tal variável não tenha sido isoladamente mensurada, é plausível considerar que experiências prévias de manipulação e discriminação sistemática de materiais possam ter favorecido o desempenho na tarefa de ordenação incremental. Como argumentam Lederman e Klatzky (1987), o reconhecimento tátil depende de procedimentos exploratórios específicos, cuja eficiência pode ser aprimorada por prática sistemática.

A tarefa do Experimento 1 exigia ordenar amostras segundo progressão dimensional. Isso implicava não apenas reconhecer diferenças absolutas, mas manter referências relativas entre níveis sucessivos ao longo da sequência. Tal exigência está alinhada à natureza sequencial da percepção háptica descrita por Loomis e Lederman (1986), segundo a qual a integração perceptiva ocorre por síntese progressiva de fragmentos explorados ao longo do tempo. A ordenação incremental demanda comparação contínua e manutenção de parâmetros relativos na memória de trabalho

tátil — processo que pode ser favorecido por repertórios exploratórios consolidados.

No Experimento 2, por sua vez, a tarefa envolvia busca e correspondência localizada, reduzindo a necessidade de organização sequencial contínua e priorizando reconhecimento pontual. A literatura demonstra que diferentes propriedades do objeto ativam diferentes procedimentos exploratórios (Lederman; Klatzky, 1987). Enquanto a ordenação incremental exige varredura comparativa sucessiva, a tarefa de correspondência pode ser resolvida por identificação direta de características salientes. Essa alteração na estrutura da atividade contribui para explicar a aproximação de desempenho entre os grupos no segundo experimento.

Adicionalmente, não se observou efeito significativo de aprendizagem no grupo experimental, apesar do intervalo entre as aplicações. A literatura indica que a aprendizagem tátil não decorre automaticamente da repetição, mas da reorganização de estratégias exploratórias e da consolidação de padrões comparativos (Heller; Gentaz, 2014). Assim, a ausência de ganho expressivo sugere que o desempenho superior do grupo controle no Experimento 1 esteve mais associado ao repertório exploratório prévio do que à familiaridade progressiva com as amostras. Em conjunto, esses resultados indicam que o desempenho tátil não depende exclusivamente da condição sensorial ou das propriedades físico-mecânicas do material impresso. Conforme discutido ao longo desta tese, a percepção háptica constitui fenômeno relacional, no qual superfície, gesto exploratório e organização cognitiva se articulam dinamicamente (Lederman; Klatzky, 2009a). A natureza da tarefa e o repertório exploratório acumulado influenciam a clareza percebida tanto quanto a materialidade do objeto.

Dessa forma, as diferenças observadas entre os grupos não devem ser interpretadas como evidência de superioridade ou limitação intrínseca associada à condição visual. Elas expressam a interação entre tipo de tarefa, experiência prévia e estratégias exploratórias mobilizadas. Tal interpretação reforça o caráter relacional do desempenho háptico e evidencia que o desenvolvimento de sistemas de informação tátil produzidos por FFF deve considerar, além dos parâmetros materiais e dimensionais, as demandas cognitivas específicas envolvidas na atividade proposta.

A sub-hipótese SH2, relacionada ao aprendizado perceptivo ao longo dos experimentos, encontra confirmação parcial. A análise estrutural realizada por meio do MDS e do alinhamento por Procrustes indica que a reorganização perceptiva não ocorreu da mesma maneira nos dois grupos. No grupo controle, observou-se maior estabilidade entre os experimentos, sugerindo

consolidação mais homogênea das relações entre os níveis da escala. No grupo experimental, por sua vez, a reorganização foi menos uniforme, com deslocamentos relativos mais acentuados.

O aprendizado perceptivo, portanto, não se limita ao aumento do número de acertos, mas envolve transformação das estratégias de exploração. Como destacam Heller e Gentaz (2014), o tato constitui sistema integrado que articula contato, movimento e ritmo. Aprender, nesse contexto, significa reorganizar o modo como o corpo explora e integra as diferenças ao longo do tempo, e não apenas reconhecê-las com maior precisão.

Essa interpretação dialoga com outro achado relevante da pesquisa: a ausência de correspondência direta entre eficácia e eficiência. Embora se esperasse que maior definição geométrica estivesse associada a menor tempo de execução, os dados mostram que maior precisão na identificação das diferenças não implicou, necessariamente, decisões mais rápidas.

A percepção háptica depende não apenas da distinção física entre níveis, mas da comparação sucessiva realizada durante a exploração (Loomis; Lederman, 1986). Assim, é possível alcançar maior precisão ao custo de maior tempo de verificação. A clareza estrutural das texturas não elimina a necessidade de consolidação progressiva das relações entre os níveis; pode, inclusive, demandar exploração mais cuidadosa para estabilizar essas relações.

Em conjunto, os achados indicam que o desempenho tátil envolve reorganização perceptiva e investimento exploratório. Precisão e tempo de execução não evoluem necessariamente de forma paralela, pois ambos dependem das estratégias mobilizadas na exploração ativa.

A sub-hipótese H3, que postulava maior clareza tátil do PLA em função de sua rigidez e definição geométrica, é confirmada em termos de eficácia global e robustez estrutural. Contudo, a ausência de correspondência direta entre maior precisão e menor tempo médio evidencia que a clareza geométrica é fenômeno relacional. A percepção de textura não depende exclusivamente da definição do ponto impresso, mas da interação entre saliência, proporção e estratégia exploratória. Tal compreensão aproxima-se das análises de Okamoto, Nagano e Yamada (2013), que ressaltam a dimensão psicofísica da experiência tátil, articulando propriedades objetivas da superfície a avaliações subjetivas de conforto e legibilidade. Assim, a rigidez pode favorecer distinção estrutural, mas não garante automaticamente fluidez decisória.

A sub-hipótese H4, referente à influência da variação dimensional, revela contribuição particularmente significativa. No grupo controle, a ampliação progressiva dos pontos tendeu a elevar a eficácia. No grupo experimental, contudo, observou-se efeito de ótimo intermediário,

sobretudo na condição D50%. A ampliação máxima (D100%) não produziu ganho proporcional de acertos e, em algumas situações, implicou aumento do custo exploratório. Esse resultado confirma que a percepção háptica opera de forma sequencial e incremental. A análise da Diferença Mínima Significativa demonstrou que as transições consecutivas da escala permanecem como zona limítrofe de discriminação, mesmo quando a dimensão física é ampliada.

Nesse sentido, pode-se observar a ausência de linearidade na ampliação dimensional. Estudos aplicados sobre sistemas de informação tátil impressos por FFF frequentemente associam a ampliação da altura de relevo ao aumento da legibilidade e da distinção entre elementos, sobretudo em contextos de mapas e modelos tridimensionais (Pistofidis et al., 2021; Kaplan; Pyayt, 2022; Wabiński; Mościcka; Kuźma, 2021). Contudo, os resultados aqui obtidos indicam que essa relação não se manifesta necessariamente de forma linear, especialmente quando consideradas diferenças incrementais sucessivas na escala dimensional. A ampliação máxima pode alterar a proporcionalidade relacional entre níveis adjacentes e aumentar a complexidade comparativa, sobretudo entre pessoas com deficiência visual, o que evidencia a importância de ajustes graduais e calibrados no desenvolvimento de sistemas táteis.

Apesar da consistência estrutural dos resultados e da convergência observada entre diferentes indicadores analíticos, algumas limitações metodológicas devem ser explicitamente reconhecidas. A primeira refere-se à composição do grupo experimental. A amostra apresentou heterogeneidade quanto à origem da deficiência (congenita e adquirida) e quanto à experiência prévia com leitura tátil e uso sistemático do braille. Essa diversidade é coerente com os princípios do design inclusivo, que reconhecem a variabilidade humana como condição constitutiva e não excepcional. No entanto, do ponto de vista analítico, tal heterogeneidade pode ter ampliado a dispersão interindividual e dificultado a identificação de padrões mais homogêneos de desempenho.

Outra limitação diz respeito ao recorte material adotado. O estudo concentrou-se em três filamentos amplamente utilizados na impressão 3D por FFF (PLA, PETG e TPU), selecionados por suas diferenças mecânicas e por sua relevância prática. Ainda assim, outros materiais disponíveis no mercado — incluindo compósitos, filamentos com carga mineral ou misturas flexíveis intermediárias — não foram contemplados. Desse modo, os resultados não podem ser automaticamente extrapolados para toda a gama de materiais possíveis, mas devem ser compreendidos no âmbito do conjunto investigado.

Do ponto de vista geométrico, a investigação concentrou-se em texturas compostas por

pontos com variações dimensionais controladas. Entretanto, sistemas de informação tátil frequentemente combinam múltiplos padrões, como linhas contínuas, superfícies texturizadas mistas, áreas preenchidas e elementos simbólicos tridimensionais. Portanto, a ausência de variações geométricas mais complexas restringe a aplicabilidade direta dos resultados a sistemas de informação tátil nos quais múltiplas propriedades interagem simultaneamente.

Além disso, os experimentos foram conduzidos em ambiente controlado, com condições estáveis de iluminação, ruído e ausência de interferências externas. Em contextos reais de uso — como museus, ambientes urbanos, espaços educacionais ou situações de orientação e mobilidade — fatores ambientais adicionais, como ruído, distrações cognitivas, pressa ou carga emocional, podem influenciar o desempenho exploratório. Dessa forma, a transferência direta dos resultados para situações naturais de interação deve ser realizada com cautela.

