

6 Resultados

6.1. Obtenção da equação constitutiva

6.1.1. Análise experimental

Com o intuito de simular o comportamento da expansão sobre base rígida, realizamos três ensaios expandindo um lençol de borracha com espessura de 0,208 mm sobre um expensor de pele com capacidade de 200 ml. É possível visualizar as curvas de expansão na Figura 6.1.

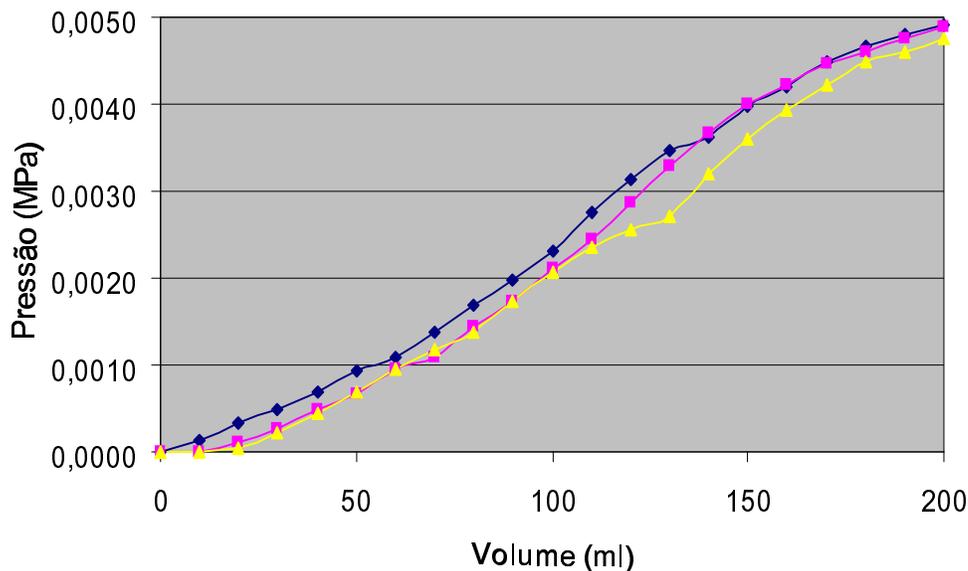


Figura 6.1 – Variação do volume pela pressão intra-expansor

A Figura 6.1 mostra que no início do processo de expansão, na medida em que a água é inserida dentro do expensor, a pressão obtida aumenta pouco. Após o volume de aproximadamente 40 ml a pressão sobe mais rapidamente ao longo do ensaio até a medida perto de 170 ml. O gráfico mostra que depois dessa faixa de volume, a taxa de crescimento da pressão tende a diminuir. É importante ressaltar

que o expansor encontrava-se sem nenhum líquido no seu interior, com isso estava dobrado entre a placa de acrílico e o lençol de borracha.

Para conseguirmos uma linha suavizada da média, utilizamos uma ferramenta de aproximação de curva, presente no Origin 6.1, que possibilitou a sua obtenção. A Figura 6.2 apresenta a curva média da variação do volume pela pressão interna no expansor.

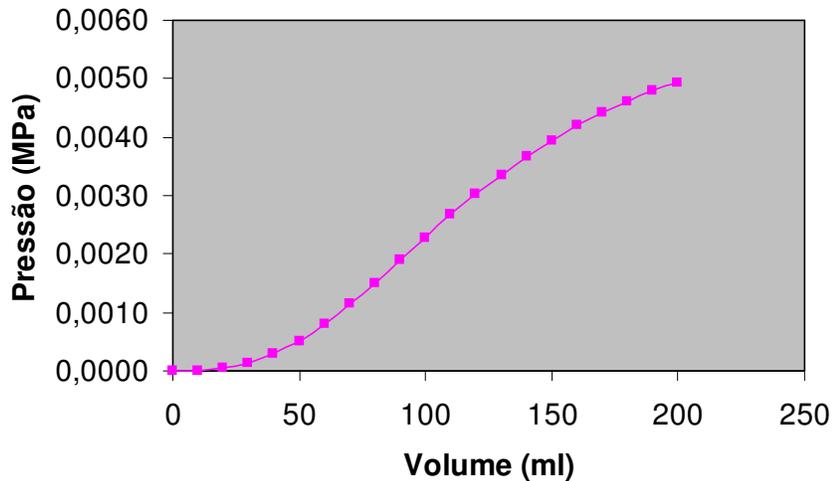


Figura 6.2 – Média da variação do volume pela pressão intra-expansor

O valor máximo da pressão na curva de expansão da membrana sobre base rígida é de 0,49 MPa para um volume de 200 ml.

6.1.2. Análise numérica

Implementamos o programa no software Maple 9 como já visto no capítulo 5 e com isso obtivemos os resultados numéricos que se seguem.

Para a identificação da equação constitutiva da borracha e suas constantes elásticas, foram utilizados os resultados experimentais acima e sua descrição através dos resultados numéricos. A formulação numérica foi apresentada no capítulo 3 e o ensaio experimental no capítulo 4.

Considerando o material comportando-se como Neo-Hookeano, e considerando um determinado nível de volume inserido, os valores experimentais foram relacionados com os valores numéricos e a espessura indeformada, H , através da fórmula a seguir:

$$C = \frac{P_{exp}}{P_{num} \times H} \quad (6.1)$$

onde P_{exp} é a pressão experimental e P_{num} é a pressão numérica adimensionalizada obtida pelo programa feito no Maple 9 para valores unitários de C e H . A curva que relaciona P_{num} com o aumento de volume no expansor é mostrada na Figura 6.3.

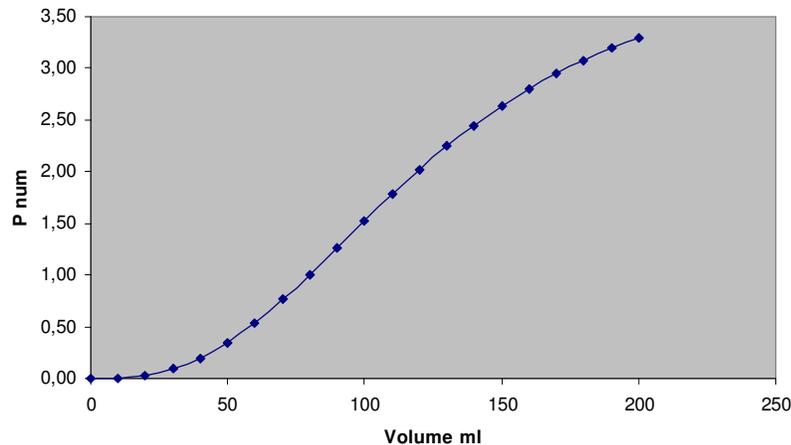


Figura 6.3 – P_{num} x Volume

Através da expressão (6.1), utilizando a espessura indeformada H e as pressões numéricas alcançadas na Figura 6.3, encontramos o valor da constante elástica, C , para um material Neo-Hookeano, eq. (3.1), de $C=0,359628038$ MPa.

