

6. Resumo dos resultados finais e discussão

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados e comparações realizadas no estudo numérico e experimental dos tubos de silicone. Também serão discutidos os resultados obtidos com a introdução de imperfeições na análise numérica e os resultados obtidos quando utilizamos as equações constitutivas propostas para o tecido arterial.

6.1. Tubos de silicone

Neste item serão apresentados os resultados e comparações realizadas no estudo experimental e numérico de tubos de silicone com a geometria representativa da aorta sem imperfeição.

6.1.1. Comparação entre os resultados da pressão crítica

Na tabela 6.1 são apresentadas as pressões crítica (mmHg) obtidas na análise experimental e numérica para os funcionais de energia e tipos de elementos estudados, podemos observar a variação da pressão crítica em função do alongamento aplicado a estrutura como também em função do funcional de energia e do tipo de elemento escolhido.

Material	Alongamento		
	0(%)	10(%)	20(%)
Experimental	117,60	110,90	95,70
Ogden1 – Casca	136,56	130,33	111,14
Ogden 1 – Sólido	122,14	116,60	103,87
Neo Hookeano- Casca	166,66	148,41	134,48
Neo Hookeano - Sólido	150,83	142,08	128,06

Tabela 6.1 – Comparação da pressão crítica (mmHg) numérica e experimental

A figura 6.1 faz uma representação gráfica da tabela 6.1 onde podemos observar claramente a diminuição da pressão crítica em função do alongamento aplicado e que a análise numérica que mais se aproxima dos resultados experimentais é quando adotamos o funcional de energia Ogden 1 e utilizamos elementos sólidos.

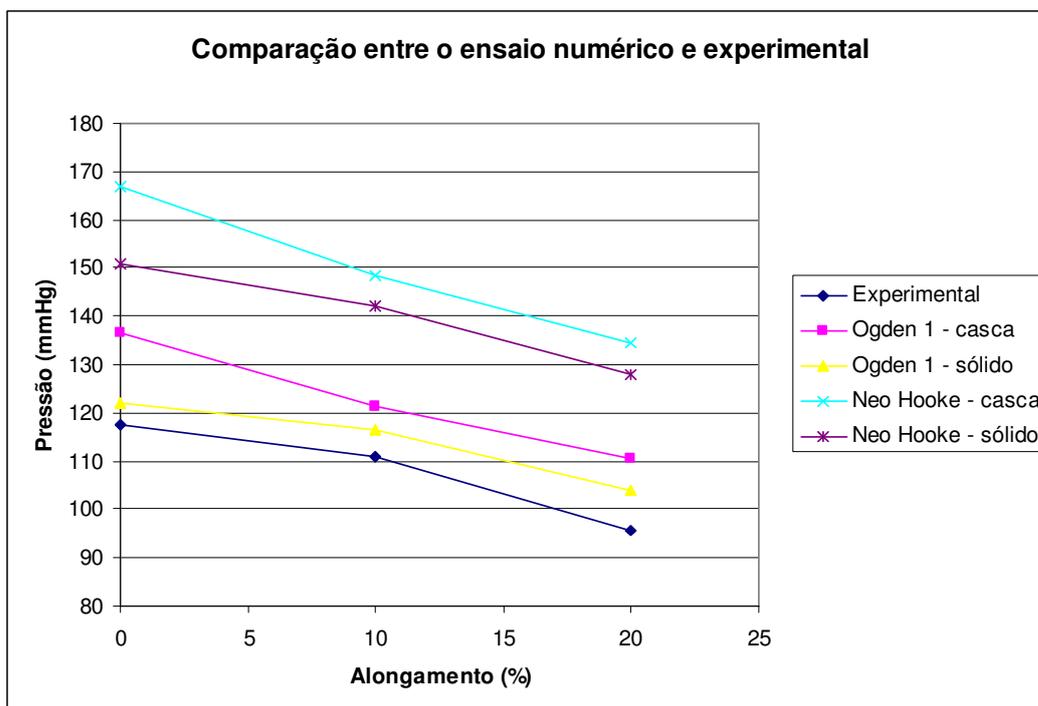


Figura 6.1 – Gráfico comparativo da pressão crítica numérica e experimental

A tabela 6.2 apresenta a diferença percentual entre os resultados experimentais e numéricos obtidos.

Material	Alongamento		
	0(%)	10(%)	20(%)
Ogden1 – Casca	16,12	17,52	16,13
Ogden 1 – Sólido	3,86	5,14	8,53
Neo Hookeano- Casca	41,71	33,82	40,52
Neo Hookeano - Sólido	28,25	28,11	33,81

Tabela 6.2 – Diferença percentual dos ensaios numéricos e experimentais

Pela análise do gráfico da figura 6.1 podemos observar que a modelagem numérica que mais se aproximou dos resultados experimentais foi a que utilizou o funcional de energia Ogden 1 com elemento sólido.

Utilizando-se o funcional de energia Ogden 1, tanto com o elemento finito de sólido quanto com o elemento finito de casca, obteve-se pressão crítica mais próxima da análise experimental. Podemos observar também na tabela 6.2 que a diferença percentual entre o ensaio numérico com o elemento sólido e funcional de energia Ogden 1 apresentou uma diferença média de 5,84% em relação ao ensaio experimental, e que o ensaio numérico com elemento de casca e funcional de energia Ogden 1 apresentou uma diferença média de 16,59% em relação ao ensaio experimental.

Com funcional de energia Neo Hookeano obtivemos uma variação média de 30,05% entre a análise numérica e o resultado do ensaio experimental. Quando utilizamos o elemento de casca e o funcional de energia Neo Hookeno, obtivemos uma variação média de 36,68% entre a análise numérica e o ensaio experimental.

Notamos que o funcional de energia Ogden 1 representa melhor o material estudado experimentalmente que o Neo Hookeno, tanto para elementos de sólido quanto para elementos de casca.

6.1.2.

Comparação entre os resultados da tensão

A tabela 6.3 apresenta a comparação entre as tensões principais máximas (kPa) obtidas no instante da pressão crítica para os funcionais de energia e os tipos de elementos estudados em função do nível de alongamento.

Material	Alongamento		
	0(%)	10(%)	20(%)
Ogden1 – Casca	275,90	302,40	440,60
Ogden 1 – Sólido	312,40	369,50	536,20
Neo Hookeano- Casca	255,30	355,10	380,90
Neo Hookeano - Sólido	359,90	401,40	602,90

Tabela 6.3 – Comparação das tensões principais máximas (kPa) que ocorrem no instante da pressão crítica

A figura 6.2 apresenta uma análise gráfica da tabela 6.3.

