

**ALESSANDRO RODRIGUES FARIA**

**MODELAGEM DE PROCEDIMENTOS  
CIRÚRGICOS PARA TRATAMENTO DO  
HEMATOMA SUBDURAL AGUDO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2013

**ALESSANDRO RODRIGUES FARIA**

**MODELAGEM DE PROCEDIMENTOS CIRÚRGICOS PARA  
TRATAMENTO DO HEMATOMA SUBDURAL AGUDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Cleudmar Amaral de Araújo

Co-Orientador: Dr. Antônio Geraldo Diniz Roquette

UBERLÂNDIA-MG

2013

**ALESSANDRO RODRIGUES FARIA**

**MODELAGEM DE PROCEDIMENTOS CIRÚRGICOS PARA  
TRATAMENTO DO HEMATOMA SUBDURAL AGUDO**

Tese APROVADA pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr Cleudmar Amaral de Araújo – FEMEC/UFU – Orientador

---

Dr. Antonio Geraldo Diniz Roquette – FAMED/UFU – Coorientador

---

Prof. Dr. Edson Antonio Capello Sousa – DEM/UNESP/BAURU

---

Prof. Dr. Sebastião Nataniel Silva Gusmão - UFMG

---

Prof. Dr. Ricardo Fortes de Miranda – FEMEC/ UFU

---

Profa. Dra. Sonia A. Goulart Oliveira – FEMEC/UFU

**Uberlândia, 09 de Outubro de 2013.**

Dedico este trabalho à minha esposa,  
Claudimar Elias de Deus Faria, que não mediu  
esforços para mais este passo em nossa vida,  
aos meus filhos Rafael e Filipe,  
e a todos que contribuíram para a finalização deste.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre me orientando e me dando forças a cada passo.

À minha família pelo amor recebido, apoio sem limites, paciência constante, e esforços direcionados para mais este passo em nossa vida.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

Ao meu orientador, prof. Dr. Cleudmar A. Araújo, pelas ideias objetivas em momentos importantes durante a realização deste trabalho, e por contribuir para o desenvolvimento da interação Engenharia/Medicina. Desejo passar adiante o que aprendi com você.

Ao meu coorientador, Dr. Antonio Geraldo Diniz Roquette, pelo conhecimento transmitido durante o trabalho, sem o qual seria impossível a realização deste, e por contribuir para o desenvolvimento da interação Engenharia/Medicina.

Ao Prof. Dr. Ricardo Fortes de Miranda, pelas ideias objetivas, durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Francisco Paula Léopore Neto, pelas ideias objetivas, durante a realização deste trabalho.

Aos médicos neurocirurgiões, Carlos Robson Alarcão Carísio, José Weber Vieira Faria, Isac Alaor Dias, Silvio Sarmiento Lessa, pela contribuição na Técnica CVBFD e cooperação para o desenvolvimento da interação Engenharia/Medicina.

Ao Prof. Dr. Henner Alberto Gomide e à profa Dra. Sônia Aparecida Goulart Oliveira, por terem me introduzido na pesquisa nos anos 90, como meus orientadores de IC e de Mestrado.

A todos os colegas do Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner A. Gomide, e ao técnico Valdico de Faria, pelo carinho, amizade e ajuda durante todo esse tempo.

Às secretárias da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por todo seu apoio e amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela bolsa concedida.

## Fugindo da Salvação

O homem comeu a fruta da desobediência, caiu em pecado e foi expulso do paraíso. Alguns dizem que ele foi expulso do paraíso e só depois passou a comer a fruta. Tanto faz! O que interessa é que Deus foi atrás e está tentando buscar de volta a ovelha desgarrada. E a história foi sempre o homem correndo de Deus, e Deus correndo atrás para perdoar e salvar o homem. Tentou com Noé, mas houve nova queda. Depois veio a aliança com Abraão, mas Ló se separou dele, e assim, a fruta do pecado teve nova oportunidade. Em Sodoma e Gomorra, os anjos diziam a Ló para “levantar-se e sair, pois a cidade seria destruída”, mas ele não se mexia. Como o homem moderno, estava vendo seu próprio fim e não reagia. Os anjos tiveram que arrastá-lo para fora da cidade. Depois, escravizado por comer novamente a fruta, o homem clamou no Egito, e Deus enviou Moisés.

Alguns mudaram a forma de agir. Jó quando se remoía em cinzas exclamou: “Deus deu, Deus tirou”. E as trevas foram perdendo suas forças. Uma sucessão de quedas e ascensões começou a ocorrer. Jeremias ficou surpreso quando Deus apresentou outra fala com “Perdoarei todas as suas iniquidades”.

Então a Luz chegou e se apresentou de forma única: “Eu sou o caminho, a verdade e a vida. Ninguém vem ao Pai senão por mim”.

Não se trata de um dos caminhos, mas “o caminho”. E ainda na cruz, a Luz abriu as portas de volta para a origem de tudo: “Hoje estarás comigo no paraíso”.

