

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Daniel El-Jaick de Souza Mota**

**Análise numérica e experimental do comportamento de  
expansores de pele sobre base elástica**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre pelo Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-  
Rio.

Orientador: Profa. Djenane Cordeiro Pamplona

Rio de Janeiro, março de 2006



**Daniel El-Jaick de Souza Mota**

## **Análise numérica e experimental do comportamento de expansores de pele sobre base elástica**

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

**Profa. Djenane Cordeiro Pamplona**

Presidente/Orientador  
Departamento de Engenharia Civil - PUC - Rio

**Prof. Paulo Batista Gonçalves**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Profa. Fabiana Rodrigues Leta**

UFF

**Dra. Stefane Rodrigues Xavier Lopes**

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de março de 2006

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

**Daniel El-Jaick de Souza Mota**

Graduado em Engenharia Civil pela PUC-Rio em 2003.

Ficha Catalográfica

Mota, Daniel El-Jaick de Souza

Análise numérica e experimental do comportamento de expansores de pele sobre base elástica / Daniel El-Jaick de Souza Mota ; orientador: Djenane Cordeiro Pamplona. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

126 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Expansão de membranas. 3. Biomembranas. 4. Pele. 5. Base elástica. I. Pamplona, Djenane Cordeiro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

**CDD: 624**

## **Agradecimentos**

À minha orientadora Professora Djenane Pamplona, pela sua atenção e estímulo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores da PUC-Rio que contribuíram para a minha formação profissional, especialmente ao Professor Raul Rosas e Silva por direcionar-me no caminho do Mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil pela maneira gentil como sempre me trataram desde a Graduação.

À turma do laboratório, Cláudio Castilho e Marcela Juliboni pela grande ajuda nas experiências realizadas.

À minha família que colaborou e me encorajou nos momentos difíceis.

Ao CNPQ e à CAPES pelo suporte financeiro.

## Resumo

Mota, Daniel El-Jaick de Souza; Pamplona, Djenane Cordeiro. **Análise numérica e experimental do comportamento de expansores de pele sobre base elástica.** Rio de Janeiro, 2006. 126p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Apesar do conhecimento do comportamento de estruturas sobre base elástica ser importante para a engenharia de forma geral, a motivação deste trabalho está focada na Biomecânica, nos nossos trabalhos envolvendo o grupo de pesquisa da Clínica do Dr. Ivo Pitanguy e da Santa Casa de Misericórdia. Em tese recente de Doutorado, foi realizada uma modelagem da técnica cirúrgica de expansão da pele. A expansão da pele é um processo fisiológico, definido como a capacidade que a pele tem de aumentar sua área superficial em resposta a uma deformação imposta. Durante as expansões acompanhadas pode-se observar que dependendo da região em que o expansor é implantado seu comportamento pode ser bastante distinto. Expansores que são implantados no couro cabeludo iniciam a expansão da pele assim que é introduzida a solução salina no expansor. Quando o expansor é implantado em regiões com mais gordura, como por exemplo na coxa, a expansão da pele não se inicia imediatamente tendo em vista que o expansor se deforma para dentro, pressionando a gordura (que oferece menos resistência) e não a pele. Este comportamento ocasiona abertura dos pontos na cicatriz e pode chegar a inviabilizar todo o processo de expansão naquela região. Para a simulação do processo de expansão da pele, foi feita a expansão com lençol de borracha e para a base elástica foi usado um conjunto que consistia em uma bexiga elástica preenchida com um material viscoso no seu interior. Este trabalho é pioneiro em investigar tanto numérica quanto experimentalmente o comportamento da expansão de lençóis de borracha sobre base rígida e base elástica, comparando o seu comportamento. Os resultados numéricos e experimentais da expansão do lençol de borracha tiveram uma boa concordância e a análise paramétrica da espessura do lençol de borracha comprovou a importância da obtenção mais precisa da espessura da pele pelos médicos, já que as pressões verificadas são bem diferentes para cada espessura. Foram estudadas

diversas equações constitutivas, procurando a que melhor descrevesse o processo da expansão da pele. A formulação do material Neo-Hookeano obteve os melhores resultados para o lençol de borracha. Também foi feito um estudo com a formulação de energia de Delfino para estudar a expansão da pele humana.

### **Palavras-chave**

Expansão de membranas; biomembranas, pele, base elástica.

