

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO CONCEITUAL DE UMA TELA DE RECONSTRUÇÃO CRANIANA FABRICADA
POR ESTAMPAGEM INCREMENTAL

por

Marcelo Fritscher

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2018

PROJETO CONCEITUAL DE UMA TELA DE RECONSTRUÇÃO CRANIANA FABRICADA
POR ESTAMPAGEM INCREMENTAL

por

Marcelo Fritscher

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. **Thamy Cristina Hayashi**
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Joyson Luiz Pacheco

Comissão de Avaliação:

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Joyson Luiz Pacheco

Porto Alegre, 16, novembro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me apoiaram e me deram força para continuar buscando meus sonhos. Dedico também à minha namorada que nunca deixou de acreditar que a diplomação seria possível.

FRITSCHER, M. **Projeto conceitual de uma tela de reconstrução craniana produzida por estampagem incremental**. 2018. 23. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Atualmente no Brasil se realizam centenas de cirurgias de cranioplastia. Esta cirurgia é recomendada para a correção de defeito no crânio humano. Pode-se usar diversos materiais para fazer a correção, os enxertos autólogos são a primeira escolha dos cirurgiões caso não haja contraindicações. Porém, os defeitos podem ser muito grandes e/ou o tratamento pode ser muito complexo devido a condições particulares do paciente. Nestes casos, usa-se implantes aloplásticos, sendo o titânio o mais recomendado. O presente trabalho realizou uma análise dos conceitos envolvidos na concepção do projeto de uma tela de reconstrução craniana fabricada por estampagem incremental. Buscou-se na literatura os conceitos e definições pertinentes ao projeto e após uma avaliação das influências dos mesmos no projeto. E finalmente, definiu-se os parâmetros a serem considerados nas etapas futuras do projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Cranioplastia, biomaterial, estampagem incremental.

FRITSCHER, M. **Conceptual project of a skull reconstruction metal plate produced by incremental sheet forming**. 2018. 23. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

In the present day hundreds of cranioplasties surgeries take place in Brazil. This surgery is recommended for human skull defects. There are many materials that can be used to make the corections, autologous bone graft is the preferred choice for the surgeons if there is no contraindication. However, the defects can be too large and/or the treatment can be too complex due to particular patient conditions. In these cases, aloplastic materials are recommended. The present work analyzed the concepts involved in the conception of the project of a skull reconstruction metal plate produced by incremental sheet forming. Concepts and definitons pertinent to the project were searched in the literature, afterwards an evaluation of the influences that they have in the project was conducted. Finally, the parameters to be considered in the next phases of the project were defined.

KEYWORDS: Cranioplasty, biomaterial, incremental sheet forming.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1. CRANIOPLASTIA.....	2
3.1.1. INDICAÇÕES.....	3
3.1.2. COMPLICAÇÕES.....	3
3.2. DIAGNÓSTICO POR IMAGEM.....	4
3.2.1. RESSONÂNCIA MAGNÉTICA.....	4
3.2.2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA.....	4
3.2.3. IMAGEM DICOM.....	5
3.3. PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	5
3.4. ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	6
3.4.1. DEFORMAÇÃO DA CHAPA.....	7
3.4.2. ESTRATÉGIA DE CONFORMAÇÃO.....	8
3.4.3. TAMANHO DA FERRAMENTA.....	9
3.4.4. INCREMENTO VERTICAL.....	9
3.4.5. VELOCIDADE DE AVANÇO E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA FERRAMENTA.....	10
3.4.6. LUBRIFICAÇÃO.....	10
3.5. BIOMATERIAIS.....	10
4. PROJETO CONCEITUAL.....	11
4.1. PROBLEMA.....	11
4.2. AQUISIÇÃO DAS IMAGENS.....	12
4.3. SELEÇÃO DO MÉTODO DE CORREÇÃO E MATERIAIS.....	12
4.4. MODELAGEM 3D.....	12
4.5. PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	13
4.6. FABRICAÇÃO.....	13
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
5.1. TENDENCIAS FUTURAS.....	14
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
Anexo I	17

1. INTRODUÇÃO

A reconstrução craniana, ou cranioplastia, é uma intervenção cirúrgica feita para reparar defeitos no crânio. São diversos os defeitos que a abóboda craniana pode apresentar, geralmente são resultado de infecções, traumas, ablação tumoral e procedimento de descompressão cerebral. As alterações nas funções e a estética dependem do tipo de defeito. A perda de parte da calota craniana pode apresentar sério risco ao paciente, que pode apresentar alterações na circulação sanguínea no cérebro, que por sua vez, pode causar enxaquecas, perda de equilíbrio, irritabilidade, ansiedade, intolerância a sons e vibrações, entre outros sintomas. Por isso, a cranioplastia apresenta funções de recuperação da capacidade neurológica do paciente e estética.

Existem evidências de que o ser humano vem realizando tentativas de reconstrução craniana há milhares de anos. Foi no século XX que começou a se popularizar o uso de materiais autógenos, que provem de indivíduos da mesma espécie, como enxertos ósseos. Diversos estudos foram feitos para comparar o uso de materiais autógenos com o uso de materiais sintéticos e manufaturados também chamados de materiais aloplásticos. Ainda é difícil dizer qual dos dois tipos de materiais é o melhor, não obstante, historicamente o material preferido para esse tipo de cirurgia é o osso autólogo, ou seja, um enxerto ósseo proveniente do próprio paciente. Geralmente este material é removido da tábua externa do osso parietal, costelas e crista íliaca. A escolha da área doadora de enxerto vai depender de inúmeros fatores, que incluem, mas não se limitam a semelhança com o tecido a ser reparado na área do defeito, a proximidade com a área a ser reconstruída, a facilidade na coleta do enxerto e a capacidade de osseointegração. Outra gama de materiais que podem ser usados são os aloplásticos, podendo ser poliméricos, cerâmicos ou metálicos. Ainda não existe consenso quanto ao melhor material a ser usado na cranioplastia. As vantagens dos materiais aloplásticos são a possibilidade de customização ao caso específico do paciente e fechamento de defeitos grandes de mais para a técnica com enxerto. O presente trabalho focará na aplicação da técnica de reconstrução craniana com prótese customizada usando o titânio como material aloplástico.

Como a tela de reconstrução do crânio é um implante ortopédico de uso permanente, aspectos sobre a biocompatibilidade e toxicidade do material usado na prótese devem ser levados em consideração e estudados para assegurar o uso seguro do produto pelo paciente. O titânio tem provado ser um excelente biomaterial para implantes ortopédicos, pois apresenta boa osseointegração, é inerte dentro do corpo humano, não sofre corrosão, é leve, resistente e não é magnético. Outros biomateriais podem ser cerâmicos, poliméricos, compósitos ou outros elementos metálicos.

O desenvolvimento do implante começa a partir da aquisição das imagens DICOM, que é um protocolo internacional para o compartilhamento de imagens da medicina, elas podem ser adquiridas através de exames de ressonância magnética (RM) ou de tomografia computadorizada (TC). As imagens são processadas por um software de processamento de imagens DICOM e transformadas em um modelo 3D do crânio do paciente. Com esse modelo fiel do paciente, um protótipo do crânio é impresso e então usado para fazer uma adequação dimensional do implante produzido.

