



Lucas Boabaid Ibrahim

**Análise numérica e experimental da mecânica de
formação de aneurismas da aorta abdominal**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadora: Djenane Cordeiro Pamplona

Rio de Janeiro, agosto de 2010



Lucas Boabaid Ibrahim

**Análise numérica e experimental da mecânica de formação
de aneurismas da aorta abdominal**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Djenane Cordeiro Pamplona

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Paulo Batista Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Agenor de Toledo Fleury

Centro Universitário da FEI

Prof. Carlos Eduardo Virgini Magalhães

UERJ

Prof. Claudio Ribeiro Carvalho

UFF

Prof. Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC – Rio

Rio de janeiro, 03 de agosto de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Lucas Boabaid Ibrahim

Graduou-se Engenheiro Civil em Dezembro de 2003, pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI)

Possui Mestrado em Engenharia Civil pelo Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Ficha Catalográfica

Ibrahim, Lucas Boabaid

Análise numérica e experimental da mecânica de formação de aneurismas da aorta abdominal / Lucas Boabaid Ibrahim ; orientadora: Djenane Cordeiro Pamplona. – 2010.

272 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Aneurisma. 2. Elementos finitos. 3. Instabilidade. 4. Deformações finitas. I. Pamplona, Djenane Cordeiro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, amigos e a todos que contribuíram na realização deste trabalho.

Agradecimentos

À PUC-Rio e aos professores do Departamento de Engenharia Civil.

A minha orientadora, pela convivência, disponibilidade, incentivo, paciência e pelos conhecimentos transmitidos durante estes últimos anos.

À banca examinadora.

Aos meus colegas durante estes quatro anos.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Civil.

Ao CNPq pela bolsa e à FAPERJ e CAPES pelo suporte à pesquisa.

Resumo

Ibhahim, Lucas Boabaid; Pamplona, Djenane Cordeiro. **Análise numérica e experimental da mecânica de formação de aneurismas da aorta abdominal.** Rio de Janeiro, 2010. 272p. Dissertação de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese tem por objetivo investigar numérica e experimentalmente a mecânica da formação dos aneurismas na aorta abdominal. A parte experimental foi realizada no Laboratório de Membranas e Biomembranas utilizando-se tubos de silicone com a geometria aproximada da aorta sob pressão hidrostática. Foi investigada a pressão necessária à formação dos aneurismas e o comportamento do material ensaiado. A parte numérica foi realizada por meio do método dos elementos finitos através do programa ABAQUS (6.8.1). Com a análise numérica foi validada a análise experimental. Foram estudados casos de imperfeição geométrica e física do material, usando equações constitutivas propostas para o material da aorta.

Palavras-chave

Aneurisma; elementos finitos; instabilidade; deformações finitas

Abstract

Ibhahim, Lucas Boabaid; Pamplona, Djenane Cordeiro (Advisor).
Numerical and experimental analysis of mechanics of formation of abdominal aortic aneurysms. Rio de Janeiro, 2010. 272p. DSc.
Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this work is to investigate numerically and experimentally the mechanics of aortic aneurysms. The experimental part was performed at the Laboratory of Membranes and Biomembranes using silicone tubes with the geometry of the aorta under hydrostatic pressure. We investigate the behavior of the material tested and the critical pressure, this is the pressure necessary for the formation of aneurysms. The numerical analysis is done using the finite element code ABAQUS (6.8.1), and is validated by the experimental analysis. Some studies of geometrical and physical imperfections are performed, as well as the ones with constitutive equations for the material of the aorta.

Keywords

Aneurysm; finite elements; instability; finite deformation

Sumário

1 Introdução	32
1.1. Objetivo da dissertação	33
1.2. Organização do texto	34
2 Revisão bibliográfica	36
2.1. Definição de aneurismas	36
2.2. Tipos de aneurismas	37
2.3. Prevalência	39
2.4. Aorta	40
2.5. Divisão da artéria aorta	42
2.6. Camadas da parede arterial	44
2.7. Etiopatogenia	45
2.8. História	46
2.9. Risco de ruptura e morte	47
2.10. Fatores de risco de ruptura	47
2.11. Diagnósticos clínicos e exames subsidiários	49
2.12. Estudos de modelagens encontradas	50
2.13. Estudo microscópico do tecido arterial	57
3 Análise experimental	59
3.1. Aparato utilizado na análise experimental	61
3.2. Descrição do procedimento realizado na análise experimental	62
3.3. Escolha do material	63
3.4. Confecção do tubo de silicone	64
3.5. Obtenção das propriedades do silicone	65
3.5.1. Corpo de prova	68
3.5.2. Pré-condicionamento	68
3.6. Resultados dos ensaios com tubos de silicone	69
3.7. Estudo da pressão	69

