

### 3 Análise experimental

A parte experimental foi dividida em dois grupos:

no primeiro foram utilizados tubos cilíndricos de látex, com raio e espessura constantes ao longo de seu comprimento;

no segundo tubos de silicone especialmente executados, com a geometria aproximada da aorta, tendo diâmetros e espessuras variáveis ao longo de seu comprimento.

#### 3.1. Aparatos utilizados na realização das experiências

- Suporte metálico de altura regulável por furos espaçados de 2,5 cm, utilizado para fixar o tubo de látex ou silicone e tracioná-los, Fig. 3.1. A tração foi definida através da extensão,  $\lambda$ , razão entre o comprimento final e inicial.
- Bocais com dimensões semelhantes às dos tubos a serem usados.
- Recipiente de acrílico, contendo um manômetro acoplado, uma entrada de ar e mangueira para saída de água, Fig. 3.2.
- Aparelho desenvolvido para inserir ar, medir e controlar a pressão interna. Utilizado para pequenas pressões. (daPa), Fig 3.3.
- Bomba de ar.
- Cronômetro.

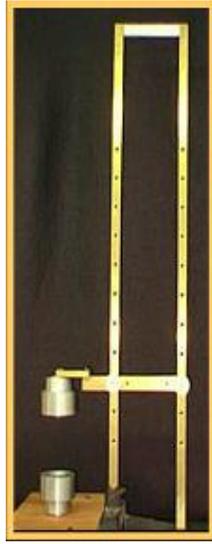


Figura 3.1 – Suporte metálico

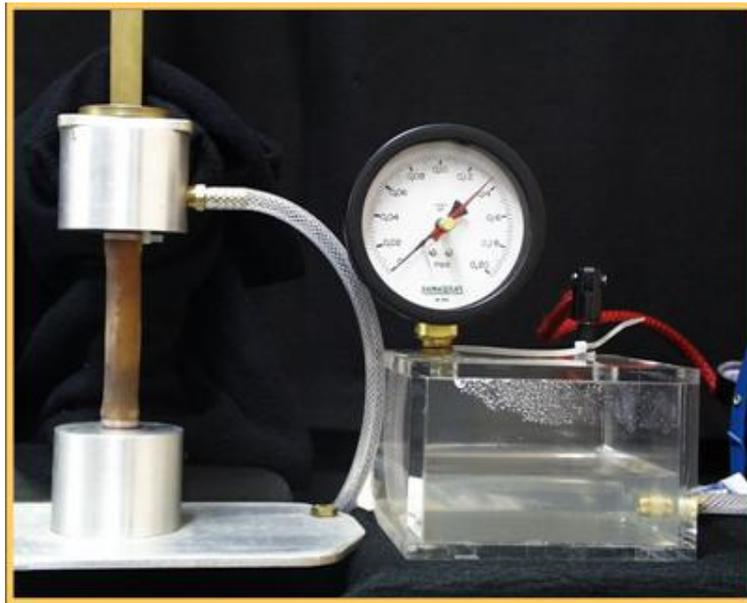


Figura 3.2 – Recipiente de acrílico contendo manômetro, entrada de ar para a bomba e mangueira para a saída de água.

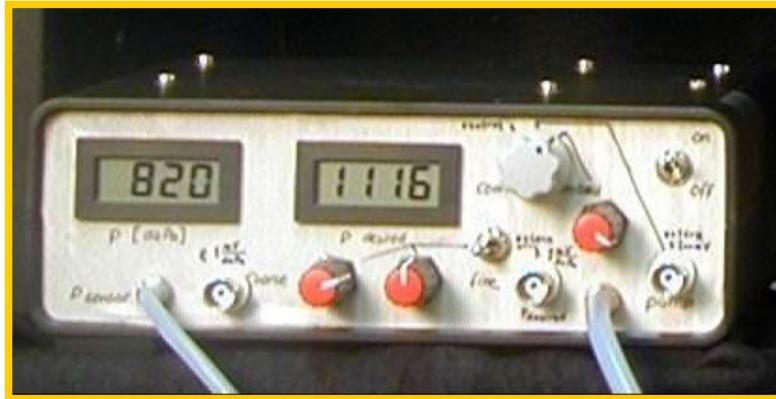


Figura 3.3 – Aparelho desenvolvido para inserir ar, medir e controlar a pressão interna. Utilizado para pequenas pressões. (daPa).

### 3.2. Tubo de látex

Descrição da experiência:

- Para simular as artérias foram utilizados inicialmente tubos de látex, com geometria semelhante à da artéria abdominal. São incompressíveis, preservando-se o volume.
- Os fluidos corporais foram representados pela água.
- A pressão interna foi medida por meio de um manômetro de ar com ponteiro de arrasto, precisão de 0,001 MPa e escala de 0 a 0,2MPa.

#### 3.2.1. Procedimento experimental

1. O tubo de látex foi fixado no aparato metálico prendendo-se suas extremidades nos bocais com braçadeiras plásticas. A distância entre as braçadeiras corresponde ao comprimento inicial do tubo de látex a ser ensaiado.
2. O tubo foi então preenchido com água. Primeiramente o recipiente foi elevado para que a água escoasse devido à diferença de nível, posteriormente a água foi bombeada para eliminar bolhas de ar no interior do tubo de látex. Nessa etapa a pressão foi monitorada de modo a não provocar deformações prévias do tubo de látex.

3. Após ter sido cheio, o tubo pode ser tracionado regulando-se a altura do suporte metálico.
4. Através de um leve bombeamento a pressão interna foi aumentada gradativamente até que um bulbo se formasse (simulação do aneurisma). Foram registrados então a pressão crítica (pressão de formação do bulbo), a pressão final (pressão interna após a formação do bulbo) e o tempo médio até a formação do bulbo.

O volume do bulbo e a diferença da altura da água no reservatório foram relacionados da seguinte forma:

Área da base interna do reservatório: 13,4cm x 13,3cm

$V(h) = 13,4 \times 13,3 \times \Delta h = 178\Delta h$  (cm<sup>3</sup>), sendo  $\Delta h$  medido em cm.

Geometria do tubo de látex:

- diâmetro interno: 12 mm
- diâmetro externo: 16,5 mm
- comprimento entre as braçadeiras: 25 cm



Figura 3.4 – Etapa 3



Figura 3.5 – Etapa 4, simulação do aneurisma.

Descrição do ensaio:

Através da bomba de ar foi aplicada a pressão no interior do tubo de látex de forma suave, até a formação do bulbo, quando se realizou a medição das pressões crítica e final, assim como o tempo médio de bombeamento até a formação do bulbo. Este procedimento foi realizado cinco vezes com o mesmo tubo de látex, variando-se o tempo de aplicação da pressão em cada ensaio.

### **3.2.2. Resultados dos ensaios com tubos de látex**

#### **3.2.2.1. Estudo da influência da velocidade de aplicação da pressão**

Descrição do ensaio:

Foi realizada uma série de três experiências para se investigar a velocidade de aplicação da pressão, para análise de seu efeito no valor da pressão crítica.

Cada experiência foi feita com um tubo de látex, aumentando-se a pressão interna gradativamente até a formação do bulbo, quando foram realizadas as medições da pressão crítica, da pressão final e do tempo decorrido.

Em cada experiência o tubo foi pressurizado (até a formação do bulbo) cinco vezes com a mesma velocidade média.

Nesta série de experiências o tubo de látex foi tracionado em 10% ( $\lambda = 1,1$ ).

