

## **ANÁLISE EXPERIMENTAL DA MECÂNICA DE ANEURISMAS**

**Aluno: Luciano de Almeida Ferreira**  
**Orientadora: Djenane C. Pamplona**

### **Objetivos**

Simular experimentalmente a formação de aneurismas da aorta abdominal e estudar seu comportamento e suas propriedades mecânicas. Servir de base de dados para comparação com análises numéricas para uma tese de mestrado [1].

### **Metodologia**

A fim de aumentar a fidelidade de nossa simulação iniciamos estudos sobre a geometria detalhada da aorta abdominal. Como se trata de um tubo com diâmetro e espessura variável não há disponível no mercado nada parecido. Após extensa pesquisa sobre materiais mais adequados e processos de moldagem começamos a produção de tubos de silicone com as dimensões exatas de uma aorta abdominal.

Utilizando diferentes proporções de catalisador no preparo do silicone é possível modificar a elasticidade e resistência final do material. Realizamos testes de tração em tubos de silicone para obter seus coeficientes elásticos e determinar a pressão crítica do tubo de silicone.

A pressão crítica encontrada era pequena para ser medida pelo antigo aparato, então utilizamos um aparelho que permite a medição e pressurização de ar suavemente. Realizamos com sucesso ensaios com tubos de silicone tracionados nos quais o aneurisma se formou e rompeu.

Nosso próximo passo será criar tubos de silicone com imperfeições locais semelhantes as que ocorrem na realidade para melhor análise experimental. Para isso o molde será adaptado permitindo assim que imperfeições específicas como as que ocorrem na realidade serão fielmente simuladas.

### **Estudo de dosagens do catalisador**

#### **Objetivo**

Inicialmente a dosagem de catalisador utilizada nas amostras se teste era a fornecida pelo fabricante. Essa dosagem se mostrou inadequada pois o tempo de manuseio do silicone era insuficiente para encher todos os moldes. Como as propriedades do silicone dependem da proporção de catalisador a ele misturado, foram realizados testes para determinar a proporção mais adequada.

### **Características do material**

#### **Silicone rty cal/n branca, com catalisador 550**

Peso específico da borracha: 1L=1,32kg (líquida)

Volume de borracha p/ cada amostra teste: 4mL .....5,28g

Volume total para 4 amostras teste: 16ml.....21,12g

dosagem	volume	proporção	tempo de manuseio	tempo de secagem
5%	1.056ml	16:01	<2min	15min

dosagem	volume	proporção	tempo de manuseio	tempo de secagem
3.5%	0.7392ml	16:0.7	<5min	25min

dosagem	volume	proporção	tempo de manuseio	tempo de secagem
2%	0.4224ml	16:0.4	<10min	35min

dosagem	volume	proporção	tempo de manuseio	tempo de secagem
1%	0.2112ml	16:0.2	<20min	50min

dosagem	volume	proporção ml	tempo de manuseio	tempo de secagem
0.5%	0.1056ml	16:0.1	<40min	>90



Fig.: Amostras do teste de dosagens de catalisador

### Considerações sobre o preparo/mistura da borracha com catalisador:

1. Misturar bem a borracha com o catalisador. O tempo indicado pelo fabricante é de um minuto.
2. As dosagens de 5%, 3,5% e 2% foram testadas e são inadequadas. A borracha endurece, porém o tempo de manuseio é muito curto.
3. A dureza está diretamente relacionada à quantidade de catalisador
4. As dosagens mais indicadas para moldagem são a de 1% ou 0.5%, por apresentarem maior tempo de manuseio e resultado final semelhante aos de dosagens maiores de catalisador.

### Cálculo aproximado do volume de tubos

Artéria:  $F_{int} = 2,8\text{cm}$ ,  $L = 45\text{ cm}$ ,

Caninho:  $F_{ext} = 8\text{mm}$ ,  $L = 1\text{m}$ ,  $raio_{int} = 0,3\text{cm}$

Aneurisma:  $F_{int} = 8\text{ cm}$ ,  $r = 4\text{ cm}$ .

