

IMPRESSÃO DE GRÁFICOS EM ALTO-RELEVO: UMA FORMA DE OTIMIZAR A PRODUÇÃO DE MATERIAIS DIDÁTICOS PARA CEGOS

PRINTING GRAPHICS IN HIGH RELIEF: A WAY TO OPTIMIZE THE PRODUCTION OF TEACHING MATERIALS FOR THE BLIND

Karen Mello Colpes¹

Régio Pierre da Silva²

Kalvin Jäckel Jokiaho³

Resumo

Os programas implantados pelo Governo Federal do Brasil para a inclusão de pessoas com deficiência em escolas regulares favoreceram o crescimento do número de alunos com deficiência nessas instituições. No entanto, a realidade da inclusão no Brasil está aquém do esperado, caracterizada por uma implementação carente de planejamento e fiscalização. Tomando como base a educação de pessoas com deficiência visual, cujo índice de incidência se destaca perante à população de pessoas com deficiência, depara-se com um corpo docente desprovido de capacitação, preparo e materiais didáticos para lidar com as particularidades deste aluno. O aluno cego possui as mesmas condições cognitivas que o aluno vidente para construir o conhecimento e aprendizado, necessitando apenas de estímulos diferentes que podem ser conferidos por recursos e materiais didáticos adequados. Portanto, este trabalho visa o desenvolvimento de um processo automatizado de impressão capaz de produzir gráficos em alto-relevo. A metodologia utilizada tem base no Projeto de Produto de Löbach e no planejamento de projetos experimentais de Montgomery. Assim, encontrou-se na utilização do TPU para impressão 3D uma alternativa para agilizar a produção desses materiais didáticos.

Palavras-chave: educação inclusiva; adaptação de materiais didáticos; gráficos em alto-relevo; impressão.

Abstract

The programs implemented by the Federal Government of Brazil for the inclusion of people with disabilities in regular schools favored the growth of the number of students with disabilities in these institutions. However, the reality of inclusion in Brazil is below expectations, characterized by an implementation lacking in planning and supervision. Based on the education of people with visual impairments, whose incidence rate stands out in relation to the population of people with disabilities, it is faced with a teaching staff devoid of training, preparation and teaching materials to deal with the particularities of this student. The blind student has the same cognitive conditions as the sighted student to build knowledge and learning, just needing different stimuli that can be conferred by adequate resources and teaching materials. Therefore, this work aims to develop an automated printing process

¹ Mestre, UFRGS – PGDesign – Programa de Pós Graduação em Design, Porto Alegre, RS, Brasil, karencolpes@gmail.com; ORCID: 0000-0002-9455-8819.

² Professor Doutor, UFRGS – PGDesign – Programa de Pós Graduação em Design, Porto Alegre, RS, Brasil, regio@ufrgs.br; ORCID: 0000-0003-3865-1450.

³ Graduando, UFRGS – DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, RS, Brasil, kalvin.jj@hotmail.com; ORCID: 0000-0002-1502-1563.

capable of producing embossed graphics. The methodology used is based on Löbach's Product Design and Montgomery's experimental design planning. Thus, the use of TPU for 3D printing was found to be an alternative to speed up the production of these teaching materials.

Keywords: inclusive education; adaptation of teaching materials; embossed graphics; print.

1. Introdução

Para se planejar qualquer ação em favor do deficiente visual, é necessária uma melhor compreensão das causas e magnitude dessa deficiência. Em 2006, a Organização Mundial de Saúde (OMS) atualizou a forma de dimensionar a população com DV, contribuindo para uma melhor compreensão de suas causas e métodos de prevenção. Assim, erros de refração não corrigidos passaram a ser considerados a maior causa de deficiência visual (CBO, 2012; CBO, 2015). Tais atualizações contribuíram para que a DV figurasse como a de maior ocorrência, 18,6% da população brasileira, sendo aproximadamente 500 mil cegos e 6 milhões com baixa visão (IBGE, 2010).

Em termos educacionais, somente nos anos 2000 é que ocorreu de fato um reposicionamento político, educacional e legislativo a respeito da inclusão no Brasil, entrando para a legislação nacional em 2008, quando foi publicado o Decreto Lei 6.571/08 (BRASIL, 2008), certificando que todas as crianças e jovens com deficiência devem estudar em escolas regulares de ensino. O decreto prevê ainda que a Secretaria de Educação Especial do Ministério da Educação, SEESP/MEC, deve disponibilizar o apoio técnico e financeiro necessários aos sistemas públicos de ensino – Destacando-se Programas de Formação de Professores na Educação Especial; implantação de salas de recursos multifuncionais; adequação de prédios escolares para a acessibilidade, bem como a formação de gestores e educadores para o desenvolvimento de sistemas educacionais inclusivos.

Como consequência, houve um aumento significativo do número de alunos com deficiência nas escolas de ensino regular. No entanto, não houve um período de transição e capacitação desses profissionais e os recursos disponíveis na sala de atendimento especial nem sempre são suficientes ou adequados.

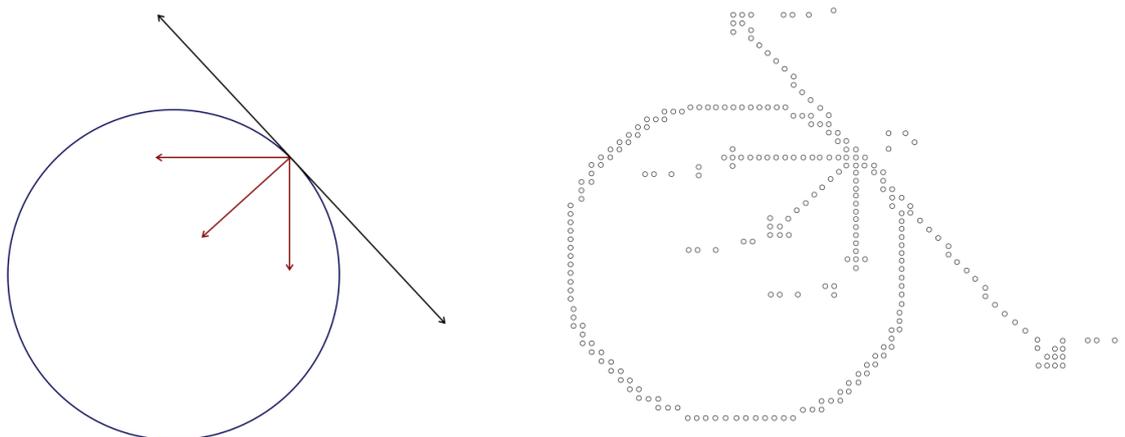
Conforme o Censo Escolar da Educação Básica (INEP, apud TODOS PELA EDUCAÇÃO 2019), em 2018, das matrículas realizadas na Educação Especial Básica, 85,9% estão em escolas de ensino regular, 14,1% em classes especiais ou escolas especializadas.