Há duas técnicas de fabricação usadas para produzir telas de reconstrução craniana. Uma delas, a mais moderna, é a impressão 3D com pó de titânio a partir de um modelo computadorizado. A outra técnica é empregar a conformação mecânica, já que as telas apresentam semelhança geométrica com calotas esféricas. Por isso, processos de estampagem são bastante usados na indústria de próteses para crânio. Uma técnica em particular que vem sendo estudada nos últimos anos é a estampagem incremental. Processo onde há uma ferramenta de formato específico que gira e realiza movimentos incrementais para gerar a forma desejada da peça a partir de uma chapa.

Neste trabalho serão analisados os aspectos a serem considerados na concepção do projeto conceitual de uma tela de reconstrução craniana produzida por estampagem incremental.

2. OBJETIVOS

Pretende-se estabelecer os conceitos fundamentais para o projeto de uma tela de reconstrução craniana customizada feita em titânio pelo processo de estampagem incremental. Ao final do trabalho, o objetivo é ter elaborado os conceitos pertinentes ao projeto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CRANIOPLASTIA

A cranioplastia é uma cirurgia feita para corrigir defeitos no crânio e vem sendo realizada a milhares de anos. A perda de parte da calota craniana representa grande risco para o paciente. Por ser realizada em uma parte muito sensível do corpo humano, ela é uma cirurgia muito desafiadora. As primeiras descrições de operações de cranioplastia apareceram no século XVI, onde defendia-se a recolocação do osso no local do trauma se a dura-máter estiver intacta ou o uso de uma placa de ouro se houvesse lesões nesta camada. Porém, o primeiro registro de uma cranioplastia bem-sucedida apareceram um século depois, onde o paciente teve um trauma corrido com um osso do crânio de um cão. Ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas melhores e com materiais diferentes. O uso de enxertos ósseos para a correção de defeitos da calota craniana começou no final do século XIX, as primeiras cirurgias eram feitas com aloenxerto, que é caracterizado por ser proveniente de um doador da mesma espécie. Em seguida, surgiram técnicas usando autoenxertos, que são transplantes realizados usando o próprio paciente como doador. Ao mesmo tempo, usava-se materiais metálicos em alguns procedimentos. O ouro foi muito usado e se mostrou um bom material, mas pelo alto custo não se tornou popular. A prata, sendo mais barata que o ouro, foi usada como substituta, porém, o material não apresentava resistência mecânica suficiente para proporcionar proteção adequada. Já no caso do alumínio, material com baixo custo e melhor resistência mecânica, o problema foi a grande risco de infecções. Durante a segunda Guerra Mundial, o polimetilmetacrilato (PMMA) mostrou-se como uma boa alternativa na correção de defeitos da calota craniana. O uso de enxertos ósseos autólogos é considerado melhor e mais recomendado. Todavia, seu uso é limitado nos grandes defeitos, também não é recomendado o uso quando pode ocorrer grande morbidade do sítio doador, quando o paciente está nos extremos de idade e o enxerto ainda está sujeito à reabsorção óssea. Então o uso de próteses de materiais aloplásticos se torna necessário em casos mais complexos. O material ideal para este tipo de implante deve ser biocompatível, resistente, leve, não-magnético e estáveis. Na cranioplastia ilustrada na figura 3.1 o sítio doador foi o próprio crânio do paciente, o local pode ser visto próximo do canto inferior direito da imagem. E na operação ilustrada na figura 3.2, pode-se notar o local do trauma e a prótese aloplástica ao lado.



Figura 3.1: Imagem de uma cranioplastia realizado com autoenxerto.



Figura 3.2: Imagem de uma cranioplastia realizada com material aloplástico.

3.1.1. INDICAÇÕES

O cérebro é um órgão muito sensível e importante, por isso uma proteção adequada é necessária. Quando o indivíduo apresenta algum defeito no crânio que precisa ser reconstruído ou já passou por uma cirurgia de craniectomia, que é quando parte do osso do crânio é removido, sua saúde pode se tornar muito debilitada além de potencialmente desfigurar a sua face. A falta de proteção adequada pode causar danos neurológicos ao paciente, por isso a cranioplastia é indicada para melhorar a proteção do cérebro, preservar as funções neurológicas, controle de epilepsia, melhora do conforto e estética do paciente. Abaixo se encontram algumas situações onde a cranioplastia é recomendada segundo Williams et al., 2015.

- Pós craniectomia descompressiva;
- Pós ablação tumoral;
- Pós trauma;
- Pós remoção de enxerto infectado; e
- Defeito congênito.

3.1.2. COMPLICAÇÕES

No período pós-cirúrgico o paciente pode apresentar uma série de complicações dependendo do tamanho do defeito e da técnica de reconstrução. Um estudo conduzido por Williams et al., 2015, acompanhou 149 pacientes que tiveram seus crânios reconstruídos com placas de titânio, o acompanhamento durou 9 anos e os sítios dos defeitos estavam localizados em toda a calvária. As complicações foram divididas em duas categorias, complicações prematuras, que é quando ocorrem antes do paciente ser liberado da internação hospitalar. E complicações tardias, definidas como acontecendo após a liberação do paciente. Abaixo, nas tabelas 3.1 e 3.2, podemos ver a complicação ocorrida e o número de pacientes que a sofreram a partir dos dados do estudo supracitado.

Outras complicações que podem ocorrer nas cirurgias de cranioplastia incluem, mas não se limitam a hidrocefalia, crises convulsivas e, no caso de enxertos ósseos, reabsorção óssea.

Tabela 3.1: Complicações prematuras na cranioplastia.

Complicações prematuras	Número de pacientes
Hematoma	4
Hemorragia	1
Infecção no sítio da operação	1
Seroma	1
Sépsis	1
Encaixe inadequado do implante	1
Morte causada por derrame hemorrágico	1

Tabela 3.2: Complicações tardias na cranioplastia.

Complicação tardia	Número de pacientes
Seroma	22
Hematoma	1
Infecção	6

3.2. DIAGNÓSTICO POR IMAGEM

De acordo com Haleern, 2018 e Garib, 2007, dentre os métodos de diagnóstico usado pelos médicos, o diagnóstico por imagem é extremamente preciso, podendo detectar cânceres em estágios ainda tratáveis, hemorragias intracranianas resultante de traumas. Alguns dos métodos de diagnóstico por imagem são raio-X, ressonância magnética e tomografias computadorizadas. Os dois últimos citados são capazes de produzir imagens em três dimensões de alta resolução.

3.2.1. RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

O exame de ressonância magnética (RM) usa campos magnéticos e pulsos de radiofrequências para gerar as imagens em 3D do paciente, as imagens são geradas no scanner e a aquisição dos dados é feita com um computador ligado na máquina. Por não emitir radiação perigosa, é um método extremamente seguro. Porém, ele apresenta algumas limitações quanto a sua precisão dimensional. A ressonância magnética é um ótimo exame para analisar tecidos moles, cérebro, órgãos, medula espinhal, ossos, juntas e até a circulação sanguínea. É capaz de fornecer informações a respeito de inchaço, sangramento, tumores no cérebro, aneurismas cerebrais, bem como inflamação na espinha dorsal. Embora o exame RM apresente boa resolução para os tecidos moles, ele ainda não é melhor método para a geração de imagens de tecidos duros e ossos.

