

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

VINÍCIUS DALL'IGNA

**AVALIAÇÃO DE GEOMETRIA DE ENCAIXE EM PRÓTESES CRANIANAS OBTIDAS
ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE MANUFATURA ADITIVA**

**CAXIAS DO SUL
2019**

VINÍCIUS DALL'IGNA

**AVALIAÇÃO DE GEOMETRIA DE ENCAIXE EM PRÓTESES CRANIANAS OBTIDAS
ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para conclusão do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Processos de Fabricação, Matrizes e Ferramentas.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Costa

CAXIAS DO SUL

2019

VINÍCIUS DALL'IGNA

**AVALIAÇÃO DE GEOMETRIA DE ENCAIXE EM PRÓTESES CRANIANAS OBTIDAS
ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para conclusão do curso
de Engenharia Mecânica da Universidade de
Caxias do Sul.

Aprovado em: 05/12/2019

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Alberto Costa.
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Leandro Luis Corso.
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano.
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Muitos trabalhos acadêmicos abordam técnicas de reconstrução craniana utilizando recursos computacionais, porém, pouco se encontra sobre a análise de encaixe destas calotas cranianas. O presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise de encaixe entre calota craniana e crânio afim de facilitar o processo cirúrgico de restauração craniana por meio do planejamento cirúrgico. A análise foi realizada por meio de tomografias computadorizadas e *softwares* de reconstrução 3D como o InVesalius (CTI Renato Archer) e o Magics (Materialise). Para o estudo foram disponibilizados doze casos de defeitos cranianos que após análise, identificou-se oito grupos de elementos geométricos, sendo eles: depressões na geometria de encaixe, perfis de saliência na superfície externa, perfis de saliência na superfície interna, corte parcial do crânio, regiões de calcificações, saliências na geometria de encaixe, rebaixos na geometria de encaixe e regiões de espessura fina. Para cada defeito foi realizada uma análise sob a ótica dos possíveis problemas na fabricação do molde para a calota craniana e posterior extração da mesma. Também foi analisado o defeito em termos do encaixe durante o processo de cirurgia. Os resultados do trabalho foram discutidos com cirurgiões especialistas da área, mostrando que de fato os processos sugeridos podem ser adotados, auxiliando o procedimento cirúrgico e servido como fonte de informação para estudos das individualidades de cada paciente além de garantir uma forma mais natural da calota craniana quando comparada com os processos convencionais. Futuros trabalhos são necessários na área de maneira a auxiliar ainda mais o procedimento cirúrgico. Com um melhor entendimento dos procedimentos cirúrgicos, ferramentas utilizadas e esforços envolvidos, pode-se por exemplo ser desenvolvidos gabaritos de cortes construídos especialmente para as ferramentas utilizadas pelos cirurgiões de maneira a eliminar tais elementos geométricos.

Palavras-chave: Cranioplastia, reconstrução craniana, calota craniana, geometria de encaixe, impressão 3D, planejamento cirúrgico.

ABSTRACT

Many academic papers address cranial reconstruction techniques using computational resources, but little is found about the fit analysis of these cranial caps. The present work aims to make a fitting analysis between cranial cap and skull in order to facilitate the surgical process of cranial restoration through surgical planning. The analysis was performed by means of computed tomographies and 3D reconstruction software such as InVesalius (CTI Renato Archer) and Magics (Materialise). For the study, twelve cases of cranial defects were made available, which after analysis, eight groups of geometric elements were identified, which were: depressions in fitting geometry, protrusion profiles on the outer surface, protrusion profiles in the inner surface, partial skull cutting, calcification regions, protrusions in fitting geometry, recesses on fitting geometry and thin thickness regions. For each defect, an analysis was performed from the perspective of possible problems in the manufacture of mold for the cranial cap and subsequent extraction of the same. The fit defect during the surgery process was also analyzed. The results of the work were discussed with specialist surgeons in the area, showing that in fact the suggested processes can be adopted, assisting the surgical procedure and served as a source of information for studies of the individualities of each patient in addition to ensuring a more natural form of the cranial cap when compared to conventional processes. Future work is needed in the area in order to further assist the surgical procedure. With a better understanding of surgical procedures, tools used and efforts involved, it can be developed cuts templates built especially for the tools used by surgeons in order to eliminate such geometric elements.

Keywords: Cranioplasty, cranial reconstruction, skull cap, fitting geometry, 3D printing, surgical planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento do tomógrafo	16
Figura 2 - Planos de corte do corpo humano	17
Figura 3 - Tratamento de imagens médicas com o software InVesallius	18
Figura 4 - Processo de reconstrução da calota craniana segundo Bogu.....	19
Figura 5 - Processo de reconstrução da calota craniana segundo Ameen.....	19
Figura 6 - Processo de Estampagem	21
Figura 7 - Estampagem Incremental.	21
Figura 9 - Funcionamento de uma impressora 3D do tipo FFF	23
Figura 10 - Teste de obtenção da calota craniana em PMMA	24
Figura 11 - Análise da estrutura de contorno de uma prótese craniana	25
Figura 12 - Negativos (em verde) na superfície de encaixe da prótese craniana.	25
Figura 13 - Prótese craniana de gesso obtida de molde impresso.	26
Figura 14 - Teste de encaixe da calota cranianas no defeito da falha.	26
Figura 15 - Fluxograma de atividades	28
Figura 16 - Regiões de geometrias complexas na superfície de encaixe do crânio... 29	
Figura 17 - Reconstrução craniana	30
Figura 18 - Regiões de geometrias complexas na superfície de encaixe da calota... 30	
Figura 19 - Calota craniana e contorno de falha craniana impressas	32
Figura 20 - Geração do modelo 3D do crânio sem interferências.....	33
Figura 21 - Geração do modelo 3D do crânio com interferências.....	34
Figura 22 - Geração do modelo 3D do crânio com interferências corrigido.	35
Figura 23 - Elementos geométricos presentes na estrutura craniana em milímetros. 36	
Figura 24 - Plano Sagital posicionado no eixo de simetria do crânio	37
Figura 25 - Sobreposição do crânio original (verde) e espelhado (cinza).	38
Figura 26 - Plano Coronal	38
Figura 27 - Demarcação Curvas de contorno de falha.	39
Figura 28 - Geração de linhas guia	39
Figura 29 - Geração da calota craniana.	40
Figura 30 - Medidas da espessura do crânio para gerar a calota craniana.	40
Figura 31 - Superfície de encaixe gerada por operações booleanas.....	41
Figura 32 - Avaliação da espessura da calota craniana.	43
Figura 33 - Elementos geométricos do crânio e da calota.....	44
Figura 34 - Correção de saliências na superfície de encaixe da calota craniana.	44
Figura 35 - Elementos geométricos do crânio e da calota.....	45
Figura 36 - Relação de perfis de saliência externa e furos muito próximos.....	46

Figura 37 - Correção para evitar depressões na superfície de encaixe da calota.....	46
Figura 38 - Geração do gabarito de marcação de corte.	47
Figura 39 - Elementos geométricos do crânio e da calota.....	48
Figura 40 - Correção do perfil de saliência interno na espessura da calota.....	48
Figura 41 - Elementos geométricos do crânio e da calota.....	49
Figura 42 - Correção para furos parciais encontrados na estrutura craniana.	50
Figura 43 - Correções para calcificações internas do crânio.	51
Figura 44 - Geração da calota craniana com espessura interna	51
Figura 45 - Elementos geométricos do crânio.	52
Figura 46 - Correção para saliências na geometria de encaixe craniana.	53

LISTA DE QUADROS

Tabela 1 - Relação de análise de elementos geométricos	55
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TC	Tomografia Computadorizada
RM	Ressonância Magnética
PMMA	Polimetil Metacrilato
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
STL	<i>STereoLithography</i>
SUS	Sistema Único de Saúde
DICOM	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i>
3D	Tridimensional
VCM	<i>Vacuum Cast Molding</i>
STEP	<i>STandard for the Exchange of Product model data</i>
LPRA	Laboratório de Prototipagem Rápida
GHC	Grupo Hospitalar Conceição
GEP	Grupo de Ensino e Pesquisa
PLA	Ácido Polilático

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	AMBIENTE DO TCC	12
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	12
1.3	OBJETIVOS.....	13
1.3.1	Objetivo geral	13
1.3.2	Objetivos específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	CRANIOPLASTIA	15
2.2	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA E RESSONÂNCIA MAGNÉTICA	16
2.3	TRATAMENTO DE IMAGENS MÉDICAS	17
2.4	RECONSTRUÇÃO CRANIANA	18
2.5	MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE PRÓTESES CRANIANAS	20
2.5.1	Método de fabricação direto.....	20
2.5.2	Método de fabricação indireto	21
2.6	ASPECTOS GEOMÉTRICOS NO ENCAIXE DE PRÓTESES CRANIANAS.....	23
2.7	TRABALHOS RELACIONADOS JUNTO AO GRUPO DE PESQUISA DA UCS	24
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	CENÁRIO DE ESTUDO	27
3.2	MÉTODO PROPOSTO	27
3.2.1	Obtenção de estudos de caso.....	27
3.2.2	Geração do Modelo 3D do crânio.....	28
3.2.3	Análise geométrica da superfície de encaixe do crânio e seleção de casos... 28	
3.2.4	Reconstrução da calota craniana	29
3.2.5	Análise geométrica da superfície de encaixe da calota craniana.....	30
3.2.6	Impressão 3D	31
3.2.7	Análise geométrica de encaixe de calotas craniana.....	31
3.2.8	Avaliação do planejamento cirúrgico	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33

4.1	OBTENÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO	33
4.2	GERAÇÃO DO MODELO 3D DOS CRÂNIOS	33
4.3	ANÁLISE GEOMÉTRICA DA SUPERFÍCIE DE ENCAIXE DO CRÂNIO E SELEÇÃO DE CASOS.....	35
4.4	PROJETO, FABRICAÇÃO E MONTAGEM DA CALOTA CRANIANA.....	36
4.4.1	Posicionamento do plano sagital.....	37
4.4.2	Espelhamento e posicionamento do crânio.....	37
4.4.3	Posicionamento do plano coronal	38
4.4.4	Geração de curvas de contorno de falha	38
4.4.5	Geração de linhas guia	39
4.4.6	Geração da calota craniana.....	39
4.4.7	Fabricação da calota craniana	41
4.4.8	Montagem da calota craniana	42
4.5	ANÁLISE DOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS NO CONTORNO DA CALOTA CRANIANA	42
4.5.1	Avaliação de espessura da calota craniana.....	42
4.5.2	Avaliação de regiões de depressões.....	43
4.5.3	Avaliação de regiões de perfis de saliência na superfície externa.....	45
4.5.4	Avaliação de regiões de perfis de saliência na superfície interna	47
4.5.5	Avaliação de regiões de furos parciais	49
4.5.6	Avaliação de regiões com calcificações na estrutura interna do crânio	50
4.5.7	Avaliação de perfis de saliência na geometria de encaixe.....	52
4.5.8	Avaliação médica / planejamento cirúrgico	53
4.5.9	Quadro com relação de análise de elementos geométricos apresentados	55
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1 INTRODUÇÃO

O procedimento neurocirúrgico de cranioplastia é o nome dado à ação de reconstrução da caixa craniana. Problemas desta magnitude são geralmente ocasionados por tumores cerebrais, acidentes automobilísticos ou defeitos de origem genética (congenitos) (BOGU, 2016).

Apesar de parecer um assunto relativamente atual, evidências remontam civilizações antigas que faziam uso de próteses de calotas cranianas com tipos de materiais diversos, tais como ouro, conchas, cabaças e outros. Muitos tipos de materiais foram desenvolvidos ao longo do tempo com significância variável e ainda hoje, apesar do avanço da ciência dos biomateriais, os procedimentos cirúrgicos podem apresentar grandes desafios em termos de reconstrução precisa devido a geometria e forma tridimensional complexa (JARDINI, 2016).

Atualmente o procedimento neurocirúrgico de reconstrução craniana é comumente realizado com materiais distintos como polímeros, cerâmicas, titânio e ossos autólogos de tamanhos variáveis e os defeitos podem até mesmo envolver tecidos adjacentes. A exposição a pressão atmosférica sobre a falha craniana do paciente pode causar diferentes tipos de sintomas como confusão, dores de cabeça, epilepsia, sensação de peso colateral além das questões estéticas como saliências ou depressões que podem comprometer a qualidade de vida. O corpo humano não regenera o osso comprometido, porém a reconstrução da calota craniana, além de proteger o tecido cerebral subjacente, diminui a dor no local do defeito e proporciona uma estética natural ao paciente (PENÃ, 2018).

Devido as propriedades construtivas do método de manufatura aditiva, o processo tem ganhado espaço na ciência médica, aliando-se a técnicas de Tomografia Computadorizada (TC) e Ressonância Magnética (RM) computadorizadas que possibilitam a captura de modelos com geometrias complexas do corpo humano. Isso, com a ajuda de ferramentas computacionais para reconstrução 3D, possibilita a geração e manipulação de modelos digitais tridimensionais que podem ser utilizados como recurso adicional com propósitos didáticos, diagnósticos e tratamentos de pacientes, e até mesmo para um planejamento de procedimentos cirúrgicos. Assim, reduz-se drasticamente o tempo de cirurgia, o risco de rejeição e infecção e até facilita o próprio procedimento cirúrgico devido a possibilidade de análise de um modelo com dimensões reais antes da cirurgia. Além disso, deve-se levar em consideração toda a personalização de formas e tamanhos que o processo de manufatura aditiva proporciona (JARDINI, 2015).

O procedimento intraoperatório para reconstrução de calotas cranianas é complexo e pode apresentar fatores agravantes, como o preparo da mistura de PMMA (polimetil metacrilato), denominada de cimento ósseo, que produz reações exotérmicas e monômeros tóxicos quando em contato com a membrana cerebral (dura-máter), além de uma

dependência de técnicas de modelagem manual que são exigidas do cirurgião para a reconstrução (PENÃ, 2018).

Atualmente implantes podem ser totalmente desenvolvidos com o auxílio de técnicas de modelagem tridimensional, e fabricados com auxílio de impressão 3D, reduzindo assim o custo das próteses em relação as equivalentes de titânio (SHARMA, 2018).

Este trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo para minimizar problemas relativos ao encaixe geométrico das próteses e dos moldes fabricados com auxílio de impressão 3D, onde, por muitas vezes devido a presença de saliências ou negativos em sua estrutura de contorno, podem dificultar o encaixe e a extração da calota do molde aumentando o tempo necessário para cirurgia e o custo envolvido. Estes problemas podem ser contornados por métodos de manipulação computacional de um modelo tridimensional da calota e com o planejamento cirúrgico pré-operatório quando combinado às técnicas e tecnologias de impressão 3D.

1.1 AMBIENTE DO TCC

O trabalho proposto foi desenvolvido no Laboratório de Prototipagem Rápida (LPRA) localizado no bloco D, da Cidade Universitária. O laboratório possui 19m² de área, onde estão acondicionados uma impressora tipo polyjet, marca Objet Eden 360 e duas impressoras do tipo FFF (*Filament Fused Fabrication*), modelo Sethi 3D BB. Além disso, se dispõe de uma Workstation Dell I7 (6700 3.4, 32GB de RAM), com softwares: de CAD, editores de arquivos no formato STL (STereoLithography), análise de elementos finitos e malhas, escaneamento 3D, dentre outros. O laboratório já vem desenvolvendo trabalhos na área de engenharia médica, onde dois trabalhos de conclusão do curso de Engenharia Mecânica foram desenvolvidos com foco na fabricação dos moldes de calotas cranianas em diferentes técnicas que servirão de apoio para o estudo do presente trabalho, cujo intuito é expandir o assunto.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Atualmente, dados do site TABNET (DATASUS, 2019) apontam que somente entre o período de janeiro de 2018 a janeiro de 2019, foram registrados cerca de 89000 casos de traumatismo cranioencefálico no Sistema Único de Saúde (SUS), onde cerca de 50% destes são ocasionados por acidentes no campo automobilístico. Casos de traumatismo cranioencefálico estão associados as principais causas de morte entre pessoas com faixa etária de 5 a 40 anos.

Além das consequências ocasionadas pelo impacto (contusão, laceração e hemorragia intercraniana), é possível que o paciente apresente lesões cerebrais difusas, o

que ocasionam o aumento do tamanho do cérebro (edema) por experimentar uma alta aceleração/desaceleração o que, por sua vez, pode ocasionar o aumento da pressão interna intercraniana (GENTILE, 2011).

Para contornar tais consequências podem ser necessários procedimentos como: sedação, hiperventilação induzida, terapia hiperosmolar, hipotermia e tratamento cirúrgicos do qual exige-se remoção de parte da caixa craniana (LINO, 2008).

Em casos de remoção de parte da caixa craniana faz-se necessário a reconstrução craniana, a qual podem-se aplicar técnicas de manufatura aditiva para o apoio cirúrgico com intuito de diminuir o tempo de operação cirúrgica, bem como a maximização da qualidade geométrica das próteses cranianas de forma geral.

As técnicas de reconstrução craniana por métodos computacionais e fabricação por impressão 3D mostram-se uma ótima opção as equivalentes produzidas em titânio com redução significativa no custo de fabricação devido as dificuldades de trabalhar com o tipo de metal.

Dois casos já foram desenvolvidos no LPRA, onde fabricaram-se por impressão 3D próteses e moldes de calotas cranianas que obtiveram bons resultados, sendo tema de trabalhos de conclusão do curso de Engenharia Mecânica no ano de 2018 na Universidade de Caxias do Sul. Problemas foram encontrados devido à complexidade da geometria de encaixe, sendo sugeridas como excelente oportunidade para o estudo, onde tem-se como objetivo principal a melhora do processo de manipulação computacional, bem como o alinhamento para melhores resultados considerando o planejamento cirúrgico e reduzindo os desafios encontrados por cirurgiões do mundo inteiro para executar os procedimentos de cranioplastia.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um estudo sobre os aspectos geométricos em superfícies de encaixe de próteses cranianas e modelos cranianos, considerando o planejamento cirúrgico, por meio de ferramental rápido obtido por impressão 3D.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão definidos abaixo:

- a) Pesquisar e avaliar técnicas para reconstituição, geração, geometrias e características de próteses de calotas cranianas;

- b) Selecionar caso de estudo;
- c) Projetar prótese e molde;
- d) Analisar encaixe da prótese e do molde;
- e) Analisar prótese resultante do uso do molde no defeito.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CRANIOPLASTIA

Cranioplastia é o nome dado a reconstrução de falhas cranianas e é um procedimento desafiador para neurocirurgiões devido à complexidade dos defeitos cranianos que podem ser encontrados em diferentes pacientes. Normalmente relacionado a doenças congênitas, traumas, tumores cerebrais, dentre outros, suas principais indicações são para uma estética natural do contorno craniano, proteção contra traumas e proteção contra síndrome de trefinado. A síndrome de trefinado trata-se da deterioração neurológica ocasionada devido a ação da pressão atmosférica e pressão do tecido craniano atuando na região onde há remoção óssea considerável. Tais procedimentos de reconstrução normalmente utilizam ossos autólogos oriundos da tibia, osso íliaco e costela, ossos alogênicos oriundos de bancos de ossos ou materiais aloplásticos, ligas de titânio, polymethyl metacrilato (PMMA), etc (ANDRABI, 2017).

