

Metodologia para Modelagem de Kit Cranioplastia em Software Gratuito

Marina Soler Donaire (CTI) ¹, Thiago Nunes Palhares (CTI) ², Marcelo F. Oliveira (CTI) ³, Marcília Valéria Guimarães (CTI) ⁴

{msdonaire, tpalhares, mfolivei, mvguimaraes }@cti.gov.br

Divisão de Tecnologias para Produção e Saúde - DIPTS

¹ Pontifícia Universidade Católica de Campinas

² CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP

Abstract. *This article presents a methodology for cranioplasty using molds designed from a prosthesis virtually modeled with free software. Traditionally, cranioplasty requires the use of licensed software. The proposed approach aims to democratize access to this technique by utilizing free software to create molds that generate customized prostheses. The study details the process from the acquisition of tomographic images to the printing of the mold in Polyamide 12. The proposed technique was tested in a clinical case of cranioplasty and demonstrated adequate precision in the adaptation of the fabricated prosthesis to the cranial defect. The results indicate that the technique is effective and safe, offering a viable alternative to traditional methods without compromising the quality of the results.*

Resumo. *Este artigo apresenta uma metodologia para cranioplastia utilizando moldes projetados a partir de uma prótese modelada virtualmente com software gratuito. A cranioplastia, tradicionalmente, requer o uso de softwares com licença. A proposta visa democratizar o acesso a essa técnica, utilizando software livre para criar moldes que geram próteses personalizadas. O estudo detalha o processo desde a aquisição de imagens tomográficas até a impressão do molde em Poliamida 12. A técnica proposta foi testada em um caso clínico de cranioplastia e demonstrou adequada precisão na adaptação da prótese confeccionada ao defeito craniano. Os resultados indicam que a técnica é eficaz e segura, oferecendo uma alternativa viável aos métodos tradicionais sem comprometer a qualidade dos resultados.*

Palavras-chave: *cranioplastia, molde, prótese, software gratuito, impressão 3D, PMMA, biocompatível, falha óssea, modelagem.*

1. Introdução

A craniectomia descompressiva é uma cirurgia emergencial para aliviar a pressão intracraniana causada por inchaço cerebral após traumas. Ao remover parte do crânio, o cérebro pode se expandir sem ser comprimido, prevenindo danos adicionais, salvando vidas e melhorando os prognósticos em casos de lesões cerebrais graves (Oliveira, (2015)). Após uma craniectomia descompressiva, muitas vezes a cranioplastia se faz necessária para restaurar o crânio e proteger o cérebro. Esse procedimento envolve a substituição da parte removida por um implante, feito de materiais biocompatíveis como polimetilmetacrilato ou titânio, e melhora a estética, a proteção cerebral e a qualidade de vida. O uso de técnicas avançadas, como a modelagem de próteses com software gratuito, torna a cranioplastia mais acessível e precisa, especialmente em contextos de recursos limitados e iniciativas públicas (Maricevich, (2023)).

O método da cranioplastia com planejamento cirúrgico utilizando moldes impressos e próteses pré-moldadas envolve a criação de um modelo tridimensional detalhado do defeito craniano do paciente, desenvolvido a partir de imagens tomográficas e processado com software de segmentação e modelagem 3D. Esse modelo é então impresso em 3D, permitindo aos cirurgiões visualizar e planificar a cirurgia com precisão, dessa forma a prótese correspondente, geralmente feita de polimetilmetacrilato ou outro material biocompatível, é moldada com antecedência para se ajustar perfeitamente ao defeito craniano específico do paciente. Esse planejamento pré-operatório detalhado não apenas reduz o tempo de cirurgia e os riscos associados, mas também melhora significativamente os resultados estéticos e funcionais, facilitando uma recuperação mais rápida e eficiente para o paciente (Barbosa, (2020)) .

O polimetilmetacrilato (PMMA) é amplamente utilizado na cranioplastia devido à sua biocompatibilidade, resistência e capacidade de ser moldado com precisão. Contudo, durante o processo de polimerização do PMMA, a reação exotérmica pode elevar a temperatura do material de 70°C a 120°C, o que apresenta riscos significativos se for moldado diretamente na cabeça do paciente. Esse aumento de temperatura pode causar danos aos tecidos circundantes e ao próprio cérebro. Por isso, uma vantagem crucial de moldar o PMMA em um molde impresso fora do corpo do paciente é a eliminação desses riscos térmicos (Duric, (2019)).

O objetivo deste artigo é apresentar o processo de desenvolvimento de um kit de cranioplastia criado inteiramente com o uso de *software* gratuito. A intenção é demonstrar como ferramentas computacionais acessíveis podem ser utilizadas para a concepção e modelagem de próteses cranianas personalizadas, oferecendo uma alternativa econômica e eficaz para o planejamento e execução de cranioplastias.