No que tange a evasão, Silva e Dore (2016) atribuem a saída de alunos com DV em grande parte à falta de materiais didáticos adaptados. Quando há o material adaptado, este geralmente é entregue com uma enorme defasagem para com o período letivo. Na tentativa de minimizar esse déficit, os materiais didáticos são adaptados pelos profissionais responsáveis pelo atendimento na sala de recursos da escola ou que atuam em Centros de Apoio Pedagógico e Atendimento às Pessoas Deficientes Visuais (CAP) e instituições de apoio ao DV (Instituto Benjamin Constant, Fundação Dorina Nowill, UCERGS, ACERGS, etc). Esse trabalho de adaptação, além da transcrição Braille e produção de audiodescrição, também conta com a criação de gravuras, diagramas e gráficos táteis, utilizando-se dos mais variados materiais artesanais, assim como, da criatividade e habilidade artística do profissional que realiza essa adaptação. Mesmo assim, na prática, a morosidade burocrática que antecede o processo de adaptação dos materiais didáticos, o trabalho minucioso envolvido e, portanto,

demorado acabam resultando em entregas parciais e/ou tardias (COLPES, 2014).

Uma das maiores dificuldades encontradas pelos estudantes com deficiência visual está na visualização de gráficos, desenhos e representações diversas (AMARAL et al, 2009). Nesse quadro, entende-se que as matérias ligadas às ciências exatas, a exemplo dos gráficos de disciplinas como Física e Matemática, exigiriam uma maior abstração para sua compreensão, e por isso mesmo se tornariam mais complexas ao aluno cego, que na maioria das vezes recebe um material de leitura ponto a ponto por um leitor de tela ou a adaptação em relevo com a utilização de impressora Braille, métodos mais simples, porém, nem sempre eficazes. A leitura ponto a ponto torna confusa a visualização e compreensão do todo e os gráficos adaptados em impressora Braille não conseguem atingir as formas desejadas por uma questão de resolução. Por exemplo, não é possível reproduzir um círculo perfeito ou uma reta inclinada numa impressora Braille, como pode ser observado na Figura 1, podendo acarretar em ruídos na interpretação da informação.

Figura 1: Diagrama de um livro de Matemática. À esquerda, círculo com reta tangente conforme se apresenta no livro. À direita, exemplo de reprodução deste mesmo gráfico em impressora Braille.



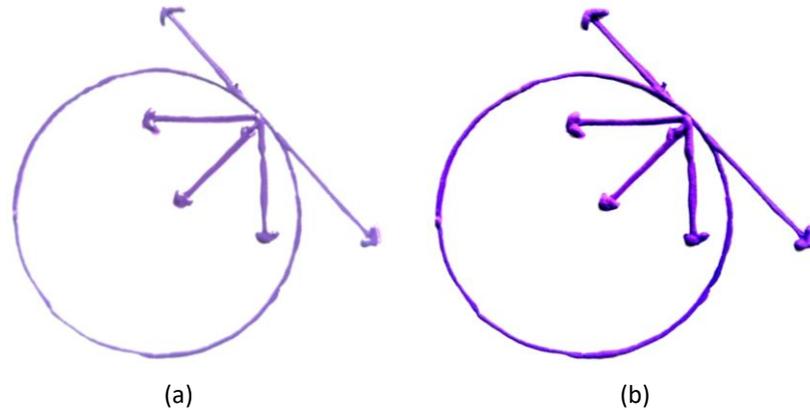
Fonte: Elaborado pelos autores.

Uma alternativa adotada pelos CAPs para solucionar este problema de resolução é a reprodução dos gráficos (manualmente) com a utilização de tintas de emulsão acrílica, exemplo da Figura 2. Observa-se que o efeito de "degraus" resultante da adaptação com pontos Braille (Figura 1) é solucionado. No entanto, por se tratar de um traçado à mão livre, a adaptação com a tinta relevo não resulta em um traço uniforme.

Outra questão é que geralmente os maquinários mais utilizados pelos centros de apoio para a criação e/ou adaptação de materiais didáticos para cegos, são importados, o que com a aplicação dos impostos brasileiros aumenta significativamente seu custo, além de possuírem assistência técnica no exterior dificultando sua manutenção.

Possibilidades de solução a este problema podem ser encontradas na utilização conjunta do Design com a Tecnologia Assistiva (TA), áreas que buscam minimizar as dificuldades que impedem as pessoas com deficiência de desempenharem suas atividades diárias. E no que se refere a educação, têm por objetivo fornecer as condições necessárias ao aprendizado (BRENDLER et al., 2014).

Figura 2: Exemplo do mesmo diagrama apresentado anteriormente, agora reproduzido em tinta puff.
(a) À esquerda, gráfico antes da expansão da tinta. (b) À direita, gráfico após expansão da tinta com sopro de ar quente



Fonte: Elaborado pelos autores.

Diante do que foi exposto até aqui, o objetivo deste trabalho é contribuir para maior celeridade na adaptação de materiais didáticos para cegos com o desenvolvimento de um cabeçote de impressão que utilize tintas de emulsão acrílica com propriedades expansivas ao calor (tinta puff) para a obtenção de gráficos relacionais⁴ em alto-relevo para as disciplinas de Matemática e Física. Vale destacar que não havendo qualquer diretriz para relevos com esta finalidade, será utilizado como referência a NBR 9050, que possui especificações para o relevo de pontos Braille - como altura do relevo entre 0,6 e 0,8 mm e espessura de 0,8 a 1,2 mm (NBR 9050, 2020).

De um modo geral, esse projeto se apresenta inicialmente como uma necessidade do usuário pelas razões já explicadas. Mas, se configura também em uma oportunidade de mercado, uma lacuna científica que compõe o cenário ideal para a atuação do Design de Produto.

2. Metodologia de Pesquisa

Para Löbach (2001), o designer industrial é um produtor de ideias, que coleta informações e as utiliza para a solução dos problemas que lhe são apresentados. Ele afirma ainda que todo processo de design é tanto criativo como de solução de problemas e divide esse processo em quatro fases principais: fase de preparação ou análise do problema, fase de geração de alternativas, fase de avaliação e fase de realização da solução, que se entrelaçam umas às outras, uma dinâmica mais cíclica do que linear, e que por isso pode ser revista e "retroalimentada".

Montgomery (2005) define o projeto de experimentos como uma metodologia apoiada prioritariamente em conceitos estatísticos, utilizada para otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. Sendo utilizada para a otimização de sistemas, ou seja, otimização de produtos, processos ou serviços. É avaliada por indicadores de desempenho e favorece para que se estruture uma sequência de ensaios de forma a validar os objetivos preestabelecidos.

⁴ Gráficos que transformam informação numérica em informação visual.

Desta forma, para se atingir os objetivos deste trabalho e encontrar uma solução ao problema levantado, dividiu-se o projeto nas fases descritas por Löbach, complementando-as com a metodologia de projeto de experimentos de Montgomery (2005):

- **1a Fase de preparação** - Análise do problema: focada em obter-se informações sobre o produto, público-alvo, ambiente, relação social e de mercado para prepará-las e utilizá-las nas fases posteriores de geração e avaliação (Löbach, 2001).
- **2a Fase da geração de alternativas:** trata-se da fase de projeto propriamente dita, produção de ideias com base nas análises realizadas. Assim, nessa etapa buscou-se por possíveis soluções em sistemas funcionais, hardware e software que pudessem compor o artefato para sua fase experimental. O método experimental empregado para encontrar a solução do problema foi o de tentativa e erro.