Para as formulações de Mooney-Rivlin e Ogden foram utilizadas as constantes das referências Lopes (2003) e Carvalho (2004), respectivamente. As constantes de Mooney-Rivlin, eq. (3.2), usadas são $C_1 = 0,1003985$ MPa e $C_2 = 0,150843$ MPa. Para a formulação de Ogden, eq. (3.3), utilizamos $\mu_1=-1,2$, $\mu_2=1,5$, $\alpha_1=3$ e $\alpha_2=5$. A tabela 6.1 mostra as constantes usadas para cada formulação de energia.

Neo-Hookeano	Mooney-Rivlin	Ogden	
$C_1 = 0,359628$ MPa	$C_1 = 0,1003985$ MPa	$\mu_1 = -1,2$	$\alpha_1 = 3$
$C_2 = 0$	$C_2 = 0,150843$ MPa	$\mu_2 = 1,5$	$\alpha_2 = 5$

Tabela 6.1 – Constantes das formulações de energia

Observamos na Figura 6.4 os resultados numéricos do comportamento da expansão de um lençol de borracha de 0,208 mm de espessura com as diferentes formulações de energia da Tabela 6.1.

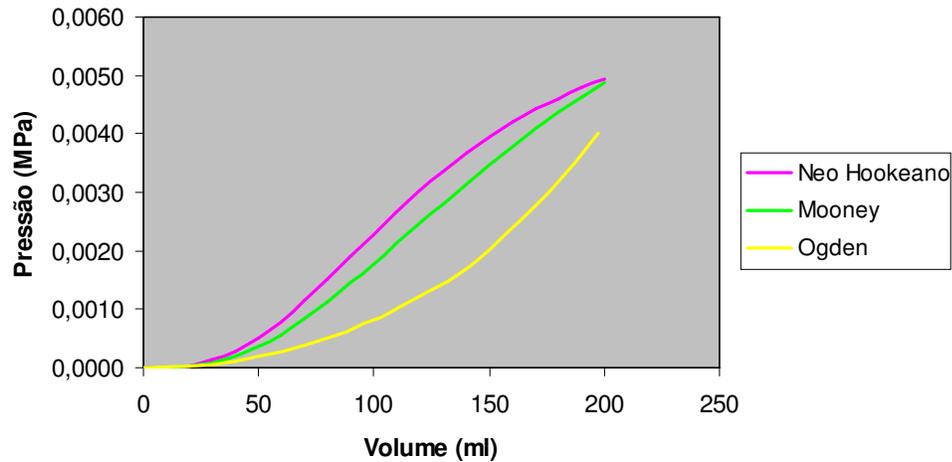


Figura 6.4 – Comparação entre diferentes formulações de energia

Podemos observar pela Figura 6.4 que a formulação de Ogden, pelo fato de ter um componente exponencial na sua equação, se comporta de maneira diferente das equações de Mooney-Rivlin e do Neo-Hookeano.

6.1.3. Comparação do modelo numérico com o modelo experimental

Comparamos o resultado experimental com o numérico para verificar se o modelo numérico consegue estabelecer uma boa aproximação da realidade. Diante das formulações de energia estudadas, traçamos um gráfico que pode ser visto na Figura 6.5.

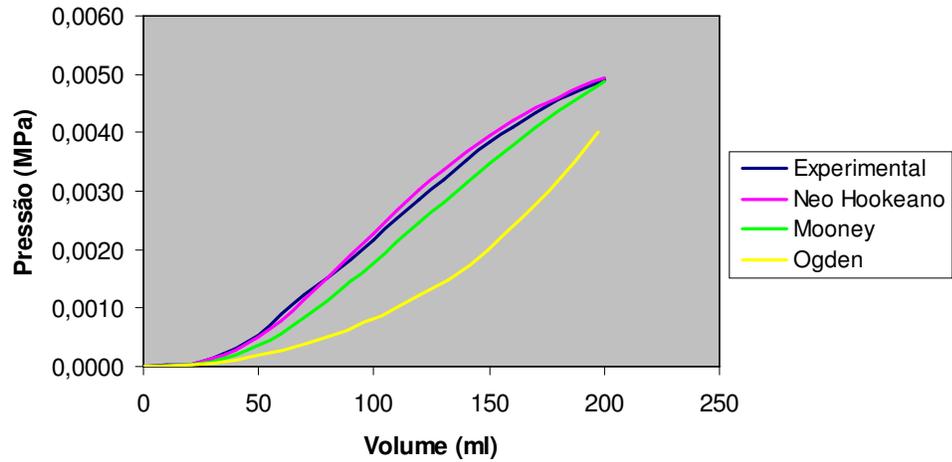


Figura 6.5 – Comparação entre experimental e numérico

Observamos que a formulação que melhor descreve o processo de expansão do lençol de borracha estudado é a Neo-Hookeana. Na figura 6.6 temos a curva numérica somente do material Neo-Hookeano com os resultados experimentais. Nota-se que a curva numérica fornece uma aproximação satisfatória com a experimental, pois passa aproximadamente pelos pontos da curva da experiência.

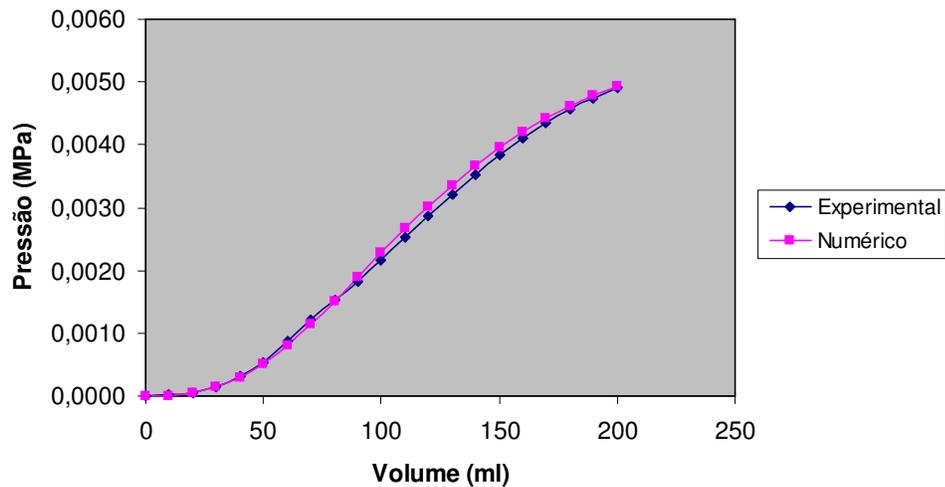


Figura 6.6 – Experimental x Neo-Hookeano

6.2. Estudo paramétrico da espessura

No modelo numérico, variamos o valor da espessura inicial (H) da membrana de borracha para fazer um estudo paramétrico. Para um mesmo volume obtido, temos diferentes pressões para cada espessura, como podemos ver na Figura 6.7.

