

## 4 Análise numérica

Para a investigação numérica foram consideradas a mesma geometria e as mesmas propriedades dos tubos cilíndricos de silicone dos ensaios experimentais.

A análise numérica foi realizada por meio do programa de elementos finitos ABAQUS (6.8.1), no qual foram utilizados elementos de casca e elementos sólidos.

Na análise numérica, também serão realizados estudos de imperfeições impostas à estrutura original.

### 4.1 Descrição da análise numérica

A geometria utilizada na análise experimental foi reproduzida computacionalmente. Após esta etapa inicial seguiram-se as etapas descritas abaixo:

- Atribuição das propriedades elásticas do silicone ao modelo numérico por meio da escolha de um funcional de energia;
- Escolha do tipo de elemento a ser empregado;
- Estudo de convergência dos resultados em função da malha selecionada;
- Na análise da tensão, foi adotada a tensão principal máxima no instante da pressão crítica; a tensão mantida nas imagens das configurações deformadas é a tensão na configuração deformada final, não sendo esta a mesma da pressão crítica; para não causar confusão foi mantida nestas imagens a tensão de V. Mises.

Os carregamentos envolvidos na análise numérica são os mesmos envolvidos na análise experimental, e são descritos abaixo:

- Alongamento aplicado a geometria computacional, por meio de um deslocamento imposto;

- Aplicação da pressão hidrostática na parede do tubo (representação da ação do sangue humano);
- Aplicação da pressão por meio de incrementos crescentes, utilizando-se o método de Riks, onde podemos então avaliar o valor da pressão crítica (máxima pressão suportada pela estrutura em estudo).

## 4.2

### Formulação dos funcionais de energia

Com os dados dos ensaios de tensão-deformação dos corpos de prova de silicone realizados no Instituto Tecnológico (ITUC) foi possível caracterizar o silicone utilizado na análise experimental. Para a realização da análise numérica tornou-se necessário a escolha de um funcional de energia que reproduzisse os dados obtidos experimentalmente.

A formulação matemática dos funcionais de energia disponíveis na biblioteca do programa de elementos finitos ABAQUS, e que foram testadas para caracterizar o silicone estão descritas abaixo:

- Arruda-Boyce:

$$U = \mu \left\{ \frac{1}{2} (I_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2} (I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^4} (I_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_m^6} (I_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_m^8} (I_1^5 - 243) \right\} \quad (4.1)$$

Onde  $\mu$  e  $\lambda_m$  são parâmetros materiais dependentes da temperatura;  $I_1$  é o primeiro invariante de deformação, definido como:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (4.2)$$

- Mooney-Rivlin:

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (4.3)$$

Onde  $I_1$  e  $I_2$  são o primeiro e o segundo invariantes de deformação, respectivamente definidos como:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (4.4)$$

$$I_2 = \lambda_1^{(-2)} + \lambda_2^{(-2)} + \lambda_3^{(-2)} \quad (4.5)$$

$$I_3 = 1 \quad (4.6)$$

- Neo Hooke:

$$U = C_{10}(I_1 - 3) \quad (4.7)$$

- Ogden:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (4.8)$$

- Polinomial:

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (4.9)$$

- Polinomial reduzido:

$$U = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (4.10)$$

- Van der Waals:

$$U = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] - \frac{2}{3} a \left( \frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (4.11)$$

Onde:

$$\tilde{I} = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2 \quad (4.12)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}} \quad (4.13)$$

- Yeoh:

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (4.14)$$

### 4.3 Escolha do funcional de energia

Com os dados dos ensaios de tração realizados no ITUC fez-se uma aproximação, por meio de uma linha de tendência, para que pudéssemos caracterizar o silicone utilizado na análise experimental.

Na figura 4.1 podemos observar a reunião de todos os dados experimentais e a equação escolhida que descreve o comportamento do material estudado.

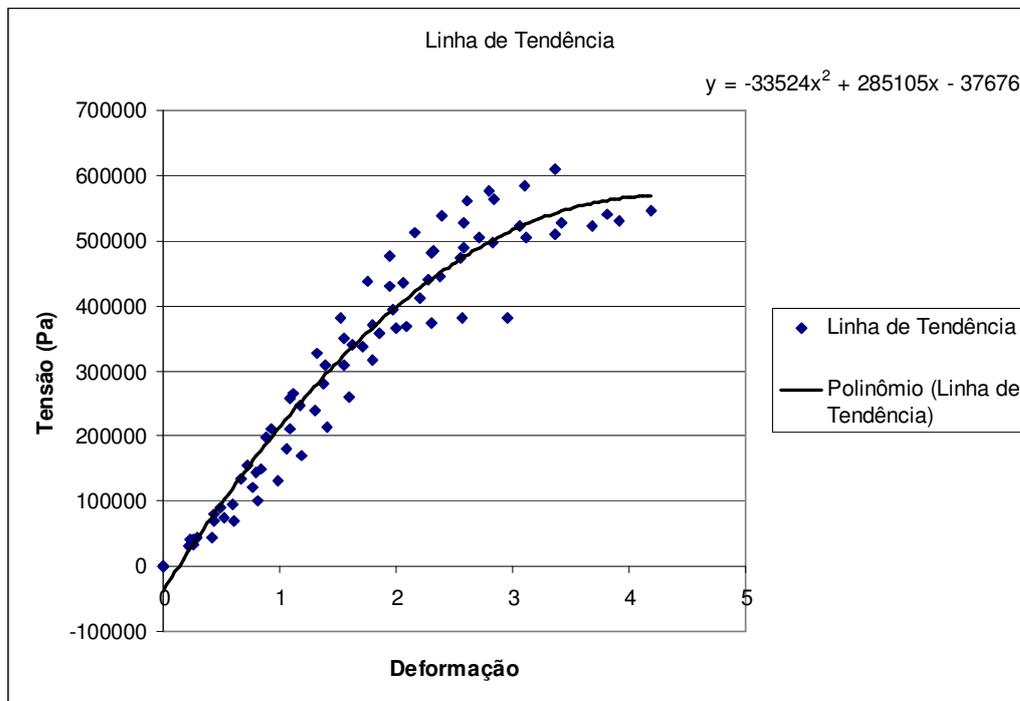


Figura 4.1 – Caracterização numérica do material estudado

A equação que descreve o comportamento elástico do silicone utilizado na análise experimental é descrita abaixo:

$$\sigma = -33524\varepsilon^2 + 285105\varepsilon - 37676$$

Para a caracterização do material em termos do funcional de energia foi adotado o intervalo para a deformação ( $\varepsilon$ ) variável entre 0,2 e 4.

Os dados de tensão-deformação obtidos através da linha de tendência foram utilizados na escolha do funcional de energia adotado para a seqüência da análise numérica.

A escolha do funcional de energia independe do tipo de elemento adotado para a análise e também do refinamento da malha.

Após selecionarmos o funcional de energia desejado o programa ABAQUS apresenta a aproximação tensão-deformação que o funcional de energia escolhido simula para os dados de entrada (experimentais) fornecidos.

Na figura 4.2 apresentamos as aproximações obtidas para o estudo dos diferentes casos de funcionais de energia.

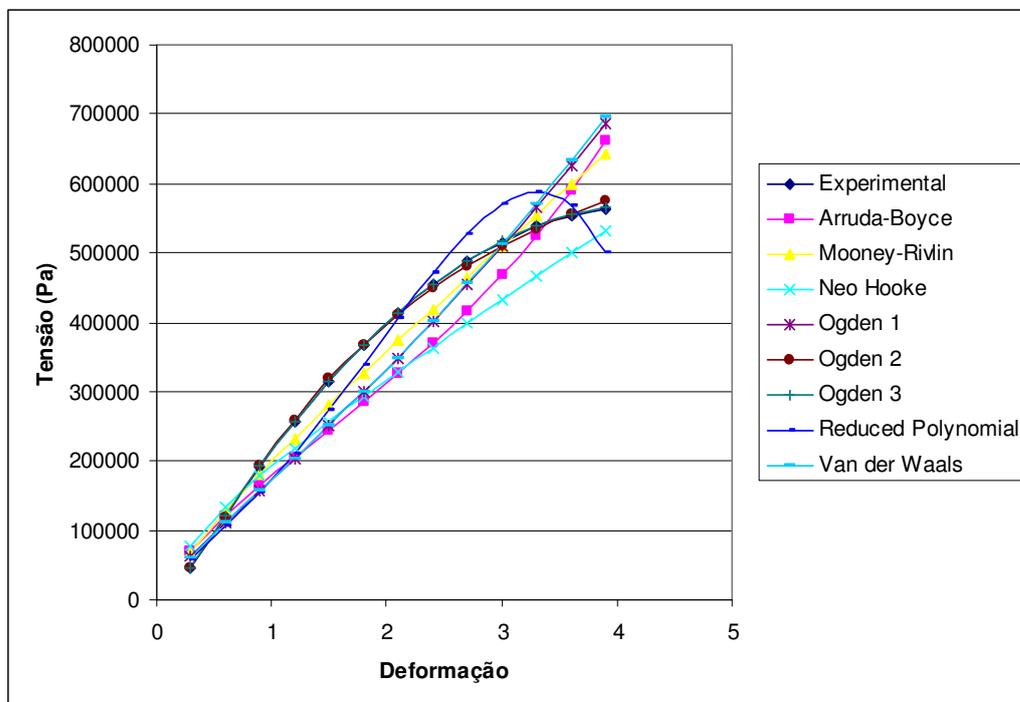


Figura 4.2 – Aproximação dos funcionais de energia

Verificamos que para os funcionais de energia Mooney-Rivlin, Ogden 2 e Ogden 3, Reduced Polynomial e Van der Waals, o material torna-se instável, apresentando deformações excessivamente grandes para estes funcionais de energia.

Na Figura 4.3 apresentamos a aproximação obtida para os funcionais de energia para os quais o material tornasse estável.

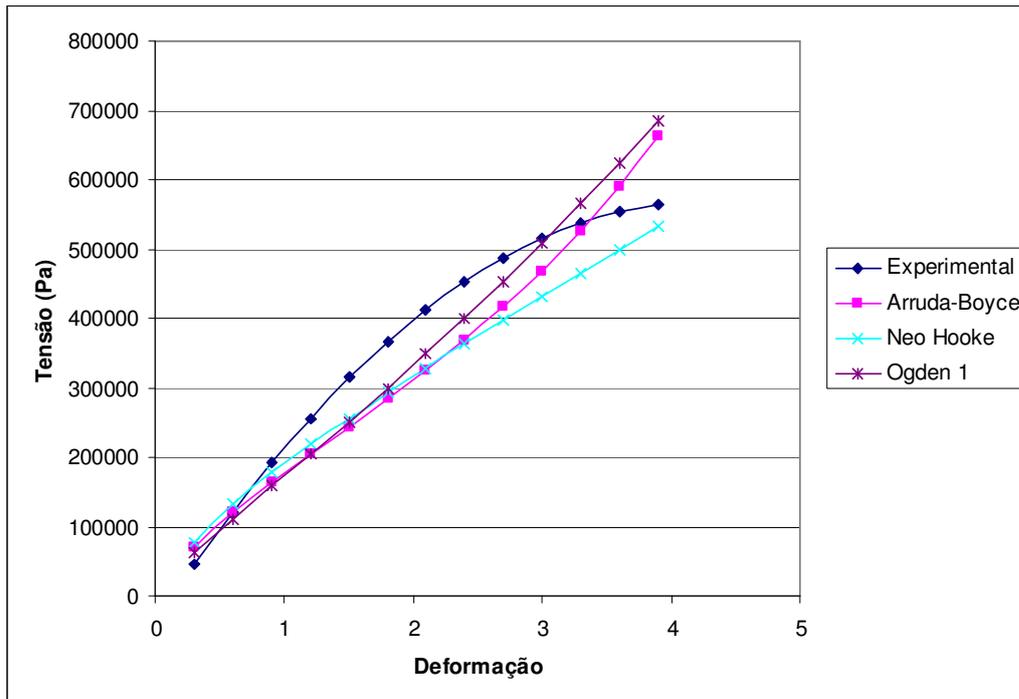


Figura 4.3 – Aproximação dos funcionais de energia estáveis

Dentre as possibilidades possíveis de análise (Arruda-Boyce, Neo Hooke e Ogden 1), optamos pela escolha do funcional de energia Ogden 1 e Neo Hooke.

Para o funcional de energia de Ogden 1, as constantes elásticas obtidas são apresentadas na tabela 4.1, com valores em kPa.

$\mu_1$ (kPa)	$\alpha_1$
84,43	2,446

Tabela 4.1 – Valores da constante elástica de Ogden 1

Para o funcional de energia Neo Hooke, as constantes elásticas obtidas são apresentadas na tabela 4.2, com valores em kPa.

$C_{10}$ (kPa)	$C_{01}$
54,83	0

Tabela 4.2 – Valores da constante elástica de Neo Hooke

Para o funcional de energia Arruda-Boyce, as constantes elásticas obtidas são apresentadas na tabela 4.3, com valores em kPa.

$\mu$ (kPa)	$\mu_0$	$\lambda_M$
96,34	99488,97	4,396

Tabela 4.3 – Valores da constante elástica de Arruda-Boyce

#### 4.4.

##### Definição da geometria

A geometria adotada na análise numérica reproduz a geometria adotada na análise experimental. E tem suas propriedades geométricas descritas abaixo:

- Comprimento inicial: 36 cm.
- Raio superior externo: 1,9 cm.
- Raio superior interno: 1,4 cm.
- Raio inferior externo: 1,46 cm.
- Raio inferior interno: 1,18 cm.

Para a análise numérica foram adotados dois tipos de elementos. O elemento de casca e o elemento de sólido.

##### 4.4.1.

##### Elemento de casca

O elemento de casca adotado para a realização da análise numérica foi o S4R. Abaixo podemos observar a descrição do elemento:

S – Shell (casca)

4 – Quadrilateral (presença de 4 nós por elemento)

R – Reduced (integração reduzida)

O Abaqus não permite variação de espessura ao longo do seu comprimento para elementos de casca, e como a espessura é variável ao longo do comprimento do tubo de silicone (representativo da aorta humana) fez-se necessário a adoção de uma pequena simplificação. O tubo de silicone foi dividido em vários segmentos

ao longo de seu comprimento, e para cada trecho foi adotado a valor da espessura média correspondente.

Na figura 4.4 podemos observar esquematicamente como ocorre a variação da espessura ao longo do comprimento do tubo de silicone para o elemento de casca.

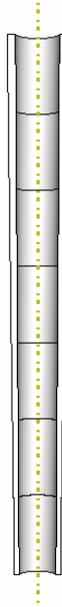


Figura 4.4 – Representação esquemática da variação da espessura ao longo do comprimento para o elemento de casca

#### **4.4.2. Elemento de sólido**

O elemento de sólido adotado para a realização da análise numérica foi o C3D10. Abaixo podemos observar a descrição do elemento:

C – Solid (sólido)

3D – Three-Dimensional (tridimensional)

10 – 10-node (10 nós)

Com o elemento sólido é possível a construção da geometria interna e externa. Por meio de uma superposição da geometria interna e externa e recortando-se a geometria interna da externa simulamos com exatidão a geometria experimental.

Na figura 4.5 podemos observar esquematicamente como ocorre a variação da espessura ao longo do comprimento do tubo de silicone para o elemento de sólido.

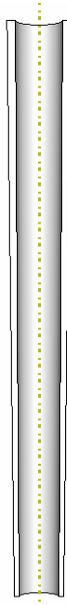


Figura 4.5 – Representação esquemática da variação da espessura ao longo do comprimento para o elemento sólido

#### **4.5. Análise de convergência**

Após a definição do funcional de energia a ser empregado na análise numérica, fez-se necessário um estudo de convergência da malha a ser empregada em cada tipo de análise.

##### **4.5.1. Análise de convergência de elemento de casca**

Adotando-se a geometria construída com elementos de casca e mantendo-se o tubo sem ser alongado, foram realizadas sucessivas análises aumentando-se gradativamente o refinamento da malha até o ponto em que se verificou a estabilização da pressão crítica.

Na figura 4.6 podemos observar a variação da pressão, até sua estabilização, em função do refinamento da malha proposta para o funcional de energia Ogden 1.

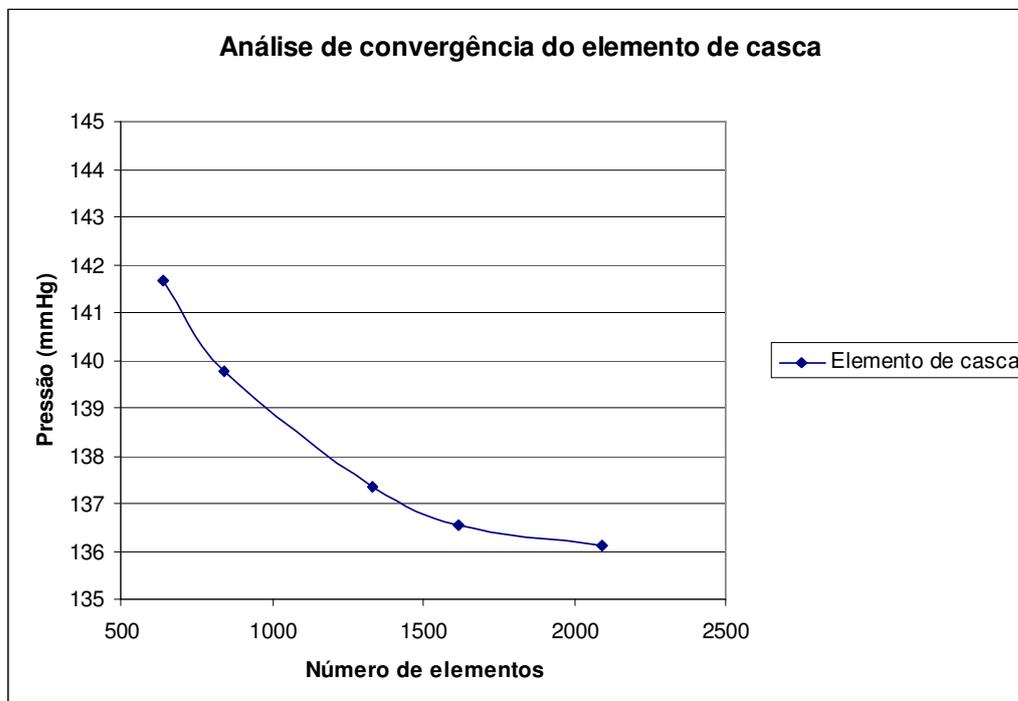


Figura 4.6 – Gráfico demonstrativo da análise de convergência do elemento de casca para o funcional Ogden 1

Foi adotada para a análise numérica a malha contendo 1617 elementos de casca para a análise numérica.

Na figura 4.7 apresentamos as malhas testadas na análise de convergência para o elemento de casca com seus respectivos números de elementos.

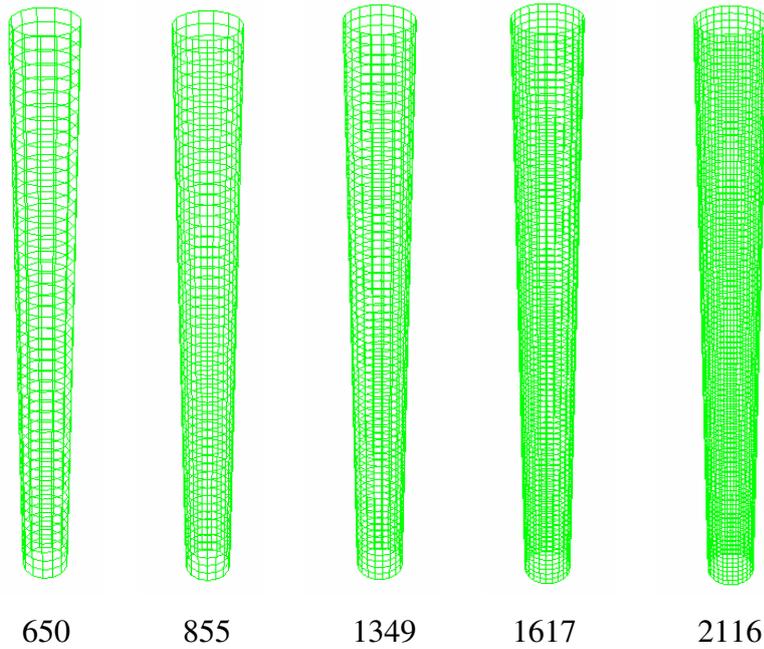


Figura 4.7 – Malhas testadas para o elemento de casca

Na figura 4.8 podemos observar a variação da pressão, até sua estabilização, em função do refinamento da malha proposta para o funcional de energia Neo Hooke.

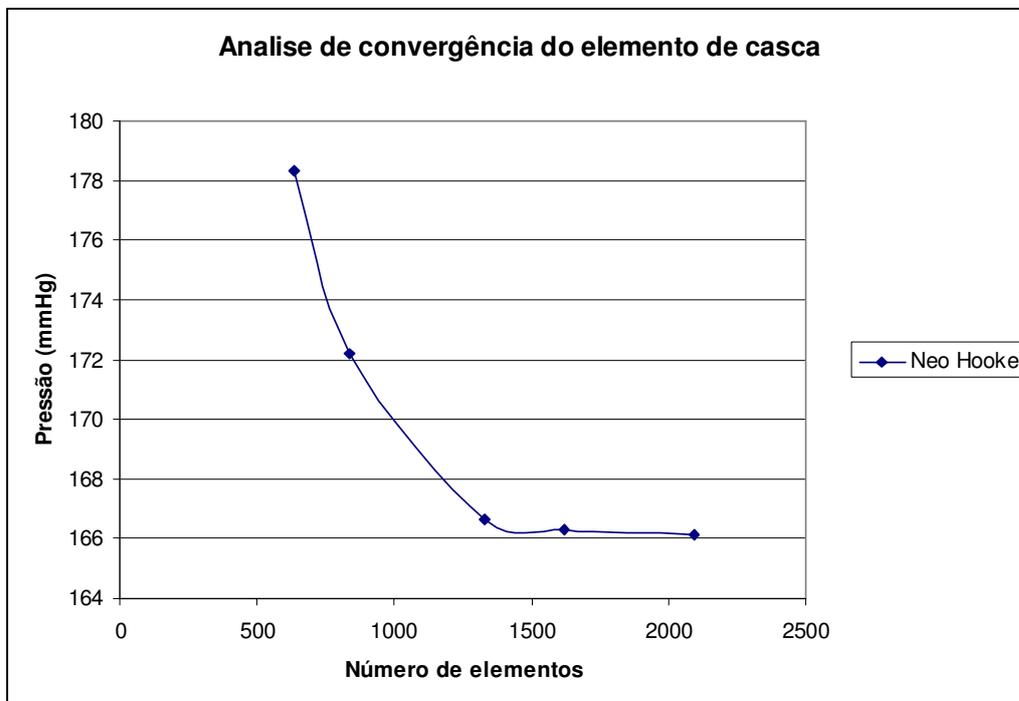


Figura 4.8 – Gráfico demonstrativo da análise de convergência do elemento de casca para o funcional Neo Hooke

Foi adotada a malha contendo 1330 elementos de casca para a análise numérica.

#### 4.5.2. Análise de convergência de elemento sólido

Adotando-se a geometria construída com elementos sólidos e mantendo-se o tubo com alongamento de 10% de seu comprimento inicial, foram realizadas sucessivas análises aumentando-se gradativamente o refinamento da malha até o ponto em que se verificou a estabilização da pressão crítica.

Na figura 4.9 podemos observar a variação da pressão, até sua estabilização, em função do refinamento da malha proposta para o funcional de energia Ogden 1.

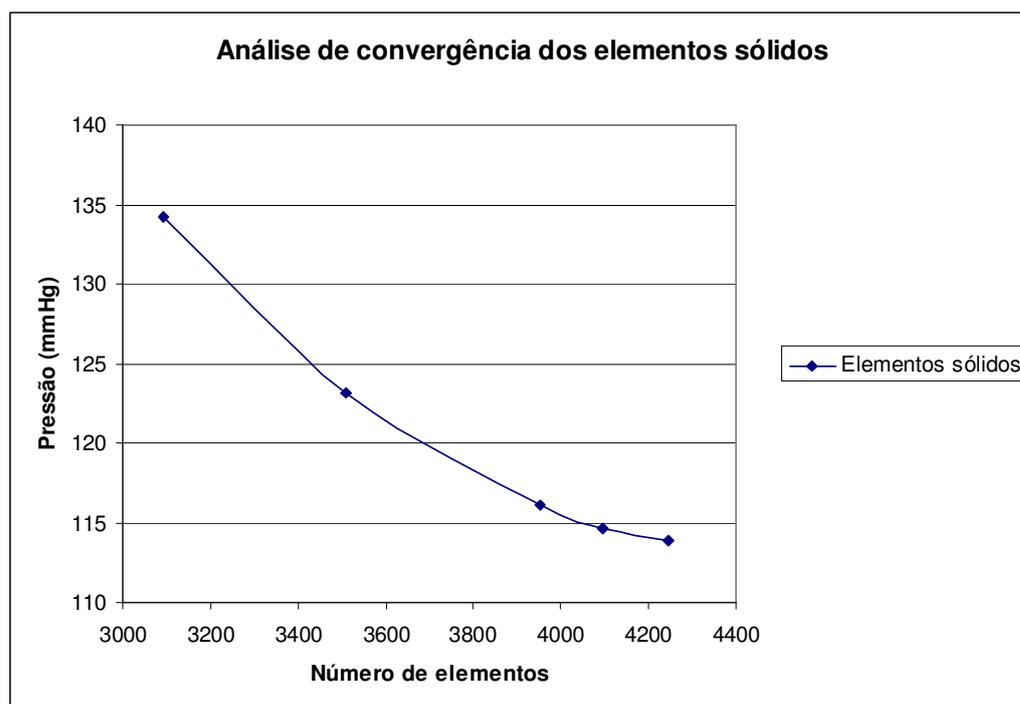


Figura 4.9 – Gráfico demonstrativo da análise de convergência dos elementos sólidos para o funcional Ogden 1

Foi adotada a malha contendo 4094 elementos de sólidos para a análise numérica.

Na figura 4.10 apresentamos as malhas testadas na análise de convergência para o elemento sólido com seus respectivos números de elementos.

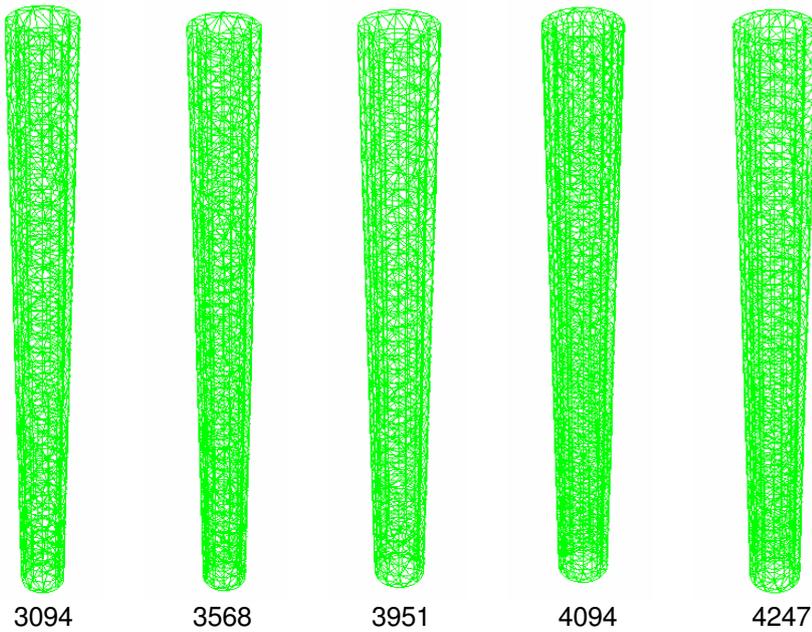


Figura 4.10 – Malhas testadas para o elemento sólido

Na figura 4.11 podemos observar a variação da pressão, até sua estabilização, em função do refinamento da malha proposta para o funcional de energia Neo Hooke.

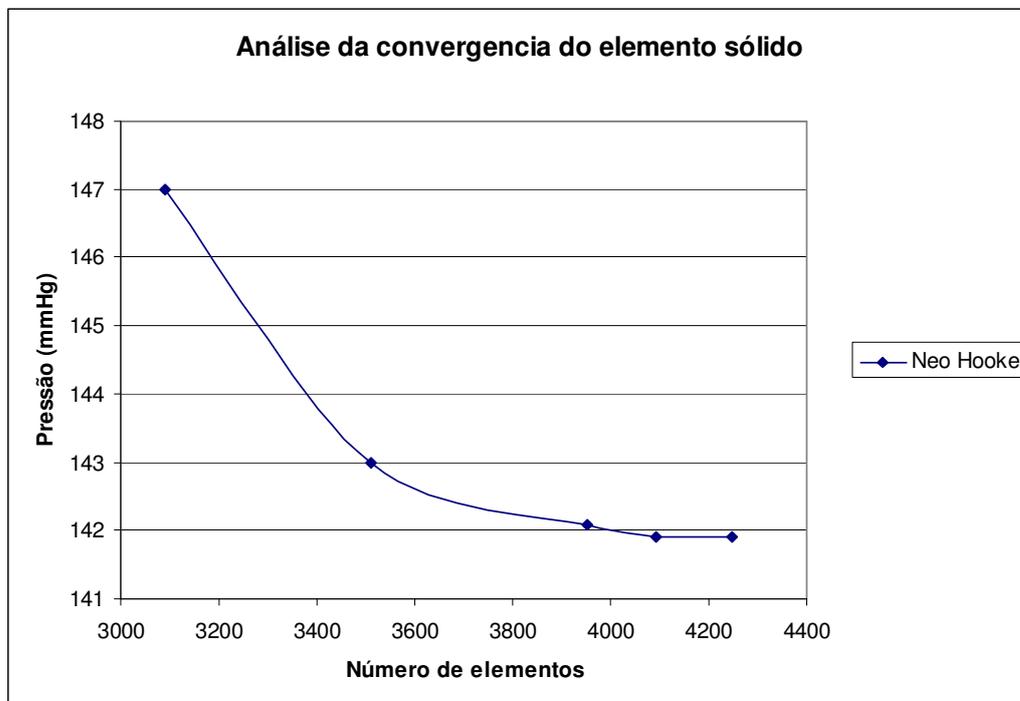


Figura 4.11 – Gráfico demonstrativo da análise de convergência dos elementos sólidos para o funcional Neo Hooke

Foi adotada a malha contendo 3951 elementos de sólidos para a análise numérica.

Apesar de termos verificado a convergência da pressão crítica para a análise anterior, quando foi realizada a análise da tensão máxima trativa principal, verificou-se que a mesma não havia convergido. Para tanto fez-se necessário um maior refinamento da malha de elementos sólidos. Para que se verificasse a convergência das tensões foi necessário refinarmos a malha até que a mesma apresentasse o valor de 11019 elementos.

Na figura 4.12 podemos observar a malha contendo 11019 elementos utilizados na análise da estrutura quando constituída de elementos sólidos.

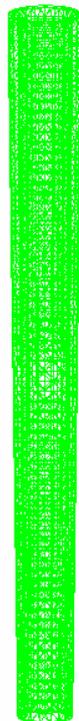


Figura 4.12 – Malha adotada para a análise com elementos sólidos

Como podemos observar na figura anterior, o excesso de elementos inviabiliza uma boa visualização da malha utilizada.

#### **4.6. Análise da pressão crítica**

Após as etapas de escolhas dos elementos a serem adotados, do funcional de energia e da análise de convergência, temos em mãos os elementos necessários

para realizarmos as investigações numéricas da variação da pressão em função do nível de alongamento aplicado ao tubo de silicone para assim compararmos os resultados numéricos e experimentais. Poderemos também dar início a investigações numéricas envolvendo imperfeições iniciais e também a adoção de funcionais de energias propostos por outros pesquisadores.

A análise numérica da pressão crítica será subdividida em três seções a saber:

- Análise da pressão crítica utilizando-se elementos de casca;
- Análise da pressão crítica utilizando-se elementos sólidos;
- Análise da pressão crítica com introdução de imperfeições.

#### 4.6.1.

#### Análise da pressão crítica com elementos de casca e funcional de energia Ogden 1

##### 4.6.1.1.

##### Sem alongamento

Para a análise do tubo de silicone com elementos de casca e sem alongamento a pressão crítica encontrada foi de 136,56 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 275,9 kPa.

Na figura 4.13 podemos observar as configurações indeformada e deformada sem alongamento.

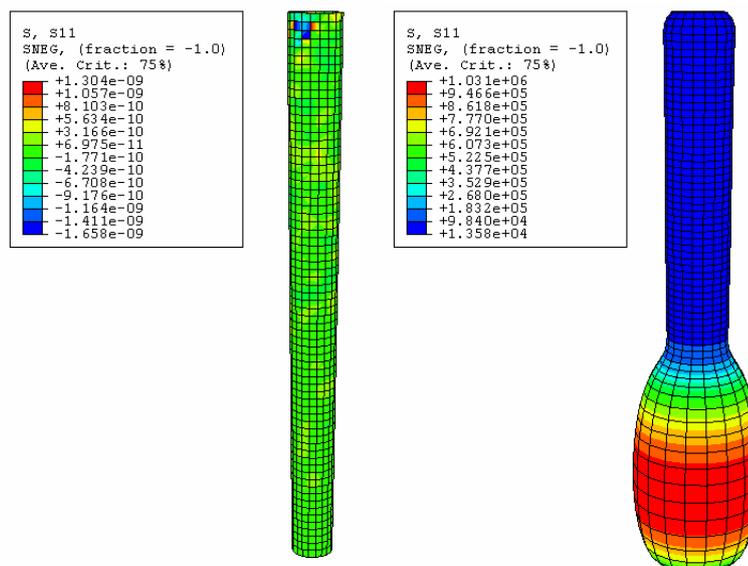


Figura 4.13 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone sem alongamento

#### 4.6.1.2. Alongamento de 10%

Para a análise do tubo de silicone com elementos de casca e alongamento de 10% de seu comprimento inicial a pressão crítica encontrada foi de 130,33 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 302,4 kPa.

Na figura 4.14 podemos observar as configurações indeformada e deformada para alongamento de 10%.

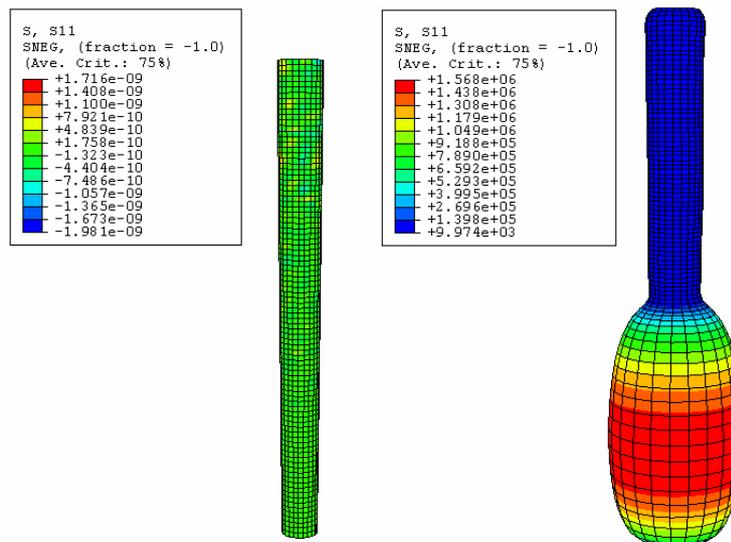


Figura 4.14 – Configuração indeformação e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 10%

#### 4.6.1.3. Alongamento de 20%

Para a análise do tubo de silicone com elementos de casca e alongamento de 20% de seu comprimento inicial a pressão crítica encontrada foi de 111,14 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 440,6 kPa.

Na figura 4.15 podemos observar as configurações indeformada e deformada para alongamento de 20%.

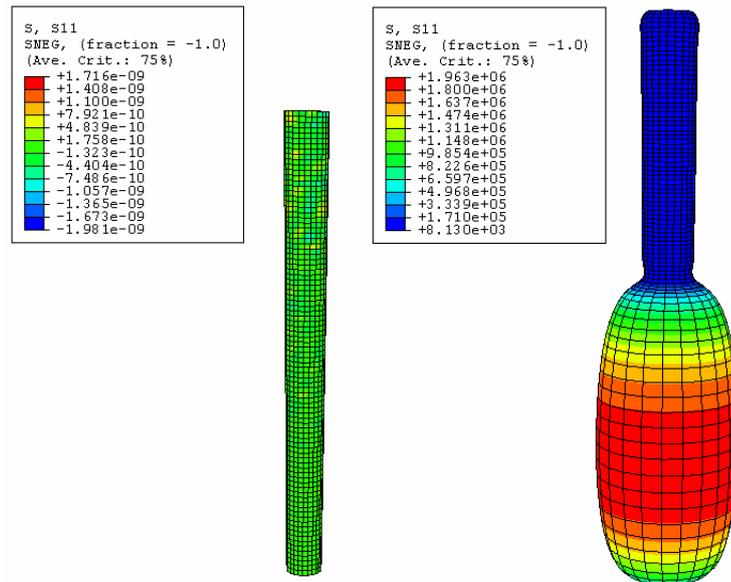


Figura 4.15 – Configuração indeformação e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 20%

#### 4.6.1.4. Comparação dos elementos de casca

Pelos resultados acima podemos observar que como no ensaio experimental o valor da pressão crítica diminui com o aumento do alongamento aplicado ao tubo de silicone, a figura 4.16 mostra essa variação.

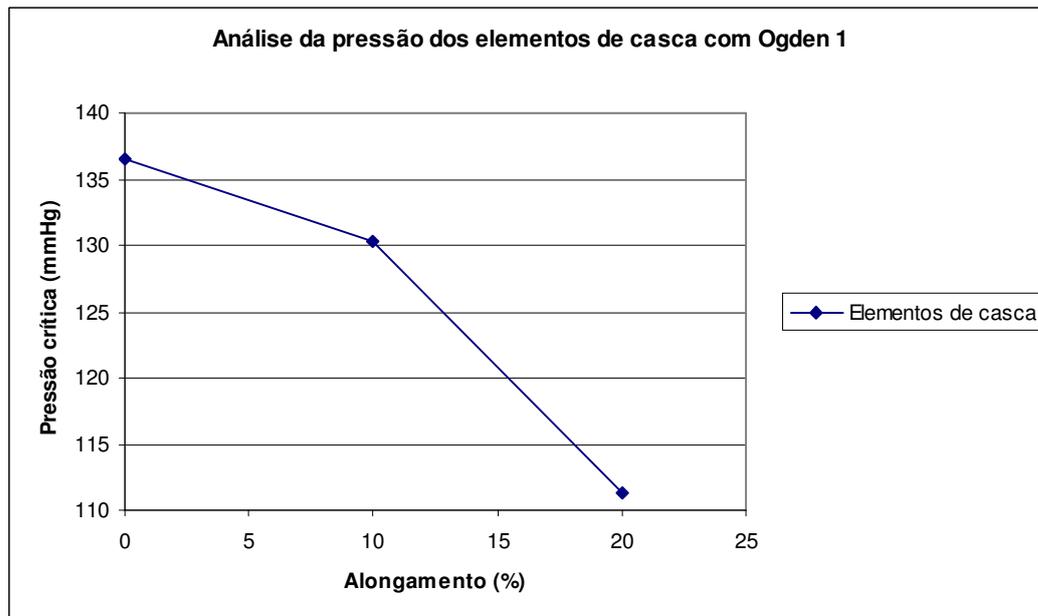


Figura 4.16 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)

Na figura 4.17 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal atuante na estrutura, para elementos de casca, no instante em que se verifica a pressão crítica.

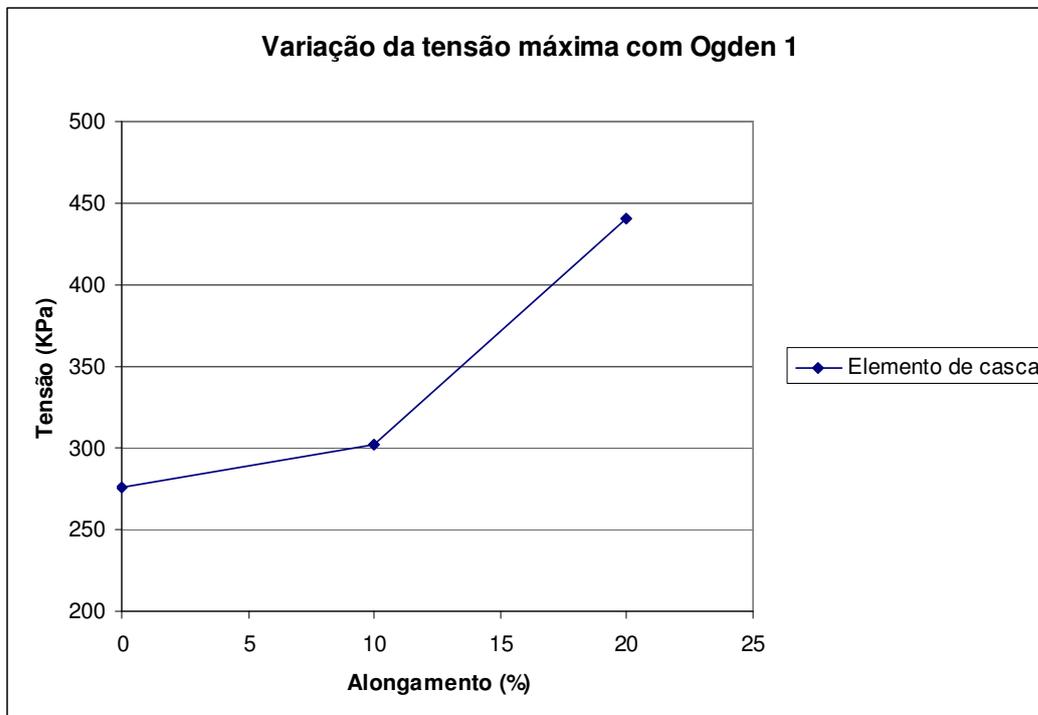


Figura 4.17 – Variação da tensão máxima trativa principal para o elemento de casca

#### 4.6.2.

#### **Análise da pressão crítica com elementos de casca e funcional de energia Neo Hooke**

##### 4.6.2.1.

##### **Sem alongamento**

Para a análise do tubo de silicone com elementos de casca e sem alongamento a pressão crítica encontrada foi de 166,66 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 255,3 kPa.