Por fim, os resultados permitem organizar implicações diretas para o desenvolvimento de sistemas de informação tátil produzidos por FFF:

- Escolha do material: a seleção do filamento não deve considerar apenas custo e facilidade de impressão. É necessário avaliar estabilidade dimensional, rigidez e resposta mecânica sob pressão digital. Materiais mais rígidos podem preservar melhor as diferenças entre níveis, mas também podem demandar exploração mais cuidadosa;
- Calibragem incremental da dimensão: a ampliação do relevo deve ser testada em diferentes níveis intermediários. O desempenho não responde de maneira linear ao aumento da altura. Pequenas variações podem produzir efeitos significativos na organização perceptiva;
- Hierarquização clara de níveis: a tridimensionalidade precisa ser organizada segundo lógica relacional coerente. Quando as diferenças entre níveis consecutivos são insuficientes, ocorre colapso perceptivo. Quando são excessivas, pode haver sobrecarga comparativa;
- Validação empírica iterativa: a prototipagem por FFF deve incluir ciclos sistemáticos de teste com usuários reais. A variabilidade perceptiva não é ruído estatístico, mas característica estruturante do design inclusivo;
- Integração entre técnica e informação: parâmetros como altura de camada, densidade e orientação de impressão devem ser definidos com base em critérios informacionais. A decisão técnica influencia diretamente a experiência cognitiva do usuário.

Em conjunto, essas implicações mostram que o desenvolvimento de sistemas de informa-

ção tátil por FFF não deve ser guiado apenas por decisões técnicas isoladas ou por critérios de produção. O tipo de material, o tamanho dos elementos, a forma como as informações se organizam e os parâmetros de impressão atuam de maneira interdependente e influenciam diretamente a legibilidade e a estabilidade perceptiva do sistema.

A clareza geométrica, portanto, não resulta apenas da definição física do relevo, mas do equilíbrio entre destaque perceptível e organização coerente da informação. Projetar para o tato exige reconhecer que pequenas variações na geometria podem modificar significativamente a forma como a escala é compreendida. Além disso, é necessário considerar que diferentes usuários adotam estratégias exploratórias distintas, e essa diversidade faz parte das condições reais de uso.

Nesse sentido, a manufatura aditiva, quando associada a processos sistemáticos de validação com usuários, deixa de ser apenas um meio de fabricação e passa a atuar como ferramenta para o aprimoramento contínuo de sistemas informacionais inclusivos.

CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como questão norteadora investigar se os materiais utilizados na impressão 3D por *Fused Filament Fabrication* (FFF) impactam o desempenho háptico de texturas aplicadas a sistemas de informação destinados a pessoas com deficiência visual. À luz dos resultados obtidos, é possível afirmar de forma objetiva que os materiais influenciam o desempenho háptico. Essa influência, contudo, não ocorre de maneira isolada ou linear. Ela resulta da interação entre propriedades físicas do material, organização dimensional da textura e modo como cada usuário realiza a exploração tátil.

Os resultados demonstraram que a materialidade impressa não funciona apenas como suporte técnico. A rigidez, a estabilidade dimensional e a resposta mecânica dos filamentos interferem diretamente na preservação das diferenças entre níveis de relevo e, conseqüentemente, na clareza percebida. Ao mesmo tempo, verificou-se que maior definição geométrica não significa, automaticamente, exploração mais rápida. A precisão final pode aumentar, mas exigir comparação mais cuidadosa. Isso evidencia a distinção entre saliência física do relevo e consolidação perceptiva durante a exploração.

Outro achado central refere-se à variação dimensional dos pontos táteis. A ampliação máxima não produziu melhora proporcional do desempenho. O que se mostrou determinante foi a proporção entre níveis consecutivos e sua compatibilidade com as estratégias exploratórias adotadas pelos participantes. A variabilidade perceptiva observada entre participantes videntes e pessoas com deficiência visual não deve ser interpretada como ruído experimental, mas como expressão de trajetórias sensoriais distintas. Essa diversidade constitui dado fundamental para o projeto de sistemas informacionais inclusivos.

Em relação aos objetivos estabelecidos na Introdução, pode-se afirmar que foram alcançados. O objetivo geral — propor uma metodologia para analisar a influência dos materiais utili-

zados na impressão 3D por FFF sobre a percepção háptica de texturas — foi atendido por meio da articulação entre indicadores de eficácia, eficiência e organização estrutural da informação.

Os objetivos específicos também foram contemplados: investigaram-se as diferenças entre materiais, analisou-se a influência da variação dimensional, avaliou-se a clareza geométrica das peças impressas e examinou-se o impacto das habilidades visuais e táteis prévias no desempenho.

A principal contribuição teórica desta tese é mostrar que, em sistemas de informação tátil produzidos por FFF, o material não pode ser analisado isoladamente, mas em relação à forma e à exploração do usuário. O trabalho aponta que o desempenho háptico não depende apenas da escolha de um “melhor material”, mas do modo como tecnologia, forma e corpo interagem durante a exploração. A impressão 3D deixa de ser entendida apenas como técnica de fabricação e passa a ser compreendida como tecnologia que participa da construção da experiência informacional.

A pesquisa também evidencia que decisões frequentemente tratadas como técnicas — escolha do filamento, altura do relevo, espaçamento entre elementos e hierarquização dimensional — possuem implicações cognitivas diretas. Por essa razão, devem ser orientadas por validação empírica com usuários reais. A impressão 3D por FFF, nesse contexto, configura-se como ferramenta estratégica para o desenvolvimento de sistemas informacionais inclusivos fundamentados em critérios perceptivos.

No plano prático, os resultados oferecem subsídios para decisões projetuais em contextos educacionais, culturais e de orientação e mobilidade. A necessidade de ajustar gradualmente o relevo, de hierarquização clara entre níveis e de escolha criteriosa do material aponta caminhos para o desenvolvimento de artefatos táteis mais consistentes e funcionalmente eficazes.

Quanto às perspectivas futuras, a pesquisa abre diferentes possibilidades de aprofundamento. No que se refere às texturas e aos materiais utilizados na impressão, estudos posteriores podem investigar outros padrões geométricos além das texturas pontuais adotadas neste trabalho. As texturas utilizadas nesta pesquisa foram baseadas na estrutura do braille, escolhida por apresentar dimensões padronizadas e por permitir controle rigoroso das variações dimensionais, aspecto central para a análise do desempenho tátil dos materiais. Essa escolha tornou possível avaliar diretamente como as características físicas do material interferem no desempenho tátil. Entretanto, a estrutura pontual desenvolvida pode funcionar como base ou grade de referência para a criação de novas configurações de texturas. Os pontos podem servir como matriz organizadora para

composições mais complexas, combinando diferentes arranjos espaciais, densidades ou formas geométricas, ampliando o repertório investigativo sobre texturas impressas por FFF.

Nesse sentido, também seria relevante investigar combinações híbridas de materiais e analisar parâmetros adicionais de impressão, como variações na altura de camada e no acabamento superficial. Com o avanço das impressoras multifilamento — ainda que seu custo permaneça elevado — torna-se possível desenvolver peças que combinem materiais com propriedades distintas, como rigidez e flexibilidade. Por exemplo, pode-se explorar a aplicação de material rígido na base da peça e material flexível apenas na área em relevo, ou o inverso. Essas combinações podem contribuir para compreender de forma mais precisa como diferentes respostas mecânicas influenciam a experiência tátil. A investigação dessas possibilidades tende a ampliar o entendimento sobre o desempenho háptico de texturas produzidas por FFF, especialmente no que se refere à interação entre suporte estrutural e área informacional.

A ampliação da diversidade do perfil dos participantes constitui aspecto fundamental para estudos futuros. Investigações posteriores devem contemplar maior variedade quanto à origem da deficiência visual (congenita ou adquirida), níveis de experiência com leitura tátil e braille, faixa etária e contextos de uso cotidiano do tato. A inclusão de participantes com diferentes trajetórias sensoriais pode contribuir para compreender de maneira mais aprofundada como estratégias exploratórias se desenvolvem e como interagem com características materiais e dimensionais das texturas.

Além disso, ampliar o perfil da amostra permite verificar se os padrões observados nesta pesquisa se mantêm em populações com experiências táteis distintas, fortalecendo a validade externa dos resultados. Considerar essa diversidade não é apenas uma questão metodológica, mas um princípio alinhado ao design inclusivo, que reconhece a heterogeneidade perceptiva como dado estruturante do projeto.

Ainda a respeito do perfil da amostra, como desdobramento, sugere-se que futuros estudos considerem, de forma sistemática, as ocupações e experiências manuais prévias das pessoas com deficiência visual, sobretudo nos casos de perda de visão adquirida. Da mesma forma, no caso de estudantes universitários, recomenda-se comparar cursos com diferentes naturezas de habilidades (humanas, técnicas e biológicas), uma vez que este fator se mostrou relevante, embora não tenha sido inicialmente considerado no planejamento experimental.

Investigações realizadas em contextos reais de uso — como ambientes urbanos, museológicos,

escolares ou espaços de orientação e mobilidade — são igualmente necessárias para avaliar a transferência dos resultados obtidos em ambiente controlado para situações cotidianas. Em contextos reais, a interação tátil ocorre sob múltiplas interferências: ruído ambiental, pressão temporal, fadiga, variações de iluminação (para pessoas com baixa visão), entre outros fatores que podem alterar a dinâmica exploratória.

Estudos aplicados nesses ambientes permitiriam verificar se os padrões de clareza, eficiência e organização perceptiva identificados nesta pesquisa se mantêm quando o sistema informacional está inserido em práticas reais de uso. Além disso, possibilitariam observar como o tato se articula com outras modalidades sensoriais, como audição e percepção espacial, ampliando a compreensão do desempenho háptico em situações complexas.

Por fim, esta tese demonstra que a informação tátil produzida por FFF não está contida exclusivamente no relevo impresso. Ela se constitui na relação entre superfície, resistência mecânica e gesto exploratório. A clareza surge do encontro entre materialidade e corpo em ação. Ao reconhecer essa dimensão relacional, o design inclusivo amplia sua capacidade de intervir de forma fundamentada na construção de sistemas informacionais efetivamente acessíveis.

REFERÊNCIAS

ASHBY, M. F.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials: engineering, science, processing and design**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9241-11:2021: ergonomia da interação humano-sistema: parte 11: usabilidade: definições e conceitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

AUTODESK. **History of 3D Printing**. Disponível em: <https://www.autodesk.com/design-make/articles/history-of-3d-printing>. Acesso em: 21 jul. 2025.