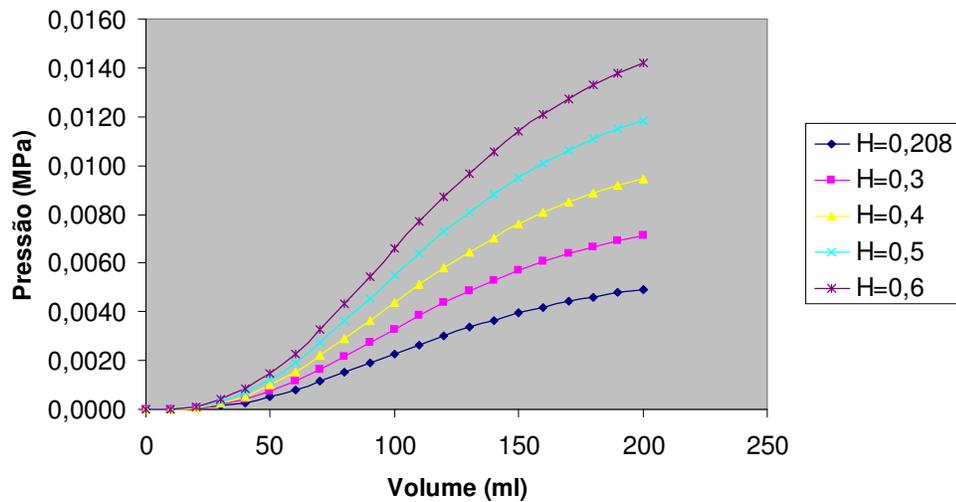


Figura 6.7 – Estudo paramétrico da espessura

Quanto maior a espessura do lençol de borracha, maior é a pressão interna no expansor de pele para um mesmo volume inserido. A pressão máxima calculada para a espessura estudada nesse trabalho, 0,208 mm, é de 0,004925779 MPa e para a espessura de 0,6 mm é de 0,0142089 MPa.

Verificamos com isso que para que seja possível descrever com segurança o processo de expansão de pele, in vivo, é fundamental que o cirurgião forneça, com exatidão, a espessura do retalho de pele que está sendo expandido.

6.3. Expansão sobre base elástica

6.3.1. Obtenção da constante de rigidez do material que simula a base elástica

Fizemos o teste de compressão como visto no capítulo 4, para acharmos o valor da constante de rigidez do conjunto usado como base elástica. Os resultados estão na Figura 6.8:

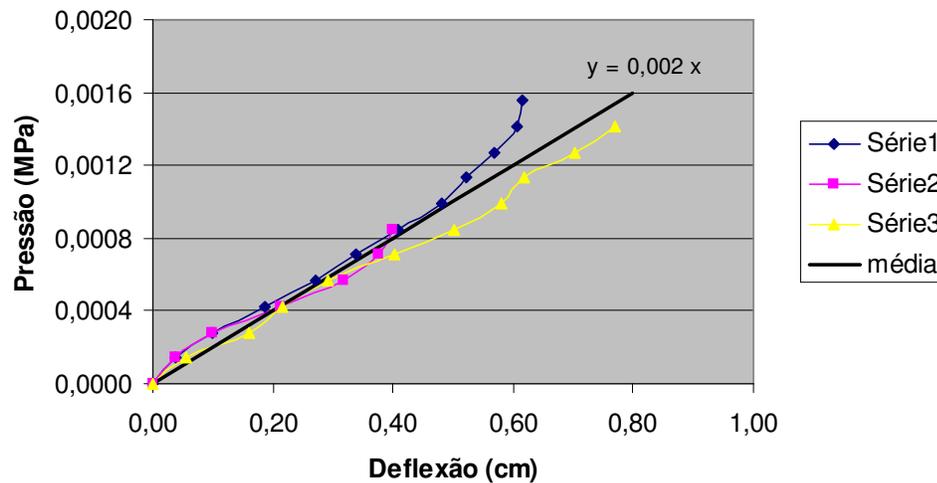


Figura 6.8 – Ensaio de compressão

Pelas inclinações das três retas acima obtivemos o valor da constante para cada ensaio e a média destas constantes é 0,002 MPa / cm. Como a inclinação do ensaio de compressão foi linear, pudemos utilizar o modelo linear de base elástica. A unidade da constante está de acordo com a observada em Timoshenko (1959) no que se refere a base elástica.

6.3.2. Análise experimental

Realizamos três ensaios de expansão da borracha com espessura de 0,208 mm, sobre um expensor de pele de capacidade de 200 ml, igual ao ensaio sobre base rígida. É possível visualizar as curvas de expansão na Figura 6.9.

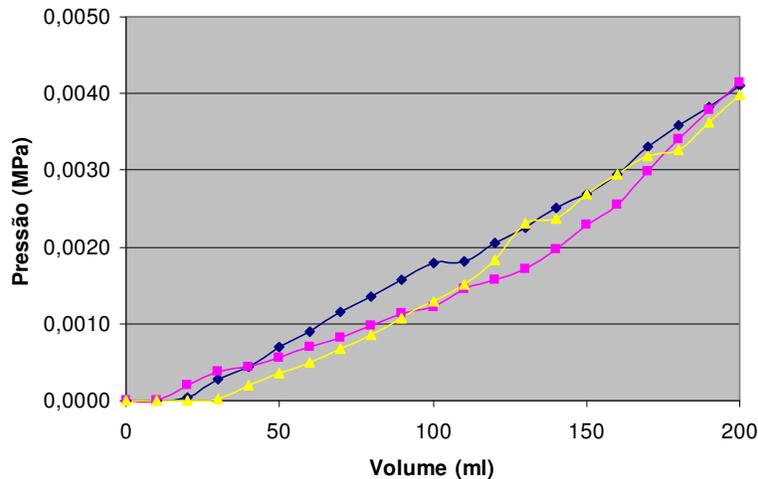


Figura 6.9 - Variação do volume x Pressão interna no expansor sobre base elástica

Na Figura 6.9, podemos observar que a pressão intra-expansor tem valores bem pequenos na fase inicial da expansão, até a faixa de volume de 50 ml. Após esse valor temos um crescimento mais acentuado da curva e as pressões sobem mais rapidamente até o final da expansão. As curvas das experiências têm oscilações durante o enchimento devido ao fato do expansor se desdobrar no início da expansão e da sua acomodação sobre a base elástica ao longo da experiência.

Do mesmo modo como foi feito para o caso da base rígida, traçamos uma linha suavizada da média. A Figura 6.10 apresenta a curva média da variação do volume pela pressão interna no expansor.

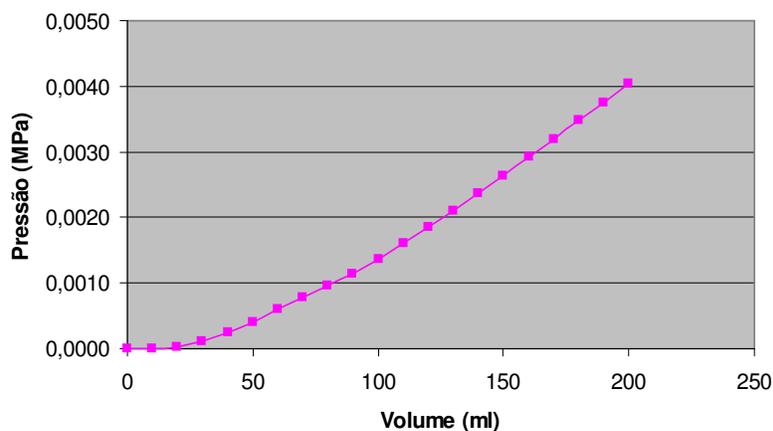


Figura 6.10 - Média da variação do volume pela pressão interna no expansor sobre base elástica

O valor máximo da pressão na curva de expansão da membrana sobre base elástica é de 0,4045 MPa para um volume de 200 ml.