## Abstract

Mota, Daniel El-Jaick de Souza; Pamplona, Djenane Cordeiro (Advisor). **Numerical and experimental analysis of the behavior of skin expanders on elastic foundation.** Rio de Janeiro, 2006. 126p. Msc. Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Despite the knowledge of the behavior of structures on elastic base being important for the engineering of general form, the motivation of this work is focused in the Biomechanics, in our works involving the group of research of the Clinic of the Dr.Ivo Pitanguy and the Saint Casa de Misericórdia. In recent thesis of Dsc., a modeling of the surgical technique of expansion of the skin was carried through. The expansion of the skin is a physiological process, defined as the capacity that the skin has to increase its superficial area in reply to an imposed deformation. During the expansions it could be observed that depending on the region where the expander is implanted its behavior could be sufficiently distinct. Expanders who are implanted on the head initiate the expansion of the skin immediately when the saline solution is introduced in the expander. When the expander is implanted in regions with more fat, as for example in the thigh, the expansion of the skin does not initiate immediately in view of that the expander is deformed to the inner part, pressuring the fat (that offers little resistance) and not the skin. This behavior causes opening of the points in the scar and can make impracticable the process of expansion in that region. For the simulation the process of skin expansion, it was made an expansion with rubber sheet and a set was used for the elastic base that consisted of a filled elastic bladder with a viscous material in its interior. This work is pioneer in investigating numerical and experimentally the behavior of the rubber sheet expansion on rigid base and elastic base, comparing its behavior. The numerical and experimental results of the expansion of the rubber sheet had a good agreement and the parametric analysis of the thickness of the rubber sheet proved the importance of a precise measure of the skin thickness by the doctors, since the verified pressures are different for each thickness. Diverse constituent equations had been studied, looking the one that better described the process of the expansion of the skin. The

formularization of the Neo-Hook material got the best results for the rubber sheet. Also a study with the formularization of energy of Delfino was made to study the expansion of the human skin.

## **Keywords**

Expansion of membranes; biomembranes, skin, elastic foundation.



## Sumário

1 Introdução	18
1.1. Objetivo da dissertação	18
1.2. Organização do texto	19
2 Revisão bibliográfica	21
2.1. A expansão de pele	21
2.2. Expansores de pele	22
2.3. A pele humana	24
2.3.1. Composição da pele	24
2.3.2. Propriedades físicas da pele	26
2.4. Indicação da expansão de pele	26
2.5. O processo de expansão de pele	27
2.5.1. Técnicas de expansão da pele	28
2.6. Experiência com porcos	29
2.6.1. Diferentes tipos de expansores	29
2.6.2. Modificações na espessura da pele	30
3 Formulação numérica	32
3.1. Metodologia para solução do problema	32
3.2. Formulações de energia para a borracha	32
3.2.1. Neo-Hookeano	33
3.2.2. Mooney-Rivlin	33
3.2.3. Ogden	33
3.2.4. Delfino	34
3.3. Geometria	34
3.4. Extensões principais e gradientes de deformação	36
3.5. Equações de equilíbrio da membrana	38
3.6. Base elástica	45
3.6.1. Equações de equilíbrio da membrana sobre base elástica	49

4	Análise experimental	50
4.1.	Material utilizado	50
4.2.	Preparação da membrana de borracha	52
4.3.	Fixação dos elementos para a expansão	52
4.4.	Ensaio para obtenção das coordenadas tridimensionais	53
4.5.	Calibração do equipamento	54
4.6.	Ensaio de expansão do lençol de borracha	56
4.6.1.	Base rígida	56
4.6.2.	Base elástica	60
4.6.2.1.	Ensaio de compressão da base elástica	60
4.6.2.2.	Expansão sobre base elástica	63
5	Análise numérica	68
5.1.	Método de Newton-Raphson	69
5.2.	Verificação do modelo computacional	72
6	Resultados	74
6.1.	Obtenção da equação constitutiva	74
6.1.1.	Análise experimental	74
6.1.2.	Análise numérica	75
6.1.3.	Comparação do modelo numérico com o modelo experimental	77
6.2.	Estudo paramétrico da espessura	79
6.3.	Expansão sobre base elástica	80
6.3.1.	Obtenção da constante de rigidez do material que simula a base elástica	80
6.3.2.	Análise experimental	80
6.3.3.	Análise numérica	82
6.3.3.1.	Expansão sobre base rígida	82
6.3.3.2.	Expansão da base do expansor	83
6.3.3.3.	Expansão do lençol de borracha	85
6.3.3.4.	Comparação entre diferentes bases elásticas	88
6.3.4.	Comparação dos resultados numéricos com os experimentais	88
6.4.	Comparação entre base rígida e elástica	89