Segundo Leão (2018) o material ideal para procedimentos cirúrgicos de cranioplastia deve ter características específicas como biocompatibilidade, resistência a variações de temperatura, possuir baixo custo e radiotransparência. A autora ainda coloca que ossos autólogos são ideais para o tipo de procedimento, porém são limitados ao tamanho da falha, dificuldades de modelagem além de necessitarem de procedimento cirúrgico auxiliar, sendo o PMMA uma alternativa por ter características similares aos ossos humanos, destacando a fácil modelagem, baixo peso, radiotransparência e baixo custo. Conforme dados de uma meta-análise entre ossos autólogos, titânio e PMMA não existe diferença estatística entre as taxas de rejeição dos outros dois materiais em relação ao PMMA.

Apesar da diversidade de materiais, não existe um senso comum quanto a recomendação de um material específico para procedimentos de cranioplastia, sendo ainda um tema de discussões em artigos em todo o mundo (JUNIOR, 2016).

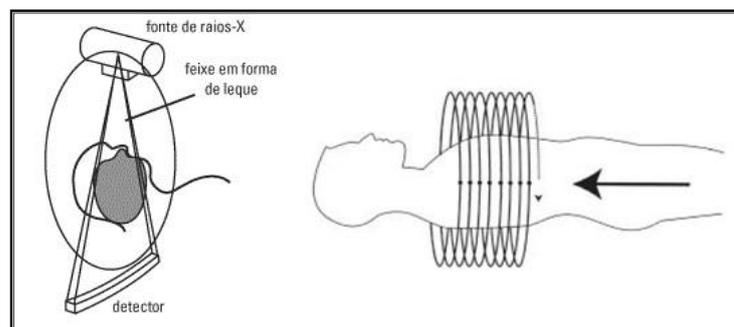
Historicamente trata-se de um procedimento que remonta antigas civilizações onde utilizavam materiais rudimentares para as correções estéticas. Na linha do tempo pode-se destacar o avanço de materiais bem como de tecnologias de imagem como a Tomografia Computadorizada (TC) e Ressonância Magnética (RM). Recentemente, graças ao desenvolvimento destas tecnologias, a utilização de impressão 3D tem-se mostrado bastante útil tanto para confecção de próteses com acabamento satisfatório e baixo custo quanto para a análise médica, auxiliando no pré-operatório e reduzindo o tempo de cirurgia e os riscos relativos as particularidades de cada paciente (SHARMA, 2018).

2.2 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA E RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Tomografia Computadorizada (TC) é o nome dado a técnica que torna possível a visualização de partes internas do corpo humano. Basicamente, o aparelho consiste em uma fonte de raios-X em forma de leque que se movimenta em um padrão helicoidal (Figura 1) e receptores captam as variações magnéticas ocasionadas pelo choque do raio-X com os tecidos em análise. Esses receptores detectam essa perturbação da radiação e a convertem em sinais elétricos que, posteriormente, são processados e disponibilizados em formato de imagem digital (YAMASHITA, 2001).

Historicamente foi necessário cerca de um século para o aperfeiçoamento das técnicas iniciadas pelo cientista Johann Radon, onde demonstrou matematicamente que um conjunto de projeções poderia reproduzir objetos 3D no início do século XX. Conforme o avanço da tecnologia, na década de 60 começam a ser desenvolvidos os primeiros tomógrafos na área médica, onde somente em 1972 em um congresso inglês são apresentadas as primeiras imagens oriundas de um tomógrafo (CARVALHO, 2007).

Figura 1 - Funcionamento do tomógrafo



Fonte: DAWSON E LEES (2001).

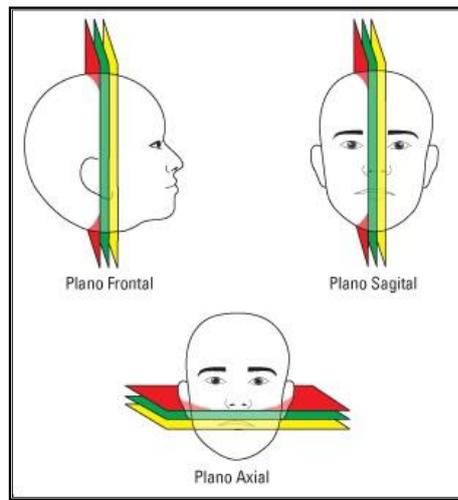
Ressonância magnética (RM) é o nome dado ao equipamento que tem o mesmo objetivo do tomógrafo, porém utilizando princípios físicos diferentes. Basicamente, trata-se de um forte campo magnético ao qual estimula os núcleos de determinados elementos por radiofrequências específicas. Quando estimuladas estas partículas emitem rádio sinais que podem ser captados, processados e convertidos em imagens digitais em secções nos três eixos (axial, coronal e sagital), conforme a Figura 2, similar a tomografia, porém mais utilizado para avaliação de partes moles. Historicamente a ressonância magnética teve seus primeiros estudos iniciados em 1946 por Purcell e Bloch. Em 1972 foram publicadas as primeiras imagens oriundas da RM e em 1976 foram apresentadas as primeiras imagens de partes do corpo humano (IWASAKI, 2008).

Com a evolução dos equipamentos de TC e RM padronizou-se o formato das imagens obtidas por esses equipamentos como *Digital Imaging and Communications in*

Medice (DICOM) onde o mesmo especifica um protocolo com uma série de parâmetros garantindo assim interoperatividade entre equipamentos de todo o mundo (AZEVEDO, 2009).

As imagens geradas tanto pelo TC como pelo RM são usadas para modelagem de estruturas volumétricas e as secções (axial, coronal e sagital), conforme a Figura 2, e tem espessura recomendada de um a dois milímetros, assim durante o exame são captados centenas de fatias que são entregues no formato DICOM (PEÑA, 2018).

Figura 2 - Planos de corte do corpo humano



Fonte: GARIB (2007).

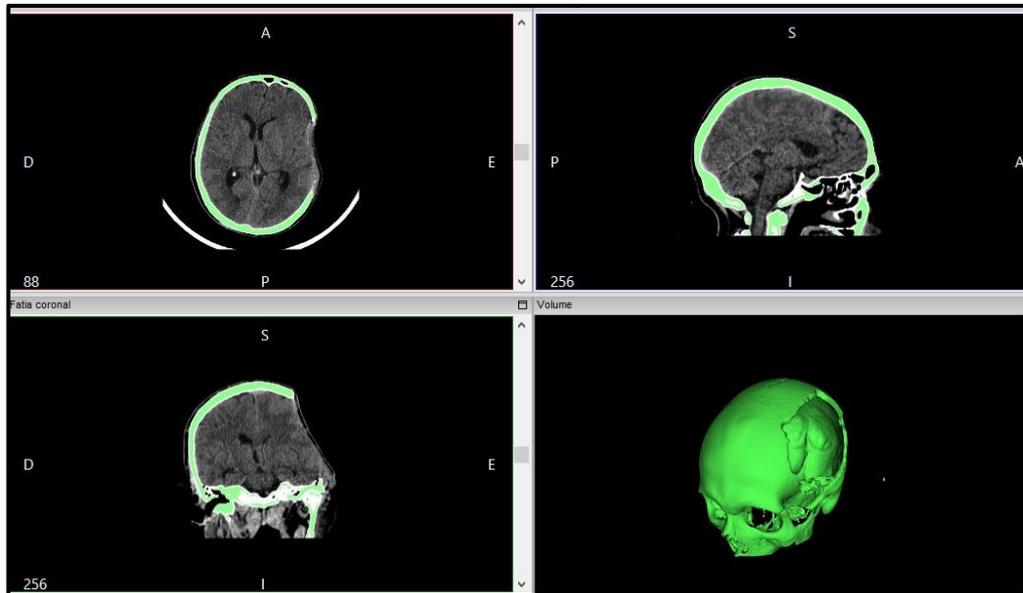
Além da espessura que varia em torno de um a dois milímetros, deve-se evitar inclinações do pórtico do tomógrafo afim de um melhor posicionamento do modelo gerado. O posicionamento correto do paciente com o plano de corte pode restringir possíveis artefatos oriundos de próteses dentárias metálicas limitando os ruídos apenas a região onde se encontram. Tais considerações podem ajudar a modelagem da prótese posteriormente, bem como evitar que seja necessário a revisão de fatia a fatia dos exames de TC na hora da obtenção do modelo tridimensional (JARDINI, 2016).

2.3 TRATAMENTO DE IMAGENS MÉDICAS

A geração do modelo 3D dos arquivos DICOM é feita através do empilhamento das secções 2D dos três eixos (axial, coronal e sagital) obtidas do TC ou RM. Isto pode ser feito por meio de *softwares* específicos que fazem este empilhamento de secções automaticamente. Um desses *softwares* é o InVesalius, desenvolvido pelo Centro de Tecnologia e Informação Renato Archer de Campinas. Trata-se de um *software* gratuito onde é possível gerar um modelo tridimensional a partir das imagens 2D oriundas do TC ou RM. Isso normalmente é feito por meio do comando *threshold* (Figura 3) que define uma densidade

de pixels pré-estabelecida pelo fabricante para demarcação de ossos e tecidos humanos e, a partir desta, gera automaticamente o modelo 3D (AMORIM, 2015).

Figura 3 - Tratamento de imagens médicas com o software InVesallius



Fonte: AUTOR (2019).

O modelo 3D é gerado normalmente em formato STL (STereoLithography), que constrói uma malha de triângulos que representa a geometria da região selecionada (COSTA, 2016).

Softwares convencionais de CAD (*Computed Aided Desing*) não manipulam arquivos STL, e para trabalhar nestes *softwares* convencionais são necessários diversos procedimentos de engenharia reversa. Existem *softwares* específicos para trabalhar com modelos STL como o MeshMixer (Autodesk), Magics (Materialise), Geomagic (3DSYSTEM), dentre outros (JARDINI, 2016).

2.4 RECONSTRUÇÃO CRANIANA

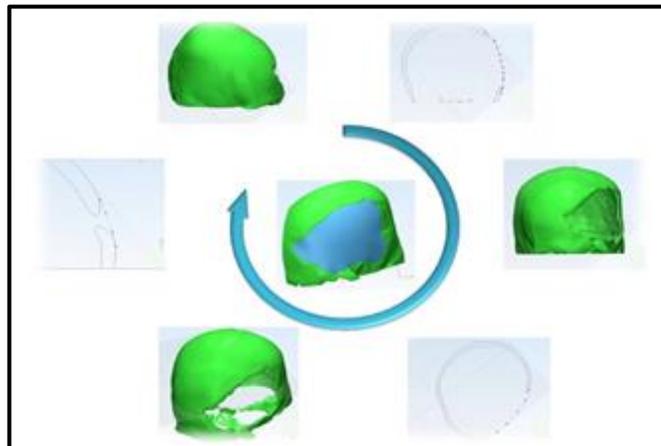
Após o tratamento das imagens oriundas da TC ou RM, faz-se o uso de diferentes ferramentas de manipulação para reconstrução da calota craniana.

Segundo Fiaschi (2016), com o modelo tridimensional do crânio é possível fazer a reconstrução craniana através de estruturas obtidas da sobreposição da região da falha craniana com a região contralateral. Estas estruturas são então utilizadas para formar a calota sólida.

Diversos autores utilizam diferentes *softwares* para a reconstrução craniana, não existindo um *software* ou método oficial.

Bogu (2016) utilizou o *software* 3-Matic (Materialise) para a reconstrução da calota craniana e, segundo o autor, o processo de modelagem pode ser dividido em 2 etapas: o pré-processamento e o pós-processamento. O pré-processamento é a etapa a qual é confeccionada a calota craniana, através da demarcação do contorno de falha, do uso de simetria para o espelhamento da região não comprometida, do desenho de linhas guias, de subtrações booleanas e outros processos (Figura 4). O pós-processamento é a etapa onde é definida a espessura variável da prótese, ângulos de alívio do canto interno e off-set, ou seja, o pós processamento trata de todas as questões de acabamento da prótese.

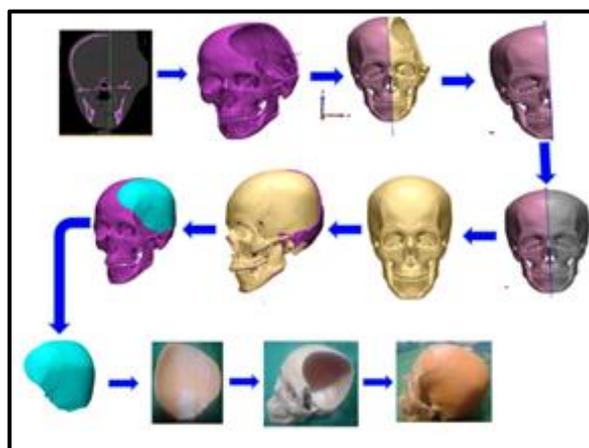
Figura 4 - Processo de reconstrução da calota craniana segundo Bogu.



Fonte: BOGU (2016).

Já Ameen (2018) utiliza menos passos e coloca que criando o plano de simetria (plano sagital) para geração do espelhamento e posicionando-o perfeitamente sobre a falha, utilizam-se operações de redução booleanas para chegar ao modelo de calota craniana adequado (Figura 5).

Figura 5 - Processo de reconstrução da calota craniana segundo Ameen.



Fonte: AMEEN (2018).

Após a reconstrução craniana, diferentes técnicas de fabricação podem ser utilizadas para a obtenção da prótese craniana final, não existindo um método correto. Diversos autores defendem diferentes métodos de fabricação e os mais utilizados serão abordados na seção seguinte.

2.5 MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE PRÓTESES CRANIANAS

Diversos métodos são utilizados para a fabricação de próteses cranianas atualmente, sendo os principais: conformação, usinagem, fundição e impressão 3D (COSTA; LAJARIN, 2011).

Os processos de fabricação de calotas cranianas podem ser divididos em: método de obtenção direto, onde a própria prótese craniana é fabricada; e método indireto, onde são fabricados aparatos para a posterior obtenção da prótese.

2.5.1 Método de fabricação direto

Segundo Costa (2005), o processo de usinagem é flexível e normalmente utilizado para a produção de próteses cranianas de titânio e implantes acrílicos. Apesar de bons resultados estéticos e um curto tempo para produção, o autor destaca a dificuldade da usinagem devido as complexidades da forma geométrica da prótese craniana.

Bazan (2004) aborda as restrições da usinagem de superfícies côncavas e das dificuldades decorrentes das fixações e referenciais necessários para a obtenção da prótese craniana por este tipo de processo. Também coloca que as próteses produzidas por usinagem ainda têm alto valor de custo agregado. Segundo o autor, o processo garante alta reprodutividade, repetibilidade, além de ótimos resultados de acabamentos e precisão sendo um processo rápido e bastante utilizado na indústria, o que garante alta disponibilidade. As limitações e dificuldades decorrentes da fixação e referenciais podem ser sanadas com a utilização de centros de usinagem de cinco eixos.

Outro processo de fabricação direta de próteses cranianas considerado adequado e amplamente utilizado, é o de prototipagem por Sinterização Direta de Material a Laser (DMLS). O processo DMLS usa da deposição de um pó metálico camada a camada e faz a fusão deste pó através da incidência de um laser de alta energia. O processo é repetido até que a prótese craniana tenha sua forma final. Geralmente, uma liga de titânio Ti6Al4V é utilizada neste processo e é necessário um equipamento especial para controle de ambiente onde ocorre a fabricação da prótese (JARDINI, 2016).

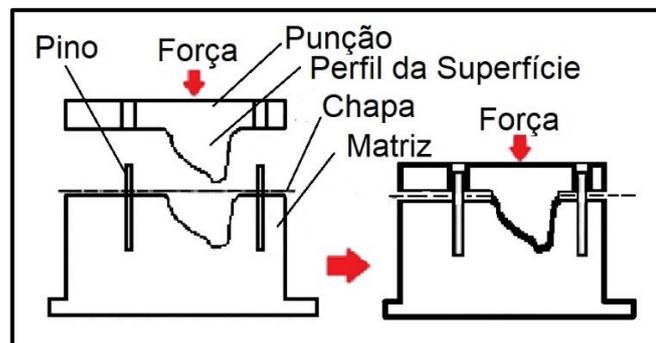
Saura (2014) coloca que a prótese craniana resultante do processo de sinterização direta de material a laser (DMLS) tem uma rugosidade superficial alta e são necessários processos de acabamento posterior, como o jateamento, polimento, etc.

2.5.2 Método de fabricação indireto

Um método discutido para a fabricação de próteses cranianas é a estampagem convencional, onde produz-se a prótese através de uma prensa que exerce a força de um punção em uma chapa, obrigando-a a conformar-se de acordo com uma matriz (Figura 6). O sucesso deste tipo de processo depende de muitos fatores, como a força do punção, posição do molde, velocidade de conformação, precisão da prensa, ferramental, material, etc. Tais fatores influenciam diretamente a qualidade final da prótese podendo estar sujeita a retorno elástico, fissuras, formação de orelhas, etc (ROCHA, 2014).

Rocha (2014) ainda coloca que este método necessita de diversas etapas antes da estampagem sendo citadas por ele a etapa de tratamento de imagens médicas, a reconstrução craniana digital e, então, iniciasse o processo de desenho de uma matriz e de um punção que será utilizado na estampagem final. Por fim o molde é fabricado. No caso do autor o mesmo utilizou moldes usinados.