2. Método

O processo de criação do conjunto se deu por uma série de etapas que envolveram criar uma prótese personalizada a partir da lesão craniana e dessa maneira utilizar essa prótese gerada para criar um molde. A lesão óssea mostrada na Figura 1 reflete a anatomia real do paciente antes da reconstrução craniana (cranioplastia), evidenciando a área afetada pela craniectomia.



Figura 1- Superfície 3D da falha óssea craniana gerada a partir da tomografia, demonstrando a anatomia real do paciente antes da reconstrução .

As etapas do planejamento cirúrgico virtual para obter a prótese e confeccionar o molde foram realizadas no software livre MeshMixer. Após o tratamento das imagens e a segmentação do crânio fraturado no *software* InVesalius, o primeiro passo foi formar a prótese personalizada, ajustando-a anatomicamente com base na forma natural do crânio remanescente. No MeshMixer, foi feita a divisão do crânio ao meio utilizando a ferramenta '*Plane Cut*' para garantir simetria e foi espelhado o lado intacto sobre a lesão. Esse espelhamento anatômico proporcionou um resultado mais natural e um melhor encaixe. Após alinhar o espelhamento com a fratura, foram removidas as partes desnecessárias da prótese e foi aplicado um '*Offset*' no crânio original, realizando uma operação Booleana com o crânio lesionado para criar a prótese base. Por fim, foi utilizada a ferramenta '*Join*' para unir o crânio '*Offset*' à prótese, resultando no ajuste final exibido nas Figuras 2(A) e (B). Na Figura 2(C), é possível observar o resultado virtual em comparação com o lado saudável.

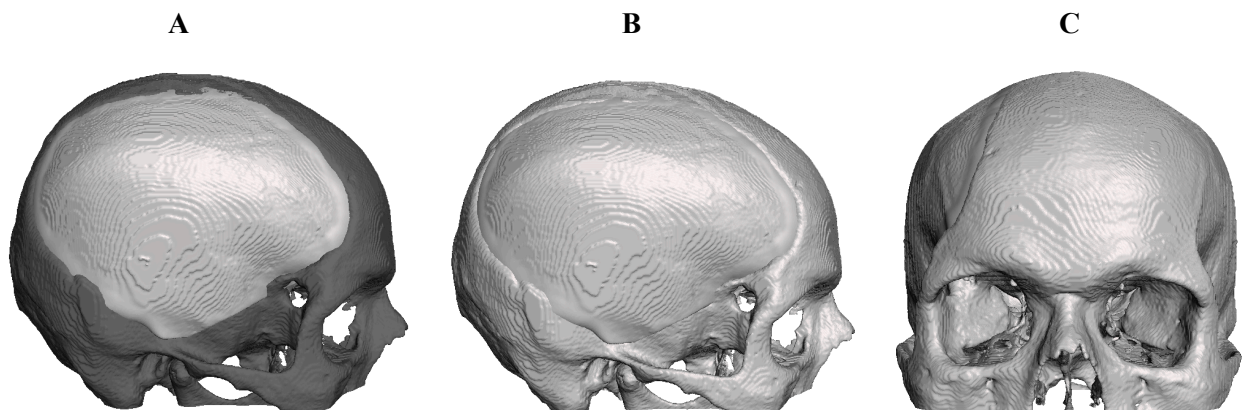


Figura 2- (A) Vista lateral da lesão corrigida pelo espelhamento do lado saudável do crânio e ajustada a falha óssea sem o uso da ferramenta *Join*. Fonte: Autoral. (B) Crânio após a junção da prótese ao crânio após o uso da ferramenta *Join* e tratamento de suavização das bordas da lesão para um melhor encaixe. (C) Crânio completo com a prótese virtual alocada para visualização.

A criação do molde para confecção da prótese de cimento ósseo (PMMA) consistiu em realizar um “*OffSet*” para desprender a prótese da superfície do crânio. Em seguida foi utilizada a ferramenta “*Boolean Difference*” entre a prótese e o crânio, nessa ordem, para criar a base interna do molde. Para gerar as superfícies superiores e inferiores do molde, foram criadas *shells* fazendo um *extrude* das superfícies, dessa forma criando a lacuna que formará a prótese de PMMA no formato exato da prótese modelada. As Figuras 3A, 3B e 3C mostram as etapas para gerar a base do molde.