Para o cálculo da geometria da rosca do parafuso de extrusão e escolha da bomba rotativa foi adotada a metodologia de Macintyre (2010) aliado ao roteiro para projeto de rosca de extrusão de Freitas (2015). Então, para a construção do artefato, do cabeçote de extrusão propriamente dito, o seguinte procedimento foi adotado: projetar o cabeçote de extrusão e seu dimensionamento técnico e obter seu modelo tridimensional para então efetuar a impressão das peças em polipropileno na impressora 3D Cloner DH - disponível no laboratório Virtual Design (ViD) do PGDesign, UFRGS.

- **3a Fase da avaliação:** com o artefato montado e em funcionamento, foram realizados testes de impressão até obterem-se as características de impressão desejadas no que se refere à uniformidade do traço, altura do relevo, espessura da linha e resolução dos desenhos obtidos.
- **4a Fase de realização e finalização:** diante dos resultados é possível passar ao último passo do processo de design, rever a alternativa escolhida, retocar e aperfeiçoá-la caso necessário para então elaborar a conclusão de resultados e comunicá-los, evidenciando os pontos a serem melhorados, as dificuldades encontradas durante o processo e sua relevância não apenas para a comunidade científica, mas, principalmente para o público ao qual se destina. É importante mencionar que no transcorrer da fase experimental foram necessários alguns ajustes no planejamento devido às restrições impostas pela pandemia de COVID-19 e a falta de acesso aos laboratórios da UFRGS.

2.1. Requisitos de Projeto do Cabeçote de Extrusão

Com base no que foi levantado sobre normas e diretrizes nacionais, bem como em recomendações de profissionais que trabalham com a adaptação de materiais didáticos para vegos, foi possível definir os requisitos de projeto. Sintetizados no Quadro 1.

Quadro 1: Requisitos de projeto para o cabeçote de impressão de gráficos em alto relevo.

Requisito	Parâmetro
Aplicar relevo	Utilização de relevo simples do tipo contorno.
Utilizar material que favoreça a usabilidade	Não deve agredir ou provocar rejeição ao manuseio.

Requisito	Parâmetro
Possuir contraste tátil	Altura do relevo deve estar entre 0,8 mm e 1,2 mm, conforme NBR 9050. Na ausência de recomendações para a espessura do traço para símbolos táteis, será empregado a medida do diâmetro da base do ponto Braille de 1,2 mm (NBR 9050).
Utilizar tinta relevo de fácil acesso no mercado	Utilização de tinta de emulsão acrílica com propriedades expansivas ao calor, a tinta puff.
Contribuir para a automatização no processo de adaptação de materiais didáticos	Produzir o cabeçote de extrusão de uma impressora de gráficos em alto-relevo

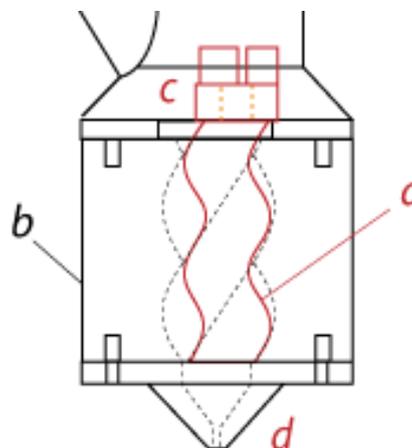
Fonte: Elaborado pelos autores

3. Projeto

Conforme Mattos e Falco (1998), não existe um critério absoluto para a seleção de um tipo de bomba que apresente um melhor desempenho em determinada aplicação. No entanto, a velocidade específica, a vazão da tinta, as características do fluido e a flexibilidade operacional desejada são fatores que influem na decisão final.

Como a bomba helicoidal de câmara progressiva (ou bomba de parafuso único) é capaz de bombear uma grande variedade de líquidos, compreendendo uma ampla faixa de pressões, descargas, viscosidade e temperaturas, possui alta empregabilidade e, portanto, confere uma boa solução para o sistema do cabeçote de impressão da tinta. Esta bomba é formada por um rotor (Figura 3 a) que é um parafuso helicoidal simples que gira em torno de seu eixo principal no interior de um estator (Figura 3 b) também com forma de parafuso, mas, com perfil de hélice dupla, passo elevado e grande profundidade de rosca. O rotor realiza um movimento excêntrico deslizante cuja ação mecânica é decorrente de um movimento hipocicloidal. Desta forma, os espaços que se formam entre o rotor e o estator deslocam-se axialmente e de forma contínua com o movimento do rotor, da boca de aspiração (Figura 3 c) para a de recalque (Figura 3 d) não havendo modificações de forma ou volume (MACINTYRE, 2010).

Figura 3: Componentes de uma bomba helicoidal de câmara progressiva



Fonte: Elaborado pelos autores

Em virtude desta geometria, são formadas cavidades vedadas entre o bocal de sucção e o de pressão. A rotação do rotor causa abertura e fechamento destas cavidades alternadamente numa progressão ininterrupta ao longo do estator, fazendo com que o fluido seja deslocado continuamente da sucção para a descarga da bomba (WEATHERFORD, 2008).

Os critérios que levaram à escolha de uma bomba rotativa foram: possuir alto rendimento ao operar com fluidos viscosos, vazão praticamente constante (o que favorece a obtenção de um traço de impressão uniforme), serem autoaspirantes, sua aplicabilidade em dimensões reduzidas, elevado rendimento com pouca vibração e a possibilidade de ser acionada diretamente por um motor elétrico (MATTOS & FALCO, 1998; MACINTYRE, 2010).

Assim, o acionamento é feito por um conjunto moto-redutor, composto por um motor elétrico acoplado a um redutor de engrenagens (quando necessário). A velocidade ou rotação adequada do motor varia conforme a viscosidade do produto a ser bombeado.

O tempo de residência corresponde ao tempo em que a tinta fica dentro da bomba. Trata-se de um fator inversamente dependente da rotação do parafuso de extrusão no processo. A pressão interna no barril é geralmente proporcional à velocidade de extrusão (rotação da rosca), portanto, é através desta velocidade que a pressão de extrusão pode ser controlada (FREITAS, 2015).

3.1. Geometria da Bomba

Para dimensionar o sistema, alguns dados já conhecidos foram considerados, como: densidade do fluido fornecida pelo fabricante, viscosidade do fluido à temperatura ambiente, largura e altura do filete de tinta, velocidade do cabeçote de impressão e velocidade angular do cabeçote de impressão. Assim como algumas hipóteses:

- Escoamento plenamente desenvolvido;
- Comportamento de fluido newtoniano, viscosidade constante;
- Escoamento incompressível, logo, a densidade é constante e o balanço de massa e o balanço de volume é nulo.