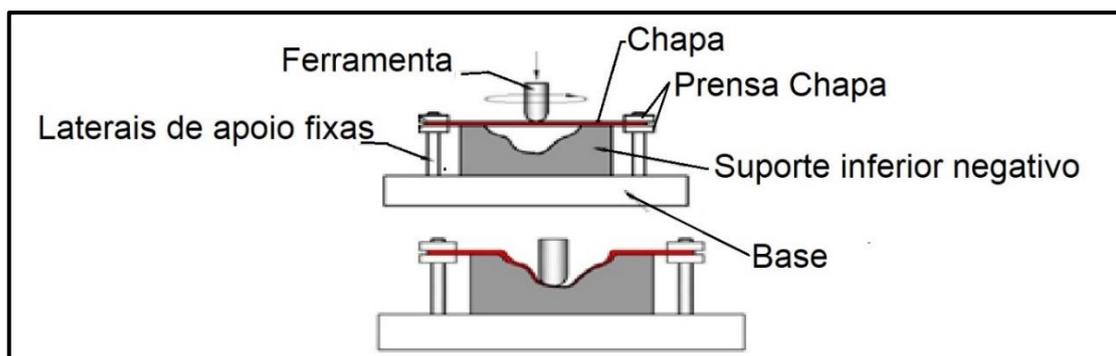
Figura 6 - Processo de Estampagem



Fonte: ROCHA (2014).

Também existe o processo de estampagem incremental, onde através de um centro de usinagem, um punção padronizado normalmente em formato cilíndrico, faz-se deformações pequenas em uma chapa localizada sobre uma matriz (Figura 7) (Lírio, 2017).

Figura 7 - Estampagem Incremental.



Fonte: CASTELAN (2010).

Castelan (2010) coloca que apesar do processo de estampagem incremental apresentar vantagens como a flexibilidade, uso de apenas uma ferramenta, baixo custo e menor tempo de produção, o processo é limitado as dimensões da peça estampada. Também é necessário uma matriz negativa ou positiva para tal processo.

A usinagem também é um método de fabricação indireto uma vez que pode ser aplicada a fabricação de um molde para a posterior obtenção (conformação) da prótese craniana.

Outro método mencionado para fabricação de próteses cranianas são moldes em resina de silicone, onde o silicone é vazado sobre um modelo oriundo de impressão 3D e seguidamente curado, tal processo permite a reprodução de 5 a 20 peças e também é conhecido como *Vacuum Cast Molding* (VCM). O silicone apresenta características como flexibilidade e resistência a altas temperaturas (VASCONCELOS, 2004).

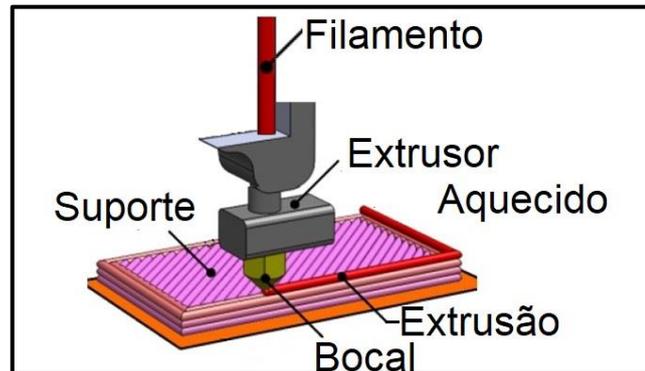
Fundição de precisão por cera perdida consiste na fabricação de moldes em cera que são preenchidos com revestimento cerâmico. Após o revestimento cerâmico estar curado, é feito o aquecimento do molde afim de retirar a cera e então é injetado o material (THAKRE, 2018).

Rocha (2010) faz um estudo sobre a aplicação do processo de fundição de precisão por cera perdida para a fabricação de uma calota craniana e coloca que o processo se mostrou eficaz para a fabricação da prótese craniana.

A impressão 3D é uma excelente alternativa a todos os processos de fabricação de próteses cranianas apresentados. Segundo Sharma (2018), o método de fabricação indireto por impressão 3D é utilizado com a fabricação de moldes para obtenção da calota craniana. Estes moldes podem ser utilizados durante o procedimento cirúrgico e garantem qualidade superior ao encaixe e acabamento da prótese craniana.

O processo de impressão do tipo FFF (*Filament Fused Fabrication*) é um processo baseado na deposição de um determinado material em camadas sucessivas. Basicamente, o sistema consiste em um extrusor aquecido que é alimentado com um filamento. O filamento é forçado a passar pelo extrusor aquecido em direção a um bocal. Devido ao aquecimento, o material é derretido e deixa o bocal em formato de um fino fio. O movimento do extrusor nos três eixos (x, y, z) faz com que o material seja depositado sucessivamente. O processo é ilustrado na Figura 9 (Steuben, 2015).

Figura 8 - Funcionamento de uma impressora 3D do tipo FFF



Fonte: STEUBEN (2015).

Oliveira (2019) coloca que moldes de PLA (ácido polilático) obtidos por impressão 3D podem evitar taxas de complicações, tempo de cirurgia e garantir uma maior qualidade estética e baixíssimo custo na obtenção de próteses de PMMA (polimetyl metacrilato). O autor afirma que os moldes podem ser esterilizados em gás plasma de peróxido de hidrogênio e destaca a utilização de salina isotônica para evitar aderência do cimento ósseo no molde.

2.6 ASPECTOS GEOMÉTRICOS NO ENCAIXE DE PRÓTESES CRANIANAS

Devido ao processo de reconstrução craniana, um ajuste muito preciso entre crânio e prótese é obtido. Se este ajuste preciso na interface de contato entre prótese e crânio não for analisado, pode atrapalhar no encaixe da prótese ou em sua fabricação.

Fragmentos presentes nas bordas de encaixe das próteses podem atrapalhar a sua fixação no crânio. Interferências entre prótese e crânio podem ocorrer principalmente em regiões onde a superfície lateral do defeito craniano apresenta geometrias complexas. Por isso, uma análise de interferência de borda no modelo digital é sugerida. Com isso, pode-se analisar a possibilidade de deixar um espaço entre prótese e crânio nessas regiões complexas, afim de evitar o contato e facilitar o encaixe da prótese na falha do crânio (MARKOWSKA, 2009).

O autor Markowska (2009) também coloca que o ajuste muito preciso da superfície externa da prótese com o crânio pode gerar bordas de contorno afiadas. É necessário levar o material de aplicação final em consideração ao se projetar a prótese craniana e, em alguns casos, o arredondamento das bordas evitando cantos vivos. O autor aborda que na grande maioria o efeito estético é obtido mesmo com espessuras de bordas de 1 milímetro, uma vez que posteriormente é coberta por pele e cabelo.

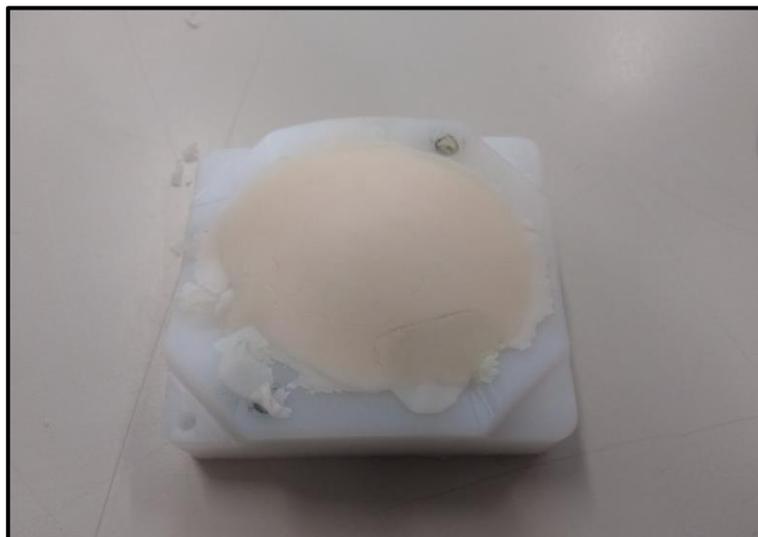
2.7 TRABALHOS RELACIONADOS JUNTO AO GRUPO DE PESQUISA DA UCS

Sordi (2018), apresenta um estudo de dois casos de reconstrução cranianas junto ao Laboratório de Prototipagem Rápida (LPRA) da UCS. O autor utilizou o método de fabricação direta por usinagem para a obtenção da calota craniana e o método de fabricação indireto por usinagem para a fabricação de um molde e através deste a obtenção da calota craniana. O material utilizado para as usinagens das calotas e moldes foi Poliamida 6.

Sordi (2018) destaca inicialmente a necessidade de processos computacionais para a conversão da calota craniana do formato STL para o formato STEP, que pode ser interpretado por *softwares* convencionais de manipulação. Após essa conversão, o autor aborda as parametrizações e técnicas utilizadas para as usinagens de fabricação das próteses e dos moldes. Para o caso dos moldes o autor ainda faz testes da obtenção da calota em gesso e com Polimetil-Metacrilato (PMMA) (Figura 10).

Sordi (2018) apresenta resultados satisfatórios tanto nas próteses obtidas pelo método de fabricação direto de usinagem como nas próteses obtidas pela moldagem utilizando os moldes usinados por método de fabricação indireto. Os testes de encaixe foram executados nos contornos da falha que foram impressos em impressoras SETHI 3D BB. O autor destaca que a remoção de negativos existentes na estrutura de contorno interna da calota craniana de um dos casos (Figura 11) foi fundamental para garantir o encaixe da prótese na falha craniana.

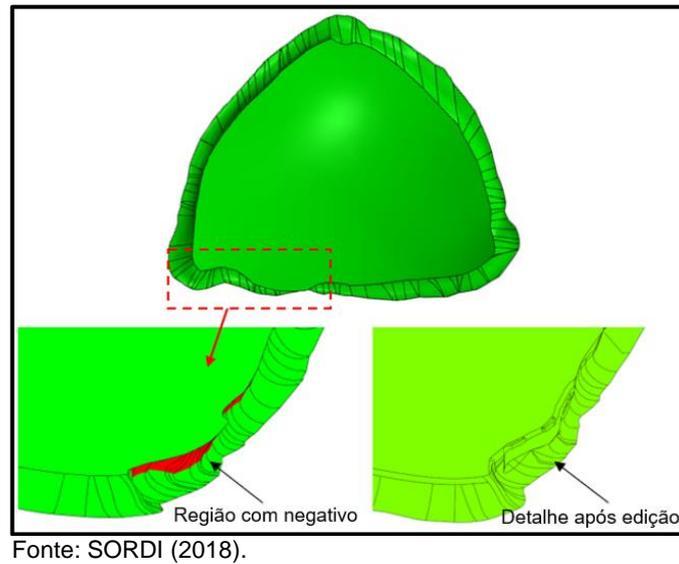
Figura 9 - Teste de obtenção da calota craniana em PMMA



Fonte: SORDI (2018).

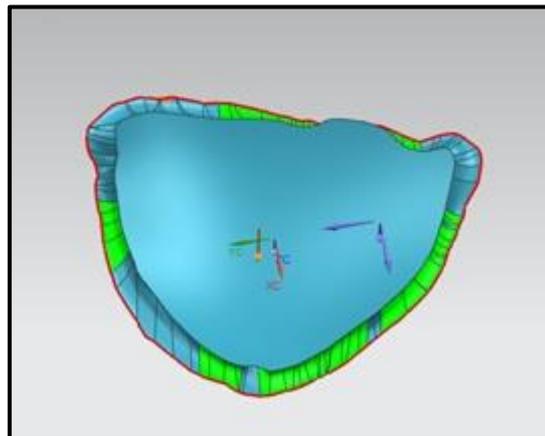
Sordi (2018) ainda sugere para trabalhos futuros o estudo da região de encaixe e sua interferência na montagem da prótese na falha craniana.

Figura 10 - Análise da estrutura de contorno de uma prótese craniana



Castilhos (2018) apresenta um estudo dos mesmos casos discutidos por Sordi (2018), porém utiliza impressoras Sethi 3D BB para a fabricação de moldes e posterior obtenção da prótese cranianas. O autor também destaca a necessidade de processos computacionais para conversão do formato STL para o formato STEP que pode ser interpretado por *softwares* específicos para construção de moldes. Durante o processo construtivo do molde o autor identificou a presença de negativos nas bordas internas da prótese (Figura 12) que podem atrapalhar a extração da prótese final do molde.

Figura 11 - Negativos (em verde) na superfície de encaixe da prótese craniana.



Castilhos (2018) utilizou para testes de encaixe os contornos das falhas cranianas impressas anteriormente para o trabalho do Sordi (2018). Os testes de moldagem foram realizados em gesso (Figura 13) e Polimetil Metacrilato (PMMA).

Figura 12 - Prótese craniana de gesso obtida de molde impresso.



Fonte: CASTILHOS (2018).

Após obtidas as próteses de PMMA foram feitos testes de encaixe das calotas nos defeitos impressos (Figura 14).W E

Figura 13 - Teste de encaixe da calota cranianas no defeito da falha.



Fonte: CASTILHOS (2018).

Castilhos (2018) conclui que o processo de obtenção de calotas cranianas por método de fabricação indireta por impressão 3D garante bons resultados estéticos e de acabamento. O autor coloca que a remoção de negativos na estrutura interna das próteses deve ser considerada e que ajuda a extração da calota do molde.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o método proposto para o desenvolvimento do trabalho, bem como os equipamentos e materiais que serão utilizados. Desta forma, inicialmente é apresentado o cenário de estudo, seguido pelo método proposto e finalmente as etapas são discutidas.

3.1 CENÁRIO DE ESTUDO

Atualmente, dados do site TABNET (DATASUS, 2019) apontam que foram registrados cerca de 89000 casos de traumatismo cranioencefálico no sistema único de saúde (SUS). Em casos de acidentes (automobilísticos, por impacto, etc.) é possível que pacientes apresentem lesões cerebrais difusas, o que ocasionam o aumento do tamanho do cérebro (edema) por experimentar uma alta aceleração/desaceleração o que pode ocasionar o aumento da pressão interna intercraniana (GENTILE, 2011; SANTO, 2002). Podem ser necessários procedimentos como: sedação, hiperventilação induzida, terapia hiperosmolar, hipotermia e tratamentos cirúrgicos que exigem a remoção de parte da caixa craniana (LINO, 2008).

Nos casos de remoção de parte da caixa craniana faz-se necessário a reconstrução craniana, a qual pode-se aplicar técnicas de impressão 3D para o apoio cirúrgico com intuito de diminuir o tempo de operação cirúrgica, bem como a maximização da qualidade geométrica das próteses cranianas de forma geral.

Em parceria com o Grupo de Ensino e Pesquisa (GEP) do Grupo Hospitalar Conceição (GHC) e do Laboratório de Prototipagem Rápida (LPRA) da Universidade de Caxias do Sul (UCS) estudos sobre a fabricação de próteses cranianas e moldes por impressão 3D vem sendo desenvolvidos nos últimos anos.

3.2 MÉTODO PROPOSTO

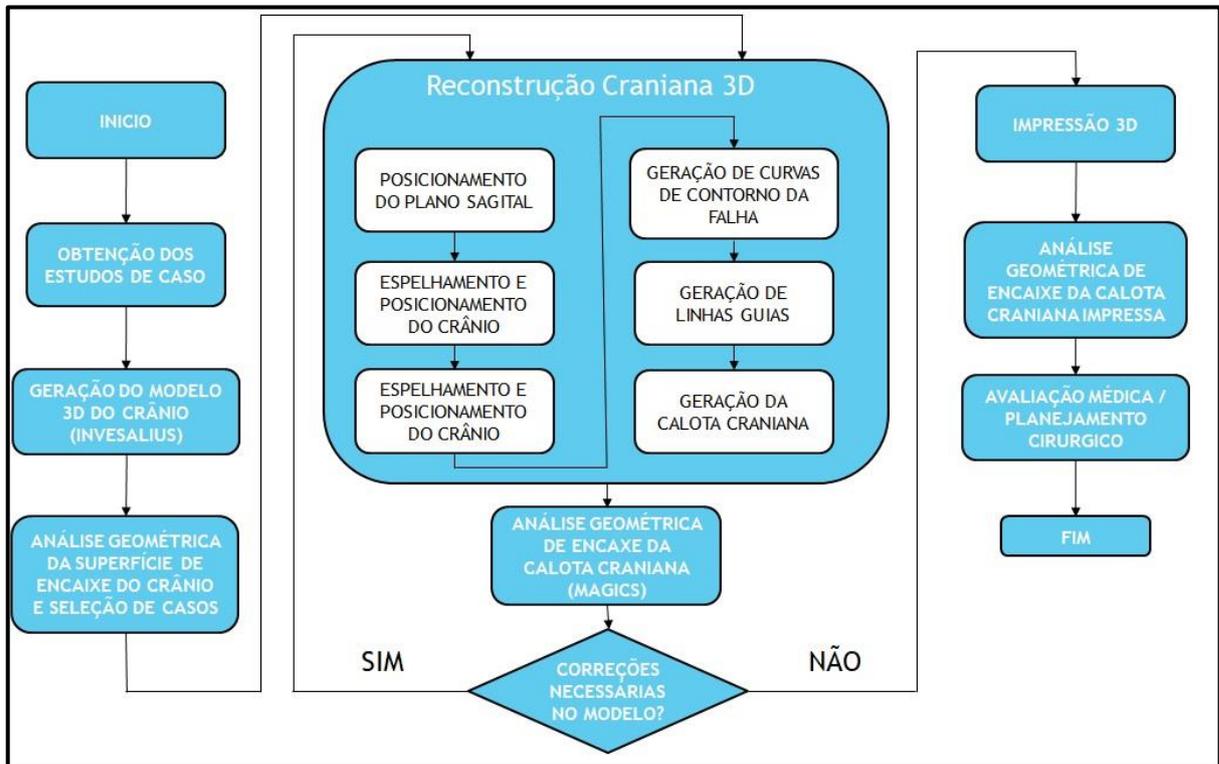
Para realização das atividades é proposto um fluxograma que apresenta a ordem sequencial proposta das atividades a serem desenvolvidas (Figura 15).

3.2.1 Obtenção de estudos de caso.

Para o desenvolvimento do presente trabalho serão utilizados casos de reconstrução craniana disponibilizados pelo Grupo de Ensino e Pesquisa do Grupo Hospitalar Conceição de Porto Alegre. Os casos disponibilizados pelo grupo são gravados em cd's e as imagens de tomografia computadorizada vem em formato DICOM (*Digital Imaging and Communications*

in Medice). No total o Laboratório de Prototipagem Rápida (LPRA) dispõe de doze casos, sendo 8 destes casos antigos já solucionados e 4 casos atuais, onde estudos para o procedimento cirúrgico de reconstrução craniana estão sendo analisados.

Figura 14 - Fluxograma de atividades



Fonte: AUTOR (2019).