6.5. Expansão do couro cabeludo	91
6.5.1. Expansão do couro cabeludo sobre o crânio	91
6.5.2. Expansão do couro cabeludo sobre uma camada de gordura	92
6.5.2.1. Obtenção da constante de rigidez da gordura	92
6.5.2.2. Expansão sobre a camada de gordura	92
6.5.3. Comparação da expansão sobre o crânio e sobre a camada de gordura	93
7 Conclusões	95
7.1. Sugestões	96
8 Referências Bibliográficas	97
Apêndice 1 Cálculo das coordenadas tridimensionais de uma expansão	99
A.1.1. Aparato utilizado	99
A.1.2. Realização das medições	101
A.1.2.1 Cálculo do ângulo $\alpha$ dos espelhos	102
A.1.2.2 Desenvolvimento dos cálculos	103
A.1.3. Validação da Metodologia	105
A.1.4. Preparação da membrana de borracha	107
A.1.5. Análise da expansão de um lençol de borracha	107
Apêndice 2 Testes de bases elásticas para a experiência	109
A.2.1 Espuma de Tradicional de Densidade D23	109
A.2.2 Espuma especial	110
A.2.3 Gelatina	111
A.2.4 Margarina dentro de bexiga	111
Apêndice 3 Relaxamento	113
Apêndice 4 Arquivos do programa Maple 9	115

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Expansor redondo	23
Figura 2.2 – Diversas formas de expansores	23
Figura 2.3 – Corte longitudinal da pele	24
Figura 2.4 – Expansão de pele	28
Figura 2.5 – Expansores redondos implantados no tórax do porco	30
Figura 3.1 – Estudo da expansão sobre base elástica	32
Figura 3.2 – Membrana indeformada	35
Figura 3.3 – Membrana deformada	36
Figura 3.4 – Tensões na membrana	38
Figura 3.5 - Modelo de Winkler	45
Figura 3.6 - Pressão dentro do expansor	48
Figura 3.7 - Base elástica	48
Figura 3.8 – Base elástica implementada	48
Figura 4.1 – Aparelho utilizado para medir as pressões internas	51
Figura 4.2 – Expansor redondo utilizado	51
Figura 4.3 – Anéis de acrílico onde eram fixadas as membranas de borracha	52
Figura 4.4 – Material usado para a fixação	53
Figura 4.5 – Ilustração do aparato	53
Figura 4.6 – Equipamento de medição para a conversão de medidas	54
Figura 4.7 – Calibração da curva de conversão do equipamento	55
Figura 4.8 – Retirada de água do tubo de vidro	56
Figura 4.9 – Montagem do ensaio de expansão da borracha sobre base rígida	57
Figura 4.10 – Vista superior do início da expansão sobre base rígida	57
Figura 4.11 - Vista superior do final da expansão sobre base rígida	58
Figura 4.12 – Expansão sobre base rígida - 0 ml	58
Figura 4.13 - Expansão sobre base rígida - 50 ml	59
Figura 4.14 – Expansão sobre base rígida - 100 ml	59
Figura 4.15 - Expansão sobre base rígida - 150 ml	60

Figura 4.16 - Expansão sobre base rígida - 200 ml	60
Figura 4.17 – Bexiga para o ensaio de compressão	61
Figura 4.18 – Ensaio de compressão da base elástica	62
Figura 4.19 – Compressão da base elástica	62
Figura 4.20 – Bexiga com furos contendo material viscoso - Geleca	63
Figura 4.21 - Montagem do ensaio de expansão da borracha sobre base elástica	63
Figura 4.22 - Vista superior do início da expansão sobre base elástica	64
Figura 4.23 - Vista superior do final da expansão sobre base elástica	64
Figura 4.24 - Expansão sobre base elástica - 0 ml	65
Figura 4.25 - Expansão sobre base elástica - 50 ml	65
Figura 4.26 - Expansão sobre base elástica - 100 ml	66
Figura 4.27 - Expansão sobre base elástica - 150 ml	66
Figura 4.28 - Expansão sobre base elástica - 200 ml	67
Figura 5.1 – Newton-Raphson	71
Figura 5.2 - Volume x Altura	72
Figura 5.3 – Raio x Altura - base rígida	73
Figura 6.1 – Variação do volume pela pressão intra-expansor	74
Figura 6.2 – Média da variação do volume pela pressão intra-expansor	75
Figura 6.3 – $P_{num}$ x Volume	76
Figura 6.4 – Comparação entre diferentes formulações de energia	77
Figura 6.5 – Comparação entre experimental e numérico	78
Figura 6.6 – Experimental x Neo-Hookeano	78
Figura 6.7 – Estudo paramétrico da espessura	79
Figura 6.8 – Ensaio de compressão	80
Figura 6.9 - Variação do volume x Pressão interna no expansor sobre base elástica	81
Figura 6.10 - Média da variação do volume pela pressão interna no expansor sobre base elástica	81
Figura 6.11 – Pressão x Volume – modelo numérico da expansão do lençol de borracha sobre base rígida	82
Figura 6.12 – Geometria da expansão sobre base rígida	83
Figura 6.13 - Pressão x Volume – modelo numérico da expansão do	

