

4 Análise experimental

No estudo do comportamento de membranas de materiais hiperelásticos há a necessidade de se escolher leis constitutivas que descrevam da melhor forma possível as propriedades do material. Muitas teorias foram desenvolvidas com o intuito de se apresentar uma equação constitutiva que melhor represente o comportamento destes materiais, dentre elas as mais conhecidas são a Neo-Hookeana, Mooney-Rivlin e de Ogden, já apresentadas anteriormente. Enquanto para a descrição de um material Neo-Hookeano, necessita-se apenas de uma constante elástica, para os materiais de Mooney-Rivlin e Ogden, necessita-se determinar o valor de duas constantes.

Neste capítulo são mostrados o aparato, os procedimentos experimentais e os resultados que permitiram a caracterização das membranas usadas na análise experimental.

4.1. Relações constitutivas dos materiais

Existem na literatura vários modelos que definem as propriedades mecânicas dos materiais, entre eles estão os modelos de materiais elásticos e inelásticos. Dentro da classe dos materiais elásticos estão os materiais elásticos lineares, os hipoelásticos, os hiperelásticos e os viscoelásticos. Dentro da classe dos materiais inelásticos podem-se destacar os materiais plásticos.

Um breve resumo sobre a caracterização destes tipos de matérias é apresentado a seguir.

4.1.1. Materiais elásticos

4.1.1.1. Material elástico linear

Um modelo linear elástico é usado quando se trabalha com materiais que apresentam pequenas deformações elásticas e pode ser definido como isotrópico, ortotrópico ou anisotrópico.

A tensão total é definida pela deformação elástica total, tal que:

$$\sigma = D^{el} \varepsilon^{el} \quad (4.1)$$

onde σ é a tensão total de Cauchy, D^{el} é o tensor elástico e ε^{el} é a deformação elástica total. Este tipo de material não deve ser utilizado quando se trabalha com grandes deformações.

4.1.1.2. Material hipoeelástico

Nos materiais hipoeelásticos, a taxa de variação da tensão é definida por uma matriz elástica multiplicada por uma taxa de variação da deformação, onde a matriz de elasticidade é uma função da deformação elástica total. Esta teoria não-linear elástica é válida para pequenas deformações elásticas e para tensões não muito maiores que o módulo elástico do material.

$$d\sigma = D^{el} : d\varepsilon^{el} \quad (4.2)$$

onde $d\sigma^{el}$ é a taxa de variação de tensão de Cauchy, D^{el} é a matriz elástica tangente e $d\varepsilon^{el}$ é a taxa de variação da deformação elástica para problemas de deformação finita.

4.1.1.3. Material hiperelástico

Os modelos constitutivos para materiais hiperelásticos descrevem o comportamento do material através da energia de deformação. São utilizados geralmente para descrever o comportamento não-linear dos materiais

elastoméricos e são válidos quando se utiliza a teoria de grades deformações. Em problemas envolvendo grandes deformações deve-se levar também em consideração as não-linearidades geométricas.

Assume-se que nos materiais elastoméricos as moléculas têm uma orientação inicial randômica. Assim o material é inicialmente considerado isotrópico. À medida que o material é tracionado, a orientação das moléculas muda gerando uma anisotropia do material. Entretanto o desenvolvimento desta anisotropia assume a direção da deformação, então o material pode ser considerado isotrópico através da história de deformação. Como uma consequência, a energia potencial de deformação deve ser preferencialmente formulada como uma função dos invariantes de deformação.

Dentre as formulações existentes para a energia de deformação de materiais hiperelásticos estão a teoria de Arruda-Boyce, Mooney-Rivlin, Neo-Hookeana, Ogden, Polinomial, Van der Waals, dentre outras.

A forma da energia de deformação proposta por Arruda-Boyce é apresentada a seguir:

$$U = \mu \left\{ \frac{1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2} (\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^4} (\bar{I}_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_m^6} (\bar{I}_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_m^8} (\bar{I}_1^5 - 243) + \dots \right\} + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right) \quad (4.3)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$$

$$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i$$

onde U é a energia de deformação por unidade de volume de referencia, μ é o modulo de cisalhamento e λ_m e D são parâmetros do material, λ_i , $\bar{\lambda}_i$ são as extensões principais e desviadoras respectivamente. \bar{I}_1 é o primeiro invariante de deformação desviador e J_{el} é a razão elástica de volume. ‘

1. Modelo de Mooney-Rivlin

A energia potencial de acordo com a formulação de Mooney-Rivlin é dada por:

$$U = C_1(\bar{I}_1 - 3) + C_2(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2}$$
(4.4)

onde C_1 , C_2 e D_1 são parâmetros do material e \bar{I}_2 é o segundo invariante de deformação desviador.

Para os casos onde as deformações nominais são pequenas ou são moderadamente grandes (<100%), este modelo é bastante eficaz. A constante D_1 está relacionado com o grau de incompressibilidade do material, isto é, quando ele é nulo o material é considerado incompressível.