6.3.3. Análise numérica

Para fazer a análise numérica do expensor sobre base elástica, separamos o problema em duas partes, como vimos no item 3.1 e os resultados parciais e totais estão a seguir.

6.3.3.1. Expansão sobre base rígida

Observamos no item 6.1.3 que a formulação que melhor descreve o processo de expansão para a borracha estudada é a Neo-Hookeana. Na figura 6.11 temos a curva numérica da pressão interna no expensor com a variação do volume.

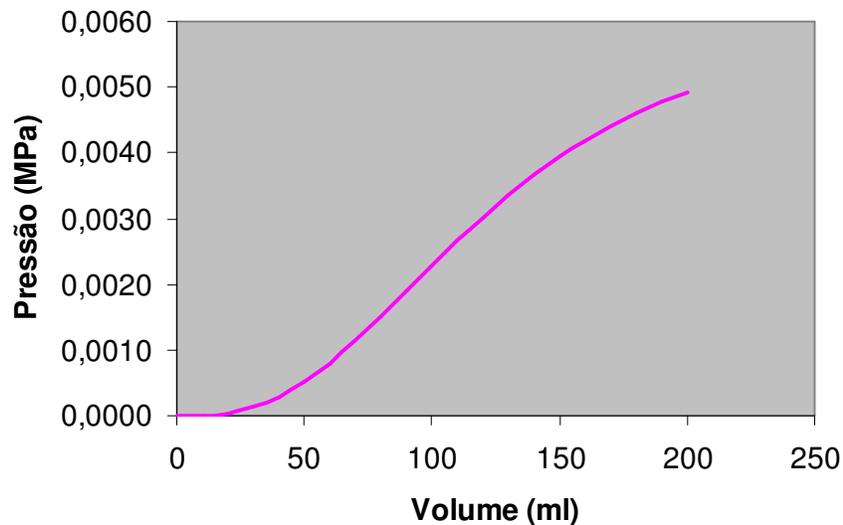


Figura 6.11 – Pressão x Volume – modelo numérico da expansão do lençol de borracha sobre base rígida

Na Figura 6.11 notamos um crescimento mais acentuado das pressões a partir do valor em torno de 40 ml, diminuindo a taxa de crescimento no final da expansão após o volume de 170 ml.

Podemos visualizar o processo de expansão do lençol de borracha sobre base rígida na Figura 6.12. Foi feito um gráfico do raio(r) pela altura(z), em que acompanhamos o processo de expansão da membrana sobre base rígida. Os valores do raio e da altura estão adimensionalizados, dividindo-se pelo raio inicial, a , e o valor da pressão(P) está em MPa.

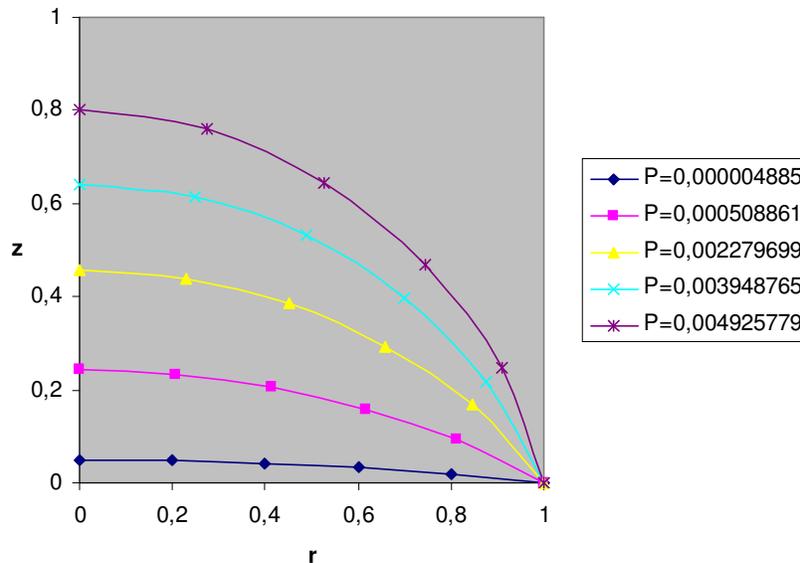


Figura 6.12 – Geometria da expansão sobre base rígida

Na figura 6.12 observamos, para diferentes pressões, a altura em que é expandido o lençol de borracha. No início da expansão, para valores pequenos de pressão, notamos que a altura cresce mais rapidamente do que em pressões mais elevadas.

6.3.3.2. Expansão da base do expansor

Na figura 6.13, temos a curva numérica da pressão interna no expansor com a variação do volume, somente da parte correspondente à expansão da base do expansor.

Os volumes são obtidos para as mesmas pressões da expansão sobre base rígida.

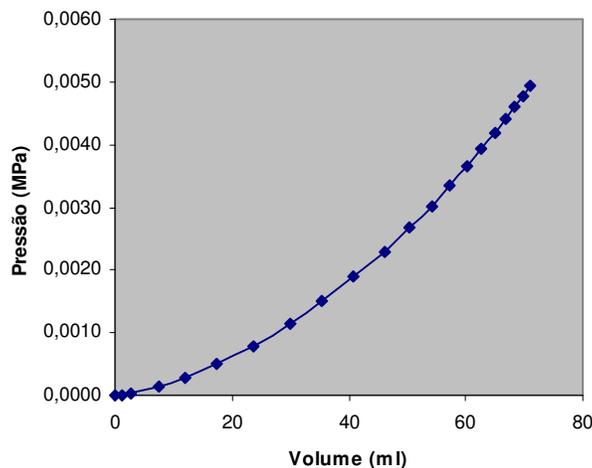


Figura 6.13 - Pressão x Volume – modelo numérico da expansão do lençol de borracha sobre base elástica

Na figura 6.13, observamos que as pressões na fase inicial da expansão são pequenas e crescem ao longo da expansão. A taxa de crescimento da pressão diminui no final da expansão.

Na figura 6.14, temos a geometria da base do expansor sobre base elástica. Foi feito um gráfico do raio(r) pela altura(z), em que acompanhamos o processo de expansão da membrana sobre base elástica. Como no caso da base rígida, os valores do raio e da altura também estão adimensionalizados, dividindo-se pelo raio inicial, a , e o valor da pressão(P) está em MPa.