BARDOT, S.; SERRANO, M.; ORIOLA, B.; JOUFFRAIS, C. Identifying how visually impaired people explore raised-line diagrams to improve the design of touch interfaces. In: **PROCEEDINGS OF THE 2017 CHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS**, 2017, Denver. New York: ACM, 2017. p. 550–555.

BARVIR, R.; VONDRAKOVA, A.; BRUS, J. TouchIt3D: technology (not only) for tactile maps. Abstracts of the International **Cartographic Association**, v. 1, p. 24, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/ica-abs-1-24-2019>.

BAUMGARTNER, E.; WIEBEL, C. B.; GEGENFURTNER, K. R. A comparison of haptic material perception in blind and sighted individuals. **Vision Research**, n. 115, p. 238-245, 2015.

BENHAMIDA, L.; LARABI, S.; METATLA, O. Hapstick-Figure: Investigating the Design of a Haptic Representation of Human Gestures from Theater Performances for Blind and Visually-Impaired People. **Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction**, v. 8, p. 649-673, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1145/3698152>

BHIRUD, B. G.; CHANDAN, L. M. Blindness enhances texture perception: role of haptic sense. **Indian Journal of Physiology and Pharmacology**, v. 62, n. 2, p. 170-173, 2018.

BONFIM, S. M. M. **A luta por reconhecimento das pessoas com deficiência: aspectos teóricos, históricos e legislativos**. Instituto Universitário de Pesquisas do Rio de Janeiro, 2009.

BONSIEPE, G. **Design, cultura e sociedade**. São Paulo: Blucher, 2011.

BORG, I.; GROENEN, P. J. F. **Modern Multidimensional Scaling: Theory and Applications** (2nd ed.). Springer, 2005.

BOSCHETTO, A.; BOTTINI, L. Accuracy prediction in fused deposition modeling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, p. 913–928, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5886-4>.

BREMNER, A. J.; SPENCE, C. The development of tactile perception. In: SARAMA, J.; CLEMENTS, D. H.; GERMEROOTH, C.; DAY-HESS, C. (Eds.). **Advances in Child Development and Behavior**. Nova Iorque: Academic Press, v. 52, p. 227-268, 2017.

BURTON, M. J. et al. The Lancet Global Health Commission on Global Eye Health: vision

beyond 2020. **The Lancet Global Health**, v. 9, n. 4, p. e489–e551, 2021.

CAPORUSSO, N.; ROA, Q.; THOMAS, B.; TILLEY, M. Tactile Network Topologies: Inclusive Learning for Visually Impaired Students in Computer Networking Education. In: **MIPRO ICT AND ELECTRONICS CONVENTION (MIPRO)**, 47., 2024, Opatija, Croatia. Proceedings [...]. Opatija, Croatia: IEEE, 2024. p. 1399–1404. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIPRO60963.2024.10569877>

CARMO, J.L.D. **Manual de boas práticas em análise sensorial** (Tese de doutorado). 112p, 2018.

CARPMAN, J. R.; GRANT, M. A. Wayfinding: abroad view. In: BECHTEL, R. B.; CHURCHMAN, A. (Eds.), **Handbook of environmental psychology**. New York: JohnWiley, p. 427-443. 2002.

CHRISTENSEN, Z. T.; OGDEN, L. V.; DUNN, M. L.; EGGETT, D. L. Multiple Comparison Procedures for Analysis of Ranked Data. **Journal of Food Science**, v. 71, n. 2, p. S132-S143, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb08916.x>

CLARKSON, J. et al. **Inclusive design: design for the whole population**. London: Springer, 2013.

CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE (BRASIL). **Resolução nº 466**, de 12 de dezembro de 2012. Brasília, 2012. Disponível em: http://www.conselho.saude.gov.br/web_comissoes/conep/index.html. Acesso em 04 set. 2023.

CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE (BRASIL). **Resolução nº 510/2016**, de 24 de maio de 2016. Brasília, 2016. Disponível em: <http://conselho.saude.gov.br/resolucoes/2016/Reso510.pdf>. Acesso em 04 set. de 2023.

COX, T. F.; COX, M. A. A. **Multidimensional Scaling** (2nd ed.). Chapman & Hall/CRC, 2001.

CPA - **Comissão Permanente de Acessibilidade. Norma Técnica para Linguagem Braille nos Elevadores**. São Paulo, 16 set. 2000. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/pessoa_com_deficiencia/arquivos/legislacao/Resolucao_CPA004.pdf. Acesso em: 15 mai. 2023.

CULBERTSON, H.; SCHORR, S. B.; OKAMURA, A. M. Haptics: the present and future of artificial touch sensation. **Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems**, v. 1, p. 385–409, 2018.

DAVE, H. K.; PATEL, S. T. Introduction to Fused Deposition Modeling Based 3D Printing Process. In: DAVE, H. K.; DAVIM, J. P. (ed.). **Fused Deposition Modeling Based 3D Printing**. Cham: Springer, p. 1–16, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4_1.

DE BORST, A. W.; DE GELDER, B. Mental imagery follows similar cortical reorganization as perception: intra-modal and cross-modal plasticity in congenitally blind. **Cerebral Cortex**, v. 29, n. 11, p. 4720–4734, 2019. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy151>.

DEL TORO, S. F.; CRESPO-SANCHEZ, J.; AYLLÓN, J.; RODRÍGUEZ-PRIETO, A.; CAMACHO, A. M. Mechanical performance of 3D-printed TPU auxetic structures for energy absorption applications. *Polymer Testing*, [S. l.], v. 143, 108669, 2025. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2024.108669.

DIEGEL, O.; SCHUTTE, J.; FERREIRA, A.; CHAN, Y. L. Design for additive manufacturing process for a lightweight hydraulic manifold. **Additive Manufacturing**, v. 36, 2020.

DUTCOSKY, S. D. **Análise Sensorial de Alimentos**. 3. ed. Curitiba, PR: Champagnat, 2011.

EDMAN, P. **Tactile graphics**. New York: American Foundation for the Blind, 1992.

FERRARI, A. L. M. **Influência do Design de Órteses de Punho e Mão no Desconforto, Transmissão de Torque e Desempenho em Tarefas Manuais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Bauru, 97p, 2019.

FERRELL, K. A.; MASON, L. L.; YOUNG, J. **Spatial cognition and blindness**. New York: Routledge, 2021.

FILAMENT2PRINT. **Parâmetros básicos de laminação**. Disponível em: <https://filament2print.com/pt/blog/parametros-basicos-laminacao>. Acesso em: 21 jul. 2025.

FRASCARA, J. **Design and communication**. London: Routledge, 2015.

FROSCHE, R. **O mundo em 3D: produção de recursos pedagógicos inclusivos**. Rio de Janeiro: Encontrografia, 2021.

GAO, G.; XU, F.; XU, J.; TANG, G.; LIU, Z. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. **Micromachines**, v. 13, n. 4, p. 553, 2022. DOI: 10.3390/mi13040553

GENTAZ, E.; HATWELL, Y. Haptic perception and cognition. In: HELLER, M.; SCHIFF, W. (eds.). **The psychology of touch**. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2004.

GIBSON, I. et al. **Additive manufacturing technologies**. 2. ed. New York: Springer, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.; KHORASANI, M. Introduction and basic principles. In: GIBSON, I. et al. **Additive manufacturing technologies**. Cham: Springer, p. 1–28, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7_1

GIBSON, J. J. **The ecological approach to visual perception**. Boston: Houghton Mifflin, 1979.

GOLDSTEIN, E. B. **Sensation and perception**. 10. ed. Boston: Cengage, 2018.

GOMES FILHO, J. **Gestalt do objeto: sistema de leitura visual da forma**. São Paulo: Escrituras, 2013.

GUAL, J.; PUYUELO, M.; LLOVERAS, J. The effect of volumetric (3D) tactile symbols within inclusive tactile maps. **Applied Ergonomics**, v. 48, p. 1-10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.10.018>

GUIMARÃES, M. J. S.; MOURA, M.; DOMICIANO, C. L. C. **Design gráfico inclusivo na contemporaneidade** (Kindle Locations 596-609). Unesp. Kindle Edition, 2021.

HATWELL, Y. **Psychologie cognitive de la cécité précoce**. Paris: Dunod, 2003.

HATWELL, Y.; STRERI, A.; GENTAZ, E. **Touching for knowing: cognitive psychology of haptic manual perception**. Amsterdam: John Benjamins, 2003.

HELLER, M. A. Tactual perception of embossed morse code and braille: the alliance of vision and touch. **Perception**, v.14, n. 5, p. 563-570, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1068/p140563>

HELLER, M. A.; BALLESTEROS, S. Introduction: approaches to touch and blindness. In: HELLER, M. A.; BALLESTEROS, S. (Eds.). **Touch and blindness: psychology and neuroscience**. Londres: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, p. 1-21, 2006. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781410615671>

HELLER, M. A.; GENTAZ, E. **Psychology of touch and blindness**. New York: Psychology Press, 2014.

HOLLOWAY, L.; MARRIOTT, K.; BUTLER, M. Accessible maps for the blind: comparing 3D printed models with tactile graphics. In: **Conference on Human Factors in Computing Systems, 1., 2018, Montreal**. Proceedings [...]. Nova Iorque: ACM, p. 1-13, 2018.

HÜTTNER, S. M.; GERHARD, K.; EILKS, I. **Tactile graphics in chemistry education for blind and visually impaired students: A design-based research approach**. 2024.

IBGE. **PNS 2019: país tem 17,3 milhões de pessoas com algum tipo de deficiência.** Agência de Notícias IBGE, 26 ago. 2021a. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/31445-pns-2019-pais-tem-17-3-milhoes-de-pessoas-com-algum-tipo-de-deficiencia>. Acesso em: 15 mai. 2025.

IBGE. **Um em cada quatro idosos tinha algum tipo de deficiência em 2019.** Agência de Notícias IBGE, 26 ago. 2021b. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/31447-um-em-cada-quatro-idosos-tinha-algum-tipo-de-deficiencia-em-2019>. Acesso em: 15 mai. 2025.

IDRC – INCLUSIVE DESIGN RESEARCH CENTRE. **What is inclusive design?** 2015. Disponível em: <<https://idrc.ocadu.ca/about-the-idrc>>. Acesso em: 20 mar. de 2024.