3.2.2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

O exame de tomografia computadorizada (TC) usa feixes de raios-X para gerar imagens em fatias do paciente, tendo assim uma imagem completa em três dimensões compostas por várias fatias, podendo ser geradas imagens de dentro dos órgãos e de diferentes níveis de densidade dentro do corpo humano. É um exame bom para se obter informações sobre ossos, olhos, coração, espinha dorsal, pescoço, ombros e outras partes dentro do corpo. Os resultados do scanner são obtidos muito rapidamente e com muito boa resolução, especialmente para tecidos duros. Por isso, este é o método preferido para diagnósticos no campo transplantes ortopédicos. As imagens geradas pelos exames de TC são formadas por elementos discretos finitos chamados voxels. Um voxel é o menor elemento de volume formado pelo método de diagnóstico por imagem e pode ser visto na ilustração da figura 3.3. Apesar do método usar raios-X, não há nenhum risco significativo ao paciente se o equipamento é operado corretamente.

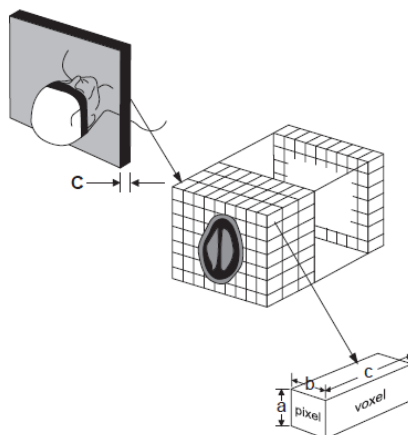


Figura 3.3: Ilustração de um voxel gerado pelo exame de tomografia computadorizada (fonte: Garib e al., 2007)

3.2.3. IMAGEM DICOM

As imagens geradas pelos scanners de RM ou TC são padronizadas internacionalmente através do sistema DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) a fim de se facilitar e padronizar os protocolos usados nas gerações de imagens para diagnósticos médicos dentre todos os fabricantes de equipamentos de diagnóstico. O sistema se popularizou no começo da década de 90 e hoje já é um padrão internacional. Ele agrupa as informações em conjunto de dados para que as informações do paciente, por exemplo nome, sempre estejam dentro do arquivo correspondente às imagens geradas no exame. Assim, impossibilita a separação das informações por acidente ou erro. Usando o padrão DICOM, há uma integração entre todos os equipamentos de aquisição de imagens, os fabricantes sempre fornecerão equipamentos capazes de gerar arquivos que poder ser lidos em vários sistemas.

3.3. PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Com o desenvolvimento das impressoras 3D, surgiu um novo processo de produção de peças, a prototipagem rápida ou também conhecida como manufatura aditiva. Ela é caracterizada por ser um processo de produção onde camada após camada de material são unidas para formar um objeto tridimensional. O objeto é formado a partir de um arquivo digital contendo um modelo em 3D da peça que pode ter sido obtido a partir de um software de design, ou de um scanner tridimensional ou ainda pode ter vindo de um equipamento de aquisição de imagens para diagnóstico como RM e TC. Abaixo, estão listadas algumas dentre as muitas tecnologias de manufatura aditiva com as siglas em inglês indicadas ao lado:

- Estereolitografia (SLA);
- Sinterização seletiva a laser (SLS);
- Modelagem por deposição de material fundido (FDM);
- Impressão polyjet 3D (PJP);
- Impressão inkjet 3D (IJP);
- Manufatura de objeto laminado (LOM);
- Fusão por feixe de elétrons (EBM); e
- Sinterização de metal direta a laser (DMLS).

A escolha da tecnologia depende do material que será usado na impressão, a tabela 3.3 contém uma relação entre processo de manufatura aditiva e material usado para confecção de implantes ortopédicos.

Tabela 3.3: Relação entre material de deposição e técnica de manufatura aditiva.

Material	Técnica de manufatura aditiva
Metal	DMLS, EBM, LOM
Polímeros	FDM, PJP
Cerâmicos	SLS, SLS, IJP

A prototipagem rápida é uma excelente ferramenta, especialmente no desenvolvimento de próteses customizadas à cada paciente. Ela permite avaliar as funções e formas do produto, bem como avaliar a manufaturabilidade, ela possibilita a impressão de um biomodelo do crânio do paciente bastante fiel à realidade e com isso pode-se ser feito o controle de qualidade da prótese, testando os encaixes e dimensões com precisão. No campo da medicina, a tecnologia é usada nas etapas pré-cirúrgicas e se mostrou uma importante etapa. O planejamento cirúrgico é feito com muito mais eficiência, já que os protótipos permitem uma melhor visualização e são manufaturados com bastante precisão anatômica. O que reduz o tempo de cirurgia e minimiza a chance de erros.

A partir da aquisição das imagens DICOM nos exames de TC ou RM deve ocorrer um processo chamada de segmentação, que é caracterizado pelo agrupamento dos voxels em distintas regiões de interesse. Esse processo é feito automaticamente por softwares específicos e então é gerado um modelo em 3D para ser modelado usando Computer Aided Design (CAD). O modelo tridimensional pode ser compartilhado facilmente via internet, o que facilita o trabalho em conjunto de pessoas à distância. Na figura 3.4 está ilustrado um exemplo de manufatura aditiva encontrado comumente, o FDM.

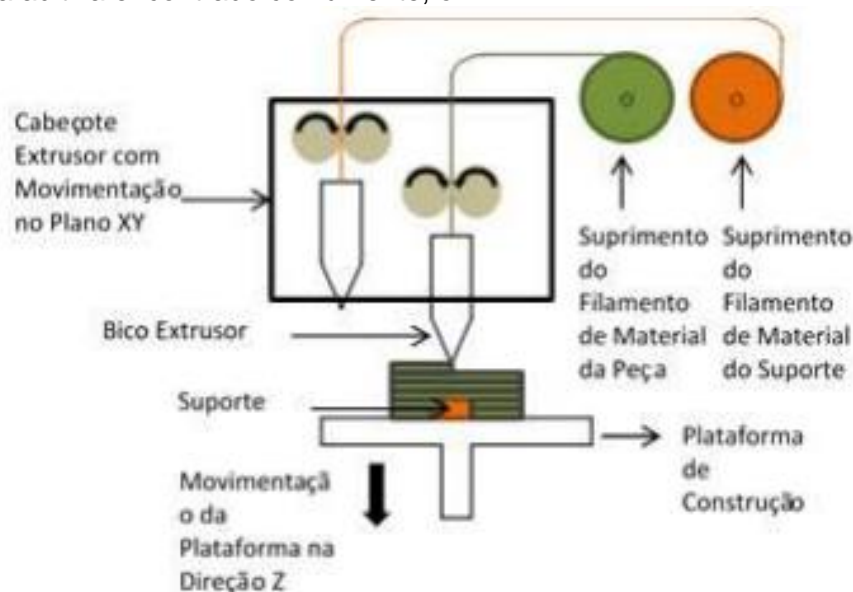


Figura 3.4: Ilustração esquemática do processo FDM de prototipagem rápida. (Fonte: Mezzeti et al., 2016.)

