

## 5

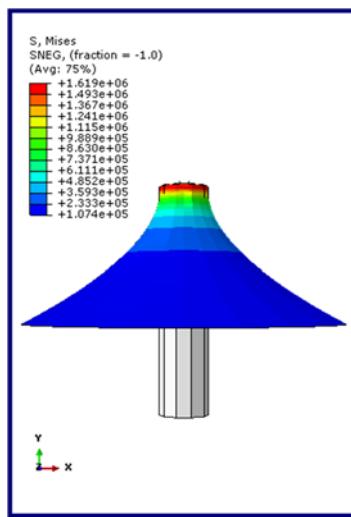
# Comparação dos resultados numéricos e experimentais

Neste capítulo serão descritas comparações entre as simulações numéricas realizadas com o software de elementos finitos Abaqus e os ensaios experimentais. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de validar os modelos numéricos desenvolvidos e assim avaliar os resultados obtidos nas simulações numéricas. Serão apresentados como pontos de interesse e de comparação numérico experimental o deslocamento em que ocorre o fim da endentação, e 90mm de deslocamento. Nestes pontos será comparado o valor da força de reação vertical, uma vez que esta força e o deslocamento foram os dados aquisitados experimentalmente.

Entende-se por endentação o fenômeno no intervalo entre o ponto inicial, onde a membrana encontra-se plana e o endentor com deslocamento vertical nulo, e o ponto imediatamente antes de haja contato da membrana com a lateral do endentor. A partir deste ponto inicia-se o processo de penetração, onde há contato da membrana com a lateral do endentor.

### 5.1. **Lubrificado**

A Figura 5.1 mostra que as maiores tensões encontram-se na região superior da membrana para o uma simulação sem atrito, isto é, simulando um ensaio com lubrificação na interface da membrana com o endentor.



**Figura 5.1 -  $\mu=0,00$  Neo Hookeano com legenda de cores expandida**

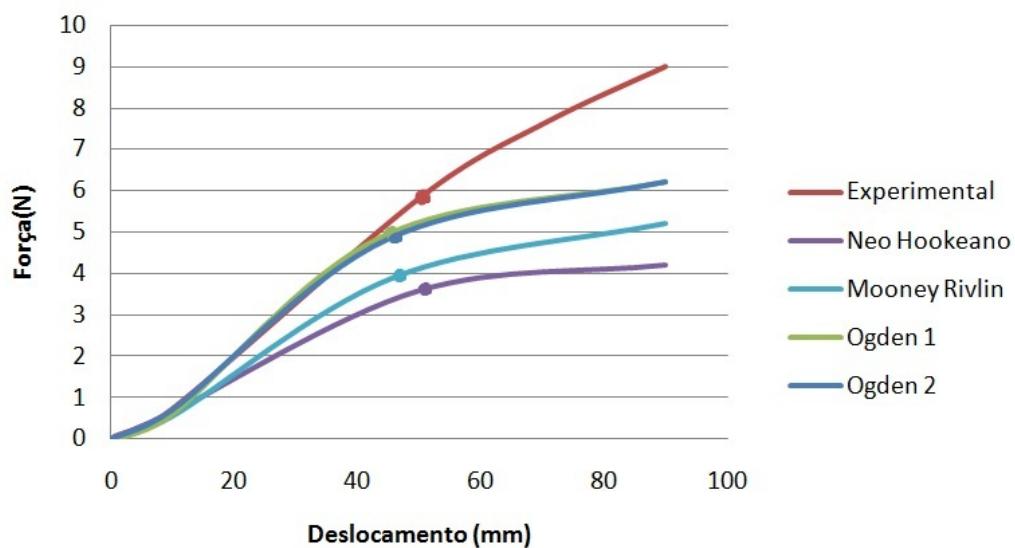
A Tabela 5.1 - Comparação numérico experimental da endentação indica o deslocamento em que ocorre o fim da endentação, a força de reação neste ponto, e por último a força de reação com 90mm (ponto máximo estudado). Estes dados são indicados para o ensaio experimental e para os quatro funcionais de energia analisados neste trabalho.