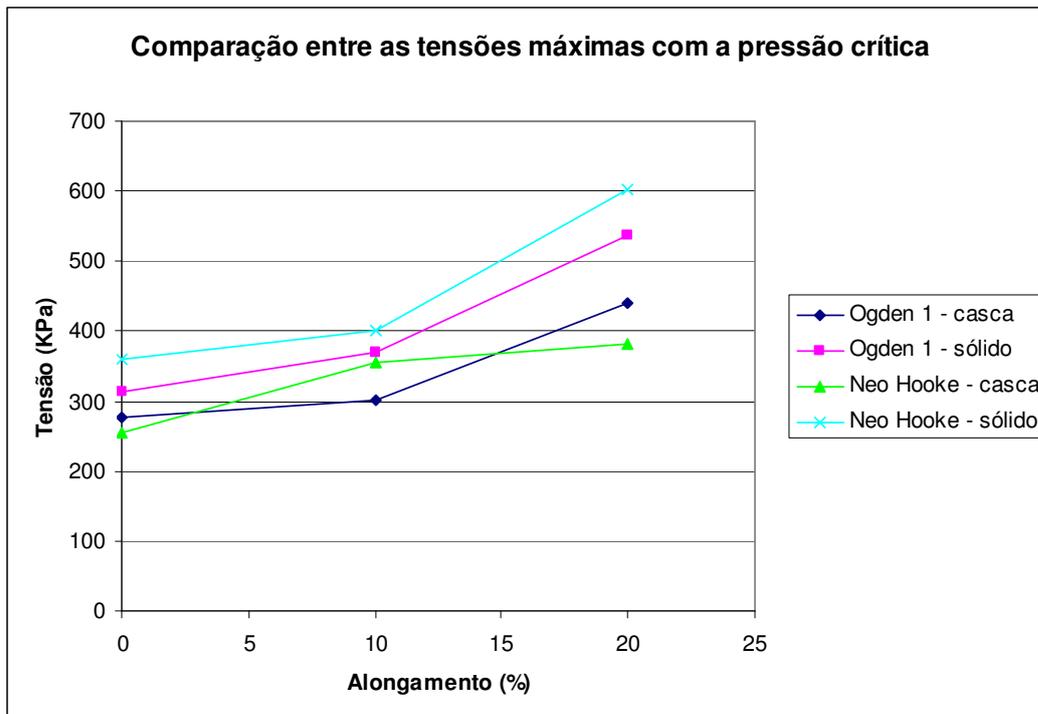


Figura 6.2 – Gráfico comparativo da tensão máxima com a pressão crítica

Pela análise do gráfico anterior podemos perceber que a tensão sofre um acréscimo em seu valor quando o nível de alongamento é aumentado, para todos os casos estudados.

6.2. Comparação da pressão crítica dos estudos de imperfeição

6.2.1. Análise da pressão crítica para imperfeições locais simétricas

Com o objetivo de avaliar a variação da pressão crítica em função da diminuição da espessura da parede arterial, foram estudados dois casos. No primeiro caso foi diminuída a espessura da parede arterial na parte inferior e no segundo caso na parte superior, como podemos observar na figura 6.3.

Neste estudo foi utilizado o modelo com elementos de casca S4R, 1617 elementos e 10% de alongamento do comprimento inicial e funcional de energia Ogden 1.

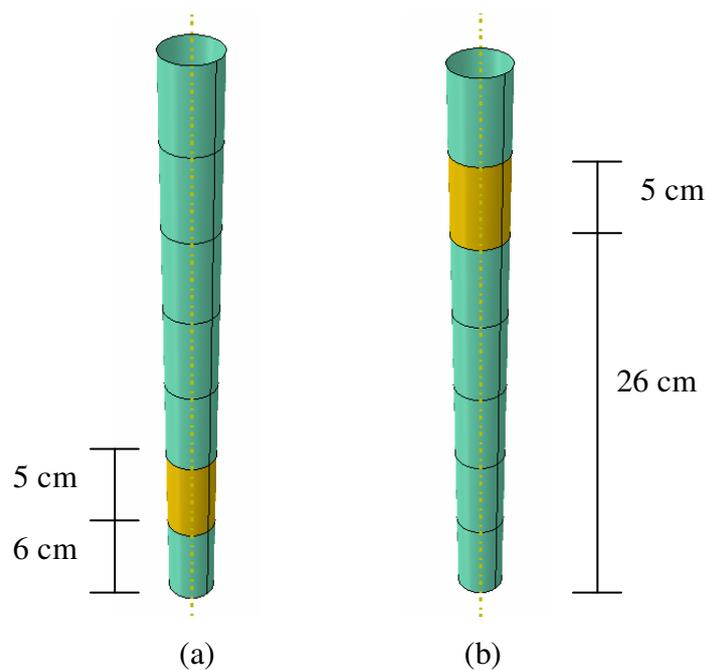


Figura 6.3 – Posição da imperfeição anelar inferior (a) e superior (b)

Na figura 6.4 podemos observar a variação da pressão crítica para o primeiro caso em função da diminuição da espessura da parede arterial. Neste caso a imperfeição anelar estava localizada na parte inferior, como visto na figura 6.3 (a).

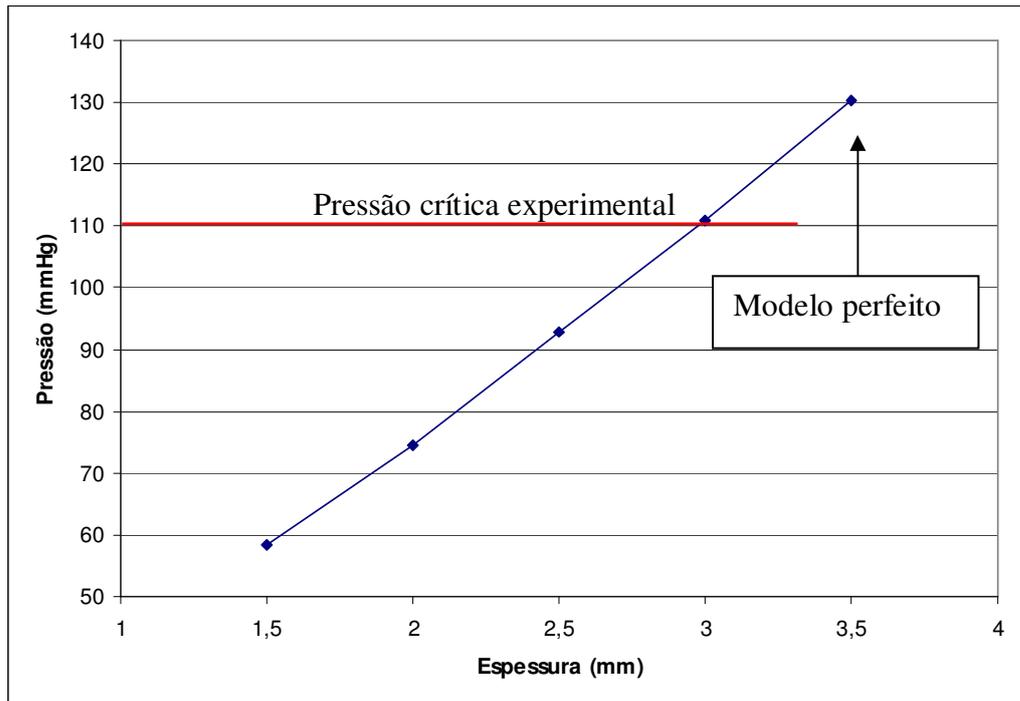


Figura 6.4 – Variação da pressão crítica (mmHg) em função da diminuição da espessura na região anelar inferior

Podemos observar uma variação linear quando a espessura da região anelar é diminuída da espessura de 3,5 mm no modelo perfeito para a espessura da 1,5 mm. Verificamos que quando reduzimos a espessura da região anelar inferior para 3,0 mm observamos que a pressão crítica é idêntica ao caso experimental.