Dimensões do tubo de látex:

- diâmetro interno: 12 mm
- diâmetro externo: 16,5 mm
- comprimento inicial entre as braçadeiras: 25 cm
- comprimento final entre as braçadeiras: 27,5cm

Ensaios:

| <b>Ensaio rápido</b>         | <b>1°</b> | <b>2°</b> | <b>3°</b> | <b>4°</b> | <b>5°</b> |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Pressão crítica (Mpa)</b> | 0,098     | 0,097     | 0,09      | 0,09      | 0,089     |
| <b>Pressão final (Mpa)</b>   | 0,048     | 0,049     | 0,05      | 0,049     | 0,048     |
| <b>Tempo</b>                 | 1'        | 40"       | 1'        | 1'10"     | 1'20"     |

| <b>Ensaio médio</b>          | <b>1°</b> | <b>2°</b> | <b>3°</b> | <b>4°</b> | <b>5°</b> |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Pressão crítica (Mpa)</b> | 0,095     | 0,09      | 0,09      | 0,089     | 0,09      |
| <b>Pressão final (Mpa)</b>   | 0,05      | 0,05      | 0,05      | 0,05      | 0,049     |
| <b>Tempo</b>                 | 3'30"     | 3'        | 3'30"     | 4'        | 4'        |

| <b>Ensaio lento</b>          | <b>1°</b> | <b>2°</b> | <b>3°</b> | <b>4°</b> | <b>5°</b> |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Pressão crítica (Mpa)</b> | 0,095     | 0,092     | 0,09      | 0,09      | 0,089     |
| <b>Pressão final (Mpa)</b>   | 0,051     | 0,048     | 0,048     | 0,048     | 0,048     |
| <b>Tempo</b>                 | 7'        | 8'        | 8'20"     | 9'        | 8'        |

Tabela 3.1 – Pressões críticas, finais e tempo decorrido em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex.

Observações sobre o ensaio rápido:

- A pressão crítica foi relativamente alta nos dois primeiros ensaios.
- No terceiro ensaio ocorreu uma diminuição na pressão crítica (cerca de 7%), que se manteve praticamente constante (0,09Mpa) nos ensaios seguintes.
- Neste ensaio, devido à elevada velocidade de bombeamento, houve menor precisão na medição da pressão crítica.
- Foi observado escoamento do tipo turbulento do fluido no interior do tubo de látex.
- O bulbo se formou na parte inferior do tubo de látex.

Observações sobre o ensaio médio:

- A pressão crítica diminuiu cerca de 5% após o primeiro ensaio e se manteve constante (0,09 MPa) nos ensaios seguintes.
- Foi observado escoamento do tipo laminar do fluido no interior do tubo de látex.
- O bulbo se formou mais ao centro do tubo de látex.

Observações sobre o ensaio lento:

- A pressão crítica apresentou uma queda de 3% após o primeiro ensaio, cerca de 2% após o segundo ensaio, sendo de 5% a queda total e se manteve constante (0,09 MPa) nos ensaios posteriores.
- Foi observado escoamento do tipo laminar do fluido no interior do tubo de látex.
- O bulbo se formou na parte inferior do tubo de látex.

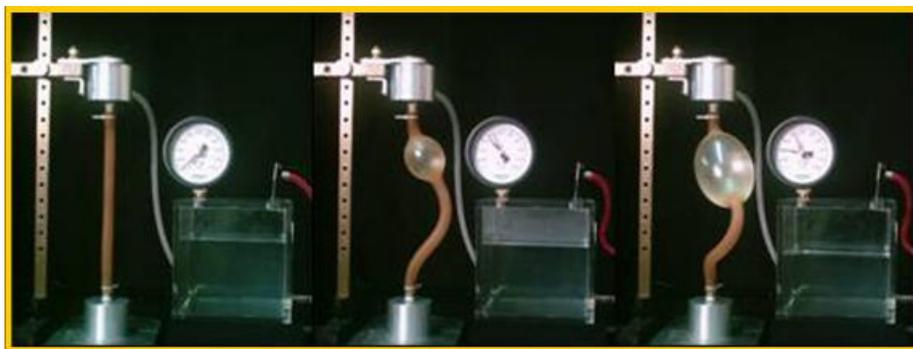
Conclusões sobre os ensaios anteriores:

- O fato de o tubo ter sido usado sucessivamente provocou decréscimo na pressão crítica devido a imperfeições criadas no material.
- A pressão crítica teve uma queda após as pressurizações iniciais e depois se manteve constante em todos os ensaios (0,09 MPa). A maior queda foi a do ensaio de bombeamento rápido (cerca de 7%). Nos outros ensaios, nos quais o escoamento da água era de forma laminar, o decréscimo foi semelhante e os valores de pressão crítica ficaram bem próximos.
- Podemos concluir que a velocidade de aplicação da pressão não influi nos valores da pressão crítica, contanto que o escoamento do fluido seja laminar.

### 3.2.2.2

#### Ensaios sucessivos de tubos de látex

A) Ensaios com tubos de látex sem tração,  $\lambda = 1,0$ .



(a)

(b)

(c)

Figura 3.6 – (a) início da experiência, (b) pressão crítica, (c) pressão final, ensaio ilustrativo da experiência.

| Ensaio 1              | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (Mpa) | 0,086 | 0,081 | 0,081 | 0,08  | 0,08  |
| Pressão final (Mpa)   | 0,042 | 0,042 | 0,042 | 0,042 | 0,042 |
| Volume do bulbo (ml)  | 373   | 356   | 356   | 356   | 320   |

| Ensaio 2              | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,084 | 0,081 | 0,08  | 0,08  | 0,08  |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,043 | 0,042 | 0,042 | 0,042 |
| Volume do bulbo (ml)  | 481   | 356   | 373   | 356   | 356   |

| Ensaio 3              | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,085 | 0,081 | 0,08  | 0,08  | 0,08  |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,042 | 0,042 | 0,042 | 0,042 |
| Volume do bulbo (ml)  | 409   | 338   | 338   | 338   | 338   |

Tabela 3.2 – Pressões críticas e finais em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex sem tração,  $\lambda = 1,0$ .

Gráfico comparativo:

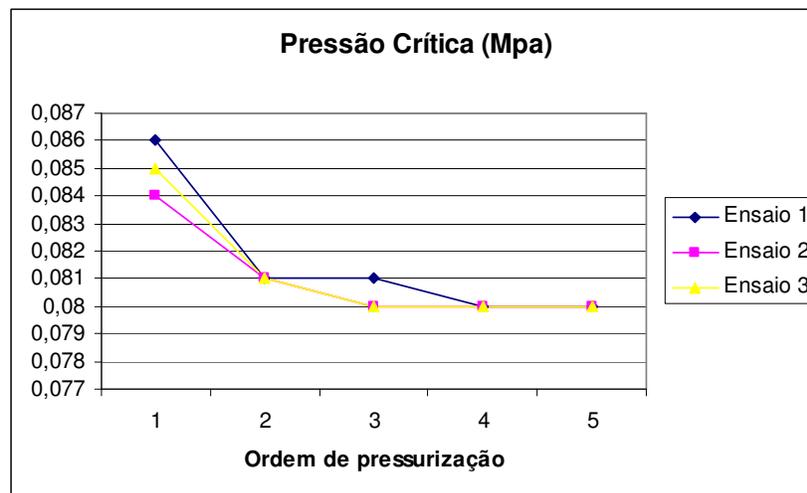


Figura 3.7 – Pressões críticas em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex sem tração,  $\lambda = 1,0$ .

Conclusões sobre os ensaios sem pré-condicionamento e sem tração:

- Ao ser pressurizado o tubo de látex apresentou pequena flambagem e o bulbo se formou na parte inferior do tubo de látex nos ensaios sem pré-condicionamento.