Na figura 4.18 podemos observar as configurações indeformada e deformada sem alongamento.

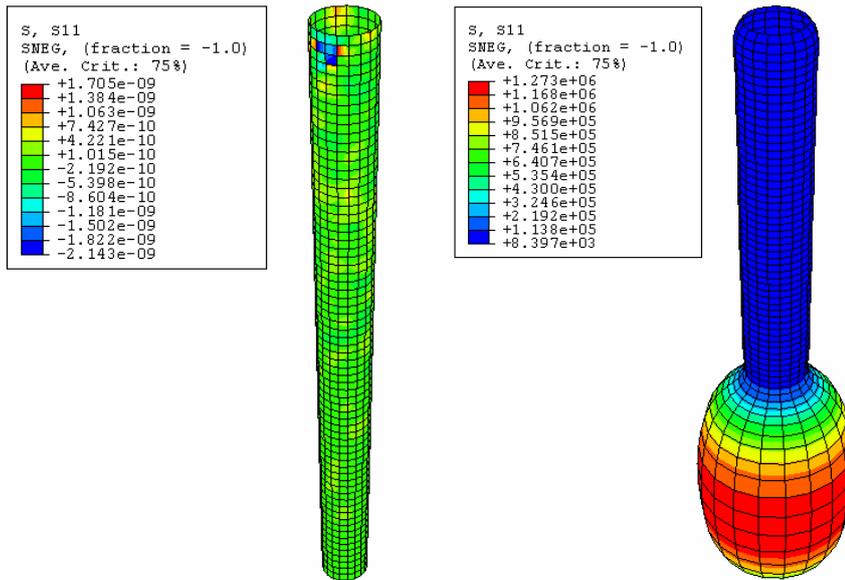


Figura 4.18 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone sem alongamento

#### 4.6.2.2. Alongamento de 10%

Para a análise do tubo de silicone com elementos de casca e alongamento de 10% de seu comprimento inicial a pressão crítica encontrada foi de 148,41 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 355,1 kPa.

Na figura 4.19 podemos observar as configurações indeformada e deformada para alongamento de 10%.

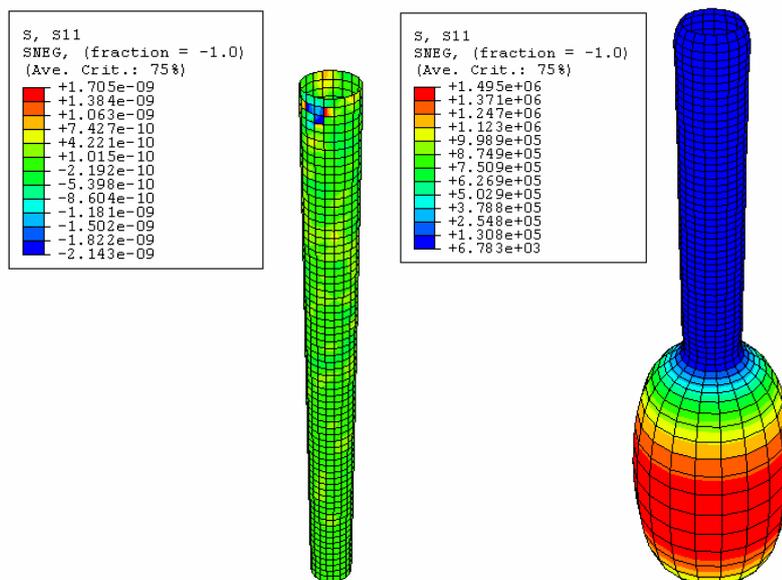


Figura 4.19 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 10%

### 4.6.2.3. Alongamento de 20%

Para a análise do tubo de silicone com elementos de casca e alongamento de 20% de seu comprimento inicial a pressão crítica encontrada foi de 134,48 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima tratativa principal foi de 380,90 kPa.

Na figura 4.20 podemos observar as configurações indeformada e deformada para alongamento de 20%.

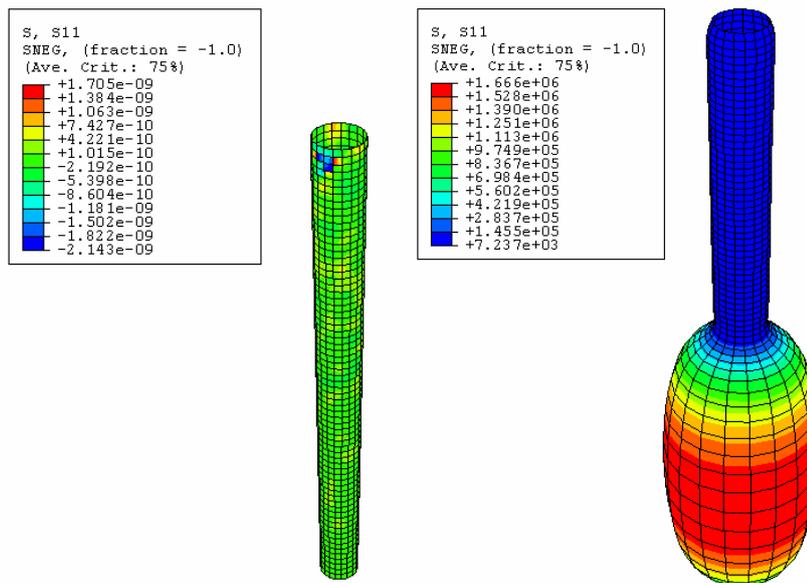


Figura 4.20 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 20%

### 4.6.2.4. Comparação dos elementos de casca

Pelos resultados acima podemos observar que como no ensaio experimental o valor da pressão crítica diminui com o aumento do alongamento aplicado ao tubo de silicone, a figura 4.21 mostra essa variação.

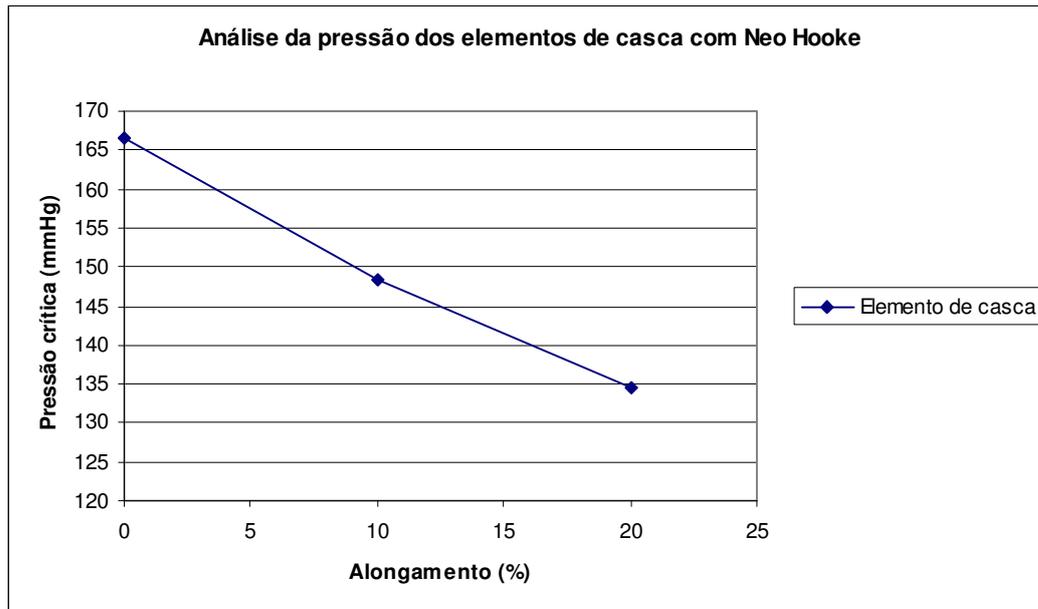


Figura 4.21 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)

Na figura 4.22 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal atuante na estrutura, para elementos de casca, no instante em que se verifica a pressão crítica.

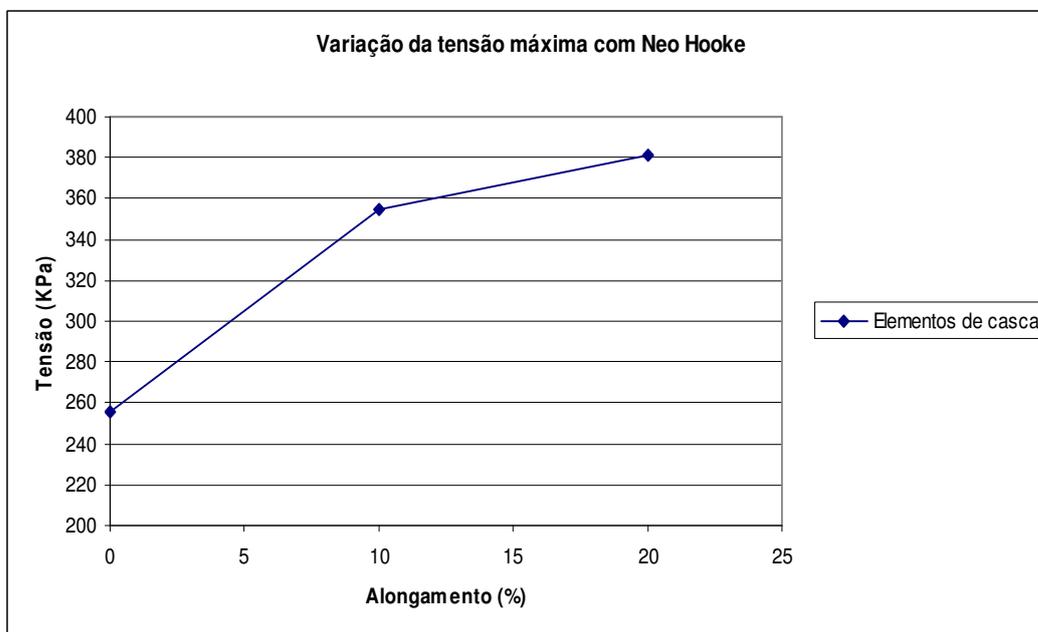


Figura 4.22 – Variação da tensão máxima trativa principal para o elemento de casca

### 4.6.3.

#### Análise da pressão crítica com elementos sólidos e funcional de energia Ogden 1

##### 4.6.3.1.

##### Sem alongamento

Para a análise do tubo de silicone com elementos sólidos e sem alongamento a pressão crítica encontrada foi de 122,14 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 312,4 kPa.

Na figura 4.23 podemos observar as configurações indeformada e deformada sem alongamento.

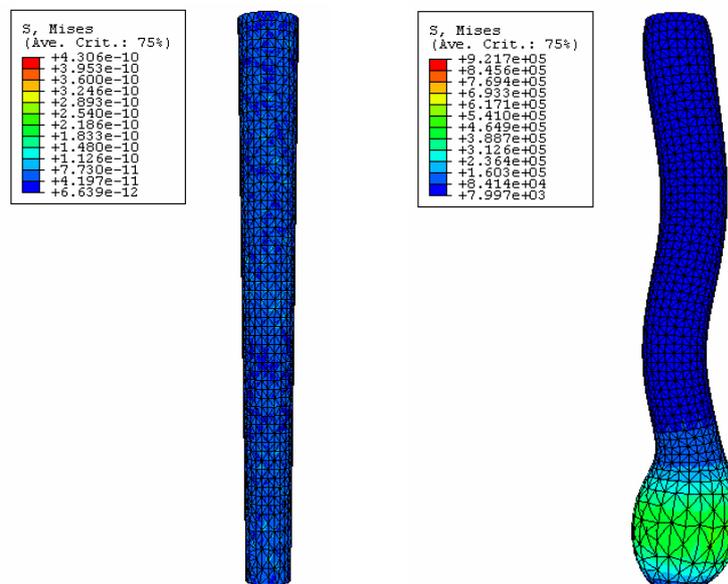


Figura 4.23 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone sem alongamento

##### 4.6.3.2.

##### Alongamento de 10%

Para a análise do tubo de silicone com elementos sólidos e alongamento de 10% de seu comprimento inicial a pressão crítica encontrada foi de 116,60 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 369,5 kPa.

Na figura 4.24 podemos observar as configurações indeformada e deformada para alongamento de 10%.

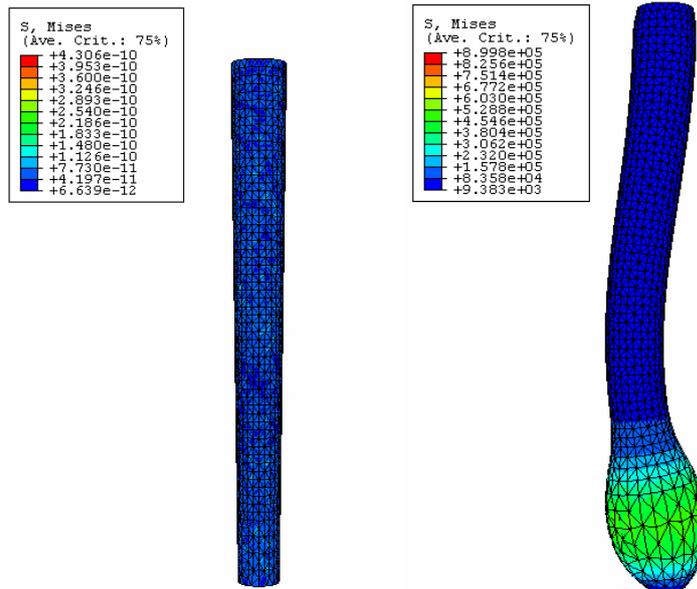


Figura 4.24 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 10%

#### 4.6.3.3. Alongamento de 20%

Para a análise do tubo de silicone com elementos sólidos e alongamento de 20% de seu comprimento inicial a pressão crítica encontrada foi de 103,87 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 536,2 kPa.

Na figura 4.25 podemos observar as configurações indeformada e deformada para alongamento de 20%.

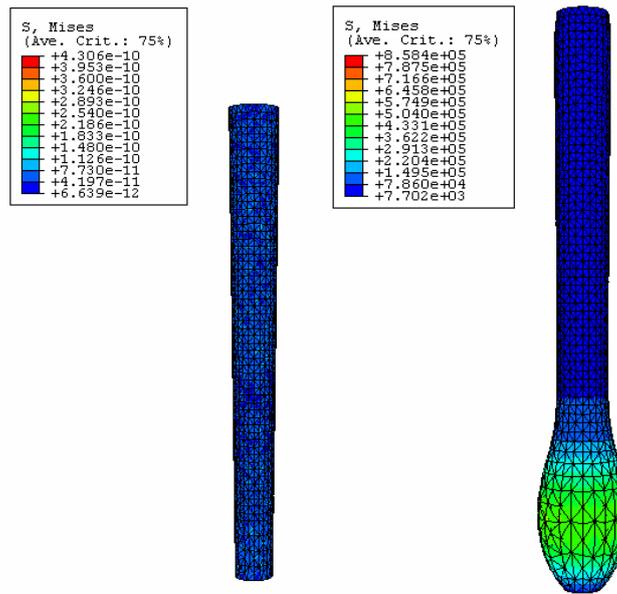


Figura 4.25 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 20%

#### 4.6.3.4. Comparação dos elementos sólidos

Pelos resultados acima podemos observar que como no ensaio experimental o valor da pressão crítica diminui com o aumento do alongamento aplicado ao tubo de silicone, a figura 4.26 mostra essa variação.

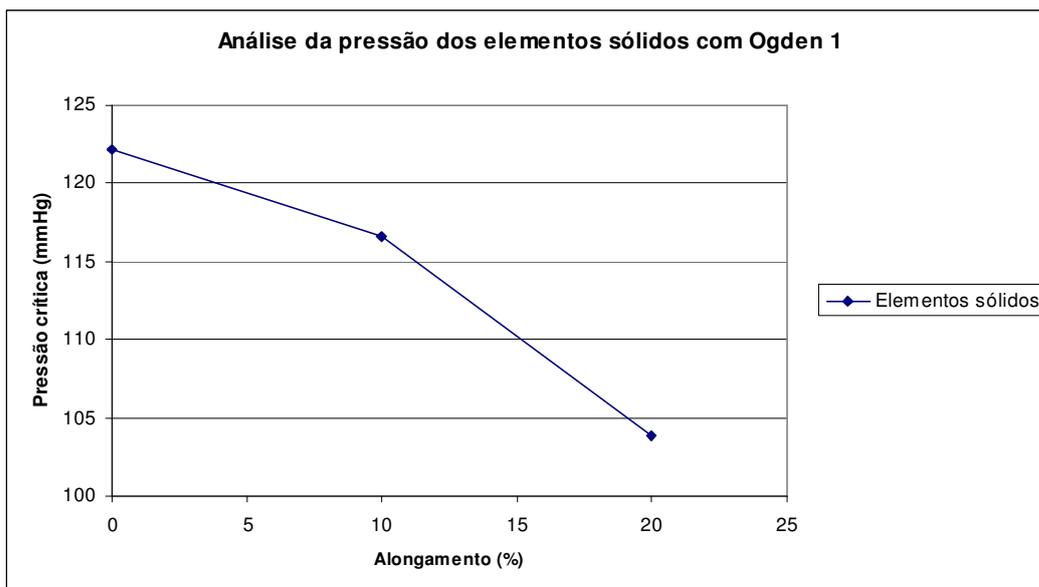


Figura 4.26 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)

Na figura 4.27 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal atuante na estrutura, para elementos sólidos, no instante em que se verifica a pressão crítica.

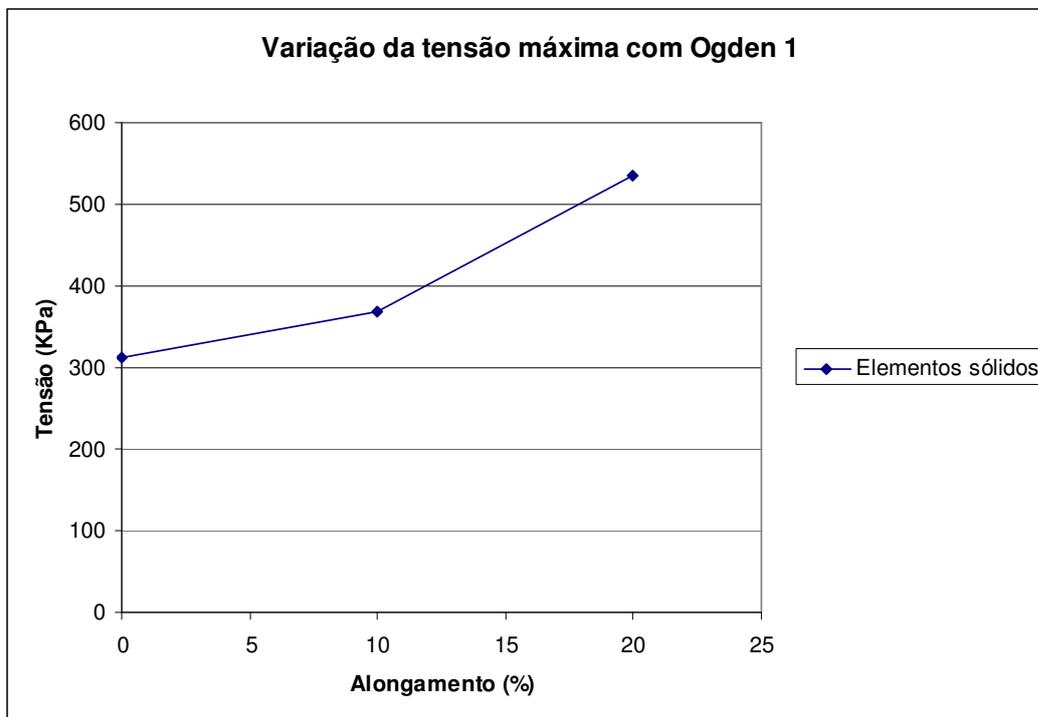


Figura 4.27 – Variação da tensão máxima trativa principal para o elemento sólido

#### 4.6.4. Análise da pressão crítica com elementos sólidos e funcional de energia Neo Hooke

##### 4.6.4.1. Sem alongamento

Para a análise do tubo de silicone com elementos sólidos e sem alongamento a pressão crítica encontrada foi de 150,83 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 359,9 kPa.

Na figura 4.28 podemos observar as configurações indeformada e deformada sem alongamento.

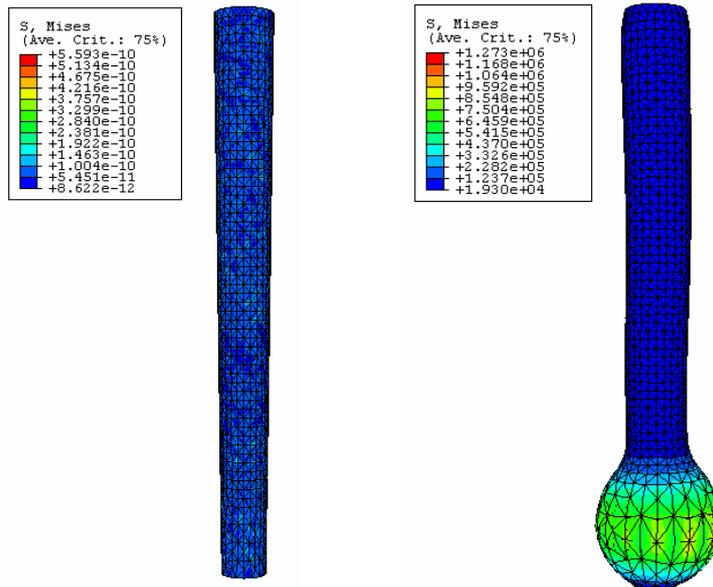


Figura 4.28 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone sem alongamento

#### 4.6.4.2. Alongamento de 10%

Para a análise do tubo de silicone com elementos sólidos e alongamento de 10% de seu comprimento inicial a pressão crítica encontrada foi de 142,08 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 401,4 kPa.

Na figura 4.29 podemos observar as configurações indeformada e deformada para alongamento de 10%.

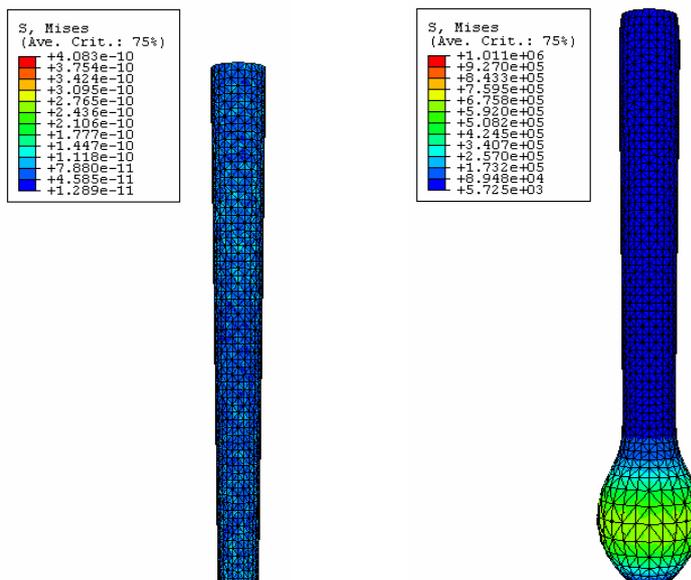


Figura 4.29 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 10%

#### 4.6.4.3. Alongamento de 20%

Para a análise do tubo de silicone com elementos sólidos e alongamento de 20% de seu comprimento inicial a pressão crítica encontrada foi de 128,06 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima tratativa principal foi de 602,9 kPa.

Na figura 4.30 podemos observar as configurações indeformada e deformada para alongamento de 20%.

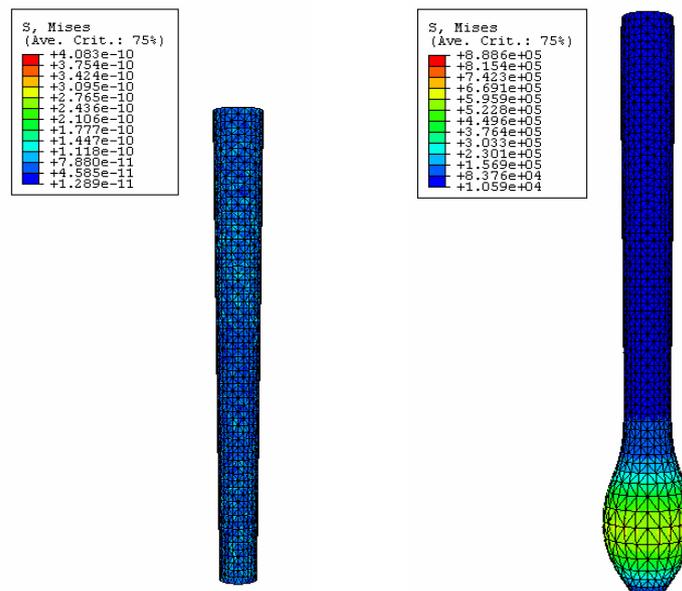


Figura 4.30 – Configuração indeformada e deformada para o tubo de silicone com alongamento de 20%

#### 4.6.4.4. Comparação dos elementos sólidos

Pelos resultados acima podemos observar que como no ensaio experimental o valor da pressão crítica diminui com o aumento do alongamento aplicado ao tubo de silicone, a figura 4.31 mostra essa variação.

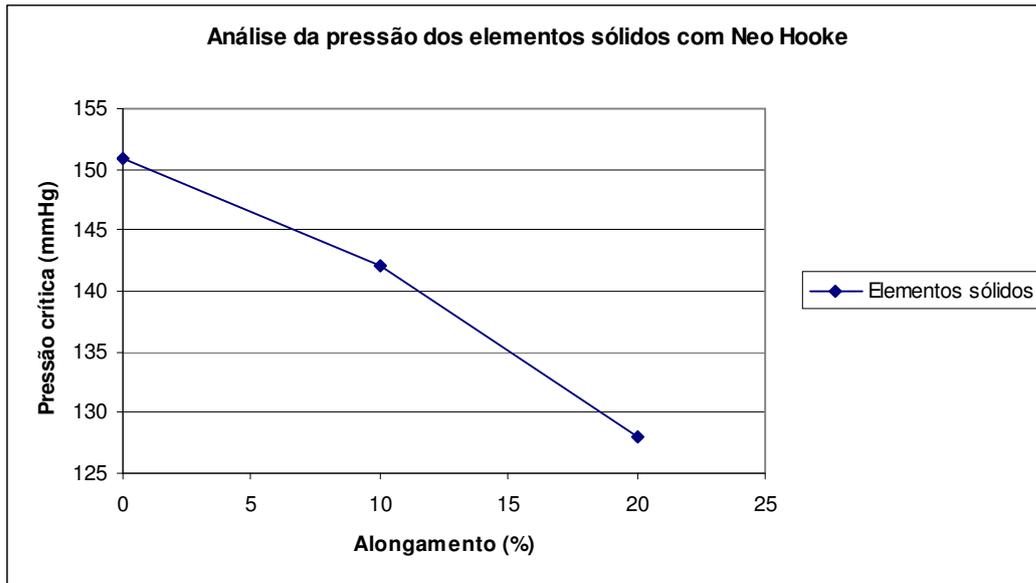


Figura 4.31 – Variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial)

Na figura 4.32 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal atuante na estrutura, para elementos sólidos, no instante em que se verifica a pressão crítica.

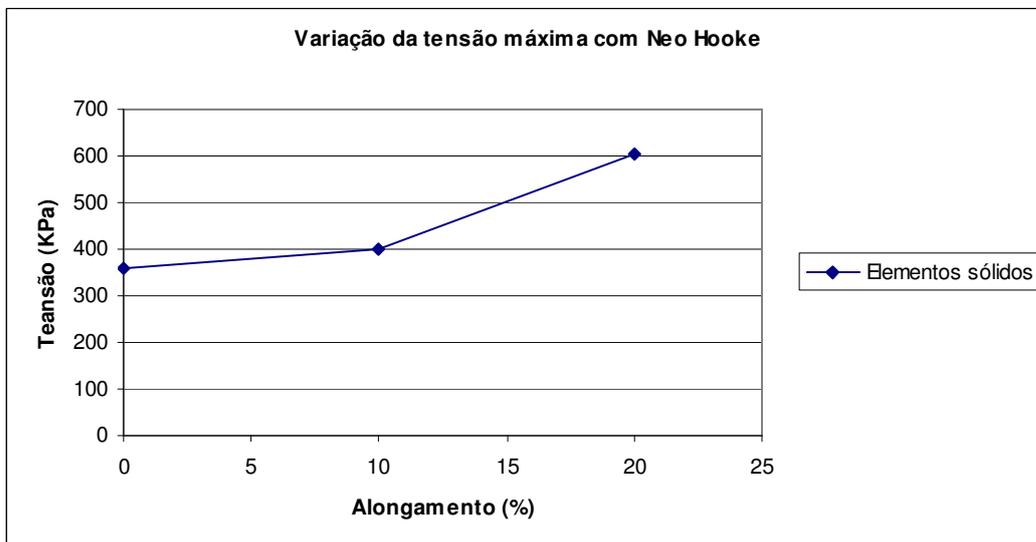


Figura 4.32 – Variação da tensão máxima trativa principal para o elemento sólido

#### 4.6.5. Comparação dos elementos de casca e sólidos

Após realizarmos as análises utilizando elementos de casca e elementos sólidos para modelar o tubo de silicone da análise experimental, podemos observar que ocorrem variações tanto na pressão quanto na tensão em função do tipo de funcional e do tipo de elemento a ser empregado na análise.

A figura 4.33 mostra a comparação entre as pressões obtidas para elementos de casca.

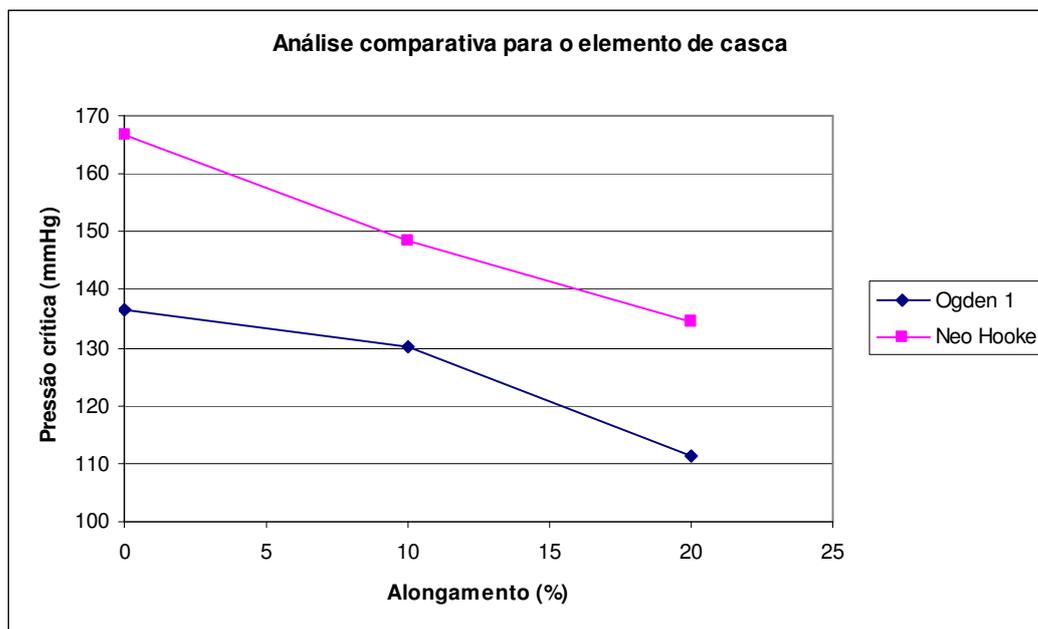


Figura 4.33 – Comparação da variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial) para elementos de casca

A figura 4.34 mostra a comparação entre as pressões obtidas para elementos sólidos.

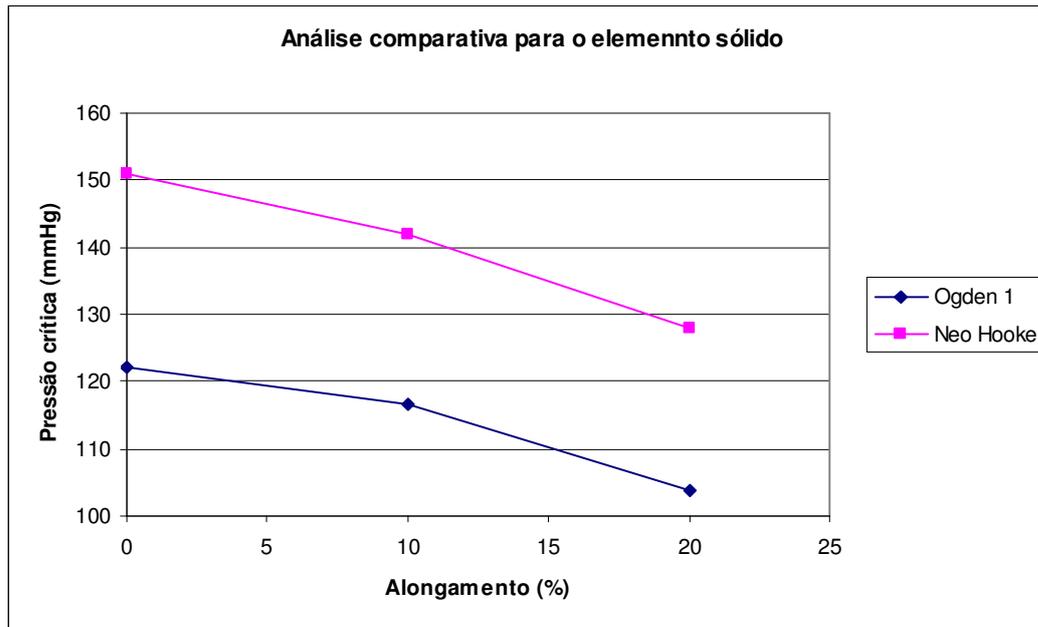


Figura 4.34 – Comparação da variação da pressão em função do alongamento (% do comprimento inicial) para elementos sólidos

A figura 4.35 mostra a comparação entre as tensões obtidas para elementos de casca.

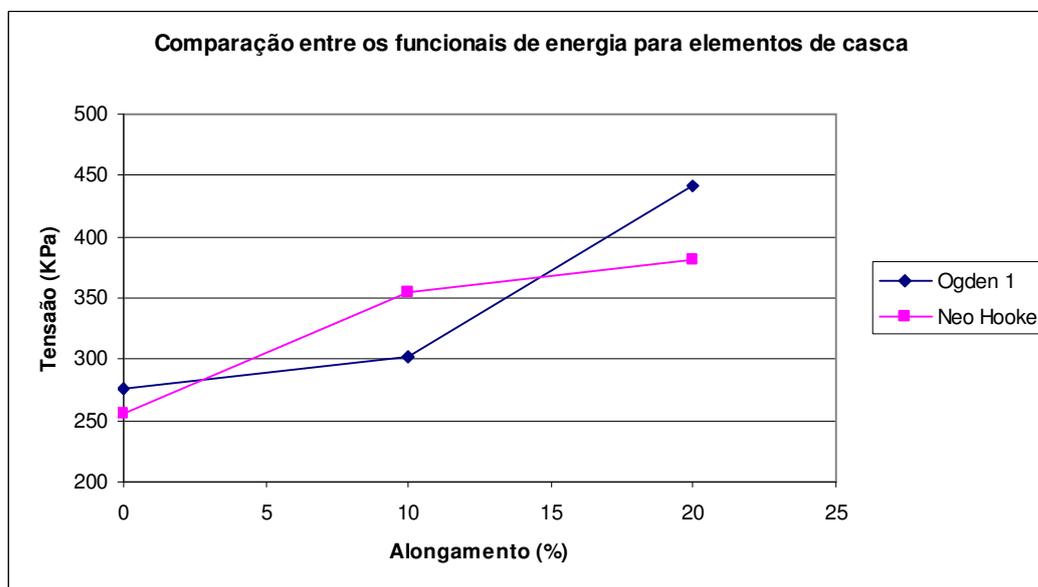


Figura 4.35 – Comparação da variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento (% do comprimento inicial) para os elementos de casca.

A figura 4.36 mostra a comparação entre as tensões obtidas para elementos sólidos.

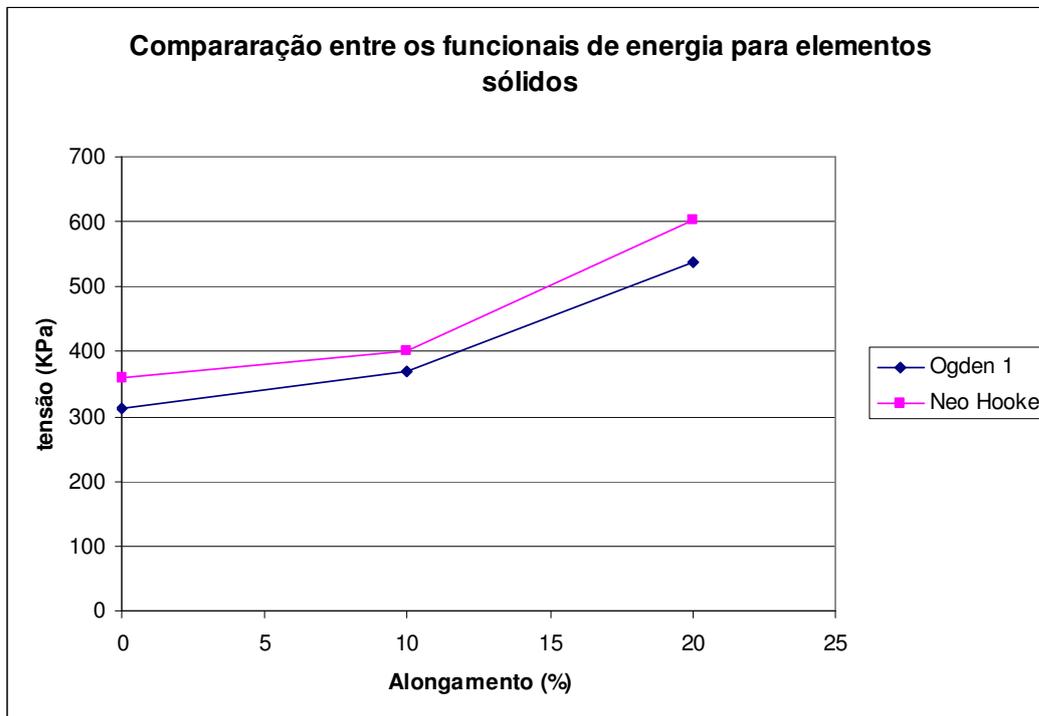


Figura 4.36 – Comparação da variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento (% do comprimento inicial) para os elementos sólidos.

#### 4.7. Estudo das imperfeições impostas

Com o objetivo de se estudar o comportamento do material sob condições iniciais de geometria alterada, foi realizado dois estudos de imperfeições. No primeiro caso realizou-se o estudo com elementos de casca do tipo S4R e no segundo caso com elementos sólidos do tipo C3D10.

Primeiro foi realizado um estudo com elementos de casca no qual foi criada uma imperfeição de forma circular (em formato de anel) na qual a espessura foi gradualmente diminuída e mantida a mesma constante elástica. Para essa análise foram feitos dois estudos, um onde a imperfeição estava localizada na parte inferior e outro na parte superior. Neste estudo a casca permanece axissimétrica. Na figura 4.37 podemos observar esquematicamente a imperfeição em formato de anel.

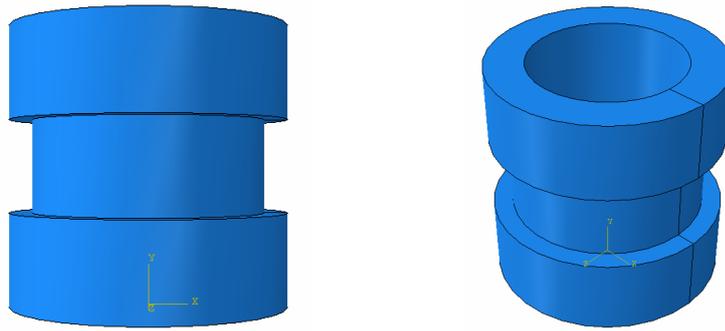


Figura 4.37 – Esquema da imperfeição em formato de anel

Também utilizando-se elementos de casca foi realizado um estudo onde a imperfeição foi localizada na parte inferior. Neste estudo o tamanho da imperfeição foi diminuído gradualmente e sua espessura também, para este caso de estudo a casca tornou-se assimétrica. Na figura 4.38 podemos observar esquematicamente a imperfeição localizada em formato de semi-anel.