2. Modelo Neo-Hookeano

A forma da energia potencial considerando um material Neo-Hookeano é :

$$U = C_1(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2$$
(4.5)

Assim como para o modelo de Mooney-Rivlin, para os casos onde as deformações nominais são pequenas ou são moderadamente grandes (<100%), este modelo é bastante eficaz.

3. Modelo de Ogden

A forma da energia potencial proposta por Oden é:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{-\alpha_i} + \lambda_2^{-\alpha_i} + \lambda_3^{-\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i}$$
(4.6)

onde λ_i são as extensões principais, μ_i , α_i e N são constantes relacionadas com as propriedades do material.

4. Modelo Polinomial

Este modelo apresenta a seguinte forma:

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i}$$
(4.7)

Os modelos de Mooney-Rivlin e Neo-Hookeano podem ser obtidos através deste modelo escolhendo-se adequadamente os valores de C_{ij} .

5. Modelo de Van der Waals

A forma da energia potencial de deformação proposta por Van der Waals é:

$$U = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] - \frac{2}{3} a \left(\frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right)$$

$$\tilde{I} = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2 \quad (4.8)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$$

onde μ é o módulo inicial de cisalhamento, λ_m é o chamado “locking stretch”, a é um parâmetro de interação global, β é o invariante misto e D governa a compressibilidade.

4.1.1.4. Material Viscoelástico

Os materiais com propriedades viscoelásticas possuem um comportamento variável com o tempo, isto é, há um tempo decorrente entre o carregamento e a resposta final. Dentre os modelos básicos encontrados na literatura podemos destacar os de Maxwell, mais comumente usado para modelar líquidos, e o de Kelvin-Voigt geralmente usado na modelagem de sólidos.

- Modelo de Maxwell

Modelo resultante da associação em série de um elemento viscoso e outro elástico que produz a relação diferencial.

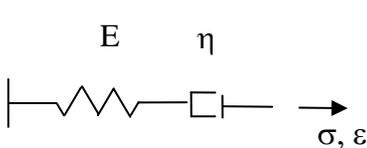
$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}$$


Figura 4.1 - Modelo de Maxwell para materiais viscoelásticos

- Modelo de Kelvin

Modelo resultante da associação em paralelo de um elemento viscoso e outro elástico que produz a relação diferencial.

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}$$

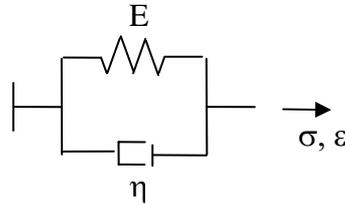


Figura 4.2 - Modelo de Kelvin para materiais viscoelástico

Os ensaios típicos para a de caracterização deste tipo de material são os ensaios de fluência (creep) e relaxação.

- Ensaio de fluência

Este ensaio consiste basicamente em manter um nível de tensão constante em um sistema ao longo de um determinado período de tempo e medir a variação da deformação ao longo do tempo. A resposta esperada para este tipo de material é uma deformação crescente ao longo deste período de tempo como mostra a Figura 4.3.

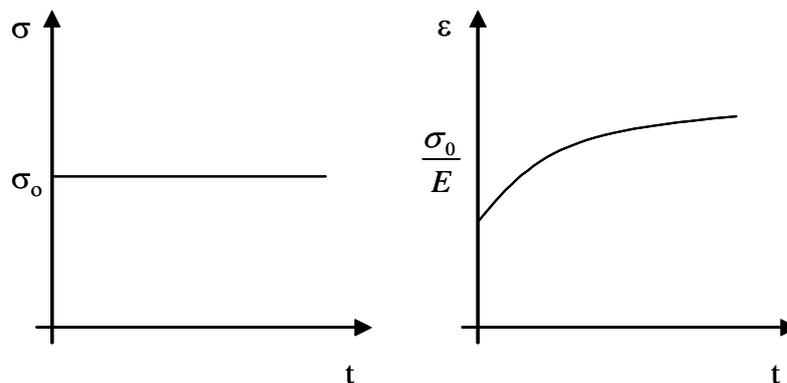


Figura 4.3 - Ensaio de Fluência

- Ensaio de relaxação

De maneira similar ao ensaio descrito anteriormente, este ensaio consiste basicamente em manter um nível de deformação constante em um sistema ao longo de um determinado período de tempo e

medir a variação da tensão ao longo do tempo. A resposta esperada para este tipo de material é uma tensão decrescente ao longo deste período de tempo, como mostra a Figura 4.4.