- O maior decréscimo da pressão crítica ocorreu nas duas primeiras pressurizações, e foi de aproximadamente 4,7%.
- A média dos volumes dos ensaios sem pré-condicionamento e sem tração foi de aproximadamente 363 ml.

B) Ensaios com tubos de látex sem pré-condicionamento e com tração de 10%,  $\lambda = 1,1$ .

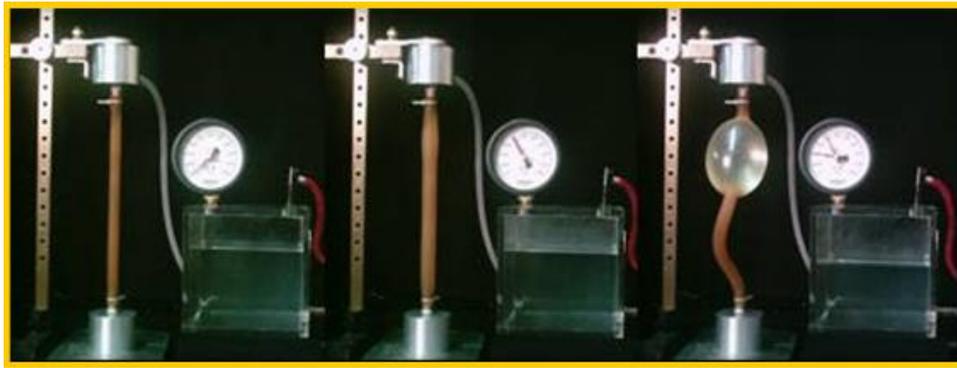


Figura 3.8 – (a) início da experiência, (b) pressão crítica, (c) pressão final, ensaio ilustrativo da experiência.

| Ensaio 4              | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,082 | 0,078 | 0,076 | 0,077 | 0,075 |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,044 | 0,043 | 0,042 | 0,042 |
| Volume do bulbo (ml)  | 445   | 302   | 302   | 302   | 302   |

| Ensaio 5              | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,082 | 0,077 | 0,076 | 0,076 | 0,075 |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 |
| Volume do bulbo (ml)  | 391   | 267   | 267   | 267   | 267   |

| Ensaio 6              | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,083 | 0,077 | 0,077 | 0,076 | 0,076 |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,043 | 0,043 | 0,043 | 0,043 |
| Volume do bulbo (ml)  | 356   | 231   | 231   | 231   | 231   |

Tabela 3.3 – Pressões críticas e finais em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex com tração,  $\lambda = 1,1$

Gráfico comparativo:

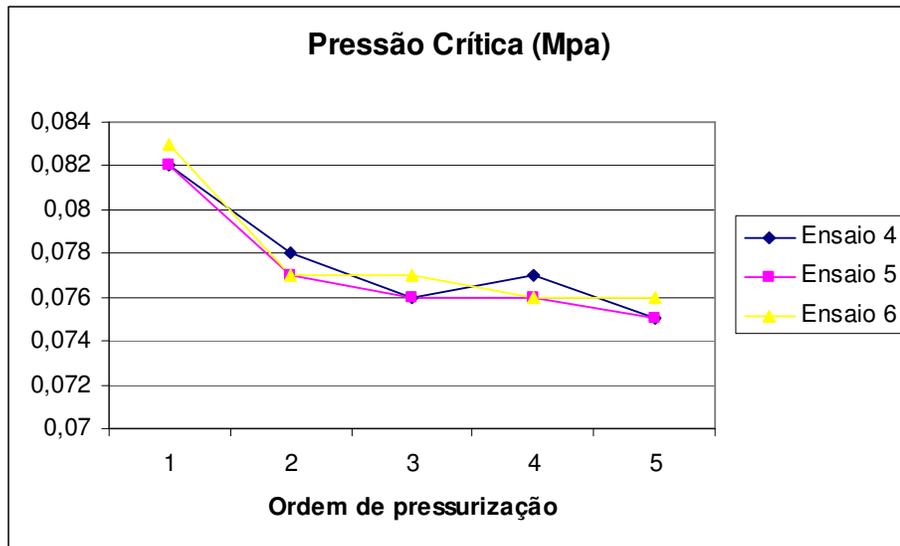


Figura 3.9 – Pressões críticas em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex com tração,  $\lambda = 1,1$

Conclusões sobre os ensaios com tração de 10%:

- O decréscimo médio da pressão crítica após a primeira pressurização foi da ordem de 6%.
- Em um dos ensaios o bulbo se formou no meio do tubo, nos outros dois se formou na parte inferior. O tubo não flambou em nenhum dos três ensaios.
- A média dos volumes dos ensaios com 10% de tração foi de 292 ml.

C) Ensaios com tubos de látex com tração de 20%,  $\lambda = 1,2$ .

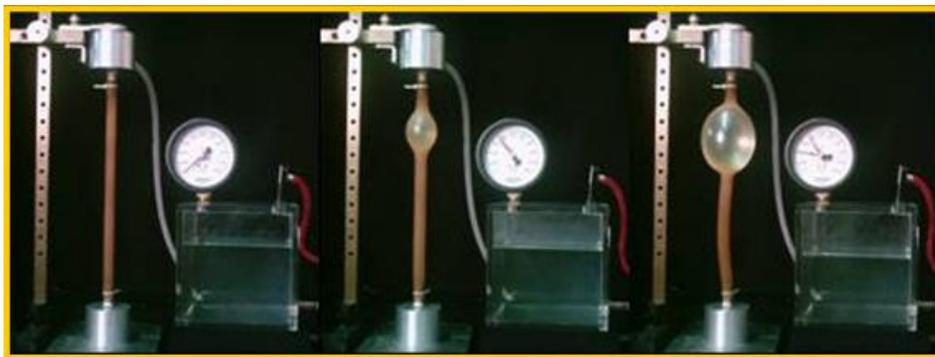


Figura 3.10 – (a) início da experiência, (b) pressão crítica, (c) pressão final, ensaio ilustrativo da experiência.

| Ensaio 7              | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,082 | 0,078 | 0,078 | 0,076 | 0,076 |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,044 | 0,044 | 0,043 | 0,043 |
| Volume do bulbo (ml)  | 320   | 178   | 231   | 267   | 267   |

| Ensaio 8              | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,081 | 0,078 | 0,078 | 0,078 | 0,076 |
| Pressão final (MPa)   | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,045 | 0,044 |
| Volume do bulbo (ml)  | 320   | 267   | 267   | 231   | 250   |

| Ensaio 9              | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,082 | 0,077 | 0,075 | 0,076 | 0,074 |
| Pressão final (MPa)   | 0,043 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 |
| Volume do bulbo (ml)  | 320   | 267   | 267   | 231   | 250   |

Tabela 3.4 – Pressões críticas e finais em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex com tração,  $\lambda = 1,2$

Gráfico comparativo:

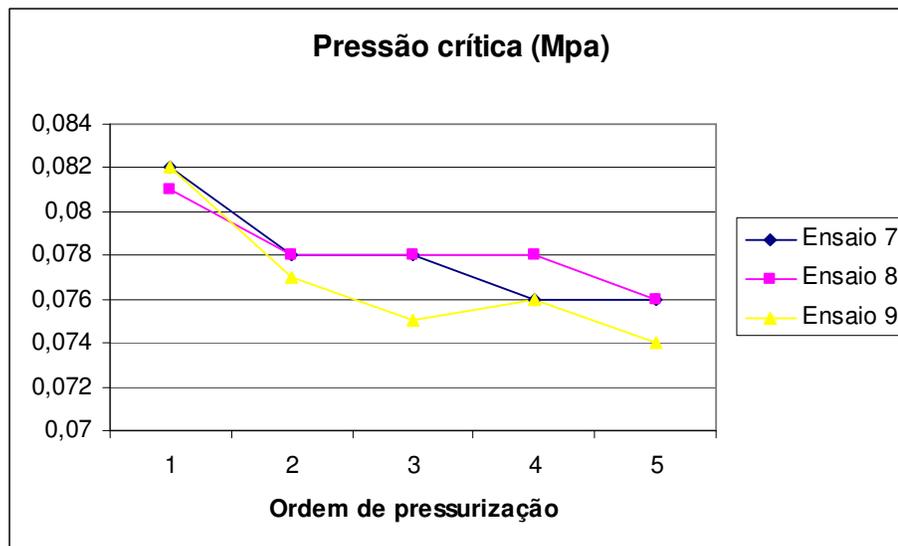


Figura 3.11 – Pressões críticas em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex com tração,  $\lambda = 1,2$ .