**Tabela 5.1 - Comparação numérico experimental da endentação sem atrito**

	Experimental	Neo Hookeano	Mooney Rivlin	Ogden 1	Ogden 2
Fim da endentação	50mm	50mm	46mm	44mm	45mm
Força de reação no fim da endentação	5,65N	3,58N	3,90N	4,88N	4,82N
Força de reação com 90mm	9,00N	4,20N	5,28N	6,20N	6,20N

Na Figura 5.2 observamos a comparação dos resultados do gráfico Força vs. Deslocamento para os funcionais estudados e o experimental, neste gráfico, as

marcas circulares sobre as linhas indicam o ponto em que se identifica o fim do processo de endentação e inicia-se a penetração. Observa-se que para deslocamentos abaixo de 40mm os funcionais de Ogden de 1<sup>a</sup> ordem e Ogden de 2<sup>a</sup> ordem descrevem bem o comportamento do material, mas para valores mais altos de deslocamento o experimental passa a assumir valores de força maiores. Tal comportamento é explicado pelo fato que para tensões altas a camada de filme lubrificante no ensaio experimental é forçada para fora da área de contato, fazendo com que o atrito real seja maior que zero o que acarreta um aumento da força de reação registrada.



**Figura 5.2 - Comparação numérico experimental do caso lubrificado  
indicando o fim da endentação**

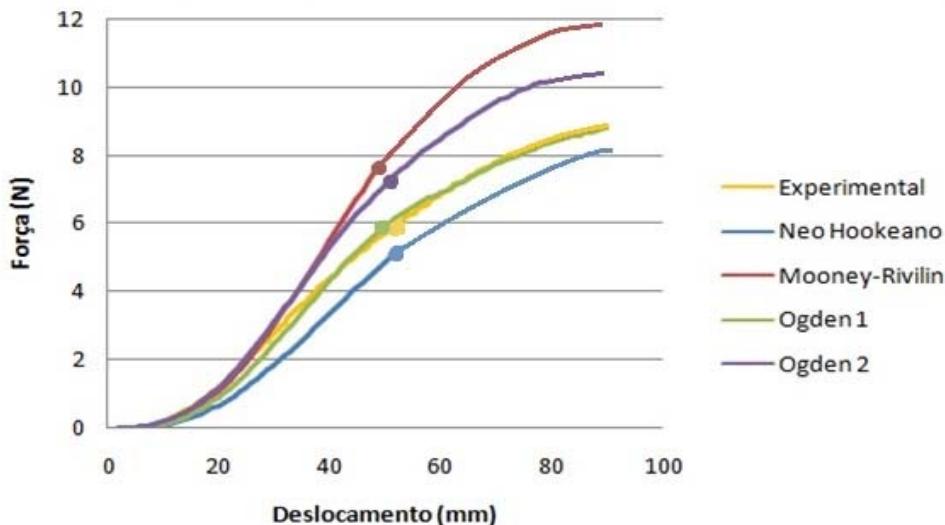
## 5.2. Sem lubrificante

A Tabela 5.2 compara as forças de reação vertical no endentor ao final da endentação, para os modelos numéricos estudados com coeficiente de atrito  $\mu = 0,46$  e o resultado da análise experimental para o caso onde o endentor encontra-se sem lixa e sem lubrificante. Para a força, o modelo cujo resultado mais se aproxima do experimental é o de Mooney Rivlin, contudo, o modelo neo-Hookeano foi o que apresentou resultados mais próximos em relação ao deslocamento vertical.

**Tabela 5.2 - Comparação numérico experimental da endentação sem lubrificante**

	Experimental	Neo Hookeano	Mooney Rivlin	Ogden 1	Ogden 2
Fim da endentação	52mm	52mm	48mm	47mm	50mm
Força de reação no fim da endentação	5,80N	5,00N	7,25N	5,80N	7,15N
Força de reação com 90mm	9,00N	8,10N	11,80N	8,90N	10,40N

O gráfico Força vs. Deslocamento mostrado na Figura 5.3, evidencia o comportamento muito semelhante entre o resultado experimental e o modelo de Ogden de 1<sup>a</sup> ordem, contudo, o fim da endentação ocorre para um deslocamento menor. As marcas sobre as linhas do gráfico indicam o ponto em que acaba a endentação e começa a penetração em cada um dos casos, observa-se que apesar da divergência entre os valores de força para os funcionais estudados há pouca diferença em relação ao ponto em que ocorre o fim da endentação.