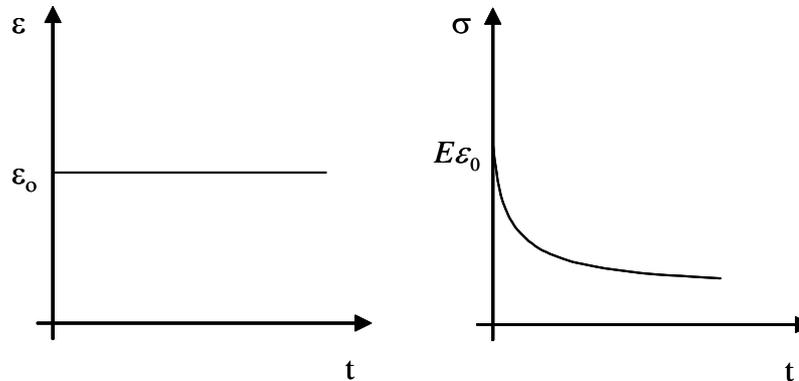


Figura 4.4 - Ensaio de relaxação

4.2. Caracterização dos materiais utilizados

Na literatura sobre grandes deformações em membranas e cascas constituídas de um material elastomérico, assume-se que o elastômero é um material hiperelástico. Entretanto, efeitos visco-elásticos podem ser importantes em certos ensaios ou aplicações práticas. A fim de se verificar o comportamento visco-elástico do material utilizado nos ensaios e se esses efeitos são importantes para os tipos de ensaios realizados, bem como para os níveis de carregamentos aplicados, foram realizados alguns ensaios de fluência através da aplicação de uma tração longitudinal constante ao longo do tempo.

Para um determinado nível de carregamento fez-se ao longo do tempo a medição da deformação longitudinal da casca, os resultados obtidos para forças variando de 3, 5 a 10N são apresentados a seguir.

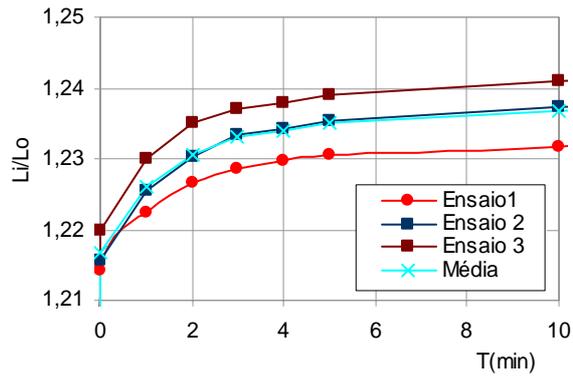


Figura 4.5 – Resultados dos ensaios realizados para uma força de tração de 3N.

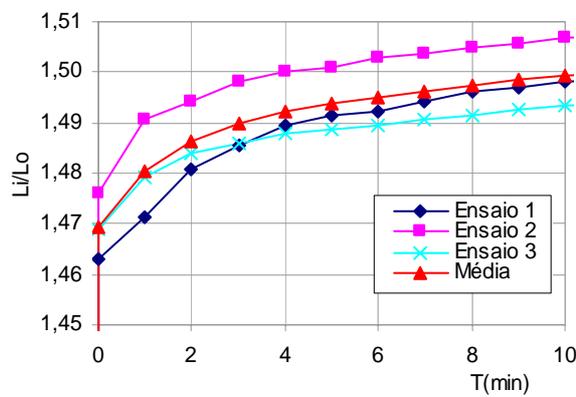


Figura 4.6 – Resultados dos ensaios realizados para uma força de tração de 5N

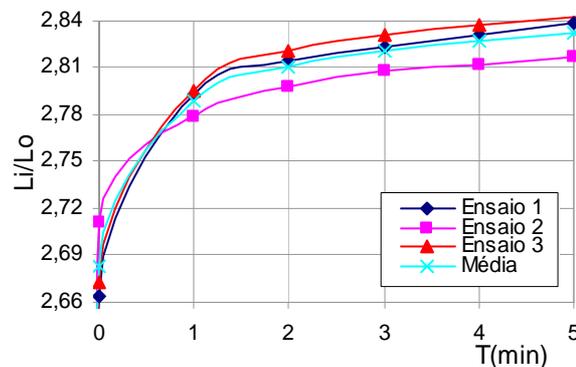


Figura 4.7 – Resultados dos ensaios realizados para uma força de tração de 10N

Nota-se nas Figuras 4.5-4.7 que há uma deformação instantânea tão logo é aplicada a carga, seguida de um pequeno acréscimo de deformação ao longo do tempo. Nota-se que para os dez primeiros minutos de ensaio este acréscimo é muito pequeno, em torno de 1,5, 2 e 7% da deformação inicial para os casos de cargas aplicadas de 3,0, 5,0 e 10,0N respectivamente. Assim sendo, as características visco-elásticas apresentadas pelo elastômero utilizado podem ser

negligenciadas uma vez que os ensaios são realizados em um pequeno intervalo de tempo e estes efeitos não interferem nos fenômenos analisados nesta tese. Entretanto estes efeitos podem vir a ser importantes em estudos futuros e deve ser levado em consideração na análise de fenômenos onde o tempo seja uma variável importante.

4.3.

Análise experimental de membrana: ensaio de tração para obtenção das constantes elásticas do material.

Para a obtenção das constantes elásticas do elastômero foram executados ensaios de tração em membranas e cascas cilíndricas, tal como ilustrado nas Figuras 4.8 e 4.9. A determinação destas constantes é feita através dos resultados obtidos experimentalmente para a curva tensão-deformação. Estes resultados são introduzidos na análise numérica, realizada pelo programa de elementos finitos ABAQUS, onde supõe-se que o comportamento do material pode ser descrito pelas teorias de Mooney Rivlin, Neo-Hookeana e de Ogden. Assim, é possível assumir a equação constitutiva que se ajuste de forma mais adequada aos resultados experimentais obtidos.