IIDA, I. **Ergonomia: projeto e produção.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, & AMERICAN SOCIETY OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS. ISO/ASTM 52900:2015. **Standard terminology for additive manufacturing - general principles - terminology.** Genève:ISO; West Conshohocken: ASTM International, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17049:2013 — **Accessible design — Application of braille on signage.** Geneva: ISO, 2013.

JABLONKA, KAMILA; LAMBERT, CHRIS; LISTER, NATHAN; ABRAM, TOM; DALTON, CAROLYN; FRONTANI, IVAN. Increasing Museum Accessibility for People with Visual Impairment Using Product Development and Additive Manufacturing. **The International Journal of the Inclusive Museum**, v. 17, n. 2. pp. 169-191, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18848/1835-2014/CGP/v17i02/169-191>

JADAD, A. R., ENKIN, M. W. **Randomized controlled trials: Questions, answers, and musings.** 2nd. ed. London: Blackwell Publishing/BMJ Books, 2007.

KAHRIMANOVIC, M.; BERGMANN T. W. M.; KAPPERS, A. M. Haptic perception of volume and surface area of 3-D objects. **Attention, Perception, & Psychophysics**, n. 72, p. 517-527, 2010.

KAPLAN, H.; PYAYT, A. Development of user feedback-based optimized encoding system for 3D-printed tactile maps. **Disabilities**, v. 2, n. 3, p. 379–397, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/disabilities2030027>.

KARIM, A. K. M. R.; PRATIVA, S.; LIKOVA, L. T. Perception and appreciation of tactile objects: the role of visual experience and texture parameters. In: IS&T INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONIC IMAGING: HUMAN VISION AND ELECTRONIC IMAGING – HVEI, 2022, San Francisco. **Proceedings...** [S.l.]: SPIE, 2022. Artigo HVEI-124, p. 1–6. DOI: 10.2352/J.Percept.Imaging.2022.5.000405.

KEMP, T.; HOLLOWOOD T.; HORT, J. **Sensory Evaluation: A practical handbook.** 5 ed., 2009. KENNEDY, E. **Designing the digital world.** Galway: National University of Ireland Galway, [s.d.]. Disponível em: <https://openpress.universityofgalway.ie/designingthedigitalworld/>. Acesso em: 21 jul. 2025.

KLATZKY, R. L. Allocentric and egocentric spatial representations: Definitions, distinctions, and interconnections. In: FREKSA, C.; HABEL, C.; WENDER, K. F. (Eds.). **Spatial cognition: an interdisciplinary approach to representation and processing of spatial knowledge.** Berlim: Springer-Verlag, p. 1-17, 1998. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-69342-4_1

KLATZKY, R. L.; LEDERMAN, S. J. Hand movements: a window into haptic object recognition. **Cognitive Psychology**, v. 19, n. 3, p. 342-368, 1987.

KOZEL, S. Comunicando e representando: mapas como construções socioculturais. In: SEEMANN, J. (org.). **A aventura cartográfica: perspectivas, pesquisas e reflexões sobre a cartografia humana.** Fortaleza: Expressão Gráfica, 2006.

KOZIOL, J. A. A note on multiple comparison procedures for analysis of ranked data. *Universaç Journal of Food and Nutrition Science*, v. 1, n. 2, p. 11-15, 2013. DOI: 10.13189/ujfns.2013.010201.

KUNZLER, L. S. Q. **Estudo das variáveis de rugosidade, dureza e condutividade térmica aplicado à percepção tátil em design de produto**. 2003. 120 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

LEDERMAN, S. J.; Klatzky, R. L. Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics*, v. 71, p. 1439–1459, 2009b. DOI: <https://doi.org/10.3758/APP.71.7.1439>

LEDERMAN, S. J.; KLATZKY, R. L. Human haptics. In: SQUIRE, L. R. (Ed. In Chief). *Encyclopedia of Neuroscience*. San Diego: Academic Press, v. 5, p. 11-18, 2009a.

LESAGE, F. X.; BERJOT, S.; DESCHAMPS, F. Clinical stress assessment using a visual analogue scale. *Occupational Medicine (Oxford)*, v. 62, n. 8, p. 600–605, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1093/occmed/kqs140>

LIRA, Valdemir Martins. **Processos de fabricação por impressão 3D: tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D**. São Paulo: Edgard Blücher, 2021.

LOOMIS, J.; LEDERMAN, S. Haptic identification of objects. *Cognitive Psychology*, v. 18, p. 219–239, 1986.

MACE, R.; HARDIE, G.; PLACE, J. **Accessible environments: toward universal design**. Raleigh: North Carolina State University, 1991.

MACHADO, E. V. [et al.]. **Orientação e mobilidade: conhecimentos básicos para a inclusão do deficiente visual**. Brasília: MEC, SEESP, 167 p, 2003.

MANZINI, E. **La materia dell'invenzione**. Milão: Progetto Cultura-Montedison, 1989.

MILLAR, S. **Reading by touch**. London: Routledge, 1997.

MILLAR, S. **Understanding and representing space**. Oxford: Oxford University Press, 1994.

MORAES, A. Ergonomia informacional: A comunicação humano-tarefa-máquina; processamento, convergência e mudança de comportamento. In _____ (Org.). **Avisos, Advertências e Projetos de Sinalização**. Rio de Janeiro: iUsEr, 2002.

NAPPI, M.; RICCIARDI, S.; TISTARELLI, M. Real time 3D face-ear recognition on mobile devices: new scenarios for 3D biometrics “in-the-wild”. In: **Human recognition in unconstrained environments**. [S. l.]: [s. n.], 2017. p. 55–75.

NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K. T. Q.; HUI, D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, v. 143, p. 172–196, 2018.

NORMAN, J. F.; Bartholomew, A. N. Blindness enhances tactile acuity and haptic 3D shape discrimination. *Attention, Perception, & Psychophysics*, v. 73, p. 2323–2331, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0160-4>

OKAMOTO, S.; NAGANO, H.; YAMADA, Y. Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *Journal of IEEE Transactions on Haptics*, v. 6, n. 1, p. 81-93, 2013.

OKAMOTO, S.; YAMADA, Y. Illustrative evaluation index for haptic interfaces using confusion matrices. *IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Paris, France, 2012, p. 1007-1012, 2012. DOI: 10.1109/ROMAN.2012.6343881.

OLIVEIRA, J. V. G. **Do essencial invisível: arte e beleza entre os cegos**. Rio de Janeiro: Renavan: FAPERJ, 2002.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Classificação internacional de funcionalidade, incapacidade e saúde (CIF)**. São Paulo: Edusp, 2001.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **World report on vision**. Geneva: World Health Organization, 2019. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-vision>. Acesso em: 25 set. 2024.

ORMELEZI, E. M. **Os caminhos da aquisição do conhecimento e a cegueira: do universo do corpo ao universo simbólico**. 2000. Dissertação (Mestrado em Psicologia e Educação) - Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

OWEN, D. H.; BROWN, D. R. Visual and tactual form complexity: a psychophysical approach to perceptual equivalence. **Perception & Psychophysics**, v. 9, n. 1, p. 36–42, 1970.

PAPIS, M.; KALSKI, P.; SZUSZKIEWICZ, G.; KOWALIK, M. P. Influence of 3D Printing Technology on Reproducing Cultural Objects in the Context of Visually Impaired People. **Advances in Science and Technology Research Journal**, v.19, n.6, 2025

PASSINI, R.; PROULX, G. Wayfinding without vision: an experiment with congenitally blind people. **Environmental Behavior**, n. 20, p. 227–252, 1998.

PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, v. 12, p. 2825–2830, 2011.

PHUTANE, M.; WRIGHT, J.; CASTRO, B. V.; SHI, L.; STERN, S. R.; LAWSON, H. M.; AZENKOT, S. Tactile Materials in Practice: Understanding the Experiences of Teachers of the Visually Impaired. **ACM Transactions on Accessible Computing**. v. 15, n. 3, p. 1–34, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1145/3508364>

PICARD, D.; DACREMONT, C.; VALENTIN, D.; GIBOREAU, A. Perceptual dimensions of tactile textures. **Acta Psychologica**, v. 114, n. 2, p. 165–184, 2003.

PISTOFIDIS, P.; IOANNAKIS, G. A.; MICHAILEDIOU, N. Composing smart museum exhibit specifications for the visually impaired. **Journal of Cultural Heritage**, v. 52, n. 4, p. 1–10, 2021. DOI: 10.1016/j.culher.2021.08.013.

POPESCU, D.; ZAPCIU, A.; AMZA, C.; BACIU, F.; MARINESCU, R. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: a review. **Polymer Testing**, v. 69, p. 157–166, 2018.

PUERTA, E.; CRNOVRSANIN, T.; SOUTH, L.; DUNNE, C. The effect of orientation on the readability and comfort of 3D-printed braille. In: CHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS – CHI '24, 2024, Honolulu. Proceedings [...]New York: Association for Computing Machinery, 2024. Article 346, p. 1–15. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3613904.3642719>.

ROVIRA, K.; DESCHAMPS, L.; BAENA-GOMEZ, D. Mental rotation in blind and sighted adolescents: the effects strategies. **European Review of Applied Psychology**, v. 61, n. 3, p. 153–160, 2011.

RUSINKIEWICZ, S.; WEYRICH, T.; MATUSIK, W.; SADLO, F.; PEIKERT, R.; PFISTER, H. Acquisition. In: GROSS, M.; PFISTER, H. (eds.). **Point-based graphics**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2007. p. 18–93. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012370604-1/50004-3>

SACHS, E. M.; CIMA, M. J.; WILLIAMS, P.; BRANCAZIO, D.; CORNIE, J. Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model. **Journal of Engineering for Industry**, v. 114, n. 4, p. 481–488, 1992.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; SABINO NETTO, A. C.; MERLINI, C. Estudo comparativo entre PETG e PLA para impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 23, n. 4, 2018. DOI: 10.1590/S1517-707620180004.0601.