3.2.2 Geração do Modelo 3D do crânio

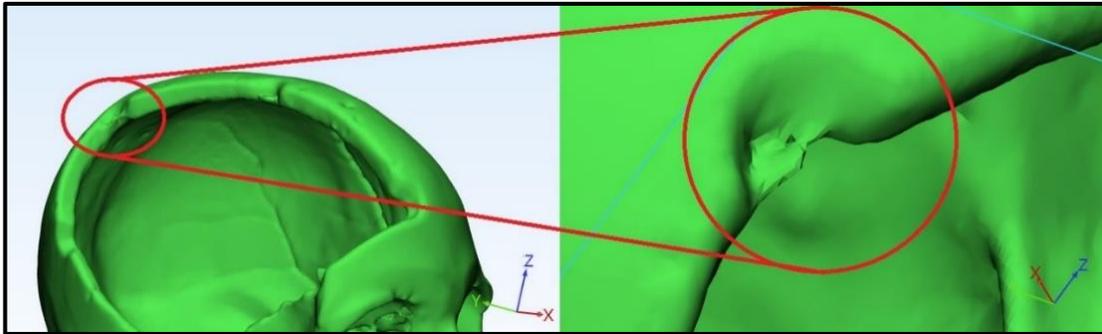
Para a geração de um modelo 3D da estrutura craniana será utilizado o software InVesalius (CTI Renato Archer). As imagens de tomografia computadorizada disponibilizadas em formato DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medice*) são importadas no *software* e após a importação é feita a demarcação óssea do crânio nos eixos coronal, sagital e axial com a utilização das ferramentas disponíveis. Feita a demarcação óssea do crânio, o *software* gera um modelo-3D do crânio que pode ser exportado em formato STL. O *software* InVesalius (CTI Renato Archer) está disponível no Laboratório de Prototipagem Rápida (LPRA).

3.2.3 Análise geométrica da superfície de encaixe do crânio e seleção de casos

Após a geração do modelo 3D da estrutura craniana, é feita uma análise da região da falha com o auxílio do *software* MAGICS (MATERIALISE) disponível no Laboratório de Prototipagem Rápida (LPRA). A análise da superfície de encaixe da falha craniana, foi

realizada com intuito de destacar protuberâncias e regiões de geometrias complexas na superfície de encaixe da estrutura craniana (Figura 16).

Figura 15 - Regiões de geometrias complexas na superfície de encaixe do crânio



Fonte: AUTOR (2019).

Quanto maior for o número de geometrias anômalas e saliências ou quanto maior for sua profundidade e tamanho, mais complexo será o contorno de encaixe da prótese.

As análises serão realizadas visualmente e onde forem identificados geometrias complexas, como as da Figura 16, serão tomadas medidas por meio de ferramentas do *software* afim de serem consideradas para a reconstrução craniana posteriormente.

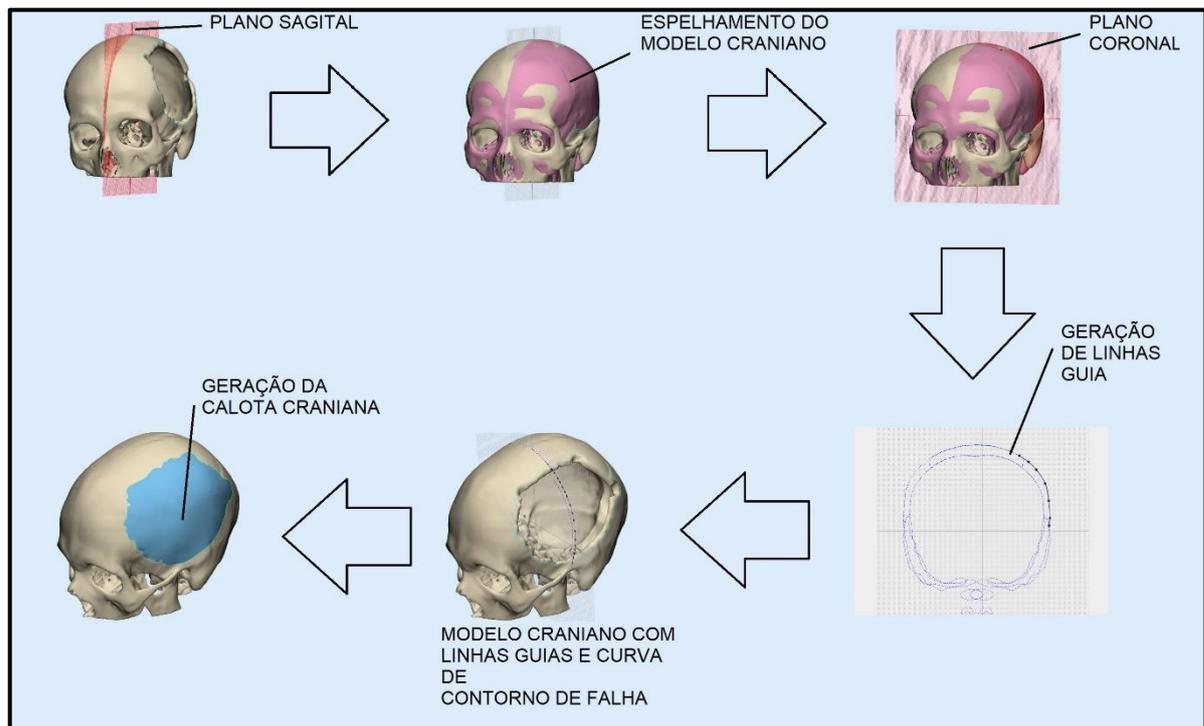
Identificados e avaliados os níveis de alteração geométrica na região do encaixe da estrutura craniana, os casos que mais apresentarem alterações serão selecionados.

3.2.4 Reconstrução da calota craniana

A reconstrução da calota craniana também será feita com o *software* MAGICS (MATERIALISE). O MAGICS permite a construção de calotas cranianas customizadas e permite ainda a manipulação de regiões específicas do modelo. Uma sequência de operações devem ser realizadas para a construção da calota craniana.

Destacam-se as operações de espelhamento do crânio com o plano sagital, demarcação da região de contorno da falha, demarcação de linhas guias e subtrações booleanas como as apresentadas na Figura 17.

Figura 16 - Reconstrução craniana

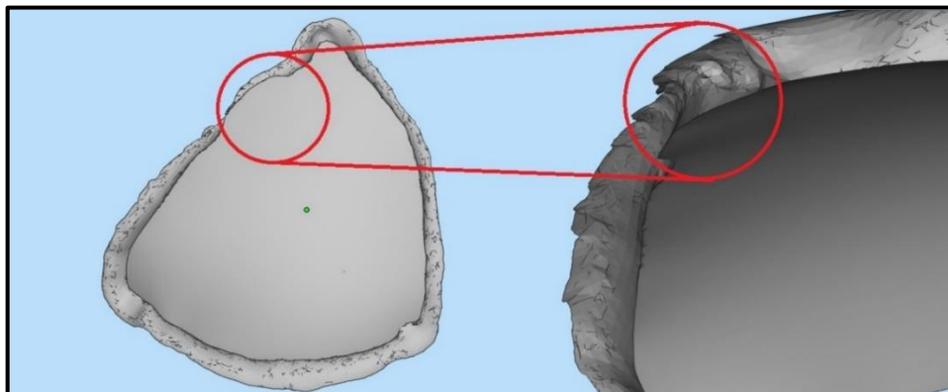


Fonte: AUTOR (2019).

3.2.5 Análise geométrica da superfície de encaixe da calota craniana

Nessa fase é realizada uma segunda análise sobre a geometria da superfície de encaixe da calota craniana. Identificam-se regiões e elementos que podem atrapalhar a remoção do molde, como cavidades e protuberâncias na geometria de contorno da prótese (Figura 18).

Figura 17 - Regiões de geometrias complexas na superfície de encaixe da calota



Fonte: AUTOR (2019).

Quanto maior for o número, tamanho e profundidade destas cavidades e protuberâncias na superfície de encaixe da calota craniana, mais dificultosa pode ser a

remoção da calota do molde, o que pode dificultar o processo de obtenção da calota no momento da cirurgia.

Serão avaliados:

- a) A direção ideal para encaixar a prótese craniana;
- b) Regiões que apresentem negativos (buracos) na superfície de encaixe da calota craniana que interfiram na extração do molde;
- c) Regiões que apresentem positivos (saliências) na superfície de encaixe da calota craniana que interfiram na extração do molde;
- d) Espessura ideal da calota craniana.

Para contornar estes problemas, podem ser necessários novos ajustes no processo de reconstrução craniana, na formação da malha de triângulos e, até mesmo, destacados possíveis ajustes cirúrgicos a serem feitos antes da fixação da prótese afim de facilitar o procedimento médico.

3.2.6 Impressão 3D

Serão utilizados neste trabalho impressoras 3D da marca SETHI3D BB e o *software* de fatiamento SIMPLIFY3D. As calotas cranianas, bem como os defeitos cranianos, serão impressos em Ácido Polilático (PLA) e também será impresso o contorno da região da falha para serem feitos os testes de encaixe. O *software* SIMPLIFY3D faz o fatiamento e a parametrização da impressora, onde consideram-se velocidade de impressão, velocidade de extrusão e movimentos de eixos (x,y e z).

O *software*, a impressora e o material serão disponibilizados pelo Laboratório de Prototipagem Rápida (LPRA).

3.2.7 Análise geométrica de encaixe de calotas craniana

Por fim, após a impressão, será avaliado o encaixe da calota craniana física no contorno de falha (Figura 19). Após a análise feita no Laboratório de Prototipagem Rápida, a prótese craniana junto com o contorno da falha craniana serão enviados para avaliação médica da equipe do Grupo de ensino e pesquisa do Grupo Hospital Conceição.

Figura 18 - Calota craniana e contorno de falha craniana impressas



Fonte: AUTOR (2019).

Após o *feedback* positivo da equipe médica que avaliará o formato craniano, será construído um molde para a obtenção da calota craniana no momento da cirurgia. O molde será testado com gesso afim de reproduzir o processo de obtenção da calota.

Se o *feedback* da equipe médica for negativo, novos ajustes serão feitos na etapa de reconstrução craniana, reimpressos e reenviados para a avaliação médica.

3.2.8 Avaliação do planejamento cirúrgico

Os resultados apresentados da análise geométrica do encaixe da interface calota/crânio tem relação direta com os procedimentos cirúrgicos. Com o planejamento adequado, podem ser indicadas possíveis regiões que devem ser removidas da estrutura óssea craniana antes da fixação da calota afim de facilitar o encaixe, regiões com espaços vazios entre calota e crânio que podem ser evitadas para prevenir infecções por acúmulo de líquidos e todo o processo de customização que as técnicas de modelagem e impressão permitem. Estes resultados podem ser apresentados e estudados pela equipe cirúrgica de forma pré-operatória e com baixo custo.

No presente trabalho serão apresentados estudos das “falhas geométricas” que possam evitar problemas construtivos das próteses cranianas e propiciar informações e modelos para o planejamento cirúrgico.

Estes tipos de análise, além de diminuir a taxa de rejeição das próteses devido a sua melhor construção e encaixe, pode diminuir consideravelmente o tempo do tratamento do paciente, bem como o de cirurgia, prover ao corpo clínico modelos de treinamento cirúrgico e acadêmico com as geometrias reais do caso em estudo, dentre outros benefícios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta as etapas executadas para o desenvolvimento do trabalho.

4.1 OBTENÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

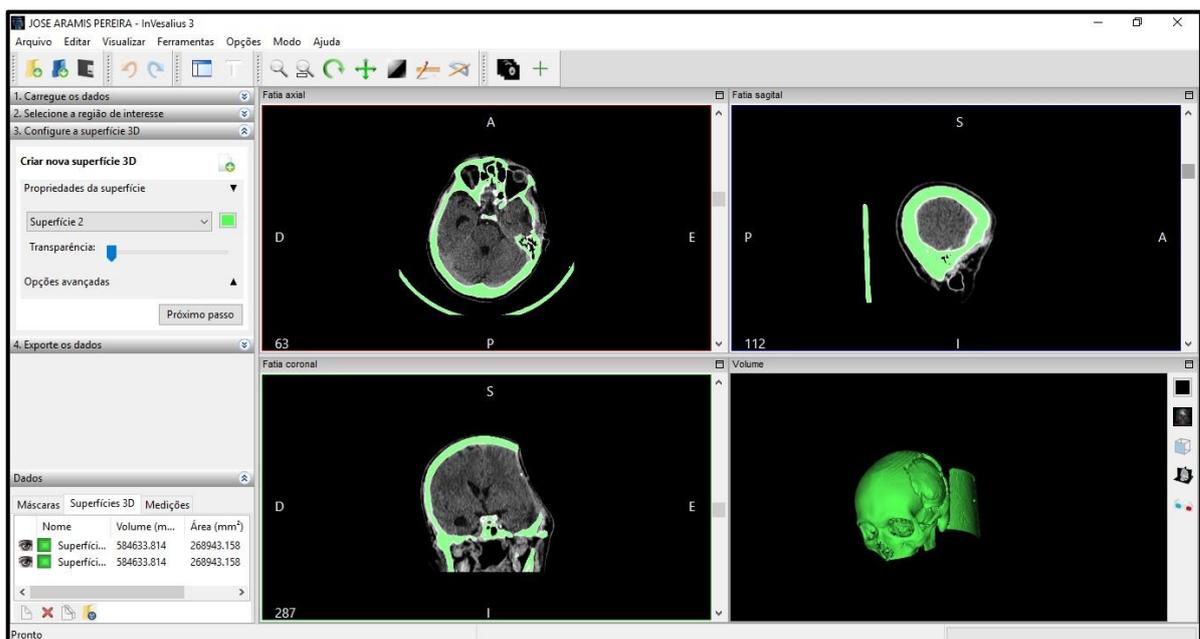
Os casos apresentados ao longo do capítulo quatro foram disponibilizados pelo Grupo de Ensino e Pesquisa do Grupo Hospitalar Conceição de Porto Alegre. Um total doze casos foram analisados onde oito destes já haviam sido submetidos a cirurgias reconstrutivas. Os outros quatro casos foram enviados de forma digital e aguardavam os procedimentos cirúrgicos de reconstrução.

Cada caso possui uma Tomografia Computadorizada e a extensão destes arquivos é DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*).

4.2 GERAÇÃO DO MODELO 3D DOS CRÂNIOS

Com as tomográficos de cada paciente em mãos iniciou-se o processo de geração dos modelos tridimensionais dos crânios utilizando o software InVesalius. De maneira geral as tomografias sempre são disponibilizadas com boa qualidade o que facilita o processo de geração do modelo tridimensional. Em casos sem alterações como o apresentado na Figura 20 o software de forma automatizada faz a geração do modelo tridimensional do exame importado.

Figura 19 - Geração do modelo 3D do crânio sem interferências.



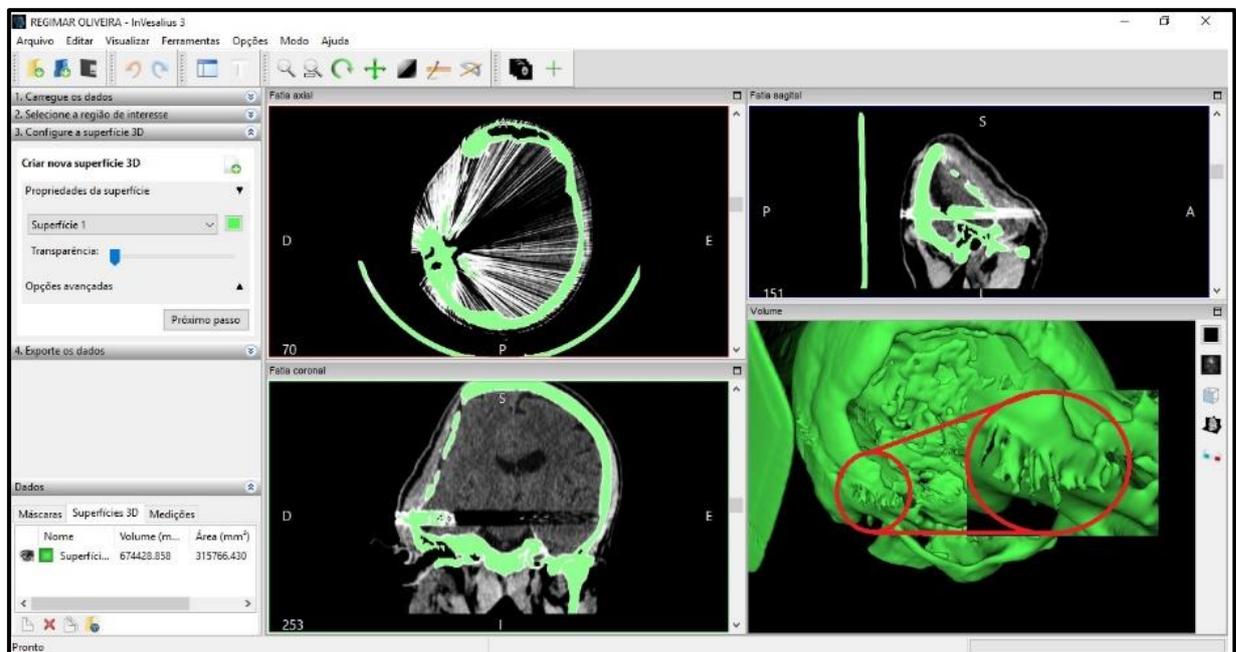
Fonte: AUTOR (2019).

Alterações no campo eletromagnético durante a tomografia podem gerar ruídos nas imagens tomográficas. Esses ruídos normalmente estão ligados a presença de artefatos metálicos.

Ruídos nas tomografias podem interferir na reconstrução da calota craniana, como o apresentado na Figura 21. A presença destes ruídos acabam gerando volumes inexistentes no modelo do crânio real, criando assim uma incerteza quanto a região da falha a ser considerada.

Interações são necessárias para a delimitação correta do crânio afim de evitar ao máximo esses ruídos.