Partindo dessas premissas, primeiro foi preciso calcular a área transversal do relevo impresso (para esse fim, foi considerada uma semi-elipse) que corresponde a mesma área da seção transversal de saída da bomba helicoidal (bico do cabeçote de impressão), resultando um valor de $0,754 \text{ mm}^2$.

Neste projeto a vazão é um elemento crítico, pois caso o bombeamento não atenda a demanda necessária, a precisão no traço dos desenhos será comprometida. Sabe-se que para bombas helicoidais a vazão é diretamente proporcional à rotação da bomba. Assim, pode-se aumentar ou diminuir a vazão da bomba helicoidal aumentando ou diminuindo sua rotação (velocidade).

A fim de simplificar o dimensionamento do problema, foi definido que a vazão e a velocidade de deslocamento do cabeçote de impressão, onde é alocada a bomba helicoidal (extrusora), deveriam estar sincronizadas. Para isso, a velocidade de saída do fluido no bico é a mesma velocidade de deslocamento do cabeçote. Ao relacionar-se a área do bico extrusor com a velocidade de deslocamento do cabeçote de impressão, encontra-se a vazão requerida. Resultando numa vazão volumétrica de aproximadamente $0,555 \text{ mm}^3/\text{s}$.

As bombas helicoidais podem ter diferentes números de estágio que estão diretamente relacionados com a pressão exercida dentro da câmara. O comprimento mínimo exigido para que se forme um estágio é o passo do estator. Não há alteração na vazão de uma bomba com o número de estágios. Somente os limites de pressão são modificados com esse aumento e para reduzir o desgaste no bombeamento de materiais em meios abrasivos, deve-se empregar bombas que possuam um maior número de estágios e rotações menores (WEATHERFORD, 2008).

A pressão da bomba pode ser encontrada relacionando-se os valores dos parâmetros do eixo, do motor e da vazão da bomba com a área de saída (largura do filete). Nessa etapa foram desconsideradas quaisquer perdas de carga ao longo do escoamento, apenas sendo considerada a potência da bomba/extrusora. Como o fluido vem de um tanque infinito aberto, a velocidade inicial é zero e para a altura inicial foi considerada a altura do parafuso 31,7 mm. Na saída, foi considerado que a pressão é a pressão atmosférica, altura é zero e a velocidade é a velocidade de saída do fluido no bico.

Neste projeto, a bomba helicoidal é acionada por um motor de passo NEMA 17 (modelo 17HS4401 - HANPOSE), torque de 0,042 kgf.m, corrente de 1,7A e ângulo de passo de 1,8°, para o seu funcionamento foi necessária a utilização de um driver A4988. Tomando-se também como dado de entrada a velocidade angular do sistema de injeção de tinta elaborado no projeto de mestrado de Colpes (2014), tem-se uma rotação de 0,54 rpm para o sistema de injeção da tinta. Assim, obteve-se a potência do motor de valor 0,02327 W.

Assim, de forma simplificada os resultados obtidos para compor os dados de entrada da fase experimental são apresentados no Quadro 2.

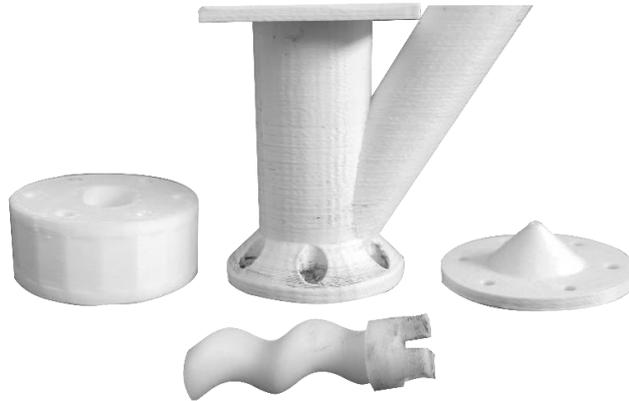
Quadro 2: Dados de entrada para a fase experimental

Viscosidade da tinta	482,9 cP ou 0,48 Pa*s
Altura do filete	0,8 mm
Largura do filete	1,2 mm
Velocidade	0,736 mm/s
Velocidade angular	0,54 rpm
Área transversal do bico extrusor	0,754 mm ²
Vazão	0,555 mm ³ /s
Potência	0,02327 W
Pressão	0,4275 kgf/cm ²

Fonte: Elaborado pelos autores

Com base no que foi apresentado até aqui definiu-se a geometria da bomba helicoidal e suas cotas gerais, o protótipo obtido por impressão 3D em PU é apresentado na Figura 4.

Figura 4: Protótipo da bomba helicoidal 1



Fonte: Acervo dos autores

Partiu-se então para a fase de experimentos, onde a velocidade de rotação do rotor será controlada até que se obtenha uma velocidade de saída que proporcione resultados de impressão satisfatórios para o projeto.

3.2. Experimento

Tendo os dados de entrada, os cálculos projetados e o protótipo da bomba impresso, a fase experimental tinha seu início previsto para março de 2020 e seria realizada no Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMEC), do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mas, a pandemia da COVID-19, ocasionada pelo coronavírus SARS-CoV-2, afetou drasticamente toda a população mundial não apenas no campo da saúde, tendo seu reflexo também em todas as demais áreas: social, política, econômica e também na educação. Somente em 2022, o ensino das Universidades Federais começou a retomar suas atividades presenciais.

Nesse contexto, qualquer cronograma previsto se perdeu. Assim, no início de 2021, buscou-se por alternativas para dar seguimento a fase experimental do projeto. A ideia central era encontrar um local que dispusesse de uma CNC ou impressora 3D, onde o protótipo da bomba helicoidal pudesse ser acoplado e testado. Desta forma, chegou-se a JOKIAHO, discente do 8º semestre do curso de Engenharia Mecânica da UFRGS, que possui uma impressora 3D (projeto próprio), baseada no sistema de movimentação de mesa móvel no eixo Y e eixo X em pórtico elevado pelo eixo Z⁵. Possuir um sistema apto para o controle tridimensional com um eixo extra de extrusão de material é uma característica de impressoras 3D que possibilitou seu uso para este experimento, podendo ainda, ser comandado independentemente ou simultaneamente ao movimento da máquina. A impressora 3D ainda possui um sistema de controle do motor semelhante ao de uma extrusora, por também trabalhar com um motor de passo.

A máquina de JOKIAHO permite a utilização de diferentes ferramentas no eixo de extrusão (Z), apenas foi necessário a criação de um flange e fiação com conectores compatíveis, possibilitando acoplar a bomba helicoidal para os testes de impressão. Um facilitador foi que diante da necessidade de pequenas correções ou melhorias no projeto da

⁵ Popularizado pela impressora RepRap Mendel e subsequentes evoluções como a impressora Prusa i3.

bomba, tais adaptações puderam ser realizadas durante a fase experimental, uma vez que sendo uma impressora 3D, tornou acessível a impressão de novas peças.