Volume da artéria sem o aneurisma =  $p.1,4^2.45 = 277\text{ml}$ .

Volume do aneurisma:  $\frac{4}{3}.p.4^3 = 268\text{ml}$

Volume do caninho =  $p.0.3^2.100 = 28\text{ml}$

Volume total necessário: 573ml

### Dosagens para mistura de borracha para artéria e quatro amostras teste

Amostras teste: 16mL, artéria: 277ml

São preparados 300ml de borracha (396g), catalisador:  $1\% \cdot 396 = 3,96\text{g}$  (396ml)

### Materiais usados para o molde de tubos de teste

- Borracha rtv cal/n branca, catalisador 550.
- Molde externo: tubo de plástico com  $D_{int}=7\text{ mm}$ ,  $H=1,5\text{mm}$ .
- Molde interno: fio encapado de diâmetros: fio azul=4 mm, fio verde=5 mm.
- Porcas para alinhamento do fio e vedação do molde
- Estacas de madeira para alinhamento do molde externo, melhor manuseio.
- Fitas adesivas para fixação das estacas no tubo e vedação do molde.
- Óleo vegetal lubrificação do molde para melhor desmolde.
- Placa de madeira para fixação dos moldes para secagem.

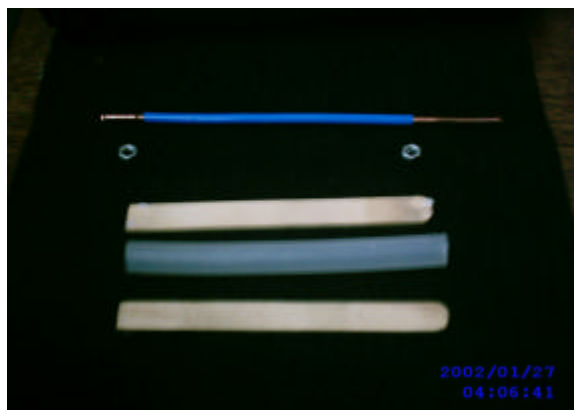


Fig.: componentes do molde de teste

### Metodologia de preparo das amostras de teste

1. O molde externo é preparado: o tubo é preso às estacas de madeira com as fitas de modo que fique o mais alinhado possível. A base do molde deve ser vedada com a fita.
2. Lubrificação do molde externo e interno com óleo vegetal.
3. Fixação dos moldes na placa de madeira verticalmente com a fita adesiva.
4. Mistura da borracha com o catalisador.
5. O volume de borracha usado no molde é medido com uma seringa e é colocado em cada molde.
6. O fio é inserido no molde, tendo cuidado para que bolhas não se formem.
7. Coloca-se então a porca na parte superior do molde, que é vedado com a fita.
8. A placa de madeira com os moldes vedados é posta para secar.

### Relação H/D por fio usado no molde

$D=7\text{ mm}$ ,  $H=1,5\text{mm}$       $\frac{H}{D}=0,21$

Relação H/D da aorta calculada: 0,13

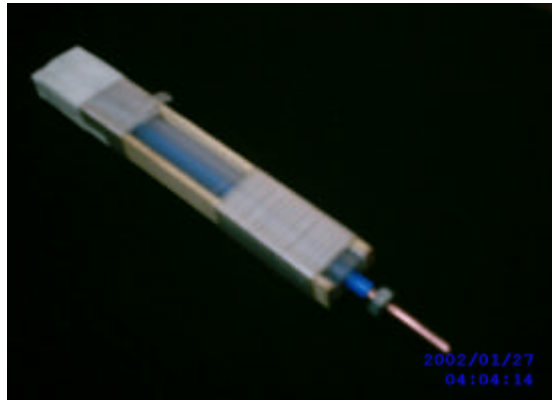


Fig.: molde das amostras de teste



Fig.: amostras de teste secando

### Teste de tração das amostras teste

#### Objetivos

Obter constantes elásticas do silicone para simulação e verificar efeitos da dosagem de catalisador nas propriedades mecânicas em tubos semelhantes aos que simulam a artéria.