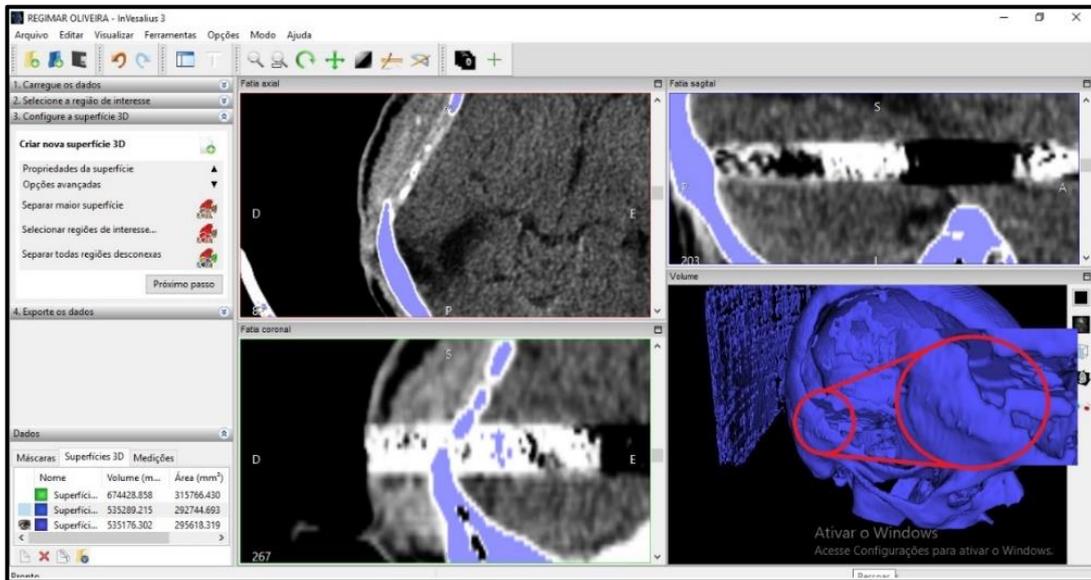
Figura 20 - Geração do modelo 3D do crânio com interferências.



Fonte: AUTOR (2019).

Nestes casos de alterações nas regiões de contorno são necessários ajustes na função limiar bem como a customização manual da máscara demarcação Figura 22.

Figura 21 - Geração do modelo 3D do crânio com interferências corrigido.



Fonte: AUTOR (2019).

Com essas considerações foi possível gerar os modelos tridimensionais dos crânios de todos os casos e convertê-los em formato STL (STereoLithography).

4.3 ANÁLISE GEOMÉTRICA DA SUPERFÍCIE DE ENCAIXE DO CRÂNIO E SELEÇÃO DE CASOS

Com os arquivos STL disponíveis, utilizou-se o *software* MAGICS (Materialise) para a primeira etapa, onde foi analisado o perfil da geometria na região de encaixe da calota craniana visando a identificação de possíveis problemas associados ao processo de reconstrução da prótese craniana, sua fabricação por meio do molde e questões associadas a cirurgia em si.

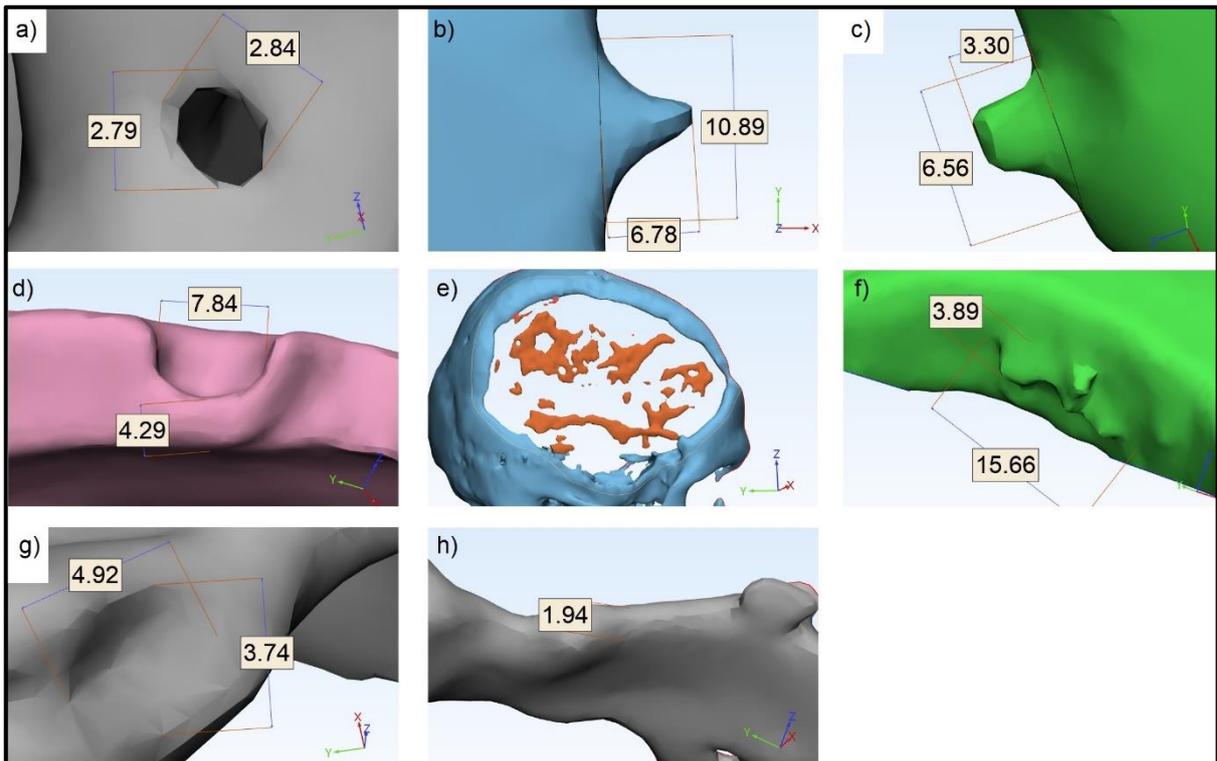
No total de doze casos, quatro não apresentaram elementos geométricos como saliências ou depressões que comprometessem o encaixe da calota craniana no crânio ou a extração da calota craniana.

Os outros oito casos apresentaram elementos geométricos ao longo da superfície de encaixe que podem interferir de maneira negativa na construção, na fabricação ou no encaixe da prótese final no crânio. Os elementos geométricos são descritos abaixo, e mostrados de forma visual na Figura 23 onde as medidas apresentadas estão em milímetros e seguindo a mesma numeração das alíneas abaixo:

- a) Depressões na geometria de encaixe, presente em dois casos.
- b) Perfis de saliência na superfície externa, presente em três casos.
- c) Perfis de saliência na superfície interna, presente em cinco casos.
- d) Corte parcial do crânio, presente em dois casos.

- e) Regiões de calcificações, presente em um caso.
- f) Saliências na geometria de encaixe, presente em presente em quatro casos.
- g) Rebaixos na geometria de encaixe, presente em dois casos.
- h) Regiões de espessura fina (varia entre 1,00mm e 2,5mm), presente em cinco casos.

Figura 22 - Elementos geométricos presentes na estrutura craniana em milímetros.



Fonte: AUTOR (2019).

4.4 PROJETO, FABRICAÇÃO E MONTAGEM DA CALOTA CRANIANA

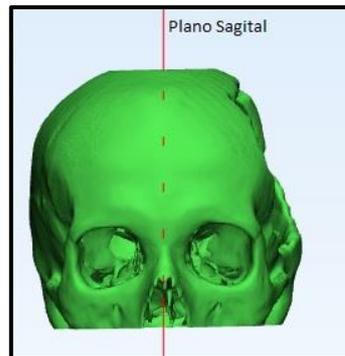
Nesta seção além de serem apresentadas as principais técnicas para a construção da calota craniana digital, são considerados pontos que podem auxiliar posteriormente na correção de falhas geométricas apresentadas na estrutura de encaixe da calota craniana. Além disso, é nesta etapa ao qual é definido a forma da calota craniana, tendo relação direta com os resultados estéticos finais.

As técnicas de reconstrução apresentadas nas subseções seguintes foram utilizadas para todos os casos estudados e em todos os casos necessários foram necessário refazer mais de uma vez alguns dos passos para contornar problemas na estrutura de encaixe do crânio, como o caso de furos, cortes e outras falhas que serão apresentadas posteriormente.

4.4.1 Posicionamento do plano sagital

O plano sagital (Figura 24) é importante para a criação do eixo de simetria, ao qual o crânio será espelhado. Quanto melhor o seu posicionamento em relação a linha central, mais facilitada será a construção das linhas guia posteriormente, o que pode garantir formas mais naturais de contorno craniano. Os planos já vem pré-determinados dos exames de tomografia.

Figura 23 - Plano Sagital posicionado no eixo de simetria do crânio.



Fonte: AUTOR (2019).

Para um posicionamento adequado do plano sagital foi necessário um ajuste da posição do modelo digital do crânio em relação ao eixo de coordenadas global do *software* MAGICS. Com isso, a criação do plano sagital pôde ser feita com um plano paralelo ao eixo de coordenadas Y (Figura 24).

O posicionamento do modelo digital do crânio em relação ao eixo de coordenadas global do *software* MAGICS vai além de auxiliar o posicionamento do plano sagital auxiliará no posicionamento de cortes posteriormente, principalmente devido a possibilitar o uso das funções de vistas do *software* MAGICS. O posicionamento do plano pode ser feito através das ferramentas de translação e rotação.

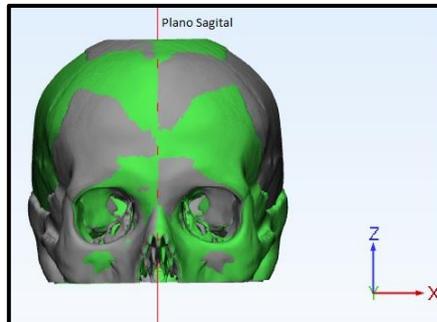
4.4.2 Espelhamento e posicionamento do crânio

Após a criação e posicionamento do plano sagital o crânio foi espelhado. Quando necessário, foram feitos mais ajustes quanto ao posicionamento dos modelos (modelo original e modelo espelhado).

Apesar de usar-se simetria craniana para o espelhamento, o crânio não é perfeitamente simétrico. Para um desenho de contorno craniano mais natural possível, diferentes posicionamentos em diferentes pontos podem ser necessários entre os modelos digitais (crânio original e crânio espelhado). Este posicionamento se faz através das ferramentas de translação e rotação do *software* de manipulação (MAGICS). Essa avaliação será feita no momento de construção das linhas guias, posteriormente.

Se bem posicionado o plano sagital, pode-se reparar uma sobreposição de cores entre os modelos (Figura 25).

Figura 24 - Sobreposição do crânio original (verde) e espelhado (cinza).

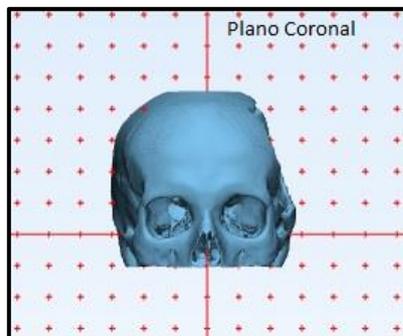


Fonte: AUTOR (2019).

4.4.3 Posicionamento do plano coronal

O plano coronal (Figura 26) é posicionado noventa graus em relação ao plano sagital.

Figura 25 - Plano Coronal



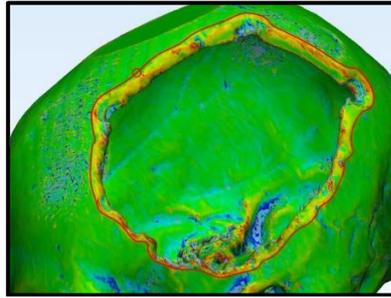
Fonte: AUTOR (2019).

O plano coronal é o plano onde são desenhadas as linhas guias que constroem a estrutura da calota craniana e, dependendo do tamanho da falha, podem ser necessários diferentes planos em diferentes posições para garantir o contorno da calota o mais natural possível.

4.4.4 Geração de curvas de contorno de falha

As curvas de contorno de falha servem para demarcar a região de interesse para a posterior construção da superfície externa da calota craniana. Para ajudar a identificar os limites de contorno, utilizou-se uma análise de curvatura máxima aplicada ao crânio (Figura 27).

Figura 26 - Demarcação Curvas de contorno de falha.



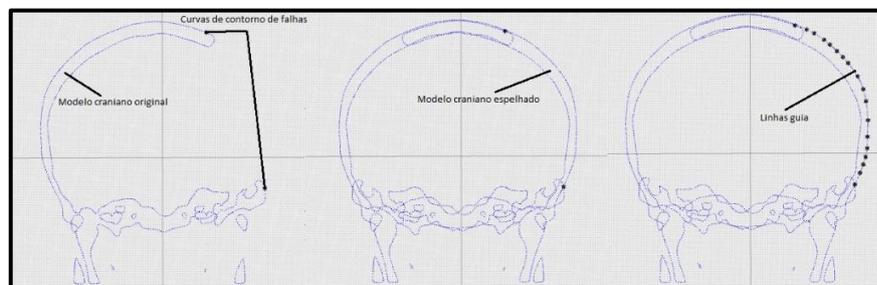
Fonte: AUTOR (2019).

As curvas de contorno de falha sempre são maiores que as falhas cranianas e essa diferença é corrigida por meio de funções de subtração por operações booleanas após a construção da superfície externa da calota craniana.

4.4.5 Geração de linhas guia

Utilizou-se o plano coronal para sobrepor o modelo original e espelhado do crânio junto da curva de contorno de falha em um *sketch*, onde foi desenhado o contorno de falha por meio de curvas *splines* (linhas guia) para posterior reconstrução geométrica (Figura 28).

Figura 27 - Geração de linhas guia



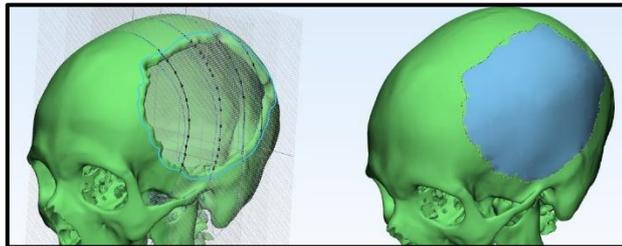
Fonte: AUTOR (2019).

Conforme o tamanho de falha, foram necessários diversos planos coronais, posicionamentos dos modelos do crânio (modelo original e espelhado) e, conseqüentemente, *sketchs* com diferentes linhas guia.

4.4.6 Geração da calota craniana

Utilizando as linhas guia (*splines*) e a curva de contorno de falha, gera-se de forma automatizada através do *software* MAGICS a superfície externa da calota craniana digital (Figura 29).

Figura 28 - Geração da calota craniana.

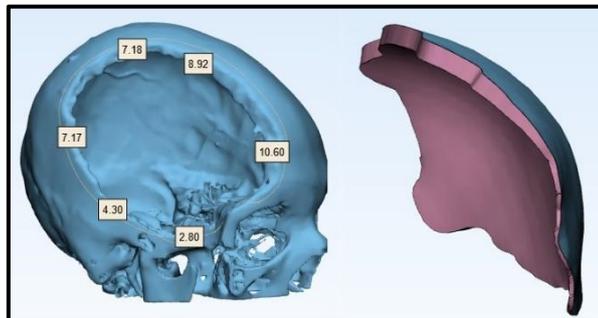


Fonte: AUTOR (2019).

Com a superfície externa da calota craniana criada inicia-se o processo de acabamento, onde o primeiro passo é a geração da espessura da calota. O crânio humano apresenta espessuras distintas ao longo de sua estrutura, podendo variar em mais de um centímetro de uma região para outra. Utilizar espessuras não variáveis para construção de calotas cranianas restringem a espessura máxima da calota a espessura mínima do crânio. Em alguns casos, isso gera calotas muito finas que tem menor resistência mecânica, menor peso e que geram vazios equivalentes a espessura variável do crânio em sua parte interna.

Para gerar a espessura variável da calota craniana, são realizadas medidas ao longo da estrutura craniana e, após, utilizada a função off-set variável (Figura 30).

Figura 29 - Medidas da espessura do crânio para gerar a calota craniana.



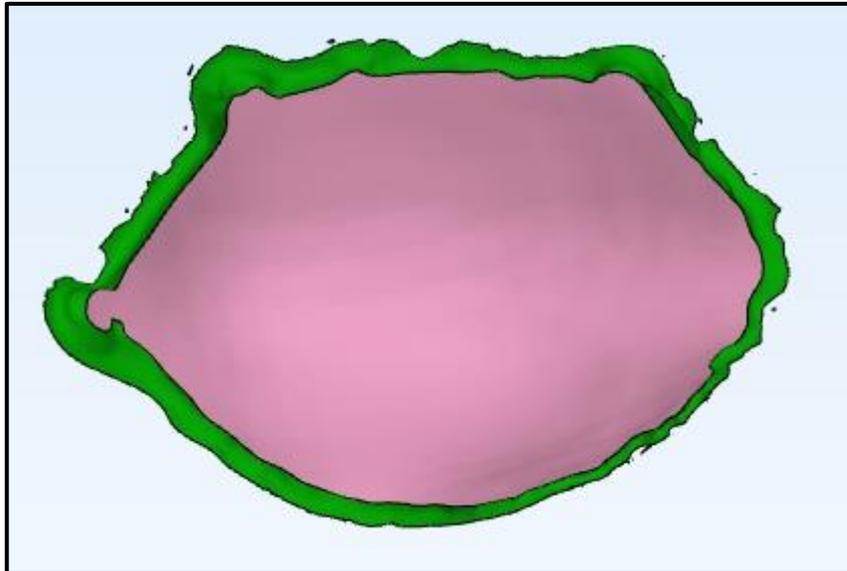
Fonte: AUTOR (2019).

Para a geração da estrutura de encaixe da calota craniana, utiliza-se a função de subtração por operações booleanas. A função de subtração por operações booleanas consiste em cortar regiões onde existam interferência entre dois corpos parcialmente sobrepostos.

O processo de subtração por operações booleanas acaba gerando falhas geométricas na superfície de encaixe da calota craniana (Figura 31) que tem relação direta com as falhas apresentadas na avaliação geométrica da superfície de encaixe do crânio. O encaixe perfeito gerado pela subtração por operações booleanas nos casos onde o crânio apresenta qualquer alteração na superfície de encaixe, reflete (espelha) na calota os elementos geométricas encontrados no crânio, por exemplo se no crânio existia uma

depressão após a geração da calota será encontrada uma saliência. Com isso inicia-se a análise geométrica de encaixe da calota craniana.

Figura 30 - Superfície de encaixe gerada por operações booleanas.



Fonte: AUTOR (2019).

4.4.7 Fabricação da calota craniana

Após o projeto da calota craniana são fabricados moldes que são utilizados pelo cirurgião durante a cirurgia de reconstrução para a geração do modelo físico em cimento ósseo. O molde é construído através da calota projetada, utilizando-a para a geração das cavidades superiores e inferiores através do *software* Magics (MATERIALISE).