Na figura 6.5 podemos observar a variação da pressão crítica para o segundo caso em função da diminuição da espessura da parede arterial. Neste caso a imperfeição anelar estava localizada na parte superior, como visto na figura 6.3 (b).

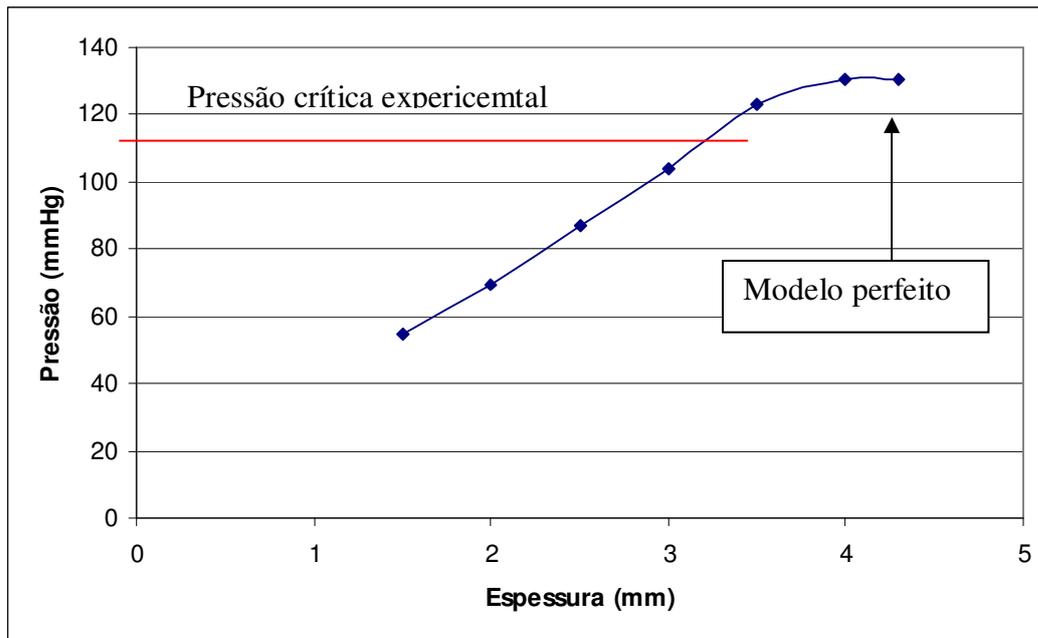


Figura 6.5 – Variação da pressão crítica (mmHg) em função da diminuição da espessura na região anelar superior

Podemos observar que após a redução da espessura da região anelar superior de 4,3 mm no modelo perfeito para 3,5 mm a variação da pressão crítica passa a ser linear, antes de atingirmos essa espessura o bulbo continuava a se formar na parte inferior, como visto no item 4.7.2. Verificamos que quando reduzimos a espessura da região anelar superior para 3,2 mm observamos que a pressão crítica é idêntica ao caso experimental.

6.2.2. Análise da pressão crítica para imperfeições locais assimétricas

Com o objetivo de avaliar a variação da pressão crítica em função de uma imperfeição local foram estudados 4 casos onde foram reduzidas progressivamente as espessuras destes locais. Na figura 6.6 podemos observar a posição de cada uma das imperfeições geradas. Neste estudo foi utilizado o modelo com elementos de casca S4R, 1617 elementos e 10% de alongamento do comprimento inicial e funcional de energia Ogden 1.

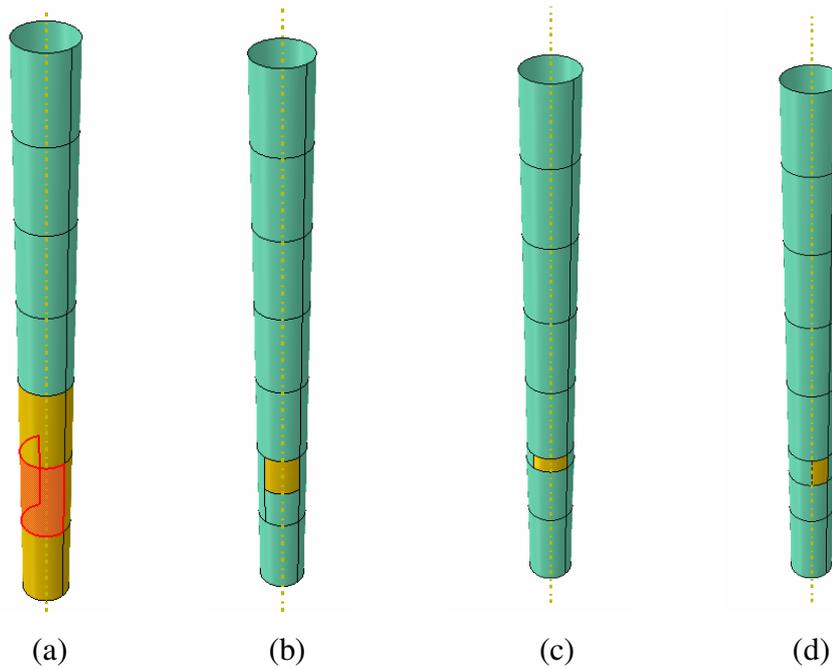


Figura 6.6 – Posição das imperfeições para os casos estudados (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3, (d) caso 4; figuras fora de escala

Na figura 6.7 podemos observar a variação da pressão crítica para cada um dos casos em análise em função da diminuição da espessura no local da imperfeição indicados na figura 6.6.