3.8. Estudo da variação volumétrica	70
3.9. Ensaaios experimentais	70
3.9.1. Ensaio 1	70
3.9.2. Ensaio 2	73
3.9.3. Ensaio 3	75
3.9.4. Ensaio 4	78
3.9.5. Ensaio 5	80
3.9.6. Ensaio 6	83
3.10. Padronização das pressões críticas	85
3.11. Padronização da análise do volume	86
3.12. Repetibilidade do ensaio	87
3.13. Causas da variação da pressão crítica	88
4 Análise numérica	90
4.1. Descrição da análise numérica	90
4.2. Formulação dos funcionais de energia	91
4.3. Escolha do funcional de energia	93
4.4. Definição da geometria	96
4.4.1. Elemento de casca	96
4.4.2. Elemento sólido	97
4.5. Análise de convergência	98
4.5.1. Análise de convergência de elemento de casca	98
4.5.2. Análise de convergência de elemento sólido	101
4.6. Análise da pressão crítica	103
4.6.1. Análise da pressão crítica com elementos de casca e funcional de energia Ogden	104
4.6.1.1. Sem alongamento	104
4.6.1.2. Alongamento de 10%	105
4.6.1.3. Alongamento de 20%	105
4.6.1.4. Comparação dos elementos de casca	106
4.6.2. Análise da pressão crítica com elementos de casca e funcional de energia Neo Hooke	107
4.6.2.1. Sem alongamento	107

4.6.2.2. Alongamento de 10%	108
4.6.2.3. Alongamento de 20%	109
4.6.2.4. Comparação dos elementos de casca	109
4.6.3. Análise da pressão crítica com elementos sólidos e funcional de energia Ogden	111
4.6.3.1. Sem alongamento	111
4.6.3.2. Alongamento de 10%	111
4.6.3.3. Alongamento de 20%	112
4.6.3.4. Comparação dos elementos sólidos	113
4.6.4. Análise da pressão crítica com elementos sólidos e funcional de energia Neo Hooke	114
4.6.4.1. Sem alongamento	114
4.6.4.2. Alongamento de 10%	115
4.6.4.3. Alongamento de 20%	116
4.6.4.4. Comparação dos elementos sólidos	116
4.6.5. Comparação dos elementos de casca e sólidos	118
4.7. Estudo das imperfeições impostas	120
4.7.1. Análise da pressão crítica para imperfeição anelar inferior	123
4.7.2. Análise da pressão crítica para imperfeição anelar superior	126
4.7.3. Análise da pressão crítica para imperfeição local	130
4.7.3.1. Caso 1	130
4.7.3.1.1. Caso 1 – modelo perfeito	131
4.7.3.1.2. Caso 1 – espessura de 3,0 mm	132
4.7.3.1.3. Caso 1 – espessura de 2,5 mm	132
4.7.3.1.4. Caso 1 – espessura de 2,0 mm	133
4.7.3.1.5. Caso 1 – espessura de 1,5 mm	134
4.7.3.1.6. Caso 1 – espessura de 1,0 mm	134
4.7.3.1.7. Estudo comparativo do caso 1	135
4.7.3.2. Caso 2	138
4.7.3.2.1. Caso 2 – espessura 3,0 mm	139
4.7.3.2.2. Caso 2 – espessura 2,5 mm	140
4.7.3.2.3. Caso 2 – espessura 2,0 mm	140
4.7.3.2.4. Caso 2 – espessura 1,5 mm	141

4.7.3.2.5. Caso 2 – espessura 1,0 mm	142
4.7.3.2.6. Estudo comparativo do caso 2	142
4.7.3.3. Caso 3	145
4.7.3.3.1. Caso 3 – espessura de 3,0 mm	146
4.7.3.3.2. Caso 3 – espessura de 2,5 mm	147
4.7.3.3.3. Caso 3 – espessura de 2,0 mm	147
4.7.3.3.4. Caso 3 – espessura de 1,5 mm	148
4.7.3.3.5. Caso 3 – espessura de 1,0 mm	151
4.7.3.3.6. Estudo comparativo do caso 3	151
4.7.3.4. Caso 4	152
4.7.3.4.1. Caso 4 – espessura de 3,0 mm	153
4.7.3.4.2. Caso 4 – espessura de 2,5 mm	154
4.7.3.4.3. Caso 4 – espessura de 2,0 mm	154
4.7.3.4.4. Caso 4 – espessura de 1,5 mm	155
4.7.3.4.5. Caso 4 – espessura de 1,0 mm	156
4.7.3.4.6. Estudo comparativo do caso 4	156
4.7.3.5. Estudo comparativo da análise da pressão crítica para imperfeição local	159
4.7.4. Análise da pressão crítica para imperfeições geradas por excentricidade	161
4.7.4.1. Ogden – excentricidade de 0,5	161
4.7.4.2. Avaliação gráfica	163
4.7.4.3. Neo Hooke – excentricidade de 0,5	165
4.7.4.4. Avaliação gráfica	167
4.7.4.5. Ogden – excentricidade de 1,0	169
4.7.4.6. Avaliação gráfica	171
4.7.4.7. Neo Hooke – excentricidade de 1,0	173
4.7.4.8. Avaliação gráfica	176
4.7.4.9. Ogden – excentricidade de 1,5	178
4.7.4.10. Avaliação gráfica	180
4.7.4.11. Neo Hooke – excentricidade de 1,5	182
4.7.4.12. Avaliação gráfica	184
4.7.4.13. Ogden – excentricidade de 2,0	186