SATHIAN, K. Visual cortical activity during tactile perception in the sighted and the visually deprived. **Developmental Psychobiology**, v. 46, n. 3, p. 279–286, 2005. <https://doi.org/10.1002/dev.20056>.

SATHIAN, K.; LACEY, S. Visual cortical involvement during tactile perception in blind and sighted individuals. In: RIESER, J. J., ASHMEAD, D. H., EDNER, F. F., CORN, A. L. (Eds.). **Blindness and brain plasticity in navigation and object perception**. Mahwah, NJ: Erlbaum, p. 113-125, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/dev.20056>

SHAKESPEARE, T. **Disability rights and wrongs**. Canada: Routledge, 2018.

SILVA, J. C. R. P.; PASCHOARELLI, L. C. A ergonomia informacional e a possibilidade de desenvolvimento de texturas para leitura tátil: uma revisão. In: **O design aliado à tecnologia assistiva: a projeção de um andador direcionado a idosos com mobilidade reduzida**. São Carlos: Editora Canal 6, 2018. p. 371.

SINGHAL, I.; BALAJI, B. S. Creating Atom Representations Using Open-Source, Stackable 3D Printed Interlocking Pieces with Tactile Features to Support Chemical Equation Writing for Sighted and Visually Impaired Students. **Journal of Chemical Education**, v. 97, p. 118-124, 2020. DOI: 10.1021/acs.jchemed.9b00255

SLOCUMB, William James. **The engineer's guide to 3D printing: the practical handbook for Fused Filament Fabrication**. [S. l.]: Independently published, 2025. ISBN 979-8308722380.

SPIELBERGER, C. D. **State-trait anxiety inventory**. Palo Alto: Consulting Psychologists Press, 1983.

SPIRANDELLI, A. J. **Design na produção de mapas táteis: análise das estratégias de navegação para pessoas com deficiência visual**. Dissertação (Mestrado em Design) — Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2022.

STORY, M. F.; MUELLER, J. L.; MACE, R. L. **The universal design file**. Raleigh: NC State University, 1998.

TEKLI, J.; ISSA, Y. B.; CHBEIR, R. Evaluating touch-screen vibration modality for blind users to access simple shapes and graphics. **International Journal of Human-Computer Studies**, v. 110, p. 115–133, 2018.

TENNISON, J. L.; GORLEWICZ, J. L. Non-visual perception of lines on a multimodal touchscreen tablet. **ACM Transactions on Applied Perception (TAP)**, v. 16, n. 1, p. 1–19, 2019.

TZVETKOVA-ARSOVA, M. et al. 3D tactile tiles optimization for blind and visually impaired people. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIRCUITS, SYSTEMS, COMMUNICATIONS AND COMPUTERS (CSCC)**, 26., 2022, Sofia. Proceedings [...] Piscataway: IEEE, 2022. p. 286–289. DOI: 10.1109/CSCC55931.2022.00055.

VASCONCELLOS, R. **Cartografia tátil e o deficiente visual: uma avaliação das etapas de produção e uso do mapa**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

VERDIANI, G.; CHARALAMBOUS, A.; ALGOSTINO, F. The Earlier Mona Lisa: creating a tactile physical model for transversal sharing and learning during the exhibition. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON CULTURE AND COMPUTER SCIENCE (KUI '23)**, 2023. Proceedings [...] New York: ACM, 2023.

VINTER, A.; FERNANDES, V.; ORLANDI, O.; MORGAN, P. Exploratory procedures of tactile images in visually impaired and blindfolded sighted children: how they relate to their consequent performance in drawing. **Research in Developmental Disabilities**, v. 33, n. 6, p. 1891–1831, 2012.

VIZIOLI, S. H. T.; ADAMI, A.; HIILESMAA, L.; CARVALHO, L. C. Comparative study of the photogrammetry process in different hardware. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS**, 24., 2020. Proceedings[...]

[S. l.]: [s. n.], 2020. v. 8, n. 4.]

VOLPATO, N. (org.). **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. Princípio da manufatura aditiva: impressão 3D. In: VOLPATO, N. (org.). **Tecnologias e aplicações da manufatura aditiva**. São Paulo: Blucher, p. 19–40, 2017.

WABIŃSKI, J.; MOŚCICKA, A.; KUŹMA, M. The information value of tactile maps: a comparison of maps printed with the use of different techniques. **The Cartographic Journal**, v. 58, n. 2, p. 123–134, 2021.

WALLER, S.; BRADLEY, M.; HOSKING, I.; CLARKSON, J. P. Making the case for inclusive design. **Applied Ergonomics**, v. 46, p. 297–303, 2015.

WHITAKER, T. A.; SIMÕES-FRANKLIN, C.; NEWELL, F. N. Vision and touch: Independent or integrated systems for the perception of texture? **Brain Research**, n. 1242, p. 59–72, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.05.037>

WIBERG, A.; PERSSON, J.; ÖLVANDER, J. Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software. **Rapid Prototyping Journal**, v. 25, n. 6, p. 1080–1094, 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Blindness and vision impairment – key facts**. Geneva: WHO, 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>. Acesso em: 15 jul. 2025.

WU, C. F.; WU, H. P.; TU, Y. H.; YEH, I. T.; CHANG, C. T. A study on the design procedure of three-dimensional printable tactile graphics for individuals with visual impairments. **Journal of Visual Impairment & Blindness**, v. 116 (4), p. 507–516, 2022. DOI: [10.1177/014548X221122754](https://doi.org/10.1177/014548X221122754)

YOSHIOKA, T.; BENSMAÏA, S. J.; CRAIG, J. C.; HSIAO, S. S. Texture perception through direct and indirect touch: An analysis of perceptual space for tactile textures in two modes of exploration. **Somatosensory and Motor Research**, v. 24, n. 1–2, p. 53–70, 2007.

ZAMORA, D. C.; LIANG, H.; FROELICH, J. E. Towards Rapi Fabrication of Custom Tactile Surface Indicators for Indoor Navigation. In: **Proceedings of the 26th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility**, p. 1–5, 2024.

ZOLEK-TRYZNOWSKA, Z.; BRZEZINSKA, Z.; BEDNARCZYK, E. Quality Assessment of Braille Dots Printed by Fused Deposition Modeling 3D Printing Technology. **Advances in Science and Technology Research Journal**, v. 18, n. 6, pp. 321–330, 2024. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/191928>

APÊNDICE I



Faculdade de
Arquitetura, Artes,
Comunicação
e Design

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa *“Design aplicado ao desenvolvimento sistemas de informação para pessoas com deficiência visual: uma proposta metodológica para avaliação de materiais utilizados na impressão 3D por FFF”*, que tem como pesquisador responsável Ms. Antônio José Spirandelli e orientadora Prof. Assoc. Cassia Leticia Carrara Domiciano. Caso haja alguma palavra ou frase que não consiga entender, converse com o pesquisador responsável pelo estudo ou com um membro da equipe desta pesquisa para esclarecê-los.

O objetivo desta pesquisa é avaliar a influência de diferentes materiais utilizados em impressoras 3D por FFF (*Fused Filament Fabrication*, como PLA, PETG e TPU) na percepção háptica de texturas aplicadas em sistemas de informação inclusivos para pessoas com deficiência visual (PcDVs). E tem como justificativa contribuir para a área do Design da Informação e do Design Inclusivo, identificando critérios que orientem a escolha de materiais para impressão 3D por FFF a fim de melhorar o desempenho háptico de produtos destinados a PcDVs.

Caso aceite participar da pesquisa, os procedimentos envolvidos em sua participação são os seguintes: serão apresentados três conjuntos com cinco amostras de texturas diferentes, todas impressas em 3D, para análise tátil. Cada amostra deverá ser manipulada com as mãos, sem o auxílio da visão, e então você deverá classificá-las com base na densidade percebida, da mais densa (posição posição mais à direita) para a menos densa (posição mais à esquerda). O procedimento terá duração aproximada de 10 minutos.

A atividade não envolve riscos físicos, emocionais ou psicológicos significativos. Caso você sinta desconforto ou deseje interromper sua participação, terá liberdade para fazê-lo a qualquer momento. Não há benefícios diretos para os participantes, mas a pesquisa contribuirá para o desenvolvimento de tecnologias e ferramentas mais acessíveis, como mapas táteis ou dispositivos sensoriais, beneficiando especialmente indivíduos com deficiência visual; bem como contribuir para avanços em áreas como design inclusivo, acessibilidade com aplicação da impressão 3D.

Seus dados serão tratados de forma anônima e utilizados exclusivamente para fins acadêmicos e científicos. Sua participação é voluntária e você pode desistir a qualquer momento, sem prejuízo. Solicitamos também sua autorização para apresentar os resultados deste estudo em eventos da área e publicar em revista científica nacional e/ou internacional. Por ocasião da publicação dos resultados, seu nome será mantido em sigilo absoluto, bem como em todas as fases da pesquisa.

Caso você tenha dúvidas, poderá entrar em contato com o pesquisador responsável Antônio José Spirandelli, pelo telefone (14) 98205.5454, endereço (Rua dos Radioamadores 2-60, Jardim Brasil, Bauru/SP) e/ou pelo e-mail (antonio.spirandelli@unesp.br).

Declaro que fui informado(a) sobre os objetivos do estudo, o caráter voluntário da participação e a garantia de confidencialidade, autorizando minha participação neste estudo. Esse termo é assinado em duas vias, sendo uma do participante e a outra para os pesquisadores.



Faculdade de
Arquitetura, Artes,
Comunicação
e Design

Declaração de Consentimento

Concordo em participar do estudo intitulado: *“Design aplicado ao desenvolvimento sistemas de informação para pessoas com deficiência visual: uma proposta metodológica para avaliação de materiais utilizados na impressão 3D por FFF”*.

Nome do participante ou responsável

Assinatura do participante ou responsável

Data: ____/____/____

Eu, Antônio José Spirandelli, declaro cumprir as exigências contidas nos itens IV.3 e IV.4, da Resolução nº 466/2012 MS.