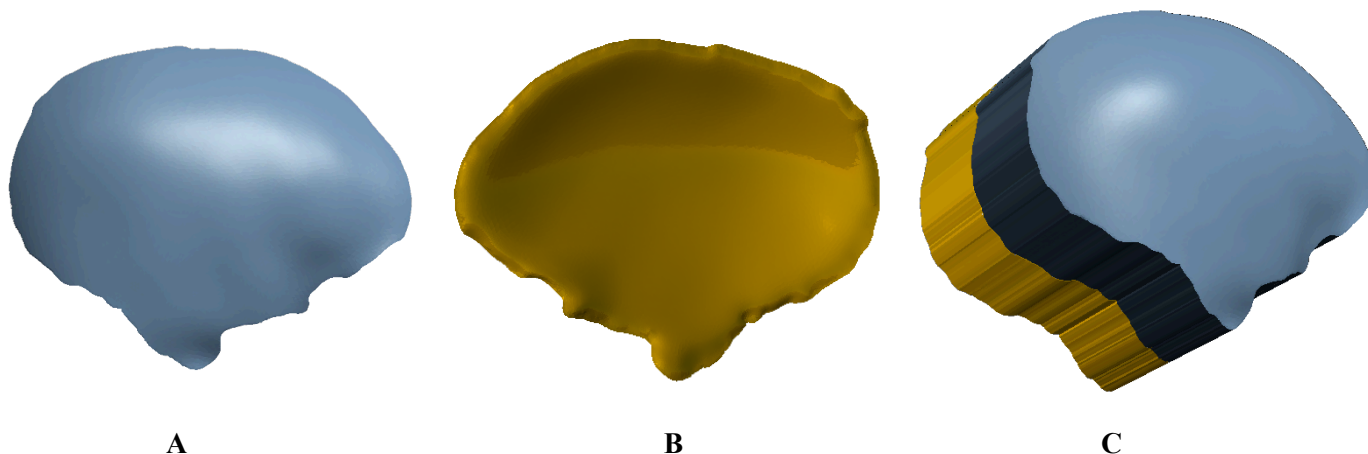


Figura 3 -(A) Vista frontal da prótese gerada virtualmente que dará origem a parte A do molde. (B) Vista posterior da prótese gerada que dará origem à parte B do molde . (C) Base do molde, criada a partir das *shells* azul (parte de cima do molde) e laranja (parte de baixo do molde). Todas as imagens são de fonte autoral.

Em seguida ao processo de *extrude* para obter a base do molde, foram adicionadas formas sólidas, disponíveis no Meshmixer, para auxiliar no manejo do molde pelo cirurgião. A forma escolhida foi retangular (Fig. 4A), por motivos estéticos e funcionais. Além disso, pinos foram incorporados para facilitar o encaixe das faces do molde durante a moldagem da prótese em PMMA. Na modelagem, também foram incluídas especificações para que o molde fosse impresso usando a tecnologia de Sinterização Seletiva a Laser (SLS), como o uso das estruturas em *honeycomb* (Figs. 4B e 4C) para facilitar a liberação do pó remanescente da impressão e ajustes para aumentar a resistência do molde e reduzir o risco de empenamento. Para otimizar o uso de material, foram realizados cortes nas laterais do molde onde havia excesso, como mostrado nas Figuras 4B e 4C. As Figuras 4D e 4E mostram a parte interna do molde superior com pinos de encaixe e a parte interna do molde inferior com os furos correspondentes.