Em trabalhos anteriores desenvolvidos pelo LPRA da UCS, foram encontradas dificuldades quanto a extração das calotas cranianas destes moldes. Conforme os autores Sordi (2018) e Castilhos (2018) as calotas cranianas estudadas apresentaram elementos geométricos em sua estrutura de encaixe que acabaram prejudicando a extração da calota craniana do molde.

Estes elementos geométricos mencionados nos estudos progressos ocorrem devido ao método de geração adotado para a reconstrução da calota craniana e são relativos aos elementos geométricos apresentados anteriormente encontrados no modelo craniano. Diferentes ações podem ser tomadas a fim de eliminar tais elementos de maneira que não interfiram no encaixe e geração da calota craniana através do molde. Na seção 4.5 são apresentados algumas sugestões para defeitos encontrados nos casos avaliados.

4.4.8 Montagem da calota craniana

Durante a cirurgia, após a geração da calota craniana em cimento ósseo, um outro aspecto que pode ser afetado pelos elementos geométricos presentes nos modelos (calota craniana e crânio) é a montagem da calota no crânio. Quando espalhados ao redor da superfície de encaixe, estes elementos geométricos podem criar condições de encaixe muito específicas, o que dificulta o encaixe da calota no crânio e em alguns casos pode até mesmo impossibilitar essa montagem.

4.5 ANÁLISE DOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS NO CONTORNO DA CALOTA CRANIANA

Após a calota craniana ter sido modelada, foi iniciado o processo de acabamento e a análise da superfície de encaixe da prótese. Pode-se fazer uma relação entre os elementos geométricos encontrados na avaliação do crânio anteriormente com os elementos geométricos encontrados na superfície de encaixe das calotas cranianas. O estudo destes elementos geométricos, bem como as técnicas de contorno, podem auxiliar o processo cirúrgico como um todo, uma vez que as calotas encaixam-se mais facilmente e são extraídas do molde com maior êxito.

4.5.1 Avaliação de espessura da calota craniana

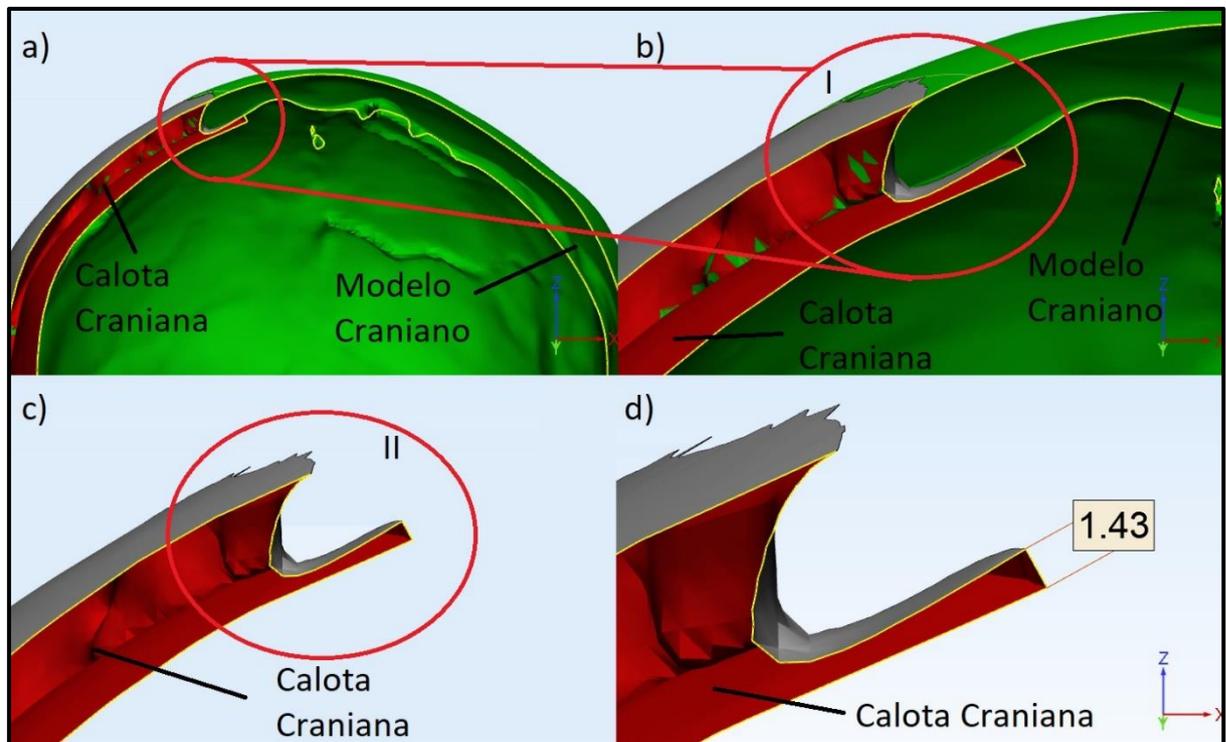
Para avaliar a espessura da calota craniana, utilizou-se a vista em cortes seccionados com o plano coronal ao longo da falha craniana.

Como mencionado anteriormente, o crânio apresenta espessuras variáveis ao longo de sua estrutura. Portanto, devem ser evitadas regiões onde a espessura da calota ultrapassa a espessura do crânio na superfície de encaixe, uma vez que regiões com espessuras superiores às do crânio podem interferir de maneira negativa no órgão interno e assim aumentar o risco de infecção e rejeição da calota craniana.

A Figura 32 no item a, mostra o encaixe geração pelo método utilizado no trabalho. Nesse caso, percebe-se que parte da calota reconstituída é preenchida na parte de baixo do crânio (elemento I no item b da figura). Nesse caso, além de ser um elemento que implica numa difícil fabricação pelo molde e de difícil encaixe, o mesmo também cria uma espessura além da espessura do crânio (elemento II, no item c da figura). Por essa razão, admitir que a espessura da calota deva ser entre um a três milímetros menor que a espessura da falha craniana pode evitar qualquer contato com os órgãos internos, reduzindo assim os riscos de rejeição. O item d da Figura 32 mostra as medidas tomadas através do *software* de

manipulação (MAGICS), onde a espessura total da calota craniana chega a ultrapassar em 1,43mm a espessura do crânio.

Figura 31 - Avaliação da espessura da calota craniana.



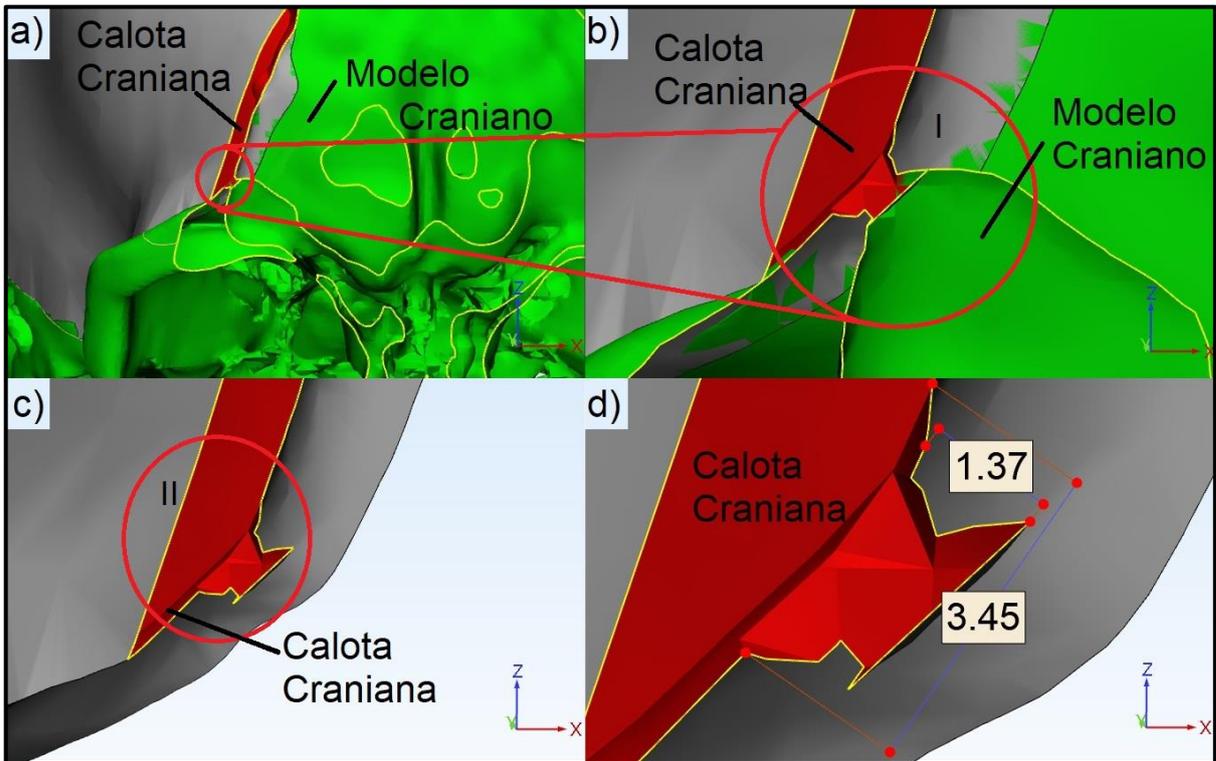
Fonte: AUTOR (2019).

4.5.2 Avaliação de regiões de depressões

Regiões da superfície de encaixe do modelo craniano que apresentaram elementos geométricos tipo depressões ou furos, acabam gerando saliências como pontas, relevos e outras formas distintas na superfície de encaixe da calota craniana. Estas saliências geradas podem dificultar a remoção da calota craniana do molde e, posteriormente, o encaixe da calota no paciente durante a cirurgia.

A Figura 33 no item a, mostra o encaixe geração pelo método utilizado no trabalho. Nesse caso, percebe-se que uma região da calota reconstituída preenche uma parte vazia (depressão ou buraco) do crânio (elemento I no item b da figura). Nesse caso, a existência deste elemento (saliência) implica numa difícil fabricação pelo molde e de difícil encaixe (elemento II, no item c da figura). O item d da Figura 33 mostra as medidas tomadas através do *software* de manipulação, onde o elemento geométrico apresenta 1,37mm de altura e 3,45mm de largura.

Figura 32 - Elementos geométricos do crânio e da calota.

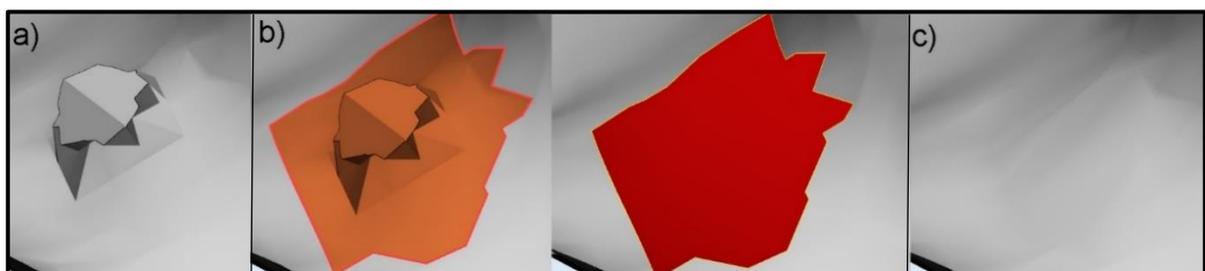


Fonte: AUTOR (2019).

Como trata-se de uma depressão na estrutura craniana, a não existência das saliências impacta de maneira positiva do ponto de vista do encaixe entre crânio e calota e do ponto de vista da extração do molde. Assim, a correção destes elementos geométricos pode ser feita diretamente no modelo digital da calota craniana. Para tanto, sugere-se o corte destes elementos geométricos com o cuidado de manter a superfície de encaixe da calota o mais homogênea possível.

A Figura 34 no item a, mostra a saliência na superfície de encaixe da calota craniana. Nesse caso, para corrigir essas saliências, sugere-se o corte da região do elemento geométrico (item b da figura). O item c da figura, mostra a região que apresentava a saliência após o tratamento corretivo.

Figura 33 - Correção de saliências na superfície de encaixe da calota craniana.



Fonte: AUTOR (2019).

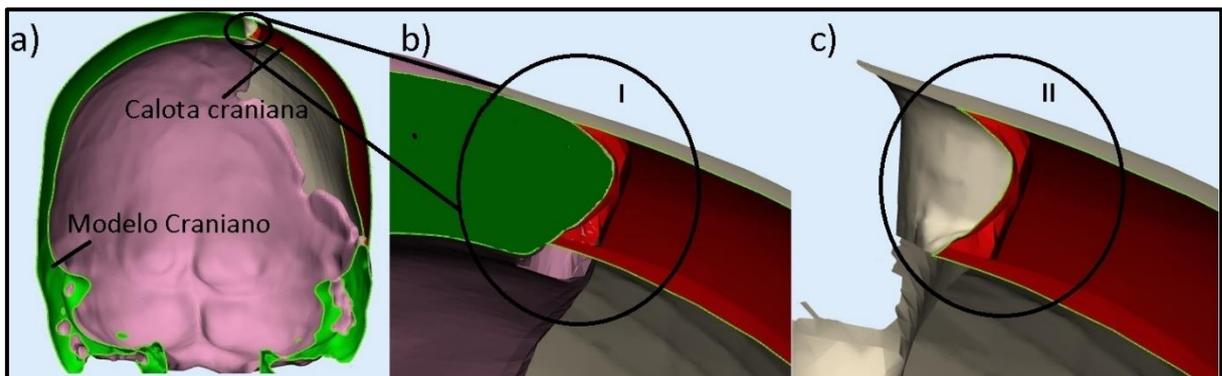
Para o cirurgião evitar o vazio deixado entre calota e crânio, uma alternativa é o preenchimento das depressões com cimento ósseo durante o procedimento cirúrgico de reconstrução craniana.

4.5.3 Avaliação de regiões de perfis de saliência na superfície externa

Regiões da superfície de encaixe do modelo craniano que apresentaram elementos geométricos tipo perfis de saliência na superfície externa acabam gerando depressões (negativos) na superfície de encaixe da calota craniana.

A Figura 35 no item a, mostra o encaixe geração pelo método utilizado no trabalho. Nesse caso, percebe-se que parte da calota reconstituída é preenchida em sua superfície de encaixe com o perfil de saliência existente no modelo craniano (elemento I no item b da figura). Nesse caso, além de ser um elemento (negativo) que implica numa difícil fabricação pelo molde é de difícil encaixe (elemento II, no item c da figura).

Figura 34 - Elementos geométricos do crânio e da calota.

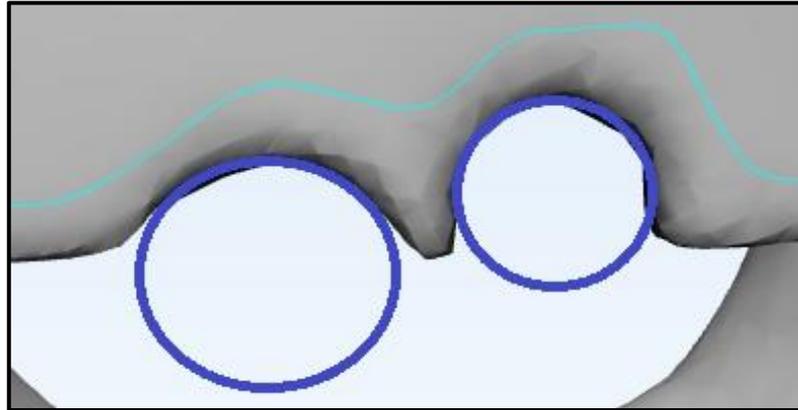


Fonte: AUTOR (2019).

Perfis de saliência na superfície externa de encaixe do crânio estão relacionados a furos muito próximos um do outro, decorrentes dos métodos de extração da calota craniana adotados durante a cirurgia de descompressão. Estes perfis podem ter dimensões variadas.

A Figura 36 demonstra o processo de geração de um tipo de perfil de saliência devido a furos muito próximos um do outro.

Figura 35 - Relação de perfis de saliência externa e furos muito próximos.



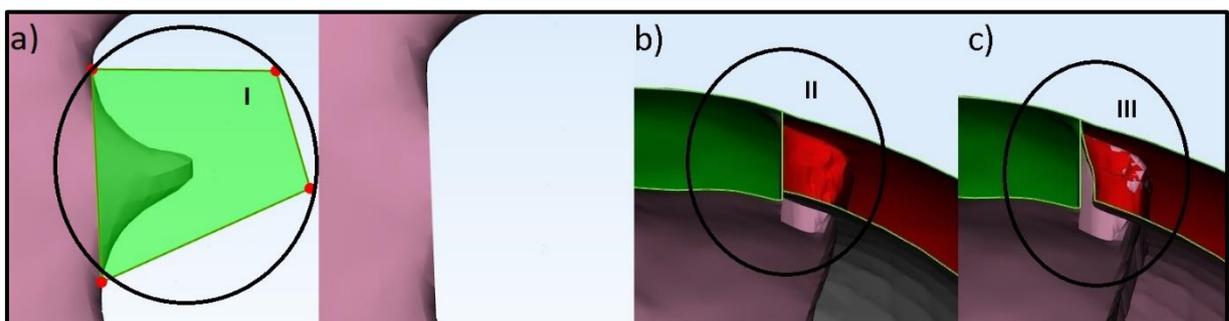
Fonte: AUTOR (2019).

O afastamento dos furos pode ajudar a evitar estas saliências. Além disso, evitar interrupção durante o corte do crânio na cirurgia ajuda a evitar a formação de perfis de saliência nas extremidades.

Para corrigir as depressões na superfície de encaixe da calota craniana, sugere-se o corte destes elementos geométricos (perfis de saliência) ainda no modelo craniano, antes da geração da calota. Assim, no momento da subtração por operações booleanas, os elementos geométricos (depressões) não serão gerados na superfície de encaixe final da calota craniana. Nesta região do crânio onde foi efetuado o corte, faz-se um chanfro, suavizações e reduções localizadas na superfície de encaixe da calota craniana de maneira a criar uma folga interna.

A Figura 37 mostra o processo de correção de perfis de saliência. Nesse caso, para a correção das saliências sugere-se o corte da região do elemento geométrico no modelo craniano (elemento I no item a da figura). Após efetuado o corte, a calota é reconstituída e é feita uma análise da região editada utilizando a vista seccionada com o plano coronal (elemento II no item b da figura). Nesse caso, para auxiliar o encaixe, evitando prováveis diferenças entre o modelo computacional e o modelo real, criou-se uma folga local entre crânio e calota utilizando chanfro, suavização e redução local (elemento III no item c da figura).