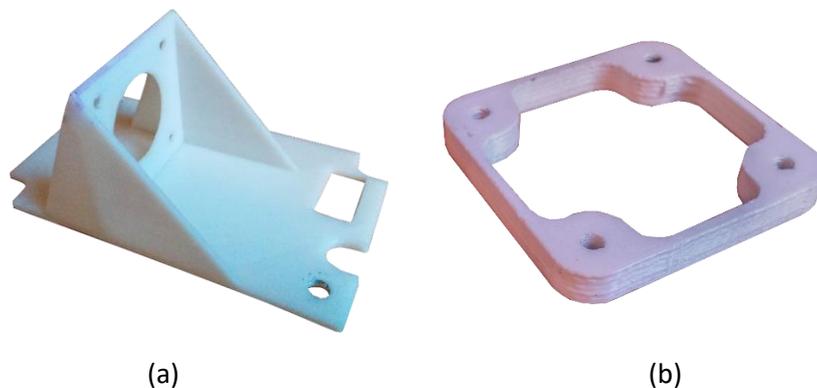
3.3. Peças e Bombas Testadas

Os componentes inicialmente impressos apresentavam falhas decorrentes do processo de impressão 3D e de dimensionamento em algumas peças do arquivos .STL, sendo necessário realizar correções de modelagem e reimpressão em polímero PLA branco. Porém, este conjunto não apresentou desempenho satisfatório, pois, não conseguiu produzir uma linha visível e constante. Observou-se que o mesmo não conseguiu bombear a tinta livremente em nenhuma velocidade do motor, independentemente do período de tempo decorrido, sendo o fluxo de material decorrente de vazamentos. Desta forma, outras tentativas com alterações no tipo de bomba e geometria tiveram que ser feitas, essa evolução será sintetizada a seguir.

3.3.1. Bomba Helicoidal 1

Para o encaixe dos componentes na impressora 3D de JOKIAHO, foi preciso criar um flange de suporte (Figura 5a), impresso em plástico ABS de cor natural (branco). Também foi feito um separador que aumentou a altura entre o motor e o suporte (Figura 5b), se fez necessário devido ao comprimento do eixo do motor.

Figura 5: (a) Flange de suporte para a bomba; (b) Separador



Fonte: Acervo dos autores

Na Figura 6, é possível observar uma imagem da bomba montada e com o motor acoplado, porém, este modelo não conseguiu produzir uma linha visível e constante, também mostrou ser de difícil limpeza e esvaziamento.

Observou-se que esse sistema não conseguiu bombear a tinta livremente em nenhuma velocidade do motor, independentemente do período de tempo decorrido, assim, o único fluxo de material foi decorrente de vazamentos. Então, partiu-se para modificações mais significativas no projeto original, desenvolvendo-se um novo conjunto de peças para a bomba helicoidal.

Figura 6: (a) Bomba helicoidal impressa e montada



Fonte: Acervo dos autores

3.3.2. Bomba Helicoidal 2

As peças da versão 2 foram impressas com maior precisão e qualidade, aumentando-se o número de camadas. Utilizou-se a combinação de peças em plástico ABS e peças em TPU, material flexível. Esse novo conjunto também contou com um encaixe que permitisse a remoção do conjunto estator-rotor do motor de passo e flange, proporcionando um melhor acesso para limpeza.

Para os estatores (Figura 7a) adotou-se a utilização de um material flexível, o TPU com dureza Shore A99, escolhido devido a sua melhor resistência a cargas de cisalhamento em relação ao plástico PLA utilizado anteriormente, fator importante visto que os novos estatores possuem tolerâncias muito menores, agora sem folga entre rotor e estator. Conferindo assim, resistência mecânica, flexibilidade, e suficiente dureza ao estator para não deformar durante seu uso. Os estatores também foram impressos com camadas de 0,08 mm de altura, a fim de reduzir ao máximo a influência das linhas das camadas de impressão nos resultados.

Para que pudessem ser acoplados em suportes rígidos (Figura 7b), feitos em PLA branco, adotou-se um formato hexagonal para a parte externa dos estatores. Como tais suportes não necessitavam de uma maior precisão e qualidade de impressão, foram produzidos na resolução padrão de 0,2 mm de altura por linha impressa. A combinação destas peças impressas em materiais diferentes, permite um encaixe preciso, rígido com e garante a flexibilidade necessária ao estator. Característica que permite uma maior aproximação das qualidades de uma bomba helicoidal comercial.

Figura 7: (a) Estator de 1 estágio, impresso em TPU; (b) Estatores e suportes



(a)

(b)

Fonte: Acervo dos autores

Os testes com o novo conjunto (Figura 8a) apresentaram extrusão de tinta em excesso. Novos ajustes foram feitos incluindo um novo cálculo para a vazão da tinta. Porém, mesmo que a nova geometria tenha tornado esta, a melhor versão da bomba até o momento (em termos de otimização dos processos de montagem e limpeza), a mesma apresentou um constante problema de pulsação nas linhas impressas, não apresentando resultados satisfatórios (Figura 8b).

Figura 8: (a) Bomba helicoidal com rotor e estator de 3 estágios; (b) Resultados utilizando a bomba helicoidal 2 e após alterações nos parâmetros de entrada



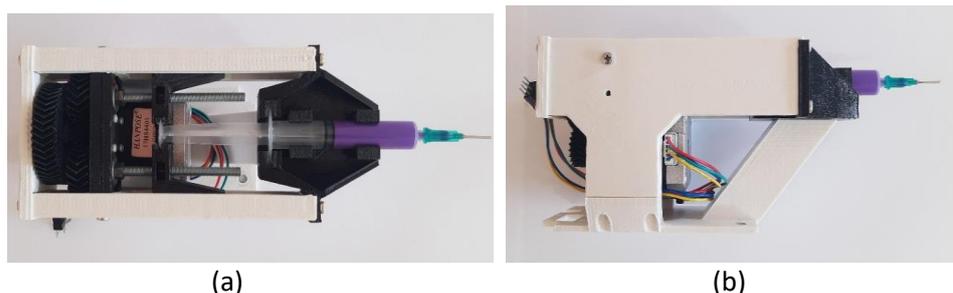
Fonte: Acervo dos autores

Tornou-se notório que para uma mesma tarefa, o motor da bomba gira apenas uma pequena fração do que giraria se operasse em uma extrusora de proporção usual. Essa diferença significativa de velocidade de rotação do motor acabou por ultrapassar o limite de precisão do conjunto motor de passo e seu driver. Assim, como o motor sequer movia um micropasso por uma distância de aproximadamente 2mm, visto que cada micropasso do motor deslocaria $1,35 \text{ mm}^3$ de material. Constatou-se que a bomba exigia uma precisão mecânica muito além do viável para protótipos como este, em escala reduzida.

3.3.3. Bomba/Extrusora 3 – Deslocamento Linear de Seringa

Vista a exigência mecânica acima do viável, partiu-se para um novo projeto de extrusora de tinta, agora baseada na movimentação linear de uma seringa (Figura 9a). O sistema foi pensado para resolver o problema de resolução do motor, sendo diretamente compatível com o volume de extrusão da extrusora E3D Titan clone utilizada na máquina e sem multiplicadores de extrusão configurados separadamente.