O equipamento utilizado no ensaio de tração é constituído por um pórtico metálico acoplado a mecanismos que se encaixam através de roscas e que permitem a fixação da extremidade superior da membrana. Estas peças são mostradas na Figura 4.8.

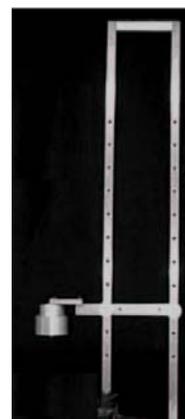


Figura 4.8 - Aparato utilizado nos ensaios de membranas cilíndricas sob tração e pressão

A membrana é fixada ao pórtico através da extremidade superior sendo que este apoio impede deslocamentos verticais e horizontais. Em sua extremidade inferior é fixada uma placa circular rígida que mantém constante o raio da extremidade inferior da membrana durante todo o ensaio. Um carregamento axial, P , variando de 0 a $10N$ com um incremento de carga constante de $0.50N$ é então aplicado. Para a obtenção das configurações deformadas, a cada acréscimo de carga a membrana é fotografada. Foram realizados cinco ensaios, sendo fotos de três estágios de deformação de um deles apresentadas na Figura 4.9. Medidas dos raios deformados foram obtidas através do programa de edição de fotografias, Microsoft Photo Editor.

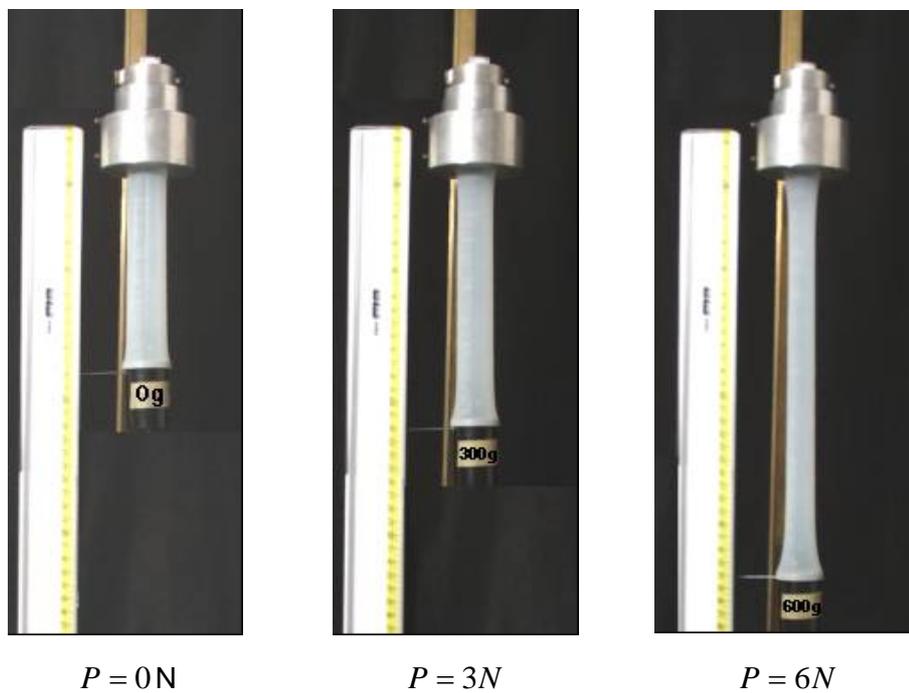


Figura 4.9 - Fotos de um típico ensaio de membrana cilíndrica sob tração

Uma seqüência de fotos editadas e posicionadas lado a lado (Figura 4.10), para vários níveis de carregamento, propicia uma visão geral dos resultados obtidos durante o ensaio.



Figura 4.10 - Seqüência de deformadas ilustrando um ensaio de tração em membrana cilíndrica

Medidas do alongamento longitudinal são obtidas diretamente através da leitura da régua posicionada junto ao pórtico (Figura 4.10). Estas medições são lançadas em uma planilha gráfica onde são calculadas as deformações para cada acréscimo de carga (Figura 4.11). Cabe ressaltar que o ensaio é feito em um curto período de tempo de tal forma que as características visco-elásticas do elastômero não interferem nos resultados experimentais.