Conclusões sobre os ensaios com tração de 20%:

- O tubo não flambou e o bulbo se formou em sua parte inferior em todos os ensaios.
- O primeiro decréscimo médio foi da ordem de 4,8%.
- A média dos volumes dos ensaios com 20% de tração foi de 262 ml.

D) Comparação entre as médias das pressões críticas nos ensaios de tubos de látex, sem e com diferentes níveis de tração inicial.

A média da pressão crítica (em MPa) de cada ensaio é apresentada na tabela abaixo.

| Ensaio          | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda = 1$   | 0,083 | 0,077 | 0,077 | 0,076 | 0,075 |
| $\lambda = 1,1$ | 0,082 | 0,077 | 0,076 | 0,076 | 0,073 |
| $\lambda = 1,2$ | 0,081 | 0,077 | 0,077 | 0,076 | 0,076 |

Tabela 3.5 – Média das pressões críticas em ensaios sucessivos com diferentes níveis de tração.

Gráfico comparativo:

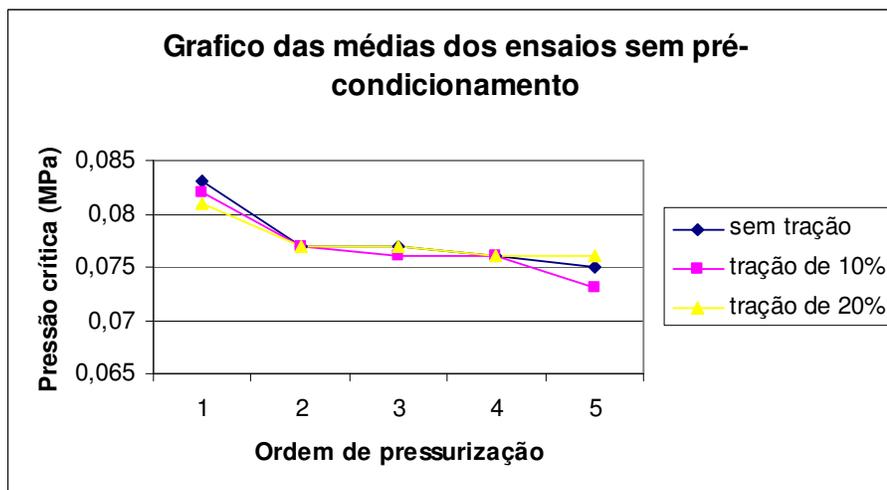


Figura 3.12 – Média das pressões críticas em ensaios sucessivos com diferentes níveis de tração.

Conclusão dos ensaios sem pré-condicionamento:

- Todos os bulbos, com exceção de um, formaram-se na parte inferior do tubo de látex. O tubo sem tração apresentou pequena flambagem antes da formação do bulbo.

- A média dos primeiros decréscimos nos ensaios foi de aproximadamente 5,2%.
- A média dos volumes dos ensaios foi de aproximadamente 305ml.

### 3.2.2.3

#### Ensaios sucessivos em tubos de látex com pré-condicionamento

Descrição do ensaio:

Antes de ser instalado no aparato metálico o tubo de látex foi pré-condicionado manualmente, puxando-se suas extremidades até que o comprimento do tubo atingisse o dobro do comprimento inicial. O tubo foi esticado 20 vezes, de forma rápida e sucessiva.

Após ter sido pré-condicionado o tubo foi instalado no aparato, suas extremidades presas por braçadeiras plásticas nos bocais e enchido de fluido.

A pressão do fluido foi aumentada de forma suave até que se formasse um bulbo no tubo, quando foram registrados os valores da pressão crítica (de formação do bulbo), da pressão final (pressão após a formação do bulbo), do tempo decorrido até a formação do bulbo e o volume médio do bulbo.

Em cada ensaio o mesmo tubo foi pressurizado até a formação do bulbo cinco vezes com a mesma velocidade média. O tempo médio até a formação do bulbo foi de 4 minutos, de forma que o escoamento fosse laminar.

A) Ensaio nos tubos de látex sem tração,  $\lambda = 1,0$ .

| Ensaio 10             | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,083 | 0,083 | 0,08  | 0,079 | 0,079 |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,043 | 0,043 | 0,044 | 0,043 |
| Volume do bulbo (ml)  | 267   | 267   | 250   | 214   | 267   |

| Ensaio 11             | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,083 | 0,08  | 0,08  | 0,08  | 0,079 |
| Pressão final (MPa)   | 0,043 | 0,044 | 0,043 | 0,042 | 0,043 |
| Volume do bulbo (ml)  | 267   | 214   | 267   | 250   | 214   |

| Ensaio 12             | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,084 | 0,08  | 0,08  | 0,079 | 0,079 |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,042 | 0,042 | 0,042 | 0,042 |
| Volume do bulbo (ml)  | 284   | 267   | 250   | 250   | 284   |

Tabela 3.6 - Pressões críticas e finais em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex sem tração,  $\lambda = 1,0$

Gráfico comparativo:

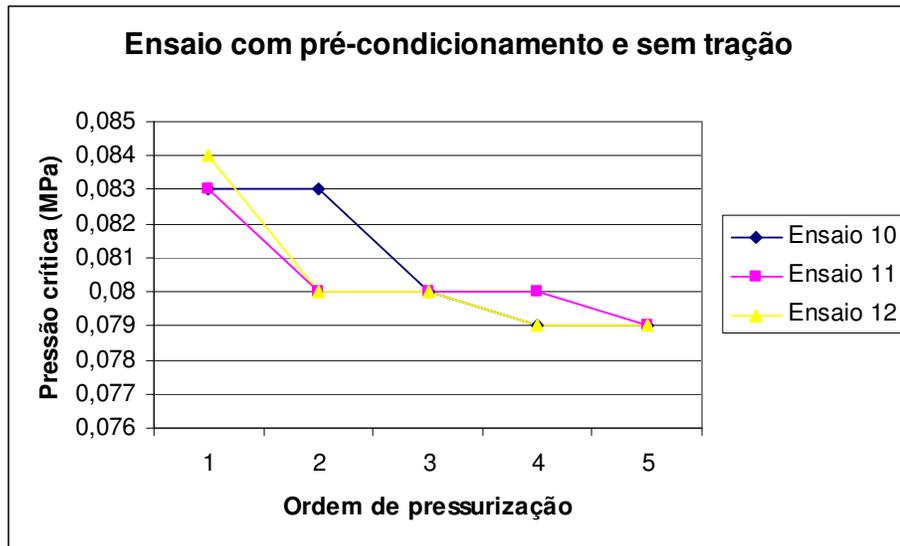


Figura 3.13 - Pressões críticas em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex sem tração,  $\lambda = 1,0$ .