3.4. ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A estampagem incremental é um processo caracterizado por ser um processo de conformação mecânica, necessitando o uso de uma máquina comandada numericamente, que é seu principal equipamento. O processo faz o uso de ferramentas e tecnologias voltadas para a área da usinagem. As principais variáveis controladas durante o processo são:

- Tamanho e formato da ferramenta movida;
- Material da ferramenta;
- Velocidade de deslocamento da ferramenta;

- Estratégia de conformação;
- Incremento vertical;
- Força de fixação do prensa-chapas; e
- Temperatura de estampagem.

Este processo é uma ótima opção quando o produto pode ser feito por conformação e a produção for de pequenos lotes de peças, como protótipos de produtos novos em desenvolvimento, e pode ser uma boa opção para a fabricação de quantidades reduzidas de produtos sob encomenda, onde a produção por estampagem incremental em larga escala se torna inviável economicamente.

3.4.1. DEFORMAÇÃO DA CHAPA

A deformação tridimensional que ocorre durante a estampagem incremental obedece a Lei da constância de volume que pode ser vista na equação 3.1.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (3.1)$$

Onde φ_1 , φ_2 e φ_3 são as deformações principais nos três eixos perpendiculares que o material experimenta. No processo de estampagem incremental o material pode apresentar diversas combinações de deformações principais. E cada material apresenta um nível máximo de deformação que pode suportar antes que ocorra a estricção e subsequentemente a fratura. Os níveis suportados pela peça sendo fabricada dependem da combinação e da trajetória das deformações sofridas. Usando uma Curva Limite de Conformação (CLC) pode-se determinar se as deformações sofridas no processo estão fora da zona de segurança. Um exemplo de CLC pode ser visto na figura 3.5.

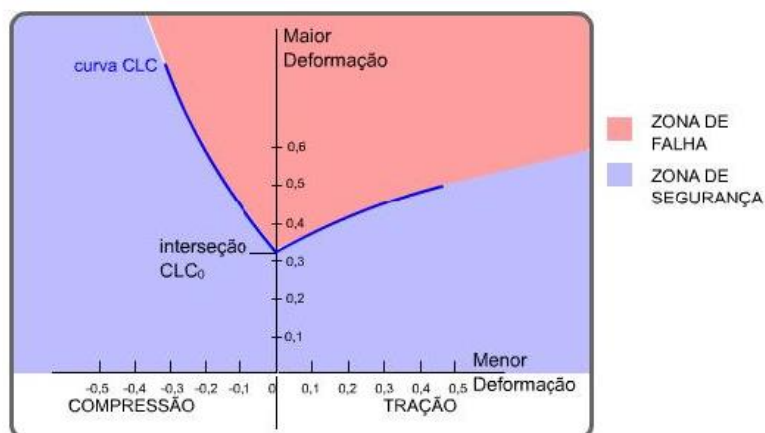


Figura 3.5: CLC típica para um aço. (Fonte: Tiburi, 2007.)

A conformação na estampagem incremental pode ser positiva gerando superfícies convexas no lado da ferramenta, e negativa, gerando superfícies côncavas no lado da ferramenta. A chapa a ser conformada deve ser fixa em um prensa-chapa, como pode ser observado na figura 3.6. Então, a medida que a ferramenta conforma a peça, a espessura da chapa reduz seguindo a Lei da constância de volumes. A redução da espessura causada pela conformação pode ser prevista usando a lei empírica do seno, conforme a equação abaixo.

$$t_1 = t_0 \times \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad (3.2)$$

Onde t_1 é a espessura final da chapa, t_0 é a espessura inicial e α é o ângulo de estampagem.

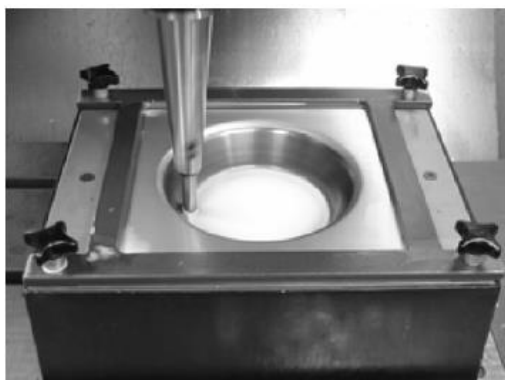


Figura 3.6: Representação do processo de estampagem incremental.

Outro aspecto relacionado à deformação da chapa que deve ser levado em consideração é o retorno elástico da peça, que ocorre quando o processo de conformação termina e pode ocasionar erros enormes se não for levada em conta nas predições de comportamento do material durante a operação de conformação. Para compensar o retorno elástico, pode ser determinado um fator de escala para se produzir a peça com dimensões levemente maiores. Assim, ao se retirar a força na punção a peça toma a forma pretendida.

3.4.2. ESTRATÉGIA DE CONFORMAÇÃO

Como o processo é comandado numericamente, o sistema segue como referência um sistema de coordenadas cartesianas. A ferramenta então pode realizar movimentos longitudinais, transversais e verticais. Todo o percurso da ferramenta pode ser programado usando sistemas Computer Aided Manufacturing (CAM), o percurso é o que caracteriza a estratégia de conformação. Independente da estratégia, a ferramenta sempre realiza passos verticais, pequenos incrementos aumentando a deformação no sentido da profundidade ou altura da peça. O passo vertical é um importante parâmetro do processo, uma vez que ele define quanta deformação a chapa vai sofrer, e quanto maiores são as deformações maiores são os encruamentos e aumento da resistência mecânica que pode gerar regiões frágeis e até falhas. Na figura 3.7 podem ser observadas as cristas geradas a cada passada da ferramenta ao logo do processo, o que vai definir a qualidade superficial do produto, uma vez que a rugosidade está diretamente ligada ao tamanho das cristas.

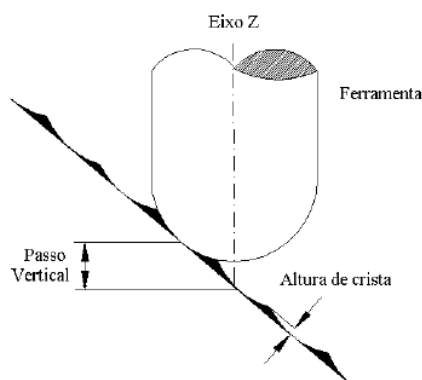


Figura 3.7: Ilustração do passo vertical e da crista formada.

Primeiramente dois tipos de estratégias são apresentados, o primeiro é quando se acompanha um caminho de estampagem com incremento vertical constante. Assim a ferramenta seguirá uma série de curvas de nível ao conformar a peça. Esta estratégia

apresenta baixa qualidade superficial no produto final, especialmente se a peça apresentar regiões planas ou quase planas com incrementos verticais maiores que 0,5 mm, a chapa fica pode apresentar marcações nas regiões entre níveis. A outra estratégia é usar um incremento vertical variável, o que faz com que as curvas de nível geradas tenham altura da crista constante, melhorando muito a qualidade superficial do produto final. Para esta segunda técnica, quando menor for o ângulo da superfície, menor deverá ser o passo vertical e o incremento horizontal da ferramenta.

Existem outras duas estratégias possíveis: a estratégia em contorno e a radial. A primeira caracteriza-se por começar no centro da peça e realizar contornos concêntricos até atingir o limite da geometria. Em seguida, a ferramenta realiza um incremento do contorno, conectando-se ao próximo contorno. A estratégia radial é caracterizada pelos movimentos radiais partindo do centro da peça se estendendo até o limite da geometria da peça, voltando ao centro após realizar um incremento radial.