Muitos, como Paulo, entendendo isto fecharam a aliança oferecida: “Quanto a mim, não julgo tê-lo alcançado; mas uma coisa faço: esquecendo-me das coisas que para trás ficam e avançando para as que diante de mim estão, prossigo para o alvo, para o prêmio da soberana vocação de Deus em Cristo Jesus”.

Alessandro Rodrigues Faria

FARIA, A. R. **Modelagem de procedimentos cirúrgicos para tratamento do Hematoma Subdural Agudo**. 2013. 119 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### Resumo

Alguns traumas cerebrais com sangramento no espaço subdural ocasionam o Hematoma Subdural Agudo (HSDA). O tratamento é o procedimento cirúrgico denominado de Craniotomia Descompressiva (CD), com ampla abertura da dura-máter. Os prognósticos são desanimadores, devido à alta taxa de morbi/mortalidade. O processo de rápida descompressão intradural provoca acentuada extrusão cerebral, gerando isquemia e edemas. Neurocirurgiões associados a engenheiros mecânicos, ambos da Universidade Federal de Uberlândia, propuseram o método denominado de Craniotomia Vértex-Basal com Fenestrações Durais (CVBFD), no qual são feitas múltiplas e pequenas incisões na dura-máter, para diminuir de forma gradual a pressão intracraniana. Minimiza-se o efeito de grandes deformações nas estruturas cerebrais. As análises destas técnicas são dificultadas, pois, o tecido biológico é anisotrópico, não homogêneo, e possui relação não linear entre os campos de tensão e deformação. O objetivo deste trabalho foi avaliar os procedimentos de CD e CVBFD utilizando modelagem de tecidos vivos integrados a modelos numéricos de elementos finitos, simulando o ambiente cerebral, avaliando o comportamento biomecânico. No processo CVBFD, foi observado não só deslocamento total menor em linhas de medida na dura-máter e no hematoma, como também menor valor de tensão principal máxima. O aumento do número de fenestrações melhora a flexibilidade da dura-máter.

---

Palavras-chave: Hematoma Subdural Agudo, Craniotomia Descompressiva, Craniotomia Vértex-Basal com Fenestrações Durais, Neurocirurgia, Elementos Finitos, Modelagem de Tecidos Vivos.



FARIA, A. R. **Modeling of surgical procedures for the treatment of acute subdural hematoma.** 2013. 119 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### **Abstract**

Some types of brain trauma with bleeding in the subdural space cause the Acute Subdural Hematoma (ASDH). The treatment is the surgical procedure called a decompressive craniotomy (DC), with a wide opening of the dura mater. The prognoses are discouraging because of high morbidity / mortality. The process of rapid intradural decompression causes severe cerebral extrusion, resulting in edema and ischemia. Neurosurgeons associated with mechanical engineers, both from the Federal University of Uberlândia, proposed the method called Basal Vertex craniotomy with dural fenestration (BVCDF), in which are made multiple small incisions in the dura mater, for gradually decrease the intracranial pressure. Minimizes the effect of large deformations generated in brain structures. The analyzes of these techniques are hampered because the biological tissue is anisotropic, inhomogeneous, and possesses non-linear relationship between the stress field and strain field. The aim of this study was to evaluate the procedures DC and BVCDF modeling using living tissue integrated numerical finite element models simulating the brain environment and evaluating the biomechanical behavior. Both procedures were also qualitatively evaluated through in vitro approach. In the process BVCDF was observed not only a smaller value of total displacement in lines of dura mater and hematoma, as well as smaller value of maximum principal stress. The increase in the number of fenestrations improves the flexibility of the dura mater.

---

Key Words: Acute Subdural Hematoma, Decompression Craniotomy, Basal-Vertex Craniotomy with Dual Fenestrations, Neurosurgery, Finite Elements, Modeling of Living Tissue.

## Lista de Símbolos

<b>Símbolos</b>	<b>Significado</b>
$\alpha_n$	Constante Material
$C_{ij0}$	São parâmetros que descrevem a elasticidade instantânea do tecido
$C = F^T F$	Tensor de Cauchy-Green
$\mu_n$	Constante Material
$\mu$	Módulo de cisalhamento instantâneo
$\mu_0$	Módulo de cisalhamento instantâneo ( $\mu$ ) no estado não deformado
$\Delta L$	Variação do Comprimento
$E$	Módulo de elasticidade
$\varepsilon$	Deformação
$\varepsilon^e$	Deformação Elástica
$\varepsilon^v$	Deformação Viscosa
$F$	Gradiente Deformação
$F^i$	Gradiente de deformação inelástico.
$F^e$	Gradiente de deformação elástico.
$\varphi$	Energia de deformação
$\varphi^e$	Contribuições elásticas da Energia de deformação
$\varphi^i$	Contribuições ineláticas da Energia de deformação
$\Psi$	Potencial Incremental de Energia
$g_k$	Coeficiente de relaxação
$Q$	Variáveis Internas
$\dot{h}$	Velocidade da parte superior da máquina dos testes de Miller
$\psi$	pseudo potencial que fornece a dependência da tensão sobre a taxa aproximação incremental de taxa de variáveis $\dot{F}^i$ e $\dot{Q}$
$K$	Constante volumétrica (Miller sugere $K = 1,583$ para material do cérebro)
$\eta$	Parâmetro de amortecimento (viscosidade).
$I_1$	Primeiro invariante de deformação
$I_2$	Segundo invariante de deformação