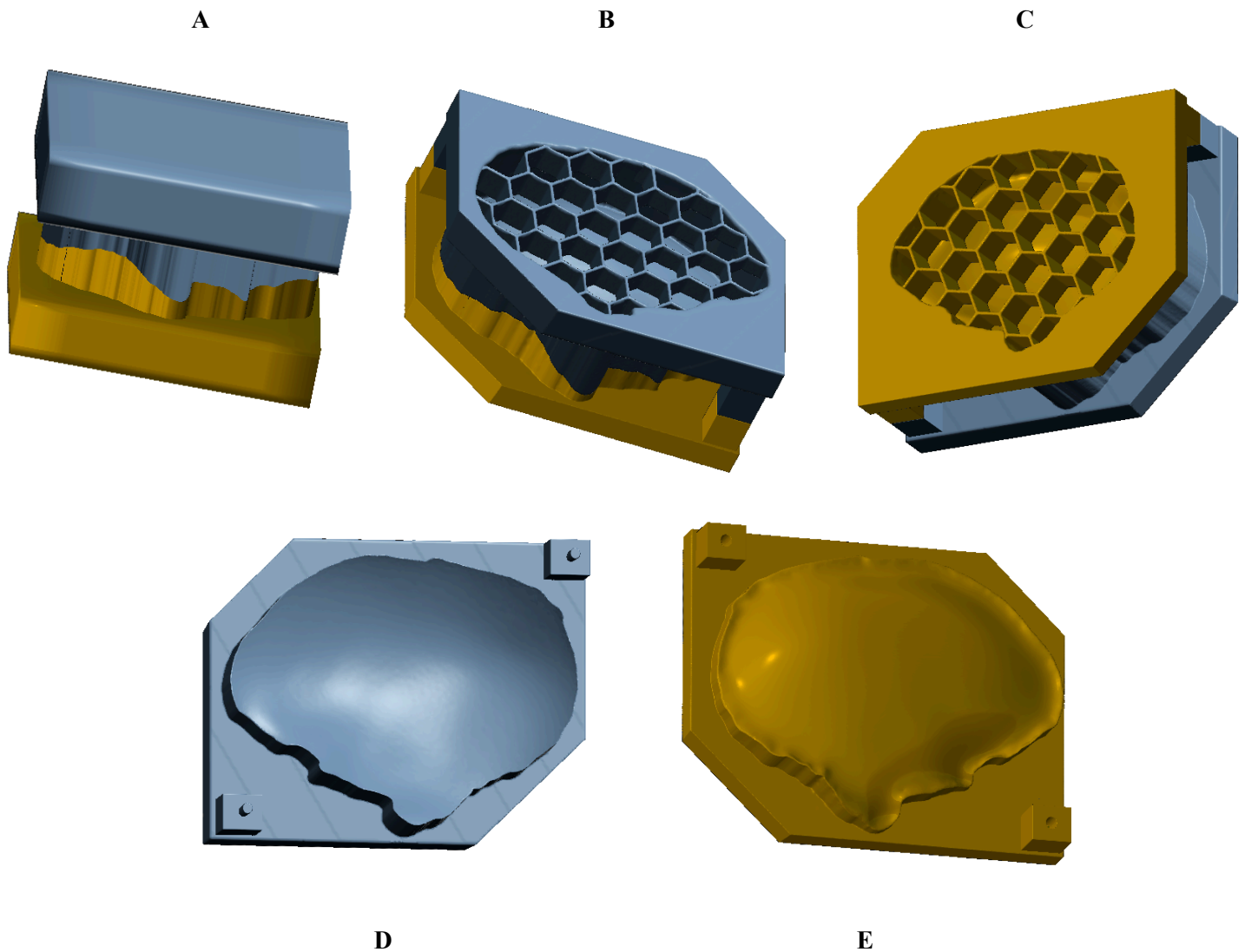


Figura 4- (A) Molde base sem otimização. (B) Molde otimizado que apresenta a parte superior em Azul que corresponde a shell azul da prótese, com *honeycomb*. (C) Molde otimizado porém com a face inferior em evidência em Laranja que corresponde a shell laranja da prótese, com padrão *honeycomb*. (D) Parte interior do molde superior com pinos de encaixe. (E) Parte interior do molde inferior com furos de encaixe. Todas as imagens são de fonte autoral.

O padrão *honeycomb* utilizado (Figuras 4B e C) está disponível no site Thingiverse, também gratuito e tem como função permitir a extração do pó excedente e fortalecer a estrutura onde foi retirada a parte sólida para economia de material.

3. Resultados e Discussões

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma metodologia para um kit de cranioplastia feito inteiramente com *software* livre, visando democratizar o acesso a medicina personalizada. Como resultado da aplicação do método foram obtidos os arquivos tridimensionais em formato STL, do crânio com a falha óssea (Fig.1), a prótese gerada a partir dessa falha óssea ilustrada nas Figuras 2 e 3 e os arquivos das partes A e B do molde (Fig.4). A partir desses arquivos foi feita a impressão das peças em poliamida 12 usando a tecnologia SLS, processo realizado no CTI Renato Archer. As Figuras 5A, B, C e D mostram as peças confeccionadas através da impressão.