Assinatura do Pesquisador

Data: ____/____/____

Programa de Pós-graduação em Design
Av Eng Luiz Edmundo Carrijo Coube, nº 14-01 | Vargem Limpa,
Bauru/SP | CEP 17033-360 | Tel: (14) 3103-6157
e-mail: spg.faac@unesp.br | www.faac.unesp.br



APÊNDICE II

Plano de Gestão de Dados

1. Coleta de dados

1.1. Quais dados digitais serão gerados pela pesquisa?

A pesquisa envolverá a coleta de dados quantitativos e qualitativos, incluindo:

- Dados experimentais: registros numéricos das respostas dos participantes nos testes de ordenação e localização tátil;
- Tempos de execução: duração das tarefas registradas em cronômetro e vídeos;
- Dados qualitativos: gravações de entrevistas estruturadas e transcrições;
- Registros audiovisuais: vídeos e fotos do experimento para validação da execução;
- Dados computacionais: arquivos de modelagem 3D das texturas e matrizes de dissimilaridade geradas para análise estatística.

1.2. Como os dados serão coletados ou criados?

- Os testes serão aplicados em ambiente controlado, com registros estruturados em planilhas digitais;
- Os tempos de execução serão aferidos manualmente e validados por análise de vídeo;
- As entrevistas serão gravadas em áudio e transcritas manualmente;
- A matriz de confusão será gerada com base nas respostas dos participantes e convertida em matriz de dissimilaridade para análise estatística;
- Os arquivos 3D das amostras serão gerados em softwares de modelagem e armazenados em formatos .STL e .OBJ.

2. Como serão gerenciados internamente (cobrindo as etapas de geração, limpeza e armazenamento seguro e confiável)?

A pesquisa seguirá as diretrizes da Resolução 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde, assegurando a proteção dos participantes, assim o estudo será submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP-UNESP). Todos os participantes assinarão o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) antes da coleta de dados e os dados serão anonimizados para evitar identificação

dos participantes.

Os dados gerados na pesquisa serão de propriedade do pesquisador e da instituição responsável; os arquivos de modelagem 3D poderão ser licenciados sob Creative Commons (CC BY4.0), permitindo reutilização com citação da fonte; e as transcrições de entrevistas e demais documentos seguirão as políticas de acesso da UNESP.

3. Armazenamento e backup

3.1. Como os dados serão armazenados e terão backup durante a pesquisa?

Os dados serão armazenados em três locais:

- Servidor institucional da UNESP (acesso restrito e criptografado);
- Plataforma em nuvem (Google Drive ou OneDrive, backup semanal);
- HD externo (cópia de segurança mantida offline).

3.2. Como você vai gerenciar o acesso e a segurança?

- Apenas o pesquisador responsável e equipe aprovada terão acesso aos dados brutos;
- Dados anonimizados poderão ser compartilhados para fins acadêmicos mediante solicitação;
- Os arquivos serão protegidos por senha e criptografia para evitar acessos não autorizados.

4. Compartilhamento de dados

4.1. Como você vai compartilhar os dados?

- Dados anonimizados poderão ser compartilhados mediante solicitação, garantindo conformidade ética;
- Conjuntos de dados serão publicados em periódicos científicos e conferências acadêmicas;
- Os arquivos 3D das texturas poderão ser disponibilizados em repositórios de acesso aberto.

4.2. Existem restrições ao compartilhamento de dados requeridos?

- Dados contendo informações sensíveis dos participantes não serão disponibilizados publicamente;
- Os vídeos dos experimentos não serão compartilhados para evitar identificação dos indivíduos;
- Acesso aos dados poderá ser concedido sob acordos de uso específicos.

APÊNDICE III



Faculdade de
Arquitetura, Artes,
Comunicação
e Design

ENTREVISTA ESTRUTURADA

1. Identificação do Participante

- 1.1 Nome ou identificação:
1.2 Idade:
1.3 Curso de graduação (apenas para o grupo controle):
1.4 Data da entrevista:

2. Critérios de Inclusão e Exclusão

Para o Grupo Controle (Indivíduos videntes)

2.1 Você possui algum treinamento formal ou experiência com o uso do tato para identificação de objetos, superfícies ou texturas?

- Sim
 Não

Se sim, pode descrever brevemente quais?

Resposta: _____

2.2 Você teve contato prévio com texturas semelhantes às que serão empregadas neste estudo?

- Sim
 Não

Para o Grupo Experimental (Indivíduos com cegueira congênita ou adquirida)

2.3 Sua cegueira é congênita ou adquirida?

- Congênita
 Adquirida

2.4 No caso de cegueira adquirida, você se lembra do ano ou da idade em que perdeu a visão?

Resposta: _____



Faculdade de
Arquitetura, Artes,
Comunicação
e Design

2.5 Você é fluente em Braille?

- Sim
 Não

2.6 Você possui experiência prévia com o uso de mapas ou outros sistemas de informação táteis?

- Sim
 Não

Se sim, pode descrever brevemente quais?

Resposta: _____

3. Aspectos Gerais de Exploração Tátil

3.1 Com que frequência você utiliza a exploração tátil no seu cotidiano para identificar objetos ou superfícies?

- Sempre
 Frequentemente
 Ocasionalmente
 Raramente
 Nunca

3.2 Você já utilizou produtos ou sistemas desenvolvidos por impressão 3D?

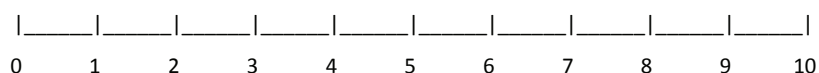
- Sim
 Não

Se sim, qual era o propósito?

Resposta: _____

4. Escala VAS para Avaliação de Ansiedade ou Estresse (Pré-Teste)

Por favor, indique na escala abaixo como você se sente neste momento, sendo 0 (nenhuma ansiedade/estresse) e 10 (ansiedade/estresse extremo).



Programa de Pós-graduação em Design

Av Eng Luiz Edmundo Carrijo Coube, nº 14-01 | Vargem Limpa,
Bauru/SP | CEP 17033-360 | Tel: (14) 3103-6157
e-mail: spg.faac@unesp.br | www.faac.unesp.br



APÊNDICE IV

Scripts Python executados pelo Google Colab para análise de dados.

Script Python para construção da matriz de confusão e gráfico MDS:

1. Lê a matriz de confusão via upload (.csv)
2. Constrói a matriz de dissimilaridade
3. Roda MDS métrico 2D
4. Calcula stress “bruto” do sklearn e stress de Kruskal (normalizado)
5. Faz um “*mini scree*” (1D, 2D, 3D) com stress de Kruskal

```
# =====
# MDS A PARTIR DE MATRIZ DE CONFUSÃO (Colab)
# - Upload de um CSV quadrado NxN
# - Converte em dissimilaridade:  $D = 1 - (C + C.T)/2$ 
# - Executa MDS métrico (1D, 2D, 3D) e não-métrico (2D)
# - Calcula stress do sklearn e stress de Kruskal
# - Plota MDS 2D métrico
# =====

import io
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from google.colab import files
from sklearn.manifold import MDS

# -----
# 1) UPLOAD DO ARQUIVO CSV (MATRIZ DE CONFUSÃO)
# -----
print("Selecione a matriz de confusão (CSV quadrado NxN):")
uploaded = files.upload()
fname = list(uploaded.keys())[0]

# tenta ler com rótulos nas linhas/colunas
try:
    C = pd.read_csv(io.BytesIO(uploaded[fname]), index_col=0)
except Exception:
    C = pd.read_csv(io.BytesIO(uploaded[fname]), header=None)
```

```

# conferência de formato
if C.shape[0] != C.shape[1]:
    raise ValueError(f"A matriz deve ser quadrada! Recebido:
{C.shape}")

C = C.apply(pd.to_numeric, errors='coerce').fillna(0.0)

# rótulos das amostras
if C.index.dtype == 'int64' or C.index.dtype == 'float64':
    labels = [f"A{i+1}" for i in range(C.shape[0])]
    C.index = labels
    C.columns = labels
else:
    labels = list(C.index)

print("\nMatriz de Confusão carregada:")
display(C)

# -----
# 2) MATRIZ DE DISSIMILARIDADE
# -----
# OBS: se sua matriz já está em proporções 0-1, isso não altera
nada.
# Se estiver em contagens, isso normaliza pelo valor máximo
(escala 0-1).
if C.values.max() > 1:
    C_norm = C / C.values.max()
else:
    C_norm = C.copy()

# similaridade simetrizada
S_sym = (C_norm + C_norm.T) / 2.0
# dissimilaridade
D = 1.0 - S_sym

print("\nMatriz de Dissimilaridade (D = 1 - similaridade
simetrizada):")
display(D)

# -----
# 3) FUNÇÃO PARA CALCULAR STRESS DE KRUSKAL

```

```

# -----
def kruskal_stress(D_real, coords):
    """
    Calcula o stress de Kruskal a partir de:
    - D_real: matriz de dissimilaridade NxN (numpy array)
    - coords: coordenadas MDS Nxk (numpy array)
    """
    # distâncias euclidianas no espaço MDS
    D_hat = np.sqrt(((coords[:, None, :] - coords[None, :, :]) **
2).sum(axis=2))
    num = ((D_real - D_hat) ** 2).sum()
    den = (D_real ** 2).sum()
    return np.sqrt(num / den)

# -----
# 4) FUNÇÃO PARA RODAR MDS E RETORNAR STRESS
# -----
def run_mds_and_stress(D, n_components=2, metric=True,
random_state=42):
    """
    Roda MDS (sklearn) e retorna:
    - coords: coordenadas Nxk
    - stress_raw: stress do sklearn (soma de quadrados)
    - stress_kruskal: stress normalizado de Kruskal
    """
    mds = MDS(
        n_components=n_components,
        dissimilarity='precomputed',
        metric=metric,
        random_state=random_state,
        max_iter=5000,
        n_init=20
    )
    coords = mds.fit_transform(D)
    stress_raw = mds.stress_
    stress_k = kruskal_stress(D, coords)
    return coords, stress_raw, stress_k

D_np = D.values

# -----
# 5) SCREE BÁSICO: 1D, 2D, 3D (MÉTRICO)
# -----
print("\n=== Scree de Stress (MDS métrico) ===")
scree_results = []