Conclusões sobre os ensaios com pré-condicionamento e sem tração:

- O primeiro decréscimo da pressão crítica ocorreu nas duas primeiras pressurizações, e foi de aproximadamente 4%. Notou-se que há um segundo decréscimo, menor (aproximadamente 1%), entre a 3ª e a 4ª pressurização.
- Em dois ensaios o bulbo se formou na parte central do tubo, nos três ensaios o tubo flambou acentuadamente antes da formação do bulbo. O pré-condicionamento do tubo aliado ao fato deste não estar tracionado pareceu influir nesse fenômeno.
- A média dos volumes dos ensaios com pré-condicionamento e sem tração foi de aproximadamente 255 ml.

B) Ensaio com tubos de látex com pré-condicionamento e com tração de 10%,  $\lambda = 1,1$ .

| Ensaio 13             | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,083 | 0,079 | 0,078 | 0,078 | 0,077 |
| Pressão final (MPa)   | 0,043 | 0,042 | 0,044 | 0,042 | 0,044 |
| Volume do bulbo (ml)  | 320   | 285   | 250   | 285   | 214   |

| Ensaio 14             | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,084 | 0,079 | 0,078 | 0,079 | 0,077 |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,043 | 0,043 | 0,044 | 0,043 |
| Volume do bulbo (ml)  | 356   | 302   | 267   | 250   | 284   |

| Ensaio 15             | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão crítica (MPa) | 0,084 | 0,08  | 0,079 | 0,078 | 0,077 |
| Pressão final (MPa)   | 0,042 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 |
| Volume do bulbo (ml)  | 373   | 284   | 284   | 284   | 284   |

Tabela 3.7 - Pressões críticas e finais em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex com tração,  $\lambda = 1,1$

Gráfico comparativo:

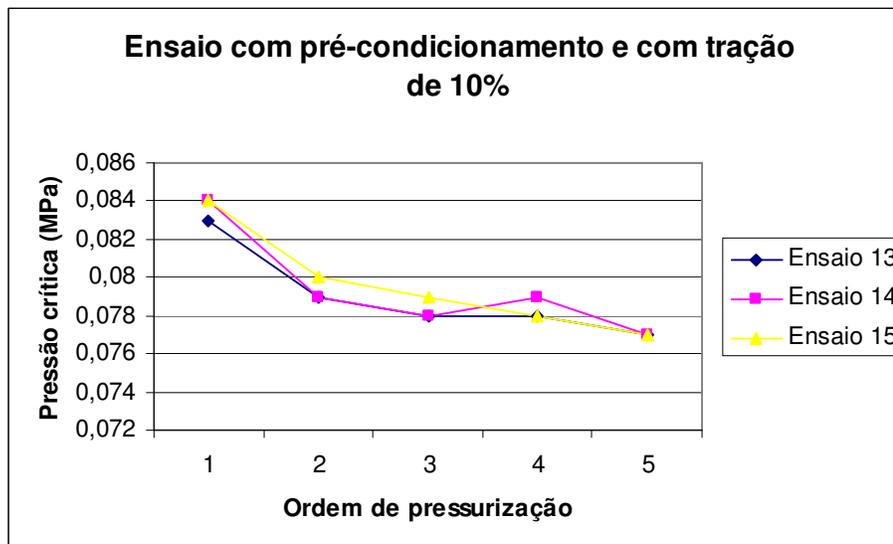


Figura 3.14 - Pressões críticas em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex com tração,  $\lambda = 1,1$ .

Conclusões sobre os ensaios com pré-condicionamento e com tração de 10%:

- O bulbo se formou na farte inferior do tubo após pequena flambagem do mesmo em todos os ensaios. Aparentemente o pré-condicionamento acentuou a flambagem do tubo de látex.
- O maior decréscimo da pressão crítica ocorreu nas duas primeiras pressurizações, e foi de aproximadamente 5,2 %, maior que o decréscimo sem tração.
- A média dos volumes dos ensaios com pré-condicionamento e tração de 10% foi de aproximadamente 288 ml.

C) Ensaios com tubos de látex com pré-condicionamento e com tração de 20%,  $\lambda = 1,2$ .

| <b>Ensaio 16</b>             | <b>1°</b> | <b>2°</b> | <b>3°</b> | <b>4°</b> | <b>5°</b> |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Pressão crítica (MPa)</b> | 0,084     | 0,078     | 0,078     | 0,077     | 0,076     |
| <b>Pressão final (MPa)</b>   | 0,043     | 0,044     | 0,044     | 0,044     | 0,044     |
| <b>Volume do bulbo (ml)</b>  | 356       | 250       | 250       | 250       | 250       |

| <b>Ensaio 17</b>             | <b>1°</b> | <b>2°</b> | <b>3°</b> | <b>4°</b> | <b>5°</b> |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Pressão crítica (MPa)</b> | 0,084     | 0,077     | 0,077     | 0,076     | 0,075     |
| <b>Pressão final (MPa)</b>   | 0,044     | 0,044     | 0,045     | 0,044     | 0,044     |
| <b>Volume do bulbo (ml)</b>  | 340       | 250       | 250       | 284       | 267       |

| <b>Ensaio 18</b>             | <b>1°</b> | <b>2°</b> | <b>3°</b> | <b>4°</b> | <b>5°</b> |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Pressão crítica (MPa)</b> | 0,083     | 0,076     | 0,076     | 0,075     | 0,074     |
| <b>Pressão final (MPa)</b>   | 0,043     | 0,044     | 0,044     | 0,044     | 0,044     |
| <b>Volume do bulbo (ml)</b>  | 340       | 267       | 267       | 231       | 250       |

Tabela 3.8 - Pressões críticas e finais em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex com tração,  $\lambda = 1,2$

Gráfico comparativo:

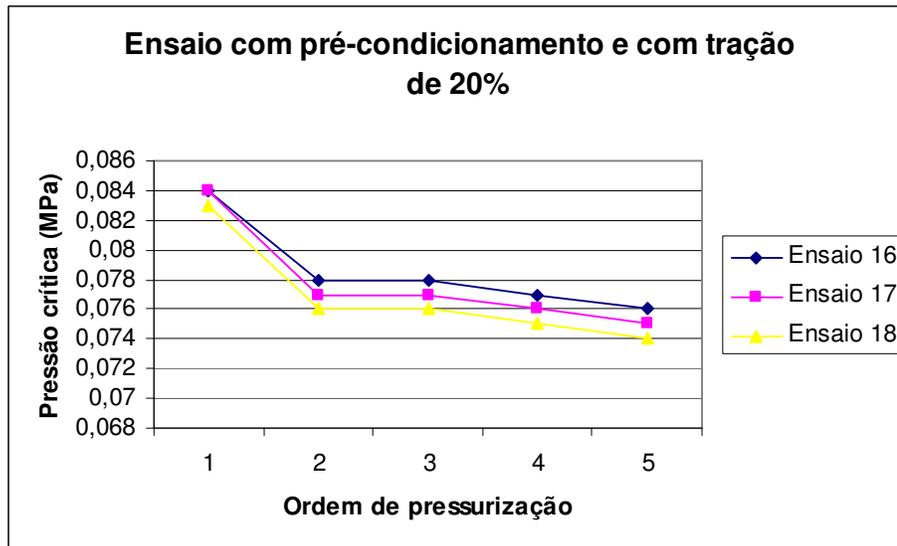


Figura 3.15 - Pressões críticas em ensaios consecutivos com o mesmo tubo de látex com tração,  $\lambda = 1,2$ .