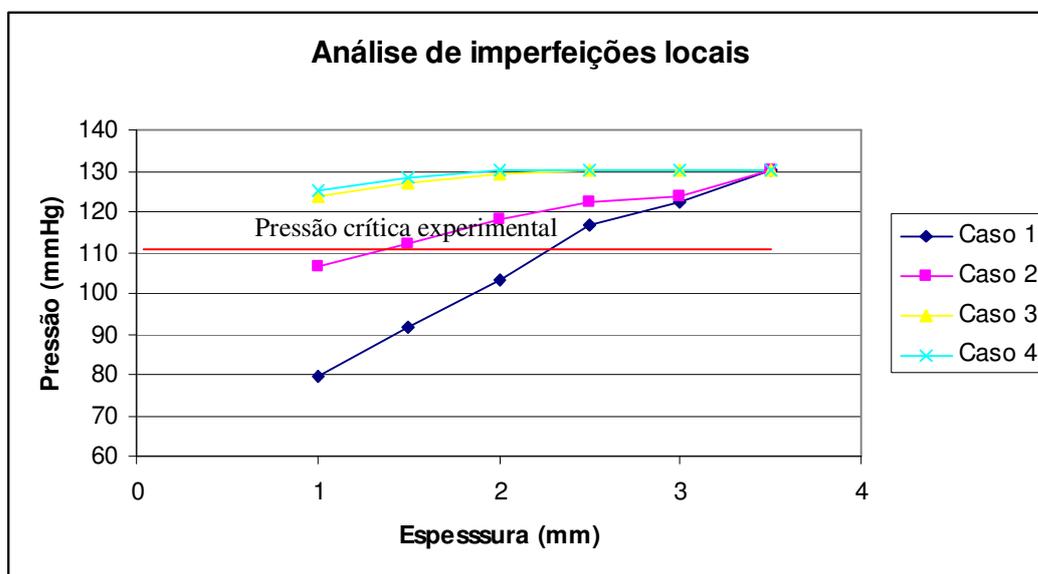


Figura 6.7 – Variação da pressão crítica em função de imperfeições locais

Podemos observar pelo gráfico da figura 6.7 que à medida que diminuimos a espessura do local da imperfeição a pressão crítica diminui. Observamos

também que à medida que o tamanho da imperfeição diminui a variação da pressão em relação com o caso sem imperfeição é quase desprezível. Porém mesmo quando a imperfeição é pequena, esta é suficiente para fazer a estrutura flambar. Nos casos 1 e 2 quando a espessura é reduzida para 2,3 mm e 1,5 mm respectivamente o resultado da pressão crítica é idêntico ao experimental. Nos casos 3 e 4 à redução da espessura não foi suficiente para chegarmos ao valor da pressão crítica experimental.

6.2.3. Análise dos elementos sólidos com excentricidade

Foram realizados estudos utilizando-se elementos sólidos com funcionais de energia Ogden 1 e Neo Hooke. Foi criada uma excentricidade crescente na parte internas do tubo de silicone representativo da aorta, fazendo desta forma que um lado se tornasse mais espesso e outro mais delgado. Este é o mesmo tipo de excentricidade que foi gerada na análise experimental e responsável pela diminuição da pressão crítica em relação ao modelo perfeito como visto na figura 3.34.

Na figura 6.8 podemos observar a variação da pressão crítica em função do nível de alongamento aplicado e da excentricidade estudada para o funcional de energia Ogden 1.

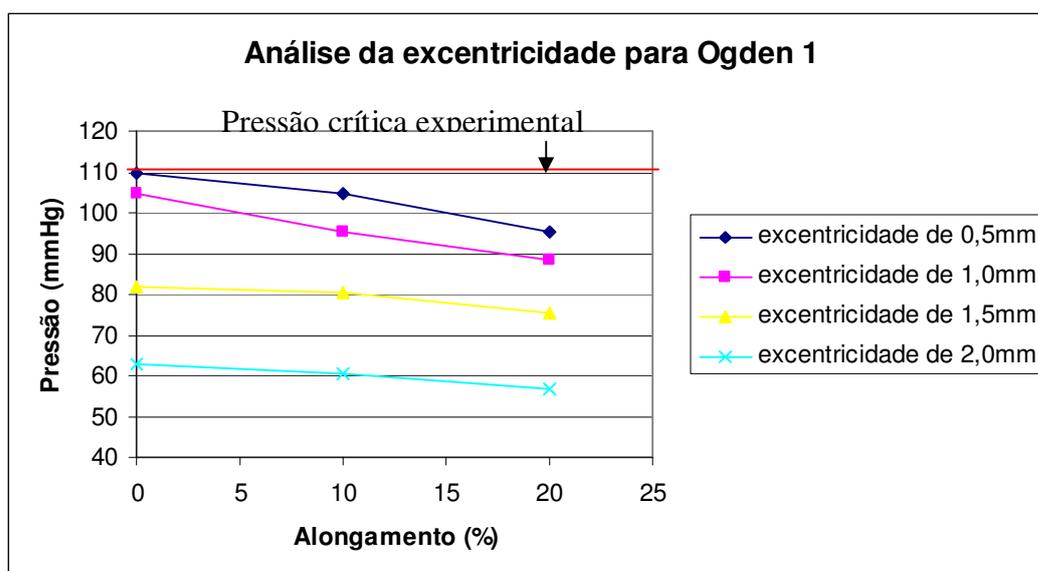


Figura 6.8 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade para Ogden1

Para os casos de excentricidade estudados todos os valores de pressão crítica estão abaixo do valor da pressão crítica experimental para o caso de 10% de alongamento (110,90 mmHg).

Na figura 6.9 podemos observar a variação da pressão crítica em função do nível de alongamento aplicado e da excentricidade estudada para o funcional de energia Neo Hooke.

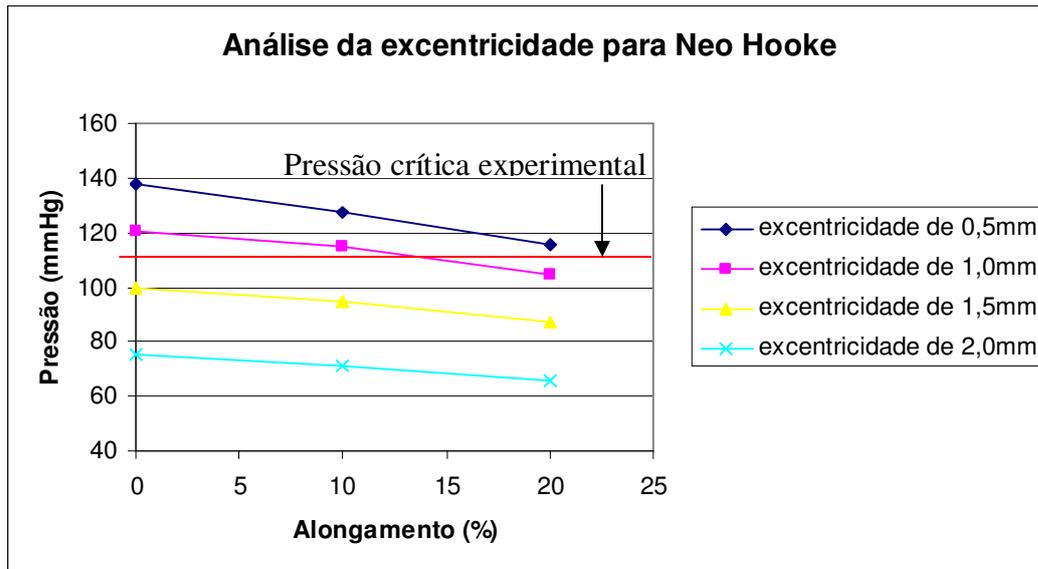


Figura 6.9 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade para Neo Hooke

Podemos observar uma redução da pressão crítica tanto em função do aumento da excentricidade quanto do alongamento. Podemos observar também que o efeito do alongamento diminui à medida que se aumenta a excentricidade, tanto para o funcional de energia Ogden 1 quanto para o funcional de energia Neo Hooke.