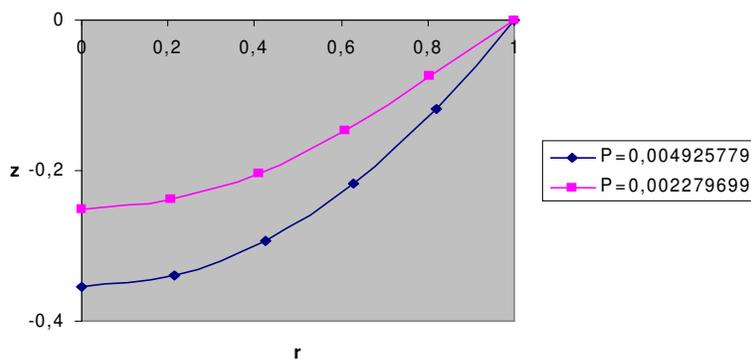


Figura 6.14 – Raio x Altura – da base do expansor com diferentes pressões

A Figura 6.14 mostra que quanto maior a pressão no expansor mais ele irá se deformar, empurrando mais a base elástica.

6.3.3.3. Expansão do lençol de borracha

Calculamos o valor do volume interno no expansor para cada pressão aplicada sobre o mesmo. Pela Figura 6.15, podemos ver o comportamento da expansão de um lençol de borracha de 0,208 mm de espessura com a formulação de energia do Neo-Hookeano.

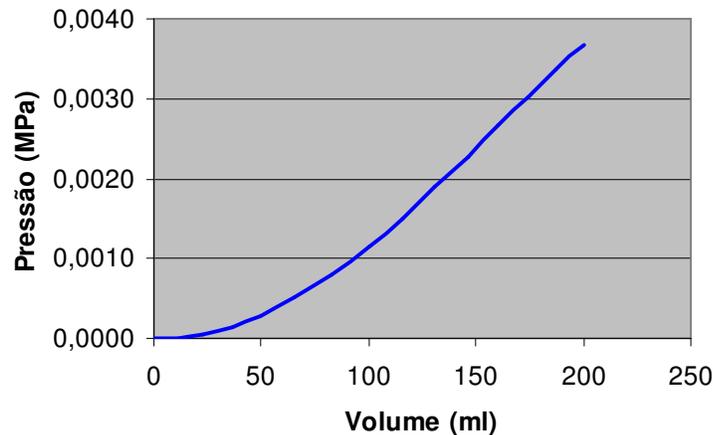


Figura 6.15 – Pressão x Volume – modelo numérico da expansão do lençol de borracha sobre base elástica

No início da expansão, até a medida aproximada de 50 ml, a pressão aumentou pouco com o acréscimo de água no expansor. Após essa medida a curva teve uma maior taxa de crescimento até atingir o volume de 200 ml. O valor máximo atingido pela pressão no modelo numérico é de $P=0,003664$ MPa.

Pelo modelo numérico foi possível traçar os gráficos referentes ao comportamento da expansão da membrana de borracha. As Figuras 6.16, 6.17 e 6.18 ilustram a expansão, indicando a parte correspondente exclusivamente à parte rígida e àquela com a inclusão da parcela elástica, com as pressões em MPa.