```

```

for dim in [1, 2, 3]:
    coords_dim, stress_raw_dim, stress_k_dim =
run_mds_and_stress(D_np, n_components=dim, metric=True)
    scree_results.append((dim, stress_raw_dim, stress_k_dim))
    print(f"{dim}D -> stress_raw = {stress_raw_dim:.4f} |
stress_Kruskal = {stress_k_dim:.4f}")

# -----
# 6) MDS MÉTRICO 2D (PRINCIPAL)
# -----
coords2d_metric, stress_raw_2d, stress_k_2d =
run_mds_and_stress(D_np, n_components=2, metric=True)

print("\n=== MDS métrico 2D (principal) ===")
print(f"Stress bruto (sklearn)      : {stress_raw_2d:.4f}")
print(f"Stress de Kruskal (normal.) : {stress_k_2d:.4f}")

# -----
# 7) MDS NÃO-MÉTRICO 2D (OPCIONAL, PARA COMPARAR)
# -----
coords2d_nonmetric, stress_raw_nm, stress_k_nm =
run_mds_and_stress(D_np, n_components=2, metric=False)

print("\n=== MDS não-métrico 2D (comparação) ===")
print(f"Stress bruto (sklearn)      : {stress_raw_nm:.4f}")
print(f"Stress de Kruskal (normal.) : {stress_k_nm:.4f}")

# -----
# 8) GRÁFICO DO MDS 2D MÉTRICO
# -----
plt.figure(figsize=(7, 7), dpi=150)
plt.scatter(coords2d_metric[:, 0], coords2d_metric[:, 1], s=80)

for i, lab in enumerate(labels):
    plt.text(coords2d_metric[i, 0] + 0.01,
             coords2d_metric[i, 1] + 0.01,
             lab,
             fontsize=12)

plt.title(f"MDS 2D Métrico\nStress Kruskal = {stress_k_2d:.3f}",
          fontsize=14)

```

```
plt.xlabel("Dimensão 1")
plt.ylabel("Dimensão 2")
plt.axhline(0, color='gray', linewidth=0.5)
plt.axvline(0, color='gray', linewidth=0.5)
plt.grid(alpha=0.3)
plt.gca().set_aspect("equal", adjustable="box")

plt.tight_layout()
plt.savefig("MDS_2D_metric.png", dpi=300)
plt.savefig("MDS_2D_metric.pdf")
plt.show()

print("\nArquivos gerados:")
print("- MDS_2D_metric.png")
print("- MDS_2D_metric.pdf")
```

Script Python para o cálculo da correlação estatística entre as duas matrizes de confusão (Pearson e Spearman, com p-valor)

1. “Achatar” as matrizes (transformar em vetores com todos os valores).
2. Comparar célula a célula → correlação de Pearson (linear) e Spearman (monótona).
3. Obter também os p-valores.

```
import numpy as np
from scipy.stats import pearsonr, spearmanr

# Exemplo de duas matrizes (substitua pelas suas)
M1 = np.array([
    [1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0],
    [0.0, 0.83, 0.17, 0.0, 0.0],
    [0.0, 0.17, 0.67, 0.17, 0.0],
    [0.0, 0.0, 0.17, 0.83, 0.0],
    [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0]
])

M2 = np.array([
    [0.8, 0.0, 0.2, 0.0, 0.0],
    [0.2, 0.4, 0.4, 0.0, 0.0],
    [0.2, 0.4, 0.0, 0.4, 0.0],
    [0.0, 0.2, 0.4, 0.2, 0.2],
    [0.0, 0.0, 0.4, 0.4, 0.6]
])

# Achatar as matrizes
v1 = M1.flatten()
v2 = M2.flatten()

# Pearson
r_p, p_p = pearsonr(v1, v2)

# Spearman
r_s, p_s = spearmanr(v1, v2)

print(f"Pearson r={r_p:.3f}, p={p_p:.5f}")
print(f"Spearman r={r_s:.3f}, p={p_s:.5f}")
```

Script para correta sobreposição dos gráficos do MDS com ajuste de Procrustes

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.spatial import procrustes

def procrustes_align_and_plot(X_ref, X_mov, labels=None,
                             title="MDS overlay (Procrustes)":
    """
    X_ref: (n,2) configuração de referência (ex.: controle)
    X_mov: (n,2) configuração a ser alinhada (ex.: experimental)
    labels: lista opcional de rótulos (n,)
    """
    X_ref = np.asarray(X_ref, dtype=float)
    X_mov = np.asarray(X_mov, dtype=float)

    if X_ref.shape != X_mov.shape:
        raise ValueError("X_ref e X_mov precisam ter o mesmo shape
        (n,2).")

    # Procrustes retorna versões padronizadas (centradas e
    # escaladas) + disparidade
    X_ref_p, X_mov_p, disparity = procrustes(X_ref, X_mov)

    plt.figure()
    plt.scatter(X_ref_p[:, 0], X_ref_p[:, 1], marker='o',
                label='Referência')
    plt.scatter(X_mov_p[:, 0], X_mov_p[:, 1], marker='^',
                label='Alinhado (Procrustes)')

    # linhas ligando pontos correspondentes (ajuda a ver o ajuste)
    for i in range(X_ref_p.shape[0]):
        plt.plot([X_ref_p[i, 0], X_mov_p[i, 0]],
                 [X_ref_p[i, 1], X_mov_p[i, 1]], linewidth=0.8)

    if labels is not None:
        plt.text(X_ref_p[i, 0], X_ref_p[i, 1], str(labels[i]))

    plt.title(f"{title}\nDisparidade Procrustes: {disparity:.6f}")
    plt.axhline(0)
    plt.axvline(0)
    plt.gca().set_aspect('equal', adjustable='box')
    plt.legend()
    plt.show()

    return X_ref_p, X_mov_p, disparity

```

Script Python para gerar gráfico complementar tipo scatter com regressão + r e p anotados para ilustrar correlação estatística entre as duas matrizes de confusão

```
# Scatter de correlação entre duas matrizes de confusão
(Colab-ready)
# - Upload de 2 CSVs (matriz1 e matriz2), ambos NxN, normalizados
por linha
# - Opção exclui_diagonal para ignorar a diagonal (acertos)
# - Saídas: figura PNG/PDF + impressão de Pearson/Spearman

import io
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from google.colab import files
from scipy.stats import pearsonr, spearmanr, linregress

exclui_diagonal = True # <<< altere para False se quiser incluir
a diagonal

def read_square_csv(prompt):
    print(prompt)
    up = files.upload()
    fname = list(up.keys())[0]
    # tenta ler com índice textual (rótulos nas linhas)
    try:
        M = pd.read_csv(io.BytesIO(up[fname]), index_col=0)
        M = M.apply(pd.to_numeric, errors="coerce")
    except Exception:
        M = pd.read_csv(io.BytesIO(up[fname]), header=None)
    # conferências
    if M.shape[0] != M.shape[1]:
        raise ValueError(f"O CSV deve ser quadrado; recebido
{M.shape}.")
    M = M.fillna(0.0)
    return M

# 1) Carregar as duas matrizes
M1 = read_square_csv("Selecione a MATRIZ 1 (CSV quadrado,
normalizada por linha):")
M2 = read_square_csv("Selecione a MATRIZ 2 (CSV quadrado,
normalizada por linha):")

# 2) Vetorizar (opcionalmente excluindo a diagonal)
```

```

if exclude_diagonal:
    mask = ~np.eye(M1.shape[0], dtype=bool)
    v1 = M1.values[mask]
    v2 = M2.values[mask]
else:
    v1 = M1.values.flatten()
    v2 = M2.values.flatten()

# 3) Estatísticas
r_p, p_p = pearsonr(v1, v2)
r_s, p_s = spearmanr(v1, v2)

# 4) Regressão (para a linha vermelha)
slope, intercept, _, _, _ = linregress(v1, v2)
xline = np.linspace(v1.min(), v1.max(), 200)
yline = slope * xline + intercept

# 5) Plot
plt.figure(figsize=(7,7), dpi=300)
plt.scatter(v1, v2, label="Células (M1 × M2)", s=25)
plt.plot(xline, yline, label="Regressão linear", linewidth=2)
plt.plot([0,1],[0,1], "--", label="Identidade (y = x)",
linewidth=1)

plt.xlabel("Matriz 1 (valores normalizados)")
plt.ylabel("Matriz 2 (valores normalizados)")
plt.title("Correlação entre matrizes de confusão")
txt = (f"Pearson r = {r_p:.3f}, p = {p_p:.4g}\n"
      f"Spearman r = {r_s:.3f}, p = {p_s:.4g}\n"
      f"Diagonal {'excluída' if exclude_diagonal else
'incluída'}")
plt.gca().text(0.03, 0.97, txt, transform=plt.gca().transAxes,
va="top", ha="left",
bbox=dict(boxstyle="round,pad=0.3", fc="white",
ec="0.5"))

plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("correlacao_matrizes.png", dpi=300)
plt.savefig("correlacao_matrizes.pdf")
plt.show()