Conclusões sobre os ensaios com pré-condicionamento e com tração de 20%:

- O tubo não flambou e o bulbo se formou em sua parte inferior em todos os ensaios.
- O primeiro decréscimo médio da pressão crítica foi da ordem de 7,9%.
- A média dos volumes dos ensaios com pré-condicionamento e com tração de 20% foi de 273ml.
- Notou-se que os valores iniciais da pressão crítica foram idênticos aos dos ensaios com 10% de tração, com pré-condicionamento. A diferença na pressão crítica se deu nas pressurizações seguintes, diminuindo com a tração, por isso o decréscimo maior nos ensaios com 20% de tração com pré-condicionamento.

D) Comparação entre as médias das pressões críticas nos ensaios de tubos de látex com pré-condicionamento, sem e com diferentes níveis de tração inicial.

A média da pressão crítica (em MPa) de cada ensaio com pré-condicionamento é apresentada na tabela 3,9.

| Ensaio          | 1°    | 2°    | 3°    | 4°    | 5°    |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda = 1$   | 0,083 | 0,081 | 0,08  | 0,079 | 0,079 |
| $\lambda = 1,1$ | 0,083 | 0,079 | 0,078 | 0,078 | 0,077 |
| $\lambda = 1,2$ | 0,083 | 0,077 | 0,077 | 0,076 | 0,075 |

Tabela 3.9 – Média das pressões críticas em ensaios sucessivos com diferentes níveis de tração.

Gráfico comparativo:

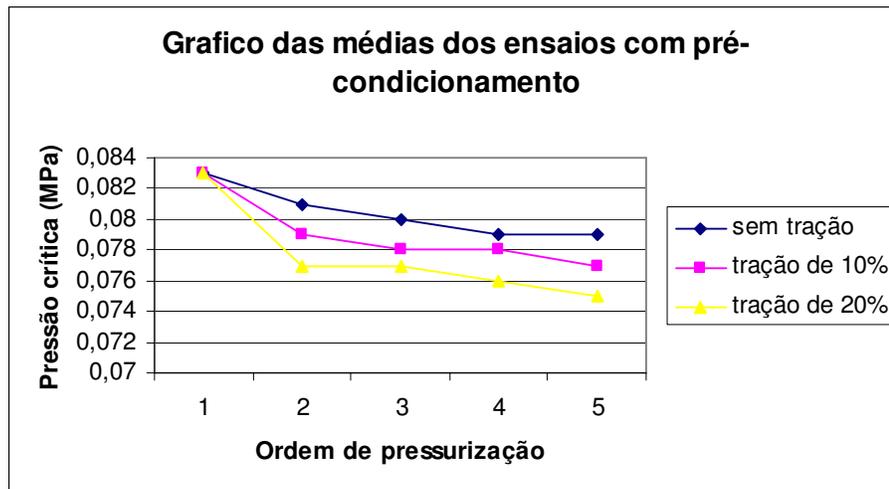


Figura 3.16 – Média das pressões críticas em ensaios sucessivos com diferentes níveis de tração.

Conclusão dos ensaios com pré-condicionamento:

- O bulbo se formou no meio do tubo duas vezes quando não traçado e depois de acentuada flambagem, nos outros ensaios se formou sempre na parte inferior. Quando a tração era de 10% foi observada suave flambagem do tubo, fato que não ocorreu quando a tração era de 20%.

- A média dos primeiros decréscimos dos ensaios com pré-condicionamento foi da ordem de 5,7%.
- A média dos volumes desses ensaios foi de 272 ml.

### 3.2.2.4.

#### Comparação dos efeitos do pré-condicionamento em tubos de látex

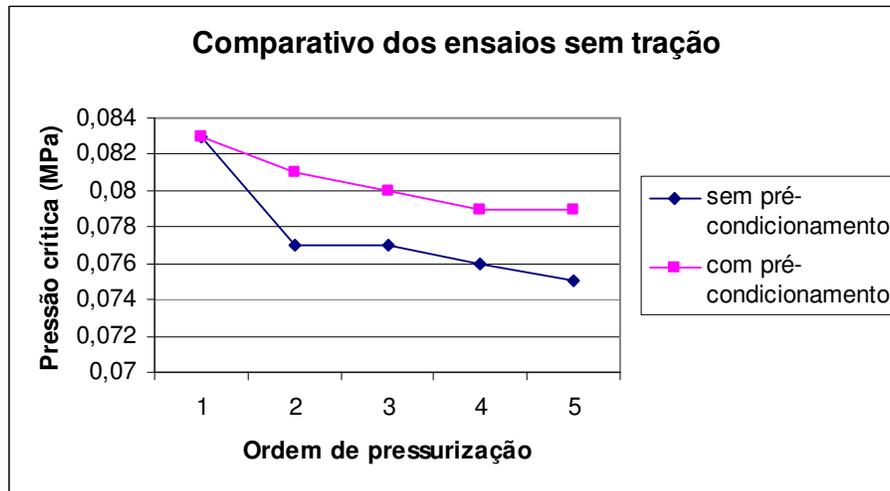


Figura 3.17 - Média das pressões críticas dos ensaios sucessivos em tubos de látex sem e com pré-condicionamento, sem tração.

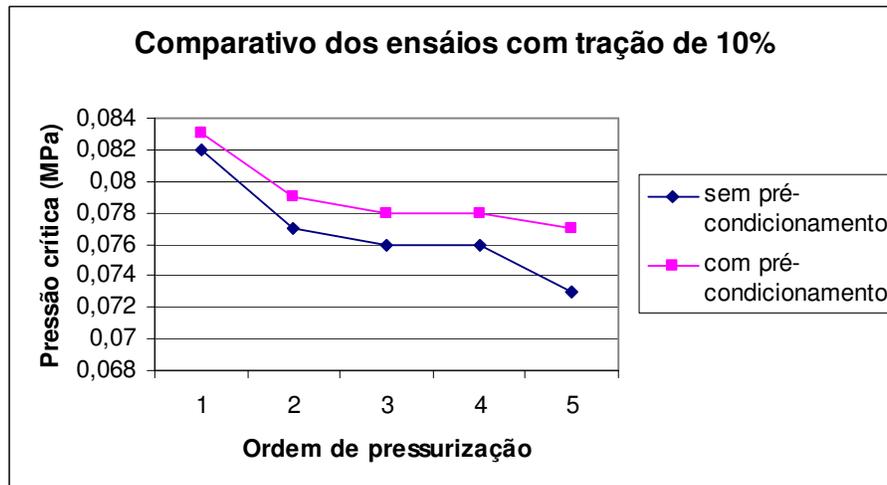


Figura 3.18 - Média das pressões críticas dos ensaios sucessivos em tubos de látex sem e com pré-condicionamento, tração de 10%.

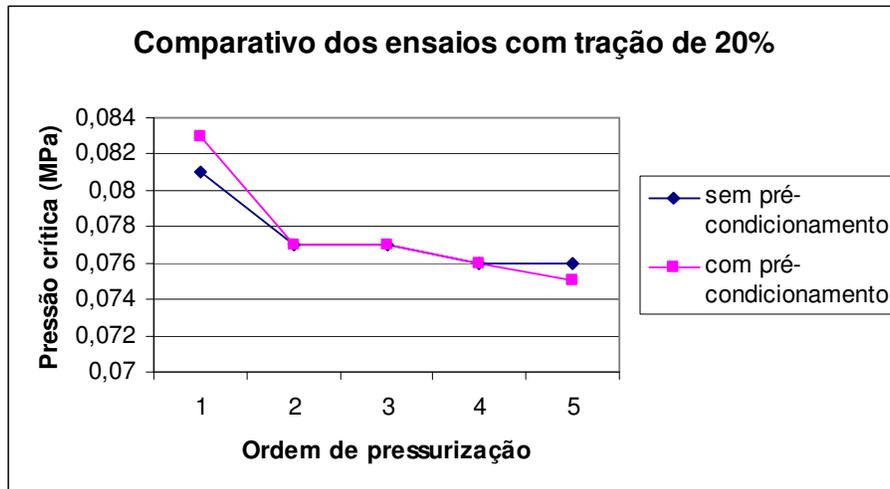


Figura 3.19 - Média das pressões críticas dos ensaios sucessivos em tubos de látex sem e com pré-condicionamento, tração de 20%.