Para o funcional de energia Neo Hooke verificamos que seria necessário uma excentricidade 1,2 para obtermos uma pressão crítica numérica idêntica a experimental para um alongamento de 10%.

6.2.4.

Análise dos elementos sólidos com excentricidade e variação da constante elástica

Com o objetivo de analisar a variação da pressão crítica em função da perda das propriedades elásticas, fato que ocorre rapidamente nos portadores da Síndrome de Marfan, foi realizado um estudo utilizando-se a variação da excentricidade adotada anteriormente e a constante elástica do funcional de energia Neo Hooke foi reduzida de seu valor original 54,83 kPa para 10 kPa em intervalos constantes.

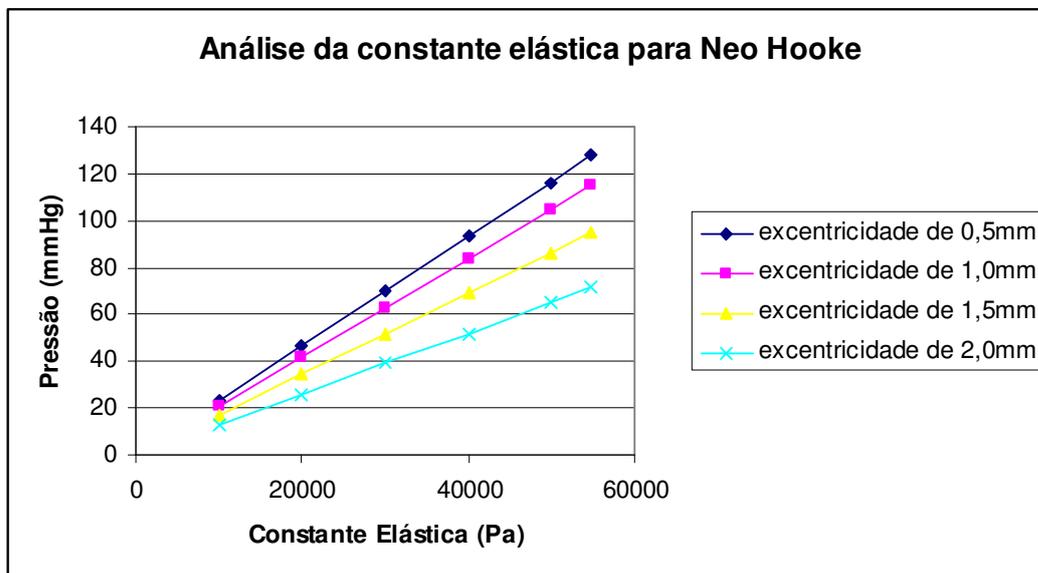


Figura 6.10 – Variação da pressão crítica em função da redução da constante elástica

Podemos observar que à medida que a constante elástica diminui o valor da pressão crítica decresce de forma linear. Verificamos também que quando utilizamos a constante elástica com valor de 10 kPa a pressão crítica é muito baixa.

6.3.

Comparação entre os resultados da pressão crítica obtidas numérica e experimentalmente

A seguir são apresentados nas figuras 6.11, 6.12 e 6.13 à comparação dos resultados das pressões críticas experimentais e numéricas.

Pela análise do gráfico da figura 6.1 anterior podemos observar que a modelagem numérica que mais se aproximou dos resultados experimentais foi a que utilizou o elemento sólido com o funcional de energia Ogden 1. Foi também a que mais se assemelhou com a forma obtida experimentalmente. Como podemos observar nas figuras 6.11, 6.12 e 6.13.

Nas figuras abaixo são apresentadas as configurações deformadas (a) sem imperfeição, (b) experimental, (c) com excentricidade de 0,5 mm, (d) com excentricidade de 1,0 mm, (e) com excentricidade de 1,5 mm e (f) com excentricidade de 2,0 mm, com suas respectivas pressões críticas.

A figura 6.11 apresenta o caso sem alongamento.