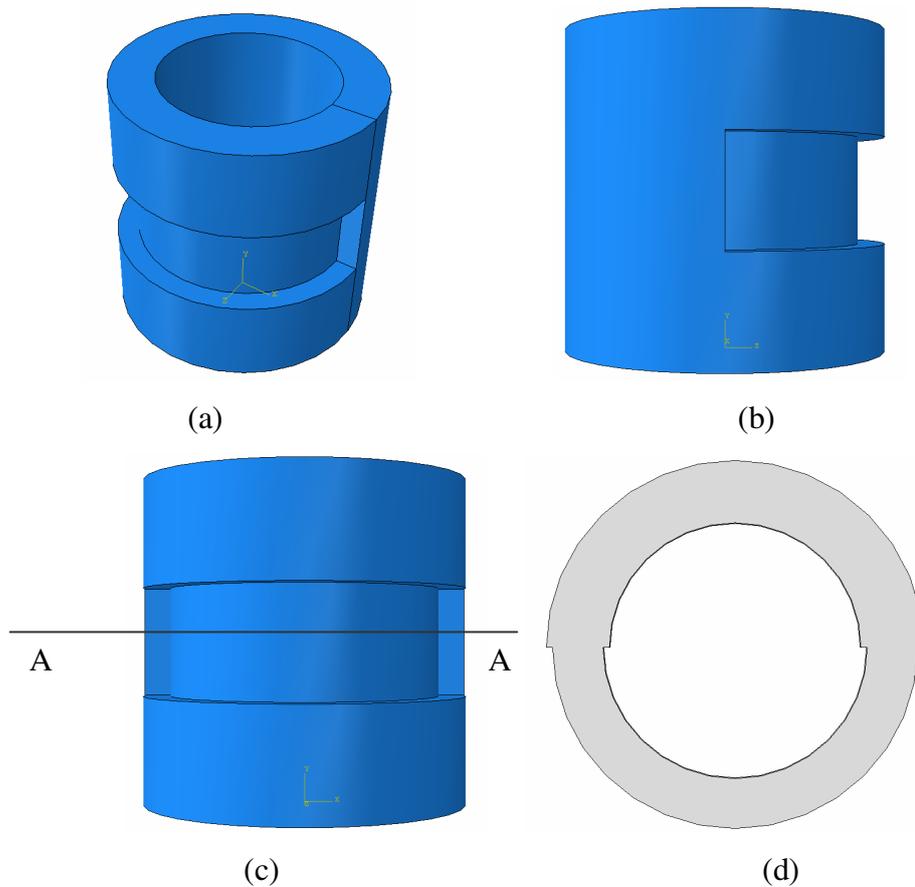


Figura 4.38 – (a), (b) e (c) Esquema da imperfeição em formato de semi-anel e (d) formato da área da seção transversal no corte AA

Posteriormente foi realizado um estudo com elementos sólidos no qual foram introduzidas excentricidades crescentes para a posição do centro do círculo que define a parede interior da aorta. A figura 4.39 apresenta a seção transversal da casca onde podemos observar como os centros dos círculos que definem a parede interior e exterior da aorta não são concêntricos.

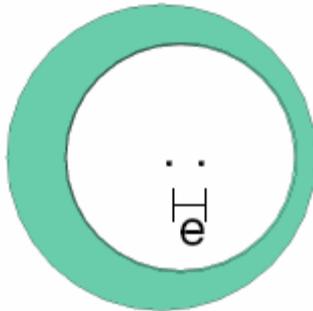


Figura 4.39 – Seção transversal da casca com círculos não concêntricos e excentricidade  $e$

Também com elementos sólidos e excentricidade crescente, foi realizado um estudo para a simulação da Síndrome de Marfan (perda das propriedades elásticas), no qual se utilizou o funcional de energia Neo Hooke por apresentar apenas uma constante elástica como apresentado na tabela 4.2, e assim ser possível introduzir uma variação linear da constante para analisarmos o comportamento da pressão crítica. Para este estudo sempre foi adotado um alongamento de 10% do comprimento inicial. A constante elástica foi reduzida e foram analisados os casos onde estas eram de 54,83 kPa (modelo perfeito), 50 kPa, 40 kPa, 30 kPa, 20 kPa e 10 kPa.

O motivo da escolha do elemento de casca no primeiro estudo foi o ganho computacional, pois o elemento de casca apresenta uma análise numérica muito mais rápida que o elemento sólido, fazendo com que a análise seja muito mais rápida. Este estudo também poderia ser feito com elementos sólidos. No segundo caso foram escolhidos elementos sólidos pela impossibilidade de criar essa geometria com elementos de casca.

#### 4.7.1.

#### **Análise da pressão crítica para imperfeição anelar inferior**

Com o objetivo de avaliar a variação da pressão crítica e da configuração deformada do material, realizou-se uma diminuição linear da espessura da parede arterial na região onde o bulbo se formava no modelo perfeito.

No primeiro estudo das imperfeições impostas foi utilizado o modelo com elementos de casca S4R, 1617 elementos e 10% de alongamento do comprimento inicial e funcional de energia Ogden 1 (as constantes estão descritas na tabela 4.1). Para este estudo foi criada uma região circular, anelar, de 5 cm de altura onde variou-se a espessura. Esta região está localizada a 6 cm da base da casca. A espessura deste anel, no modelo perfeito apresentava uma espessura média de 3,5 mm. A espessura foi reduzida progressivamente para 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm e 1,5 mm. Provocando diminuição na pressão crítica que a estrutura suportava. O resultado pode ser observado na tabela 4.4.

Espessura do “anel” (mm)	Pressão crítica (mmHg)
3,5 (perfeito)	130,33
3,0	110,79
2,5	92,76
2,0	74,40
1,5	58,35

Tabela 4.4 – Pressão crítica em função da diminuição da espessura da região anelar inferior

A figura 4.40 faz uma representação gráfica da tabela 4.4, onde podemos perceber que a variação da pressão crítica com a diminuição da espessura do anel se comporta praticamente de forma linear.

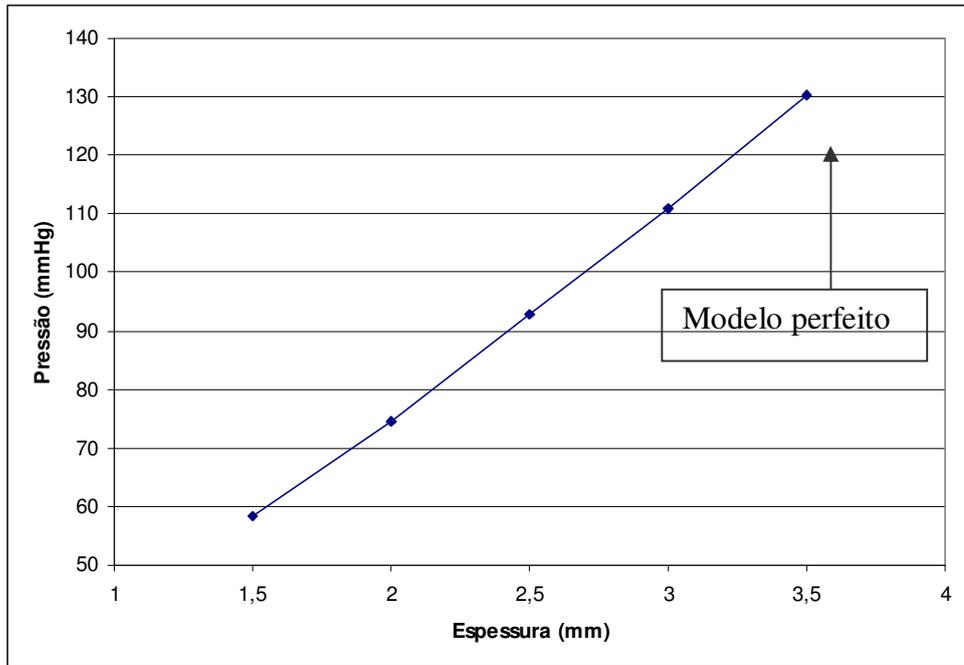


Figura 4.40 – Pressão crítica em função da diminuição da espessura da região anelar inferior e valor da pressão crítica no modelo perfeito

Na figura 4.41 podemos observar: (a) a posição da imperfeição anelar inferior, (b) a configuração deformada do modelo perfeito com espessura da região anelar de 3,5 mm e (c), (d), (e) e (f) as configurações deformadas para cada um dos casos estudados onde as espessuras da região anelar foram reduzidas para 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm e 1,5 mm.

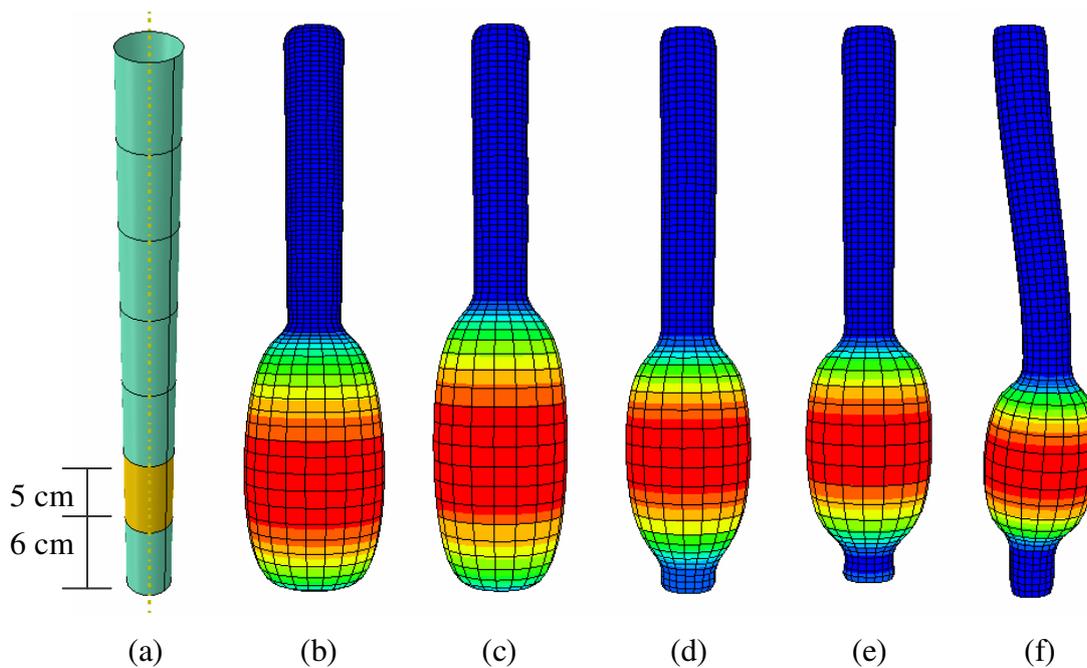


Figura 4.41 – (a) posição da imperfeição e (b), (c), (d), (e) e (f) configurações deformadas para 3,5 mm (modelo perfeito), 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm e 1,5 mm

Podemos observar que quando o anel apresentava espessura de 3,0 mm, figura 4.39 (c), o bulbo formado ficou com um formato mais alongado, este fato se explica pelo fato da seção abaixo ter uma espessura de 3,1 mm, ficando assim um longo trecho com uma espessura muito similar.

Podemos observar também que com a redução da espessura da parede arterial o bulbo concentra-se na região do anel onde a imperfeição foi imposta, alcançando seu ponto máximo na figura 4.41 (f).

Observa-se também que no caso em que o anel apresentava espessura de 1,5 mm, figura 4.41 (f), ocorreu uma pequena flambagem lateral da casca que representa a aorta.

Na tabela 4.5 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar.

Espessura do “anel” (mm)	Tensão máxima (kPa)
3,5 (perfeito)	302,4
3,0	416,2
2,5	359,3
2,0	447,6
1,5	770,2

Tabela 4.5 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar

A figura 4.42 faz uma representação gráfica da tabela 4.5.

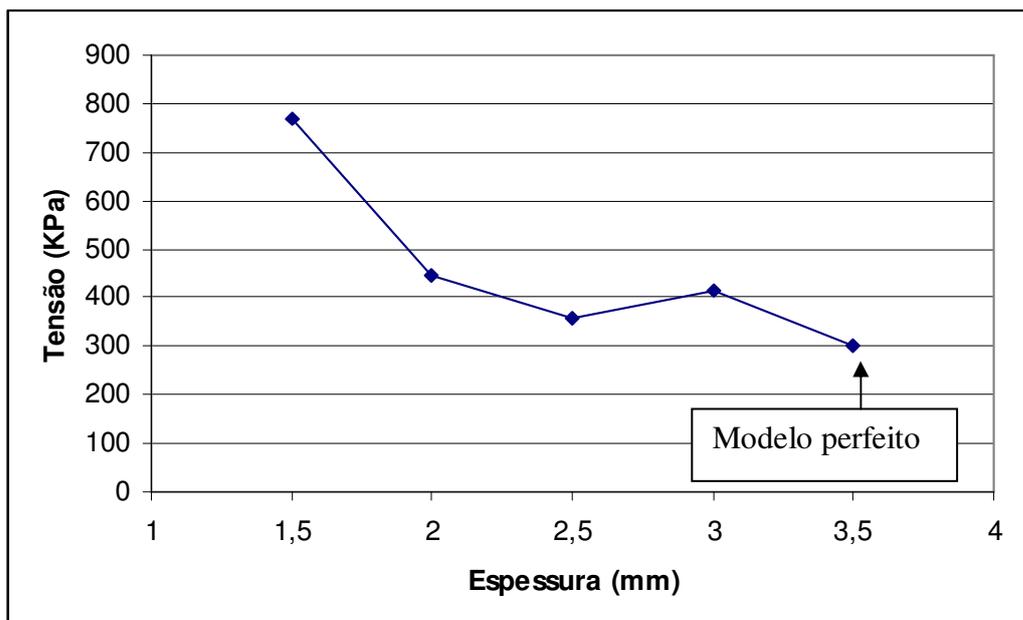


Figura 4.42 - Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito

Podemos observar que à medida que a espessura da região anelar diminui a tensão máxima trativa principal aumenta.

#### 4.7.2.

#### **Análise da pressão crítica para imperfeição anelar superior**

Com o objetivo de avaliar a variação da pressão crítica e da configuração deformada do material, realizou-se uma diminuição linear da espessura da parede arterial na região superior da casca que representa a aorta.

No segundo estudo das imperfeições impostas foi utilizado o modelo com elementos de casca S4R, 1617 elementos e 10% de alongamento do comprimento inicial. Para este estudo foi criada uma região circular, anelar, de 5 cm de altura onde variou-se a espessura. Esta região está localizada a 21 cm da base da casca. A espessura deste anel, no modelo perfeito apresentava uma espessura média de 4,3 mm. A espessura foi reduzida progressivamente para 4,0 mm, 3,5 mm, 3,0 mm e 2,5 mm, 2,0 mm e 1,5 mm. Provocando diminuição na pressão crítica que a estrutura suportava. O resultado pode ser observado na tabela 4.6.

Espessura do “anel” (mm)	Pressão crítica (mmHg)
4,3 (perfeito)	130,33
4,0	130,33
3,5	122,86
3,0	104,03
2,5	86,76
2,0	69,64
1,5	54,59

Tabela 4.6 – Pressão crítica em função da diminuição da espessura da região anelar superior

A figura 4.43 faz uma representação gráfica da tabela 4.5.

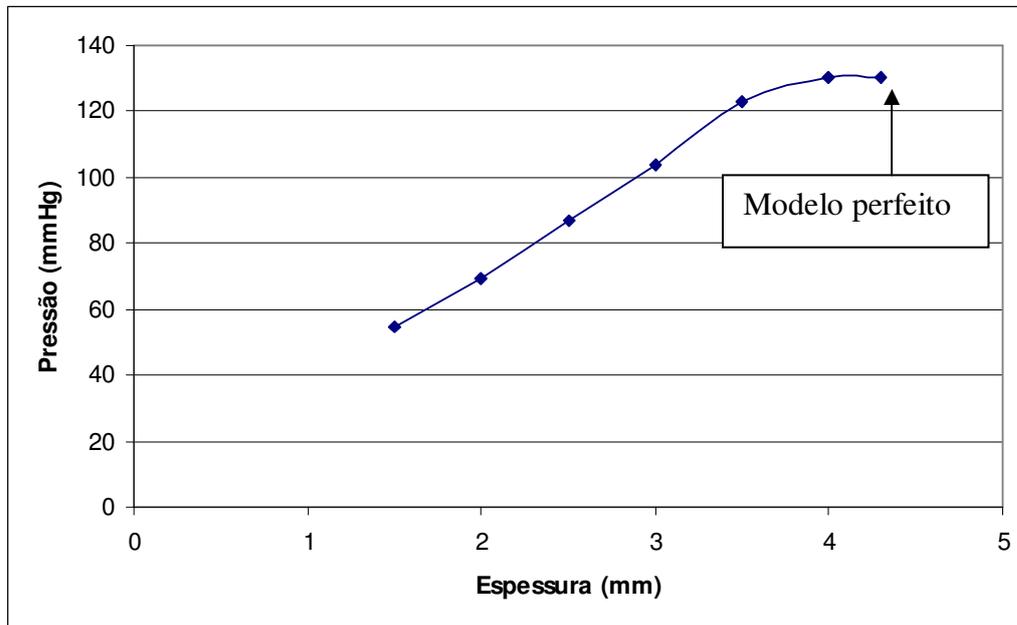


Figura 4.43 – Pressão crítica em função da diminuição da espessura da região anelar superior e valor da pressão crítica no modelo perfeito

Na figura 4.44 podemos observar: (a) a posição da imperfeição anelar superior, (b) a configuração deformada do modelo perfeito com espessura da região anelar de 4,3 mm e (c), (d), (e), (f), (g) e (h) as configurações deformadas para cada um dos casos estudados onde as espessuras da região anelar foram reduzidas para 4,0 mm, 3,5 mm, 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm e 1,5 mm.

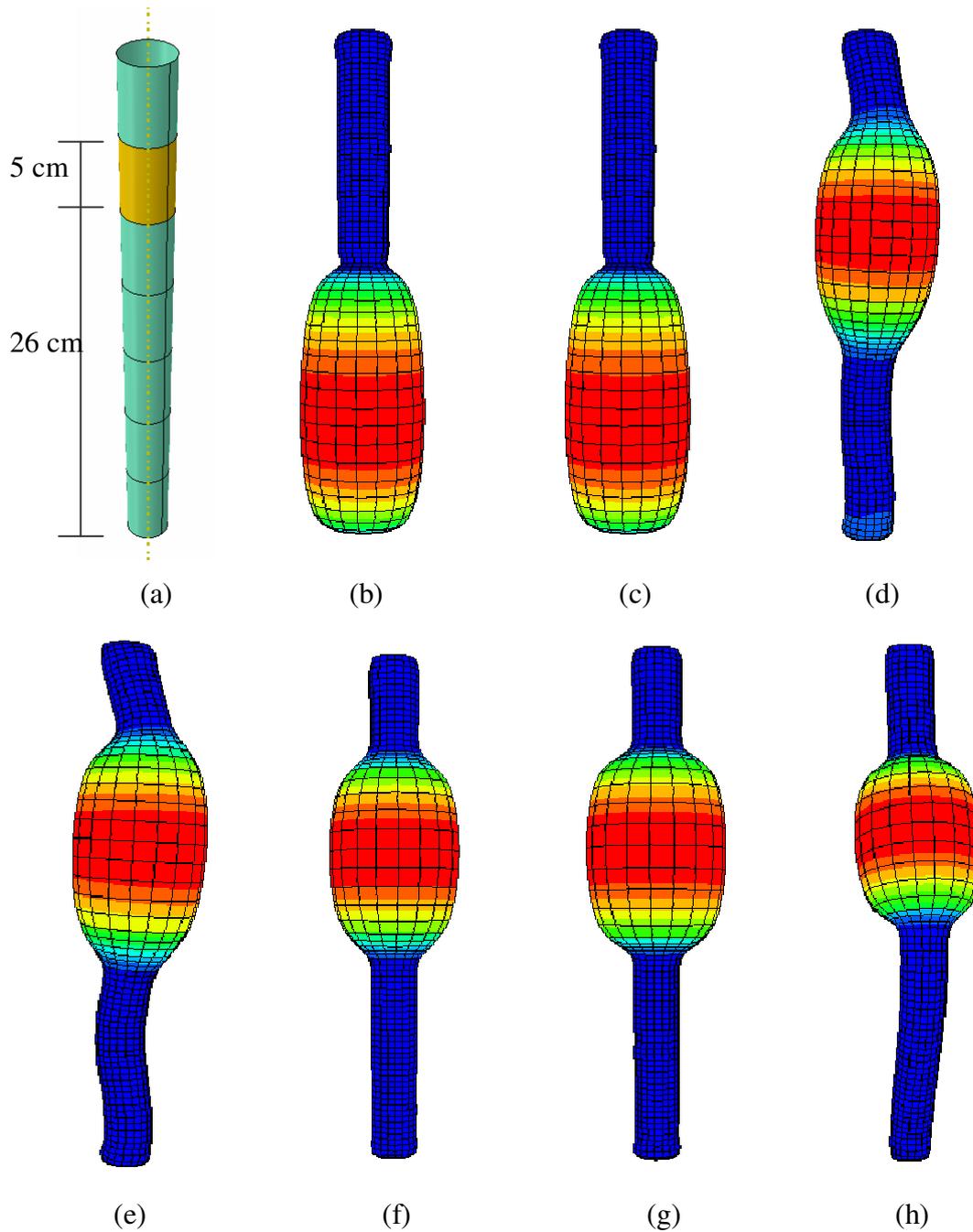


Figura 4.44 – (a) posição da imperfeição e (b), (c), (d), (e), (f), (g) e (h) configurações deformadas para 4,3 mm (modelo perfeito), 4,0 mm, 3,5 mm, 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm e 1,5 mm.

Podemos observar que após a redução da espessura para 4,0 mm, figura 4.44 (c), o bulbo continua se formando na parte inferior e a pressão crítica permanece a mesma.

Quando a espessura é reduzida para 3,5 mm, figura 4.44 (d) o bulbo passa a se formar na parte superior, gerando assim diminuição na pressão crítica.

Observamos pelo gráfico da figura 4.43 que para espessuras inferiores a 3,5 mm a variação da pressão crítica se dá praticamente de forma linear e o bulbo passa a se formar no local onde a imperfeição foi imposta.

Na tabela 4.7 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar.

Espessura do “anel” (mm)	Tensão máxima (kPa)
4,3 (perfeito)	302,4
4,0	302,4
3,5	306,0
3,0	324,2
2,5	376,3
2,0	454,6
1,5	790,9

Tabela 4.7 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar

A figura 4.45 faz uma representação gráfica da tabela 4.7.

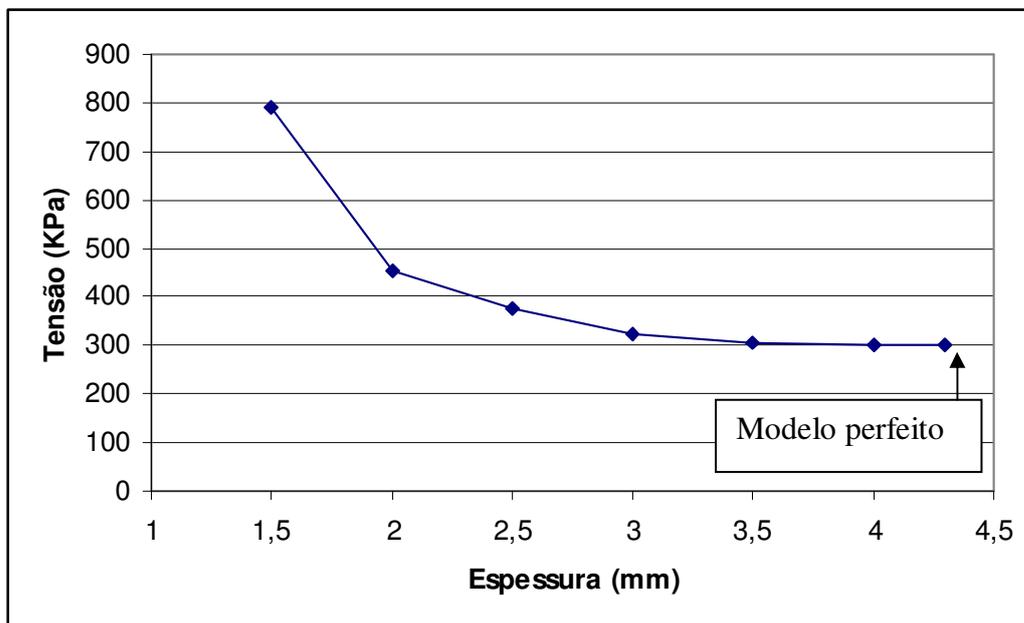


Figura 4.45 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da região anelar e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito

Podemos observar que à medida que a espessura da região anelar diminui a tensão máxima trativa principal aumenta. Não existe diferença no valor da tensão máxima trativa principal quando passamos de 4,3 mm para 4,0 mm, pois o bulbo continua se formando na parte inferior como visto na figura 4.44 (b) e (c). Quando

a espessura é reduzida para 3,5 mm, figura 4.44 (d) o bulbo passa a se formar na parte superior, sendo que o valor da tensão máxima trativa principal quase não se altera.

### **4.7.3.**

#### **Análise da pressão crítica para imperfeição local**

Com o objetivo de avaliar a variação da pressão crítica e da configuração deformada do material, realizou-se uma diminuição linear da espessura da parede arterial em uma região localizada da parte inferior da aorta.

Neste estudo foram utilizados no modelo elementos de casca S4R, 1617 elementos e 10% de alongamento do comprimento inicial e funcional de energia Ogden 1 (valor das constantes apresentadas na tabela 4.1). Para este modelo foi criada uma região de imperfeição inicial com formato retangular que variava da cota 6 cm a cota 11 cm (medido a partir da base). A espessura deste anel, no modelo perfeito apresentava uma espessura média de 3,5 mm. Esta espessura foi reduzida progressivamente para 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm. Com essa variação foi verificada a variação da pressão crítica que a estrutura suportava.

#### **4.7.3.1.**

##### **Caso 1**

No primeiro caso das imperfeições localizadas a imperfeição esta entre a cota 6 cm e a cota 11 cm (medido a partir da base) tendo assim 5 cm de altura e compreendendo a metade da circunferência da casca representando a aorta, tendo, portanto 4,44 cm de largura.

Na figura 4.46 podemos observar a posição em que se encontra o primeiro caso de imperfeições localizadas.

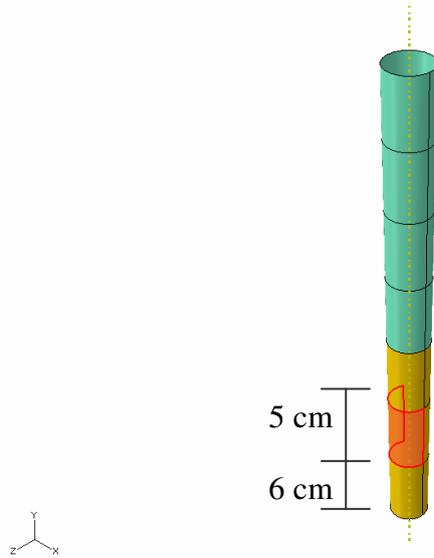


Figura 4.46 – Posição do primeiro caso das imperfeições localizadas

#### 4.7.3.1.1.

##### Caso 1 – modelo perfeito

No modelo perfeito a espessura da imperfeição localizada foi mantida com a espessura original (3,5 mm). Na figura 4.47 podemos observar a configuração indeformada e deformada. A pressão crítica encontrada foi de 130,33mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 302,4 kPa.

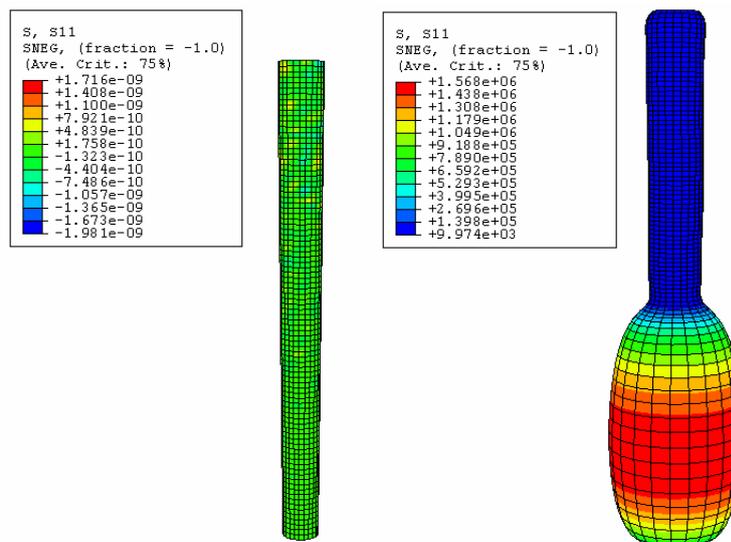


Figura 4.47 – Configuração indeformada e deformada sem imperfeição

#### 4.7.3.1.2.

##### Caso 1 – espessura de 3,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 3,0 mm. Na figura 4.48 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 122,41 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 503,7 kPa.

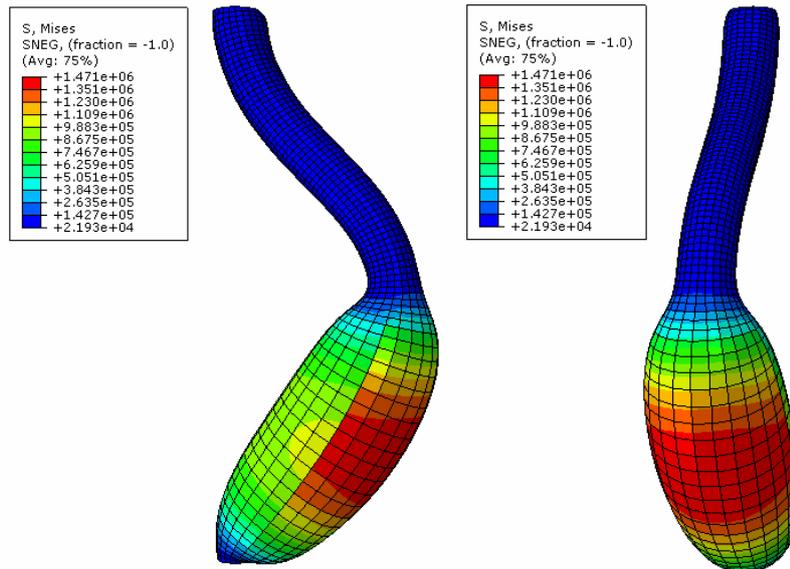


Figura 4.48 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm

#### 4.7.3.1.3.

##### Caso 1 – espessura de 2,5 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 2,5 mm. Na figura 4.49 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 116,73 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 738,3 kPa.

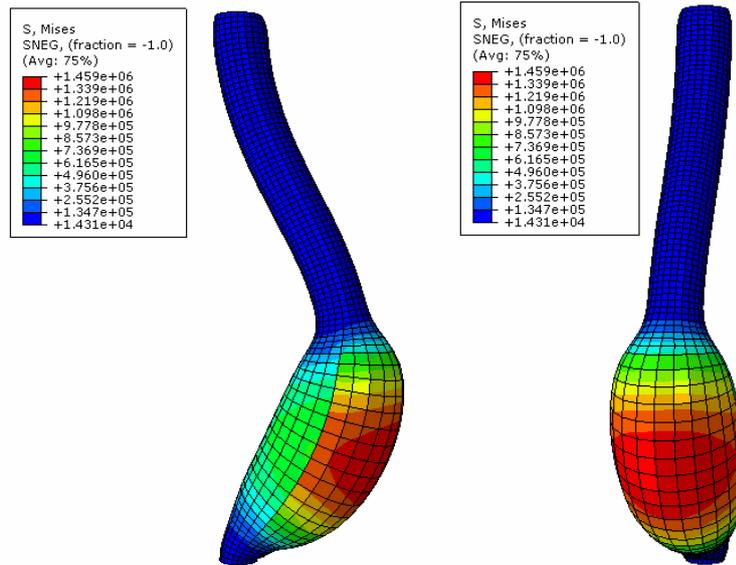


Figura 4.49 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,5 mm

#### 4.7.3.1.4.

#### Caso 1 – espessura de 2,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 2,0 mm. Na figura 4.50 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 103,05 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1692,0 kPa.

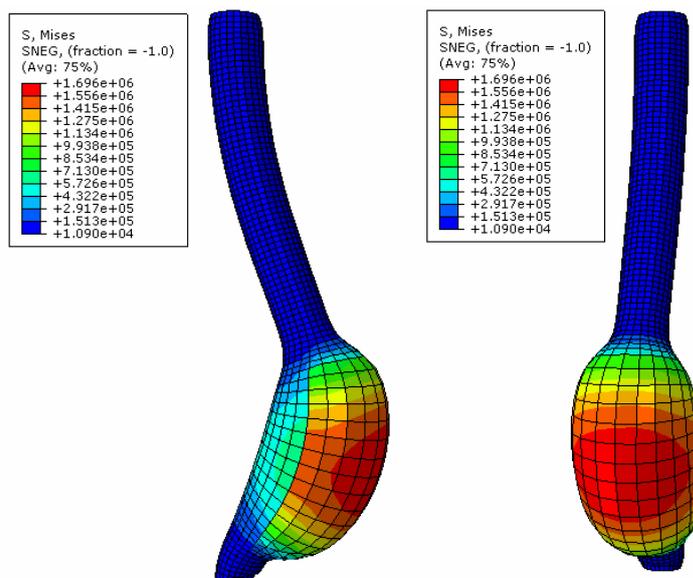


Figura 4.50 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,0 mm

#### 4.7.3.1.5.

##### Caso 1 – espessura de 1,5 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 1,5 mm. Na figura 4.51 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 91,51 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima tratativa principal foi de 2479,0 kPa.

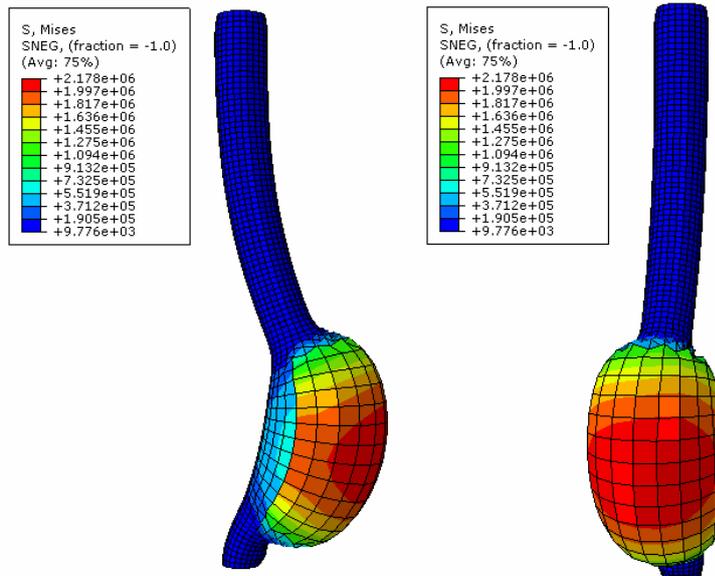


Figura 4.51 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,5 mm

#### 4.7.3.1.6.

##### Caso 1 – espessura de 1,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 1,0 mm. Na figura 4.52 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 79,67 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima tratativa principal foi de 2794,0 kPa.

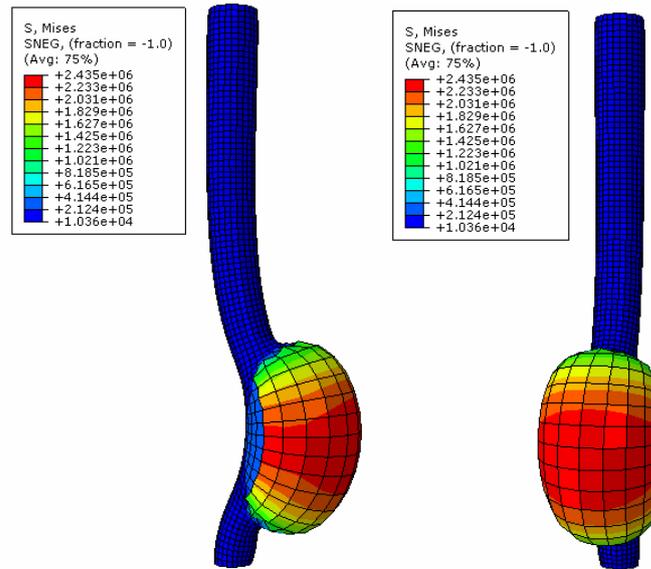


Figura 4.52 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,0 mm

#### 4.7.3.1.7. Estudo comparativo do caso 1

Na figura 4.53 podemos observar a configuração deformada para cada uma dos casos estudados anteriormente, onde a espessura foi reduzida progressivamente de 3,5 mm (modelo perfeito) para 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm. Pela figura podemos observar que à medida que a espessura diminui o bulbo se concentra na região da imperfeição.

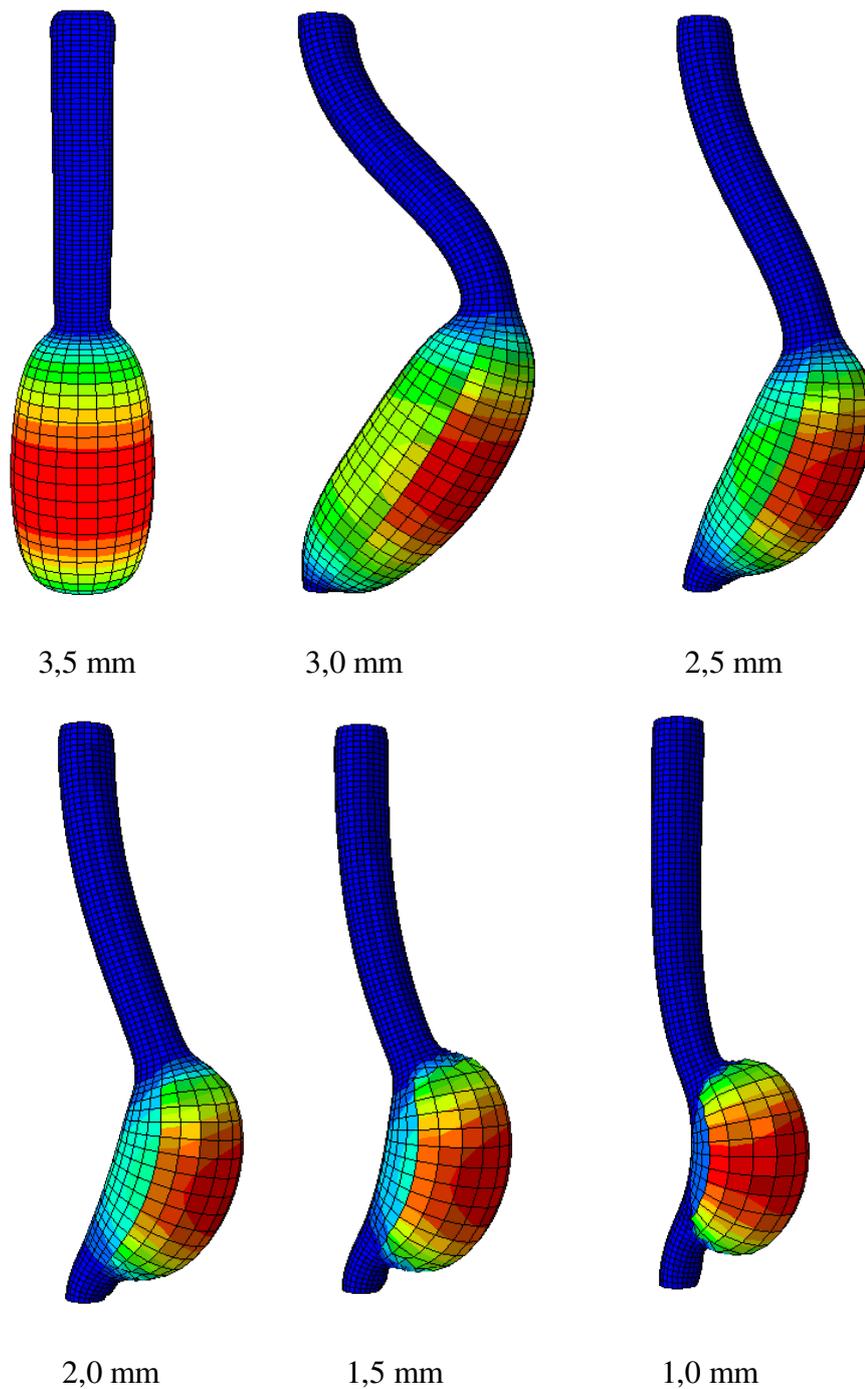


Figura 4.53 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,5 mm, 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm para o caso 1 de imperfeições locais

No gráfico da figura 4.54 podemos observar a variação da pressão crítica em função da diminuição da espessura da parede arterial na posição onde foi introduzida a imperfeição localizada.

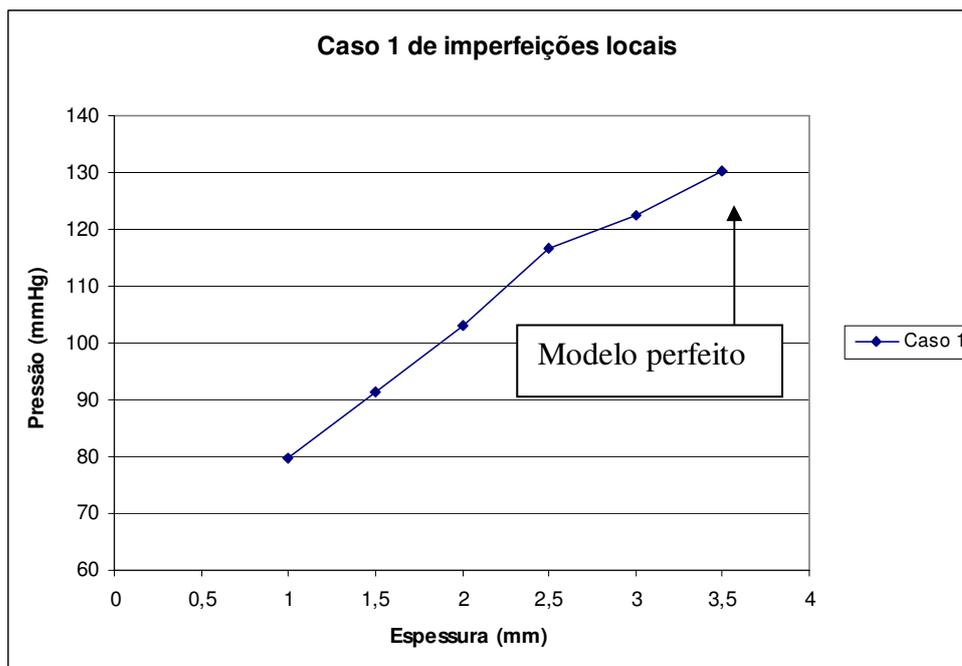


Figura 4.54 – Variação da pressão crítica para o caso 1 e valor da pressão crítica no modelo perfeito

Podemos observar que a diminuição da pressão ocorre praticamente de forma linear.