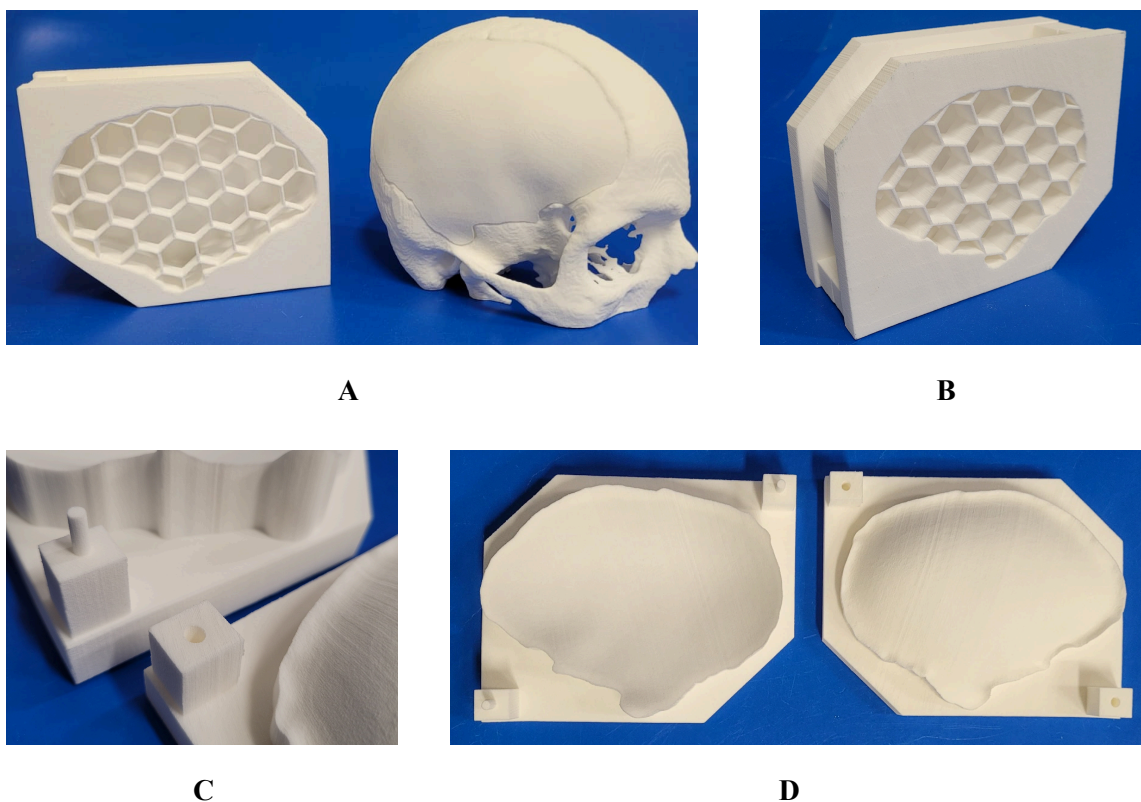


Figura 5 - (A) Imagem do crânio com a prótese e com a face A do molde. (B) Molde com face B em evidência. (C) Pinos utilizados para estabilização. (D) Parte interna do molde, onde será modelada a prótese. Todas as imagens são de fonte autoral.

Após a impressão do biomodelos em Poliamida 12 ser realizada, foi simulado o processo de moldagem da prótese com cimento ósseo, utilizando o molde impresso e o PMMA. Por causa da porosidade do material utilizado para a impressão, foi necessário utilizar um desmoldante para que após a reação química a mistura não se aderisse ao molde permanentemente. Para isso, foi utilizado óleo de girassol farmacêutico, aplicando de 3 a 4 camadas no molde impresso. Esse é o mesmo processo empregado por médicos e dentistas ao utilizarem kits semelhantes,

desenvolvidos para o uso com cimento ósseo. Depois de aplicar a massa resultante da mistura dos compostos do kit de cimento ósseo (PMMA) no molde e pressionar para extravasar o material excedente, o processo de reação foi concluído em vinte minutos. Nesse contexto, a prótese se desprende facilmente das duas faces do molde. O resultado do processo de geração da prótese usando o PMMA e o molde em poliamida 12 é mostrado nas Figuras 6A, B, C e D. Na Figura 6D, ainda é possível observar como a prótese encaixa e cobre a falha óssea com precisão, sem a necessidade de ajustes. O formato do molde, gerado a partir da falha, resultou em um encaixe adequado na lesão, visto que não foram feitos ajustes adicionais na prótese.