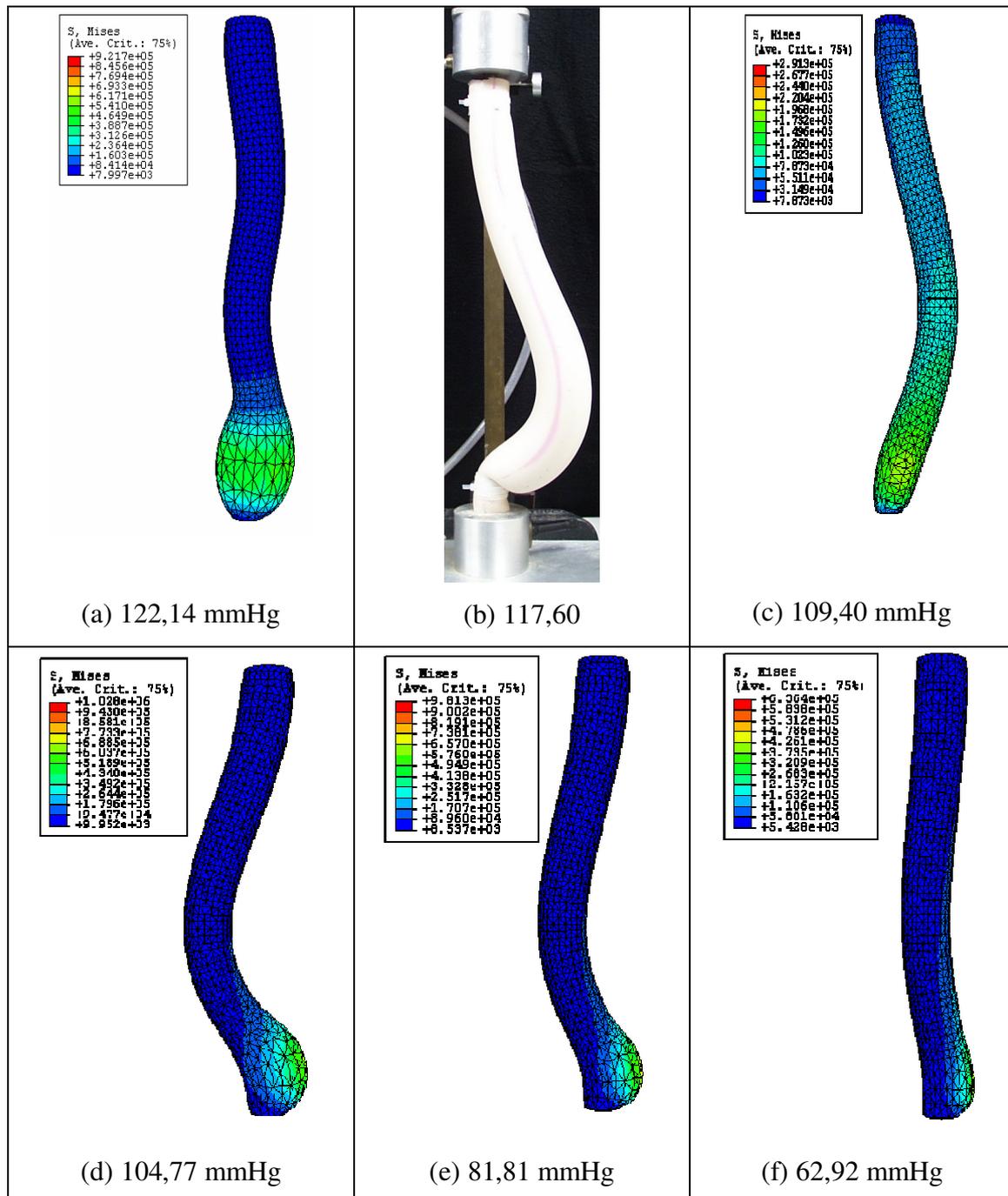


Figura 6.11 – Configurações deformadas (a) sem imperfeição (b) experimental, (c), (d), (e) e (f) com excentricidades de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm respectivamente, sem alongamento

Podemos observar na figura 6.11 que à configuração deformada com excentricidade de 1,0 mm (d) é muito semelhante à configuração deformada experimental (b).

A figura 6.12 apresenta o caso com alongamento de 10%.

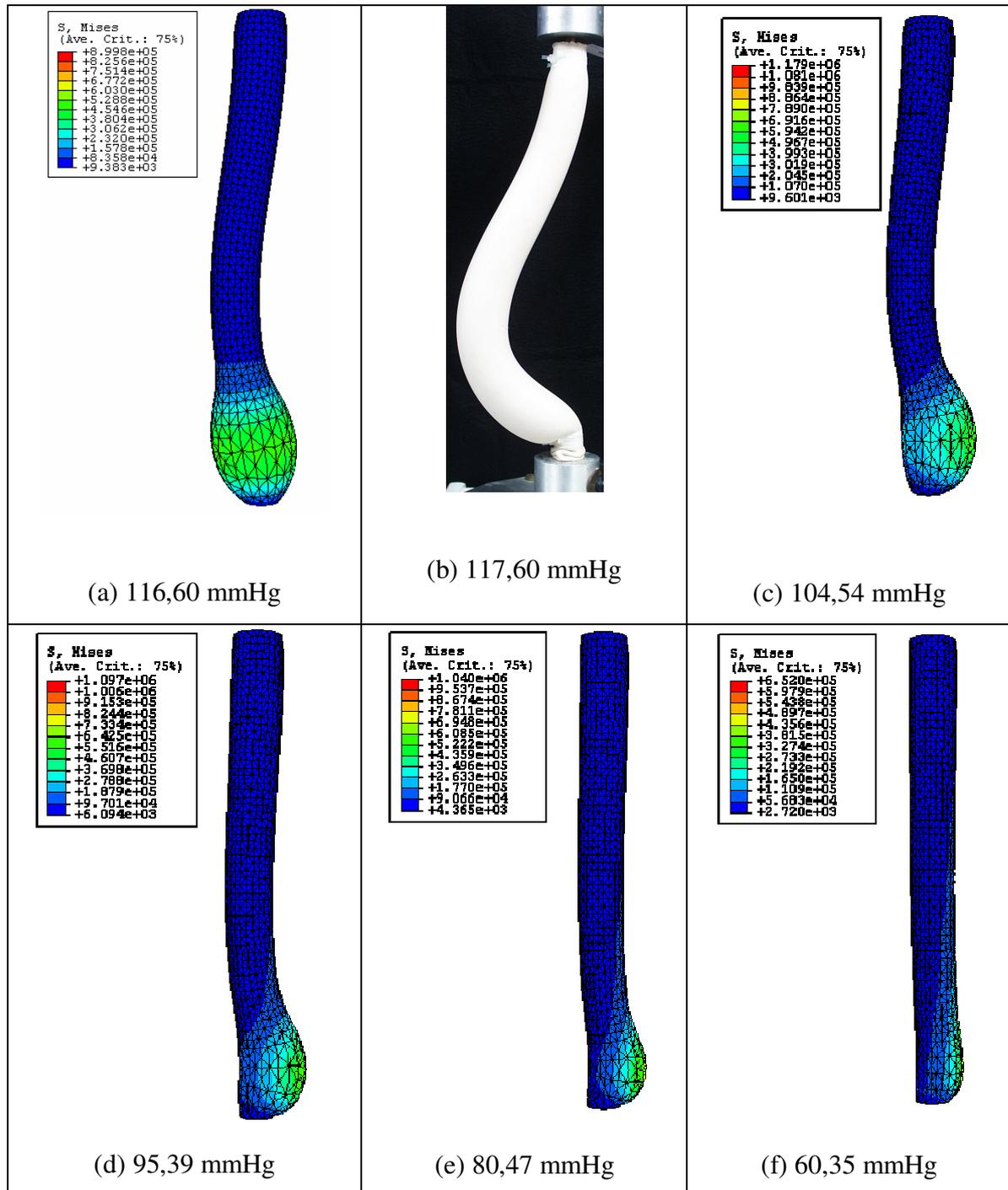


Figura 6.12 – Configurações deformadas (a) sem imperfeição (b) experimental, (c), (d), (e) e (f) com excentricidades de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm respectivamente, com alongamento de 10%.

A figura 6.13 apresenta o caso com alongamento de 20%.