Na tabela 4.8 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da parede arterial na posição onde foi introduzida a imperfeição localizada.

Espessura do “anel” (mm)	Tensão máxima (kPa)
3,5 (perfeito)	302,4
3,0	503,7
2,5	738,3
2,0	1692,0
1,5	2479,0
1,0	2794,0

Tabela 4.8 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 1

A figura 4.55 faz uma representação gráfica da tabela 4.8.

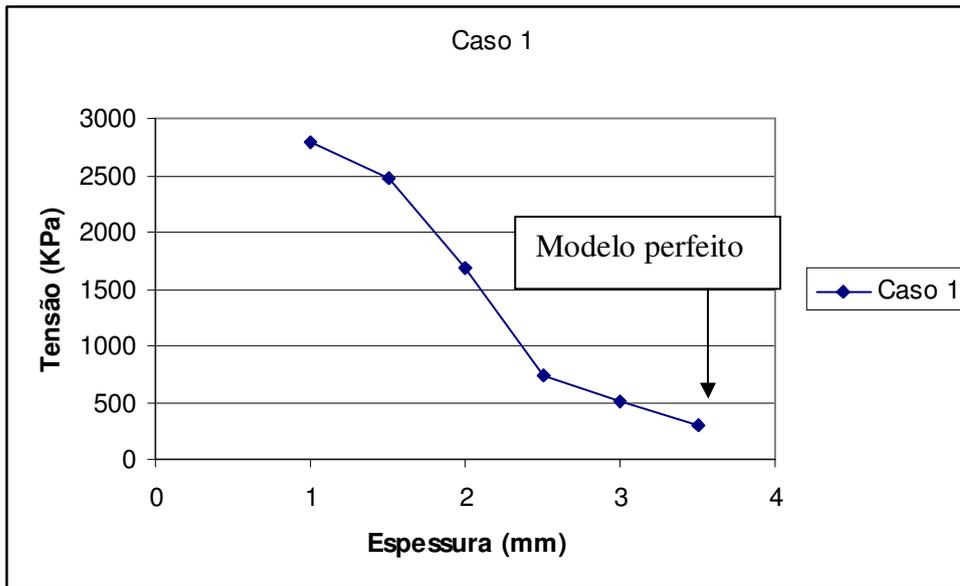


Figura 4.55 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 1 e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito

Pela figura 4.55 podemos observar que a tensão máxima trativa principal aumenta à medida que a espessura diminui.

#### 4.7.3.2. Caso 2

No segundo caso das imperfeições localizadas a imperfeição está localizada entre a cota 8,5 cm e a cota 11 cm (medido a partir da base) tendo assim 2,5 cm de altura e compreendendo um quarto da circunferência da casca representativa da aorta, tendo, portanto, 2,22 cm de largura.

Na figura 4.56 podemos observar a posição em que se encontra o segundo caso de imperfeições localizadas.

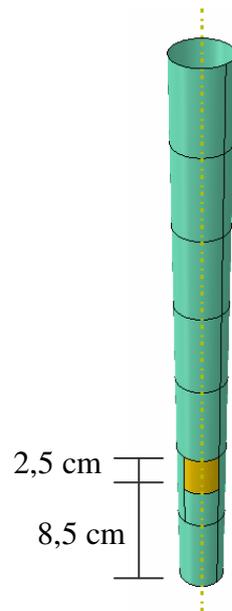


Figura 4.56 – Posição do segundo caso das imperfeições localizadas

#### 4.7.3.2.1.

#### Caso 2 – espessura 3,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 3,0 mm. Na figura 4.57 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 123,52 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 266,8 kPa.

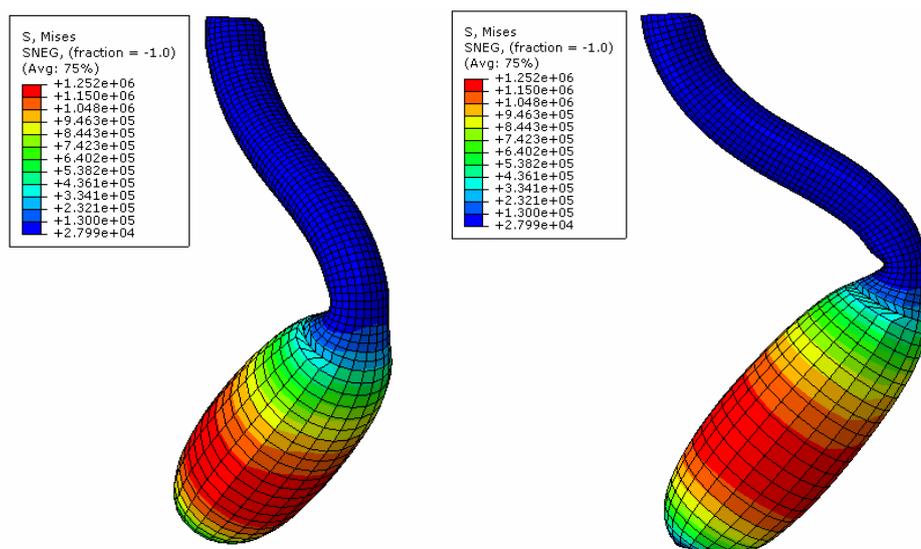


Figura 4.57 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm

### 4.7.3.2.2. Caso 2 – espessura 2,5 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 2,5 mm. Na figura 4.58 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 122,15 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 360,3 kPa.

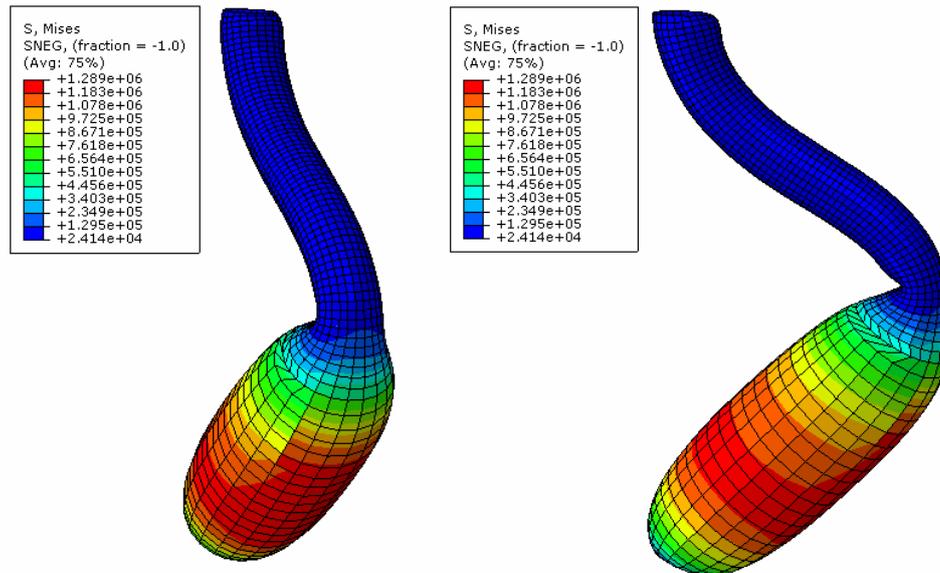


Figura 4.58 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,5 mm

### 4.7.3.2.3. Caso 2 – espessura 2,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 2,0 mm. Na figura 4.59 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 118,06 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 639,2 kPa.

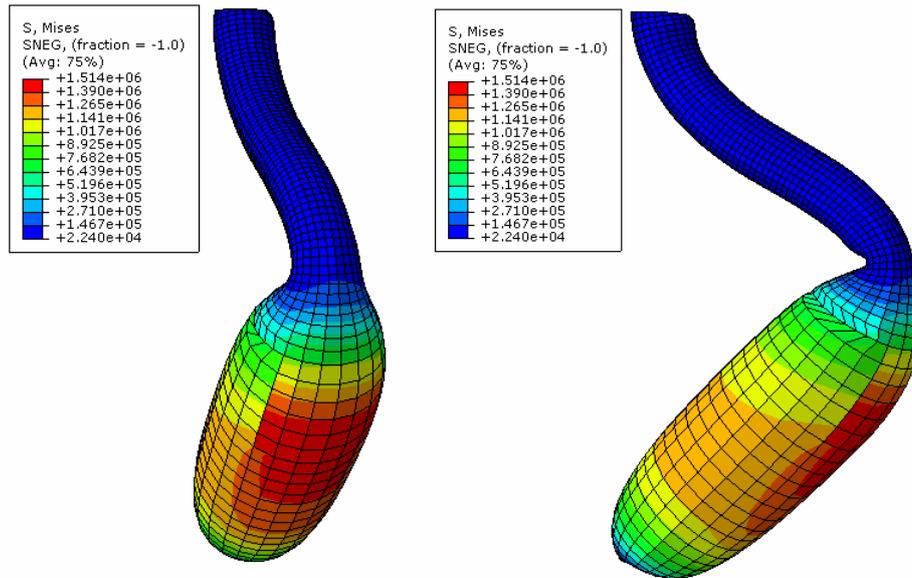


Figura 4.59 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,0 mm

#### 4.7.3.2.4. Caso 2 – espessura 1,5 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 1,5 mm. Na figura 4.60 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 112,26 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima tratativa principal foi de 947,0 kPa.

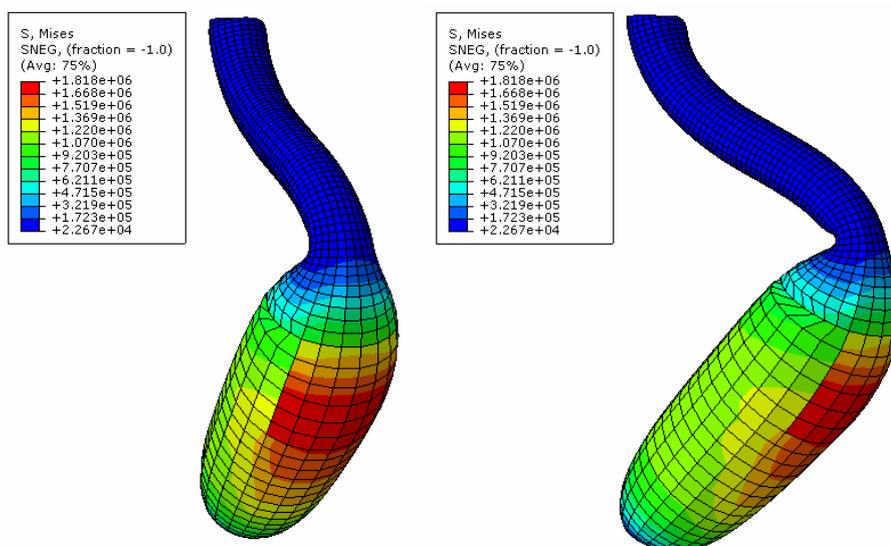


Figura 4.60 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,5 mm

#### 4.7.3.2.5. Caso 2 – espessura 1,0 mm

Caso em a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 1,0 mm. Na figura 4.61 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 106,28 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1344,0 kPa.

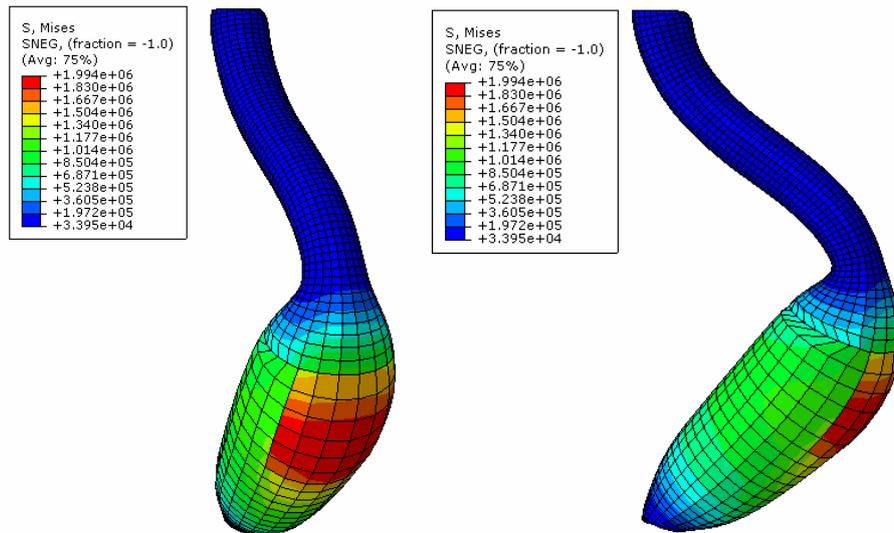


Figura 4.61 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,0 mm

#### 4.7.3.2.6. Estudo comparativo do caso 2

Na figura 4.62 podemos observar a configuração deformada para cada uma dos casos estudados anteriormente, onde a espessura foi reduzida progressivamente de para 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm. Pela figura podemos observar que a medida que a espessura diminui o bulbo se concentra na região da imperfeição.

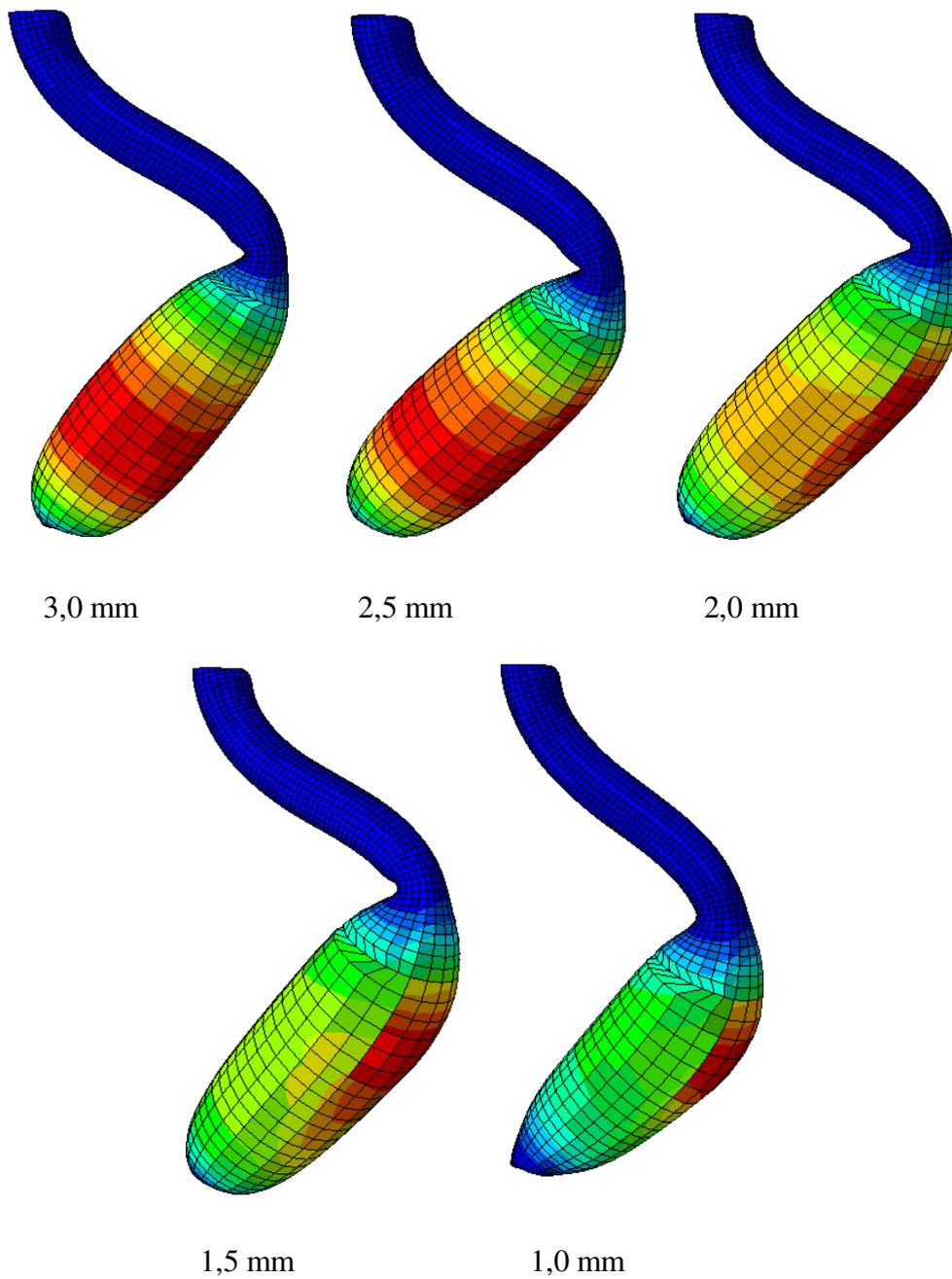


Figura 4.62 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm para o caso 2 de imperfeições locais

No gráfico da figura 4.63 podemos observar a variação da pressão crítica em função da diminuição da espessura da parede arterial na posição onde foi introduzida a imperfeição localizada.

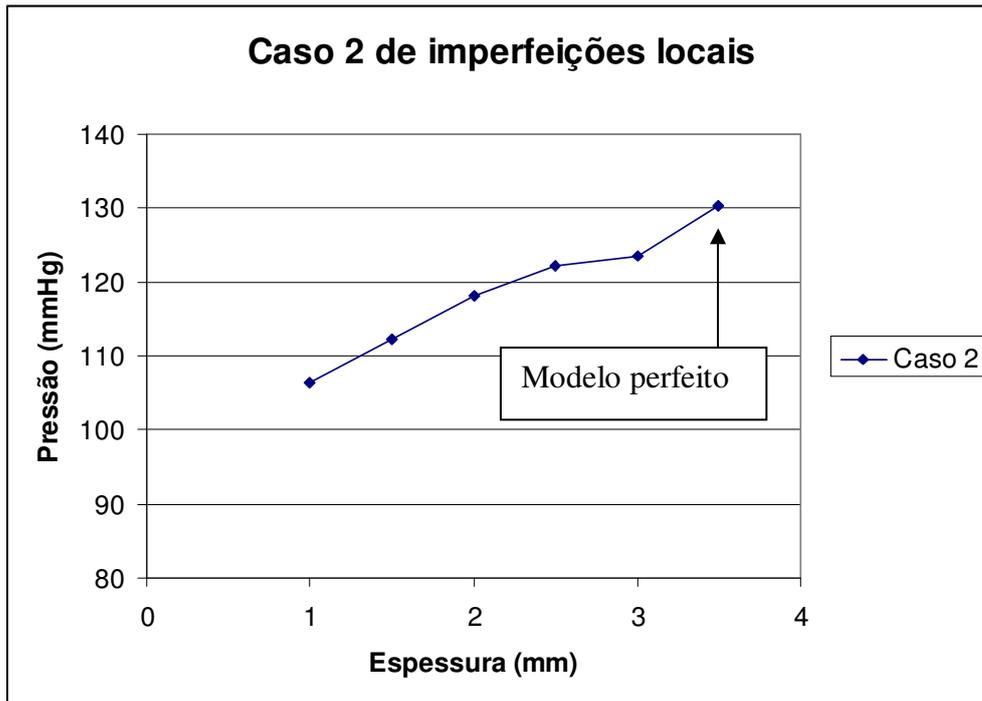


Figura 4.63 – Variação da pressão crítica para o caso 2 e valor da pressão crítica no modelo perfeito

Podemos observar que a diminuição da pressão ocorre praticamente de forma linear.

Na tabela 4.9 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da parede arterial na posição onde foi introduzida a imperfeição localizada.

Espessura do “anel” (mm)	Tensão máxima (kPa)
3,5 (perfeito)	302,4
3,0	266,8
2,5	360,3
2,0	639,2
1,5	947,0
1,0	1344,0

Tabela 4.9 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 2

A figura 4.64 faz uma representação gráfica da tabela 4.9.

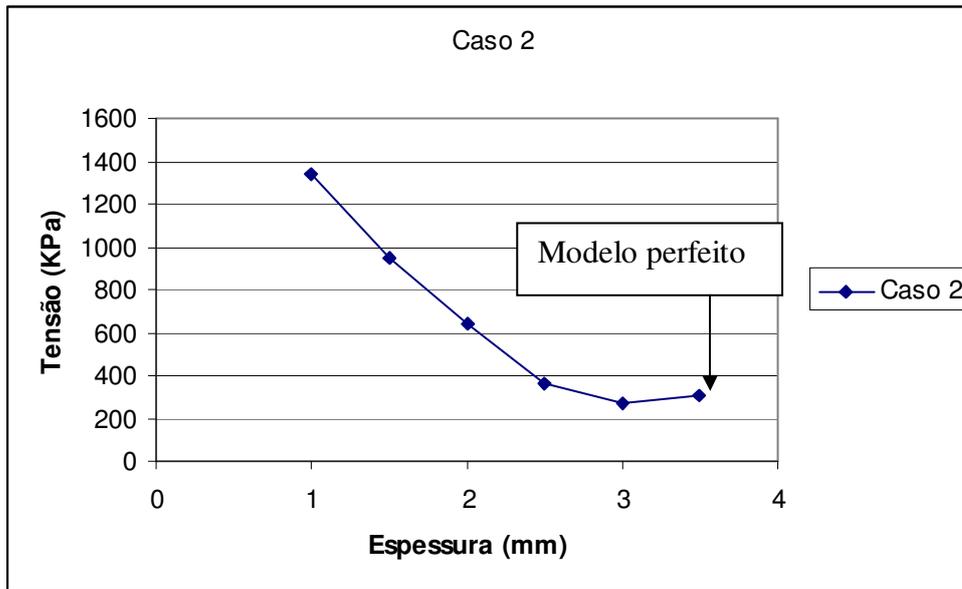


Figura 4.64 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 2 e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito

Pela figura 4.64 podemos observar que a tensão máxima trativa principal permanece praticamente constante entre a espessura de 3,5 mm e 2,5 mm, a partir de 2,5 mm a tensão máxima trativa principal aumenta praticamente de forma linear à medida que a espessura diminui.

#### 4.7.3.3. Caso 3

No terceiro caso das imperfeições localizadas a imperfeição está localizada entre a cota 10 cm e a cota 11 cm (medido a partir da base) tendo assim 1 cm de altura e compreendendo um quarto da circunferência da casca representativa da aorta, tendo, portanto 2,22 cm de largura.

Na figura 4.65 podemos observar a posição em que se encontra o terceiro caso de imperfeições localizadas.

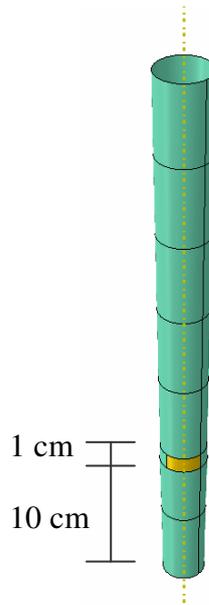


Figura 4.65 – Posição do terceiro caso das imperfeições localizadas

#### 4.7.3.3.1.

#### Caso 3 – espessura de 3,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 3,0 mm. Na figura 4.66 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 130,30 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 315,2 kPa.

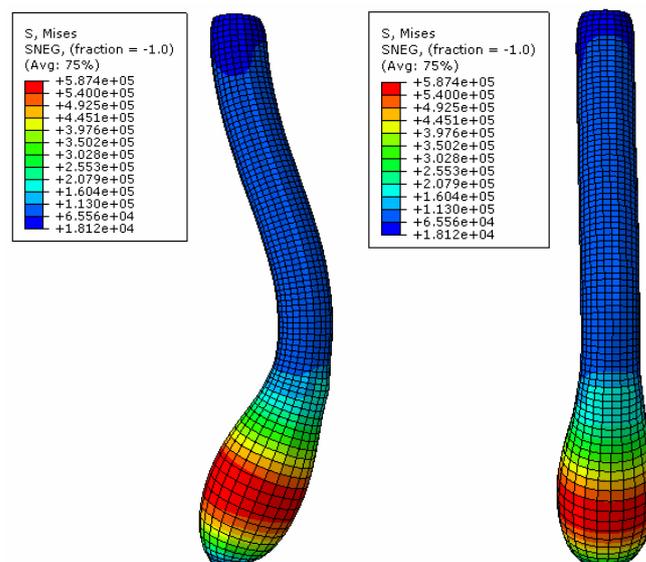


Figura 4.66 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm

#### 4.7.3.3.2.

##### Caso 3 – espessura de 2,5 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 2,5 mm. Na figura 4.67 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 130,26 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 312,6 kPa.

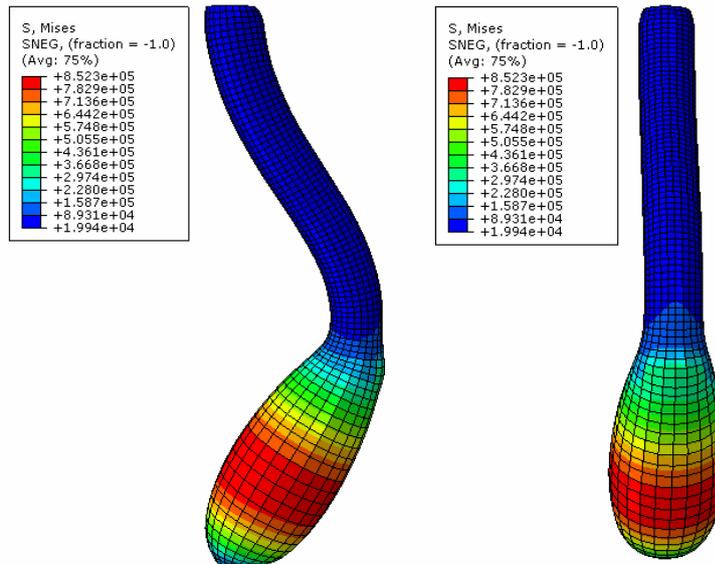


Figura 4.67 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,5 mm

#### 4.7.3.3.3.

##### Caso 3 – espessura de 2,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 2,0 mm. Na figura 4.68 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 129,52 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 482,5 kPa.

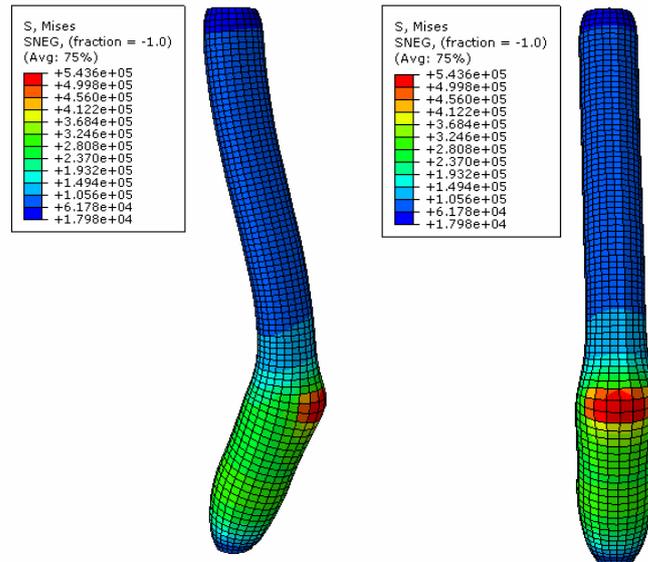


Figura 4.68 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,0 mm

#### 4.7.3.3.4. Caso 3 – espessura de 1,5 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 1,5 mm. Na figura 4.69 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 126,82 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 678,8 kPa.

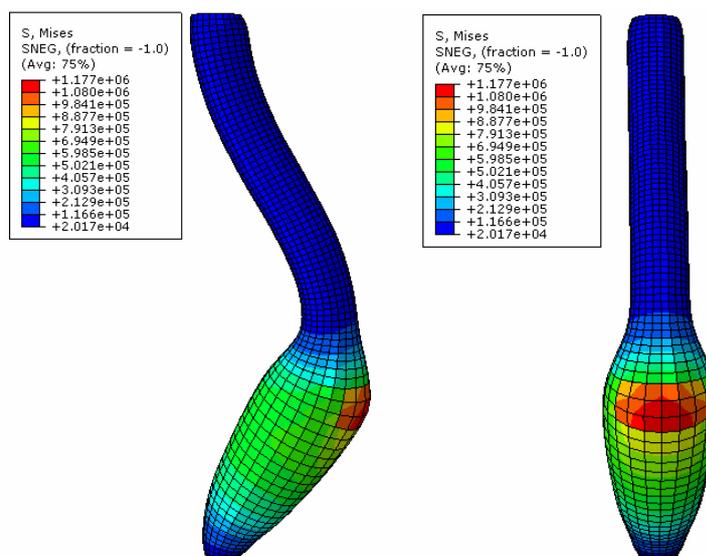


Figura 4.69 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,5 mm

#### 4.7.3.3.5.

#### Caso 3 – espessura de 1,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 1,0 mm. Na figura 4.70 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 123,50 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 966,3 kPa.

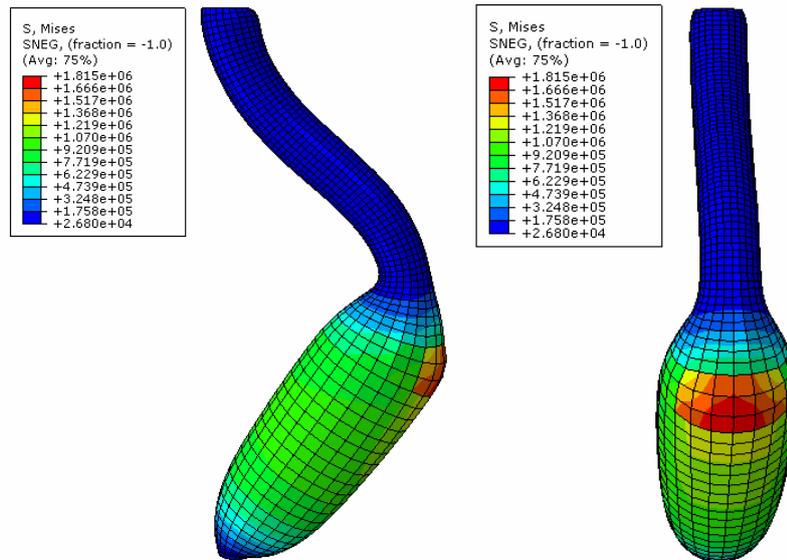


Figura 4.70 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,0 mm

#### 4.7.3.3.6.

#### Estudo comparativo do caso 3

Na figura 4.71 podemos observar a configuração deformada para cada uma dos casos estudados anteriormente, onde a espessura foi reduzida progressivamente de para 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm. Pela figura podemos observar que a medida que a espessura diminui o bulbo se concentra na região da imperfeição e aumenta a flambagem lateral.

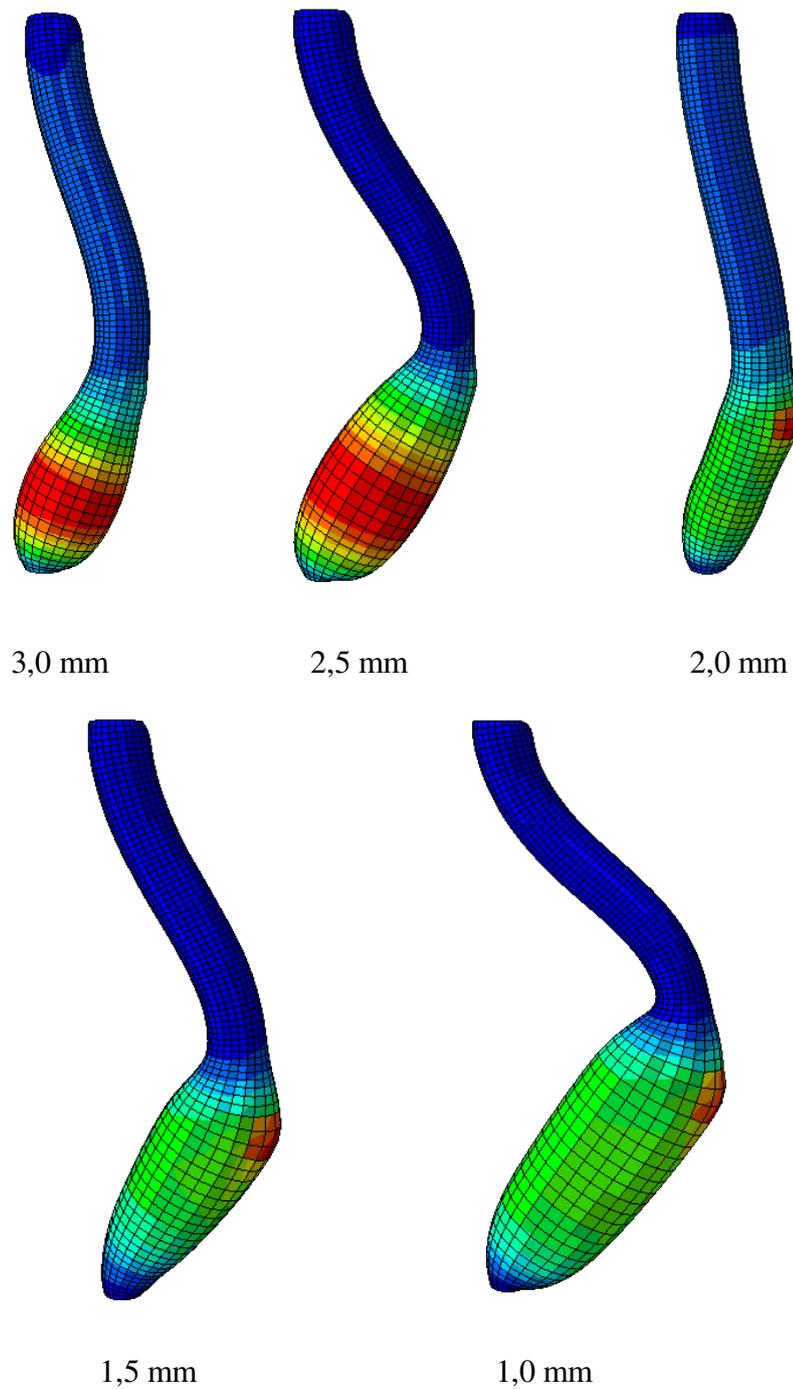


Figura 4.71 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm para o caso 3 de imperfeições locais

No gráfico da figura 4.72 podemos observar a variação da pressão crítica em função da diminuição da espessura da parede arterial na posição onde foi introduzida a imperfeição localizada.

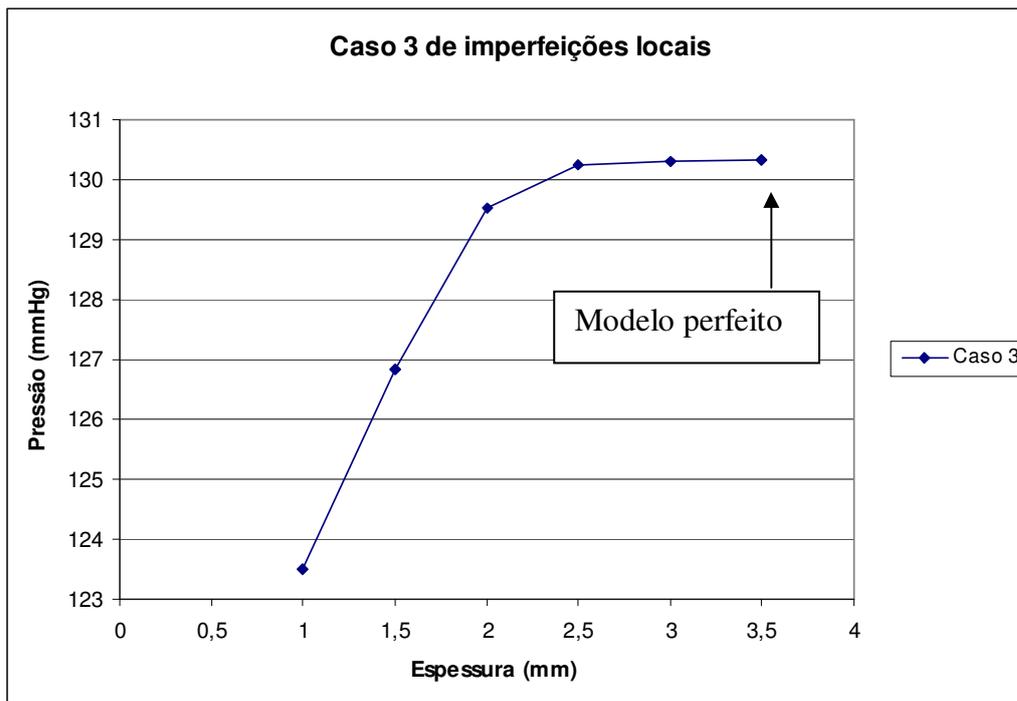


Figura 4.72 – Variação da pressão crítica para o caso 3 e valor da pressão crítica no modelo perfeito

Podemos observar que a variação da pressão crítica até a espessura de 2,5 mm é praticamente nula e que a diminuição da pressão crítica para a espessura de 2,0 mm em comparação ao modelo perfeito é muito pequena. Também podemos notar uma diminuição mais acentuada da pressão crítica para espessuras inferiores a 2,0 mm.

Na tabela 4.10 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da parede arterial na posição onde foi introduzida a imperfeição localizada.

Espessura do “anel” (mm)	Tensão máxima (kPa)
3,5 (perfeito)	302,4
3,0	315,2
2,5	312,6
2,0	482,5
1,5	678,8
1,0	966,3

Tabela 4.10 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 3

A figura 4.73 faz uma representação gráfica da tabela 4.10.

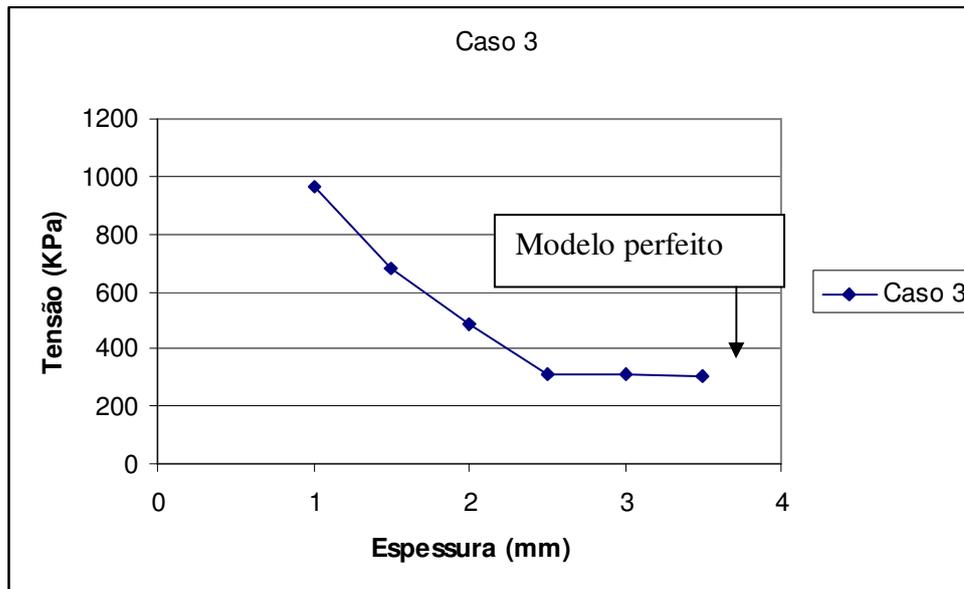


Figura 4.73 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 3 e valor da tensão máxima trativa principal no modelo perfeito

Pela figura 4.73 podemos observar que a tensão máxima trativa principal permanece praticamente constante entre a espessura de 3,5 mm e 2,5 mm, a partir de 2,5 mm a tensão máxima trativa principal aumenta praticamente de forma linear à medida que a espessura diminui e a deformação fica localizada.

#### 4.7.3.4. Caso 4

No quarto caso das imperfeições localizadas a imperfeição está localizada entre a cota 10 cm e a cota 11 cm (medido a partir da base) tendo assim 1 cm de altura e compreendendo um oitavo da circunferência da casca representativa da aorta, tendo, portanto, 1,11 cm de largura.

Na figura 4.74 podemos observar a posição em que se encontra o segundo caso de imperfeições localizadas.

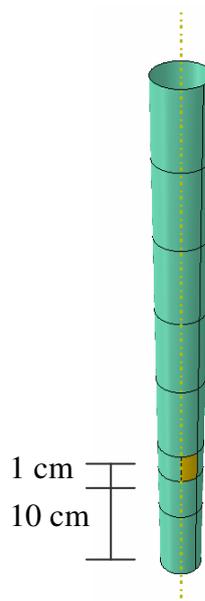


Figura 4.74 – Posição do quarto caso das imperfeições localizadas

#### 4.7.3.4.1. Caso 4 – espessura de 3,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 3,0 mm. Na figura 4.75 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 130,31 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 332,1 kPa.

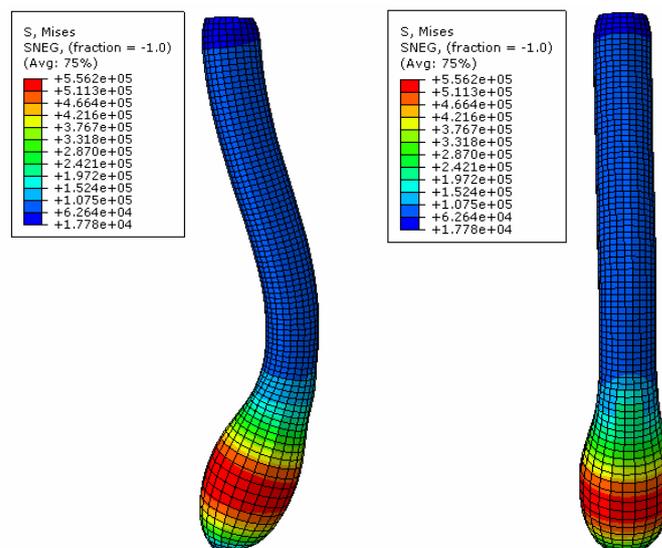


Figura 4.75 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm

#### 4.7.3.4.2.

##### Caso 4 – espessura de 2,5 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 2,5 mm. Na figura 4.76 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 130,30 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 362,1 kPa.