#### Procedimentos para teste de tração

1. A amostra é fixada no aparato de teste por meio de duas braçadeiras plásticas. Na extremidade inferior do tubo há uma agulha para aferição de seu comprimento bem como um gancho para prender a carga.
2. Mede-se o comprimento do tubo no aparato sem carga.
3. Adiciona-se uma carga de 10g e o tubo tem seu comprimento medido.
4. Repete-se a etapa 4 até que o tubo apresente acréscimo no comprimento inicial maior do que 10% ou rompa.
5. Os valores obtidos são organizados em tabelas das quais são plotados gráficos.
6. Para melhor análise fotografa-se o ensaio para análise em pixels.

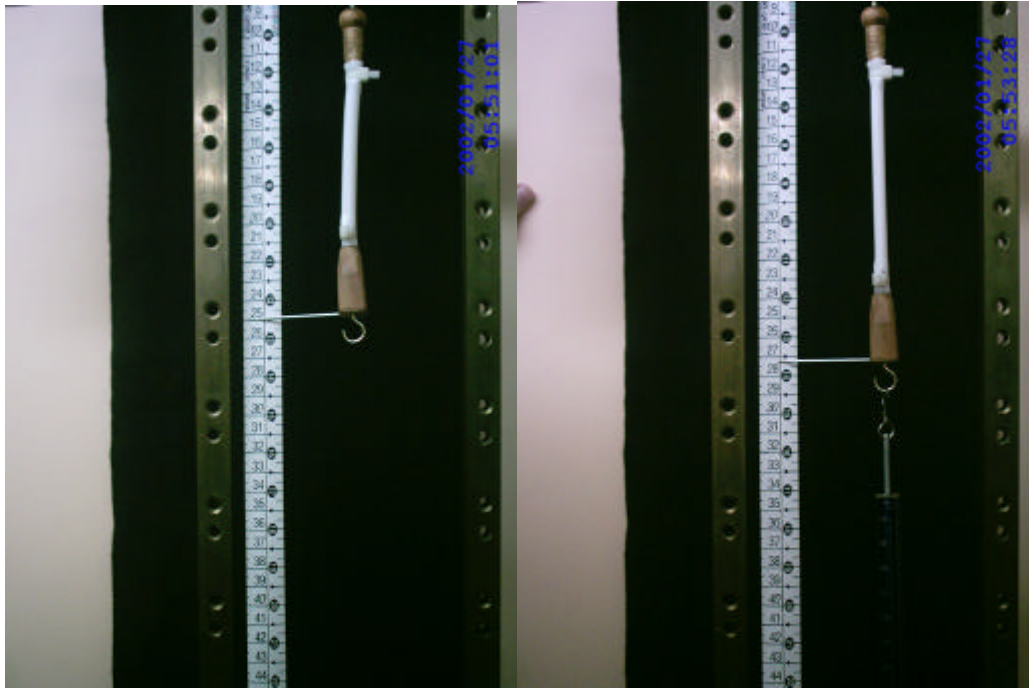


Fig.: teste de tração

**Amostra de prova 1**

Comprimento da amostra: 7,5 cm

Comprimento da amostra no aparato sem carga: 24,5cm

Comprimento da amostra no aparato com prato: 24,9cm

Comprimento da amostra no aparato com balança: 25 cm

Carga(g)	L(pesos)	L(balança)	Carga(g)	L(pesos)	L(balança)
10	24,8	25,2	150	26,6	27,1
20	25	25,25	160	26,8	27,3
30	25,1	25,4	170	27	27,5
40	25,2	25,5	180	27,1	27,5
50	25,4	25,55	190	27,3	27,6
60	25,5	25,7	200	27,4	27,8
70	25,6	25,8	210	27,5	27,9
80	25,7	25,9	220	27,6	28,1
90	25,9	26	230	27,8	28,3
100	26	26,3	240	28	28,4
110	26,1	26,5	250	28,1	28,5
120	26,3	26,7	260	28,2	28,7
130	26,4	26,8	270	28,4	28,8
140	26,5	27			