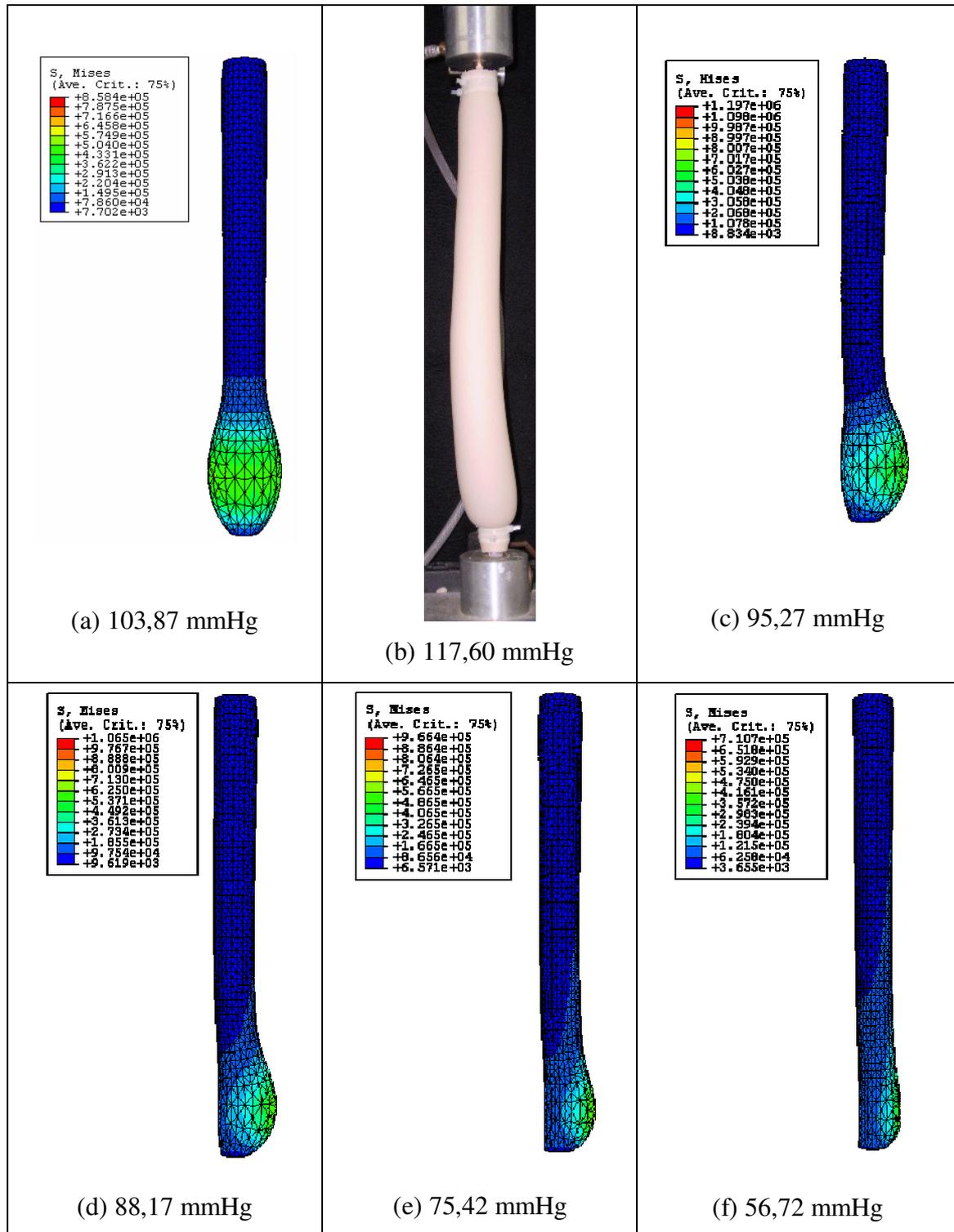


Figura 6.13 – Configurações deformadas (a) sem imperfeição (b) experimental, (c), (d), (e) e (f) com excentricidades de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm respectivamente, com alongamento de 20%.

Utilizando-se o funcional de energia Ogden 1, tanto com o elemento finito de sólido quanto com o elemento finito de casca obteve-se pressão crítica mais próxima da análise experimental. Podemos observar também na tabela 5.2 que a diferença percentual entre o ensaio numérico com o elemento sólido e funcional de energia Ogden 1 apresentou uma diferença média de 5,84% em relação ao ensaio experimental, e que o ensaio numérico com elemento de casca e funcional de energia Ogden 1 apresentou uma diferença média de 16,59% em relação ao ensaio experimental.

Com funcional de energia Neo Hookeano obtivemos uma variação média de 30,05% entre a análise numérica e o resultado do ensaio experimental. Quando utilizamos o elemento de casca e o funcional de energia Neo Hookeano, obtivemos uma variação média de 36,68% entre a análise numérica e o ensaio experimental.

6.4

Avaliação da pressão para o gráfico tensão deformação proposto por Sacks

Foi realizado estudo com os funcionais de energia Ogden 1 e Yeoh utilizando-se os dados do gráfico de tensão-deformação proposto por Sacks (2006) para a aorta. Com as constantes elásticas geradas para estes funcionais de energia e descritas nas tabelas 5.1 e 5.2 e fazendo a avaliação para os níveis de tração estudados.

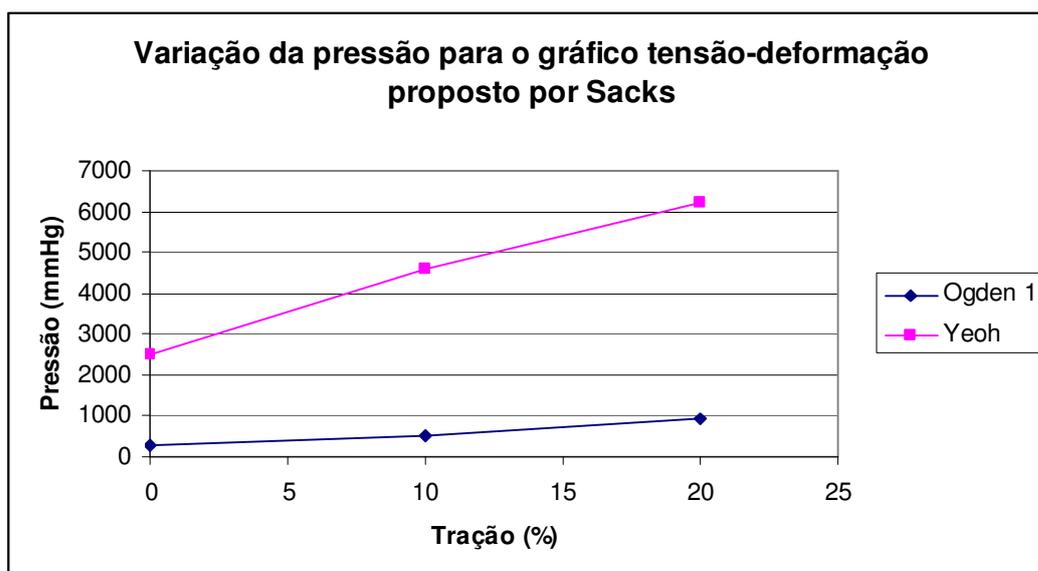


Figura 6.14 – Variação da pressão crítica através dos dados propostos por Sacks

Como podemos observar no gráfico da figura 6.14 o aumento da tração faz com que a pressão crítica aumente, o contrário do que ocorreu em todas as análises anteriores.