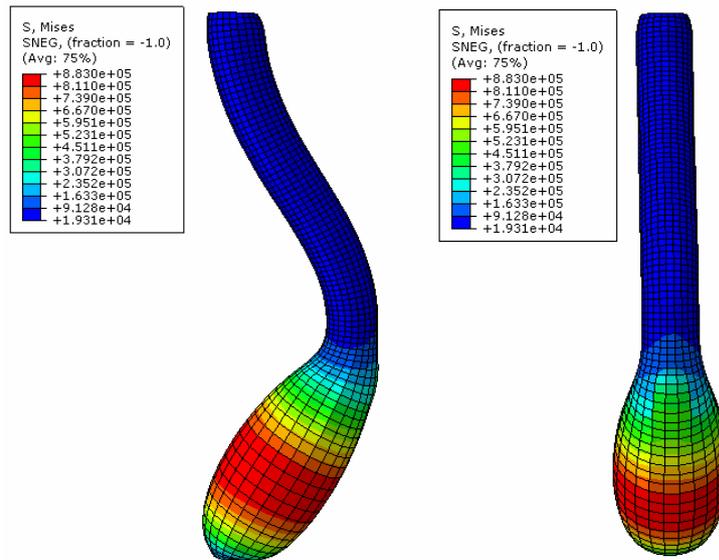


Figura 4.76 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,5 mm

#### 4.7.3.4.3.

##### Caso 4 – espessura de 2,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 2,0 mm. Na figura 4.77 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 130,23 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 562,3 kPa.

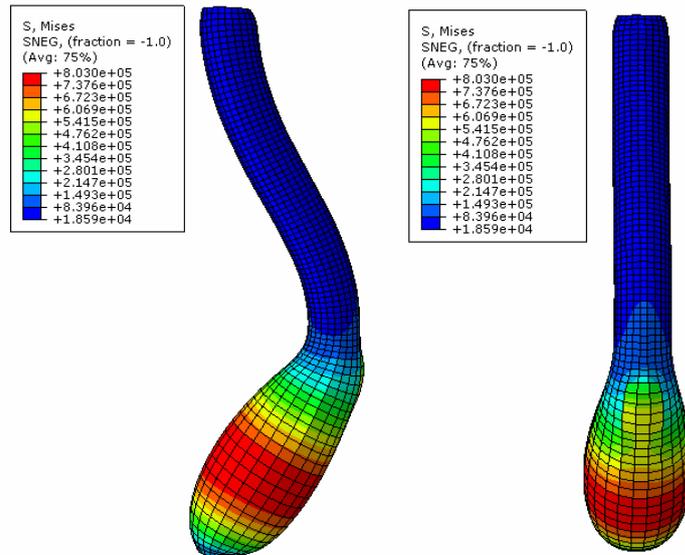


Figura 4.77 – Configurações deformadas para imperfeição de 2,0 mm

#### 4.7.3.4.4.

#### Caso 4 – espessura de 1,5 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 1,5 mm. Na figura 4.78 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 128,33 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 915,8 kPa.

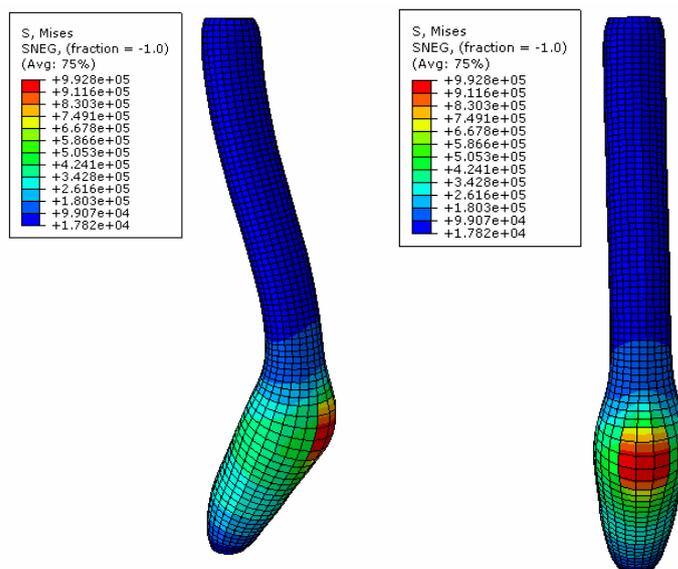


Figura 4.78 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,5 mm

#### 4.7.3.4.5.

#### Caso 4 – espessura de 1,0 mm

Neste caso a espessura da imperfeição localizada foi reduzida para 1,0 mm. Na figura 4.79 podemos observar duas vistas da configuração deformada. A pressão crítica encontrada foi de 124,94 mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1432,0 kPa.

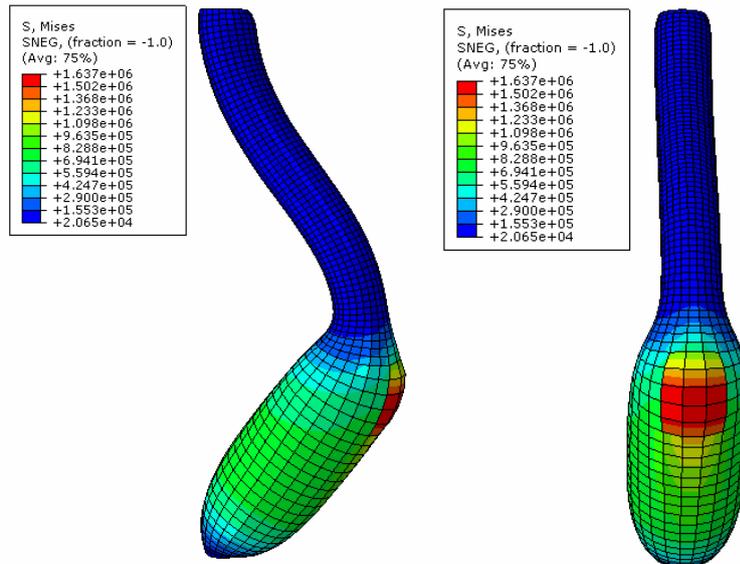


Figura 4.79 – Configurações deformadas para imperfeição de 1,0 mm

#### 4.7.3.4.6.

#### Estudo comparativo do caso 4

Na figura 4.80 podemos observar a configuração deformada para cada uma dos casos estudados anteriormente, onde a espessura foi reduzida progressivamente de para 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm. Pela figura podemos observar que a medida que a espessura diminui o bulbo se concentra na região da imperfeição e aumenta a flambagem lateral.

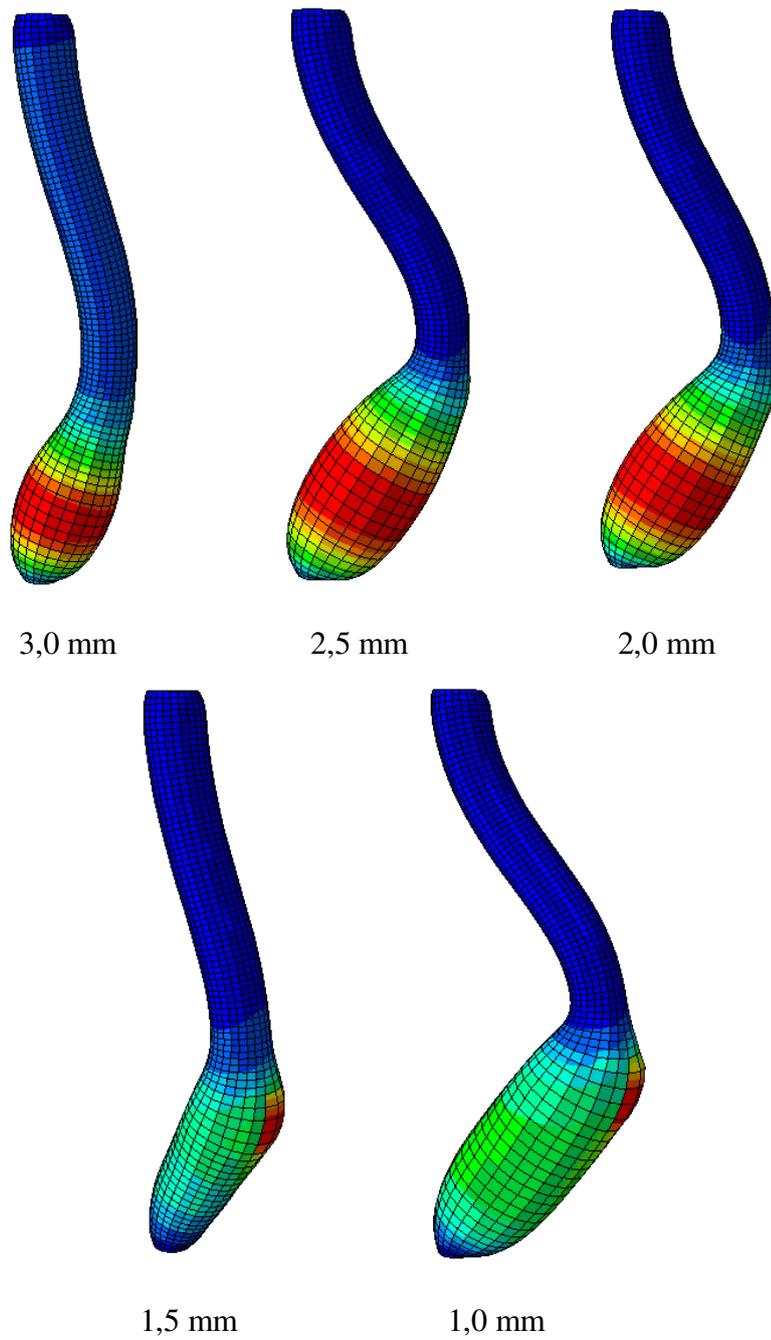


Figura 4.80 – Configurações deformadas para imperfeição de 3,0 mm, 2,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm e 1,0 mm para o caso 4 de imperfeições locais

No gráfico da figura 4.81 podemos observar a variação da pressão crítica em função da diminuição da espessura da parede arterial na posição onde foi introduzida a imperfeição localizada.

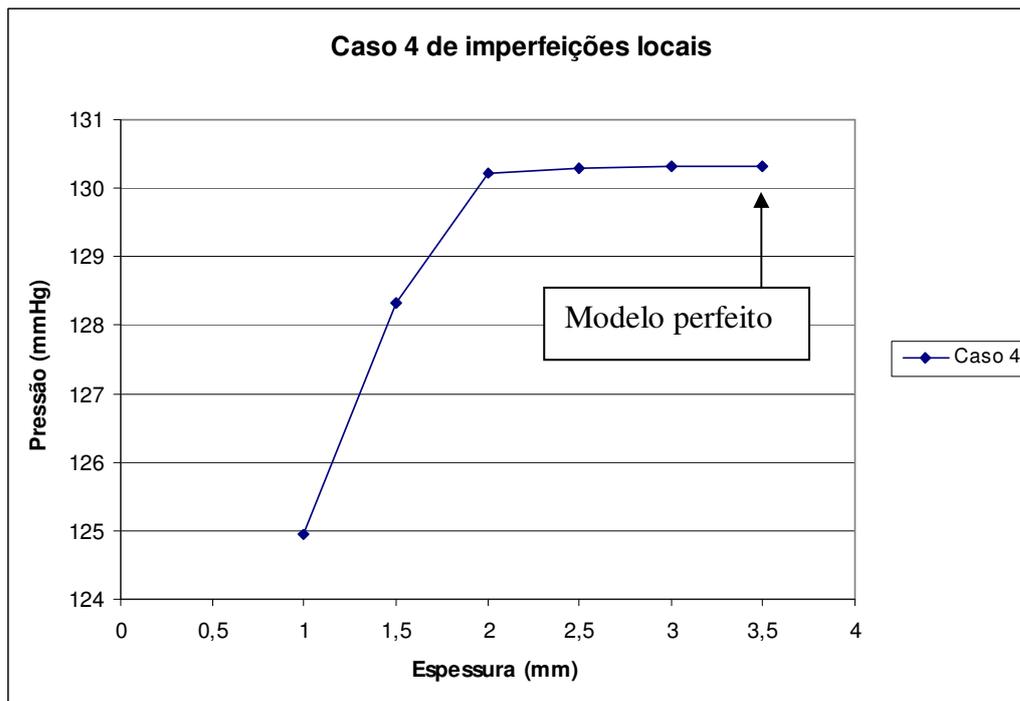


Figura 4.81 – Variação da pressão crítica para o caso 4 e valor da pressão crítica no modelo perfeito

Podemos observar que a variação da pressão crítica até a espessura de 2,0 mm é praticamente nula. Também podemos notar uma diminuição mais acentuada da pressão crítica para espessuras inferiores a 2,0 mm, como no caso 3 pois a partir deste instante as deformações são localizadas.

Na tabela 4.11 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da espessura da parede arterial na posição onde foi introduzida a imperfeição localizada.

Espessura do “anel” (mm)	Tensão máxima (kPa)
3,5 (perfeito)	302,4
3,0	332,1
2,5	362,1
2,0	562,3
1,5	915,8
1,0	1432,0

Tabela 4.11 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 4

A figura 4.82 faz uma representação gráfica da tabela 4.11.

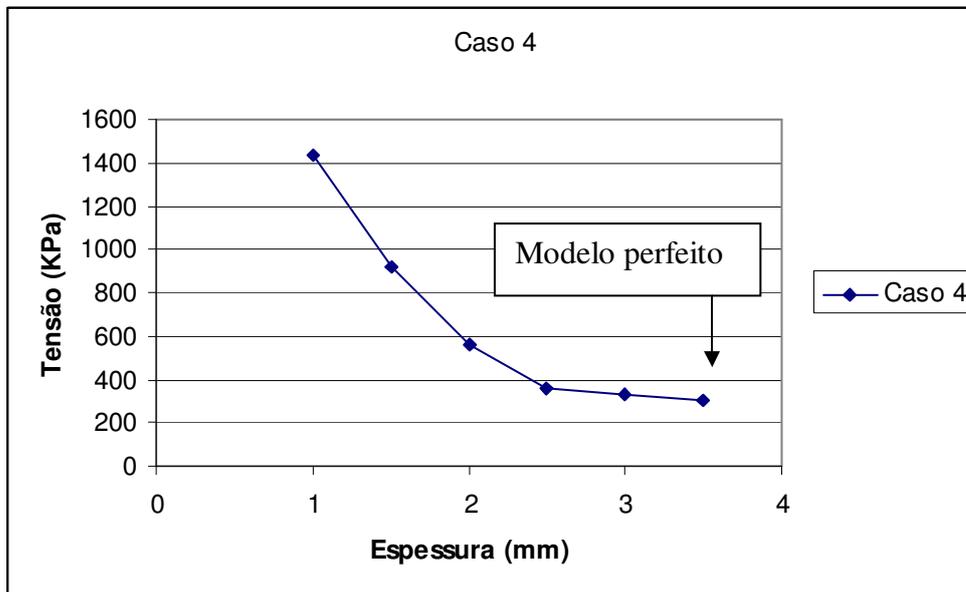


Figura 4.82 – Variação da tensão máxima trativa principal para o caso 4

Pela figura 4.82 podemos observar que a tensão máxima trativa principal permanece praticamente constante entre a espessura de 3,5 mm e 2,5 mm, a partir de 2,5 mm a tensão máxima trativa principal aumenta praticamente de forma linear à medida que a espessura diminui.

#### 4.7.3.5.

#### Estudo comparativo da análise da pressão crítica para imperfeição local

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 4.83 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.

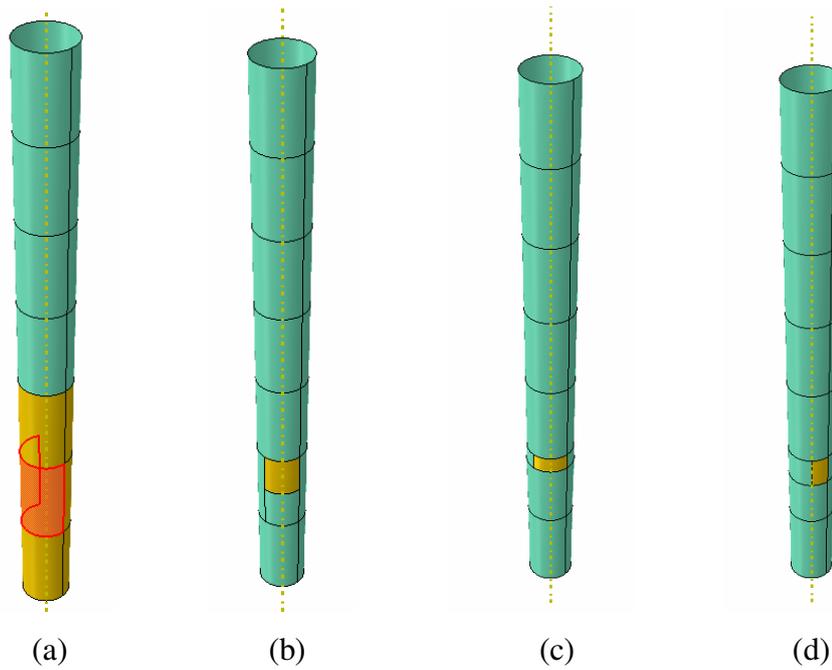


Figura 4.83 – Posição das imperfeições para os casos estudados (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3, (d) caso 4; figuras fora de escala

Na figura 4.84 podemos observar a variação da pressão crítica para cada um dos casos em análise.

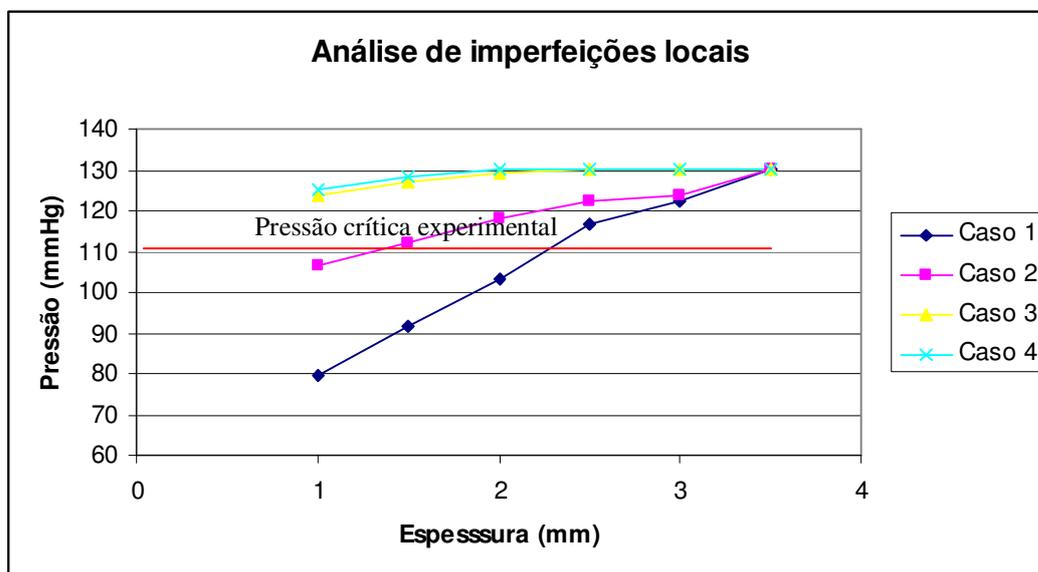


Figura 4.84 – Variação da pressão crítica em função de imperfeições locais

Podemos observar que à medida que diminuimos a espessura da imperfeição a pressão crítica diminui. Observamos também que a medida que o tamanho da imperfeição diminui a variação a 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 as espessuras são reduzidas 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.

#### **4.7.4.**

#### **Análise da pressão crítica para imperfeições geradas por excentricidade**

Neste estudo realizado com elementos sólidos C3D10 e 4094 elementos, foram realizadas duas análises, uma com o funcional de energia Ogden e outra com o funcional de energia Neo Hooke. Também foi realizada uma análise com a diminuição gradual da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para fazermos uma análise que simulasse a Síndrome de Marfan.

Para a realização deste caso de imperfeição, a parte externa do modelo representativo da aorta foi construída sempre com o seu eixo centrado enquanto a parte interna foi construída com excentricidades crescentes fora do eixo, assim teremos sempre um lado mais espesso que o outro, sendo o que realmente ocorre no caso real. Neste estudo as excentricidades adotadas são de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm.

##### **4.7.4.1.**

##### **Ogden – excentricidade de 0,5**

Na figura 4.85 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo não foi alongado e a região interna apresentava uma excentricidade de 0,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 109,4mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 489,4 kPa.

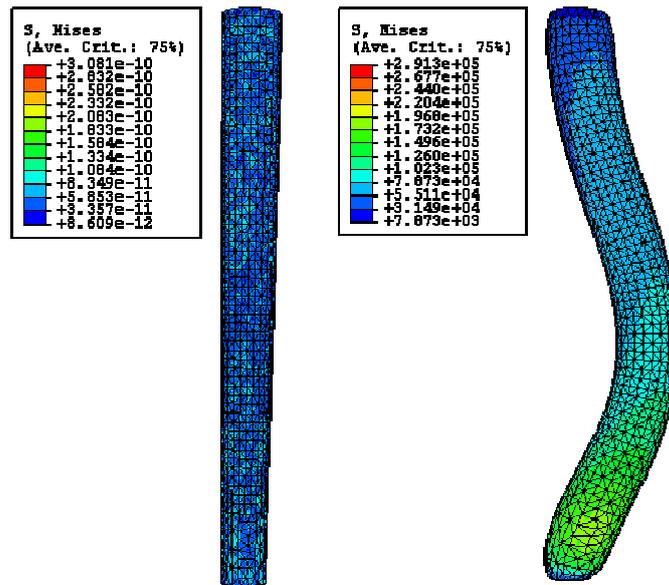


Figura 4.85 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Sem alongamento – excentricidade de 0,5 mm

Na figura 4.86 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 0,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 104,54mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 499,7 kPa.

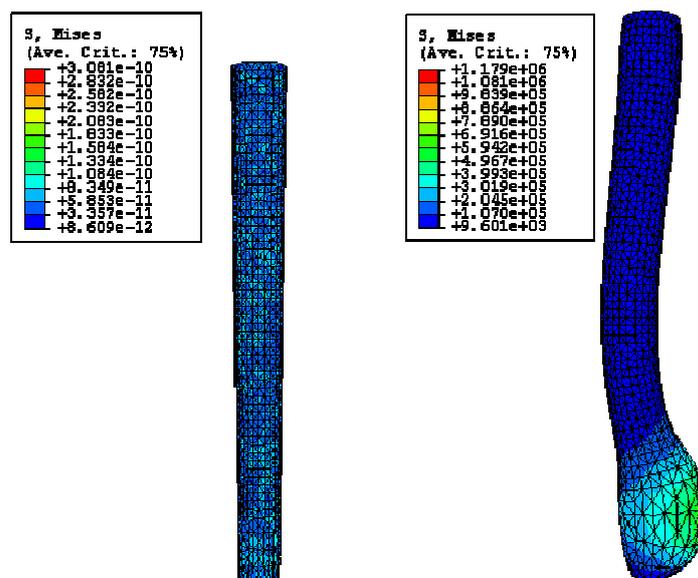


Figura 4.86 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 mm

Na figura 4.87 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden. O modelo foi alongado de 20% e a região interna apresentava uma excentricidade de 0,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 95,27mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 712,4 kPa.

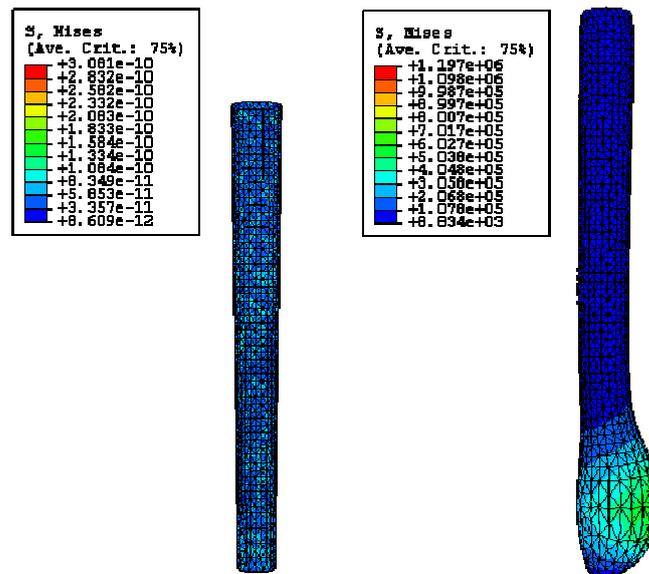


Figura 4.87 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Alongamento de 20% – excentricidade de 0,5 mm

#### 4.7.4.2. Avaliação gráfica

Na figura 4.88 podemos observar as configurações deformadas com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento do comprimento inicial e com excentricidade de 0,5 mm para o funcional de energia Ogden 1.

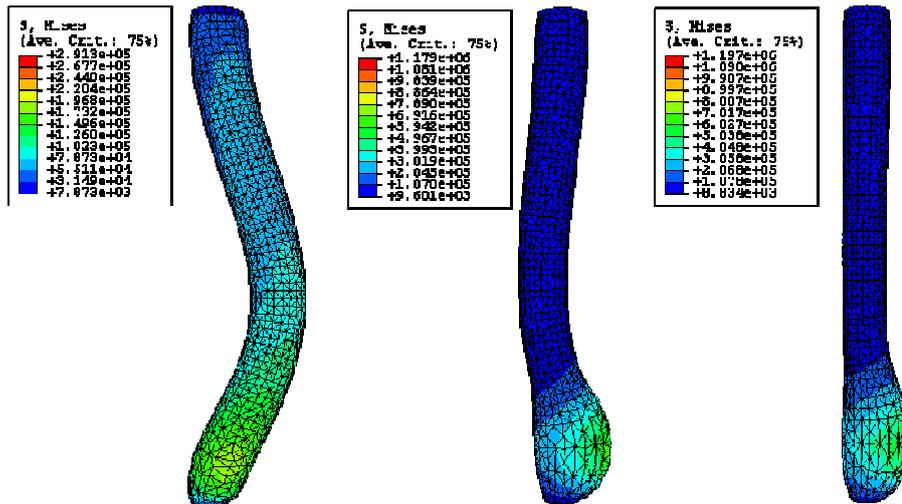


Figura 4.88 – Configurações deformadas com excentricidade de 0,5 mm para Ogden com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento

No gráfico da figura 4.89 podemos observar a variação da pressão crítica em função do alongamento aplicado para uma excentricidade de 0,5mm, utilizando-se o funcional de energia Ogden.

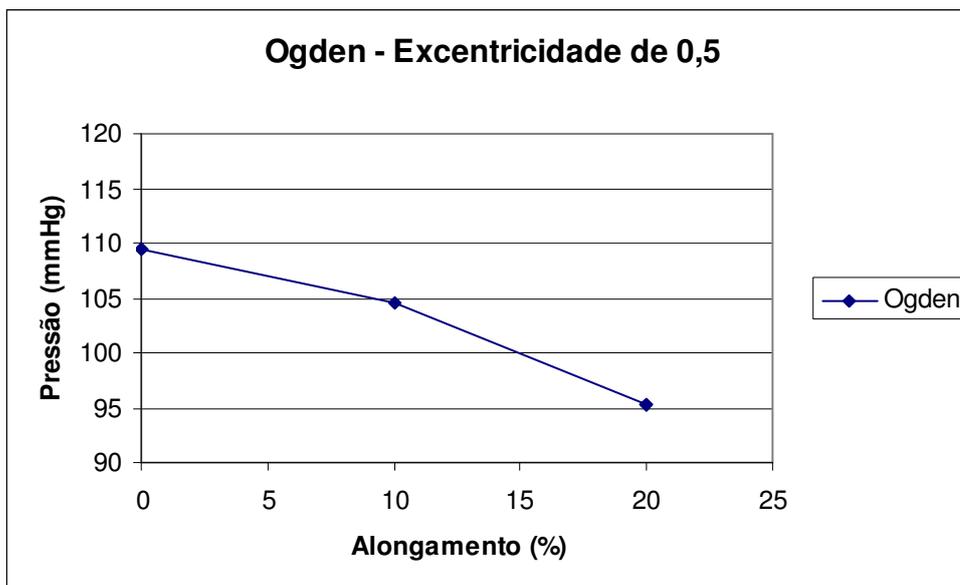


Figura 4.89 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 0,5mm - Ogden

Podemos observar que a pressão crítica diminui com o aumento do alongamento, porém não se dá de forma linear. Também podemos observar que a partir de 10 % de alongamento o bulbo concentra-se na parte inferior e é bem definido enquanto no caso onde não é aplicado o alongamento ocorre uma flambagem bem acentuada.

Na tabela 4.12 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Ogden 1.

Alongamento (%)	Tensão máxima trativa (kPa)
0	489,4
10	499,7
20	712,4

Tabela 4.12 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Ogden 1

A figura 4.90 faz uma representação gráfica da tabela 4.12.

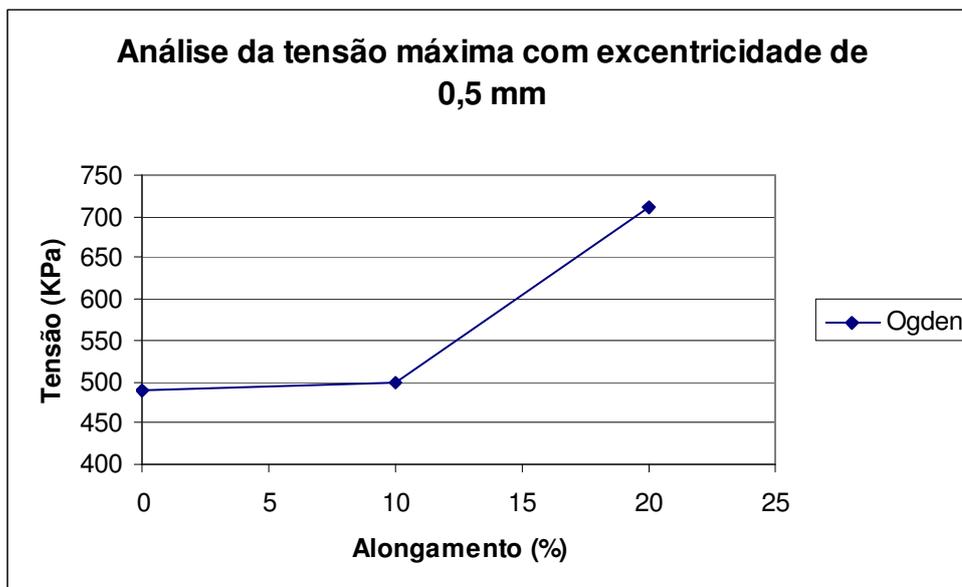


Figura 4.90 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Ogden 1

#### 4.7.4.3.

#### Neo Hooke – excentricidade de 0,5

Na figura 4.91 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo não foi alongado e a região interna apresentava uma

excentricidade de 0,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 137,99mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 466,7 kPa.

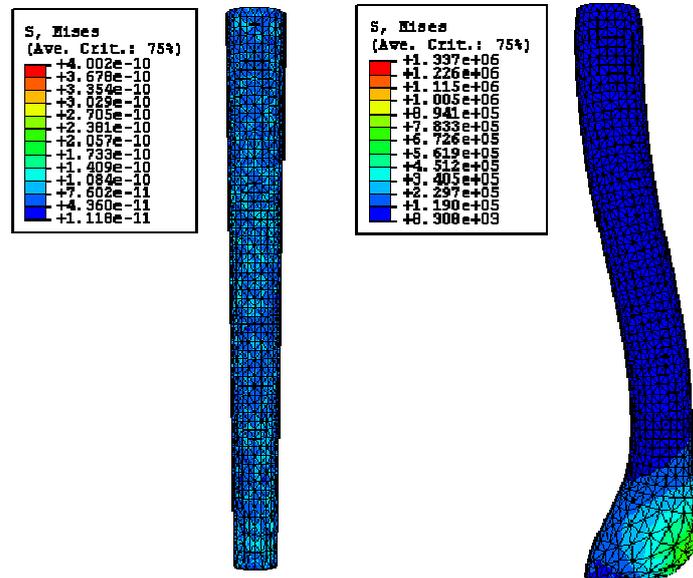


Figura 4.91 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 0,5 mm

Na figura 4.92 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 0.5mm. A pressão crítica para este caso foi de 127,73mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 527,7 kPa.

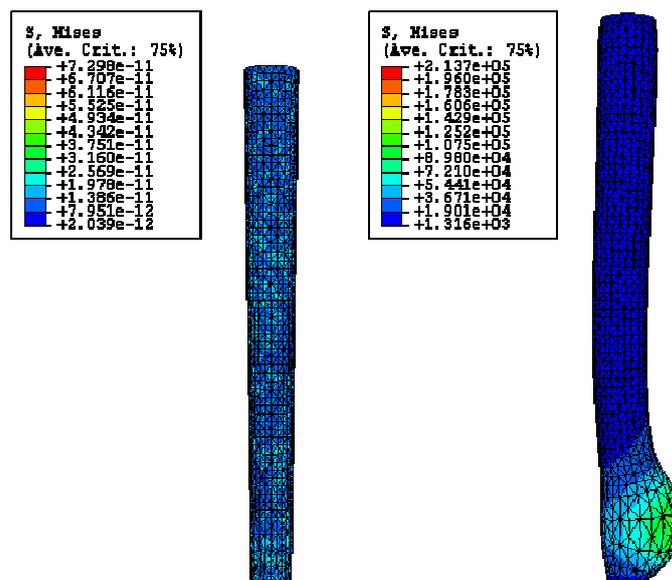


Figura 4.92 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 mm

Na figura 4.93 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 20% e a região interna apresentava uma excentricidade de 0,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 115,34mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 496,3 kPa.

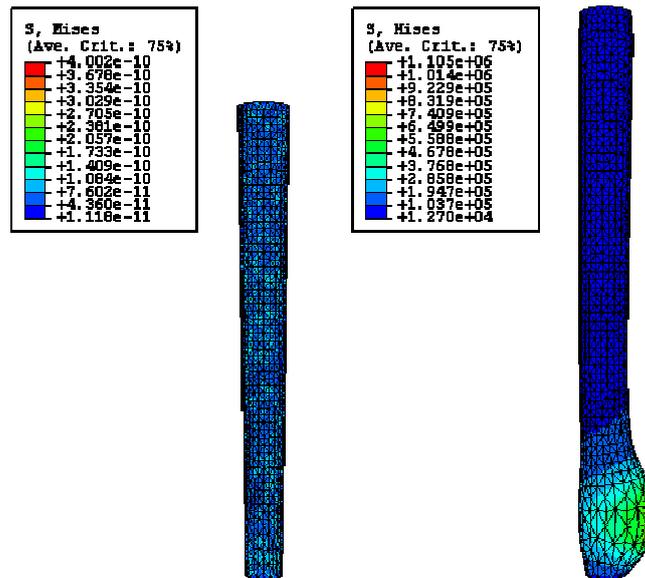


Figura 4.93 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 20% – excentricidade de 0,5 mm

#### 4.7.4.4. Avaliação gráfica

Na figura 4.94 podemos observar as configurações deformadas com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento do comprimento inicial e com excentricidade de 0,5 mm para o funcional de energia Neo Hooke.

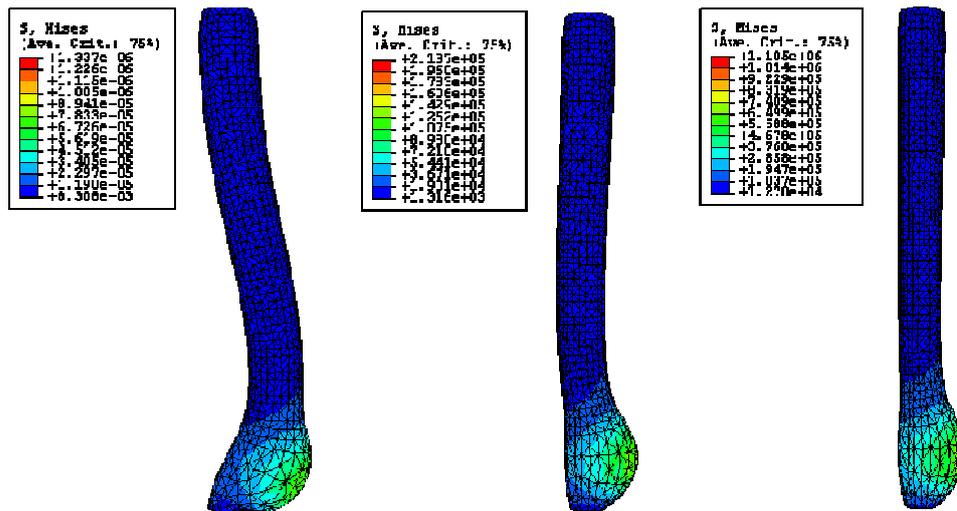


Figura 4.94 – Configurações deformadas com excentricidade de 0,5 mm para Neo Hooke com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento

No gráfico da figura 4.95 podemos observar a variação da pressão crítica em função do alongamento aplicado para uma excentricidade de 0,5mm, utilizando-se o funcional de energia Neo Hooke.

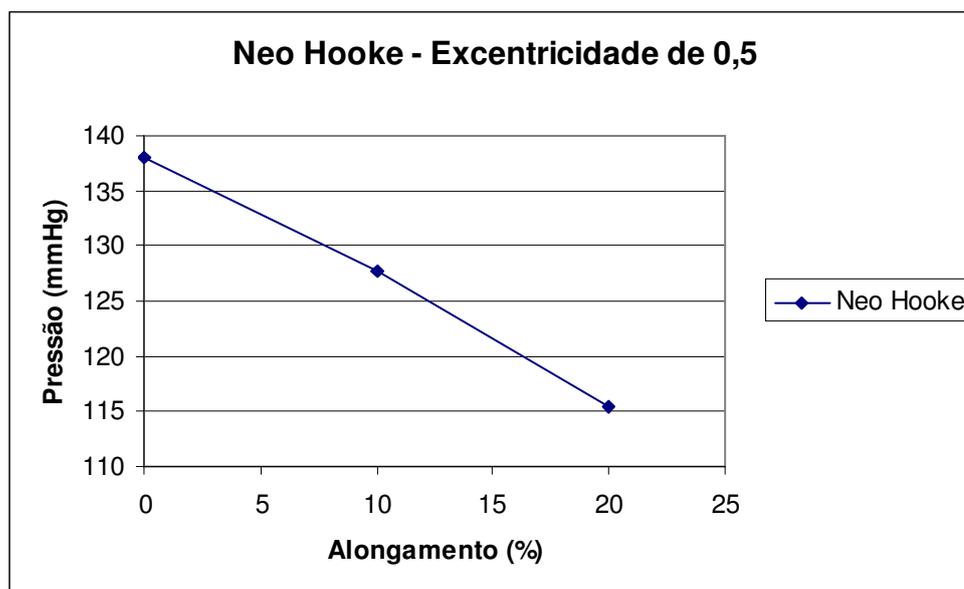


Figura 4.95 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 0,5mm – Neo Hooke

Podemos observar que com o funcional de energia Neo Hooke o bulbo concentra-se na parte inferior em todos os casos e a pressão crítica é praticamente linear.

Na tabela 4.13 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Neo Hooke.

Alongamento (%)	Tensão trativa máxima (kPa)
0	466,7
10	527,7
20	496,3

Tabela 4.13 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Neo Hooke

A figura 4.96 faz uma representação gráfica da tabela 4.12.

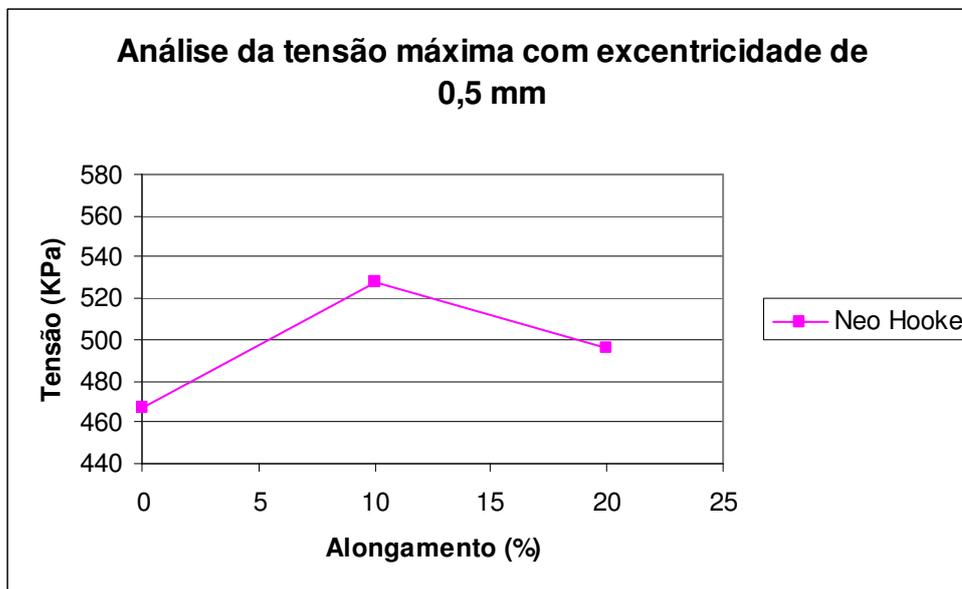


Figura 4.96 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 0,5 mm e funcional de energia Neo Hooke

#### 4.7.4.5. Ogden – excentricidade de 1,0

Na figura 4.97 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo não foi alongado e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 104,77mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 335,1 kPa.