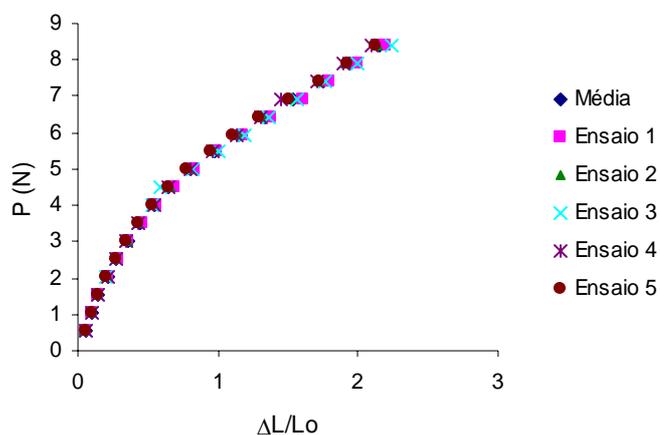


Figura 4.11 – Resultados experimentais: relação carga axial versus deformação longitudinal para uma membrana tracionada

Analisando-se o gráfico apresentado na Figura 4.11, nota-se a repetibilidade dos resultados, gerando uma boa concordância entre as curvas obtidas para os diversos ensaios. Observa-se também que, inicialmente, a membrana apresenta

um comportamento quase linear. A não-linearidade do material, assim como uma crescente perda de rigidez, tornam-se evidentes com o aumento da deformação.

4.4. Cálculo das constantes da membrana utilizando o algoritmo de Runge-Kutta

Para o cálculo das constantes do material foram utilizados os resultados de deformação longitudinal, z , e radial, r , obtidas através do ensaio experimental de tração apresentado na Figura 4.11.

Considerando-se um determinado nível de tração aplicada, os valores experimentais obtidos para r e z em uma das extremidades da membrana foram considerados como condições de contorno na análise numérica (Tabela 3.1). As condições iniciais, r' e z' , em uma das extremidades da membrana, foram impostas de forma a se obter numericamente as condições de contorno prescritas através do algoritmo de integração numérica descrito no item 3.3. Após a convergência dos resultados, os valores de r , r' , z e z' foram obtidos para qualquer ponto ao longo do comprimento da membrana.

O valor da constante C_1 foi avaliado em duas seções ao longo da membrana: uma seção situada no centro e outra no bordo da membrana. Através do equilíbrio de forças e com o auxílio das equações (3.11) e (3.17), verifica-se que o valor de C_1 pode ser obtido através das seguintes expressões:

$$C_{1B} = \frac{F \lambda_2 \lambda_1}{2 \pi R H z' w_2} \quad (4.9)$$

$$C_{1C} = \frac{F \lambda_1}{2 \pi r H w_2} \quad (4.10)$$

sendo F o valor da carga de tração aplicada.

As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram os valores de C_1 e C_2 obtidos para dois ensaios distintos. Foram considerados três estágios de deformação da membrana (z_1, z_2, z_3) e os valores de C_1 calculados para seções no centro e bordo de acordo com as equações (4.9) e (4.10). Para a constante C_2 do material de Mooney-Rivlin, considerou-se que $C_2 = c_2/7$. Esta é, na verdade, uma aproximação que tem sido usada na literatura, mas que não é necessariamente verdadeira.

Ensaio	C_1 (MPa)	z_1	z_2	z_3	C_1 (MPa)	$C_{1\text{médio}}$ (MPa)
1	C_{1B}	0.191892	0.187328	0.184558	0.187928	0.182913
	C_{1C}	0.191891	0.187358	0.184543		
2	C_{1B}	0.184275	0.179279	0.179844	0.177899	
	C_{1C}	0.184265	0.179267	0.179824		

Tabela 4.1 - Valores de C_1 obtidos para um material Neo Hookeano

Ensaio	C_1 (MPa)	Z_1	Z_2	Z_3	C_1	$C_{1\text{ médio}}$
1	C_{1B}	0.154025	0.152337	0.150969	0.152389	0.146663
	C_{1C}	0.153975	0.152231	0.150794		
2	C_{1B}	0.140589	0.137217	0.144890	0.140938	
	C_{1C}	140687	137277	144963		
					$C_{2\text{ médio}}$	0.020952

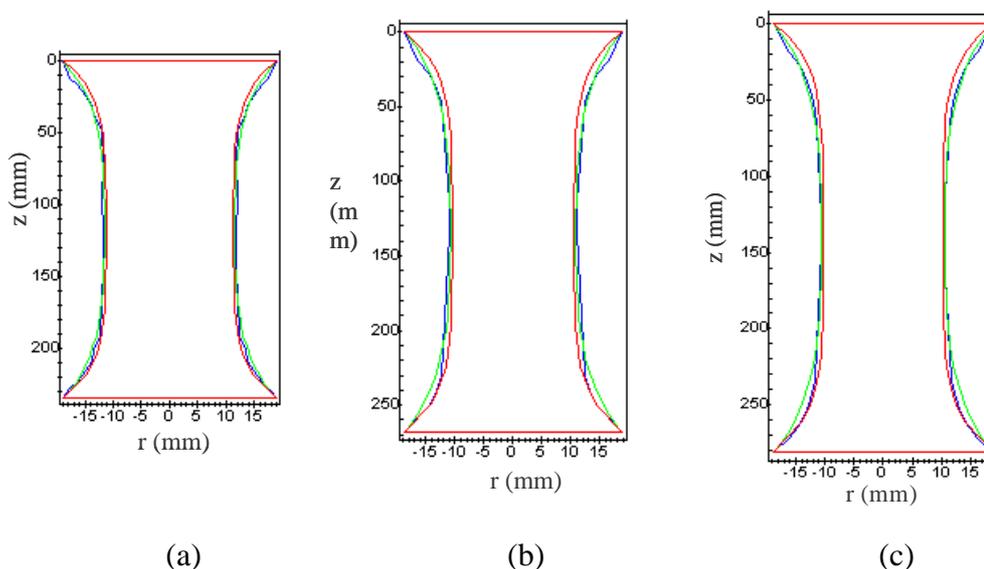
Tabela 4.2 – Valores de C_1 obtidos para um material de Mooney com $C_2 = c/7$ 