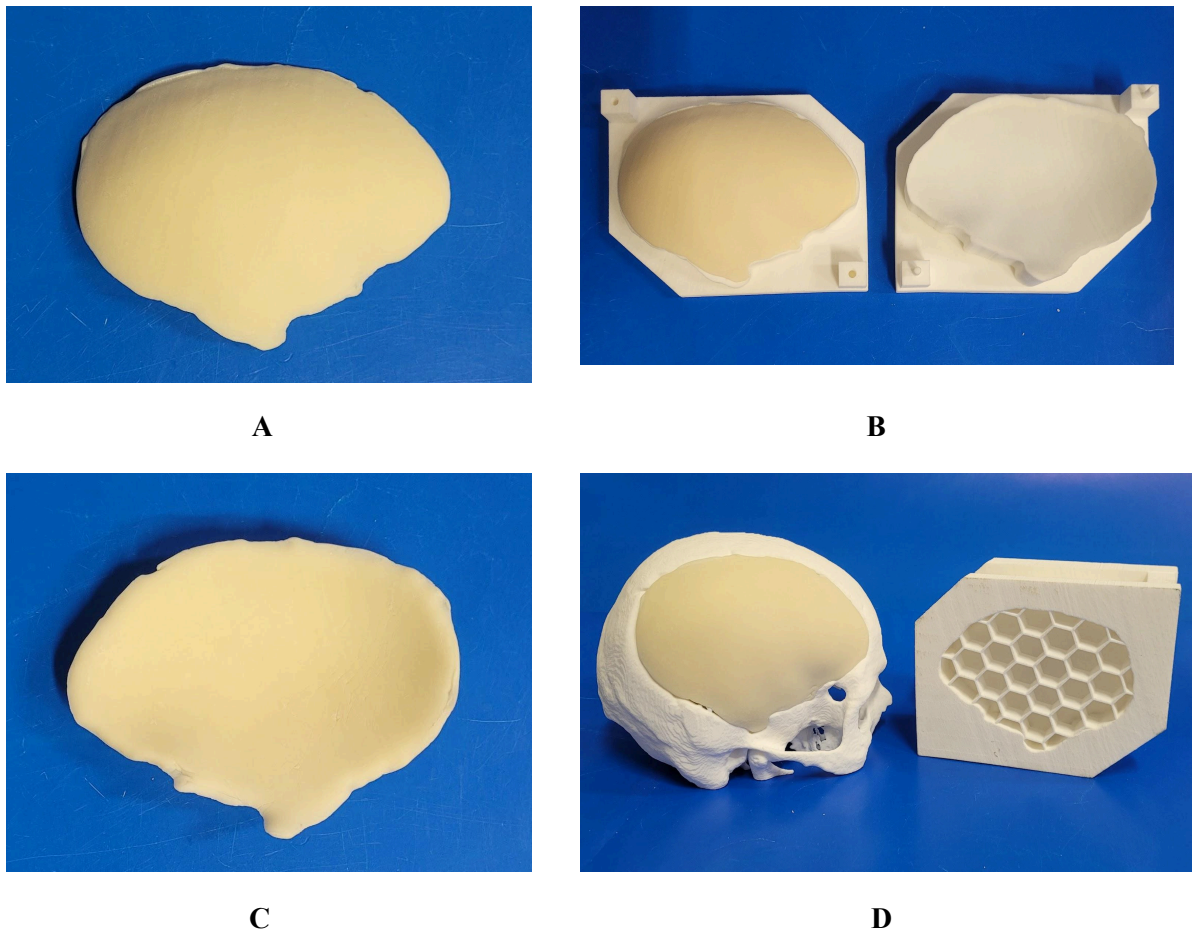


Figura 6 - (A) Prótese de cimento ósseo cirúrgico feita com o molde da Figura 5D. (B) Molde com a prótese aderida para visualização do encaixe. (C) Parte traseira da prótese de cimento ósseo cirúrgico. (D) Prótese colocada na falha óssea ao lado do molde utilizado.

Ao comparar os resultados da prótese virtual impressa (Fig. 7B) com a gerada a partir do molde em cimento ósseo cirúrgico (Fig. 7C), pode-se concluir que o resultado é satisfatório. A prótese moldada desempenha a mesma função da virtual, mas em material biocompatível, cumprindo, assim, o objetivo da pesquisa.

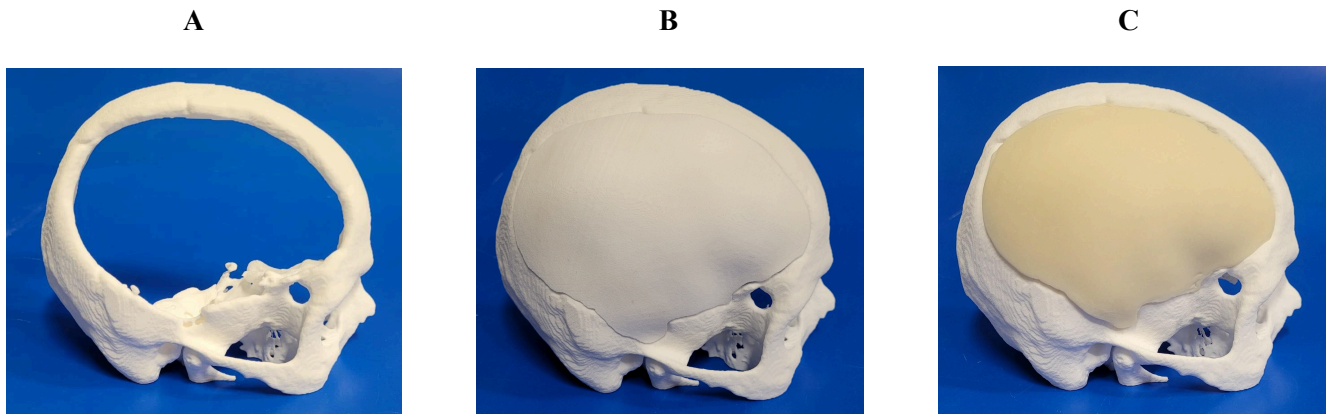
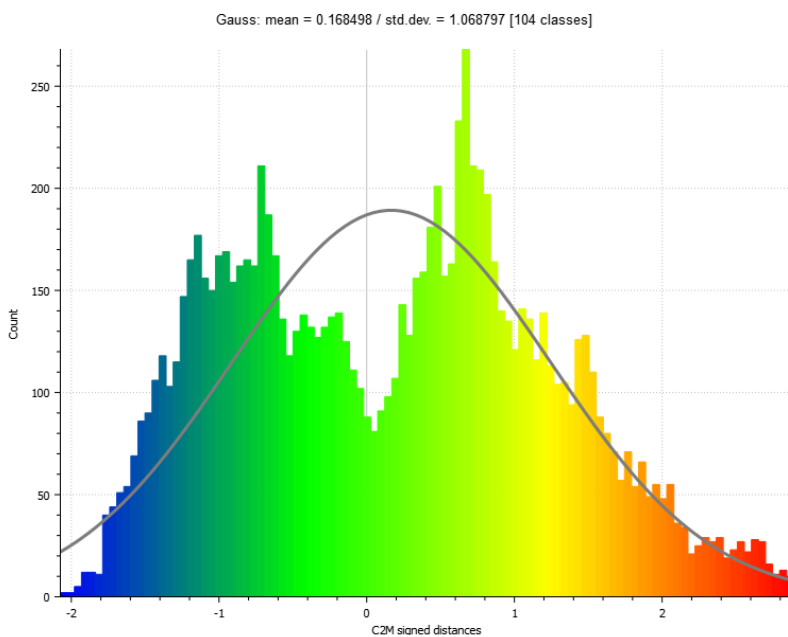
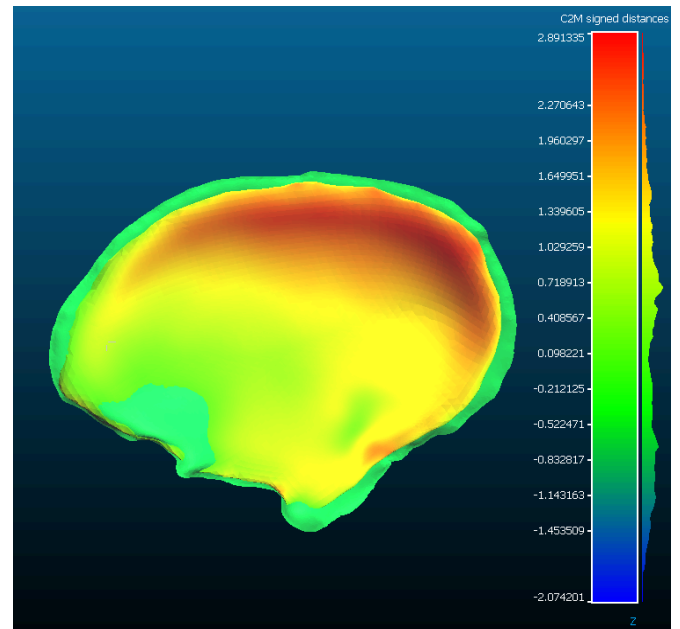