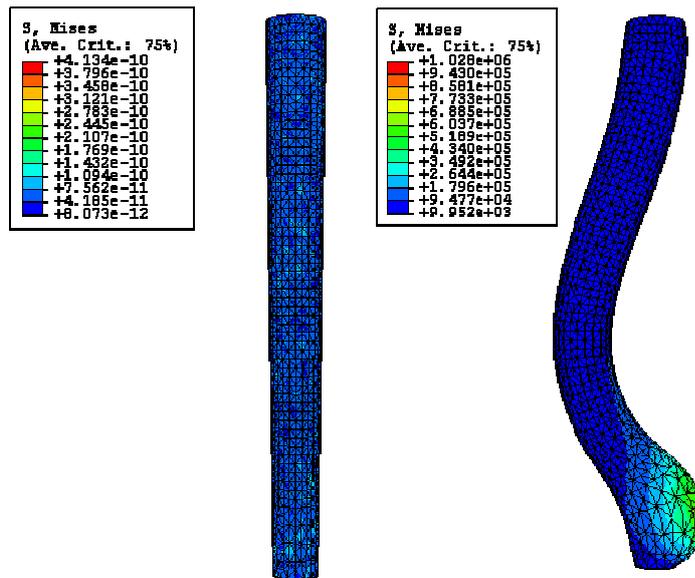


Figura 4.97 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 1,0 mm

Na figura 4.98 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 95,39mmHg. Para esta pressão a tensão máxima tratativa principal foi de 713,7 kPa.

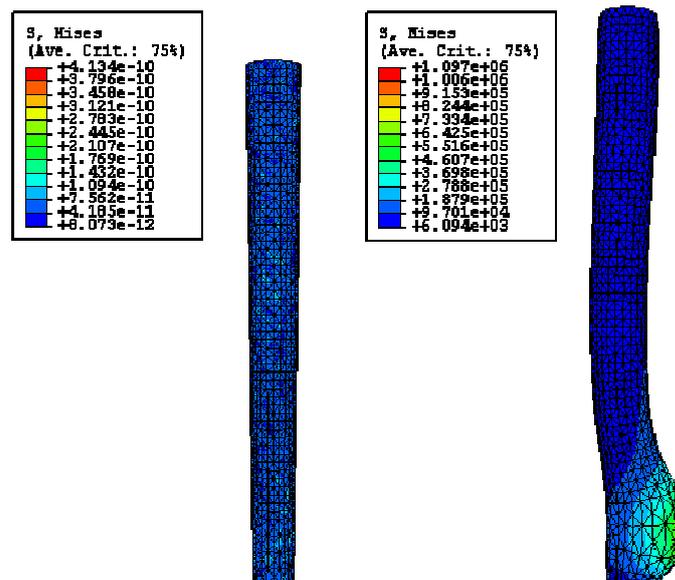


Figura 4.98 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 mm

Na figura 4.99 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo foi alongado de 20% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 88,17mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 866,3 kPa.

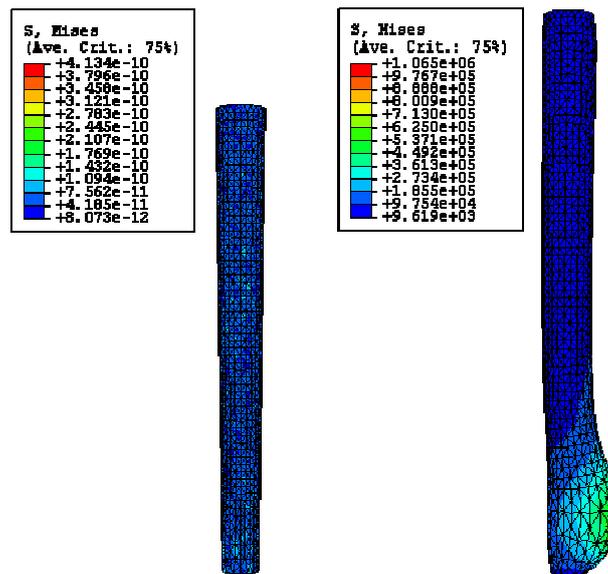


Figura 4.99 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 20% – excentricidade de 1,0 mm

#### 4.7.4.6. Avaliação gráfica

Na figura 4.100 podemos observar as configurações deformadas com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento do comprimento inicial e com excentricidade de 1,0 mm para o funcional de energia Ogden.

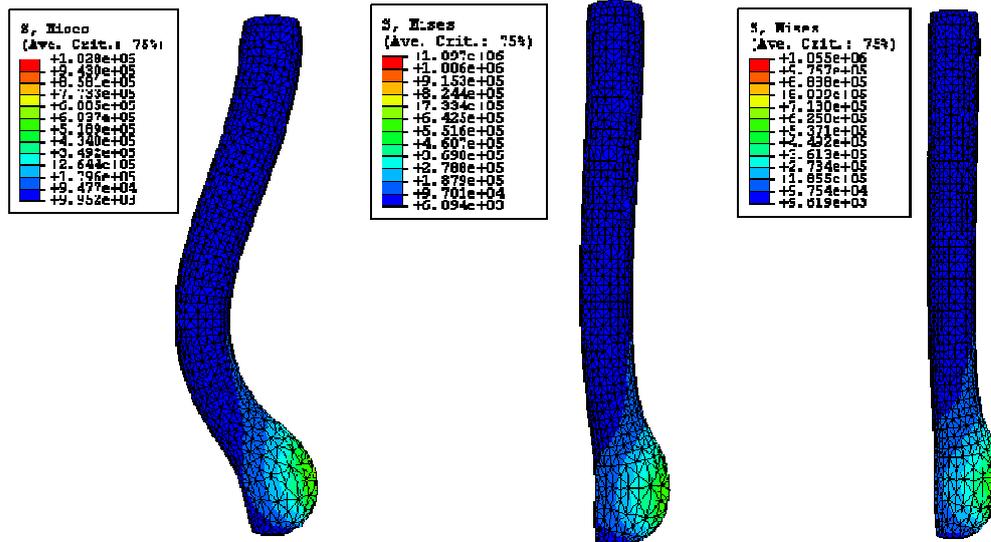


Figura 4.100 – Configurações deformadas com excentricidade de 1,0 mm para Ogden com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento

No gráfico da figura 4.101 podemos observar a variação da pressão crítica em função do alongamento aplicado para uma excentricidade de 1,0mm, utilizando-se o funcional de energia Ogden.

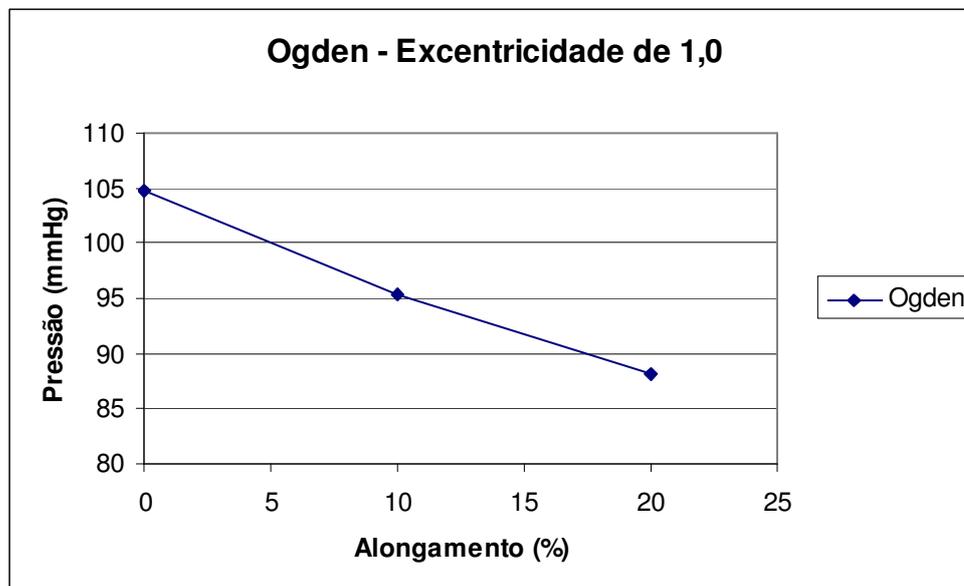


Figura 4.101 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,0mm - Ogden

Para o caso com excentricidade de 1,0 mm podemos observar que o bulbo localiza-se na parte inferior sem que no caso sem alongamento a flambagem é bem acentuada, com 10 % de alongamento a flambagem é pequena e no caso com 20 % de alongamento a flambagem é praticamente nula.

Na tabela 4.14 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 1,0 mm e funcional de energia Ogden 1.

Alongamento (%)	Tensão trativa máxima (kPa)
0	335,1
10	713,7
20	866,3

Tabela 4.14 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,0 mm e funcional de energia Ogden 1

A figura 4.102 faz uma representação gráfica da tabela 4.14.

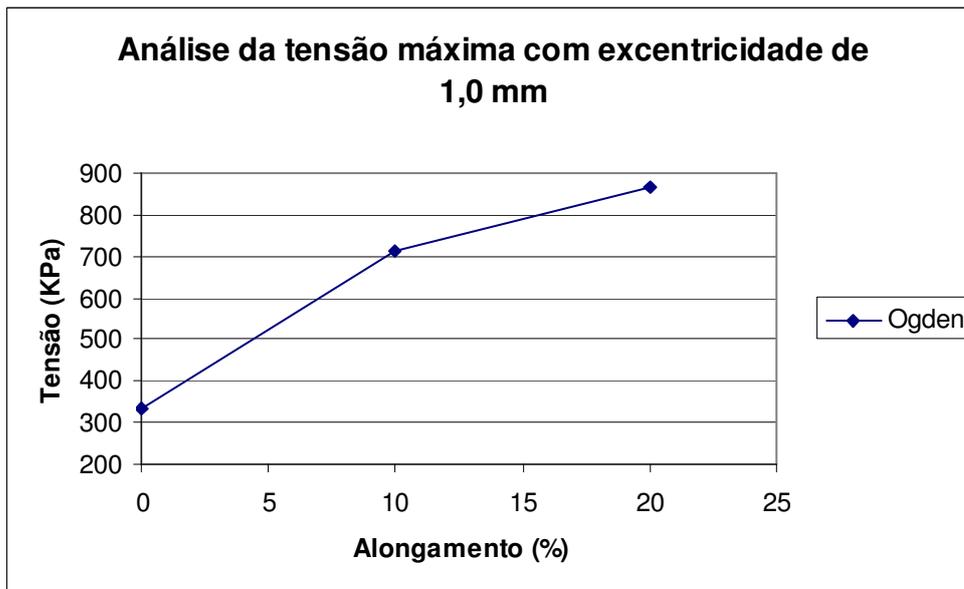


Figura 4.102 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,0 mm e funcional de energia Ogden 1

#### 4.7.4.7. Neo Hooke – excentricidade de 1,0

Na figura 4.103 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo não foi alongado e a região interna apresentava uma

excentricidade de 1,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 120,37mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 543,7 kPa.

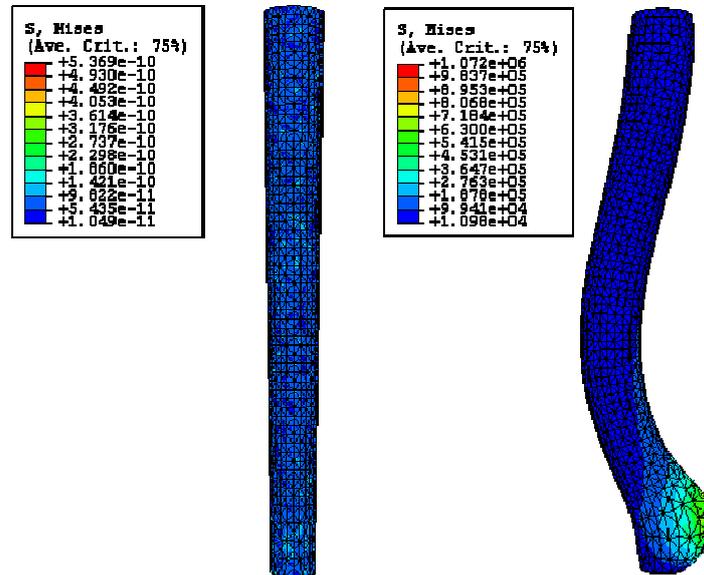


Figura 4.103 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 1,0 mm

Na figura 4.104 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 114,87mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 758,5 kPa.

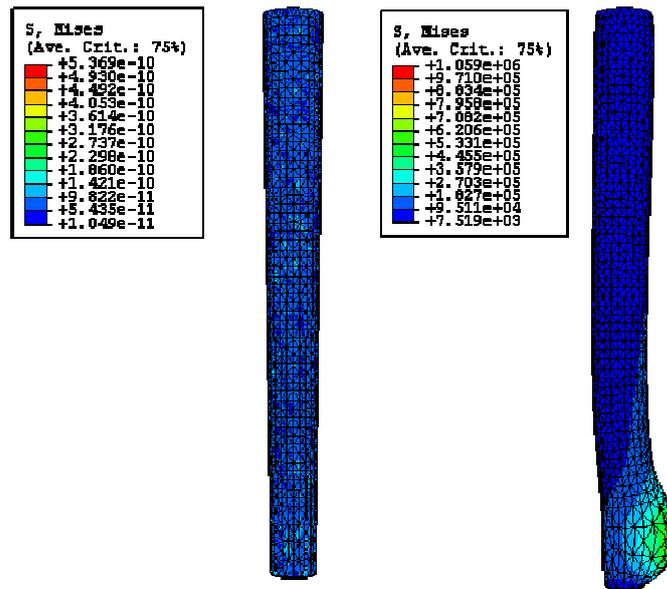


Figura 4.104 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 mm

Na figura 4.105 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 20% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 104,81mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 791,1 kPa.

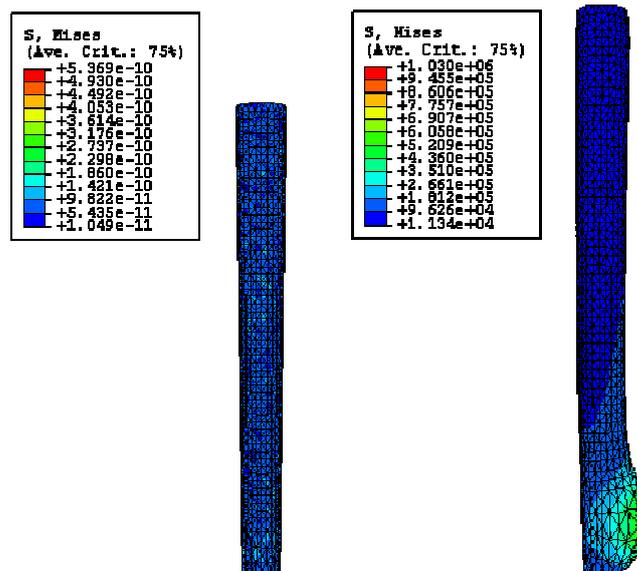


Figura 4.105 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 20% – excentricidade de 1,0 mm

#### 4.7.4.8. Avaliação gráfica

Na figura 4.106 podemos observar as configurações deformadas com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento do comprimento inicial e com excentricidade de 1,0 mm para o funcional de energia Neo Hooke.

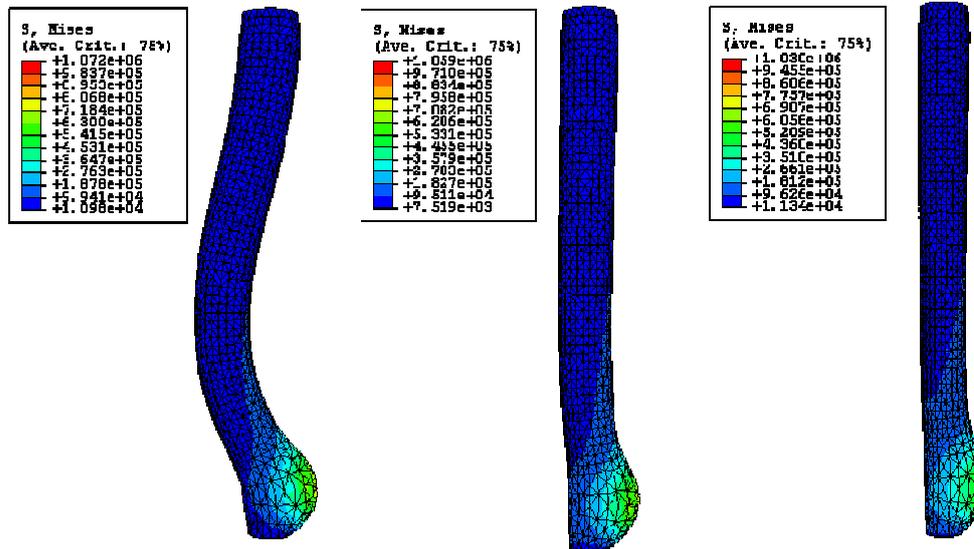


Figura 4.106 – Configurações deformadas com excentricidade de 1,0 mm para Neo Hooke com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento

No gráfico da figura 4.107 podemos observar a variação da pressão crítica em função do alongamento aplicado para uma excentricidade de 1,0mm, utilizando-se o funcional de energia Neo Hooke.

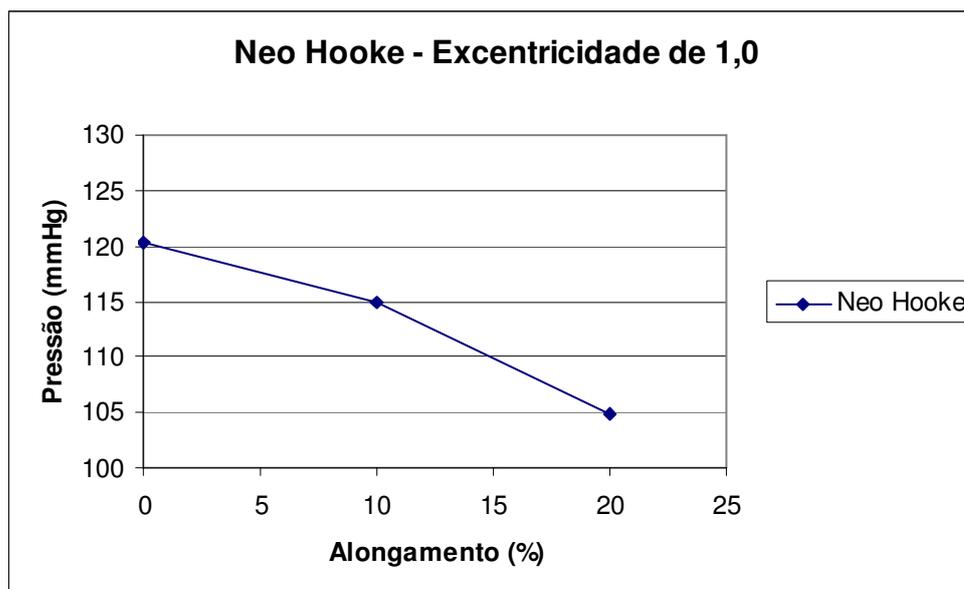


Figura 4.107 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,0 mm – Neo Hooke

Na tabela 4.15 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 1,0 mm e funcional de energia Neo Hooke.

Alongamento (%)	Tensão trativa máxima (kPa)
0	543,7
10	758,5
20	791,1

Tabela 4.15 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,0 mm e funcional de energia Neo Hooke

A figura 4.108 faz uma representação gráfica da tabela 4.15.

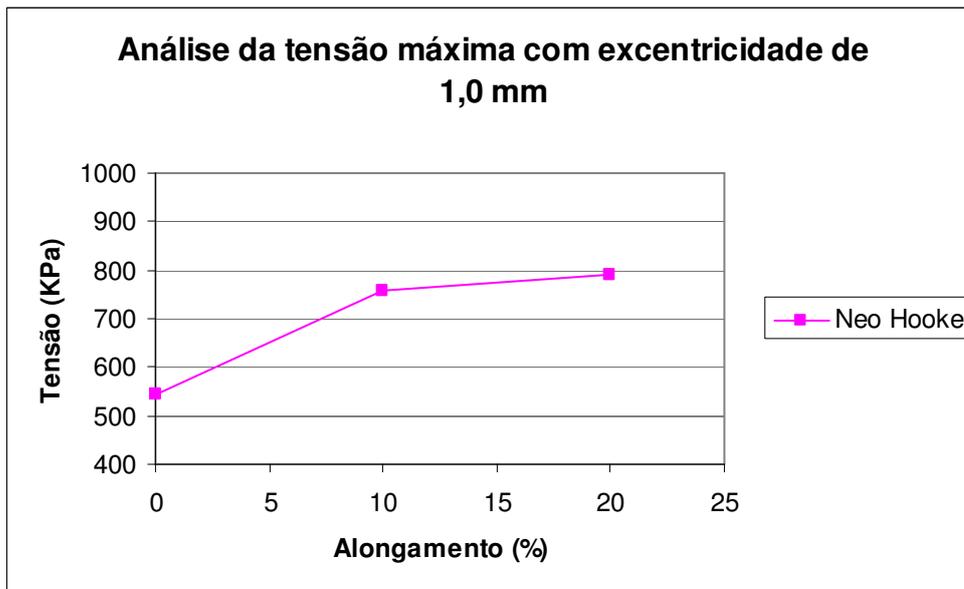


Figura 4.108 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,0 mm e funcional de energia Neo Hooke

#### 4.7.4.9. Ogden – excentricidade de 1,5

Na figura 4.109 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo não foi alongado e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 81,81mmHg. Para esta pressão a tensão máxima tratativa principal foi de 824,6 kPa.

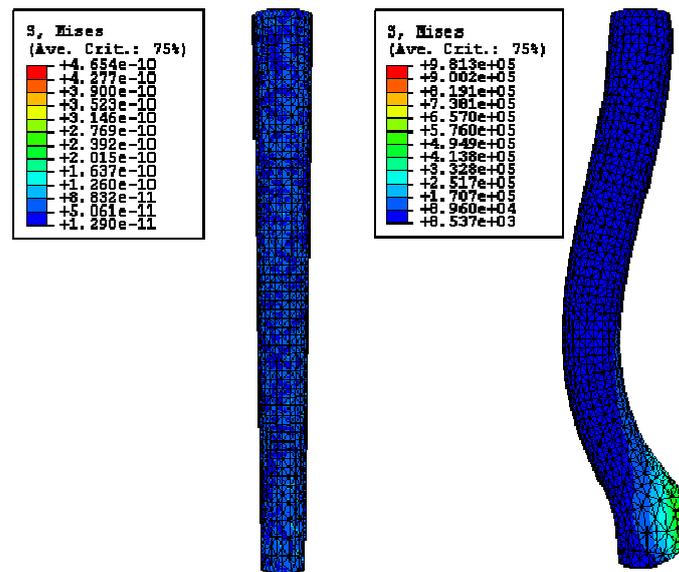


Figura 4.109 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 1,5 mm

Na figura 4.110 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1.5mm. A pressão crítica para este caso foi de 80,47mmHg. Para esta pressão a tensão máxima tratativa principal foi de 921,0 kPa.

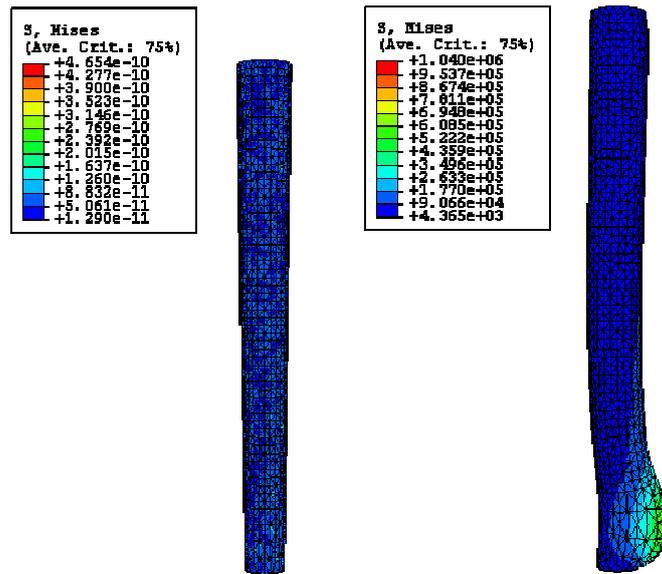


Figura 4.110 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 mm

Na figura 4.111 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo foi alongado de 20% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 75,42mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1012,0 kPa.

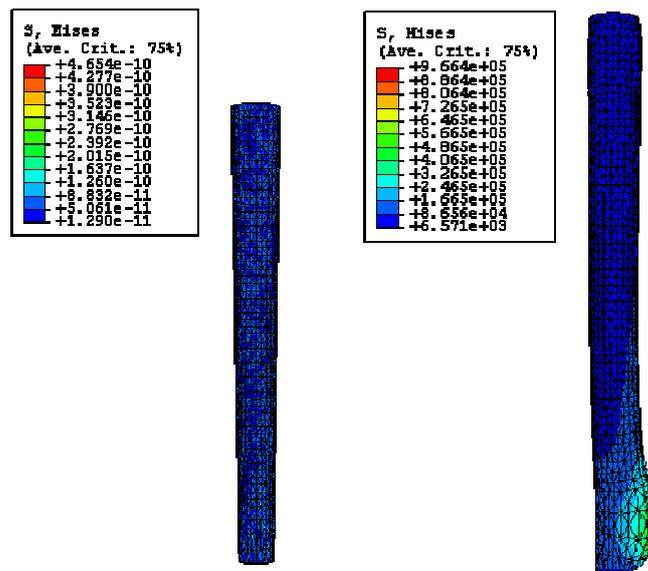


Figura 4.111 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 20% – excentricidade de 1,5 mm

#### 4.7.4.10. Avaliação gráfica

Na figura 4.112 podemos observar as configurações deformadas com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento do comprimento inicial e com excentricidade de 1,5 mm para o funcional de energia Ogden.

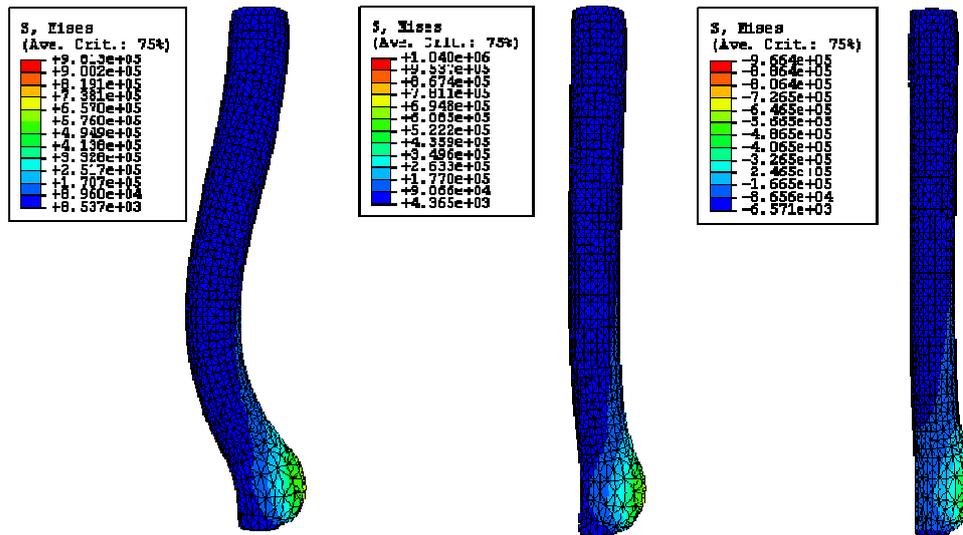


Figura 4.112 – Configurações deformadas com excentricidade de 1,5 mm para Ogden com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento

No gráfico da figura 4.113 podemos observar a variação da pressão crítica em função do alongamento aplicado para uma excentricidade de 1,5mm, utilizando-se o funcional de energia Ogden.

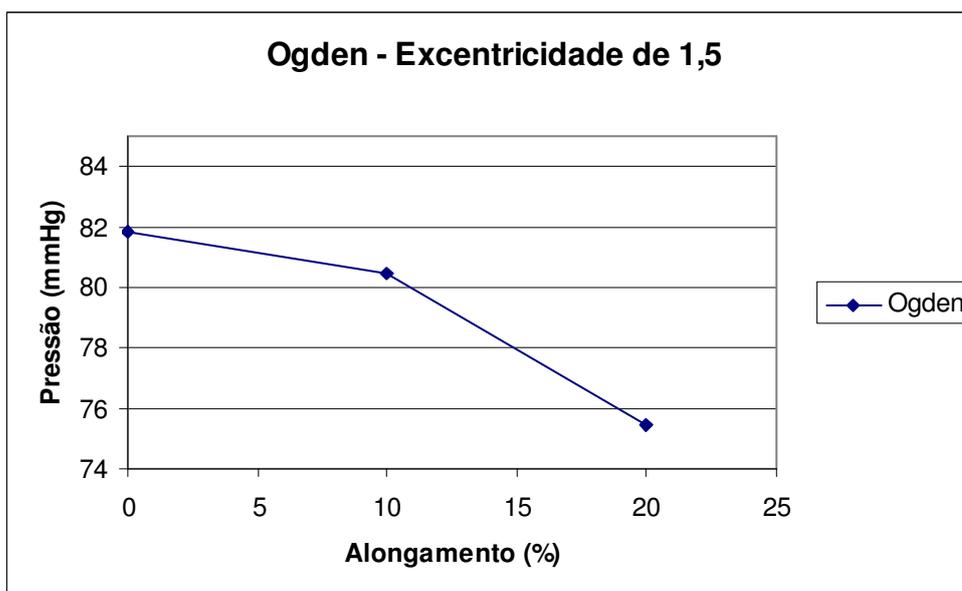


Figura 4.113 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,5mm - Ogden

Podemos observar uma diminuição da flambagem lateral e que o valor da pressão crítica de 0 % para 10 % de alongamento é praticamente a mesma, diminuindo apenas quando se tem um alongamento de 20 %.

Na tabela 4.16 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 1,5 mm e funcional de energia Ogden 1.

Alongamento (%)	Tensão trativa máxima (kPa)
0	824,6
10	921,0
20	1012,0

Tabela 4.16 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,5 mm e funcional de energia Ogden 1

A figura 4.114 faz uma representação gráfica da tabela 4.16.

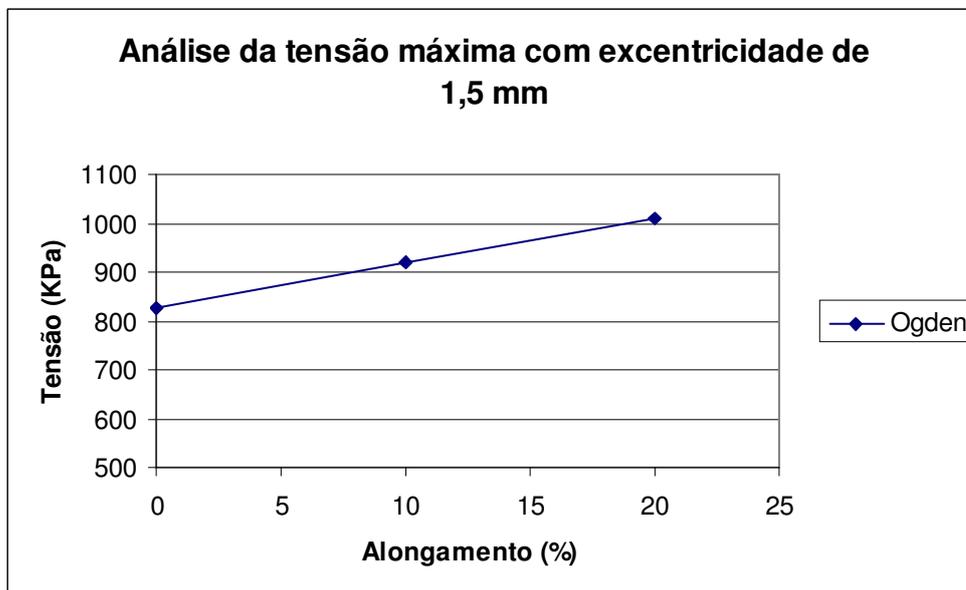


Figura 4.114 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,5 mm e funcional de energia Ogden 1

#### 4.7.4.11. Neo Hooke – excentricidade de 1,5

Na figura 4.115 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo não foi alongado e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 99,48mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 690,1 kPa.

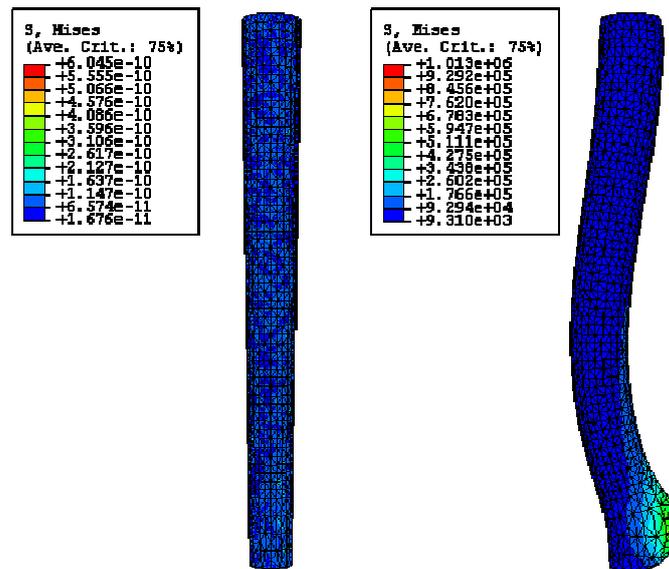


Figura 4.115 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 1,5 mm

Na figura 4.116 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 94,81mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 841,5 kPa.

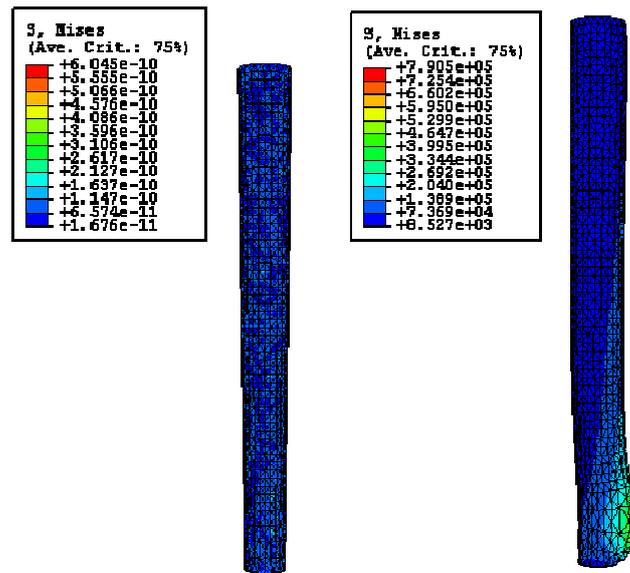


Figura 4.116 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 mm

Na figura 4.117 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 20% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A pressão crítica para este caso foi de 87,27mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 868,3 kPa.

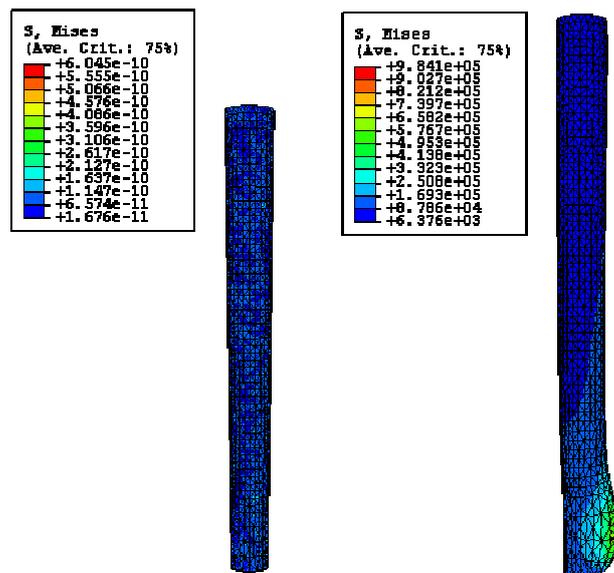


Figura 4.117 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 20% – excentricidade de 1,5 mm

#### 4.7.4.12. Avaliação gráfica

Na figura 4.118 podemos observar as configurações deformadas com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento do comprimento inicial e com excentricidade de 1,5 mm para o funcional de energia Neo Hooke.

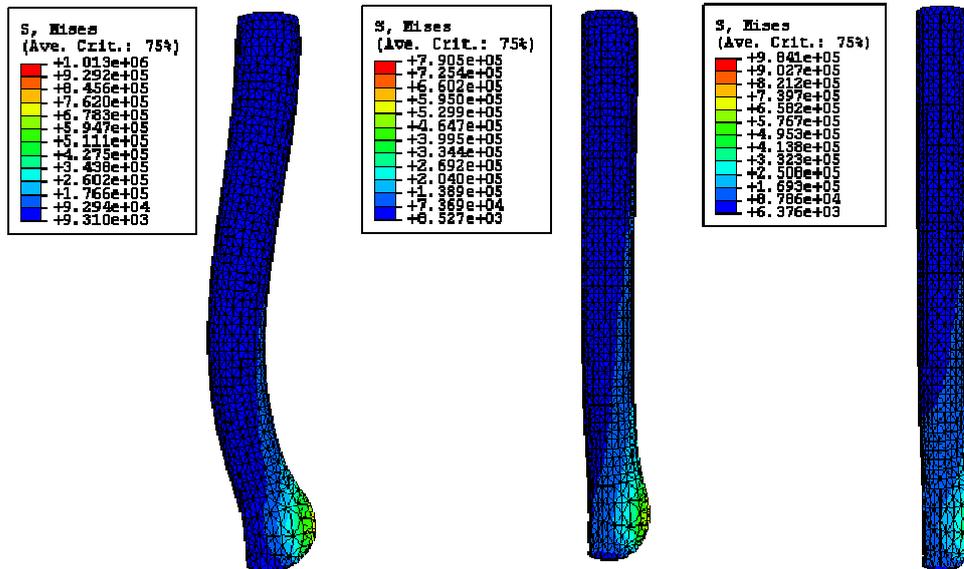


Figura 4.118 – Configurações deformadas com excentricidade de 1,5 mm para Neo Hooke com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento

No gráfico da figura 4.119 podemos observar a variação da pressão crítica em função do alongamento aplicado para uma excentricidade de 1,5mm, utilizando-se o funcional de energia Neo Hooke.

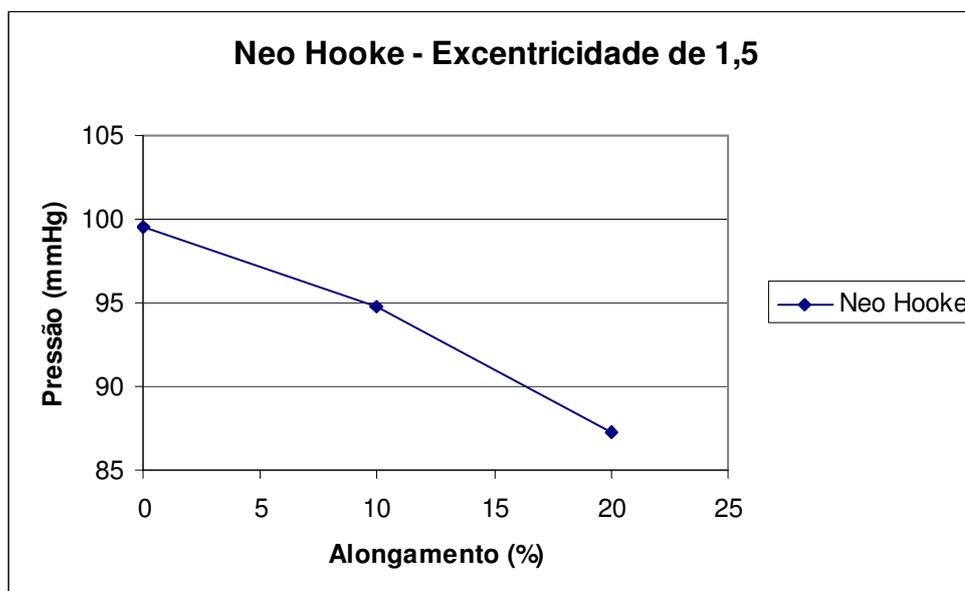


Figura 4.119 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,5mm – Neo Hooke

Na tabela 4.17 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 1,5 mm e funcional de energia Neo Hooke.

Alongamento (%)	Tensão trativa máxima (kPa)
0	690,1
10	841,5
20	868,3

Tabela 4.17 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,5 mm e funcional de energia Neo Hooke

A figura 4.120 faz uma representação gráfica da tabela 4.17.

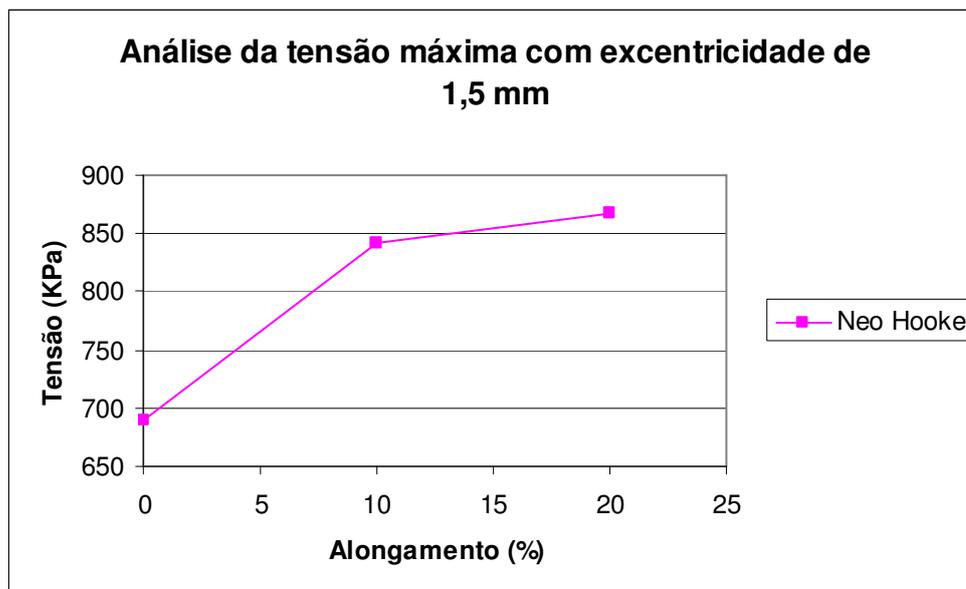


Figura 4.120 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 1,5 mm e funcional de energia Neo Hooke

#### 4.7.4.13. Ogden – excentricidade de 2,0

Na figura 4.121 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo não foi alongado e a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 62,92mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1374,0 kPa.