Figura 9: Extrusora de tinta com utilização de seringa. (a) Vista superior; (b) Vista lateral



Fonte: Acervo dos autores

O mecanismo desenvolvido utiliza engrenagens helicoidais duplas, para o máximo de suavidade na transferência de movimento, e dois conjuntos de barra roscada M5 com uma porca fixa para conversão do movimento de rotação em translação do êmbolo da seringa.

Uma das vantagens deste sistema está na sua facilidade de limpeza, visto que toda a tinta fica armazenada no interior da seringa e da agulha de saída, sua transparência também facilita a visualização da quantidade de material restante no sistema. Uma desvantagem é a recarga de tinta. Uma seringa consegue aspirar líquidos para seu interior, mesmo quando da utilização de agulhas finas de aproximadamente 0,5mm de espessura, porém a viscosidade da tinta acrílica de propriedades expansivas ao calor dificulta este processo e o carregamento incorreto da tinta pode aumentar a formação de bolhas de ar em seu interior, o que reflete em problemas de impressão durante a execução dos testes.

O sistema foi projetado para utilização de uma seringa de 13,6mm de diâmetro externo, com 60mm de movimentação máxima para o deslocamento linear do êmbolo. A relação entre o movimento linear e rotacional é de 0,16666mm/volta.

O sistema foi calculado utilizando-se o volume indicado na seringa (ml) e a distância deslocada do êmbolo. Como a seringa tem um diâmetro interno de 11,5mm, a área do êmbolo é dada por:

$$(11,5/2)^2 \times \pi = 106,8689\text{mm}^2$$

Com isso temos o volume de material extrudado para cada volta:

$$0,166666 \times 106,8689 = 17,3115\text{mm}^3$$

Que se comparado ao volume da extrusora Titan da impressora 3D, tem-se:

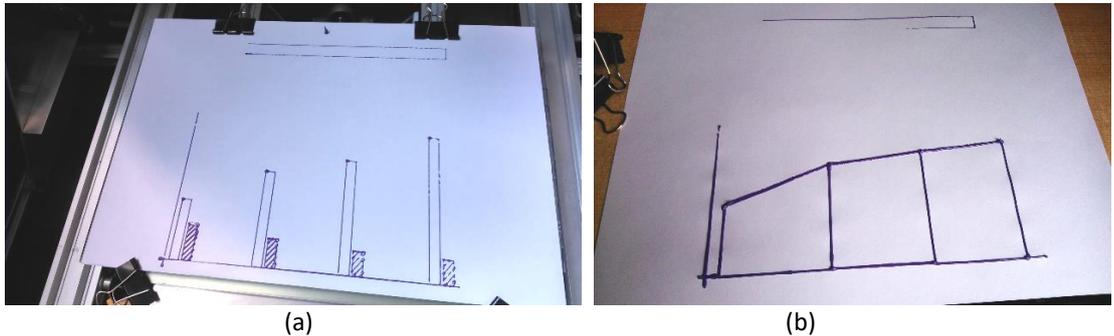
$$17,3115/19,2423 = 0,8996, \text{aproximadamente } 90\%.$$

O valor obtido se aproxima tanto do padrão de quantidade de material extrudado pela impressora 3D quando em operação com a extrusão de filamentos poliméricos, que considerou-se ser possível que a precisão esperada pelo sistema fosse a mesma.

Os resultados dos testes iniciais com essa extrusora apresentaram melhora em comparação aos resultados anteriores obtidos com a bomba helicoidal, porém, ainda se observou pulsação nas linhas obtidas (Figura 10). A espessura do traço acabou por variar durante a impressão. Isso pode ser atribuído à rugosidade do papel uma vez que tal comportamento não foi observado nos testes de impressão realizados diretamente no vidro. Foram feitas tentativas com papel de gramatura superior (90 e 120g/m², os testes anteriores foram em papel de gramatura padrão 70g/m²). Entretanto, a melhora não foi significativamente superior.

Um outro problema que não pôde ser solucionado durante os testes, foi a presença de uma bolha de tinta no início de cada traço do desenho, visível facilmente no gráfico de barras (Figura 10a). Tentativas de utilização de retração de material para solucionar o problema foram feitas, porém, sendo o material muito viscoso não retornou à seringa o suficiente para evitar a formação de tal bolha e retrações superiores causavam a formação de bolhas de ar que resultavam em falhas no traçado ou efeito splash. Com os resultados limitados por este fator, os testes com extrusão da tinta acrílica de propriedades expansivas ao calor (tinta puff) foram encerrados. Concluiu-se que o comportamento da tinta puff durante toda a fase experimental denotou não ser favorável para a aplicação de uma automatização na produção dos gráficos dentro dos parâmetros de altura e espessura de traço para desenhos em alto relevo definidos na normatização de materiais didáticos para cegos (NBR 9050, 2020).

Figura 10: Testes de impressão em papel 120g/m². (a) Gráfico em barras; (b) Gráfico de linhas



Fonte: Acervo dos autores

3.3.4. Impressão com TPU

Diante dos resultados negativos na obtenção de um cabeçote de impressão de gráficos em alto relevo que utilizasse a tinta puff, buscou-se uma solução alternativa na obtenção desses gráficos.

Durante os experimentos anteriores observou-se as características plásticas do filamento flexível de TPU, dureza em escala Shore A99 e resolveu-se testar sua aderência para impressão em papel offset A4 70g/mm², com a máquina em sua configuração de impressora 3D (temperatura de impressão a 230°C, temperatura da mesa de impressão a 50°C e bico de impressão de 0,4mm). Inicialmente, utilizou-se as configurações de impressão padrão do material, tratando-se apenas de um teste de adesão, foi impresso um quadrado de 50x50mm. Nesse primeiro teste, a impressão se soltou facilmente da folha. Então, aumentou-se a temperatura da mesa de impressão para 80°C (valor superior ao recomendado pelo fabricante do material)⁶. Este ajuste conferiu resultados de aderência satisfatórios (Figura 11). Com isso, confirmou-se a viabilidade de testar a impressão dos gráficos em relevo.