6.5. Estudo das equações constitutivas da artéria

De acordo com os resultados obtidos utilizando-se as equações constitutivas propostas por Delfino (1997) e por Sacks (2006), verificamos que as mesmas não se aplicam ao estudo da formação de aneurismas, pois os valores de pressão crítica encontrados são muito elevados para o corpo humano, devido ao valor das constantes elásticas adotadas para o tecido arterial saudável. Faz-se necessário um estudo das propriedades elásticas do tecido arterial no local onde forma-se o aneurisma, pois só a degradação dessas constantes justifica a formação dos mesmos com uma pressão compatível com o ser humano. Na geometria de Dorfmann (2010) da figura 5.17 observamos que para uma artéria de diâmetro inicial de 2,32 cm e espessura inicial de $T = 0,208$ cm, o bulbo do aneurisma com diâmetro final interno $R_i = 5,5$ cm, externo $R_e = 5,65$ cm e comprimento 6,7 cm (o seguimento inicial tinha 5,4 cm). Estes diâmetros e espessuras foram retiradas do artigo do mesmo autor.

$\lambda_1 = 1,2$, $\lambda_2 = 2,3$ e $\lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} = 0,36$ devido à incompressibilidade.

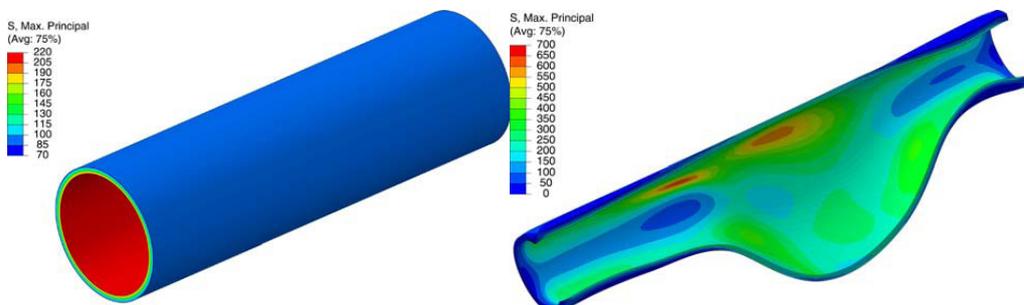


Figura 6.15 – Configuração indeformada e deformada proposta por A. Dorfmann para os aneurismas

Usando a equação de Delfino;

$$W = \frac{a}{b} \exp\left[\frac{b}{2}(I_1 - 3)\right] \quad (6.1)$$

Sendo I_1 o primeiro invariante de deformação definido como:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2} \quad (6.2)$$

e $a = 44,2KPa$ e $b = 16,7$.

Sabendo-se que:

$$\sigma_2 = \frac{a}{b} (\lambda_2^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}) \exp\left[\frac{b}{2}(I_1 - 3)\right] \quad (6.3)$$

e que do estudo do equilíbrio de vasos de pressão, a tensão na direção 2 é dada por:

$$\sigma_2 = \frac{pr}{t} \quad (6.4)$$

obtemos o par de parâmetros a e b da Equação de Delfino para diversas pressões internas necessárias, i.e., a pressões críticas que pudessem provocar a deformação da figura.

$$p = t \left[\frac{a}{b} (\lambda_2^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2}) \exp\left[\frac{b}{2}(I_1 - 3)\right] \right] / r \quad (6.5)$$

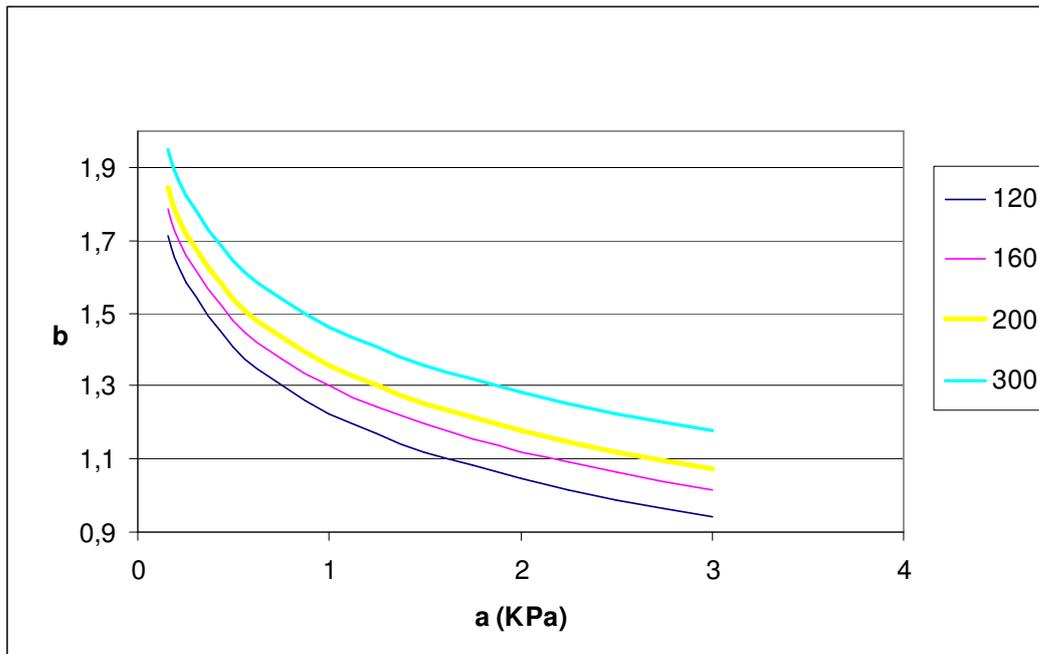


Figura 6.16 – Par de parâmetros a e b da Equação de Delfino para diversas pressões internas

Será, portanto necessária uma diminuição drástica em a de 44,2 kPa para um dígito e também de b de 25% a 30% para que haja uma deformação da ordem da figura.

Porém, como vimos no item 5.3.2b, caso haja imperfeição local um decréscimo de 43% na constante elástica, já ocasionaria um decréscimo de 73% na pressão crítica. Fazendo-nos acreditar que a formação de aneurismas deve-se a imperfeições geométricas locais e físicas (do material).

6.7. Trabalhos futuros

Os próximos trabalhos a serem realizados serão:

Análise das propriedades elásticas da aorta: Com o objetivo de obter dados mais confiáveis, deverá ser feita uma análise em parceria com alguma instituição que tenha liberação para este tipo de estudo, das propriedades elásticas da aorta. Gerando assim diferentes constantes elásticas para os diversos trechos da aorta,

pois Sokolis (2002) afirma que a aorta tornasse mais rígida a medida que se afasta do coração.

- **Modelo numérico com as constantes elásticas obtidas para Aorta no item anterior.**
- **Estudo para se obter digitalmente a geometria arterial:** com o objetivo de individualizar o estudo, deverá ser desenvolvida uma metodologia para se obter a geometria real da aorta de cada paciente e o método de se trabalhar com essa geometria em um programa de elementos finitos.
- **Inserir estudo de fluxo:** realizar o novamente os estudos anteriores com a inserção de fluxo na estrutura, para que o mesmo simule o fluxo sanguíneo do ser humano.
- **Estudo das constantes elásticas na região do aneurisma:** o aneurisma provoca uma mudança das propriedades elásticas do tecido arterial para que seja possível a formação do mesmo. Estas constantes devem ser pesquisadas para a futura utilização de modelos numéricos.