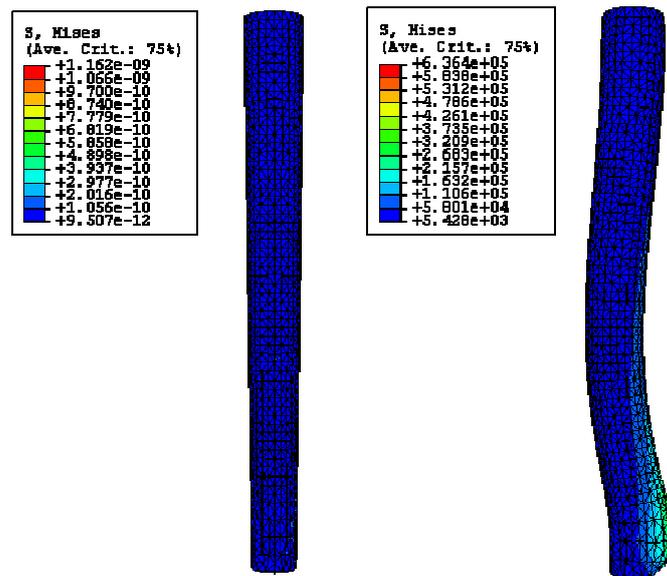


Figura 4.121 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Sem alongamento – excentricidade de 2,0 mm

Na figura 4.122 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 60,35mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1283,0 kPa.

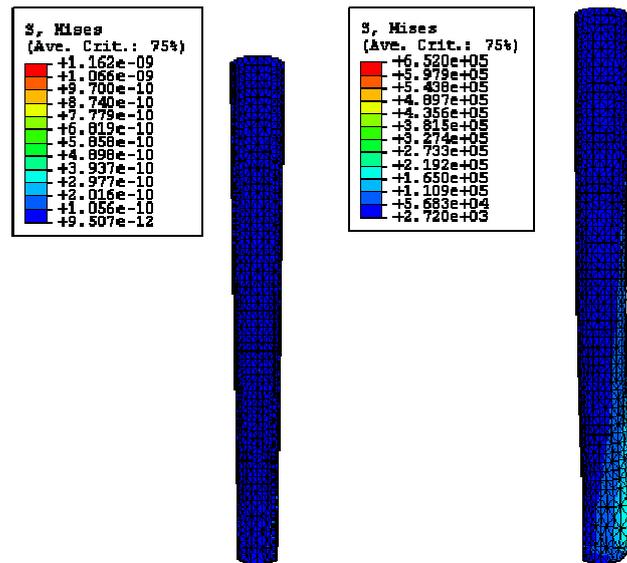


Figura 4.122 – Configuração indeformada e deformada para Ogden –Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 mm

Na figura 4.123 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Ogden, o modelo foi alongado de 20% e a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 56,72mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 799,3 kPa.

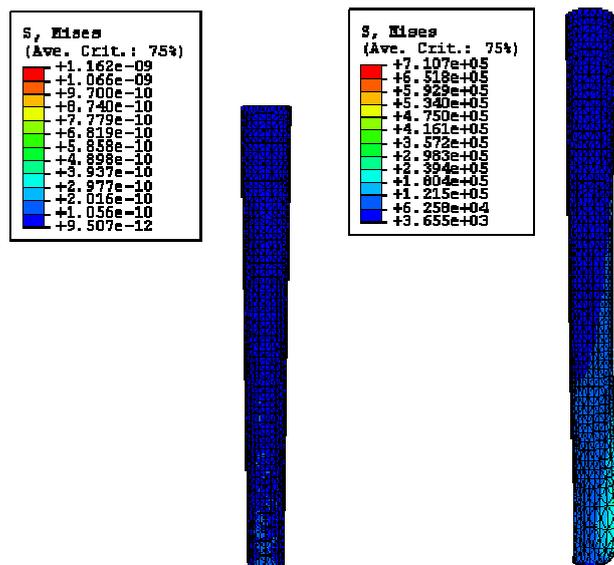


Figura 4.123 – Configuração indeformada e deformada para Ogden – Alongamento de 20% – excentricidade de 2,0 mm

#### 4.7.4.14. Avaliação gráfica

Na figura 4.124 podemos observar as configurações deformadas com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento do comprimento inicial e com excentricidade de 1,5 mm para o funcional de energia Ogden.

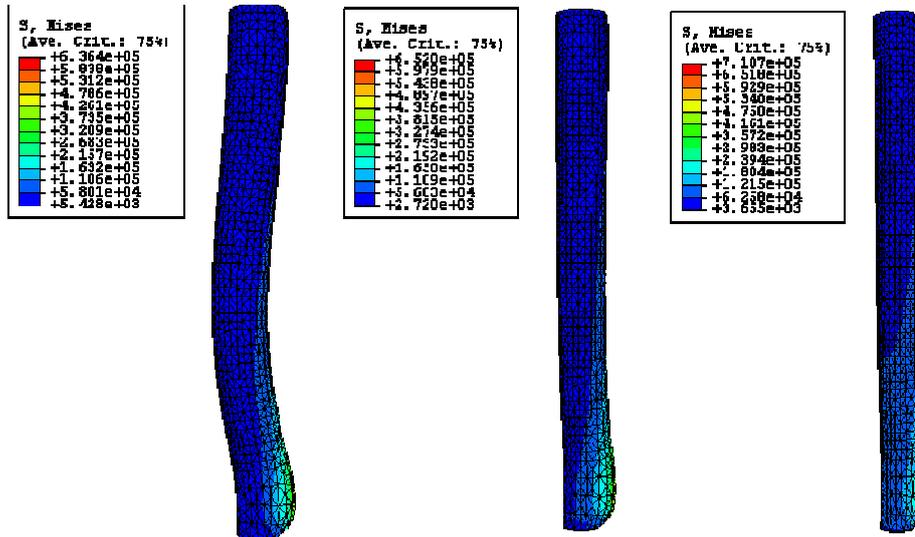


Figura 4.124 – Configurações deformadas com excentricidade de 2,0 mm para Ogden com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento

No gráfico da figura 4.125 podemos observar a variação da pressão crítica em função do alongamento aplicado para uma excentricidade de 2,0mm, utilizando-se o funcional de energia Ogden.

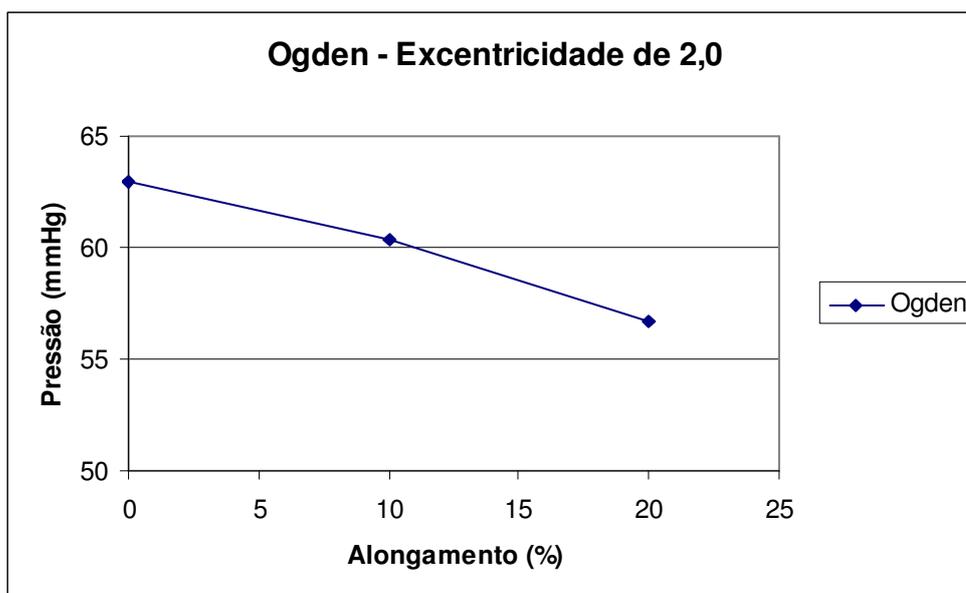


Figura 4.125 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 2,0mm - Ogden

Na tabela 4.18 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Ogden 1.

Alongamento (%)	Tensão trativa máxima (kPa)
0	1374,0
10	1283,0
20	799,3

Tabela 4.18 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Ogden 1

A figura 4.126 faz uma representação gráfica da tabela 4.18.

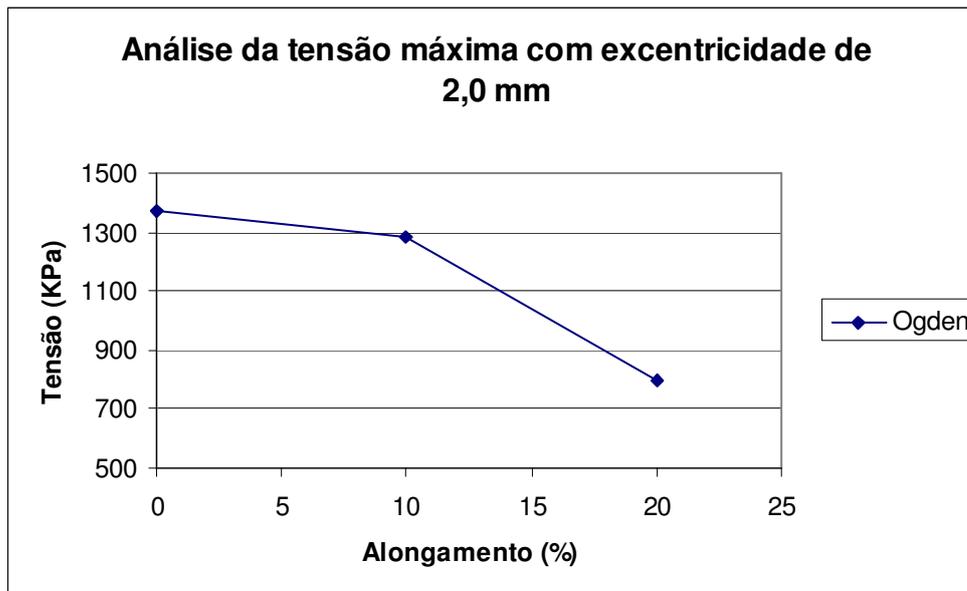


Figura 4.126 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Ogden 1

#### 4.7.4.15. Neo Hooke – excentricidade de 2,0

Na figura 4.127 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo não foi alongado a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 75,69mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1660,0 kPa.

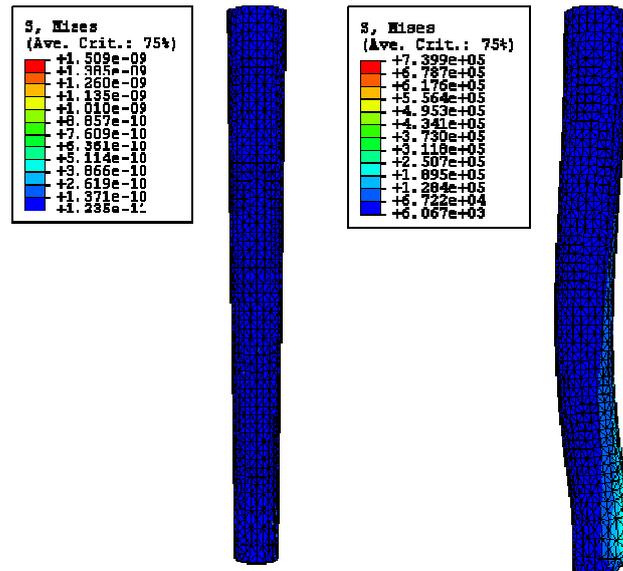


Figura 4.127 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Sem alongamento – excentricidade de 2,0 mm

Na figura 4.128 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 71,42mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1468,0 kPa.

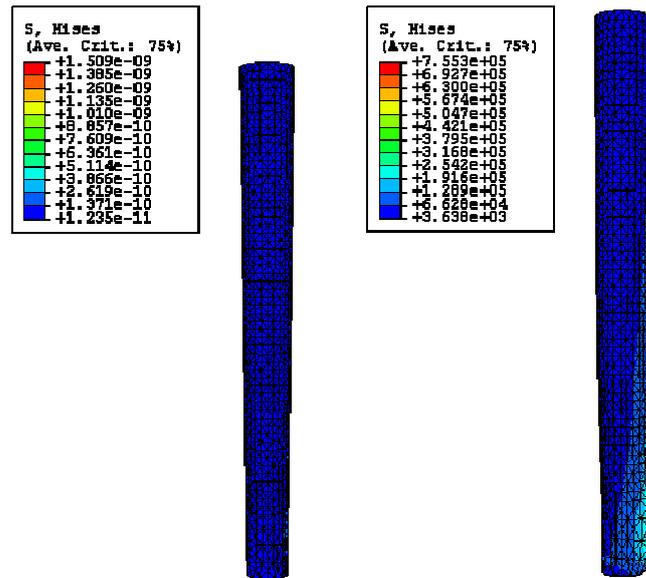


Figura 4.128 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 mm

Na figura 4.129 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 20% a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A pressão crítica para este caso foi de 65,57mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 855,4 kPa.

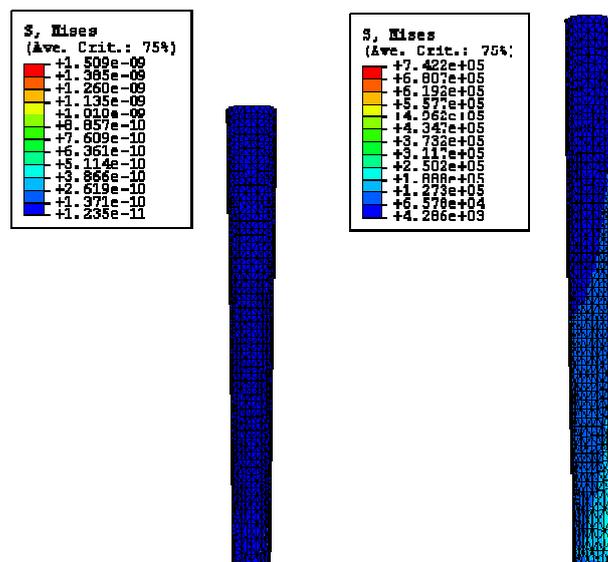


Figura 4.129 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 20% – excentricidade de 2,0 mm

#### 4.7.4.16. Avaliação gráfica

Na figura 4.130 podemos observar as configurações deformadas com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento do comprimento inicial e com excentricidade de 1,5 mm para o funcional de energia Neo Hooke.

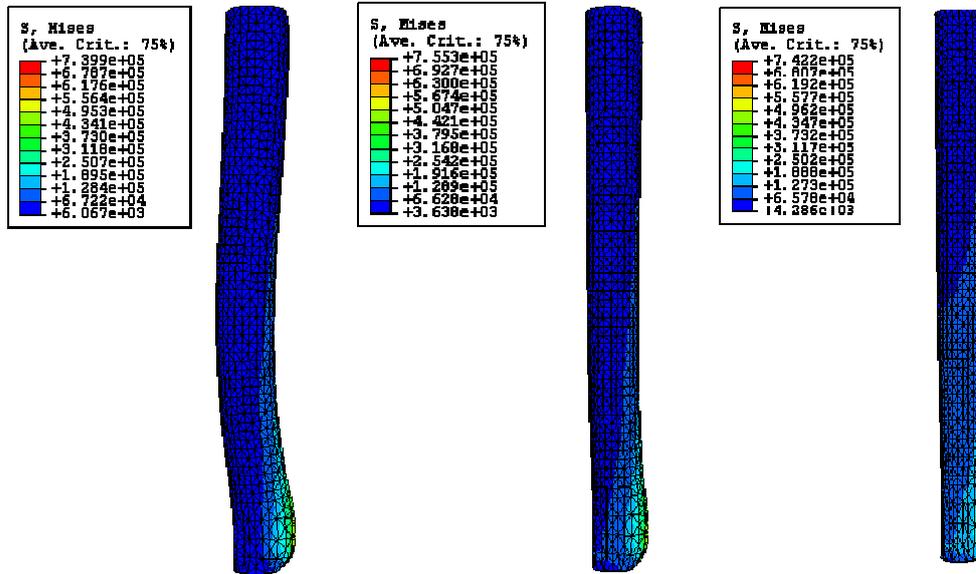


Figura 4.130 – Configurações deformadas com excentricidade de 2,0 mm para Neo Hooke com 0 %, 10 % e 20 % de alongamento

No gráfico da figura 4.131 podemos observar a variação da pressão crítica em função do alongamento aplicado para uma excentricidade de 2,0mm, utilizando-se o funcional de energia Neo Hooke.

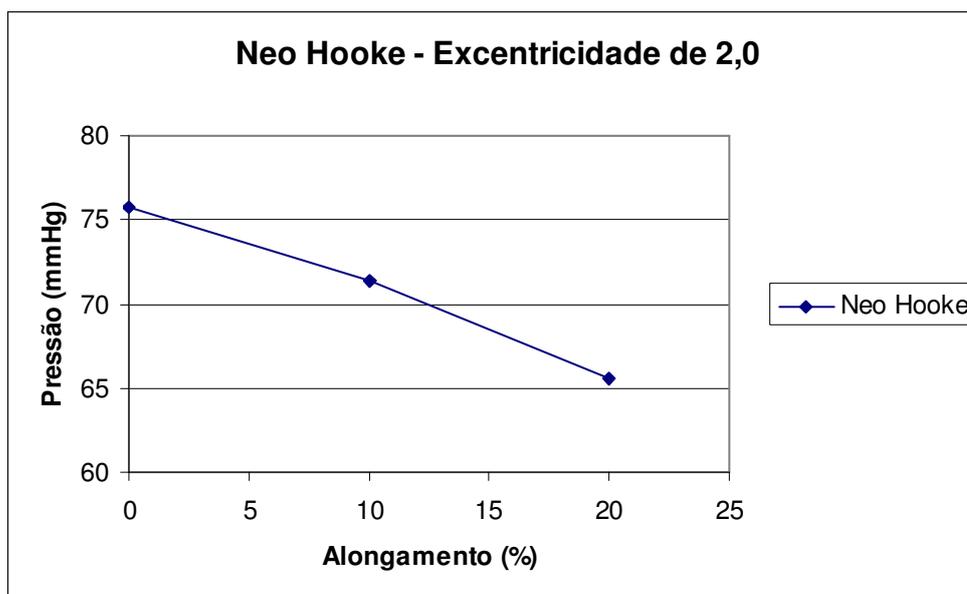


Figura 4.131 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 2,0mm – Neo Hooke

Na tabela 4.19 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Neo Hooke.

Alongamento (%)	Tensão trativa máxima (kPa)
0	1660,0
10	1468,0
20	855,4

Tabela 4.19 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Neo Hooke

A figura 4.132 faz uma representação gráfica da tabela 4.19.

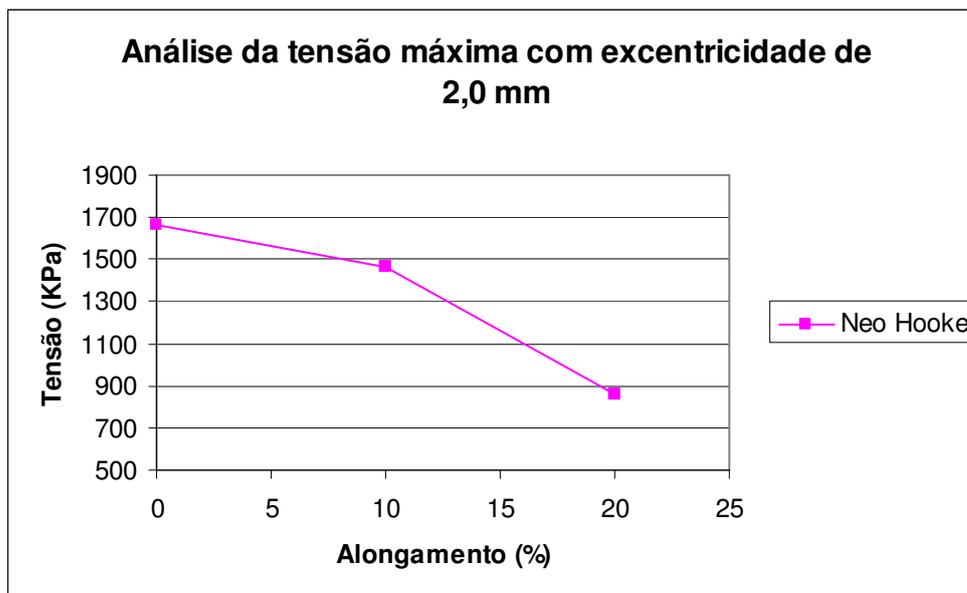


Figura 4.132 – Variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para excentricidade de 2,0 mm e funcional de energia Ogden 1

Na tabela 4.20 podemos observar a variação da pressão crítica para os funcionais de energia Neo Hooke e Ogden em função do alongamento aplicado e da excentricidade. Observamos que tanto no funcional de energia Neo Hooke e Ogden o valor da pressão crítica diminui à medida que a excentricidade e o alongamento crescem. As pressões críticas obtidas considerando o funcional de energia Ogden 1 são sempre menores que as obtidas com o funcional de energia Neo Hooke.

Observamos que a variação do alongamento não influencia tanto a variação da pressão crítica a medida que a excentricidade aumenta.

Excentricidade	Alongamento					
	Ogden	Neo Hooke	Ogden	Neo Hooke	Ogden	Neo Hooke
	0%	0%	10%	10%	20%	20%
Sem excentricidade	122,14	150,83	116,60	142,08	103,87	128,06
0,5 mm	109,94	137,99	104,54	127,73	95,27	115,34
1,0 mm	104,74	120,37	95,39	114,87	88,17	104,81
1,5 mm	81,81	99,48	81,47	94,81	75,42	87,27
2,0 mm	62,92	75,69	60,35	71,42	56,72	65,57

Tabela 4.20 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade e do alongamento

As figuras 4.133 e 4.134 fazem a representação gráfica da tabela 4.20 para os funcionais de energia Ogden 1 e Neo Hookeano respectivamente.

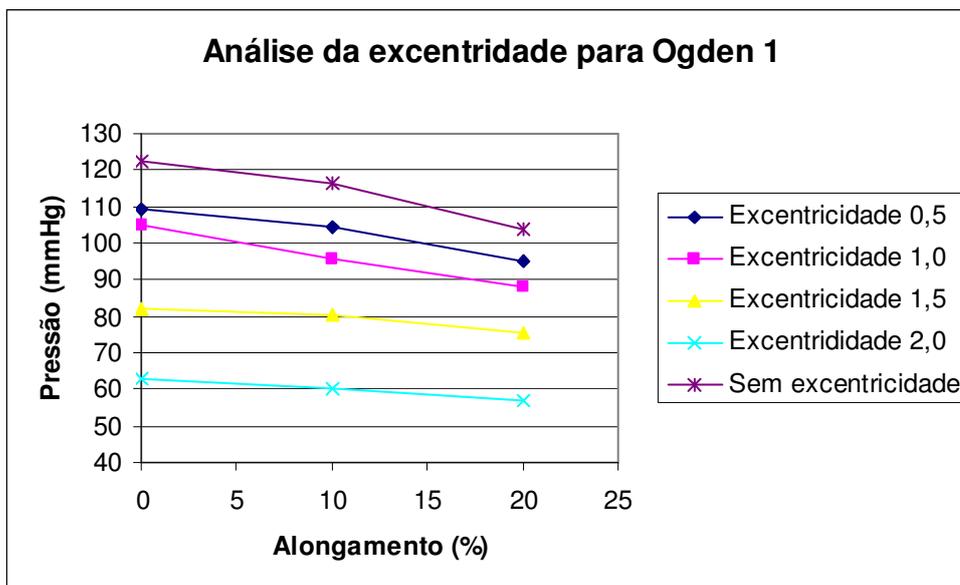


Figura 4.133 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade e do alongamento para Ogden 1

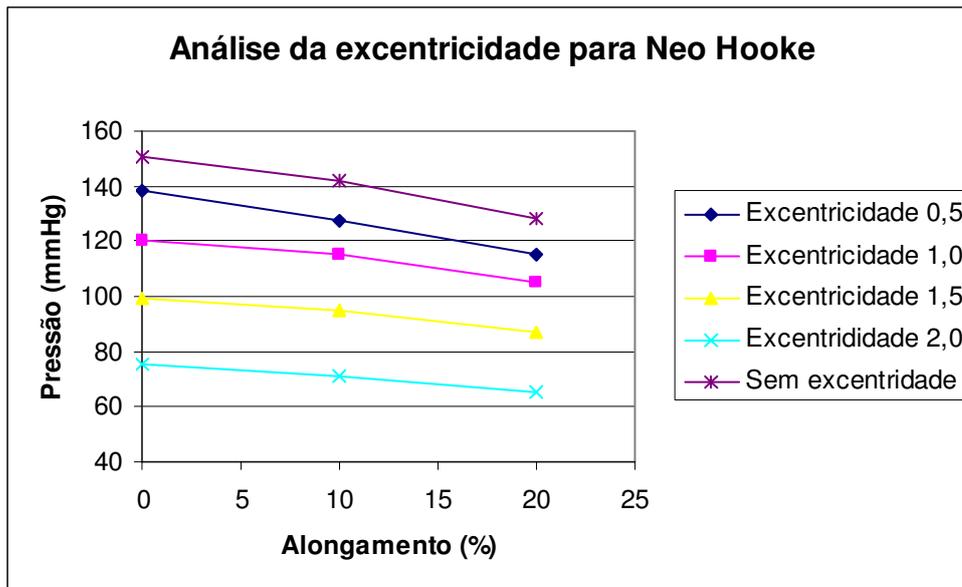


Figura 4.134 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade e do alongamento para Neo Hooke

Na tabela 4.21 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal para os funcionais de energia Neo Hooke e Ogden em função do alongamento aplicado e da excentricidade. Um fenômeno interessante ocorre para a imperfeição com excentricidade de 2,0 mm. A tensão máxima trativa principal diminui com o alongamento.

Excentricidade	Tensão					
	Ogden	Neo Hooke	Ogden	Neo Hooke	Ogden	Neo Hooke
	0%	0%	10%	10%	20%	20%
Sem excentricidade	312,4	359,9	369,5	401,4	536,2	602,9
0,5 mm	489,4	466,7	499,7	527,7	712,4	496,3
1,0 mm	335,1	543,7	713,7	758,5	866,3	791,1
1,5 mm	824,6	690,1	921,0	841,5	1012,0	868,3
2,0 mm	1374,0	1660,0	1283,0	1468,0	799,3	855,4

Tabela 4.21 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da excentricidade e do alongamento

As figuras 4.135 e 4.136 fazem a representação gráfica da tabela 4.21 para os funcionais de energia Ogden 1 e Neo Hookeano respectivamente.

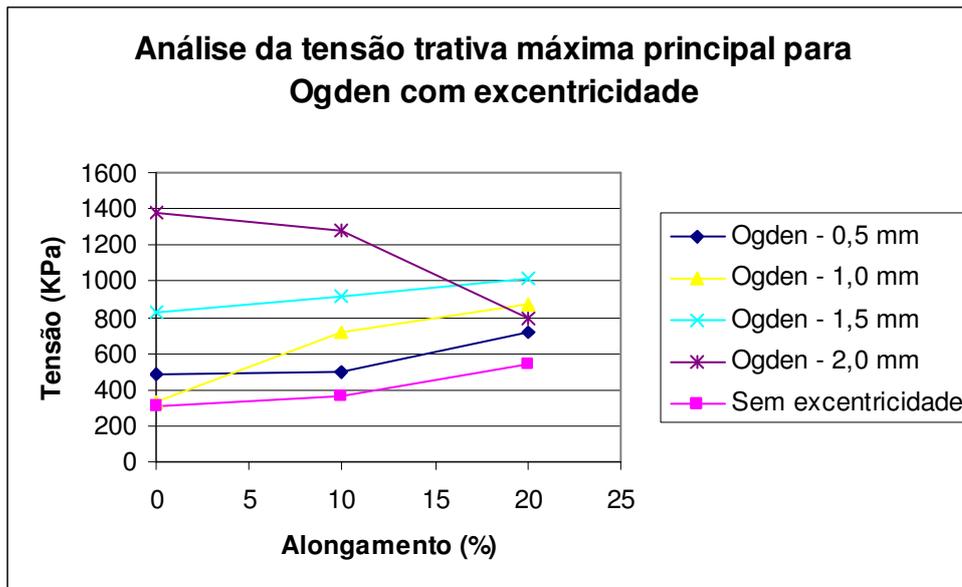


Figura 4.135 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da excentricidade e do alongamento para Ogden 1

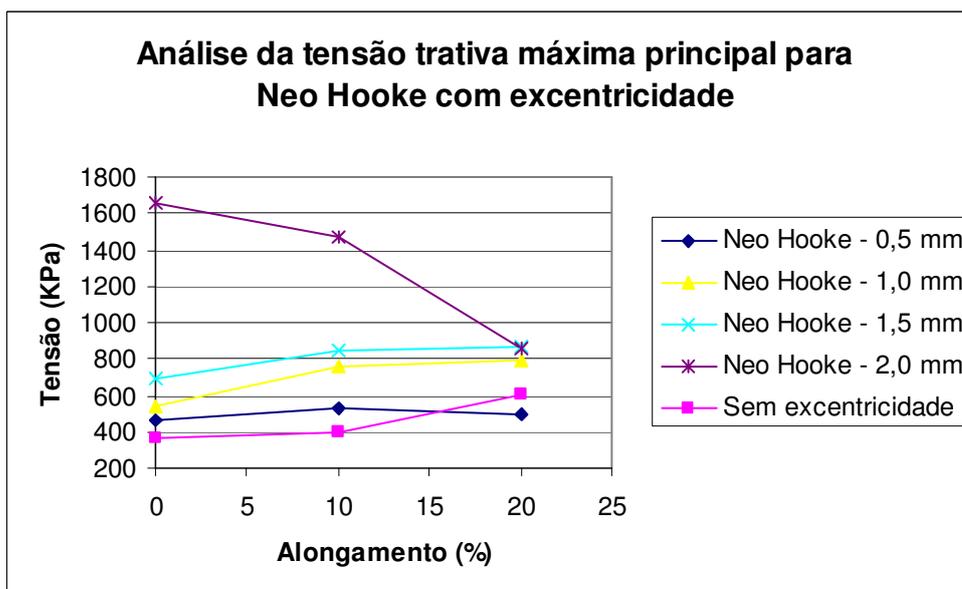


Figura 4.136 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da excentricidade e do alongamento para Neo Hooke

Pela análise dos gráficos anteriores podemos observar uma diminuição da pressão crítica com o aumento da excentricidade tanto para o funcional de energia Ogden 1 e Neo Hooke. Observamos também que quanto maior a excentricidade, maior o valor da tensão máxima trativa principal. Para os casos de excentricidade de 0,5 mm, 1,0 mm e 1,5 mm a tensão máxima trativa principal aumenta com o aumento do alongamento aplicado e para a excentricidade de 2,0 mm o valor da tensão máxima trativa principal diminui.

#### 4.7.5.

#### **Análise da pressão crítica para imperfeição gerada por excentricidade e diminuição da constante elástica**

O objetivo é estudar a variação da pressão crítica em função da perda de resistência mecânica no tecido arterial causada pelo desgaste do material, fazendo com que o mesmo se degenere muito mais rápido que o normal. Adotamos para o estudo os mesmos casos de excentricidade utilizados anteriormente (0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm) e alongamento de 10 % do comprimento inicial.

Para este estudo foi adotado o funcional de energia Neo Hooke por apresentar apenas uma constante elástica em seu funcional de energia, assim podemos reduzi-la de forma linear e observar o seu efeito no valor da pressão crítica. O valor da constante elástica calculada no item 4.3 para o funcional de energia Neo Hooke é 54,832 kPa. Este valor foi reduzido nas diversas análises para 50 kPa, 40 kPa, 30 kPa, 20 kPa e 10 kPa.

##### 4.7.5.1.

#### **Análise da sensibilidade da pressão crítica com a perda das propriedades elásticas para excentricidade de 0,5**

Na figura 4.137 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 0,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10}=50$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 115,77mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 578,8 kPa.

Para  $C_{10}=54,53$  kPa e excentricidade de 0,5 mm a pressão crítica obtida foi de 127,73 mmHg e a tensão máxima trativa principal foi de 527,7 kPa.

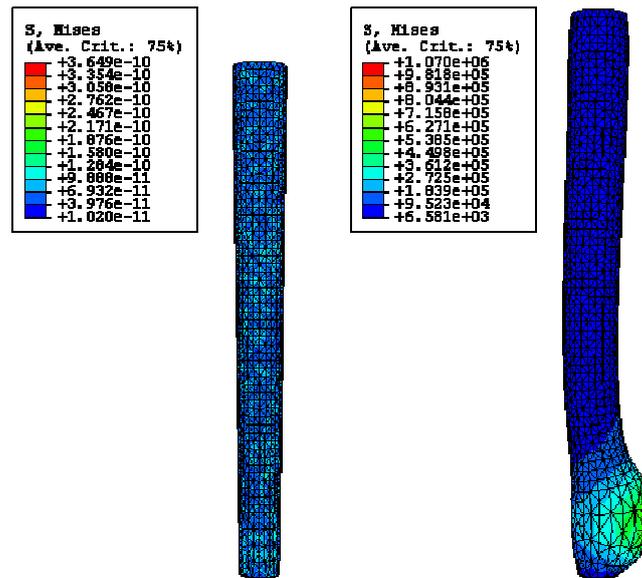


Figura 4.137 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 mm –  $C_{10} = 50$  kPa

Na figura 4.138 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 0,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 40$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 93,00mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 324,9 kPa.

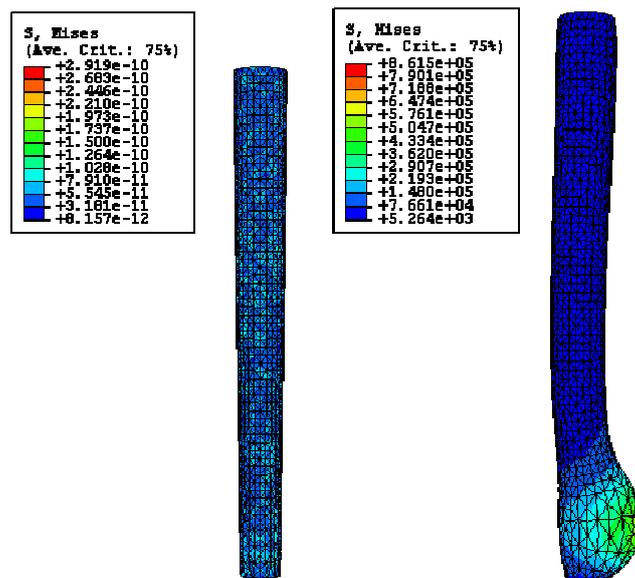


Figura 4.138 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 mm –  $C_{10} = 40$  kPa

Na figura 4.139 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 0,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10}=30$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 69,83mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 253,8 kPa.

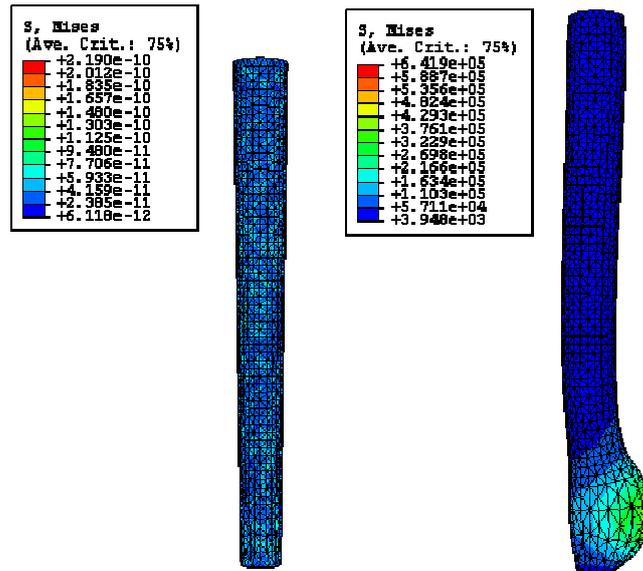


Figura 4.139 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 mm –  $C_{10} = 30$  kPa

Na figura 4.140 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 0,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10}=20$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 46,55mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 169,2 kPa.

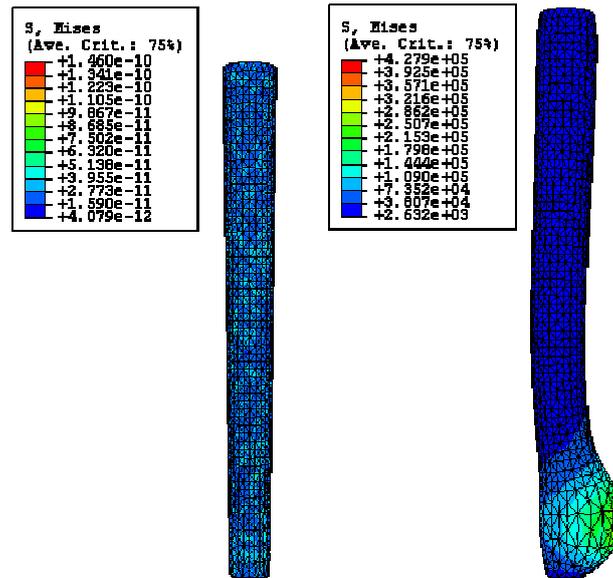


Figura 4.140 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 mm –  $C_{10} = 20$  kPa

Na figura 4.141 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 0,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10}=10$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 23,18mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 112,8 kPa.

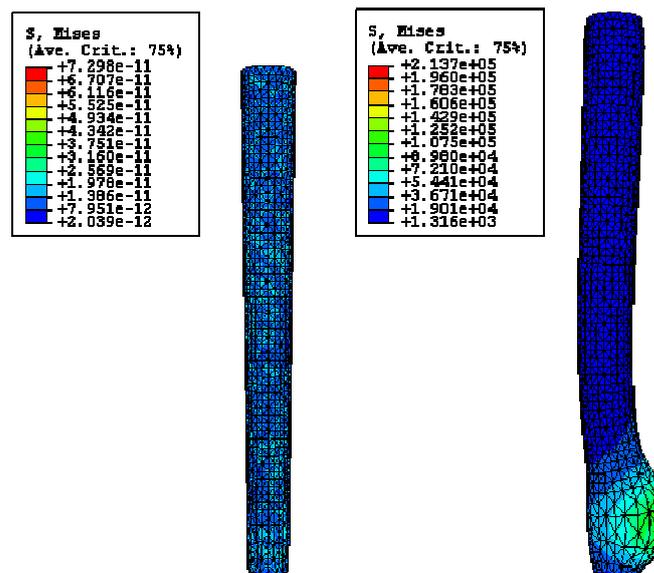


Figura 4.141 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 0,5 mm –  $C_{10} = 10$  kPa

#### 4.7.5.2. Avaliação gráfica

No gráfico da figura 4.142 podemos observar a variação da pressão crítica em função da diminuição da constante elástica para uma excentricidade de 0,5mm, utilizando-se o funcional de energia Neo Hooke.

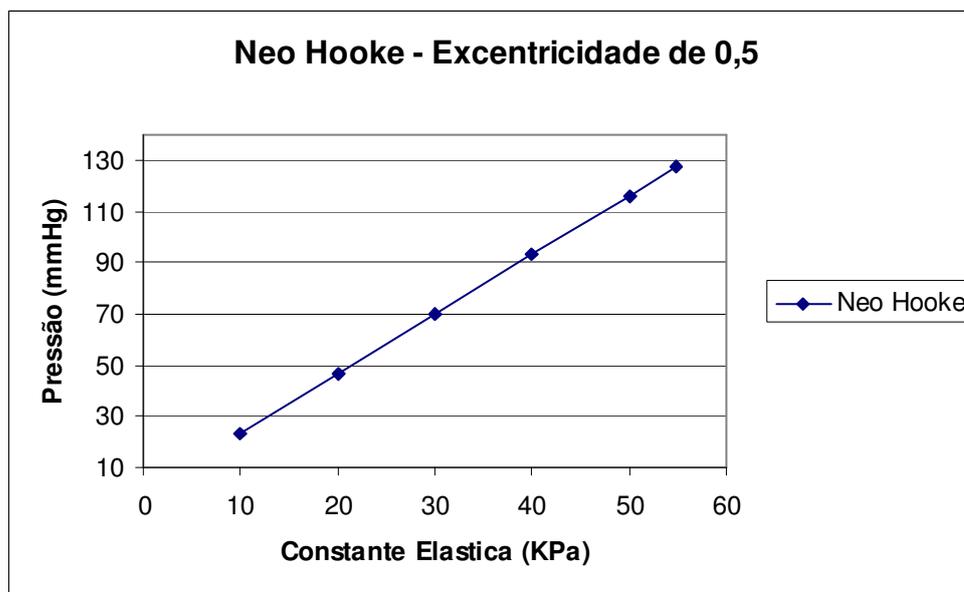


Figura 4.142 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 0,5mm – Neo Hooke

Na tabela 4.22 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 0,5 mm e diminuição da constante elástica funcional de energia Neo Hooke.

Constante elástica (kPa)	Tensão trativa máxima (kPa)
54,83	527,7
50	578,8
40	324,9
30	253,8
20	169,2
10	112,8

Tabela 4.22 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 0,5 mm

A figura 4.143 faz uma representação gráfica da tabela 4.19.