Superfícies verticais também podem ser obtidas por estampagem incremental, a estratégia usada nesses casos é a estampagem incremental multiestágios. Nesta estratégia, a peça primeiramente sofre uma pré-forma, em seguida a ferramenta executa movimentos descendentes e ascendentes alternados diminuindo o ângulo da parede a cada estágio. A forma da ferramenta pode variar entre os estágios. Outra estratégia de estampagem incremental, a estratégia espiral, apresenta a grande vantagem de não deixar marcas na superfície da peça, já que a ferramenta se movimenta nas três direções simultaneamente.

3.4.3. TAMANHO DA FERRAMENTA

O tamanho da ferramenta é um parâmetro importante na estampagem incremental, posto que está diretamente relacionado com o tempo de estampagem e com a qualidade da superfície. No geral, quanto maior for o diâmetro da ferramenta, melhor será a qualidade da superfície da peça para um mesmo valor de passo vertical. A desvantagem de uma ferramenta muito grande é a incapacidade de se copiar pequenos detalhes menores que a ferramenta. A forma das ferramentas usadas pode ser semiesférica, esférica ou chata, conforme pode ser visto na figura 3.8. A ponta da ferramenta deve apresentar baixa rugosidade, para que o atrito entre a ferramenta e a chapa seja reduzido.

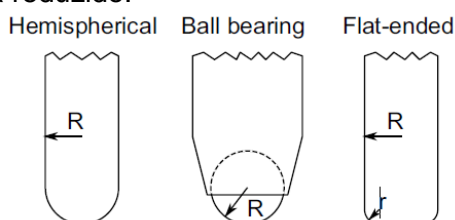


Figura 3.8: Ilustração das principais formas de ferramenta.

3.4.4. INCREMENTO VERTICAL

A magnitude do incremento vertical é determinante para a qualidade superficial da peça e também para o tempo de estampagem, este parâmetro determina o quanto a ferramenta irá deformar a peça a cada passada. Para pequenos incrementos verticais, tem-se uma boa qualidade superficial da peça, porém os tempos de estampagem crescem significativamente com a redução do passo vertical. Um fator limitante do passo vertical é o ângulo limite de estampagem, que é caracterizado como o ângulo máximo que pode ser gerado na superfície da peça sem que haja rompimento do material. No caso do titânio este ângulo é de 45° e o alumínio é capaz de suportar ângulos de até 70°.

3.4.5. VELOCIDADE DE AVANÇO E VELOCIDADE DA FERRAMENTA

Inúmeros estudos tentam avaliar as influências que as velocidades de avanço e de rotação da ferramenta têm sobre a estampabilidade do material, que é a capacidade que o material tem de se deformar plasticamente sem sofrer ruptura. A relação que o avanço da ferramenta terá com a estampabilidade dependerá do material, porém a conclusão mais comumente encontrada é a de que reduzindo a velocidade de avanço da ferramenta há um aumento da estampabilidade.

A velocidade de rotação da ferramenta também influencia na capacidade do material de se deformar plasticamente sem sofrer ruptura. O calor gerado na interface ferramenta-peça é diretamente proporcional à velocidade relativa entre os dois corpos. Sendo assim, velocidades mais elevadas vão gerar mais calor localizado na peça. Foi observado que aumentando a temperatura com mais atrito devido a altas velocidades, o metal amolece e passa a ter uma melhor capacidade de suportar as deformações plásticas. Esse aumento da capacidade é atribuído às mudanças na estrutura cristalina do material e um aumento do grão causados pelo calor gerado em altas velocidades da ferramenta. Segundo o estudo realizado por McAnulty et al., 2017, conclui-se que aumentando a velocidade de rotação da ferramenta acima de 0 rpm já representa uma melhora na estampabilidade. Em nenhuma instância é recomendado o uso da ferramenta estacionária, sendo estabelecido que no mínimo a ferramenta deve ser livre para girar.

3.4.6. LUBRIFICAÇÃO

A lubrificação tem como principais objetivos reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça sendo conformada, reduzindo também o calor gerado. E também tem como função reduzir o desgaste da ferramenta. Na literatura não foram encontrados estudos dando importância ou foco nos aspectos relacionados a lubrificação na estampagem incremental. Segundo as análises da literatura científica feita por Suriyaprajan, 2013, a lubrificação não representa um fator de extrema importância na estampagem incremental, todavia é um fator necessário para se obter bom acabamento superficial.

3.5. BIOMATERIAIS

De acordo com Bath, 2002, os biomateriais são qualquer material biocompatível, natural ou manufaturado, o qual é usado para repor ou assistir parte de um órgão ou tecido, enquanto em contato íntimo com o mesmo. Estes materiais podem ser metálicos, cerâmicos, poliméricos ou compósitos, e são classificados em quatro classes dependendo da compatibilidade que apresentam com os tecidos adjacentes:

- Biotolerante: materiais separados do osso adjacente por uma camada de tecido mole ao longo da interface formada pelo sistema imunológico. Não há contato entre a prótese e o tecido durante a osteogênese. Alguns exemplos são os a grande maioria dos polímeros sintéticos.
- Bioinerte: materiais com contato direto com o tecido ósseo, participando na osteogênese apesar de não ocorrer nenhuma reação química entre o tecido e o implante. Não existe liberação de nenhum componente que seja detectável. Alguns exemplos são alumina, zircônia, titânio e tântalo.
- Bioativo: são os materiais que interagem com o tecido ósseo, interferindo na osteogênese. Há similaridade química e mineral entre o material e o tecido, promovendo a osteocondução. Alguns exemplos são Ca-fostato e hidroxiapatita.
- Bioabsorvíveis: após certo período de tempo, esses materiais são degradados, solubilizados ou fagocitados pelo organismo. Alguns exemplos são o fosfato tricálcico e o poli-L-ácido láctico.

A biocompatibilidade de um implante médico cobre tanto a compatibilidade do material usado quanto seu design, incluindo também as interações químicas entre o material do implante e o sistema fisiológico do paciente, bem como impactos físicos que o material implantado pode ter nas regiões adjacentes ao sítio do transplante. Usando o trabalho realizado por Cunha et al., 2011, por Jones et al., 2017, e por Chen, 2015 foram obtidas as informações para o entendimento da biocompatibilidade. Para o material ser considerado biologicamente seguro, ele não pode induzir nenhum dano mensurável ao paciente. Alguns dos danos biológicos que podem ocorrer nos pacientes são indução da morte celular ou de tecidos (citotoxicidade), formação de câncer (carcinogenicidade), danos genéticos (mutagênese), resposta imunológica (pirogenia) ou coágulos sanguíneos. Algumas características dos biomateriais podem incluir, mas não se limitar a excelente biocompatibilidade, alta resistência à corrosão, propriedade mecânicas apropriadas, alta resistência ao desgaste e boa osteointegração. A resistência do implante à corrosão é um dos fatores que mais influenciará no sucesso de longo prazo do dispositivo. O corpo tem a tendência natural de envolver corpos estranhos por uma membrana usando o sistema imunológico. Esta membrana impede que ocorra a osteointegração do implante com o osso, o que pode ocasionar a soltura do implante. Esse fenômeno ocorre em materiais

As propriedades mecânicas dos biomateriais devem corresponder com a performance dos ossos, no caso de reconstrução de ossos. As propriedades importantes a serem consideradas são módulo de elasticidade, tensão de ruptura, resistência à fratura e resistência à fadiga. Quando o implante ortopédico apresente um módulo de elasticidade maior que o do osso, os esforços no osso adjacente ao implante serão menores, o que pode causar a atrofia e perda da densidade óssea no local. Por isso, deseja-se um material com o módulo de elasticidade parecido com o do osso cortical. As propriedades físicas de algumas ligas metálicas podem ser vistas na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Propriedades mecânicas de materiais comuns para implantes metálicos e do osso.