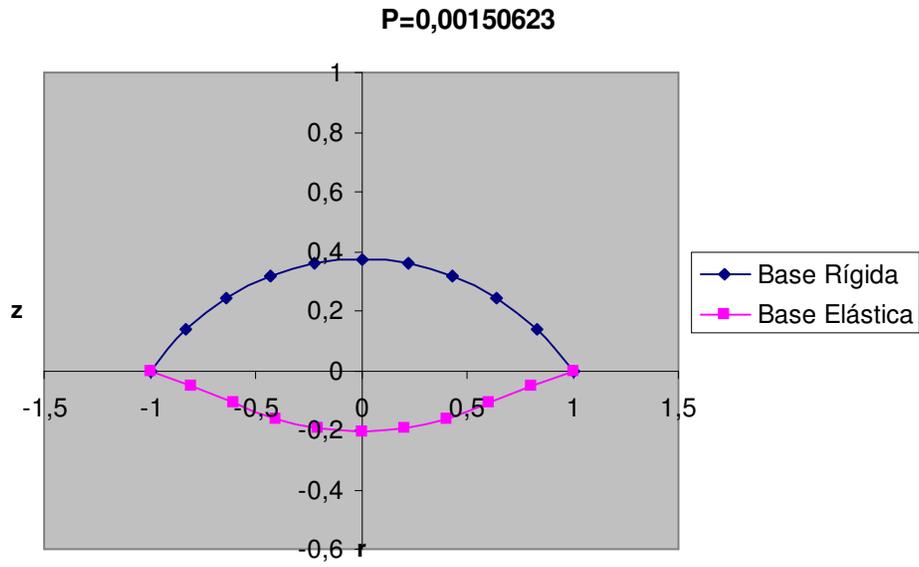


Figura 6.16 – Expansão – P=0,00150623

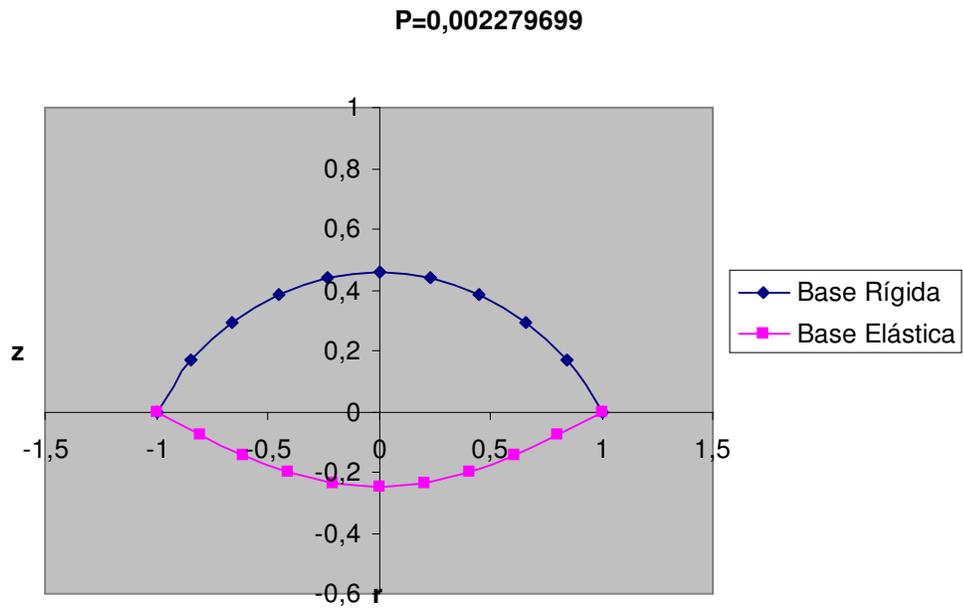


Figura 6.17 – Expansão – P=0,002279699

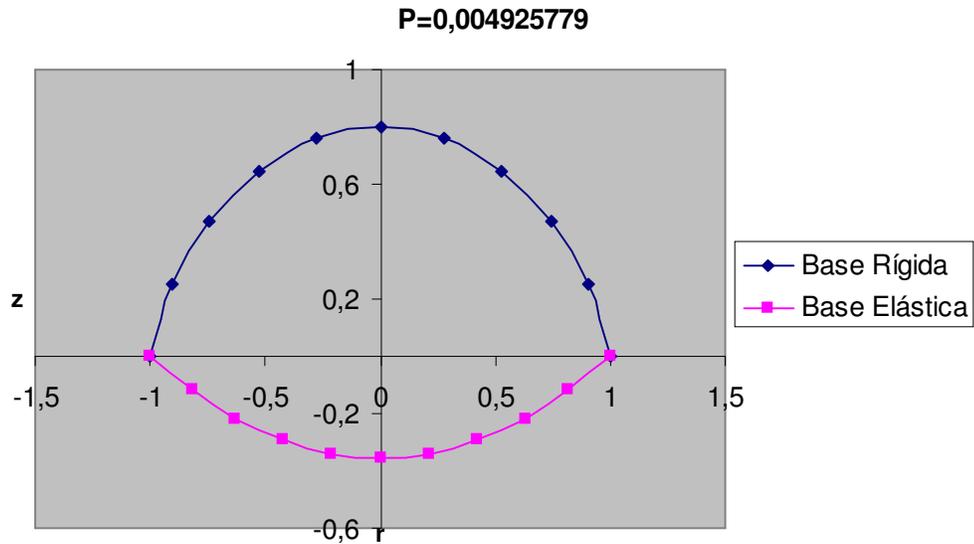


Figura 6.18 – Expansão – $P=0,004925779$

Na Figura 6.19, temos as três expansões juntas.

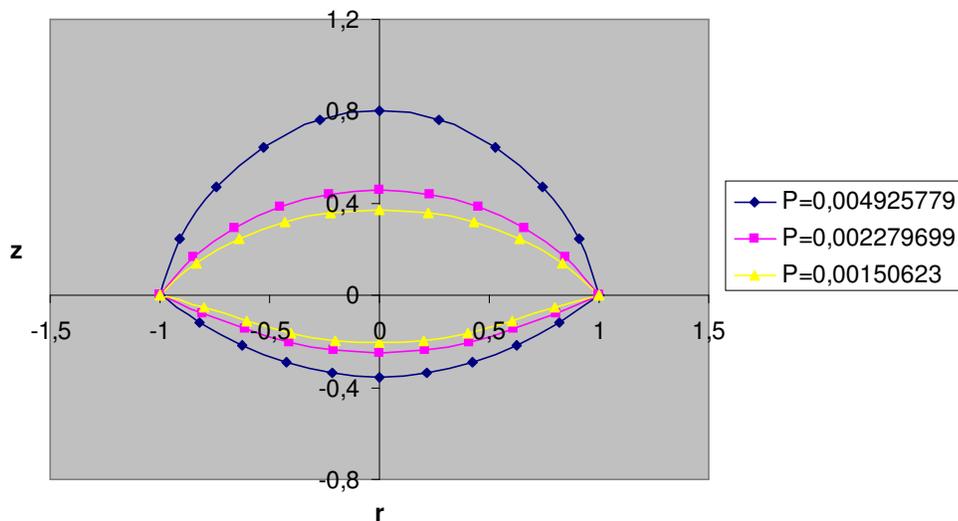


Figura 6.19 – Expansões sobre base elástica

Esses resultados mostram como se dá o comportamento da expansão de borracha sobre uma base elástica, simulando uma expansão sobre uma região adiposa.

Nesse caso para uma pressão de 0,004925779 MPa tivemos um valor adimensional de 0,8, ou seja, para o comprimento do raio da membrana plana de 5 cm, o valor da altura da membrana (z) vale 4 cm.

6.3.3.4. Comparação entre diferentes bases elásticas

No item 6.3.3.3 analisamos a expansão do lençol de borracha sobre uma base elástica de constante de rigidez de 0,002 MPa / cm, encontrada no item 6.3.1. Nesse item é apresentada uma comparação numérica entre diferentes valores de constante de rigidez da base elástica.

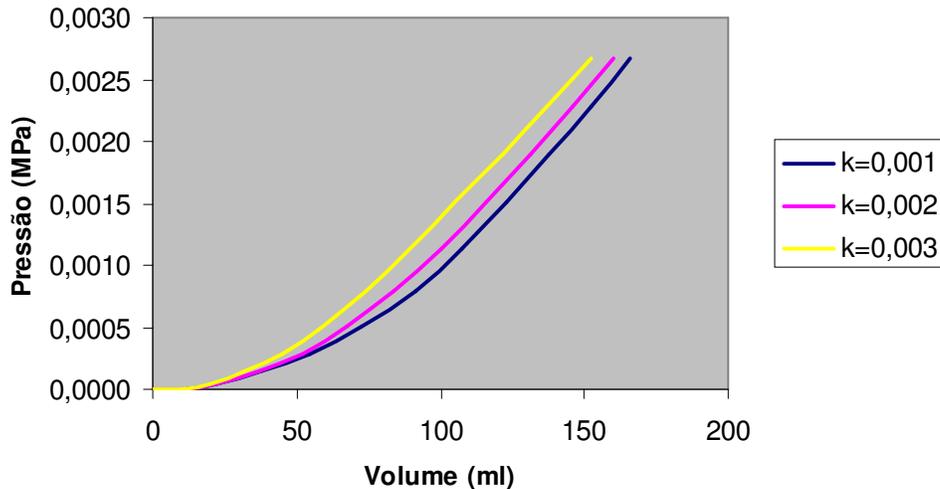


Figura 6.20 – Comparação numérica entre diferentes bases elásticas

A figura 6.20 mostra a comparação numérica entre três bases elásticas, com valores de 0,001 MPa / cm, 0,002 MPa / cm, 0,003 MPa / cm. Quanto maior o valor da constante de rigidez, menor é a deformação da base elástica. Assim, quanto mais rígida é a base elástica, maior é a pressão no lençol de borracha.

6.3.4. Comparação dos resultados numéricos com os experimentais

Na Figura 6.21 observamos a aproximação do modelo numérico com o experimental.

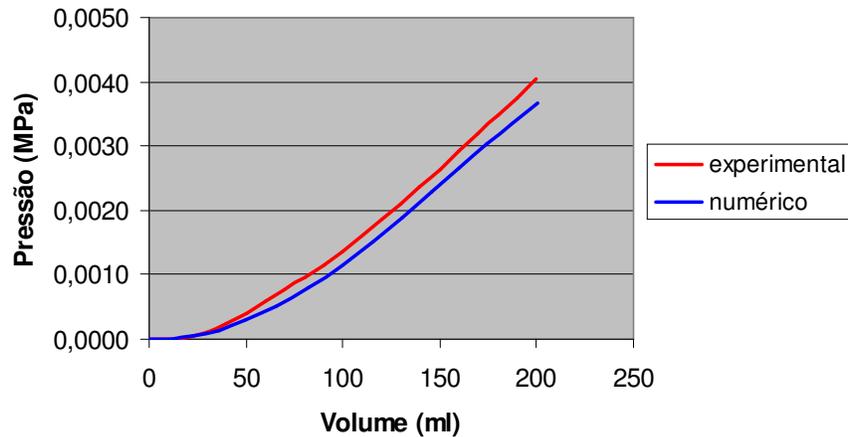


Figura 6.21 – Comparação da base elástica – numérico x experimental

Notamos que a curva numérica se aproxima satisfatoriamente da curva experimental, tendo uma pequena diferença de valores. Ambas as curvas têm o mesmo comportamento, com valores baixos de pressão no início da expansão seguido de um maior crescimento ao longo da expansão.