lençol de borracha sobre base elástica	84
Figura 6.14 – Raio x Altura – da base do expansor com diferentes pressões	84
Figura 6.15 – Pressão x Volume – modelo numérico da expansão do lençol de borracha sobre base elástica	85
Figura 6.16 – Expansão – $P=0,00150623$	86
Figura 6.17 – Expansão – $P=0,002279699$	86
Figura 6.18 – Expansão – $P=0,004925779$	87
Figura 6.19 – Expansões sobre base elástica	87
Figura 6.20 – Comparação numérica entre diferentes bases elásticas	88
Figura 6.21 – Comparação da base elástica – numérico x experimental	89
Figura 6.22 - Comparação dos resultados experimentais com bases rígida e elástica	89
Figura 6.23 – Comparação numérica entre base rígida e elástica	90
Figura 6.24 - Comparação entre as curvas experimentais e numéricas das bases rígida e elástica	90
Figura 6.25 – Expansão no couro cabeludo	91
Figura 6.26 – Constante de rigidez da gordura	92
Figura 6.27 – Expansão do couro cabeludo com uma camada de gordura	93
Figura 6.28 – Comparação da expansão do couro cabeludo sobre o crânio e sobre uma camada de gordura	93
Figura A.1.1 – Ilustração do aparato	99
Figura A.1.2 – Foto do aparato	100
Figura A.1.3 - Aparato com semi-esfera de isopor	100
Figura A.1.4 – Esquema da reflexão no espelho	101
Figura A.1.5 – Geometria das coordenadas	102
Figura A.1.6 - Medição de 1cm sobre as "régua de referência" (pixels)	105
Figura A.1.7 - Origens de referência (pixels)	105
Figura A.1.8 - Medição dos pontos da semi-esfera de isopor (pixels)	106
Figura A.1.9 - Medição das distâncias XB e XB' (pixels e cm)	106
Figura A.1.10 – Cálculo do z	106
Figura A.1.11 - Tabelas de comparação do cálculo do z do centro	107

Figura A.1.12 - Gráfico z do centro (cm) versus Pressão (da Pa)	108
Figura A.2.1 – Carregamento do ensaio de compressão da espuma tradicional	109
Figura A.2.2 - Descarregamento do ensaio de compressão da espuma tradicional	109
Figura A.2.3 – Espuma especial	110
Figura A.2.4 - Carregamento do ensaio de compressão da espuma especial	110
Figura A.2.5 - Descarregamento do ensaio de compressão da espuma especial	111
Figura A.2.6 – Gelatina	111
Figura A.2.7 – Margarina dentro da bexiga	112
Figura A.3.1 - Gráfico pressão (da Pa) x tempo (minutos)	113

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Modelos de Fundação	47
Tabela A.2.1 - Tabela referente ao ensaio de relaxamento	113



## Lista de símbolos

### Romanos

$a$	raio da membrana indeformada
$C_i$	constante elástica do material
$D_1$	grau de incompressibilidade do material
$ds$	comprimento deformado
$dS$	comprimento indeformado
$h$	espessura da membrana deformada
$H$	espessura da membrana indeformada
$J_{el}$	deformação volumétrica elástica
$K_i$	curvatura principal
$p$	pressão exercida pela base elástica
$P$	pressão interna
$r$	coordenada relativa ao raio deformado
$T_i$	tensão principal por unidade de comprimento
$x_i$	coordenada de um ponto genérico no corpo deformado
$x_{i,J}$	gradiente de deformação
$X_k$	coordenada de um ponto genérico no corpo indeformado
$z$	coordenada vertical
$W$	densidade de energia de deformação

### Gregos

$\phi$	coordenada relativa ao ângulo deformado
$\theta$	coordenada relativa ao ângulo indeformado
$\rho$	coordenada relativa ao raio indeformado
$\sigma_{ii}$	tensões principais nas suas respectivas direções
$\lambda_i$	extensões principais