Figura 4.12 - Deformadas obtidas numericamente e experimentalmente para uma membrana tracionada

Utilizando-se as constantes assim determinadas, efetuou-se a integração numérica das equações diferenciais da membrana e os resultados obtidos considerando-se os dois modelos constitutivos foram comparados com os dados

experimentais. Na Figura 4.12 são apresentados os resultados obtidos desta análise para três diferentes níveis de deformação, z .

Na Figura 4.12 os gráficos apresentados na cor azul mostram a deformada obtida experimentalmente e nas cores vermelho e verde as deformadas obtidas pela análise numérica considerando-se o material do tipo Mooney Rivlin e Neo-Hookeano, respectivamente.

4.5. Obtenção das constantes elástica da membrana através do programa ABAQUS

Através dos dados experimentais de tensão e deformação o programa ABAQUS calcula as constantes elásticas do material. Estas constantes são determinadas através do método dos mínimos quadrados que minimiza o erro relativo em tensões. Para n pares de valores de tensão-deformação o erro relativo a ser minimizado é dado por:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_i^{th}}{T_i^{test}} \right)^2 \quad (4.11)$$

onde T_i^{test} são os valores de tensão obtidos experimentalmente e T_i^{th} são os valores de tensão obtidos através das relações constitutivas tais como as propostas por Ogden, Mooney-Rivlin, Arruda-Boyce, Yeoh, Polinomial e Polinomial reduzida, Van Der Valls e Neo-Hookeana. Para materiais incompressíveis dados de ensaios uniaxiais são necessários e, para materiais compressíveis, testes de compressão volumétrica.

A membrana a qual foi submetida ao ensaio de tração descrito no item 4.3 é analisada. Os valores das tensões e deformações obtidos experimentalmente são fornecidos na entrada de dados do programa ABAQUS. Uma análise estática geral é realizada considerando-se elementos de membrana do tipo M3D4. Uma malha foi gerada contendo 841 elementos e 870 nós.

Os resultados obtidos para as constantes, em MPa, para as teorias de Mooney-Rivlin, Neo-Hookeana e de Ogden são apresentados na Tabela 4.3.

Neo-Hookeana	$C_1 = 0.2151360$	$C_2 = 0$
Mooney-Rivlin	$C_1 = 0.148964$	$C_2 = 0.013929$
Ogden	$\mu = 1.84619$	$\alpha = 0.430272$

Tabela 4.3 - Constantes elásticas para o material das membranas

Através da comparação das curvas carga-deformação longitudinal (Figura 4.13) obtidas numericamente e experimentalmente pode-se verificar que a lei constitutiva que melhor representa o material da membrana utilizada nos ensaios experimentais é a de Mooney-Rivlin.

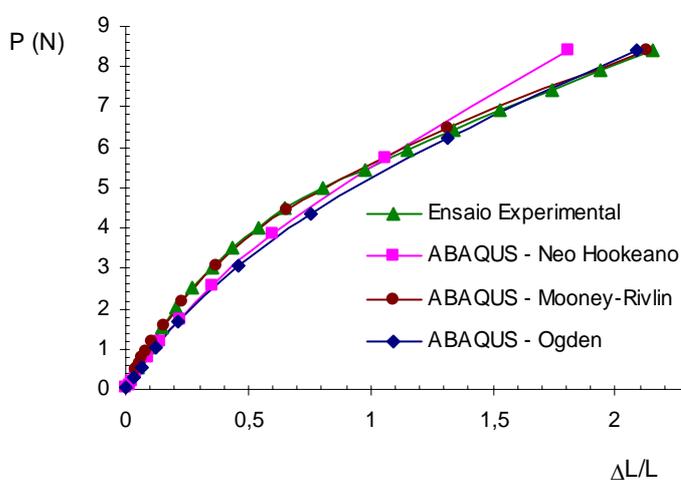


Figura 4.13 - Curvas carga-deformação obtidas numérica e experimentalmente para uma membrana tracionada

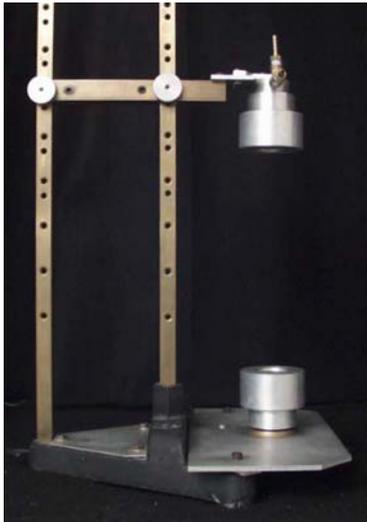
4.6.