4.7.4.14. Avaliação gráfica	188
4.7.4.15. Neo Hooke – excentricidade de 2,0	190
4.7.4.16. Avaliação gráfica	192
4.7.5. Análise da pressão crítica para imperfeição gerada por excentricidade e diminuição da constante elástica	197
4.7.5.1. Análise da sensibilidade da pressão crítica com a perda das propriedades elásticas para excentricidade de 0,5	197
4.7.5.2. Avaliação gráfica	201
4.7.5.3. Análise da sensibilidade da pressão crítica com a perda das propriedades elásticas para excentricidade de 1,0	202
4.7.5.4. Avaliação gráfica	206
4.7.5.5. Análise da sensibilidade da pressão crítica com a perda das propriedades elásticas para excentricidade de 1,5	207
4.7.5.6. Avaliação gráfica	211
4.7.5.7. Análise da sensibilidade da pressão crítica com a perda das propriedades elásticas para excentricidade de 2,0	212
4.7.5.8. Avaliação gráfica	216
5. Análise numérica realizada com as características da parede arterial	220
5.1. Primeiro estudo das propriedades da aorta	220
5.1.1. Escolha do funcional de energia	221
5.1.2. Análise de convergência	223
5.1.3. Análise da pressão crítica com elementos de casca e funcional de energia Ogden 1	224
5.1.3.1. Sem alongamento	225
5.1.3.2. Alongamento de 10%	225
5.1.3.3. Alongamento de 20%	226
5.1.3.4. Comparação da pressão crítica para Ogden 1	227
5.1.4. Análise da pressão crítica com elementos de casca e funcional de energia Yeoh	228
5.1.4.1. Sem alongamento	228
5.1.4.2. Alongamento de 10%	229
5.1.4.3. Alongamento de 20%	229

5.1.4.4. Comparação da pressão crítica para Yeoh	230
5.2. Segundo estudo das propriedades da aorta	231
5.2.1. Equação constitutiva de Delfino	231
5.2.2. Equação constitutiva de Sacks	233
5.2.2.1. Equação constitutiva de Sacks aplicada a espessura da media	234
5.2.2.2. Equação constitutiva de Sacks aplicada a espessura da media e geometria de D.P. Sokolis	235
5.3. Estudo da degeneração local do tecido arterial para a formação do aneurisma	235
5.3.1. Primeiro estudo das imperfeições locais dos aneurismas	237
5.3.2. Segundo estudo das imperfeições locais dos aneurismas	241
6. Resultados finais	245
6.1. Tubos de silicone	245
6.1.1. Comparação entre os resultados da pressão crítica	245
6.1.2. Comparação entre os resultados da tensão	247
6.2. Comparação da pressão crítica dos estudos de imperfeição	249
6.2.1. Análise da pressão crítica para imperfeições locais simétricas	249
6.2.2. Análise da pressão crítica para imperfeições locais assimétricas	251
6.2.3. Análise dos elementos sólidos com excentricidade	253
6.2.4. Análise dos elementos sólidos com excentricidade e variação da constante elástica	255
6.3. Comparação entre os resultados da pressão crítica obtidas numérica e experimentalmente	256
6.4. Avaliação da pressão para o gráfico tensão deformação proposto por Sacks	260
6.5. Estudo das equações constitutivas de artéria	261
6.7. Trabalhos futuros	263
7. Bibliografia	265
Anexo A Código de elementos sólidos	270