Figura 36 - Correção para evitar depressões na superfície de encaixe da calota.



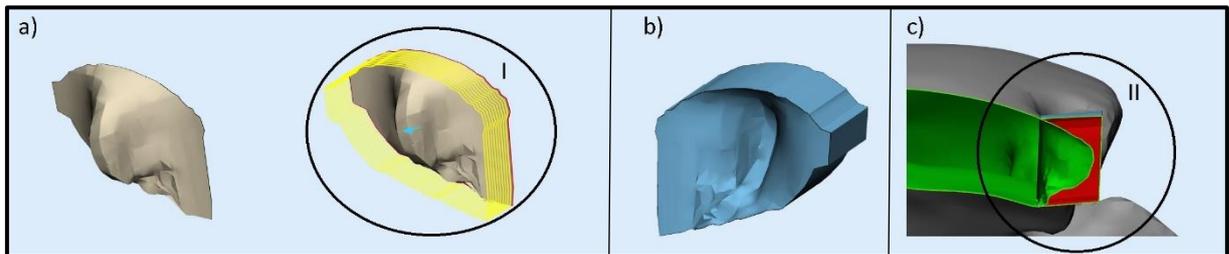
Fonte: AUTOR (2019).

Para auxiliar o cirurgião a fazer o corte do elemento geométrico (perfil de saliência) na estrutura craniana, propõe-se a criação de um gabarito para demarcação da região a ser cortada do crânio. O cirurgião irá posicionar este gabarito sobre o elemento geométrico (perfil de saliência) do crânio para realizar o corte o mais similar possível ao feito de maneira digital durante o modelamento da calota craniana.

Para modelar o gabarito, utilizou-se a região cortada digitalmente do crânio e criou-se um molde que pode ser encaixado perfeitamente sobre a falha utilizando a função de subtração por operações booleanas.

A Figura 38 mostra o processo de geração do gabarito que irá auxiliar o cirurgião a fazer o corte do perfil de saliência do modelo craniano. Nesse caso, utiliza-se o próprio perfil de saliência cortado do modelo craniano para a geração do gabarito (elemento I no item a da figura). O item b da figura mostra o gabarito gerado. Nesse caso, uma análise do encaixe do gabarito sobre o perfil de saliência do crânio é feita através da vista seccionada com o plano coronal (elemento II no item c da figura).

Figura 37 - Geração do gabarito de marcação de corte.



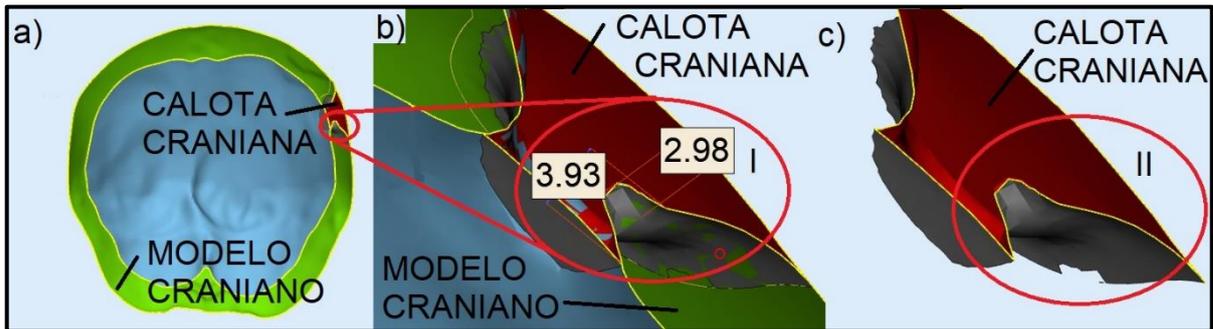
Fonte: AUTOR (2019).

4.5.4 Avaliação de regiões de perfis de saliência na superfície interna

Regiões da superfície de encaixe do modelo craniano que apresentaram elementos geométricos tipo perfis de saliência na superfície de encaixe interna acabam gerando depressões (negativos) na superfície de encaixe da calota craniana.

A Figura 39 no item a, mostra o encaixe geração pelo método utilizado no trabalho. Percebe-se, nesse caso, que parte da calota reconstituída é preenchida em sua superfície de encaixe com o perfil de saliência existente no modelo craniano, onde apresenta uma profundidade de 2,98 mm e altura de 3,93 mm (elemento I no item b da figura). O elemento (negativo) implica numa difícil fabricação pelo molde e também um difícil encaixe (elemento II, no item c da figura).

Figura 38 - Elementos geométricos do crânio e da calota.



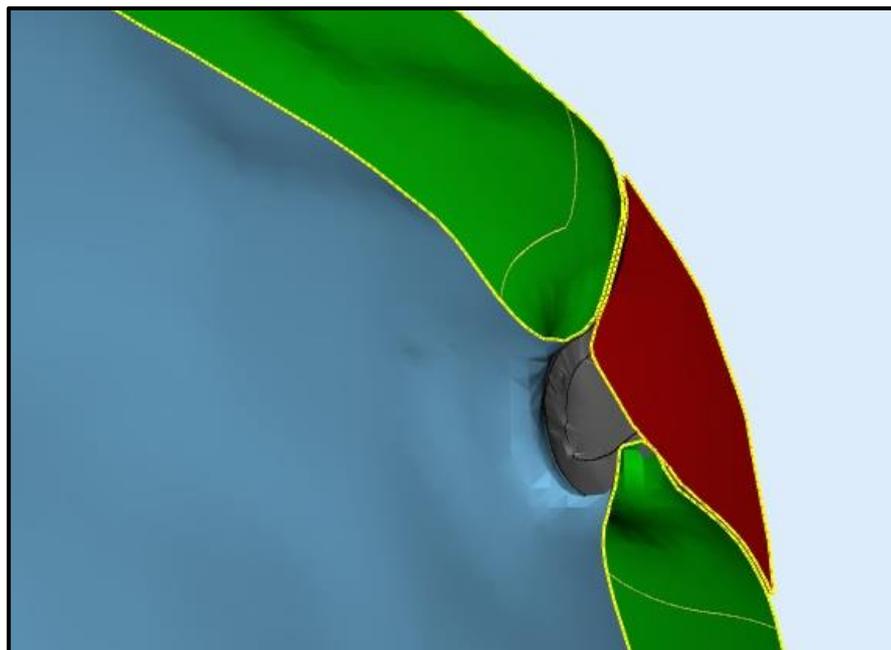
Fonte: AUTOR (2019).

Perfis de saliência na superfície interna de encaixe do crânio podem ser geradas devido a calcificações encontradas na região da dura-máter e aos processos de remoção da calota craniana durante a cirurgia. Estes fatos devem ser analisados junto a equipe médica.

As depressões na superfície interna de encaixe da calota craniana podem ser evitadas de duas maneiras: a primeira é um processo idêntico ao processo de correção para elementos geométricos do tipo perfis de saliência na superfície externa de encaixe do crânio, onde o perfil de saliência é removido por meio de cortes antes da geração da calota craniana; a segunda é através da redução da espessura da calota craniana feita de forma local onde é apresentado o elemento geométrico (perfil de saliência de encaixe interna do crânio).

A Figura 40 mostra a vista seccionada com o plano coronal do encaixe entre modelo craniano e calota com a espessura reduzida.

Figura 39 - Correção do perfil de saliência interno na espessura da calota.



Fonte: AUTOR (2019).

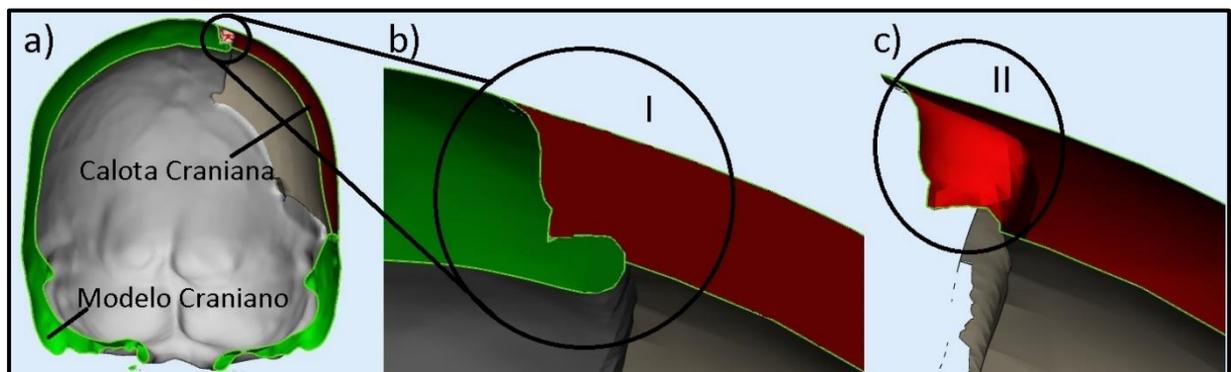
O método de redução da espessura é mais recomendado, pois não necessita de procedimentos cirúrgicos auxiliares, porém, em regiões onde o modelo craniano apresenta baixa espessura, pode ser necessário o método por cortes para evitar regiões muito finas. Um aspecto negativo deste tipo de correção é a geração de vazios referentes a variação de espessura entre estrutura craniana e calota craniana nos pontos onde forem encontrados estes tipos de elementos geométricos (perfis de saliência na superfície interna de encaixe do crânio).

4.5.5 Avaliação de regiões de furos parciais

Regiões da superfície de encaixe do modelo craniano que apresentaram elementos geométricos tipo furos parciais acabaram gerando regiões com geometrias complexas (saliências e depressões) na superfície de encaixe da calota craniana (Figura 41).

A Figura 41 no item a, mostra o encaixe gerado pelo método utilizado no trabalho. Percebe-se que parte da calota reconstituída preenche o furo parcial existente no modelo craniano (elemento I no item b da figura). Os elementos gerados na calota craniana apresentam formas complexas, como saliências e depressões, o que implica numa difícil fabricação pelo molde e num difícil encaixe (elemento II, no item c da figura).

Figura 40 - Elementos geométricos do crânio e da calota.



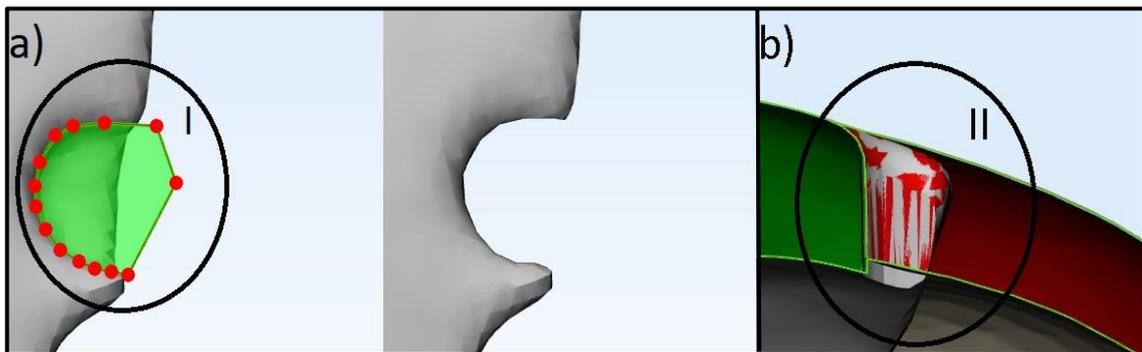
Fonte: AUTOR (2019).

As regiões com furos parciais podem gerar problemas para o encaixe da prótese no crânio, bem como dificultar a extração do molde. Em geral, devido a geometria da ferramenta de corte (broca), a superfície parcialmente cortada tem formato irregular, o que impossibilita o encaixe justo da calota craniana, sendo necessária uma redução de espessura nestes pontos.

Para evitar redução de espessura, antes da construção da calota craniana, um corte com mesmo diâmetro da broca utilizada na cirurgia é feito de maneira a eliminar o elemento geométrico (furo parcial) da superfície de encaixe do modelo craniano.

A Figura 42 mostra o processo proposto para correção de furos parciais. Nesse caso, sugere-se o corte da região do elemento geométrico (furo parcial) no modelo craniano (elemento I no item a da figura). Após efetuado o corte do perfil de saliência no modelo craniano, a calota é reconstituída e é feita uma análise da região de encaixe onde o crânio apresentava o perfil de saliência utilizando a vista seccionada com o plano coronal (elemento II no item b da figura).

Figura 41 - Correção para furos parciais encontrados na estrutura craniana.



Fonte: AUTOR (2019).

Para a calota encaixar na falha craniana, o médico deverá usar o mesmo diâmetro de broca para terminar o furo durante o procedimento cirúrgico de reconstrução craniana.

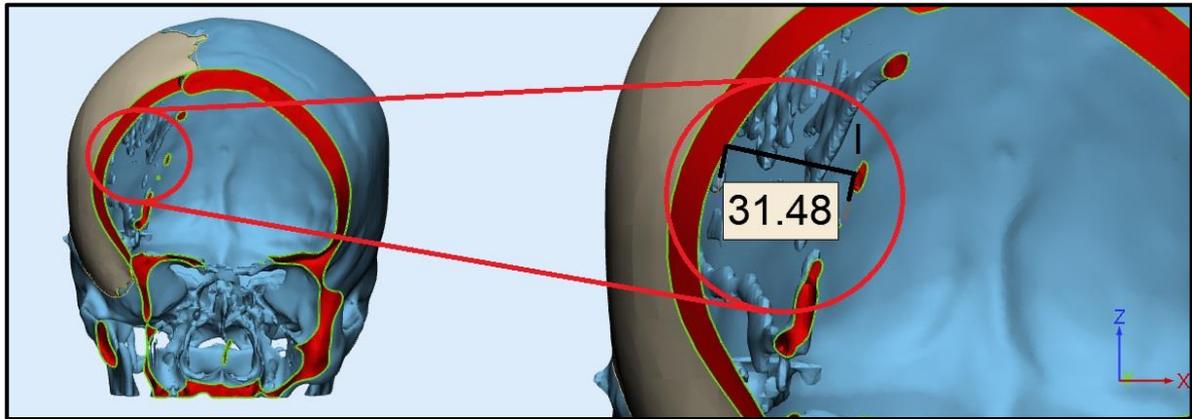
O cirurgião deve evitar deixar os furos incompletos, o que ajuda na precisão das calotas durante o processo de reconstrução digital, bem como pode aumentar a espessura máxima da calota craniana nesses pontos. Caso sejam necessários, gabaritos também podem ser construídos para auxiliar a furação ou demarcação da região.

4.5.6 Avaliação de regiões com calcificações na estrutura interna do crânio

Um dos casos estudados apresentou calcificações da dura-máter. Devido a problemas com infecções anteriores, foi solicitado pela equipe médica que a calota tivesse a espessura interna estendida até as calcificações para reduzir os vazios internos de forma a impedir o acúmulo de líquidos e, conseqüentemente, reduzir o risco de infecção.

A Figura 43 no item a, mostra um corte seccionado com o plano coronal, onde são identificados calota craniana, modelo craniano e as calcificações. Nesse caso, a distância "A", destacada no elemento I do item b é a distância que caracteriza o vazio entre a calota e as calcificações do modelo craniano.

Figura 42 - Correções para calcificações internas do crânio.

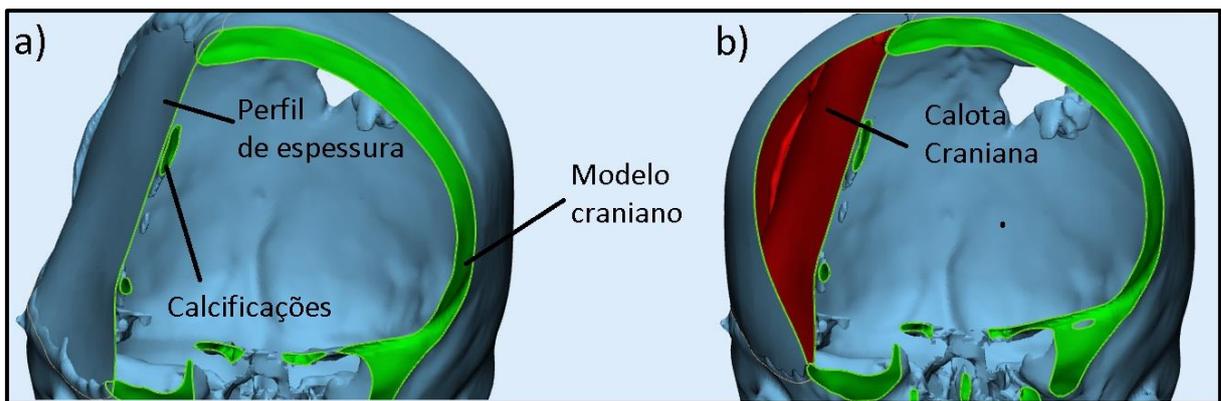


Fonte: AUTOR (2019)

Utilizou-se das técnicas construtivas apresentadas anteriormente para criar um perfil de espessura das regiões com calcificações. Com o perfil criado, aumentou-se a espessura da calota de maneira a ultrapassar o perfil das calcificações e, então, através da função de redução por operações booleanas chegou-se a estrutura necessária para a calota craniana ideal.

A Figura 44 no item a, mostra o perfil de espessura criado utilizando como guia as calcificações existentes no modelo craniano. Nesse caso, utilizou-se o perfil de espessura criado como limite para a espessura total da calota (item b da figura).

Figura 43 - Geração da calota craniana com espessura interna



Fonte: AUTOR (2019).

Em casos como esse a calota apresenta maior peso e necessita de muito mais material (cimento ósseo) para produção. Regiões calcificadas necessitam de acompanhamento médico para a escolha da melhor técnica para o tratamento da falha, podendo ser ela a remoção das regiões calcificadas, desconsiderar tais regiões diminuindo a espessura da calota ou considera-las como limite para o aumento da espessura da calota.