Figura 7 - (A) Crânio com falha óssea sem nenhum tipo de intervenção. (B) Crânio com a prótese gerada virtualmente de acordo com a falha óssea da Figura A . (C) Crânio com prótese em PMMA moldada com o kit cranioplastia desenvolvido.

Para a comprovação da sua eficácia, foi utilizado um Scanner 3D para digitalizar a prótese moldada em um arquivo stl, dessa forma sendo possível realizar uma comparação da prótese virtual com a moldada, como mostrado na Figura 8 A e B.



A



B

Figura 8 - (A) Histograma Gaussiano, o ajuste Gaussiano feito revela que a média das distâncias assinadas é de aproximadamente 0,168498 e o desvio padrão é de 1,068797. (B) Imagem da análise comparativa das próteses moldada e virtual com a escala de diferença gerada com padrão de cores.

LEGENDA : Vermelho/Amarelo: Indica regiões onde a prótese física está acima da prótese virtual, ou seja, há uma protuberância na prótese física em relação ao modelo virtual. As distâncias assinadas nessas áreas são positivas. **Verde:** Representa as áreas onde as superfícies da prótese física e virtual estão bastante próximas, indicando uma boa correspondência entre os dois modelos. **Azul:** Indica áreas onde a prótese física está abaixo da superfície da prótese virtual, com distâncias negativas.

O histograma das distâncias assinadas (C2M signed distances) analisa a correspondência entre a superfície da prótese física, feita a partir de um molde, e o modelo virtual baseado na lesão original. No gráfico, o eixo horizontal mostra as distâncias assinadas, com valores positivos indicando projeções da prótese física para o modelo virtual, e valores negativos indicando depressões. O eixo vertical representa a quantidade de pontos para cada intervalo de distância. Grande parte das distâncias está centrada em torno de zero, sugerindo alta similaridade entre as superfícies. Outrossim, há algumas variações positivas e negativas, indicando pequenas discrepâncias entre o modelo físico e o virtual, possivelmente devido à perda de qualidade no processo de digitalização 3D da prótese moldada ou excesso de material no momento da moldagem, tornando a prótese moldada levemente mais espessa que a virtual.