**Figura 5.3 - Comparação numérico experimental indicando o fim da endentação**

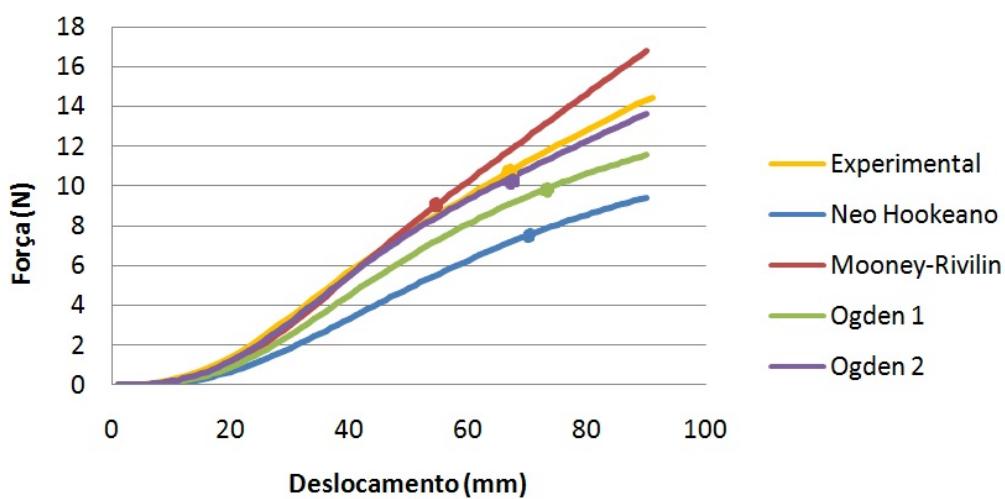
### 5.3. Com lixa

Nos ensaios realizados com lixa, isto é, o maior atrito estudado (Tabela 5.3) o fim da endentação ocorreu com 65mm de deslocamento vertical do endentor, exatamente o mesmo valor encontrado para o modelo numérico de Ogden de 2<sup>a</sup> ordem. Na Figura 5.3 observa-se a comparação dos resultados numéricos para os quatro funcionais de energia estudados utilizando o coeficiente de atrito  $\mu = 0,8$  e o resultado da média de 3 ensaios de endentação realizados com o endentor coberto por lixa 600. Como esperado, para pequenos deslocamentos do endentor e consequentemente pequenas deformações da membrana há pouca divergência entre todos os funcionais e destes com o experimental. A medida que o deslocamento do endentor aumenta fica clara uma melhor descrição do material como Ogden de 2<sup>a</sup> ordem. Para valores de deslocamento vertical de até 50mm, aproximadamente o fim da endentação o modelo de Mooney-Rivlin diverge pouco dos resultados experimentais.

**Tabela 5.3 - Comparação numérico experimental da endentação para o atrito máximo.**

	Experimental	Neo Hookeano	Mooney Rivlin	Ogden 1	Ogden 2
Fim da endentação	65mm	70mm	55mm	76mm	65mm
Força de reação no fim da endentação	10,80N	7,62N	9,30N	9,95N	10,19N
Força de reação com 90mm	14,20N	9,48N	17,00N	11,64N	13,63N

No gráfico da Figura 5.4 vemos a comparação dos resultados numéricos e experimentais onde o fim das linhas indica o ponto final da endentação. Observa-se claramente que o modelo Ogden de 2<sup>a</sup> ordem é o que melhor descreve este resultado Força vs. deslocamento experimental, dado que pode ser comprovado na Tabela 5.3 que relaciona o ponto do fim da endentação e a força de reação para o ensaio experimental e os diversos tipos de material estudados.



**Figura 5.4 - Comparação numérico experimental com lixa indicando o fim da endentação**

## 5.4. Rompimento

Na Figura 5.5 observa-se a comparação das membranas rompidas no ensaio sem lubrificante e sem lixa (a esquerda) e no ensaio com lixa (a direita). Observa-se uma grande diferença no diâmetro dos furos sendo o da esquerda de aproximadamente 4mm de diâmetro e o da direita 16mm de diâmetro. Como sabe-se que a membrana isotrópica rompe-se na região de maior tensão e que essa região está localizada no bordo do endentor, a partir destas imagens é possível inferir qual a deformação sofrida pela membrana no ponto de rompimento. Como esperado, o fato do coeficiente de atrito ser maior, causa uma maior restrição ao movimento da membrana no topo do endentor e faz com que a deformação seja quase nula nesta região. A membrana com lubrificante não rompeu-se com o curso máximo do endentor possível no aparato experimental, mas pode-se supor que por estar ainda mais deformada no ponto de rompimento, o furo nesta membrana seria ainda menor que os 4mm apresentados no caso sem lubrificante e sem lixa.



**Figura 5.5 - Comparação de membranas rompidas**