$I_3$	Terceiro invariante de deformação
$\lambda$	A taxa de alongamento do material (Razão de alongamento)
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Alongamentos Principais
$\nabla F$	Gradiente de deformação
$L$	Comprimento Inicial
$L_0$	Comprimento Final
$m$	massa
$m_1$	Quantidade de fluido na entrada do recipiente
$m_2$	Quantidade de fluido na saída do recipiente
$p$	pressão
$P$	É o Tensor de Piola-Kirchhoff.
$T$	Tensão de Lagrange
$T_R(x)$	Primeiro Tensor Tensão de Piola-Kirchhoff
$\tau_{zz}$	Componente de tensão
$\tau_k$	Constante de tempo
$t$	tempo
$\sigma$	Tensão
$\sigma^e$	Tensão elástica
$\sigma^v$	Tensão viscosa
$V$	Volume
$\omega$	Função Densidade de Energia de Deformação, ou função de energia livre de Helmholtz, $\omega = \omega(F) = \omega(C)$

## Lista de Abreviaturas

<b>breviaturas</b>	<b>Significado</b>
AVC	Acidente Vascular Cerebral
CD	Craniotomia Descompressiva
CVBFD	Craniotomia Vértex Basal com Fenestrações Durais
DT	Deslocamento Total
ECG	Escala de Coma de Glasgow
EF	Elementos Finitos
FAMED	Faculdade de Medicina FAMED (UFU)
Fe	Fenestrações Variadas
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica (UFU)
FH	Fenestrações Horizontais
FV	Fenestrações Verticais
FSC	Fluxo Sanguíneo Cerebral
HIC	Hipertensão Intracraniana
HSDA	Hematoma Subdural Agudo
LCR	Líquido Cefalorraquidiano
LPM	Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner A. Gomide
MFD	Múltiplas Fenestrações da Dura-Máter
PAM	Pressão Arterial Média
PIC	Pressão Intracraniana
PPC	Pressão de Perfusão Cerebral
PV	Pressão Venosa
PVC	Cloreto de Polivinil
RVC	Resistência Vascular Cerebral
SNC	Sistema Nervoso Central
TCE	Trauma Cranioencefálico
$(TC)_{xyz}$	Matriz simétrica que fornece as componentes do Tensor Tensão de Cauchy
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UTI	Unidade de Terapia Intensiva

## Sumário

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 – A Estrutura Cerebral – Conceitos Básicos	5
2.1.1 – Principais Elementos	5
2.1.2 – A Pressão Intracraniana (PIC)	10
2.1.3 – O Hematoma Subdural Agudo (HSDA)	17
2.2 – Tratamento do HSDA – Técnicas Cirúrgicas	20
2.2.1 – Craniotomia Descompressiva (CD)	20
2.2.2 – Craniotomia Vértex-Basal com Fenestrações Duraís (CVBFD)	23
2.3 – Modelagem de Tecidos Macios Adaptada às Estruturas Cerebrais	28
2.3.1 – Modelagem de Tecidos Biológicos	28
2.3.2 – Modelos Matemáticos para Tecido Cerebral	32
2.3.3 – Modelos Matemáticos para Estruturas do Cérebro	37
a) Modelo Constitutivo Hiperelástico	39
b) Modelo Constitutivo Viscoelástico	40
CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 – Modelagem Numérica do HSDA - Estado da Arte	43
3.2 – Comportamento Físico dos Processos Cirúrgicos	53
3.3 – Avaliação das Técnicas Cirúrgicas para Tratamento do HSDA	57
3.3.1 Aparato Experimental	57
3.3.2 Modelagem por Elementos Finitos	61
a) Modelo Adaptado para a Análise Experimental	61
b) Modelo Bidimensional	65
c) Modelo Tridimensional Não Linear	66
CAPÍTULO IV – RESULTADOS	78
4.1 – Avaliação qualitativa dos fenômenos de CD e CVBFD	78
4.2 – Teste de Malha no Modelo Tridimensional Não Linear	83
4.3 – Avaliação Não Linear dos Fenômenos Relacionados com a Técnica CD e CVBFD	88
CAPÍTULO V – DISCUSSÃO	93
5.1 Avaliação qualitativa	93
5.2 Avaliação Não Linear	95

CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO	97
CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXO 1 – TABELA INDICATIVA DE AVALIAÇÃO UTILIZANDO A ECG	105