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de ruptura [MPa]	Resistência à fratura [MPa√m]
Liga de CoCrMo	240	900 – 1540	~100
Aço inox 316L	200	540 – 1000	~100
Liga de Ti	105 – 125	900	~80
Liga d Mg	40 – 45	100 – 250	15 - 40
Liga de NiTi	30 – 50	1355	30 - 60
Osso	10 – 30	130 - 150	2 - 12

4. PROJETO CONCEITUAL

Nesta etapa os aspectos considerados no projeto de uma tela de reconstrução craniana por estampagem incremental discutidos até o momento serão especificados e discutidos.

4.1. PROBLEMA

Como foi observado a cranioplastia é uma cirurgia importante para a reabilitação do paciente, uma vez que a falta de proteção adequado no cérebro pode causar severas debilitações à saúde do indivíduo, inclusive deterioração das funções neurológicas. A correção de grandes defeitos da calota craniana representa um desafio para o cirurgião e para o fabricante do implante. Segundo dados extraídos do site do Ministério da Saúde, no período de setembro de 2018 houveram 123 cirurgias de cranioplastia aprovadas pelo SUS e 141 no mês de outubro. O que representa um número significativo de pacientes obtendo próteses para reconstrução craniana. Devido aos contornos delicados da abóboda craniana, a fabricação de uma tela de reconstrução craniana, por se tratar de uma prótese implantada de uso

permanente, deve ser precisa e anatomicamente fidedigna, usando materiais e métodos adequados para a produção de implantes ortopédicos. A tela deve apresentar bom acabamento superficial e deve ter resistência mecânica parecida com a do osso humano.

O desenvolvimento de uma prótese pode seguir o fluxograma exposto na figura A.1

4.2. AQUISIÇÃO DE IMAGENS

O primeiro passo para o desenvolvimento de uma tela de reconstrução craniana é a aquisição das imagens DICOM do paciente, a partir das imagens obtidas com o exame de diagnóstico por imagem, pode-se dar início ao projeto da tela.

Usando uma máquina de ressonância magnética ou tomografia computadorizada, faz-se a coleta das imagens para o diagnóstico. Esta etapa é realizada pelo médico responsável pelo paciente e não pelo fabricante do implante. Em um segundo momento, os arquivos DICOM serão encaminhados para o fabricante junto com um laudo com os resultados do diagnóstico e especificações quanto ao tipo de operação a ser realizada, é interessante também que o médico envie ao fabricante um planejamento da cirurgia. Os arquivos então podem ser convertidos em um modelo virtual tridimensional. Na figura A.2 no anexo I, pode-se ver a janela de trabalho do software InVesalius®, que faz a segmentação das imagens DICOM e as transforma em um modelo tridimensional pronto para a exportação do arquivo para um software CAD.

4.3. SELEÇÃO DO MÉTODO DE CORREÇÃO E MATERIAL

A seleção do método de correção é feita pelo cirurgião também, e depende de diversos fatores que incluem, mas não se limitam a histórico de infecções, doenças crônicas, idade, disponibilidade da prótese e custos. Na literatura, foi observado que o método de correção preferível aos cirurgões é o enxerto ósseo autólogo, ou autoenxerto. Porém, em muitos casos o uso de tal técnica é inviável e pode representar muitos riscos durante a reabilitação do paciente. Com os processos produtivos ficando cada vez mais baratos, os materiais aloplásticos se tornam uma ótima opção para a cirurgia de cranioplastia, especialmente para a correção de grandes defeitos. Como o foco do projeto é a fabricação do implante por estampagem incremental, é método de correção para este projeto é a cirurgia de cranioplastia com prótese aloplástica.

O titânio é um ótimo biomaterial, apresentando excelente osseointegração e é totalmente inerte dentro do corpo humano. Também possui ótimas propriedades mecânicas e biocompatibilidade. O que o torna um material muito bom para o uso em implantes ortopédicos, especialmente por atender muitos dos atributos desejados no biomaterial ideal. Seu uso histórico em implantes provou-se ser eficiente e, ainda, próteses feitas com titânio apresentam baixos índices de complicações durante o período pós-operatório. Por isso, ele é o material escolhido para construir a tela de reconstrução.

4.4. MODELAGEM 3D

Uma série de softwares podem ser usados para fazer essa modelagem, usam-se softwares que trabalham em Computer Aided Design (CAD). Como o produto se trata de uma réplica anatômica no crânio, os contornos e curvaturas da prótese são baseadas na simetria da cabeça do paciente. Grandes defeitos representam um desafio, visto que dependendo da extensão da falha na calota craniana, a modelagem por espelhamento do lado saudável pode ficar impossibilitada. Assim, o projetista responsável pela concepção do desenho tridimensional do implante deve ter em seu leque de ferramentas CAD abrangente para que possa dimensionar os mais variados defeitos da calvária humana. Para evitar retrabalhos e pré-fabricação incorreta do implante, é recomendado que a tela possua um excesso de 10 mm a partir do contorno do defeito, assim pode haver uma sobreposição da tela no osso. No anexo I figura A.3 (A) pode-se ver o modelo 3D da prótese e na figura 4.3 (B) a mesma prótese

encontrasse sobre o defeito a ser reconstruído. Usando a modelagem tridimensional com o modelo virtual exato do crânio do paciente é possível obter uma prótese totalmente personalizada e com encaixe muito preciso.

4.5. PROTOTIPAGEM RÁPIDA

No projeto de uma tela de reconstrução craniana usa-se a prototipagem rápida para verificar se o implante atende as funções pretendidas. Bem como, possibilita a avaliação da forma e contornos do produto. O modelo virtual 3D do crânio do paciente é exportado para um computador conectado à uma impressora 3D, que fará a impressão do biomodelo a ser usado nas verificações e avaliações durante a pré-fabricação. Na figura A.3 vemos dois exemplos de telas sendo conferidas com o auxílio do biomodelo impresso.

4.6. FABRICAÇÃO

O processo de fabricação escolhido para o projeto da tela é a estampagem incremental de uma chapa de titânio. Este processo necessita de um software para programação dos parâmetros e estratégias usando Computer Aided Manufacturing (CAM). O software irá gerar o código fonte que a máquina fresadora de comando numérico (CNC) irá usar para fabricar a peça. Os parâmetros a serem definidos são: velocidade de avanço, incremento vertical, estratégia, forma, tamanho e material da ferramenta e lubrificante.

Ainda não há muitos estudos preditivos do comportamento do titânio durante a estampagem incremental, porém, foram encontrados na literatura relacionada alguns parâmetros usados em testes. As escolhas das magnitudes de alguns parâmetros são feitas de forma inicial, ou seja, podem haver mudanças dos mesmos durante as fases subsequentes do projeto. Em um primeiro momento, pegaram-se dados encontrados na literatura para se ter uma ideia do valor dos parâmetros a serem usados.