4. Conclusão

A metodologia desenvolvida para a criação do Kit de Cranioplastia utilizando software gratuito demonstrou ser uma abordagem eficaz e de fácil aprendizado e acesso, uma vez que, é feita em *software* livre que pode ser adquirido e manuseado de maneira simples. A integração de um processo de modelagem virtual permitiu que a personalização da prótese craniana fosse feita de acordo com as necessidades individuais do paciente em questão, enquanto o uso de impressão 3D por SLS proporcionou a fabricação do molde com alta precisão. Esse método oferece vantagens ao reduzir os custos associados à modelagem 3D, já que elimina a necessidade de adquirir softwares comerciais para a realização dessa metodologia, além de ter mostrado resultados precisos e adaptáveis à complexidade anatômica específica do paciente. Assim, a aplicação desta metodologia promove acesso e facilidade significativa no campo do planejamento cirúrgico personalizado, democratizando o acesso a medicina personalizada.

Com as análises realizadas com o *software CloudCompare*, foi possível comprovar as similaridades da prótese desenvolvida com a prótese virtual, mesmo com as pequenas diferenças entre ambas que se dá pela etapa de digitalização da mesma onde foram perdidos muitos detalhes, o resultado se apresentou muito satisfatório e cumpriu o objetivo de forma que cobre a lesão de maneira satisfatória e as diferenças apresentadas não vem a ser um problema. Para trabalhos futuros seria recomendável, melhorar a qualidade dos pinos de encaixe laterais e a disposição da estrutura de *honeycomb*, pois ambos apresentaram fragilidade em comparação ao

restante da estrutura do molde, juntamente com aprimorar as técnicas manuais da moldagem e manipulação do material PMMA.

5. Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Marcília Valéria Guimarães pela imensa ajuda com minha pesquisa, pela paciência sempre, por sua competência no que faz e por seu coração sempre gentil, que neste período de grandes descobertas que estão contribuindo para a minha formação profissional e pessoal, é uma pessoa que tem minha admiração e carinho. Agradeço também ao meu coorientador Marcelo F. Oliveira pelas oportunidades de trabalho e discussões, mostrando-se sempre solícito e compreensivo. Tenho a agradecer muito à Denise Vilela Novais e ao Leonardo M. R. Machado, que mesmo não sendo meus orientadores ou coorientadores exerceram um papel muito importante na minha pesquisa e sempre estiveram disponíveis para me auxiliar em momentos cruciais que garantiram bons resultados em minha pesquisa. Devo agradecer especialmente ao Thiago Palhares quem idealizou o processo e me auxiliou para que o resultado fosse possível me ensinando muitas coisas durante esse processo, ou seja, foi crucial para o produto final desta pesquisa, e também agradeço ao restante da equipe pelos auxílios na pesquisa e troca de experiências. Sou grata ao CNPQ, à Comissão PIBIC e ao CTI pela oportunidade da bolsa de IC e a infraestrutura disponível da unidade CTI Renato Archer.

6. Referências

- [1] Yacubian-Fernandes, A., Laronga, P. R., Coelho, R. A., Ducati, L. G., & Silva, M. V. (2004). **Prototipagem como forma alternativa para realização de cranioplastia com metilmetacrilato: nota técnica**. Arquivos de Neuro-Psiquiatria, 62(3b), 865-868.
- [2] YACUBIAN-FERNANDES, Adriano et al. **Prototipagem como forma alternativa para realização de cranioplastia com metilmetacrilato: nota técnica**. Arquivos de Neuro-Psiquiatria, v. 62, p. 865-868, 2004.
- [3] OLIVEIRA, Arthur Maynart Pereira. **Efeitos da cranioplastia em doentes submetidos à craniectomia descompressiva: avaliação anatômica, neurológica e da hemodinâmica encefálica**. (2015). Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [4] SOUZA, L. S.; SANTOS, A. A. de C.; CARVALHO, J. V. de A. ; BEZERRA, A. G. L. ; SALES, A. M. S. ; ROBLES, M. A. S.; ALMEIDA, L. M. G. F. de ; CASTRO, M. C. da S. ; FREIRE, N. C. ; SANTOS, B. F. de O. . **Infectious risk of using biomaterials for cranioplasty: polymethylmethacrylate vs. autologous bone**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 11, n. 8, p. e0511830483, (2022).
- [5] MARICEVICH, Pablo et al. **Cranioplastias: estratégias cirúrgicas de reconstrução**. Revista Brasileira de Cirurgia Plástica, v. 31, p. 32-42, (2023).
- [6] ĐURIĆ, Krešimir Saša et al. **Polymethylmethacrylate cranioplasty using low-cost customised 3D printed moulds for cranial defects—a single Centre experience**. British journal of neurosurgery, v. 33, n.4, p. 376-378, (2019).
- [7] BARBOSA FILHO, Eliezer et al. **Cranioplastia com prótese 3D prototipada: revisão técnica, aplicação de método de modelamento tomográfico do defeito craniano e estudo pré clínico**. (2020). Universidade Positivo. <https://repositorio.cruzeirodosul.edu.br/handle/123456789/2768>