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Exemplo de aneurismas – John A. Elefteriades (2006)	32
Figura 2.1 – Exemplo de dilatação permanente e localizada – http://www.gforum.tv/board/1092/285283/um-importante-avanco-no-entendimento-dos-aneurismas-cerebrais.html	36
Figura 2.2 - Representação da ruptura do aneurisma - John A. Elefteriades (2006)	37
Figura 2.3 - Representação da dissecação dos aneurismas - John A. Elefteriades (2006)	38
Figura 2.4 - Corte transversal do aneurisma de dissecação - John A. Elefteriades (2006)	39
Figura 2.5 - Local da maior incidência dos aneurismas - http://copy.pnn.pt/noticias_imagens/aneurisma_aorta.jpg	30
Figura 2.6 - Exemplo de aneurisma na aorta abdominal - http://www.hospiten.es/hospiten/HOSPITEN/published/DEFAULT/CMI/DT E/aaa/aneurisma0007.jpg	40
Figura 2.7 - Espessura da parede arterial após a formação do aneurisma - John A. Elefteriades (2006)	41
Figura 2.8 – Variação da espessura da parede arterial no local de ruptura do aneurisma - Madhavan L. Raghavan e outros (2006)	42
Figura 2.9 - Representação da aorta e dos principais órgãos do corpo humano - http://manualmerck.net/images/thumbnail/p_140.gif	42
Figura 2.10 - Representação da aorta segmentada - http://manualmerck.net/images/thumbnail/p_141.gif	43
Figura 2.11 - Camadas constituintes da aorta – Gerhard A. Holzapfel (2000)	44
Figura 2.12 - Exemplo de próteses usadas na reparação de aneurismas - http://manualmerck.net/images/thumbnail/p_142-1.gif	46
Figura 2.13 – Imagem gerada por angiorressonância - http://www.cetac.com.br/ex3.htm	50

Figura 2.14 – Gráfico de energia da camada luminal	55
Figura 2.15 - Microscopia realizada no tecido arterial – D. P. Sokolis (2006)	59
Figura 3.1 - Variação da espessura da parede arterial proposta por D. P. Sokolis (2007)	60
Figura 3.2 - Variação do diâmetro interno e externo da parede arterial proposta por D. P. Sokolis (2007)	60
Figura 3.3 - Equipamentos utilizados na análise experimental	61
Figura 3.4 - Corpos de prova para determinação da concentração de catalisador	63
Figura 3.5 – Processo para retirada de bolhas da mistura	64
Figura 3.6 - Detalhes do molde de gesso utilizado na confecção do tubo de silicone	65
Figura 3.7 - Detalhe da garra utilizada no ensaio de tração do corpo de prova	66
Figura 3.8 - Detalhe do ensaio de tração	67
Figura 3.9 - Representação dos corpos de prova e da artéria	68
Figura 3.10 – Seqüência de fotos ao longo do ensaio (pressões em mmHg)	71
Figura 3.11 – Gráfico de caracterização do ensaio 1	72
Figura 3.12 – Variação da pressão do ensaio 1	72
Figura 3.13 – Variação do volume do ensaio 1	73
Figura 3.14 – Gráfico de caracterização do ensaio 2	74
Figura 3.15 – Variação da pressão do ensaio 2	74
Figura 3.16 – Variação do volume do ensaio 2	75
Figura 3.17 – Seqüência de fotos ao longo do ensaio (pressões em mmHg)	77
Figura 3.18 – Gráfico de caracterização do ensaio 3	77
Figura 3.19 – Variação da pressão do ensaio 3	77
Figura 3.20 – Variação do volume do ensaio 3	78
Figura 3.21 – Gráfico de caracterização do ensaio 4	79
Figura 3.22 – Variação da pressão do ensaio 4	79
Figura 3.23 – Variação do volume do ensaio 4	80

Figura 3.24 – Seqüência de fotos ao longo do ensaio (pressões em mmHg)	81
Figura 3.25 – Gráfico de caracterização do ensaio 5	82
Figura 3.26 – Variação da pressão do ensaio 5	82
Figura 3.27 – Variação do volume do ensaio 5	83
Figura 3.28 – Gráfico de caracterização do ensaio 6	84
Figura 3.29 – Variação da pressão do ensaio 6	84
Figura 3.30 – Variação do volume do ensaio 6	85
Figura 3.31 – Análise da variação da pressão	86
Figura 3.32 – Análise da variação do volume	87
Figura 3.33 – Gráfico de caracterização do ensaio 7	88
Figura 3.34 – Imperfeições	89
Figura 4.1 – Caracterização numérica do material estudado	93
Figura 4.2 – Aproximação dos funcionais de energia	94
Figura 4.3 – Aproximação dos funcionais de energia estáveis	95
Figura 4.4 – Representação esquemática da variação da espessura ao longo do comprimento para o elemento de casca	97
Figura 4.5 – Representação esquemática da variação da espessura ao longo do comprimento para o elemento sólido	98
Figura 4.6 – Gráfico demonstrativo da análise de convergência do elemento de casca para o funcional Ogden 1	99
Figura 4.7 – Malhas testadas para o elemento de casca	100
Figura 4.8 – Gráfico demonstrativo da análise de convergência do elemento de casca para o funcional Neo Hooke	100
Figura 4.9 – Gráfico demonstrativo da análise de convergência dos elementos sólidos para o funcional Ogden 1	101
Figura 4.10 – Malhas testadas para o elemento sólido	102
Figura 4.11 – Gráfico demonstrativo da análise de convergência dos elementos sólidos para o funcional Neo Hooke	102
Figura 4.12 – Malha adotada para a análise com elementos sólidos	103
Figura 4.13 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone sem alongamento	104