Figura 11: Tentativa de remoção do quadrado impresso

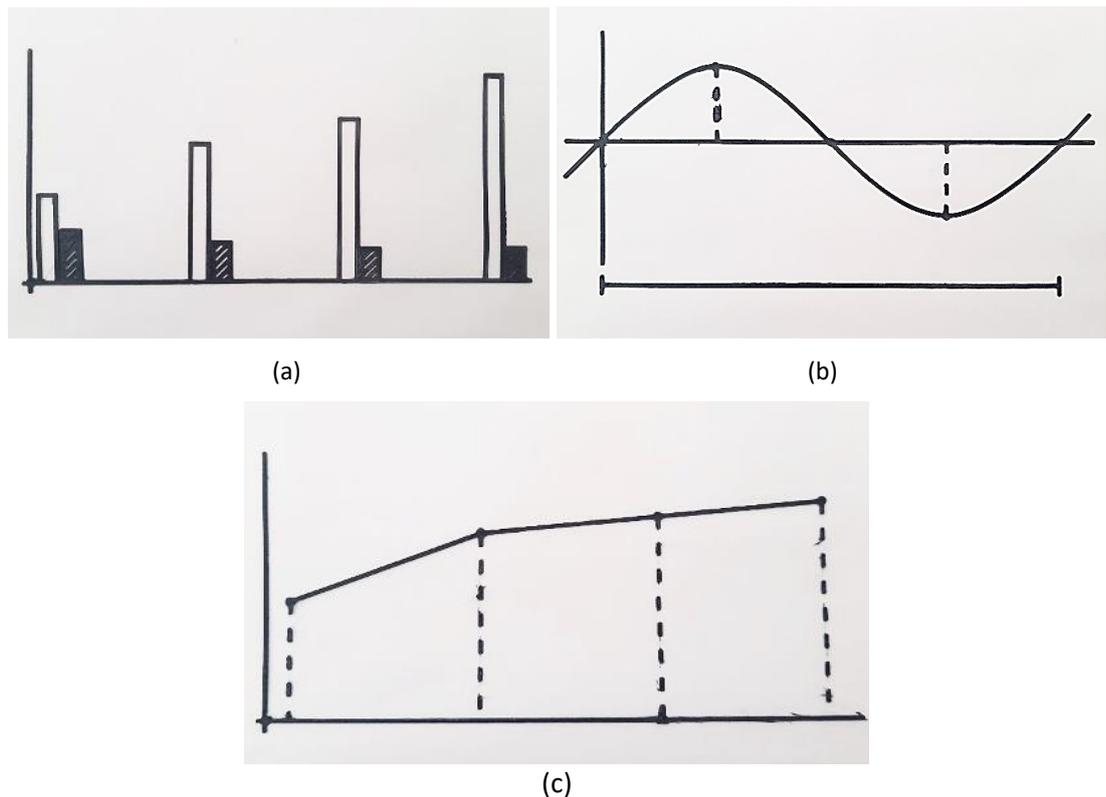


Fonte: Acervo dos autores

⁶ Tal recomendação tem o objetivo de que o material se prenda à mesa apenas o suficiente para não se mover durante o processo de impressão, devendo soltar-se facilmente ao final da impressão. Neste caso, elevou-se este valor para além do recomendado pois, o intuito era de que o material ficasse colado à base.

Os gráficos da Figura 12 apresentam melhora expressiva em comparação aos testes realizados com a tinta puff. No caso das tentativas de impressão com a tinta, como os resultados não foram satisfatórios, não foi viável dar seguimento na impressão dos demais gráficos. Então, parou-se no teste de impressão do gráfico de barras. Já nos testes com a impressão em TPU, realizou-se a impressão dos três tipos de gráficos (barras, curvas e linhas).

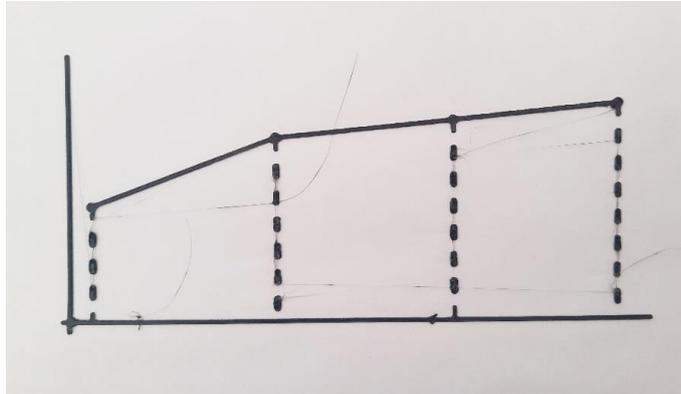
Figura 12: Resultado da impressão dos três modelos de gráficos com TPU. (a) Gráfico de barras; (b) Gráfico em curva – seno; (c) Gráfico de linhas



Fonte: Acervo dos autores

Esses gráficos foram registrados após a realização de uma limpeza, pós impressão, para a retirada de algumas rebarbas inerentes ao processo de impressão 3D (Figura 13) com o uso de um alicate de corte lateral e ainda se percebe a presença de pequenas imperfeições. Contudo, conseguiu-se atingir o objetivo de obter a impressão de gráficos de modelos diferentes e um relevo padrão com linhas de 0,8mm de altura e 1,2mm de espessura.

Figura 13: Rebarbas e “teias” de impressão para limpeza



Fonte: Acervo dos autores

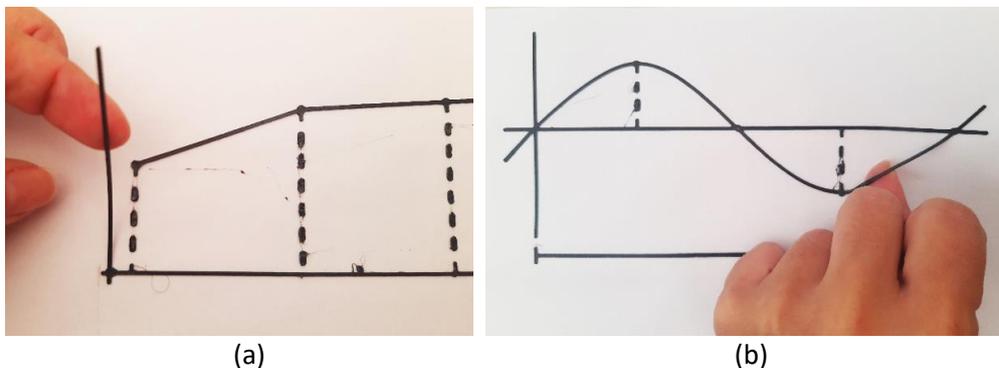
O fluxo volumétrico de material foi de $2,16\text{mm}^3/\text{s}$, velocidade de impressão de $20\text{mm}/\text{s}$, como foi utilizado o bico de impressão de $0,4\text{mm}$ de espessura, cada traço do desenho era composto por 3 linhas de impressão. Essa configuração se manteve para os três gráficos, variando apenas o tempo de impressão de cada um conforme a complexidade do desenho. Assim, o gráfico de barras foi impresso em 16min, seno em 9min e o de linhas em 12min.

Embora os resultados pareçam excelentes, algumas observações precisam ser destacadas:

1. Para que o relevo em TPU se mantenha fixo a folha, é necessário aguardar por cerca de 10min o resfriamento da mesa, ou seja, é preciso aguardar que ela passe de 80°C até 50°C . Do contrário, o material poderá se soltar da folha (Figura 14).
2. O aquecimento da mesa provoca uma dilatação no papel, que mesmo tendo suas extremidades fixadas por grampos ou fita adesiva, acaba criando pequenas ondulações. Estas ondulações podem resultar em falhas na impressão (linhas tortas ou falhadas).
3. A realização das impressões requer familiaridade com impressões 3D, pois, como utiliza o software da impressora, é necessário que cada um dos gráficos seja modelado em código G para processamento e impressão (Esta observação é válida para todos os ensaios realizados).