Logo, no primeiro momento foi feita a escolha de se usar os parâmetros de estampagem utilizados no estudo conduzido por Bertol et al., 2010, onde foram testados os ângulos limites de estampagem do alumínio e do titânio. Os valores estão mostrados na tabela abaixo. O material da ferramenta esférica usada foi aço rápido com 10% de Co e a lubrificação foi feita com pó de MoS₂. A chapa de titânio fica fixa no prensa-chapa através de parafusos localizados nas bordas do mesmo.

Tabela 4.1: Parâmetros de estampagem

Velocidade de avanço	1000 mm/min
Rotação	Ferramenta livre
Incremento	5% do raio da ferramenta
Espessura da chapa	1 mm
Diâmetro da ferramenta	8 mm

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A demanda por próteses para cranioplastia é significativa no país na atualidade e existem muitas técnicas para a realização da operação. O projeto de uma tela de reconstrução craniana se mostrou desafiador e complexo. Muitos aspectos devem ser considerados antes mesmo de se obter uma peça a ser fabricada. Por se tratar de um produto implantável, os requerimentos de biocompatibilidade e atoxicidade do material são fundamentais. Requisitos que são amplamente atendidos pelo titânio puro e suas ligas.

O processo de estampagem incremental é um processo de alta tecnologia e capaz de gerar peças extremamente complexas em pouco tempo e com baixos custos, dependendo do tamanho do lote. Um dos problemas do processo é a necessidade de se prever o comportamento do material quando ele sofre as conformações localizadas. Sem essas predições, a fabricação da peça pode ser impropria, fazendo com que a peça não tenha a

qualidade necessária e exigida para servir como implante ortopédico. Em etapas futuras do projeto, é necessária a validação dos parâmetros selecionados.

No presente trabalho obtiveram-se as definições e influências que os aspectos e parâmetros pertinentes ao projeto de uma tela de reconstrução craniana personalizadas possuem, bem como os conceitos envolvidos na estampagem incremental, processo de fabricação escolhido para gerar os implantes. Viu-se que o material para a cranioplastia, além de atender os requisitos de biocompatibilidade, deve ter peso próximo ao do osso e resistência mecânica próxima à do osso, e também apresentar contornos harmoniosos coerentes com a anatomia humana. Se o projeto estiver em concordância com os requisitos supracitados, o produto final irá cumprir com as exigências funcionais e cosméticas.

Por se tratar da etapa conceitual do projeto, os efeitos empíricos do processo de estampagem incremental e sua viabilidade não foram julgados no presente trabalho.

5.1. TENDÊNCIAS FUTURAS

Com os conceitos estabelecidos e os parâmetros iniciais para a execução do projeto definidos, pode-se dar início a próxima fase do projeto. Na execução do projeto, o principal aspecto a ser testado é a estampagem das telas de reconstrução, já que a predição teórica do comportamento do titânio é muito difícil. Por isso é importante que hajam ensaios e análises mais profundas dos limites de aplicação do titânio na estampagem incremental de telas de reconstrução craniana.

6. CONCLUSÕES

Viu-se que a cranioplastia é um procedimento cirúrgico de extrema delicadeza e complexidade, ocorrendo com frequência relativamente alta no Brasil. Fazendo com que haja uma demanda de implantes ortopédicos resistentes e baratos. Os avanços feitos nos biomateriais fizeram com que atualmente haja uma gama imensa de opções disponíveis para serem usadas em implantes.

O material que se mostrou mais adequado até o momento para implantes ortopédicos em cirurgias de cranioplastia é o titânio. Apresentando ótimo biocompatibilidade e osseointegração com o tecido adjacente, bem como boa resistência mecânica e baixa taxa de complicações pós-cirúrgicas. Dois métodos de aquisição por imagem são possíveis, sendo que a tomografia computadorizada é o mais recomendado devido à alta precisão dimensional nos tecidos duros. O exame de TC produz imagens DICOM que são lidas em um computador e transformadas em um modelo tridimensional do crânio do paciente.

O modelo virtual do crânio é usado para a confecção do implante virtualmente usando CAD, em seguida o modelo virtual da tela é usado para gerar os parâmetros de estampagem e a estratégia usando CAM. Uma máquina de comando numérico (CNC) faz a fabricação da tela que pode ser avaliada usando o biomodelo impresso em 3D.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 5832-2 Implantes para cirurgia – Materiais metálicos – Parte 2: Titânio puro.

Aydin S., Kucukyuruk B., Abuzayed B., Aydin S., Sanus G. Z.; **“Cranioplasty: Review of materials and techniques”**, 2011, J Neurosci Rural Pract. 2011; Vol. 2(2), pp. 162-167.

Bath, S. V.; **“Biomaterials”**, 2002. Narosa Publishing House, p.181.

Bertol, L.S., Folle, L., Schaeffer, L., Kindlein, W.J.; **“Avaliação dos ângulos-limite na estampagem incremental de alumínio e titânio”**, 30ª edição do Senafor, 20-22 outubro, 2010, Porto Alegre, RS.

Cabraja, M., Klein, M., Lehmann, T.N.; **“Long-term results following titanium cranioplasty of large skull defects”**, 2009, Journal of Neurosurgery, Vol. 26, No. 6, pp. E10.

Chen, Q., Thouas, G. A.; **“Metallic implants biomaterials”**, 2015, Materials Science and Engineering, Vol. R 87, pp. 1-57.

Cunha Colombo, Luciana Rodrigues Da et al.; **“Biomateriais para reconstrução da órbita: revisão da literatura”**, 2011, Rev. Bras. Cir. Plást. (Impr.), Vol. 26, No. 2, pp. 337-342.

DOS SANTOS FONSECA, L. et al.; **“Resultados dos primeiros casos da cranioplastia com tela de titânio e retalho galeal bipediculado pós-trauma crânio-encefálico”**; Cir. plást. Iberolatinoam, 2010, Vol. 36, No. 1, pp. 39-48.

Foggiatto, J. A.; **“O uso da prototipagem rápida na área médico-odontológica”**, 2006, Revista Tecnologia e Humanismo, Vol. 20, No. 30, pp. 60-68.

Garib et al.; **“Tomografia computadorizada de feixe cônico (Cone beam): entendendo este novo método de diagnóstico por imagem com promissora aplicabilidade na Ortodontia”**, 2007, Revista Dental Press Ortodontia e Ortopedia Facial, Vol. 12, No. 2, pp. 139-156.

Haleem, A., Javaid, M.; **“Role of CT and MRI in the design and development of orthopaedic model using additive manufacturing”**, 2018, Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma, Vol. 9, pp. 213-217.

Hara, Tatiana et al.; **“Cranioplastia: parietal versus prótese customizada”**, 2011, Rev. Bras. Cir. Plást. (Impr.), Vol. 26, No. 1, pp. 32-36.

Hill, C.S., Luoma, A.M., Wilson, S., Kitchen, N.; **“Titanium cranioplasty and the prediction of complications”**, 2012, British Journal of Neurosurgery, Vol. 26, No. 6, pp. 832-837.

Horatiu et al.; **“Reconstruction of the calvarial defects using custom-made cranioplasty plates”**, 2007, TMJ, Vol. 57, No. 1, pp. 16-20.