Figura 4.14 – Configuração indeformação e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 10%	105
Figura 4.15 – Configuração indeformação e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 20%	106
Figura 4.16 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)	106
Figura 4.17 – Variação da tensão máxima trativa principal para o elemento de casca	107
Figura 4.18 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone sem alongamento	108
Figura 4.19 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 10%	108
Figura 4.20 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 20%	109
Figura 4.21 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)	110
Figura 4.22 – Variação da tensão máxima trativa principal para o elemento de casca	110
Figura 4.23 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone sem alongamento	111
Figura 4.24 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 10%	112
Figura 4.25 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 20%	113
Figura 4.26 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)	113
Figura 4.27 – Variação da tensão máxima trativa principal para o elemento sólido	114
Figura 4.28 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone sem alongamento	115
Figura 4.29 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 10%	115
Figura 4.30 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de	

silicone com alongamento de 20%	116
Figura 4.31 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)	117
Figura 4.32 – Variação da tensão máxima trativa principal para o elemento sólido	117
Figura 4.33 – Comparação da variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial) para elementos de casca	118
Figura 4.34 – Comparação da variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial) para elementos sólidos	119
Figura 4.35 – Comparação da variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento (% do comprimento inicial) para os elementos de casca	119
Figura 4.36 – Comparação da variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento (% do comprimento inicial) para os elementos sólidos	120
Figura 4.37 – Esquema da imperfeição em formato de anel	121
Figura 4.38 – (a), (b) e (c) Esquema da imperfeição em formato de semi-anel e (d) formato da área da seção transversal no corte AA	121
Figura 4.39 – Seção transversal da casca com círculos não concêntricos e excentricidade e	122
Figura 4.40 – Pressão crítica em função da diminuição da espessura da região anelar inferior e valor da pressão crítica no modelo perfeito	124
Figura 4.41 – (a) posição da imperfeição e (b), (c), (d), (e) e (f) configurações deformadas para 3,5 mm (modelo perfeito), 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm e 1,5 mm	124
Figura 4.42 - Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito	125
Figura 4.43 – Pressão crítica em função da diminuição da espessura da região anelar superior e valor da pressão crítica no modelo perfeito	127
Figura 4.44 – (a) posição da imperfeição e (b), (c), (d), (e), (f), (g) e (h) configurações deformadas para 4,3 mm (modelo perfeito), 4,0 mm, 3,5 mm, 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm e 1,5 mm	128

Figura 4.45 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito	129
Figura 4.46 – Posição do primeiro caso das imperfeições localizadas	131
Figura 4.47 – Configuração indeformada e deformada sem imperfeição	131
Figura 4.48 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm	132
Figura 4.49 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,5 mm	133
Figura 4.50 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,0 mm	133
Figura 4.51 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,5 mm	134
Figura 4.52 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,0 mm	135
Figura 4.53 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,5 mm, 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm para o caso 1 de imperfeições locais	136
Figura 4.54 – Variação da pressão crítica para o caso 1 e valor da pressão crítica no modelo perfeito	137
Figura 4.55 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 1 e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito	138
Figura 4.56 – Posição do segundo caso das imperfeições localizadas	139
Figura 4.57 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm	139
Figura 4.58 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,5 mm	140
Figura 4.59 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,0 mm	141
Figura 4.60 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,5 mm	142
Figura 4.61 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,0 mm	142
Figura 4.62 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm para o caso 2 de imperfeições locais	143
Figura 4.63 – Variação da pressão crítica para o caso 2 e valor da pressão crítica no modelo perfeito	144
Figura 4.64 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 2 e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito	145
Figura 4.65 – Posição do segundo caso das imperfeições localizadas	146
Figura 4.66 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm	146
Figura 4.67 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,5 mm	147
Figura 4.68 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,0 mm	148