Conclusões:

1. Independentemente do nível de tração e da existência ou não de pré-condicionamento há uma súbita queda na pressão crítica nos ensaios que sucedem a primeira pressurização.
2. A influência do pré-condicionamento diminui a medida em que o tubo é tracionado, sendo quase inexistente nos ensaios que sucedem o primeiro com nível de tração de 20%.

### 3.3. Tubo de silicone

#### 3.3.1. Escolha do material utilizado nos tubos de silicone

Na confecção dos tubos de silicone foi utilizada a borracha de silicone B1, DU LÁTEX – Produtos Industriais Ltda.

Antes da confecção dos tubos de silicone, foram construídos corpos de prova de formato cilíndrico como, podemos ver na imagem abaixo.

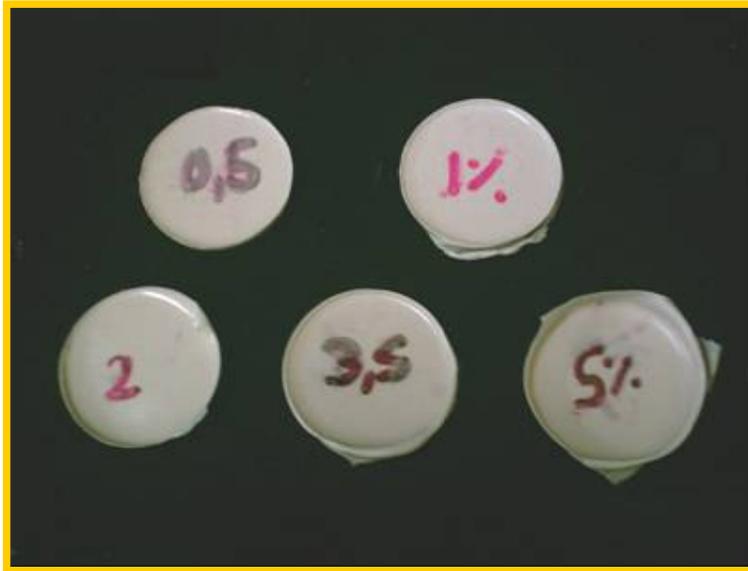


Figura 3.20 – Corpos de prova para determinação da concentração de catalisador

A figura 3.20 consta dos corpos de prova com 4,8 cm de diâmetro e 0,6 cm de espessura, confeccionados com o objeto de determinar como varia o comportamento do material para diferentes concentrações de catalisador. Para a experiência da formação dos aneurismas era importante utilizar um material que apresentasse elasticidade suficiente para que pudéssemos observar a formação dos bulbos, pois se o material fosse muito rígido, este se romperia antes que fosse observado o aneurisma.

Foram construídos corpos de prova com as seguintes concentrações de catalisador em relação a massa de silicone utilizada:

- 0,5%
- 1,0%
- 2,0%
- 3,5%
- 5,0%

Para a confecção dos tubos de silicone foi decidido utilizar uma concentração de 0,5% de catalisador para a massa total de silicone.

### 3.3.2. Ensaio de tração

A mesma mistura de silicone e catalisador feita para a confecção dos tubos cilíndricos de silicone (modelo da aorta), foi utilizada para a execução dos corpos de prova para o ensaio de tração. Este ensaio teve o objetivo de determinar o módulo de elasticidade do material a ser empregado na análise numérica, tendo em vista o comportamento linear observado no ensaio.

Os corpos de prova apresentavam as seguintes dimensões:

- diâmetro externo: 0,8 cm
- diâmetro interno: 0,5 cm

Na figura 3.21 e 3.22 podemos observar o molde e a confecção dos corpos de prova.

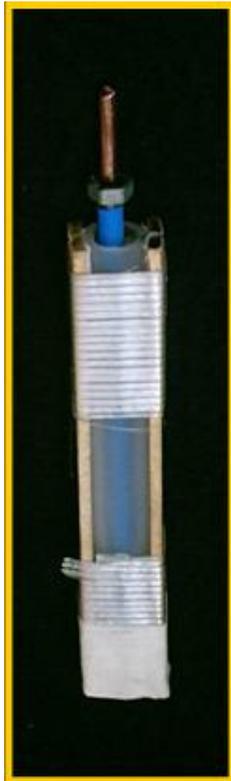


Figura 3.21 – Molde do corpo de prova



Figura 3.22 – Confecção dos corpos de prova

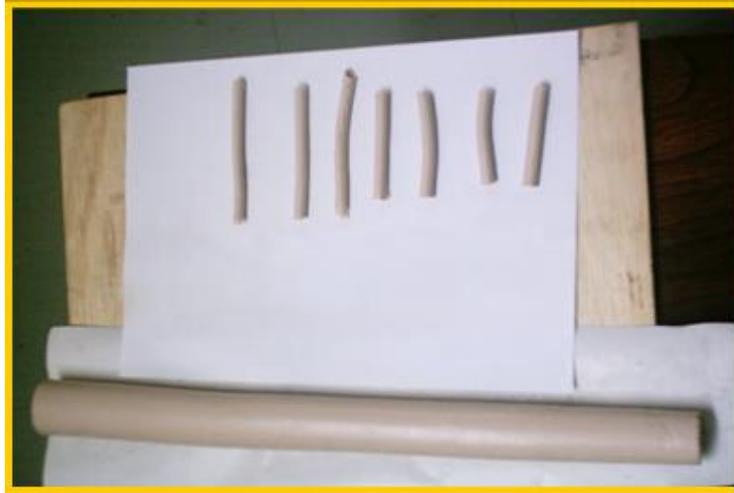


Figura 3.23 – Detalhe dos corpos de prova e do tubo de silicone

Nas figuras 3.24 e 3.25 podemos observar o ensaio de tração.

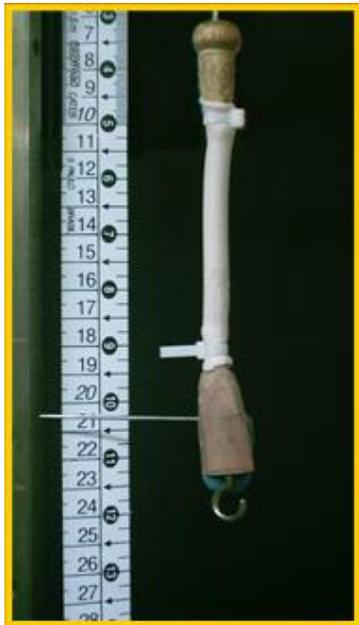


Figura 3.24 – Ensaio de tração  
(imagem sem carregamento)



Figura 3.25 – Ensaio de tração  
(imagem com carregamento)

Com a análise do gráfico tensão x deformação traçado para o ensaio anterior determinou-se o módulo de elasticidade como sendo  $E = 134,63 \text{ kPa}$ .

Foi utilizado o coeficiente de Poisson,  $\nu = 0,5$  pois o material é incompressível.