print("Arquivos gerados: correlacao_matrizes.png e
correlacao_matrizes.pdf")
print(f"Pearson: r={r_p:.3f}, p={p_p:.4g} | Spearman: r={r_s:.3f},
p={p_s:.4g}")

```

APÊNDICE V

Entrevista Estruturada - Grupo Controle (Experimento 1)

Participante	Idade	Curso	Treinamento tátil	Contato com as texturas	Uso do tato no dia a dia	Uso de produtos 3D	VAS
P1	26 (M)	Artes	Não	Não	Raramente	Não	2
P2	26 (F)	Artes	Não	Não	Raramente	Sim	3
P3	20 (M)	Artes	Não	Não	Raramente	Sim	3
P4	23 (F)	Artes	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	3
P5	23 (M)	Design	Não	Não	Raramente	Não	2
P6	20 (M)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	2
P7	19 (M)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	1
P8	26 (M)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	4
P9	20 (M)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	4
P10	25 (M)	Artes	Não	Não	Raramente	Não	5
P11	23 (M)	Artes	Não	Não	Frequentemente	Não	0
P12	21 (F)	Artes	Não	Não	Raramente	Sim	4
P13	20 (F)	Artes	Não	Não	Frequentemente	Sim	6
P14	22 (F)	Design	Não	Não	Sempre	Sim	1
P15	21 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	6
P16	19 (F)	Design	Não	Não	Sempre	Sim	3
P17	20 (F)	Design	Não	Não	Raramente	Não	4
P18	20 (M)	Design	Não	Não	Sempre	Sim	4

APÊNDICE VI

Entrevista Estruturada - Grupo Experimental (Experimento 1 e 2)

Participante	Idade	Tipo de Deficiência	Fluência em braille	Experiência com sistemas de informação	Uso de produtos 3D	VAS
P1	51 (M)	Cegueira Adquirida (15 anos)	Sim	Não	Não	0
P2	28 (M)	Baixa Visão Congênita	Sim	Sim (jogos)	Não	10
P3	54 (M)	Cegueira Adquirida (15 anos)	Não	Não	Não	5
P4	19 (M)	Baixa Visão Adquirida (9 anos)	Sim	Não	Não	3
P5	67 (F)	Cegueira Adquirida (52 anos)	Não	Sim (jogos)	Não	5
P6	57 (F)	Baixa Visão Adquirida (45 anos)	Não	Não	Não	3
P7	31(M)	Baixa Visão Congênita	Não	Sim (jogos)	Não	3
P8	23 (F)	Cegueira Congênita	Não	Sim (jogos)	Não	6
P9	38 (F)	Baixa Visão Congênita	Não	Não	Não	7

APÊNDICE VII

Entrevista Estruturada - Grupo Controle (Experimento 2) (Continua)

Participante	Idade	Curso	Treinamento tátil	Contato com as texturas	Uso do tato no dia a dia	Uso de produtos 3D	VAS
P1	22 (F)	Design	Não	Não	Raramente	Sim	3
P2	20 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	7
P3	19 (F)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	2
P4	21 (F)	Arquitetura	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	3
P5	22 (F)	Arquitetura	Não	Não	Raramente	Não	0
P6	20 (F)	Arquitetura	Não	Não	Ocasionalmente	Não	2
P7	22 (F)	Arquitetura	Não	Não	Nunca	Não	1
P8	21 (F)	Design	Não	Não	Sempre	Sim	2
P9	22 (M)	Design	Não	Não	Raramente	Sim	7
P10	21 (F)	Design	Não	Não	Raramente	Sim	0
P11	22 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	0
P12	21 (F)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	1
P13	26 (F)	Design	Não	Não	Raramente	Não	0
P14	22 (M)	Design	Não	Não	Sempre	Sim	3
P15	20 (F)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	2
P16	24 (M)	Design	Não	Não	Sempre	Sim	6
P17	18 (M)	Design	Não	Não	Sempre	Não	5
P18	19 (M)	Design	Não	Não	Frequentemente	Não	1
P19	19 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Não	8
P20	18 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Não	0
P21	19 (M)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	2
P22	18 (F)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	5
P23	18 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	5
P24	23 (F)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	3
P25	20 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	0

Entrevista Estruturada - Grupo Controle (Experimento 2) (Continuação)

Participante	Idade	Curso	Treinamento tátil	Contato com as texturas	Uso do tato no dia a dia	Uso de produtos 3D	VAS
P26	49 (M)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	5
P27	19 (F)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	0
P28	21 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	0
P29	21 (F)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	0
P30	18 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	3
P31	19 (F)	Design	Não	Não	Sempre	Não	2
P32	21 (M)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Não	2
P33	19 (F)	Design	Não	Não	Raramente	Não	6
P34	18 (M)	Design	Não	Não	Frequentemente	Não	0
P35	21 (F)	Arquitetura	Não	Não	Ocasionalmente	Não	4
P36	20 (F)	Arquitetura	Não	Não	Frequentemente	Sim	6
P37	22 (F)	Arquitetura	Não	Não	Frequentemente	Sim	7
P38	20 (F)	Arquitetura	Não	Não	Raramente	Não	6
P39	21 (M)	Arquitetura	Não	Não	Ocasionalmente	Não	0
P40	22 (M)	Arquitetura	Não	Não	Sempre	Não	0
P41	21 (F)	Arquitetura	Não	Não	Ocasionalmente	Não	0
P42	22 (M)	Arquitetura	Não	Não	Ocasionalmente	Não	6
P43	20 (F)	Design	Não	Não	Frequentemente	Sim	2
P44	21 (F)	Design	Não	Não	Ocasionalmente	Sim	5
P45	28 (M)	Design	Não	Não	Raramente	Não	2

ANEXO I

Tabela com valores de referência para DMS, Koziol (2013).

Table 1. Critical Values of Absolute Differences Between Rank Sums

A. Critical values of absolute differences between rank sums, alpha = 0.10										
Number of Panelists	Number of Samples									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	5	7	8	10	11	13	14	16	17	19
6	6	7	9	11	12	14	16	17	19	21
7	6	8	10	12	13	15	17	19	20	22
8	7	8	10	12	14	16	18	20	22	24
9	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
10	7	10	12	14	16	18	20	22	24	27
11	8	10	12	14	17	19	21	23	26	28
12	8	10	13	15	17	20	22	24	27	29
13	8	11	13	16	18	21	23	25	28	30
14	9	11	14	16	19	21	24	26	29	31
15	9	12	14	17	19	22	25	27	30	33
16	9	12	15	17	20	23	25	28	31	34
17	10	12	15	18	21	24	26	29	32	35
18	10	13	16	18	21	24	27	30	33	36
19	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37

B. Critical values of absolute differences between rank sums, alpha = 0.05										
Number of Panelists	Number of Samples									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	6	8	10	11	13	15	17	19	20	22
6	7	9	11	13	15	17	18	20	22	24
7	7	9	12	14	16	18	20	22	24	26
8	8	10	12	15	17	19	21	24	26	28
9	8	11	13	15	18	20	23	25	27	30
10	9	11	14	16	19	21	24	26	29	32
11	9	12	14	17	20	22	25	28	30	33
12	10	12	15	18	21	23	26	29	32	35
13	10	13	16	19	22	24	27	30	33	36
14	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37
15	11	14	17	20	23	26	29	32	36	39
16	11	14	17	21	24	27	30	33	37	40
17	11	15	18	21	25	28	31	35	38	41
18	12	15	19	22	25	29	32	36	39	42
19	12	16	19	23	26	30	33	37	40	43

C. Critical values of absolute differences between rank sums, alpha = 0.01										
Number of Panelists	Number of Samples									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	8	10	12	15	17	19	22	24	26	29
6	9	11	14	16	19	21	24	26	29	31
7	9	12	15	18	20	23	26	29	31	34
8	9	12	15	18	20	23	26	29	31	34
9	11	14	17	20	23	26	29	33	36	39
10	11	15	18	21	24	28	31	34	38	41
11	12	15	19	22	26	29	33	36	40	43
12	12	16	20	23	27	31	34	38	41	45
13	13	17	20	24	28	32	36	39	43	47
14	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49
15	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50
16	14	19	23	27	31	35	40	44	48	52
17	15	19	23	28	32	36	41	45	49	54
18	15	20	24	29	33	38	42	46	51	55
19	16	20	25	29	34	39	43	48	52	57


Note: In the setting where there are t samples and b panelists, compute the absolute value of the difference in rank sums between any two samples. For prespecified alpha levels 0.10, 0.05, or 0.01, the tabled values satisfy the relation: $\text{Prob}(\text{absolute difference in rank sums} > \text{tabled value}) \leq \alpha$.

ANEXO II



MINISTÉRIO DA SAÚDE - Conselho Nacional de Saúde - Comissão Nacional de Ética em Pesquisa – CONEP

FOLHA DE ROSTO PARA PESQUISA ENVOLVENDO SERES HUMANOS

1. Projeto de Pesquisa: Design aplicado ao desenvolvimento sistemas de informação para pessoas com deficiência visual: uma proposta metodológica para avaliação de materiais utilizados na impressão 3D por FFF			
2. Número de Participantes da Pesquisa: 105			
3. Área Temática:			
4. Área do Conhecimento: Grande Área 7. Ciências Humanas			
PESQUISADOR			
5. Nome: ANTONIO JOSE SPIRANDELLI			
6. CPF: 369.197.918-11		7. Endereço (Rua, n.º): DOS RADIOAMADORES JARDIM BRASIL Quadra 02 N°60 Apto 301 BAURU SAO PAULO 17011090	
8. Nacionalidade: BRASILEIRO		9. Telefone: 14982055454	10. Outro Telefone:
11. Email: antonio.spirandelli@unesp.br			
Termo de Compromisso: Declaro que conheço e cumprirei os requisitos da Resolução CNS 466/12 e suas complementares. Comprometo-me a utilizar os materiais e dados coletados exclusivamente para os fins previstos no protocolo e a publicar os resultados sejam eles favoráveis ou não. Aceito as responsabilidades pela condução científica do projeto acima. Tenho ciência que essa folha será anexada ao projeto devidamente assinada por todos os responsáveis e fará parte integrante da documentação do mesmo.			
Data: ____ / ____ / ____		 Documento assinado digitalmente ANTONIO JOSE SPIRANDELLI Data: 29/01/2025 16:54:52-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	
_____ Assinatura			
INSTITUIÇÃO PROPONENTE			
12. Nome: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO		13. CNPJ: 48.031.918/0029-25	14. Unidade/Orgão:
15. Telefone: (14) 3103-6000		16. Outro Telefone:	
Termo de Compromisso (do responsável pela instituição): Declaro que conheço e cumprirei os requisitos da Resolução CNS 466/12 e suas Complementares e como esta instituição tem condições para o desenvolvimento deste projeto, autorizo sua execução.			
Responsável: _____		CPF: _____	
Cargo/Função: _____			
Data: ____ / ____ / ____		_____ Assinatura	
PATROCINADOR PRINCIPAL			
Não se aplica.			