Figura 4.69 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,5 mm	148
Figura 4.70 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,0 mm	149
Figura 4.71 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm para o caso 3 de imperfeições locais	150
Figura 4.72 – Variação da pressão crítica para o caso 3 e valor da pressão crítica no modelo perfeito	151
Figura 4.73 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 3 e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito	152
Figura 4.74 – Posição do segundo caso das imperfeições localizadas	153
Figura 4.75 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm	153
Figura 4.76 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,5 mm	154
Figura 4.77 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,0 mm	155
Figura 4.78 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,5 mm	155
Figura 4.79 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,0 mm	156
Figura 4.80 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm para o caso 4 de imperfeições locais	157
Figura 4.81 – Variação da pressão crítica para o caso 4 e valor da pressão crítica no modelo perfeito	158
Figura 4.82 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 4	159
Figura 4.83 – Posição das imperfeições para os casos estudados (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3, (d) caso 4; figuras fora de escala	160
Figura 4.84 – Variação da pressão crítica em função de imperfeições locais	160
Figura 4.85 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Sem alongamento – excentricidade de 0,5	162
Figura 4.86 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5	162
Figura 4.87 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Alongamento de 20% – excentricidade de 0,5	163
Figura 4.88 – Configurações deformadas com excentricidade de 0,5 mm para Ogden com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento	164
Figura 4.89 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 0,5mm -	

Ogden	164
Figura 4.90 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Ogden 1	165
Figura 4.91 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 0,5	166
Figura 4.92 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 0.5	166
Figura 4.93 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 20% – excentricidade de 0,5	167
Figura 4.94 – Configurações deformadas com excentricidade de 0,5 mm para Neo Hooke com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento	168
Figura 4.95 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 0,5mm – Neo Hooke	168
Figura 4.96 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Neo Hooke	169
Figura 4.97 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 1,0	170
Figura 4.98 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0	170
Figura 4.99 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 20% – excentricidade de 1,0	171
Figura 4.100 – Configurações deformadas com excentricidade de 1,0 mm para Ogden com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento	172
Figura 4.101 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,0mm - Ogden	172
Figura 4.102 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,0 mm e funcional de energia Ogden 1	173
Figura 4.103 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 1,0	174
Figura 4.104 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –	

Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0	175
Figura 4.105 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –	
Alongamento de 20% – excentricidade de 1,0	175
Figura 4.106 – Configurações deformadas com excentricidade de 1,0 mm	
para Neo Hooke com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento	176
Figura 4.107 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,0mm –	
Neo Hooke	176
Figura 4.108 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do	
alongamento aplicado, para excentricidade de 1,0 mm e funcional de	
energia Neo Hooke	176
Figura 4.109 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –	
Sem alongamento – excentricidade de 1,5	178
Figura 4.110 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –	
Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5	179
Figura 4.111 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –	
Alongamento de 20% – excentricidade de 1,5	179
Figura 4.112 – Configurações deformadas com excentricidade de 1,5 mm	
para Ogden com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento	180
Figura 4.113 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,5mm -	
Ogden	180
Figura 4.114 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do	
alongamento aplicado, para excentricidade de 1,5 mm e funcional de	
energia Ogden 1	181
Figura 4.115 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –	
Sem alongamento – excentricidade de 1,5	182
Figura 4.116 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –	
Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5	183
Figura 4.117 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –	
Alongamento de 20% – excentricidade de 1,5	183
Figura 4.118 – Configurações deformadas com excentricidade de 1,5 mm	
para Neo Hooke com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento	184
Figura 4.119 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,5mm –	
Neo Hooke	184

Figura 4.120 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,5 mm e funcional de energia Neo Hooke	185
Figura 4.121 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Sem alongamento – excentricidade de 2,0	186
Figura 4.122 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0	187
Figura 4.123 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Alongamento de 20% – excentricidade de 2,0	187
Figura 4.124 – Configurações deformadas com excentricidade de 2,0 mm para Ogden com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento	188
Figura 4.125 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 2,0mm - Ogden	188
Figura 4.126 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Ogden 1	189
Figura 4.127 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 2,0	190
Figura 4.128 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0	191
Figura 4.129 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 20% – excentricidade de 2,0	191
Figura 4.130 – Configurações deformadas com excentricidade de 2,0 mm para Neo Hooke com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento	191
Figura 4.131 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 2,0mm – Neo Hooke	191
Figura 4.132 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Ogden 1	193
Figura 4.133 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade e do alongamento para Ogden 1	194
Figura 4.134 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade e do alongamento para Neo Hooke	196