Huutilainen, E. et al.; **“Inaccuracies in additive manufactured medil skull model caused by the DICOM to STL conversion process”**, 2014, Journal of Cranio-Maxilo-Facial Surgery, Vol. 42, pp. 259-265.

Jones, L. C., Timmie Topoleski, L. D., & Tsao, A. K.; **“Biomaterials in orthopaedic implants”**. Mechanical Testing of Orthopaedic Implants, 2017, pp. 17–32.

Mezzeti Giordano, C., de Senzi Zancul, E., & Rodrigues, V. P.; **“Análise Dos Custos Da Produção Por Manufatura Aditiva Em Comparação A Métodos Convencionais”**, 2016, Producao Online, Vol. 16(2), pp. 499-523.

Ministério da Saúde, www.datasus.saude.gov.br, acessado em 22/10/2018.

McAnulty, T., Jeswiet, J., Doolan, M.; **“Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art”**, 2017, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 16, pp. 43-54.

Nelly Vega-Woo, DNP, RN, FNP-BC; **“Evaluation of Radiation Exposure From Computed Tomography of the Head”**, 2018, Journal of Radiology Nursing, Vol. XXX, pp. 1-8.

Suriyapraikan, P.; **Single Point Incremental Forming and Multi-Stage Incremental Forming on Aluminium Allou 1050**. 98. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013

Tiburi, F. **Aspectos do processo de estampagem incremental**. 96. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

Valdevi, P. W. **Alterações cognitivas e de qualidade de vida após cranioplastia para reconstrução de craniectomia descompressiva**. 181. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Medicina: Ciências Cirúrgicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Williams L. R., Fan K. F., Bentley R. P.; **“Custom-made titanium cranioplasty: early and late complications of 151 cranioplasties and review of the literature”**. Int. J. Oral Maxillofac. Surg. 2015; Vol. 44, pp. 599–608.

Zegers T. et al.; **“The therapeutic effect of patient-specific implants in cranioplasty”**, 2017, Journal of cranio-maxillo-facial surgery: official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery, ISSN: 1878-4119, Vol. 45; No. 1, pp. 82-86.

ANEXO I

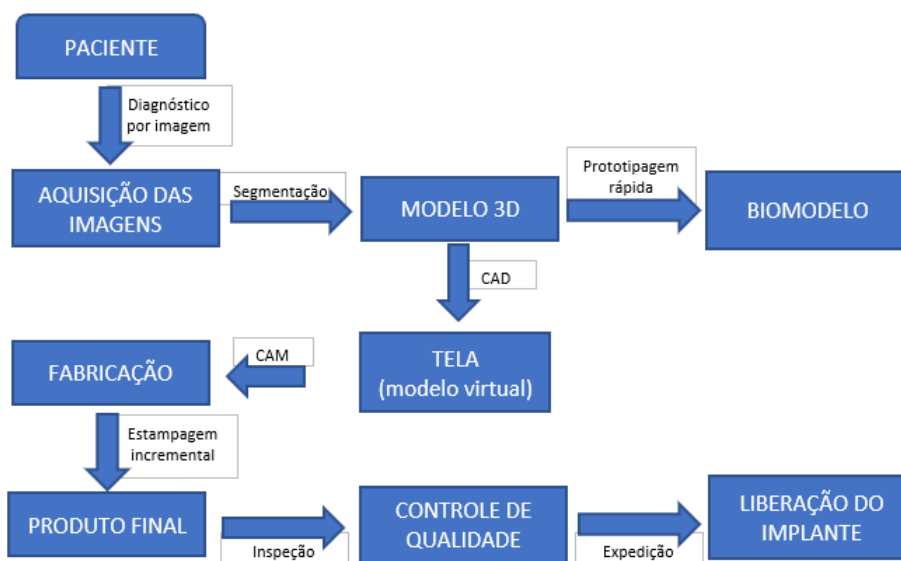


Figura A.1: Fluxograma do projeto de tela de reconstrução craniana.

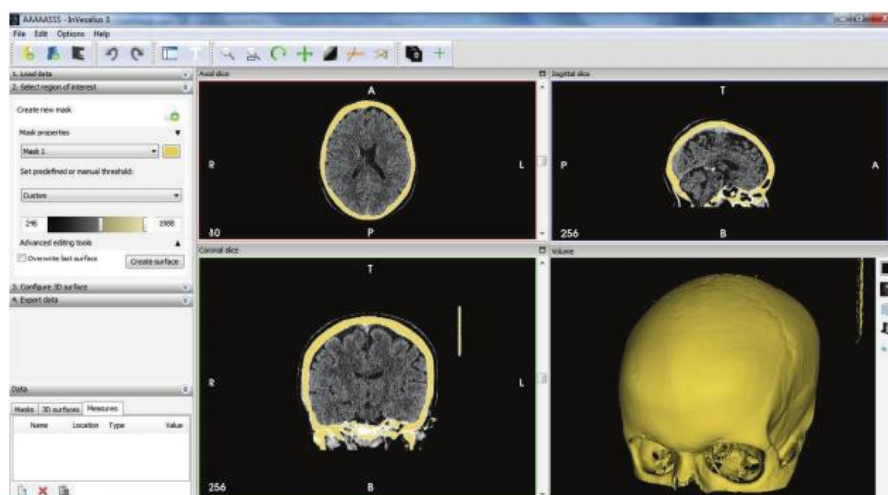


Figura A.2: Janela de trabalho de um software de leitura e conversão de imagens DICOM.

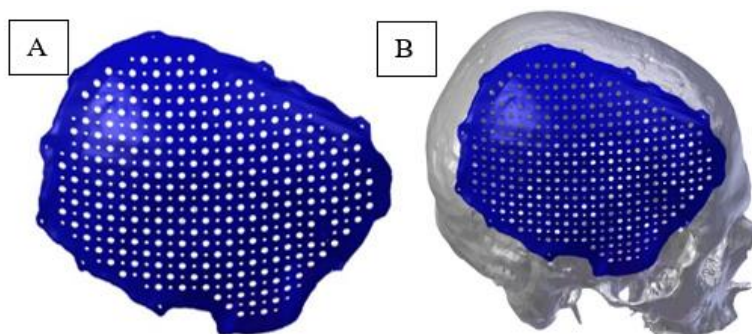


Figura A.3: (A) Modelo virtual da tela de reconstrução craniana. (B) Tela sobreposta no defeito na calvária.

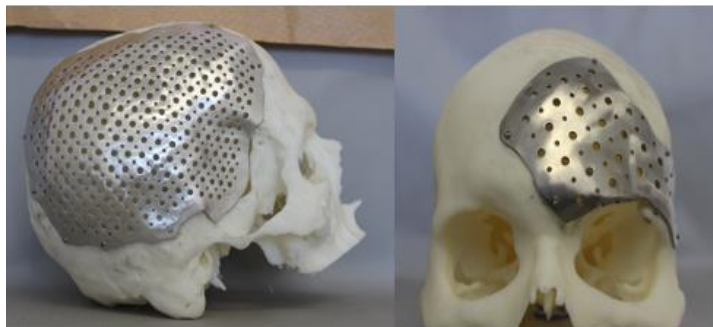


Figura 4.4: Dois exemplos de biomodelos sendo usados para verificar o encaixe do implante.