Análise experimental para aferição da formulação apresentada no capítulo 2: Ensaio de tração e pressão interna uniforme em membranas

Para os ensaios experimentais de tração e pressão interna em membranas foram fabricados dois pares de anéis de alumínio para envolverem os bordos da membrana cilíndrica, como mostra a Figura 4.14-(a). Estes anéis estão presos a um pórtico metálico de forma que a membrana possa ser tracionada axialmente. A membrana é preenchida com ar através do anel superior, usando-se um aparelho

que possibilita a medição de sua pressão interna desenvolvido pelo Professor A. Eiber da Universidade de Stuttgart, na Alemanha, Figura 4.14-(b).

A membrana é constituída por um material homogêneo, isotrópico e incompressível (preservativo de borracha da marca Microtex), possui raio médio indeformado de 16.55 mm e espessura média de 0.086 mm , valores medidos pelo Instituto de Metrologia da PUC – Rio (ITUC).



(a)



(b)

Figura 4.14 – Foto ilustrativa do pórtico e do aparelho de medição de pressão utilizados nos ensaios de membranas

4.7.

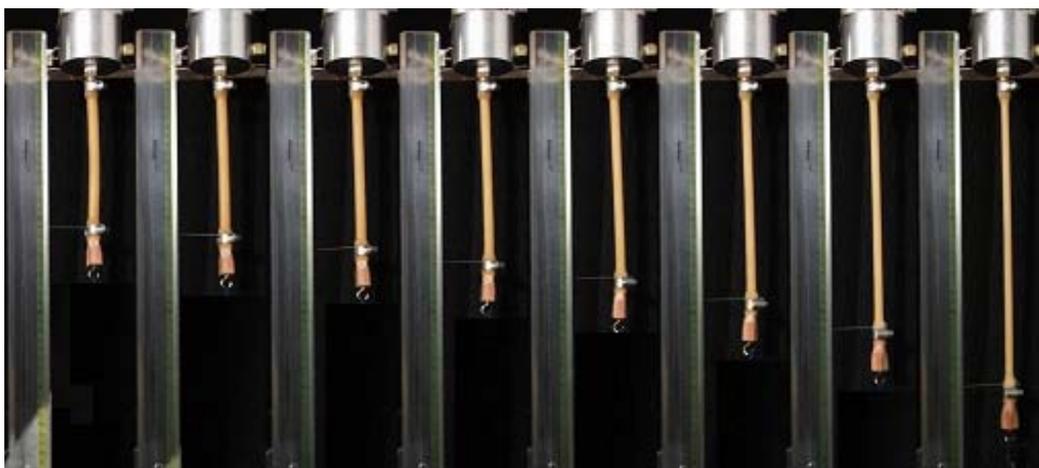
Análise experimental de cascas cilíndricas: ensaio de tração para obtenção das constantes elásticas do material.

Para a realização do ensaio de tração em cascas cilíndricas foram fabricados, para o mesmo pórtico descrito anteriormente, um par de bicos metálicos que permite a fixação bem como a injeção de líquidos ou gases dentro da casca a ser analisada (Figura 4.15). Foram utilizados corpos de provas da casca designada B205 composta por um elastômero (látex) com dimensões em milímetros de ($R=12.12$, $H=2.19$, $L=100$).



Figura 4.15 – Foto ilustrativa do aparato utilizado nos ensaios de cascas cilíndricas espessas sob tração e pressão

Os bordos da casca cilíndrica são fixados a estes bicos metálicos através de abraçadeiras que possibilitam tanto a vedação quanto a tração da casca, como mostra a Figura 4.16. A casca é então submetida a um carregamento axial, P , variando de 0 a 50N com um incremento constante de carga de 2N até atingir 20N e acréscimos de 5N até atingir a carga máxima aplicada. Para a obtenção das configurações deformadas, a cada acréscimo de carga a casca é fotografada. Medidas dos raios deformados foram obtidas através do programa de edição de fotografias, Photo Editor.



$T = 0\text{ N}$ 4.90 9.81 17.71 19.62 24.52 29.43 39.24

Figura 4.16 - Seqüência de deformadas ilustrando um ensaio de tração em uma casca cilíndrica

Medidas do alongamento longitudinal são obtidas diretamente através da leitura da régua posicionada junto ao aparato (Figura 4.16). Estas medições são lançadas em uma planilha onde são calculadas as deformações para cada acréscimo de carga. Os resultados dos três ensaios são mostrados na Figura 4.17.

