

## 6 Conclusão

Durante a execução deste trabalho diversos outros ensaios tiveram que ser realizados até que se chegasse às configurações utilizadas nos ensaios descritos.

Concluiu-se que a caracterização de uma membrana de látex hiperelástica através de ensaios uniaxiais de tração possui divergências em relação aos resultados de um ensaio de tração bi-axial, que é o caso do ensaio de endentação.

A caracterização do material que compõe a membrana por meio de um ensaio bi-axial plano é difícil de ser implementada experimentalmente e por isso não foi tentada neste trabalho, apesar da literatura [17] indicar que este tipo de ensaio é o mais adequado para a caracterização de uma membrana hiperelástica.

A caracterização dos coeficientes de atrito entre a membrana e o endentor foi igualmente conscientemente simplificada, isto é, o modelo de atrito utilizado é o mais simples e assumiu-se que o fato da membrana estar colada em uma placa de acrílico durante os ensaios de caracterização de atrito interfere pouco nos resultados. Para a utilização do modelo numérico de Coulomb para o atrito ( $f_{at} = \mu * N$ ) assume-se que não há deformações significativas dentro dos corpos e que a região de contato é significativamente menor que os corpos. Apesar da membrana deformar-se este modelo foi utilizado por ser simples tanto na caracterização do material como na utilização nos cálculos numéricos. Os ensaios realizados com blocos de massa pequena (98.6g) forneceram dados muito discrepantes dos ensaios realizados com massa maior devido à baixa força normal, que faz com que a força de atrito seja muito pequena e muito suscetível a erros de medição. A taxa de aquisição de dados de 1kHz mostrou-se adequada para a aquisição de dados de força e deslocamento nos ensaios de caracterização do atrito uma vez que o resultado com a taxa de aquisição de 10kHz não apresentou diferenças significativas nos resultados.

Observou-se que o uso de lubrificante nas interfaces membrana-corpo de prova e membrana-endentor requer cuidados uma vez que é muito difícil aplicar de forma uniforme o lubrificante. Pequenas variações na quantidade de lubrificante e

na espessura do filme causam significativa variação no coeficiente de atrito presente. Isto pode ser evidenciado pelas discrepâncias entre os resultados numérico e experimentais quando foi simulada a endentação com atrito nulo e feito o ensaio com o endentor lubrificado.

O diâmetro do furo na membrana após o rompimento mostrou-se um bom parâmetro para definir a deformação a que esta membrana estava submetida no instante anterior ao rompimento. Em conjunto com os dados de força de reação e deslocamento obtidos pode ser utilizado para definir a tensão máxima de ruptura da membrana a partir de um ensaio bi-axial (ensaio de endentação).

Pela análise numérica do problema da endentação e penetração na membrana observou-se que a escolha do funcional que irá caracterizar o material influencia na curva força vs. deformação e que portanto deve ser analisada pra cada ensaio com o qual deseja-se comparar.

Observou-se pelos gráficos de espessura da membrana em função do raio da mesma (perfil de espessura) que com o aumento do atrito passa a haver uma maior restrição ao movimento da membrana sobre a região de contato, assim, quanto maior o atrito maior a espessura da membrana na região de contato com o endentor. É possível ainda analisar que com o aumento do atrito há um crescimento na força de reação no endentor, isto se dá pelo fato de que por haver uma restrição ao movimento da membrana na região de contato há uma deformação mais uniformemente distribuída na membrana, isto é, há uma tensão máxima maior.

Com a variação da espessura da membrana observou-se que esta não influencia na geometria final deformada da membrana, mas que com um aumento da espessura há um conseqüente aumento nas forças de reação registradas no endentor, fato que é esperado uma vez que para se deformar um corpo com seção transversal maior é necessário mais força.

Quanto à comparação numérico-experimental descrita no capítulo 5 é possível observar que para o caso do endentor lubrificado há maiores divergências entre os resultados de força de reação vertical e deslocamento no fim da endentação. Esta maior divergência é explicada pela dificuldade em reproduzir a lubrificação em cada ensaio de endentação de forma similar, e ainda o fato da camada de filme lubrificante ser continuamente expelida da interface endentor-membrana a medida que o ensaio é feito.

Assim, os resultados da comparação numérico experimental para os ensaios lubrificados e as simulações com coeficiente de atrito nulo, têm menor confiabilidade e não são representativos, em relação aos realizados para atritos maiores devido à dificuldade em se executar um ensaio experimental com atrito suficientemente baixo a ponto de ser considerado nulo. Nenhum contato entre dois corpos pode ocorrer sem atrito, esta situação é meramente hipotética, o que se buscou foi minimizar ao máximo o atrito para que este pudesse ser considerado como aproximadamente nulo nas análises realizadas.

No caso da interface sem lubrificante e sem lixa, a comparação numérico-experimental mostrou que a altura em que ocorre o fim da endentação é melhor descrita quando o material é modelado como sendo Neo Hookeano, contudo, a força de reação vertical no endentor para o caso experimental aproxima-se mais do modelo de Ogden de 2ª ordem, modelo que igualmente com o de Ogden de 1ª ordem descreve bem a força de reação vertical no fim do ensaio, com 90mm de deslocamento.

No caso da interface coberta com lixa, o maior atrito estudado neste trabalho, o modelo que melhor descreveu os resultados experimentais em termos de deslocamento vertical em que ocorre o fim da endentação, foi o de Ogden de 2ª ordem, e o que melhor descreveu a força de reação neste mesmo ponto foi o de Mooney Rivlin. Já o resultado da força de reação vertical com 90mm de deslocamento (penetração) para esta mesma interface é melhor descrito pelo modelo de Ogden de 1ª ordem, mas com resultados igualmente satisfatórios para o modelo Ogden de 2ª ordem.

Conclui-se que os modelos que melhor descrevem o comportamento destas membranas estudadas de uma maneira geral, são os de Ogden de 1ª e 2ª ordem, apresentando resultados satisfatórios em termos de força de reação vertical e deslocamento vertical do endentor, sendo estes os parâmetros que foram medidos experimentalmente. Por ser mais simples, o modelo de Ogden de 1ª ordem é o mais indicado para descrever o material utilizado neste trabalho.