6.4. Comparação entre base rígida e elástica

Com os resultados obtidos podemos analisar o efeito da base elástica sobre a expansão do lençol de borracha. A comparação da análise experimental entre a expansão sobre base rígida e a sobre base elástica está na Figura 6.22.

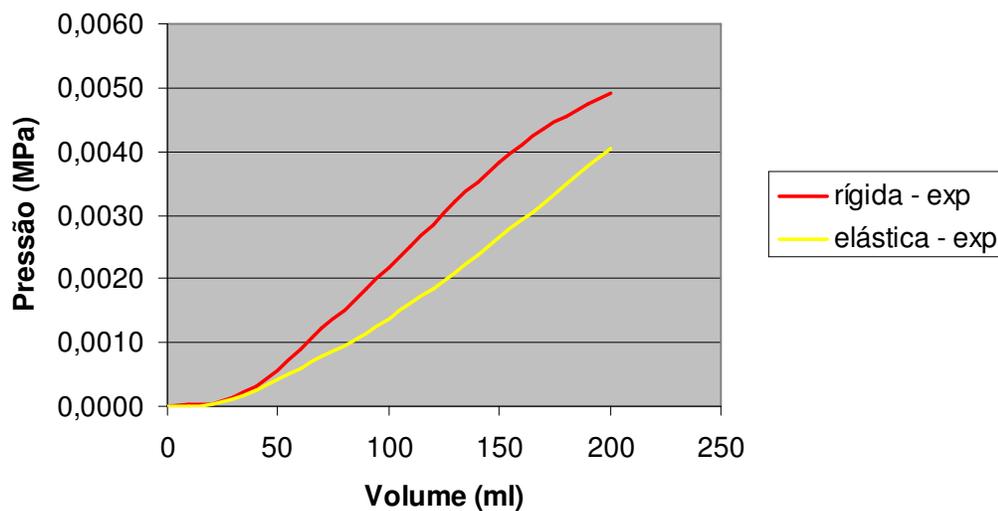


Figura 6.22 - Comparação dos resultados experimentais com bases rígida e elástica

Na Figura 6.22 podemos constatar que para um mesmo volume a pressão intra-expansor é maior no experimento com base rígida, com a diferença das pressões chegando a 52%. Temos também a comparação numérica entre a expansão sobre base rígida e a sobre base elástica que é mostrada na Figura 6.23.

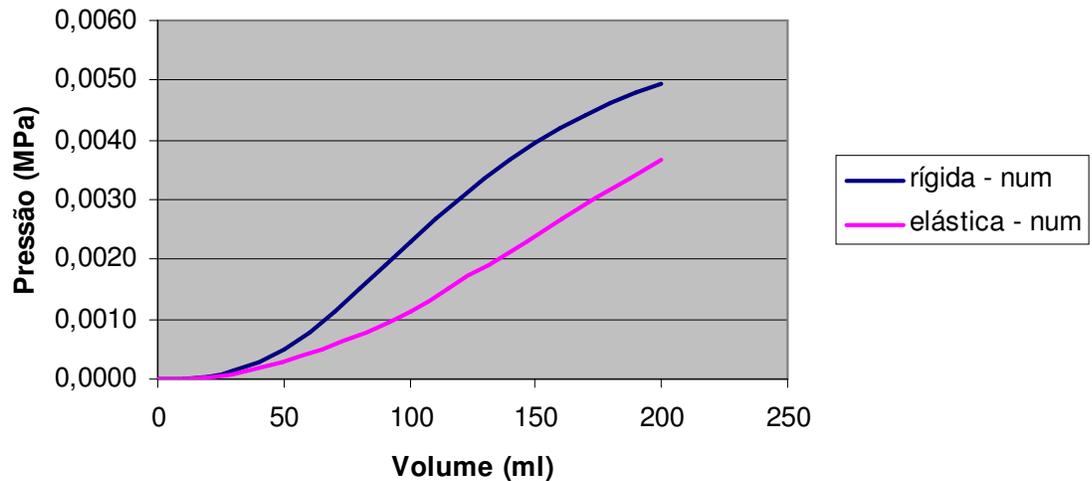


Figura 6.23 – Comparação numérica entre base rígida e elástica

Como na Figura 6.22 podemos constatar na Figura 6.23 que para um mesmo volume a pressão intra-expansor foi maior no experimento com base rígida, chegando a diferença das pressões a 68 %. Na Figura 6.24 podemos visualizar todas as curvas juntas, tanto a experimentais e a numéricas das bases rígida e elástica.

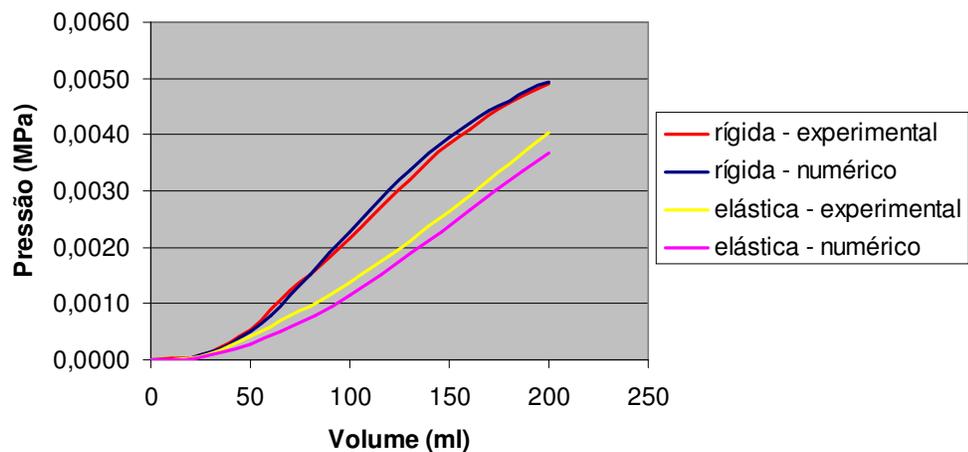


Figura 6.24 - Comparação entre as curvas experimentais e numéricas das bases rígida e elástica

Podemos concluir pela Figura 6.24 que o modelo numérico desenvolvido se comporta de acordo com as experiências feitas no laboratório, visto que as curvas numéricas e experimentais são bem próximas, tanto para a base rígida quanto para a base elástica.

6.5. Expansão do couro cabeludo

Através da utilização de constantes obtidas para a formulação de energia de Delfino, eq. (3.4), para o couro cabeludo de Carvalho (2004) foi feita uma análise numérica da expansão sobre o crânio e sobre uma camada de tecido adiposo.