Tabela: teste de tração 1

**Amostra de prova 2**

Comprimento da amostra: 7,5 cm

Comprimento da amostra no aparato sem carga: 24,8cm

Comprimento da amostra no aparato com balança: 25 cm

Carga(g)	L(cm)	Carga(g)	L(cm)
10	25,1	150	26,9
20	25,3	160	27,0
30	25,4	170	27,1
40	25,5	180	27,3
50	25,6	190	27,4
60	25,7	200	27,5
70	25,9	210	27,6
80	26,0	220	27,7
90	26,1	230	27,8
100	26,3	240	28,0
110	26,4	250	28,1
120	26,5	260	28,2
130	26,7	270	28,3
140	26,8		

Tabela: teste de tração 2

### Amostra de prova 3

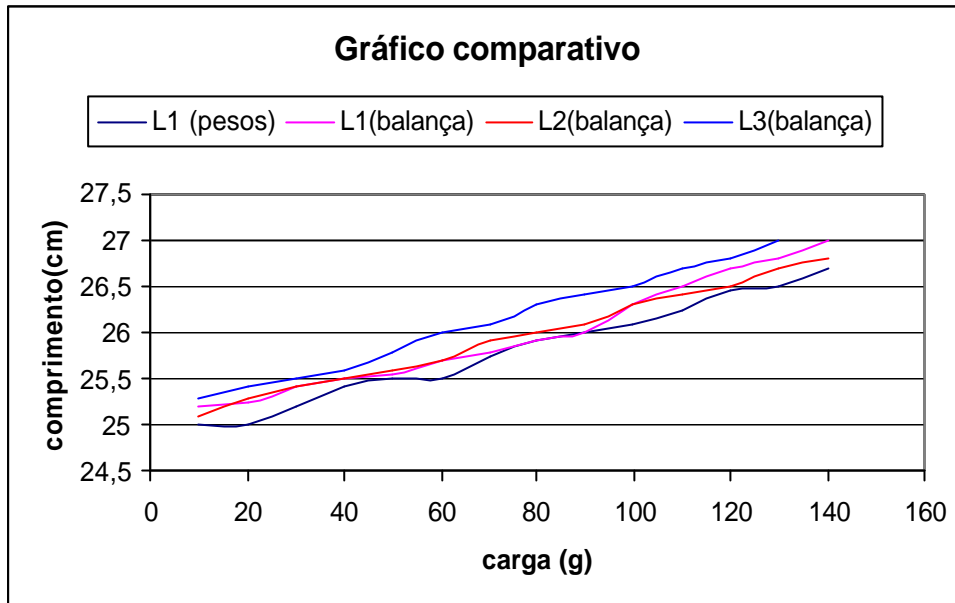
Comprimento da amostra: 8,0 cm

Comprimento da amostra no aparato sem carga: 25 cm

Comprimento da amostra no aparato com balança: 25,1cm

Carga(g)	L(cm)	Carga(g)	L(cm)
10	25,3	140	27,1
20	25,4	150	27,2
30	25,5	160	27,4
40	25,6	170	27,5
50	25,8	180	*
60	26		
70	26,1		
80	26,3		
90	26,4		
100	26,5		
110	26,7		
120	26,8		
130	27		

\*tubo se rompeu na base com  $\epsilon=1,25$



### Conclusões dos testes de tração

- Todos os três tubos suportaram trações de até 25%, sendo o silicone um material apropriado para reprodução da aorta.
- Os três tubos se comportaram de forma semelhante, garantindo que o material usado e o processo de moldagem bastante homogêneo.