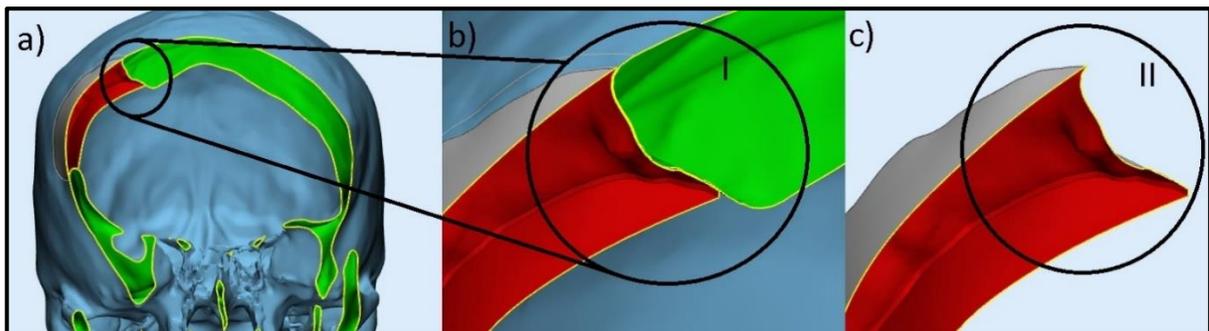
4.5.7 Avaliação de perfis de saliência na geometria de encaixe

Regiões da superfície de encaixe do modelo craniano que apresentaram elementos geométricos tipo perfis de saliência superfície na geometria de encaixe acabam gerando depressões (negativos) na superfície de encaixe da calota craniana.

Diferente dos perfis de saliência externas e internas que compreendem os cantos da superfície de encaixe da calota craniana, os elementos geométricos do tipo saliências na geometria de encaixe são localizadas no centro da superfície de encaixe da calota.

A Figura 45 no item a, mostra o encaixe geração pelo método utilizado no trabalho. Nesse caso, percebe-se que parte da calota reconstituída é preenchida em sua superfície de encaixe com o perfil de saliência existente no modelo craniano (elemento I no item b da figura). Nesse caso, além de ser um elemento (negativo) que implica numa difícil fabricação pelo molde é de difícil encaixe (elemento II, no item c da figura).

Figura 44 - Elementos geométricos do crânio.



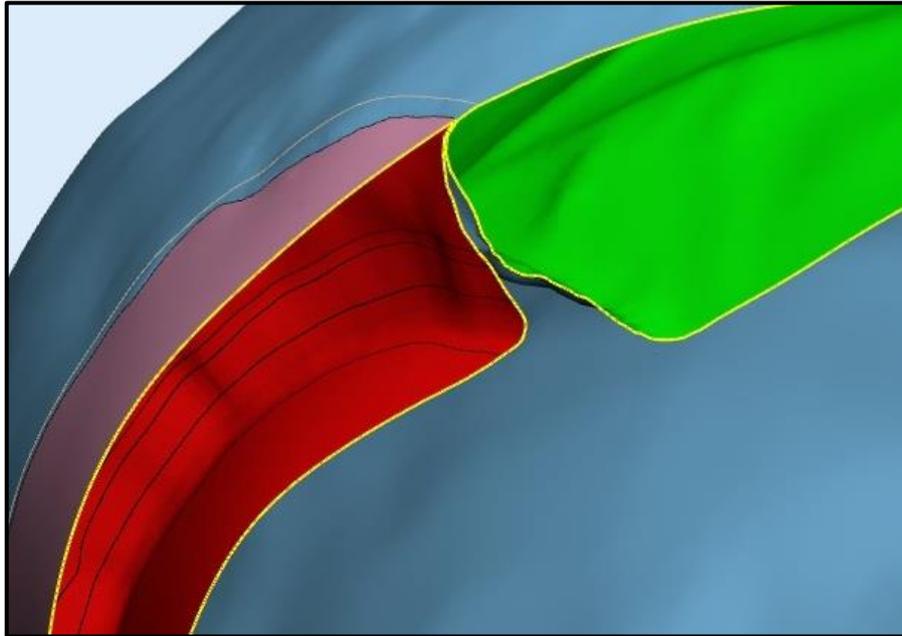
Fonte: AUTOR (2019).

Em casos de falhas muito pequenas que precisam ser extraídas, a criação de gabaritos torna-se impraticável.

Para correção dos perfis de saliência, é necessário combinar as técnicas antes apresentadas, onde cortes são feitos na superfície de encaixe do crânio de maneira a excluir o elemento para então iniciar a geração da calota craniana. Então diminui-se localmente a geometria de contorno da calota craniana através de chanfros, reduções e suavizações apresentadas anteriormente. No fim dos processos, a calota não encosta na região onde é apresentada a saliência.

A Figura 46 mostra o encaixe entre calota craniana e modelo craniano após as correções sugeridas, onde utilizou-se chanfros, suavizações e reduções locais, deixando uma folga entre calota e crânio na região onde o elemento geométrico (perfil de saliência na geometria de encaixe) era apresentado.

Figura 45 - Correção para saliências na geometria de encaixe craniana.



Fonte: AUTOR (2019).

É importante que o cirurgião evite deixar saliências presentes na geometria de encaixe do crânio na hora da extração da calota.

Os principais aspectos positivos deste caso é que o encaixe da calota se faz de forma mais facilitada e não necessita de procedimentos complementares. O aspecto negativo é que uma região de vazios é deixada devido a necessidade de que não haja contato entre o perfil de saliência na região de encaixe do crânio e a calota craniana.

4.5.8 Avaliação médica / planejamento cirúrgico

Com os resultados apresentados em mãos foi marcada uma reunião com o doutor Paulo Worm, do Grupo Hospitalar Conceição (GHC) para discutir as soluções propostas bem como entender um pouco melhor como o processo cirúrgico é feito em si.

Sobre as regiões com espessuras finas, não existem espessuras médias que podem ser adotadas. Conforme orientado pela equipe médica, o crânio apresenta espessuras finas na região da têmpora e estas são variáveis de paciente para paciente. A equipe ainda coloca que existem métodos de enxerto ósseo que podem ser adotados para a reconstrução craniana onde utilizam-se cortes da própria calota craniana extraída, porém nestas regiões finas (têmpora), estes métodos podem ser ineficientes devido a essas pequenas espessuras e tornam-se um desafio para o cirurgião.

Sobre as regiões onde são apresentadas depressões ou buracos na estrutura craniana podem ser tratadas pelo método proposto onde os elementos gerados são suprimidos na própria calota craniana.

Sobre as regiões com perfil de saliência na superfície externa, foram sugeridos cortes destes elementos geométricos no modelo craniano afim de facilitar o encaixe da calota bem como a extração do molde. Segundo a equipe médica, os cortes destas regiões podem ser feitos no momento da cirurgia reconstrutiva e os gabaritos de marcação sugeridos podem ajudar o cirurgião.

Sobre as regiões com perfil de saliência na superfície interna, foram sugeridos dois métodos de tratamento. O primeiro onde efetuam-se cortes das regiões no modelo craniano e o segundo onde reduz-se a espessura da calota craniana na região do elemento geométrico no modelo craniano. Segundo a equipe médica nestes casos o ideal é a redução da espessura da calota craniana. A equipe coloca que durante o processo de reconstrução a dura-máter pode ser “esticada” até a calota craniana por meio de fios preenchendo assim os vazios internos.

Sobre as regiões com furos parciais a equipe médica coloca que não trata-se de um procedimento comum o de não terminar os furos, porém, quando estes casos forem apresentados pode ser considerado a redução da espessura da calota craniana nestas regiões. Os processos utilizam brocas de diâmetro de quatorze milímetros.

Sobre as regiões com calcificações internas, a equipe médica coloca que são casos que devem ser tratados individualmente. Em geral a dura-máter pode ser esticada de maneira a preencher o vazio interno do crânio. Em casos onde as calcificações não permitam esticar a dura-máter, é necessário que a calota preencha este vazio. O processo ainda permite o corte das regiões calcificadas, porém é apenas utilizado como último recurso devido a exposição do órgão interno.

4.5.9 Quadro com relação de análise de elementos geométricos apresentados

Quadro 1 - Relação de análise de elementos geométricos

Análise	Elemento geométrico indesejado gerado	Método de análise	Método de contorno	Seção
Espessura total da calota craniana	Espessura da calota craniana superior a do crânio	Secção entre planos coronal e sagital	Refazer medidas de espessura do crânio e espessamento variável da calota craniana	4.5.1
Regiões de furos ou depressões no crânio	Saliências na calota craniana	Secção entre planos coronal e sagital	Selecionar região do elemento geométrico na calota craniana, deleta-lo e recriar superfície	4.5.2
Perfis de saliência na superfície externa do modelo craniano	Negativos ou depressões na superfície de encaixe da calota craniana	Secção entre planos coronal e sagital	Cortar região do crânio, recriar calota craniana do novo modelo craniano e usar a região cortada para geração de gabaritos de demarcação	4.5.3
Perfis de saliência na superfície interna do modelo craniano	Neagativos presentes na superfície de encaixe	Secção entre planos coronal e sagital	Redução da espessura total da calota craniana, de maneira a não tocar no elemento geométrico presente no crânio	4.5.4
Regiões de furos parciais no modelo craniano	Regiões da calota que preenchem o furo apresentam geometrias complexas (saliências e depressões)	Secção entre planos coronal e sagital	Usar ferramenta de corte para terminar o furo antes da reconstrução da calota craniana	4.5.5
Regiões de calcificações no modelo craniano	Regiões de calcificação na região interna do crânio	Secção entre planos coronal e sagital	Auxílio médico para melhor tratamento (aumento da espessura interna da calota ou redução da espessura da calota para evitar contato com o elemento geométrico)	4.5.6
Perfis de saliência na geometria de encaixe do modelo craniano	Negativos ou depressões na superfície de encaixe da calota craniana	Secção entre planos coronal e sagital	Quando muito pequenas evitar	4.5.7

Fonte: AUTOR (2019).[ADICIONADO]

5 CONCLUSÃO

Com os pontos considerados pela equipe médica, conclui-se que os processos sugeridos ao longo do trabalho podem sim ser adotados, garantindo uma melhor desmoldagem da calota craniana do molde geração bem como um melhor encaixe da mesma no crânio. O processo demonstrado apresenta maior precisão e melhor acabamento quando comparado aos processos convencionais, garantindo assim uma homogeneidade da calota craniana e um contorno mais natural do crânio.

Com os estudos desenvolvidos reduz-se drasticamente o tempo necessário para cirurgia de reconstrução craniana bem como se proporciona um ganho nos quesitos qualidade, segurança e até mesmo na questão informacional, onde por meio das tecnologias tridimensionais o cirurgião tem acesso as especificidades de cada caso em modelos físicos que podem ser avaliados e reavaliados permitindo ao cirurgião criar planos de ações para a cirurgia.

Além disso, a integração entre equipes durante todo o processo pode trazer ainda mais benefícios, como por exemplo a geração de modelos tridimensionais antes mesmo da primeira cirurgia de descompressão o que permitiria ao cirurgião avaliar espessuras das regiões de interesse e assim definir a estratégia ideal para a cirurgia, o que poderia, em alguns casos, até mesmo reduzir o tamanho da falha necessário para prosseguir com o tratamento médico.

Quando analisado a utilização destas tecnologias para o auxílio médico, vislumbram-se grandes oportunidades para as áreas de engenharia, uma vez que muitos processos manuais ainda são utilizados hoje em dia. Com as facilidades de fabricação que as tecnologias de impressão 3D proporcionam, aliado ao baixo custo, a customização de produtos fica muito mais facilitada e menos onerosa, podendo assim serem reavaliados muitos dos processos utilizados tanto na área médica como em diversas outras áreas do conhecimento.

Futuros trabalhos são necessários na área de maneira a auxiliar ainda mais o procedimento cirúrgico. Com um melhor entendimento dos procedimentos cirúrgicos, ferramentas utilizadas e esforços envolvidos, pode-se por exemplo ser desenvolvidos gabaritos de cortes construídos especialmente para as ferramentas utilizadas pelos cirurgiões de maneira a eliminar tais elementos geométricos. Outra sugestão é a criação de um banco de dados de acesso livre afim de facilitar os processos de reconstrução principalmente de casos onde a falha craniana é encontrada em regiões não simétricas do crânio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AATMAN, M.; JUNG, H.; SKIRBOLL, S.; **Materials used in cranioplasty: a history and analysis**. Stanford: Neurosurgical Focus, 2014.
- AMEEN, W.; AHMARI, A.; MOHAMMED, M.; ABDULHAMEED, O.; UMER, U.; MOIDUDDIN, K.; **Design, finite element analysis (FEA), and fabrication of custom titanium alloy cranial implant using electron beam melting additive manufacturing**. Arabia: Advances in Production Engineering & Management, 2018.
- AMORIM, P.; MORAES T.; AZEVEDO, F.; SILVA, J.; **InVesaliusSoftware Livre de Imagens Médicas**. Campinas: Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, 2015.
- ANDRABI, S.; SARMAST, A.; KIRMANI, A.; BHAT, A.; **Cranioplasty: Indications, procedures, and outcome - An institutional experience**. Srinagar: Surgical Neurology Int., 2017.
- AZEVEDO M.; MAZZONCINI. P.; SALOMÃO, S.; **PACS: Sistemas de Arquivamento e Distribuição de Imagens**. Ribeirão Preto: Revista Brasileira de Física Médica, 2009.
- BAZAN, O.; **Usinagem de próteses para cranioplastia a partir de imagens tomográficas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004.
- BOGU, P.; KUMAR, Y.; KHANRA, A.; **3D Printed, Customized Cranial Implant for Surgical Planning**. Warangal: Journal of Institution of Engineers. 2018.
- CARVALHO, C.; **História da tomografia computadorizada**. Rio de Janeiro: Revista Imagem, 2007.
- CASTELAN, J.; **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- CASTILHOS, M.; **Fabricação de próteses cranianas por meio de ferramental rápido com uso de impressão 3D**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2018.
- COSTA, D.; PEDRINI, H.; BAZAN, O.; **Usinagem de próteses a partir de imagens tomográficas**. Curitiba: COBEF, 2005.
- COSTA, D.; LAJARIN, S.; **Comparison of cranioplasty implants produced by machining and by casting in a gypsum mold**. Curitiba: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012.
- FIASCHI, P.; PAVANELLO, M.; IMPERATO, A.; DALLOLIO V.; ACCOGLI, A.; CAPRA, V.; CONSALES, A.; CAMA, A.; PIATELLI, G.; **Surgical results of cranioplasty with a polymethylmethacrylate customized cranial implants in pediatric patients: a single-center experience**. Genoa: Journal of. Neurosurgery. Pediatrics, 2016.
- GENTILE, J.; HIMURO, H.; ROJAS, S.; VEIGA, V.; AMAYA, L.; CARVALHO, J.; **Conduitas no paciente com trauma crânioencefálico**. São Paulo: Revista Brasileira de Clínica Medica, 2011.
- HAGE, C. F. N. S., IWASAKI M. **Imagem por ressonância magnética: princípios básicos**. Santa Maria: Ciência Rural, 2009.

- HARA, T.; FARIAS, C.; COSTA, M.; CRUZ, R.; **Cranioplasty: parietal versus customized prosthesis**. Rio de Janeiro: Revista Brasileira de Cirurgia. Plástica, 2011.
- JARDINI, A.; LAROSA, M.; MACEDO, M.; BERNARDES, L.; LAMBERT, C.; ZAVAGLIA, C.; MACIEL F., R.; CALDERONI, D.; GHIZONI, E.; KHARMANDAYAN, P.; **Improvement in Cranioplasty: Advanced Prosthesis Biomanufacturing**. Campinas: Procedia CIRP, 2016.
- JUNIOR, A.; HAMAMOTO F., P; NETO, A.; **Biomaterials for Reconstruction of Cranial Defects**. Botucatu: Arquivos Brasileiros de Neurocirurgia, 2016.
- JUNIOR, E.; YAMASHITA, H.; **Aspectos básicos de tomografia computadorizada e ressonância magnética**. São Paulo: Revista Brasileira de Psiquiatria, 2001.
- LINO, J.; BAPTISTA, L.; MOTA, J.; FERREIRA, R.; PIMENTA, G.; LOPES, M.; CAMPOS, M.; MELO, H; SERUFO, J.; FALEIRO, R.; **Abordagem do traumatismo cranioencefálico grave**. Belo Horizonte: Revista Médica de Minas Gerais, 2008.
- LIRIO, J.; MARQUES, F.; ROCHA, A.; ISRAEL, C.; **Desenvolvimento de ferramenta para estampagem incremental de aços inoxidáveis austeníticos**. Rio de Janeiro: Revista Ciência e Tecnologia, 2017.
- MARICEVICH, P.; MANSUR, A.; PEIXOTO, A.; AMANDO, J.; PANTOJA, E.; BRAUNE, A.; NASSER, J.; CRUZ, R.; **Cranioplastias: estratégias cirúrgicas de reconstrução**. Rio de Janeiro: Revista Brasileira de Cirurgia Plástica, 2015.
- MARKOWSKA, O.; GARDZINSKA A.; CHRZAN, R.; URBANIK, A.; MIECHOWICZ, S.; **User of computer tomography and 3DP rapid prototyping technique in cranioplasty planning – analysis of accuracy of boné defect modelling**. Rzeszów: Polish Journal of Radiology, 2009.
- OLIVEIRA, E.; **Técnica de baixo custo para reconstrução craniana por prototipagem**. Fortaleza: Hospital Geral de Fortaleza, 2019.
- PENÃ, A.; BRAMBILA, J.; TORRE, J.; OCHOA, M.; GALLARDO, G.; **Low-cost customized cranioplasty using a 3D digital printing model: a case report**. México: 3D Printing in Medicine, 2018.
- ROCHA, B.; **Desenvolvimento do processo de produção de próteses em ligas de titânio**. Cidade do Porto: Faculdade Engenharia Universidade do Porto, 2010.
- ROCHA, M.; **Desenvolvimento do processo de produção de próteses crânio-maxilofaciais por processos alternativos à fundição**. Cidade do Porto: Faculdade Engenharia Universidade do Porto - Dissertação, 2014.
- LAJARIN, S.; **Avaliação dimensional de implantes sob medida para cranioplastia**. Curitiba: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2008.
- SANTOS, M.; **Traumatismo crânioencefálico características e evolução**. Lisboa: Psicologia, 2002.
- SAURA, C.; **Metodologia para desenvolvimento de implantes cranianos personalizados**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2014.
- SHARMA, A.; ASHOK, G.; VINOD, S; SHASHI, J; **Single stage cranioplasty following benign calvarial tumor resection using anatomised three dimensional printed model**. Jaipur: Journal Clinics in Surgery, 2018.

SORDI, E.; **Avaliação da fabricação de próteses cranianas pelo método da usinagem e por fundição em molde usinado.** Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2018.

STEUBEN, J.; **Design for Fused Filament Fabrication additive manufacturing.** Boston: Conference: ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 2015.

THAKRE, P.; **Estimation of shrinkage and distortion in wax injection using Moldex3D simulation.** Kanchanbagh: Journal Materials Today: Proceedings, 2018.

VASCONCELOS, P.; **Fabrico rápido indirecto de ferramentas compósitas a partir de modelos de prototipagem rápida.** Cidade do Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.