Figura 4.135 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da excentricidade e do alongamento para Ogden 1	196
Figura 4.136 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da excentricidade e do alongamento para Neo Hooke	196
Figura 4.137 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 0.5 – $C_{10} = 50$ KPa	198
Figura 4.138 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 – $C_{10} = 40$ KPa	198
Figura 4.139 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 – $C_{10} = 30$ KPa	199
Figura 4.140 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 – $C_{10} = 20$ KPa	200
Figura 4.141 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 – $C_{10} = 10$ KPa	200
Figura 4.142 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 0,5mm – Neo Hooke	201
Figura 4.143 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 0,5 mm	202
Figura 4.144 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 – $C_{10} = 50$ KPa	203
Figura 4.145 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 – $C_{10} = 40$ KPa	203
Figura 4.146 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 – $C_{10} = 30$ KPa	204
Figura 4.147 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1.0 – $C_{10} = 20$ KPa	205
Figura 4.148 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1.0 – $C_{10} = 10$ KPa	205
Figura 4.149 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,0mm – Neo Hooke	206

Figura 4.150 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 1,0 mm	207
Figura 4.151 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 – $C_{10} = 50$ KPa	208
Figura 4.152 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 – $C_{10} = 40$ KPa	208
Figura 4.153 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 – $C_{10} = 30$ KPa	209
Figura 4.154 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 – $C_{10} = 20$ KPa	210
Figura 4.155 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 – $C_{10} = 10$ KPa	210
Figura 4.156 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,5mm – Neo Hooke	211
Figura 4.157 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 1,5 mm	212
Figura 4.158 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 – $C_{10} = 50$ KPa	213
Figura 4.159 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 – $C_{10} = 40$ KPa	213
Figura 4.160 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 – $C_{10} = 30$ KPa	214
Figura 4.161 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 – $C_{10} = 20$ KPa	215
Figura 4.162 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 – $C_{10} = 10$ KPa	215
Figura 4.163 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 2,0mm – Neo Hooke	216
Figura 4.164 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da	

diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 2,0 mm	217
Figura 4.165 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade e da diminuição da constante elástica	218
Figura 4.166 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da excentricidade e da diminuição da constante elástica	219
 Figura 5.1 – Gráfico tensão deformação apresentado por Sacks para o tecido arterial	 220
Figura 5.2 – Aproximação dos funcionais de energia estáveis	222
Figura 5.3 – Gráfico demonstrativo de análise de convergência do elemento de casca para o funcional de energia Ogden 1	224
Figura 5.4 – Configuração indeformada e deformada para o elemento representativo da aorta sem alongamento	225
Figura 5.5 – Configuração indeformada e deformada para o elemento representativo da aorta com alongamento de 10%	226
Figura 5.6 – Configuração indeformada e deformada para o elemento representativo da aorta com alongamento de 20%	227
Figura 5.7 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)	227
Figura 5.8 – Configuração indeformada e deformada para o elemento representativo da aorta sem alongamento	228
Figura 5.9 – Configuração indeformada e deformada para o elemento representativo da aorta com alongamento de 10%	229
Figura 5.10 – Configuração indeformada e deformada para o elemento representativo da aorta com alongamento de 20%	230
Figura 5.11 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)	230
Figura 5.12 – Configuração indeformada e deformada para o funcional de energia de Delfino com geometria sem imperfeição	232
Figura 5.13 – Configuração indeformada e deformada para o funcional de energia de Delfino com geometria com imperfeição inicial	232
Figura 5.14 – Configuração indeformada e deformada para o funcional de	

energia de Sacks com geometria sem imperfeição	233
Figura 5.15 – Configuração indeformada e deformada para o funcional de energia de Sacks com espessura apenas da camada media	234
Figura 5.16 – Configuração indeformada e deformada para o funcional de energia de Sacks com espessura apenas da camada media e geometria de D. P. Sokolis (2007)	235
Figura 5.17 – Configuração indeformada e deformada proposta por A. Dorfmann (2010) para os aneurismas	236
Figura 5.18 – Posição da imperfeição local	238
Figura 5.19 - Variação da pressão crítica em função da diminuição da constante elástica no local da imperfeição	239
Figura 5.20 - Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica no local da imperfeição	239
Figura 5.21 - Configurações deformadas de cada uma dos casos estudados para a variação da constante elástica (KPa)	240
Figura 5.22 - Variação da pressão crítica em função da diminuição da constante elástica no local da imperfeição	242
Figura 5.23 - Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica no local da imperfeição	242
Figura 5.24 - Configurações deformadas de cada uma dos casos estudados para a variação da constante elástica (KPa)	243
Figura 6.1 – Gráfico comparativo da pressão crítica numérica e experimental	246
Figura 6.2 – Gráfico comparativo da tensão máxima com a pressão crítica	247
Figura 6.3 – Posição da imperfeição anelar inferior (a) e superior (b)	248
Figura 6.4 – Variação da pressão crítica (mmHg) em função da diminuição da espessura na região anelar inferior	250
Figura 6.5 – Variação da pressão crítica (mmHg) em função da diminuição da espessura na região anelar superior	251
Figura 6.6 – Posição das imperfeições para os casos estudados (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3, (d) caso 4; figuras fora de escala	252