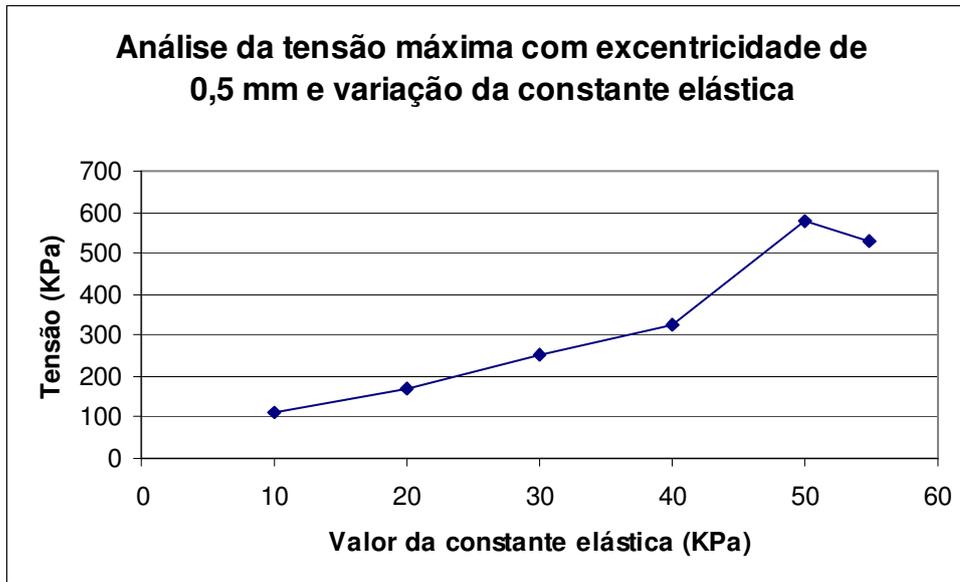


Figura 4.143 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 0,5 mm

#### 4.7.5.3.

##### **Análise da sensibilidade da pressão crítica com a perda das propriedades elásticas para excentricidade de 1,0**

Na figura 4.144 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10}=50$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 104,89mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 648,0 kPa.

Para  $C_{10}=54,53$  kPa e excentricidade de 1,0 mm a pressão crítica obtida foi de 114,87 mmHg e a tensão máxima trativa principal foi de 758,5 kPa.

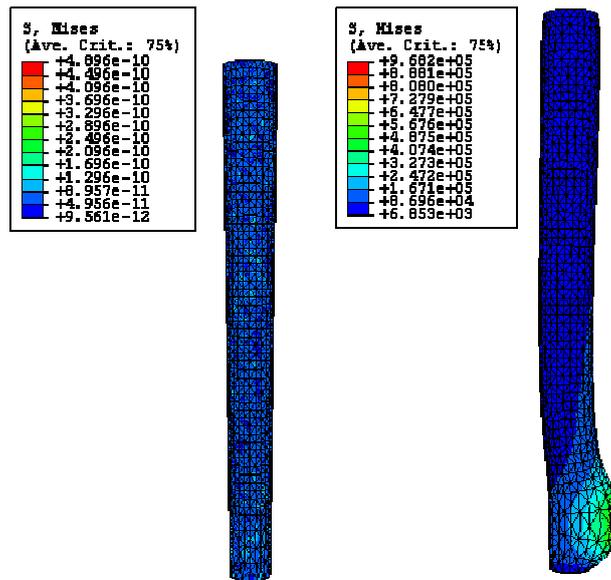


Figura 4.144 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 mm –  $C_{10} = 50$  kPa

Na figura 4.145 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 40$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 83,91mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 500,8 kPa.

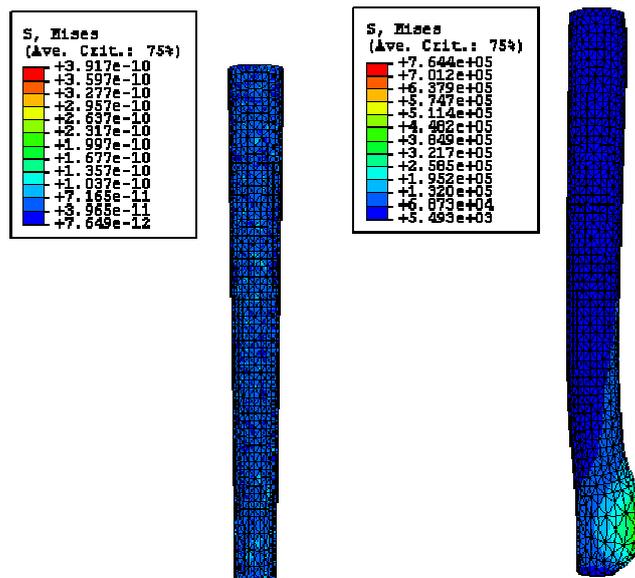


Figura 4.145 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 mm –  $C_{10} = 40$  kPa

Na figura 4.146 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 30$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 62,93mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 376,2 kPa.

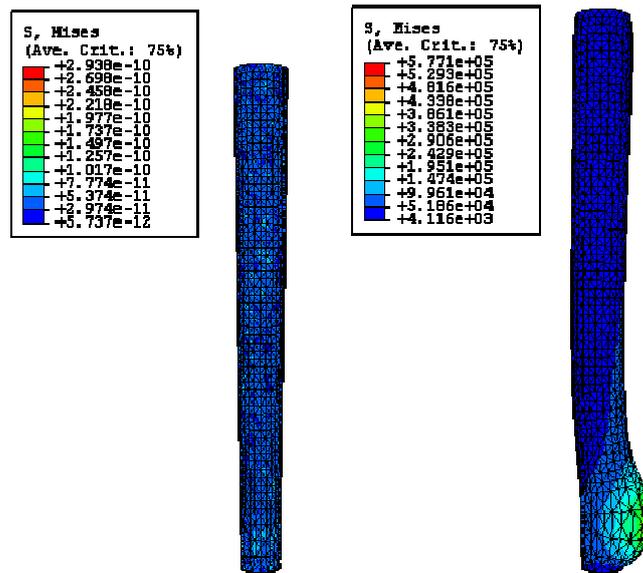


Figura 4.146 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 mm –  $C_{10} = 30$  kPa

Na figura 4.147 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 20$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 41,95mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 250,8 kPa.

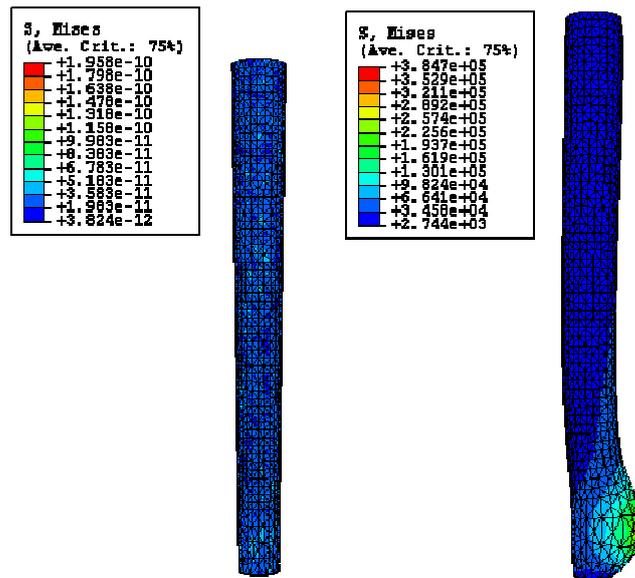


Figura 4.147 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 mm –  $C_{10} = 20$  kPa

Na figura 4.148 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 10$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 20,97mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 126,7 kPa.

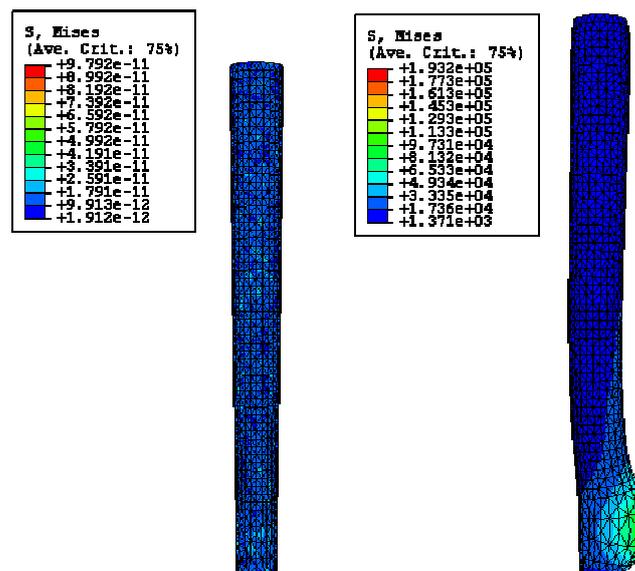


Figura 4.148 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,0 mm –  $C_{10} = 10$  kPa

#### 4.7.5.4. Avaliação gráfica

No gráfico da figura 4.149 podemos observar a variação da pressão crítica em função da diminuição da constante elástica para uma excentricidade de 1,0mm, utilizando-se o funcional de energia Neo Hooke.

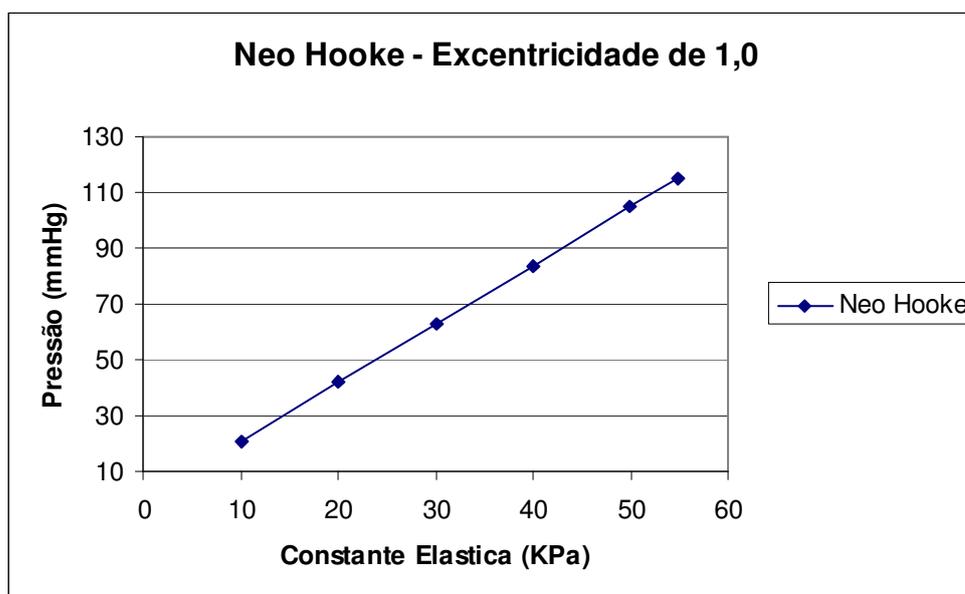


Figura 4.149 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,0mm – Neo Hooke

Na tabela 4.23 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 1,0 mm e diminuição da constante elástica funcional de energia Neo Hooke.

Constante elástica (kPa)	Tensão trativa máxima (kPa)
54,83	758,5
50	648,0
40	500,8
30	376,2
20	250,8
10	126,7

Tabela 4.23 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 1,0 mm

A figura 4.150 faz uma representação gráfica da tabela 4.23.

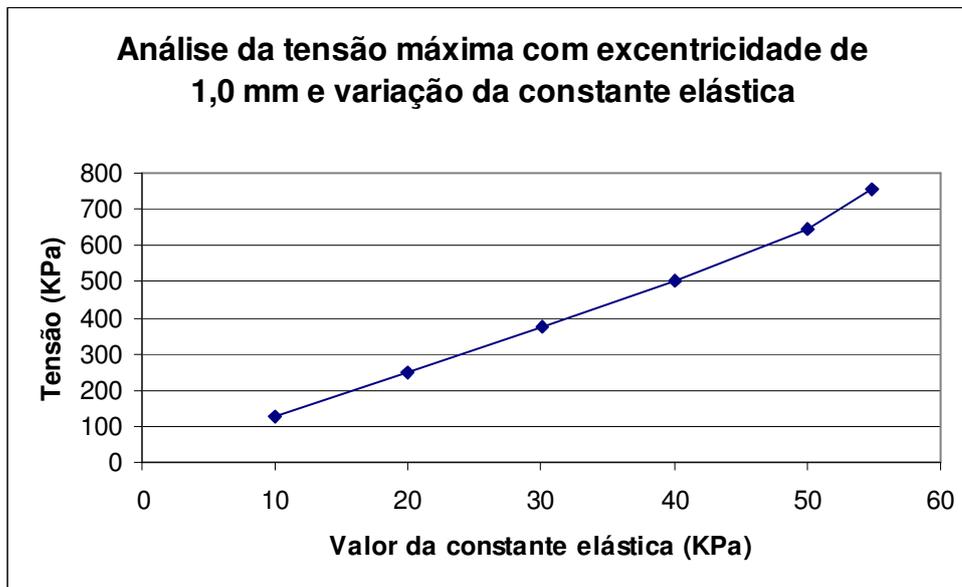


Figura 4.150 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 1,0 mm

#### 4.7.5.5.

#### **Análise da sensibilidade da pressão crítica com a perda das propriedades elásticas para excentricidade de 1,5**

Na figura 4.151 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 50$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 86,46mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 759,3 kPa.

Para  $C_{10} = 54,53$  kPa e excentricidade de 1,5 mm a pressão crítica obtida foi de 94,81 mmHg e a tensão máxima trativa principal foi de 541,5 kPa.

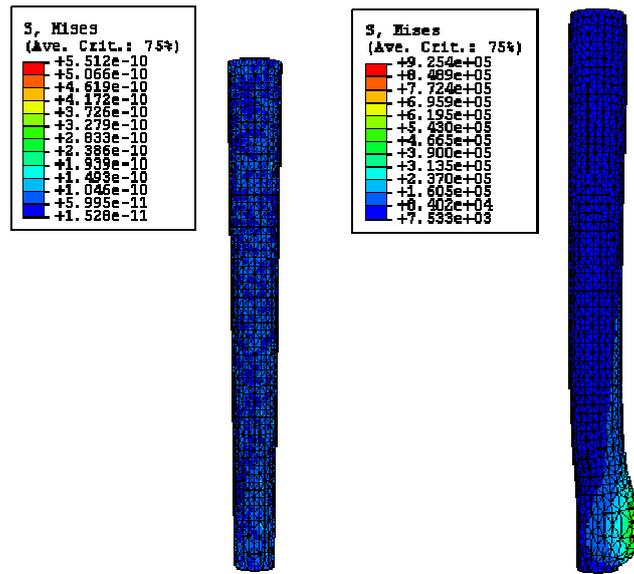


Figura 4.151 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 mm –  $C_{10} = 50$  kPa

Na figura 4.152 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 40$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 69,15mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 578,5 kPa.

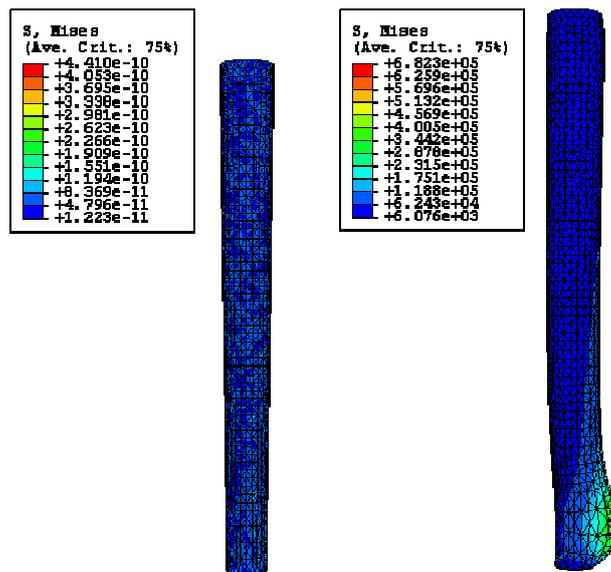


Figura 4.152 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 mm –  $C_{10} = 40$  kPa

Na figura 4.153 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 30$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 51,88mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 453,1 kPa.

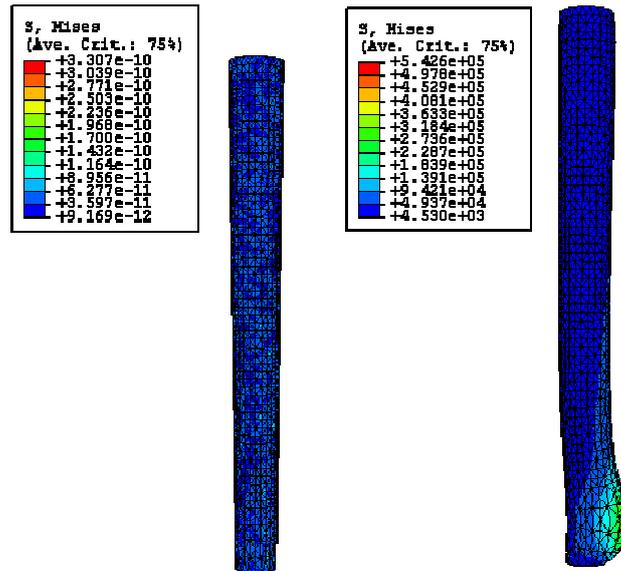


Figura 4.153 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 mm –  $C_{10} = 30$  kPa

Na figura 4.154 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 20$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 34,58mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 302,1 kPa.

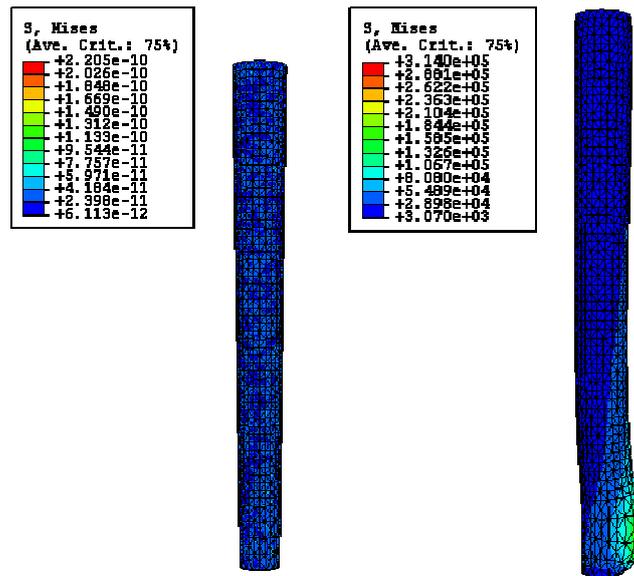


Figura 4.154 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke –Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 mm –  $C_{10} = 20$  kPa

Na figura 4.155 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 1,5mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 10000$ . A pressão crítica para este caso foi de 17,29mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 149,1 kPa.

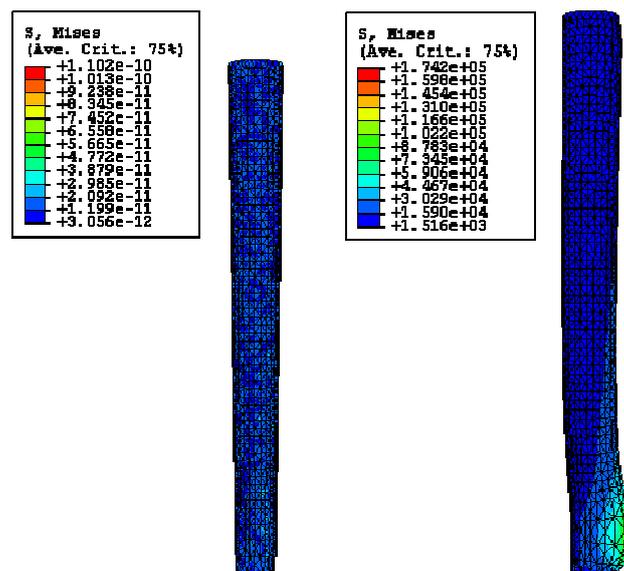


Figura 4.155 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 1,5 mm –  $C_{10} = 10$  kPa

#### 4.7.5.6. Avaliação gráfica

No gráfico da figura 4.156 podemos observar a variação da pressão crítica em função da diminuição da constante elástica para uma excentricidade de 1,5mm, utilizando-se o funcional de energia Neo Hooke.

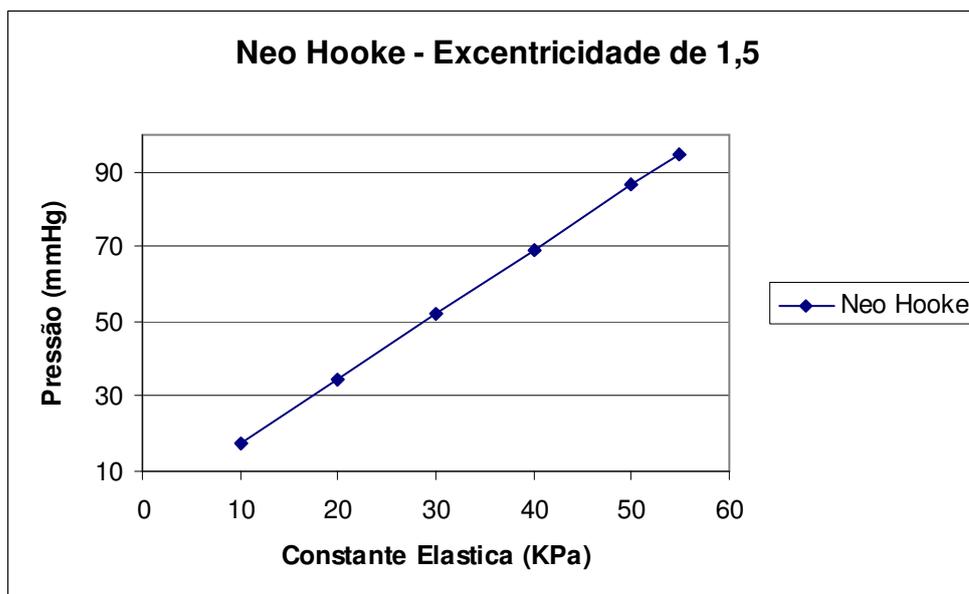


Figura 4.156 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 1,5mm – Neo Hooke

Na tabela 4.24 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 1,5 mm e diminuição da constante elástica funcional de energia Neo Hooke.

Constante elástica (kPa)	Tensão trativa máxima (kPa)
54,83	541,5
50	759,3
40	578,5
30	453,1
20	302,1
10	149,1

Tabela 4.24 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 1,5 mm

A figura 4.157 faz uma representação gráfica da tabela 4.24.

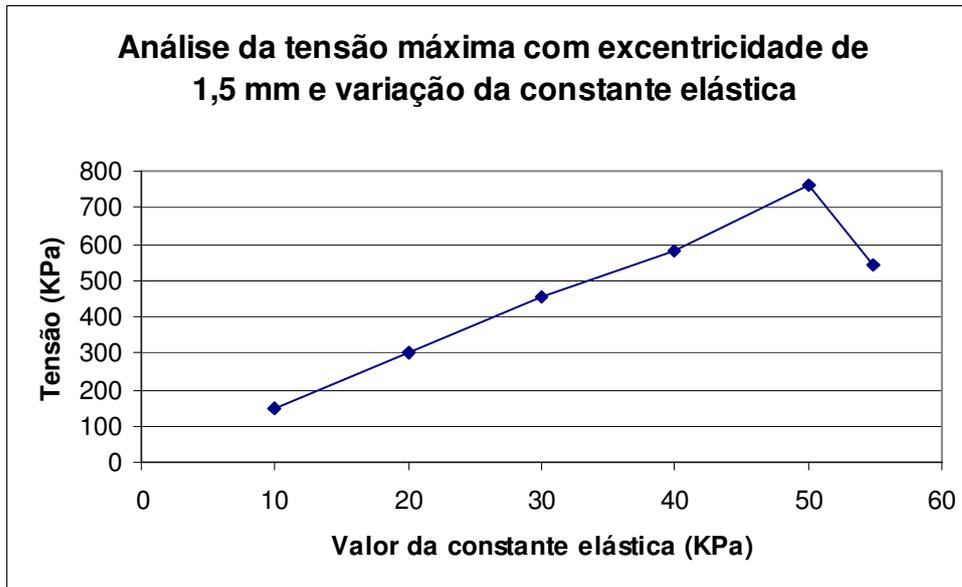


Figura 4.157 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 1,5 mm

#### 4.7.5.7.

#### **Análise da sensibilidade da pressão crítica com a perda das propriedades elásticas para excentricidade de 2,0**

Na figura 4.158 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 50$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 65,23mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1350,0 kPa.

Para  $C_{10} = 54,53$  kPa e excentricidade de 2,0 mm a pressão crítica obtida foi de 71,42 mmHg e a tensão máxima trativa principal foi de 1468,0 kPa.

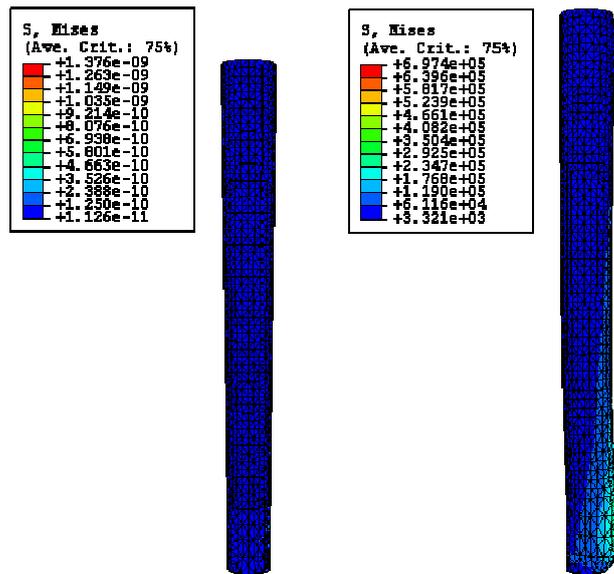


Figura 4.158 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 mm –  $C_{10} = 50$  kPa

Na figura 4.159 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 40$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 51,27mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 1074,0 kPa.

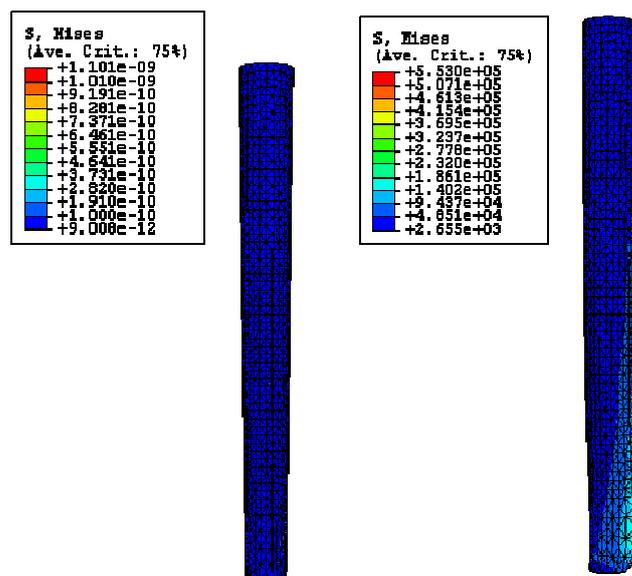


Figura 4.159 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 mm –  $C_{10} = 40$  kPa

Na figura 4.160 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 30$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 39,14mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 810,5 kPa.

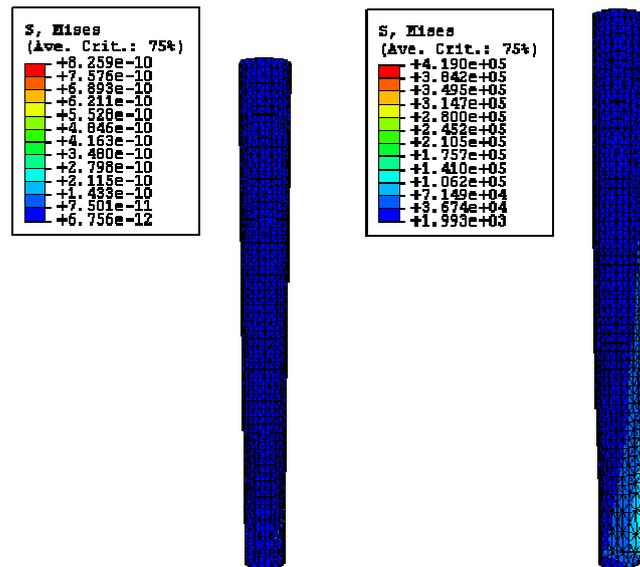


Figura 4.160 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 mm –  $C_{10} = 30$  kPa

Na figura 4.161 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 20$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 26,09mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 540,3 kPa.

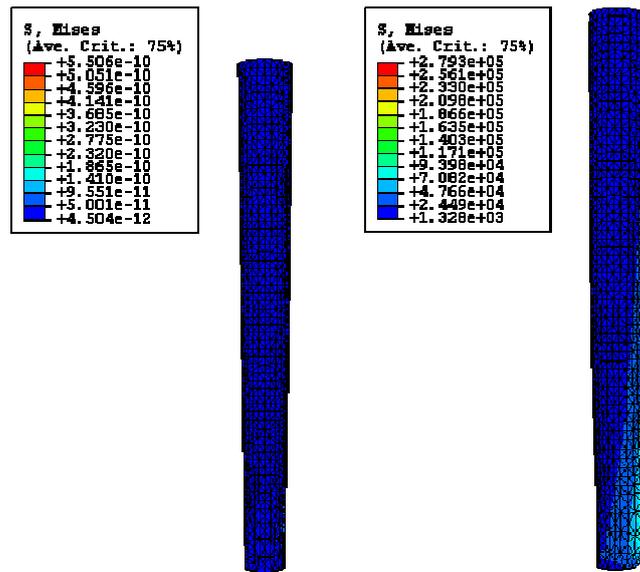


Figura 4.161 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 mm –  $C_{10} = 20$  kPa

Na figura 4.162 podemos observar a configuração indeformada e a configuração deformada para o caso em que foi utilizado o funcional de energia Neo Hooke, o modelo foi alongado de 10% e a região interna apresentava uma excentricidade de 2,0mm. A constante elástica foi reduzida para  $C_{10} = 10$  kPa. A pressão crítica para este caso foi de 12,99mmHg. Para esta pressão a tensão máxima trativa principal foi de 263,7 kPa.

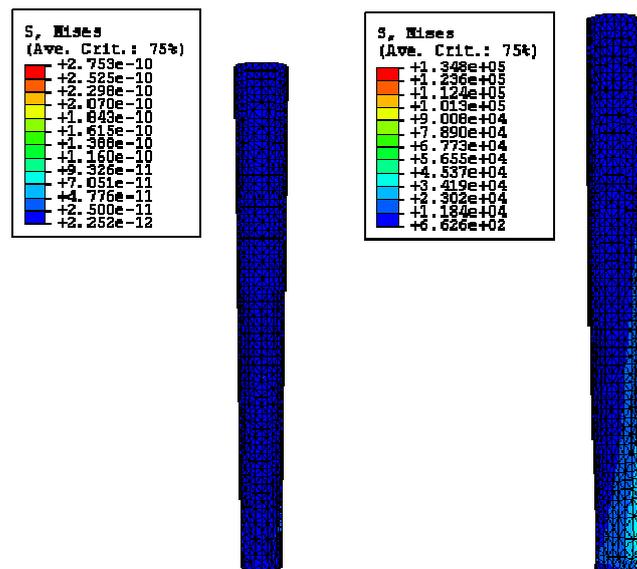


Figura 4.162 – Configuração indeformada e deformada para Neo Hooke – Alongamento de 10% – excentricidade de 2,0 mm –  $C_{10} = 10$  kPa

#### 4.7.5.8. Avaliação gráfica

No gráfico da figura 4.163 podemos observar a variação da pressão crítica em função da diminuição da constante elástica para uma excentricidade de 2,0mm, utilizando-se o funcional de energia Neo Hooke.

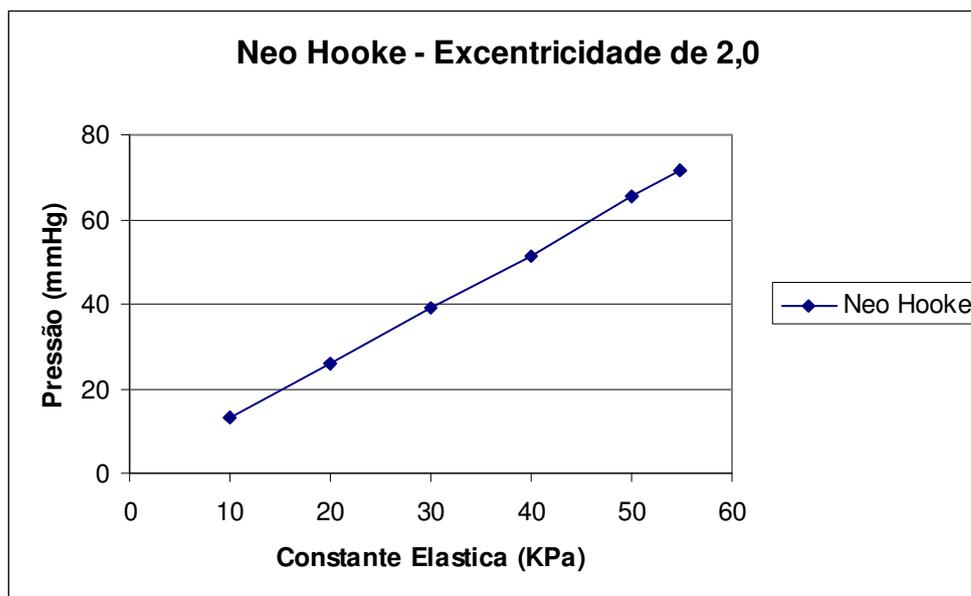


Figura 4.163 – Variação da pressão crítica – Excentricidade de 2,0mm – Neo Hooke

Na tabela 4.25 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal em função do alongamento aplicado, para o caso em que temos excentricidade de 2,0 mm e diminuição da constante elástica funcional de energia Neo Hooke.

Constante elástica (kPa)	Tensão trativa máxima (kPa)
54,83	1468,0
50	1350,0
40	1074,0
30	810,5
20	540,3
10	263,7

Tabela 4.25 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 2,0 mm

A figura 4.164 faz uma representação gráfica da tabela 4.25.

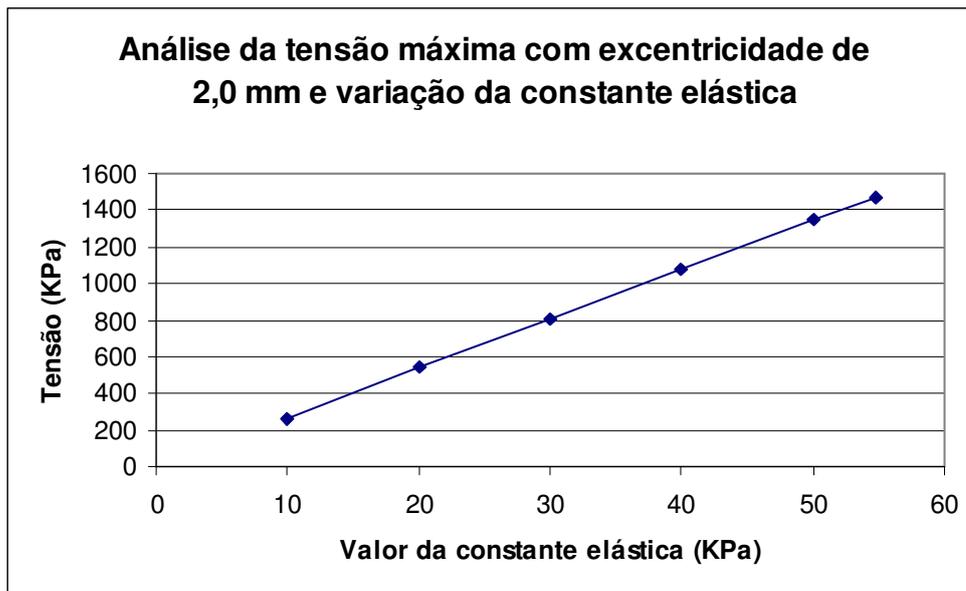


Figura 4.164 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da diminuição da constante elástica do funcional de energia Neo Hooke para excentricidade de 2,0 mm

Na tabela 4.26 podemos observar a variação da pressão crítica para o funcional de energia Neo Hooke em função da diminuição da constante elástica e da excentricidade. Observamos que a pressão crítica diminui a medida que a excentricidade aumenta, para todos os casos estudados da variação da constante elástica. Também observamos que o valor da pressão crítica diminui a medida que o valor da constante elástica diminui.

Observamos também que a pressão crítica sofre menor variação a medida que a constante elástica diminui, para valores crescentes de excentricidade.

Constante elástica (kPa)	Excentricidades			
	0,5 mm	1,0 mm	1,5 mm	2,0 mm
54,832	127,73	114,87	94,81	71,42
50	115,77	104,89	86,46	65,23
40	93,00	83,91	69,15	51,27
30	69,83	62,93	51,88	39,14
20	46,55	41,95	34,58	26,09
10	23,18	20,91	17,29	12,99

Tabela 4.26 – Variação da pressão crítica (mmHg) em função da excentricidade e da diminuição da constante elástica

A figura 165 faz uma representação gráfica da tabela 4.26.

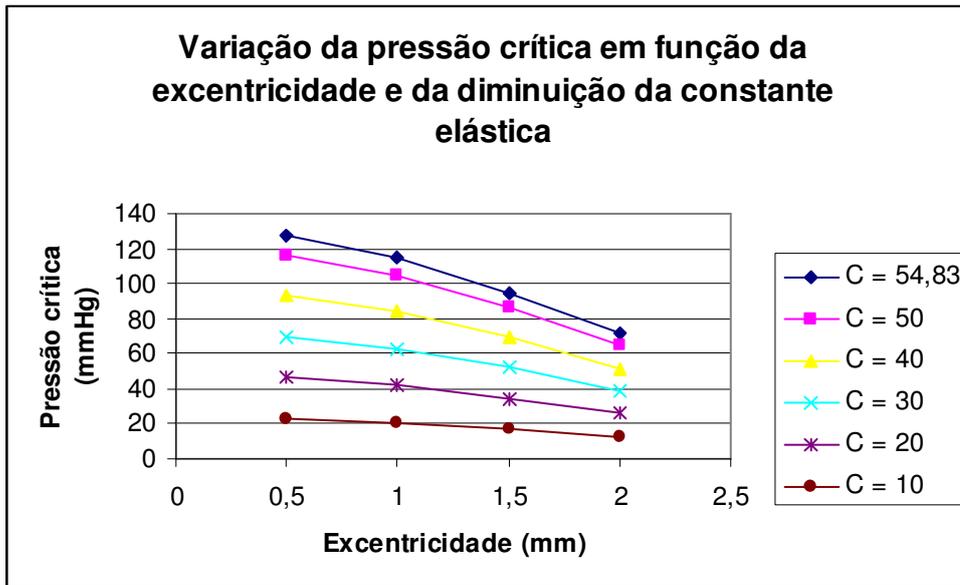


Figura 165 – Variação da pressão crítica em função da excentricidade e da diminuição da constante elástica

Na tabela 4.27 podemos observar a variação da tensão máxima trativa principal para o funcional de energia Neo Hooke em função da diminuição da constante elástica e da excentricidade.

Constante elástica (kPa)	Tensão			
	0,5 mm	1,0 mm	1,5 mm	2,0 mm
54,832	527,7	758,5	541,5	1468,0
50	578,8	648,0	759,3	1350,0
40	324,9	500,8	578,5	1074,0
30	253,8	376,2	453,1	810,5
20	169,2	250,8	302,1	540,3
10	112,8	126,7	149,1	263,7

Tabela 4.27 – Variação da tensão máxima trativa principal (kPa) em função da excentricidade e da diminuição da constante elástica

A figura 4.166 faz uma representação gráfica da tabela 4.26.

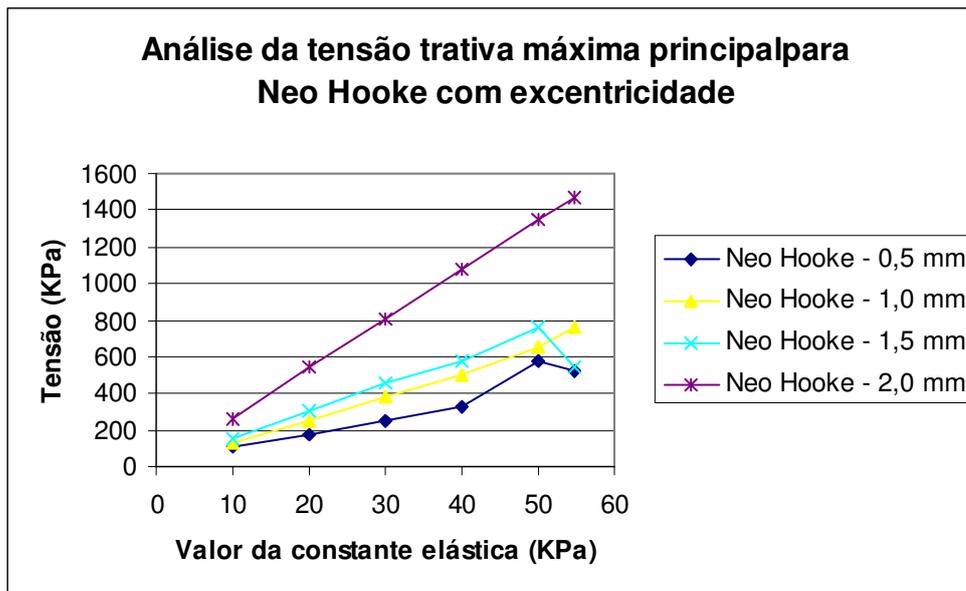


Figura 4.166 – Variação da tensão máxima trativa principal em função da excentricidade e da diminuição da constante elástica

Podemos observar uma diminuição do valor da tensão máxima trativa principal à medida que a constante elástica diminui.