Desta forma, considera-se que a proposta de adaptação do filamento de TPU para a aplicação em impressões de gráficos em alto-relevo embora seja algo muito distante do que esta pesquisa se propôs a desenvolver, apresenta uma alternativa promissora para a adaptação de materiais didáticos para cegos bem como, para futuros estudos que venham a se desenvolver nessa área. De forma a garantir maior celeridade e padronização em sua confecção.

Figura 14: Resultado da impressão sem aguardar o resfriamento da mesa para remoção da folha. (a) Eixo “y” do plano cartesiano descolando da folha no gráfico de linhas; (b) Curvatura do seno descolando da folha



Fonte: Acervo dos autores

4. Considerações Finais

Dentre as barreiras encontradas na inclusão de alunos cegos em escolas regulares de ensino, deparou-se com a lacuna do ensino-aprendizagem de gráficos matemáticos que tem no relevo a sua melhor forma de representação para este público. Material que na prática, são em sua maioria adaptados manualmente com tinta acrílica de relevo por centros de apoio, pedagogos e profissionais de Educação Especial, à exemplo do que ocorre com a transcrição de livros para o Braille. As desvantagens vão de demora na entrega do material (demanda maior tempo para adaptação), ausência de padrão entre as ilustrações à falta de uniformidade no traço.

Na intenção de atender esta lacuna tanto do ponto de vista científico, quanto de mercado, este projeto buscou desenvolver um cabeçote de impressão, que pudesse ser acoplado a impressoras 3D ou sistemas CNC, como meio de automatizar o processo de impressão de gráficos em alto-relevo a fim de agilizar a produção de materiais didáticos para pessoas cegas e conferir uniformidade aos desenhos.

Foram desenvolvidos três protótipos de bombas extrusoras para desempenharem a função de cabeçote de impressão com a tinta de emulsão acrílica de propriedades expansivas ao calor (tinta puff), no entanto, nenhum deles obteve resultado satisfatório. Como os resultados na fase experimental foram bem diferentes do previsto em toda a pesquisa, constatou-se que as bombas exigiam uma precisão mecânica muito além do viável para protótipos em escala tão reduzida.

Um outro problema que não pôde ser solucionado durante a fase experimental, foi a presença de uma bolha de tinta no início de cada traço do desenho. Nem mesmo a utilização de retração de material no bico da bomba foi suficiente para solucionar essa questão. Assim, concluiu-se que o comportamento da tinta puff durante toda a fase de testes denotou que seu uso não é favorável para a automatização na produção de gráficos em alto-relevo, dentro dos parâmetros de altura e espessura de traço para desenhos definidos na normatização de materiais didáticos para cegos (NBR 9050, 2015).

Diante disso, os passos posteriores de validação (Fases de Avaliação e Realização previstas na Metodologia) do projeto com medições e estatística não se concretizaram. Pois, não se obteve um protótipo que gerasse resultados para tal.

Embora a hipótese de projeto inicial não tenha se confirmado, conseguiu-se obter a impressão dos três gráficos relacionais dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR 9050 (2015), com 0,8 mm de altura do relevo e espessura (largura) do traço de 1,2 mm. O que se deu através da proposição de uma solução alternativa percebida durante a fase experimental, a utilização do filamento de TPU flexível de forma adaptada, ou seja, aquecendo-se mais o material a fim de deixá-lo mais plástico e viscoso a tal ponto que grudasse na folha de papel offset.

Essa proposição apresentou uma alternativa promissora para a adaptação de materiais didáticos em alto-relevo para cegos bem como, para futuros estudos que venham a se desenvolver nessa área. De forma a garantir maior celeridade e padronização em sua confecção.

Referências

ABNT. NBR 9050. **Norma Brasileira de Acessibilidade de Pessoas Portadoras de Deficiência às Edificações, Espaço Mobiliário e Equipamentos Urbanos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas, 2020.

AMARAL, Grazielle; FERREIRA, Amauri; DICKMAN, Adriana. **Educação de estudantes cegos na escola inclusiva**: o ensino da Física, XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física - SNEF, Vitória - ES, 2009.

ÁVILA, Marcos; ALVES, Milton Ruiz; NISHI, Mauro. **As condições de saúde ocular no Brasil - 2015**. São Paulo: Conselho Brasileiro de Oftalmologia (CBO), 2015. 149p. 1ª edição.

BRASIL. **Decreto n. 6.571**, de 17 de setembro. de 2008. Dispõe sobre o atendimento educacional especializado, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 de setembro de 2008.

BRENDLER, Clariana *et al.*, **Recursos didáticos táteis para auxiliar a aprendizagem de deficientes visuais**. Revista Educação Gráfica, v. 18, n. 3, p. 141-157, 2014.

COLPES, Karen. **Impressora de gráficos em alto-relevo para cegos: um facilitador no ensino da física e da matemática**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre - RS, 2014. 98p.

FREITAS, Matheus. **Análise paramétrica e validação experimental de um cabeçote de extrusão baseado em rosca, para impressão 3-D**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia, Engenharia Mecânica, USP, São Carlos, 2015. 140p.

IBGE. **Censo Demográfico 2010: População Residente por Tipo de Deficiência**, Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012.

INEP, **Censo escolar 2016**: Notas estatísticas. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Brasília: Ministério da Educação, 2017.

LÖBACH, Bernd. **Design Industrial**: Bases para a configuração dos produtos industriais, Tradução: Freddy Van Camp - São Paulo: Blücher, 2001. 4ª reimpressão, 2012. 206p.

MACINTYRE, Archibald. **Instalações Hidráulicas.**, Livros Técnicos e Científicos S. A. (LTC), 2010. 596p. 4ª edição.

MATTOS, Edson; FALCO, Reinaldo. **Bombas Industriais**, Rio de Janeiro: Interciência, 1998. XXII, 474p. 2ª edição.

MONTGOMERY, Douglas. **Design and Analysis of Experiments**, USA: John Wiley & Sons Inc., 2005. 6ª edição.

SILVA, Izaura; DORE, Rosemary. **A evasão de estudantes com deficiência na rede federal de educação profissional em Minas Gerais**. Revista Educação Especial, v. 29, n. 54, jan-abr 2016, p. 203-214, UFSM, Santa Maria - RS, Brasil, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/1984686X19152>

TALEB, Alexandre; FARIA, Marco; ÁVILA, Marcos. **As condições de Saúde Ocular no Brasil - 2012**. São Paulo: Conselho Brasileiro de Oftalmologia (CBO); 2012. 162p.

TODOS PELA EDUCAÇÃO. **Anuário Brasileiro da Educação Básica 2019**. São Paulo: Moderna, 2019. 180p.

WEATHERFORD, **Manual de instalação e manutenção**: Bomba helicoidal, 2008. Série WHT.