Figura 6.7 – Variação da pressão crítica em função de imperfeições locais	252
Figura 6.8 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade para Ogden1	253
Figura 6.9 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade para Neo Hooke	254
Figura 6.10 – Variação da pressão crítica em função da redução da constante elástica	255
Figura 6.11 – Configurações deformadas (a) sem imperfeição (b) experimental, (c), (d), (e) e (f) com excentricidades de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm respectivamente, sem alongamento	257
Figura 6.12 – Configurações deformadas (a) sem imperfeição (b) experimental, (c), (d), (e) e (f) com excentricidades de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm respectivamente, com alongamento de 10%	258
Figura 6.13 – Configurações deformadas (a) sem imperfeição (b) experimental, (c), (d), (e) e (f) com excentricidades de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm respectivamente, com alongamento de 20%	259
Figura 6.14 – Variação da pressão crítica através dos dados propostos por Sacks	260
Figura 6.15 – Configuração indeformada e deformada proposta por A. Dorfmann para os aneurismas	261
Figura 6.16 – Par de parâmetros a e b da Equação de Delfino para diversas pressões internas	263

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas da artéria	51
Tabela 3.1 – Pressões críticas do ensaio 1	70
Tabela 3.2 – Pressões críticas do ensaio 2	73
Tabela 3.3 – Pressões críticas do ensaio 3	75
Tabela 3.4 – Pressões críticas do ensaio 4	78
Tabela 3.5 – Pressões críticas do ensaio 5	80
Tabela 3.6 – Pressões críticas do ensaio 6	83
Tabela 3.7 – Pressões de referências	85
Tabela 3.8 – Volumes de referência	86
Tabela 4.1 – Valores da constante elástica de Ogden 1	95
Tabela 4.2 – Valores da constante elástica de Neo Hooke	95
Tabela 4.3 – Valores da constante elástica de Arruda-Boyce	96
Tabela 4.4 – Pressão crítica em função da diminuição da espessura da região anelar inferior	123
Tabela 4.5 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar	125
Tabela 4.6 – Pressão crítica em função da diminuição da espessura da região anelar superior	126
Tabela 4.7 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar	129
Tabela 4.8–Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 1	137
Tabela 4.9–Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 2	144
Tabela 4.10–Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 3	151
Tabela 4.11–Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 4	158
Tabela 4.12–Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Ogden 1	165
Tabela 4.13 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do	

alongamento aplicado, para excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Neo Hooke	169
Tabela 4.14 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,0 mm e funcional de energia Ogden 1	173
Tabela 4.15 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,0 mm e funcional de energia Neo Hooke	177
Tabela 4.16 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,5 mm e funcional de energia Ogden 1	181
Tabela 4.17 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,5 mm e funcional de energia Neo Hooke	185
Tabela 4.18 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Ogden 1	189
Tabela 4.19 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Neo Hooke	193
Tabela 4.20 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade e do alongamento	194
Tabela 4.21 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da excentricidade e do alongamento	195
Tabela 4.22 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 0,5 mm	201
Tabela 4.23 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 1,0 mm	206
Tabela 4.24 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 1,5 mm	211

Tabela 4.25 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 2,0 mm	216
Tabela 4.26 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade e da diminuição da constante elástica	217
Tabela 4.27 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da excentricidade e da diminuição da constante elástica	218
Tabela 5.1 – Valores da constante elástica de Ogden 1	223
Tabela 5.2 – Valores da constante elástica de Yelow	223
Tabela 5.3 - Variação da pressão crítica e da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica no local da imperfeição	238
Tabela 5.4 - Variação da pressão crítica e da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica e da espessura no local da imperfeição	241
Tabela 6.1 – Comparação da pressão crítica (mmHg) numérica e experimental	246
Tabela 6.2 – Diferença percentual dos ensaios numéricos e experimentais	247
Tabela 6.3 – Comparação das tensões principais máximas (KPa) que ocorrem no instante da pressão crítica	248