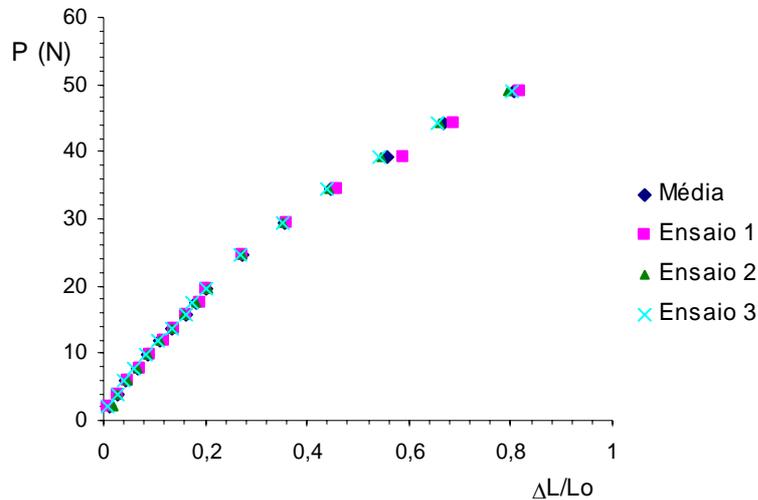


Figura 4.17 - Resultados experimentais: relação carga axial versus deformação longitudinal específica para uma casca tracionada

Analisando-se o gráfico apresentado na Figura 4.17, nota-se, como no caso anterior, a repetibilidade dos resultados, gerando uma boa concordância entre as curvas obtidas para os diversos ensaios. Assim como para membranas, observa-se que, inicialmente, a casca apresenta um comportamento quase linear. A não linearidade do material, assim como uma crescente perda de rigidez, tornam-se evidentes com o aumento da deformação.

4.7.1.

Obtenção das constantes elástica da casca através de dados de ensaios de tração através do programa ABAQUS

A casca cilíndrica que foi submetida ao ensaio de tração descrito anteriormente é agora analisada numericamente. Os valores das tensões, deformações e geometria da casca, obtidos experimentalmente, são fornecidos na entrada de dados do programa ABAQUS. Uma análise estática geral é realizada considerando-se elementos de casca do tipo S4R. Uma malha foi gerada contendo

2785 elementos e 2458 nós e os resultados das constantes, em MPa, para as teorias de Mooney-Rivlin, Neo-Hookeana e de Ogden são obtidos.

Neo-Hookeana	$C_1 = 0.201906431$	$C_2 = 0$
Mooney-Rivlin	$C_1 = 0.1003985$	$C_2 = 0.150843$
Ogden	$\mu = 1.55886$	$\alpha = 0.479757$

Tabela 4.4 - Constantes elásticas para o material da casca em MPa

Através da comparação das curvas carga-deformação (Figura 4.18) obtidas numericamente e experimentalmente pode-se verificar que as leis constitutivas Neo-Hookeana e de Ogden representam melhor o material da casca para pequenas deformações ($\Delta L/L < 0.35$) e a lei constitutiva de Mooney-Rivlin representa melhor o material na região de grandes deformações.

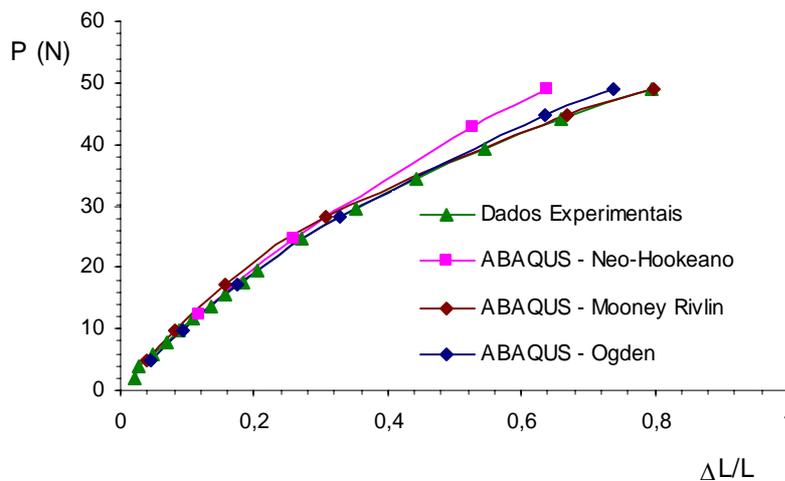


Figura 4.18 - Curvas carga-deformação obtidas numérica e experimentalmente para uma casca tracionada

4.8.

Análise experimental de cascas cilíndricas: ensaio de tração e pressão interna uniformes

Utilizando-se o mesmo aparato descrito anteriormente acoplado a um manômetro de alta precisão, a casca é submetida a uma tração longitudinal e posteriormente preenchida com ar, através do bico inferior (Figura 4.15).

A casca (tubo cilíndrico de látex) é constituída por um material homogêneo, isotrópico e incompressível. São utilizadas algumas amostras que possuem raio e espessura indeformada variáveis as quais foram medidas pelo Instituto de Metrologia da PUC – Rio (ITUC). Suas dimensão e designações são apresentadas na Tabela 4.5.

Nome da borracha	Diâmetro externo D (mm)	Espessura H(mm)	Relação H/D
B200	4.84	1.22	0.25
B204	11.54	2.95	0.26
B205	12.12	2.19	0.18
B207	13.87	3.13	0.23
B209	16.69	2.09	0.13
B210	18.67	3.58	0.19

Tabela 4.5 –Dimensões das amostras de cascas (tubos) utilizados na análise experimental