### 3.3.3. Tubo de silicone

Para a confecção do tubo de silicone foi desenvolvido no Laboratório de Membranas e Biomembranas um molde de gesso. O gesso foi colocado em um tubo de PVC, com um cilindro de madeira com diâmetro variável ao longo de seu comprimento. No interior deste molde de gesso foi introduzido outro molde de madeira de diâmetros menores e variáveis ao longo de seu comprimento. Introduzimos silicone no espaço vazio entre o molde de gesso e o tubo de madeira com diâmetro variável, para assim obtermos o tubo com a geometria desejada, como mostra a figura 3.26.

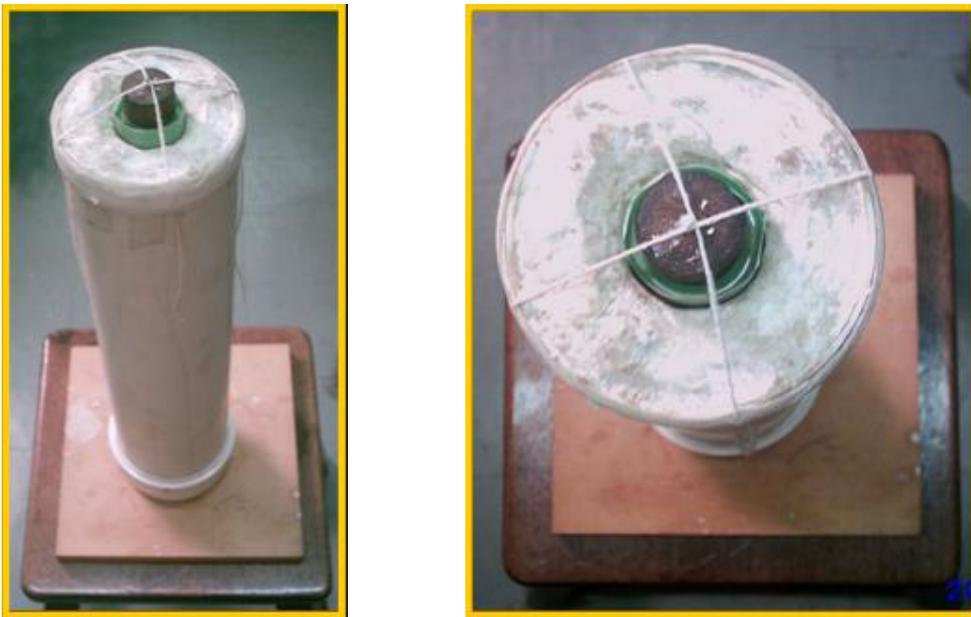


Figura 3.26 – Detalhes do molde de gesso utilizado para o modelo de silicone da aorta.

### 3.3.4. Descrição da experiência do tubo de silicone

- Para simular as artérias foram modelados no Laboratório de Biomembranas tubos cilíndricos de silicone. Para representar a geometria da aorta, esses tubos de silicone apresentam variação do diâmetro e da espessura ao longo de seu comprimento. São incompressíveis, preservando o volume de material.
- Os ensaios foram realizados injetando ar no interior dos tubos de silicone.

- A pressão interna foi medida por meio do aparelho desenvolvido para este fim, mostrado na figura 3.3.

### **3.3.5.**

#### **Procedimento experimental**

1. O tubo de silicone foi fixado no aparato metálico prendendo-se suas extremidades nos bocais com braçadeiras plásticas. A distância entre as braçadeiras corresponde ao comprimento inicial do tubo de silicone a ser ensaiado.
2. O tubo de silicone foi então tracionado regulando-se a altura do suporte metálico.
3. Através de bombeamento suave aumentou-se a pressão interna até que o bulbo (simulação do aneurisma) se formasse. Foram registrados então a pressão crítica por meio do barômetro quando ocorreu a formação do bulbo.

### **3.3.6.**

#### **Investigação da pressão crítica em tubos de silicone**

##### **3.3.6.1.**

##### **Descrição do ensaio**

Através do barômetro (representado na figura 3.3) foi aplicada a pressão no interior do tubo de silicone de forma suave, até a formação do bulbo, quando se realizou a medição da pressão crítica.

Dimensões adotadas para o tubo de silicone:

- diâmetro interno da parte inferior: 2,3 cm
- diâmetro externo da parte inferior: 2,8 cm
- diâmetro interno da parte superior: 2,8 cm
- diâmetro externo da parte superior: 3,8 cm
- comprimento entre as braçadeiras: 40 cm

### 3.3.7. Ensaio realizados

#### Ensaio 1

No primeiro ensaio o tubo de silicone foi tracionado de 10%, ( $\lambda = 1,1$ )

- Comprimento inicial: 40,5 cm
- Comprimento final: 45,5 cm

A pressão crítica encontrada foi de 11,2 KPa.

#### Ensaio 2

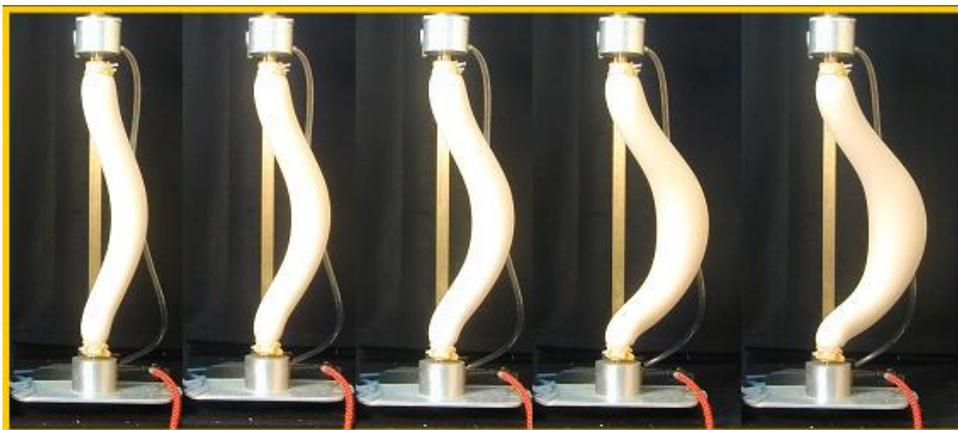
No segundo ensaio o tubo de silicone não foi tracionado, ( $\lambda = 1,0$ )

- Comprimento inicial: 40,5 cm

A pressão crítica encontrada foi de 13,02 kPa.



P = 1,02 KPa    P = 5,19 KPa    P = 7,11 KPa    P = 9,19 KPa    P = 10,95 Kpa



P = 12,35 kPa    P = 12,78 kPa    P = 13,02 kPa    P = 12,72 kPa    P = 11,72 kPa

Figura 3.27 – Seqüência da pressurização do tubo de silicone sem tração,  $\lambda = 1,0$ .

Na Figura 3.27 podemos observar a seqüência do ensaio e de suas respectivas pressões críticas.

### Ensaio 3

No terceiro ensaio o tubo de silicone foi tracionado de 40% ( $\lambda = 1,4$ )

- Comprimento inicial: 33 cm
- Comprimento final: 45,5 cm

A pressão crítica encontrada foi de 11,22 kPa.

Observações sobre o ensaio 3:

- O tubo de silicone era menor do que os anteriores, apresentando, portanto uma geometria um pouco diferente.
- Os diâmetros superiores (interno e externo) eram os mesmos dos experimentos anteriores.
- O diâmetro externo inferior era de 2,975 cm
- O diâmetro interno inferior era de 2,375 cm

A grande flambagem do tubo de silicone ocorreu devido às imperfeições locais. Podemos observar na figura 3.28 que a espessura não é a mesma em todos os pontos da seção.



Figura 3.28 – detalhe da variação da espessura no tubo de silicone