6.5.1. Expansão do couro cabeludo sobre o crânio

Na figura 6.25, podemos analisar a expansão do couro cabeludo para um expansor redondo de 9,6 cm de diâmetro.

Couro cabeludo:

Espessura da pele = 0,37cm

$a = 0,213 \text{ Mpa}$

$b = 31,5$

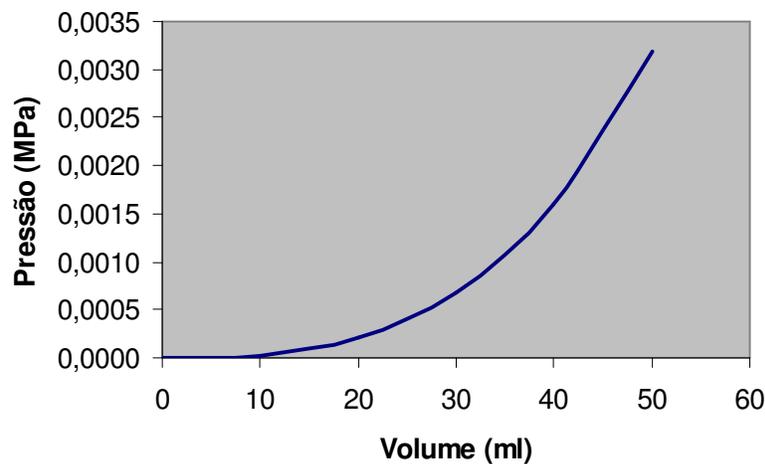


Figura 6.25 – Expansão no couro cabeludo

Devido ao fato da formulação de energia de Delfino ser da forma exponencial, temos na Figura 6.25 a curva da variação do volume com a pressão

com esse crescimento exponencial. Para volumes iniciais, a pressão aumenta pouco, e para valores de volume acima de 20 ml, a pressão sobe rapidamente. A pressão atingida para o volume de 50 ml é de 0,003196 MPa.

6.5.2. Expansão do couro cabeludo sobre uma camada de gordura

Incluímos uma camada de gordura de 1 cm para exemplificarmos o comportamento da expansão sobre uma base elástica.

6.5.2.1. Obtenção da constante de rigidez da gordura

Para acharmos o valor da constante de rigidez da gordura, utilizamos a curva de Samani (2001) que relaciona a deflexão sofrida pelo material com a pressão exercida, para valores de pressão equivalentes aos obtidos nos resultados com a formulação de Delfino. A curva de compressão está na Figura 6.26.

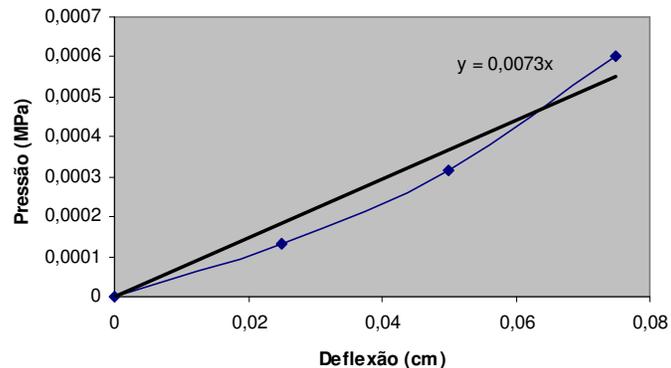


Figura 6.26 – Constante de rigidez da gordura

Pela inclinação da reta acima obtemos o valor da constante para cada ensaio e a média destas constantes é 0,0073 MPa / cm.

6.5.2.2. Expansão sobre a camada de gordura

Obtivemos numericamente a curva que relaciona a variação de volume com a pressão para o processo de expansão do couro cabeludo sobre a camada de gordura. A Figura 6.27 mostra essa relação.

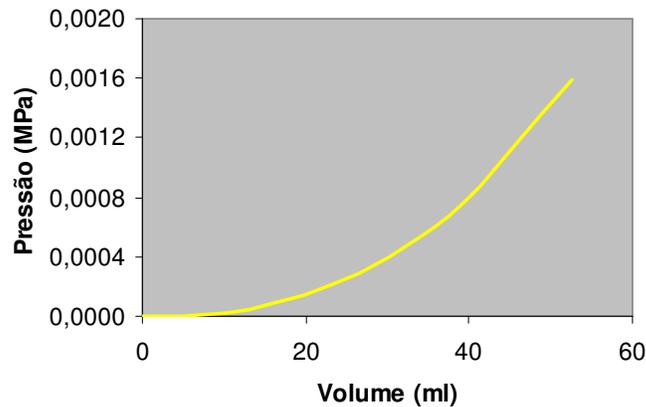


Figura 6.27 – Expansão do couro cabeludo com uma camada de gordura

O comportamento da expansão sobre uma camada de gordura é idêntico ao observado sobre o crânio, com um crescimento exponencial. Porém a pressão atingida para um volume de 50 ml é de 0,001595 MPa.

6.5.3. Comparação da expansão sobre o crânio e sobre a camada de gordura

Fizemos a comparação entre a expansão do couro cabeludo sobre o crânio, que é uma base rígida, e sobre uma camada de gordura, que é uma base elástica. A comparação está na Figura 6.28.

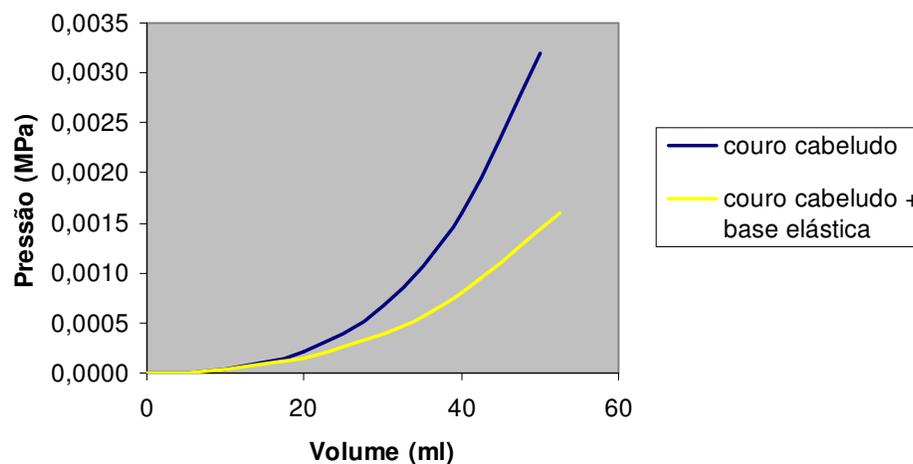


Figura 6.28 – Comparação da expansão do couro cabeludo sobre o crânio e sobre uma camada de gordura

Podemos observar na Figura 6.28 que os valores de pressão na expansão sobre a gordura são menores do que sobre o crânio. Essa diferença de pressão se dá pelo fato de que um certo volume de água no expansor deforma a gordura, já que esta funciona como uma base elástica, e com isso o couro cabeludo fica menos pressionado.