### Procedimento de preparo do molde e do tubo

1. Corta-se o cano de modo que fique verticalmente simétrico
2. Furam-se os toros de madeira e a tampa de pvc de modo a ficarem bem centrados (geratriz)
3. Cobre-se o toro maior com o papel contact e atadura de gesso respectivamente.
4. Fixa-se o toro à tampa com um parafuso e ruelas, observando a simetria. Após isso o tubo de pvc é inserido a essa estrutura.
5. O alinhamento do eixo da parte superior do toro de madeira com o eixo do tubo é feito por cabos presos diametralmente ao tubo.
6. O gesso é inserido ao molde de modo a minimizar bolhas. O molde é então posto para secar a sombra.

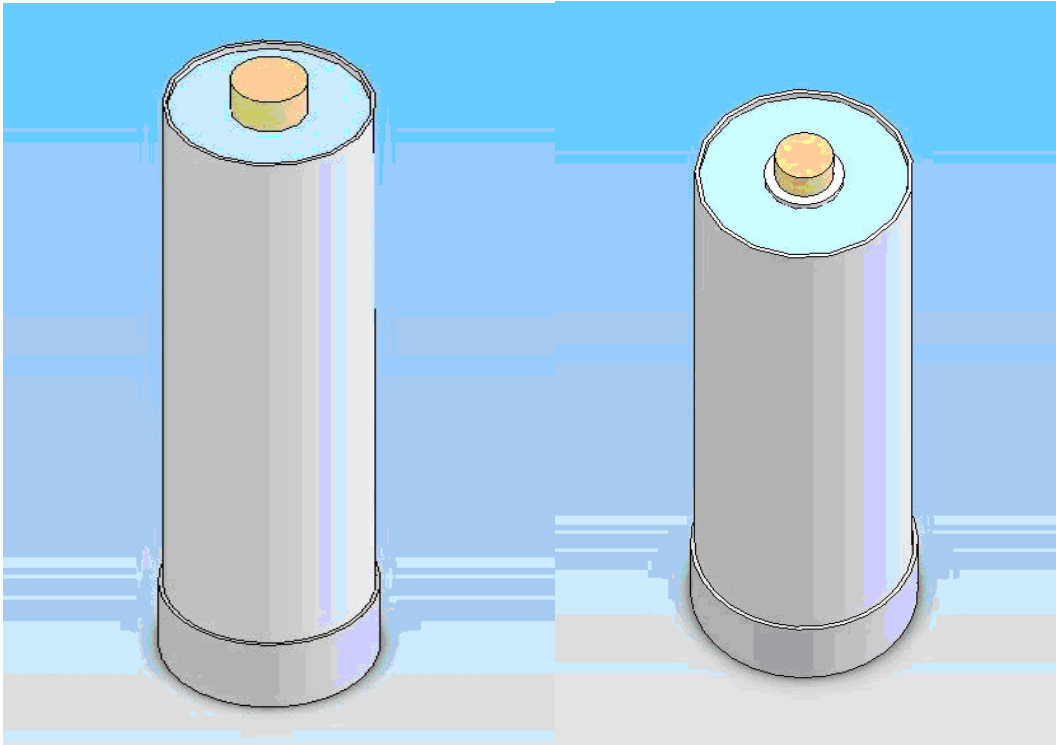


Fig1: molde gesso, à esq. com o toro de 38 mm e à dir. com toro de 28 mm.

7. Veste-se o toro menor com papel manteiga bem ajustado.
8. Substitui-se o toro maior que está no molde pelo menor que é fixado pelo parafuso. O alinhamento é semelhante ao do toro maior.
9. O silicone é preparado e inserido no molde, tendo cuidado para que bolhas não se formem.

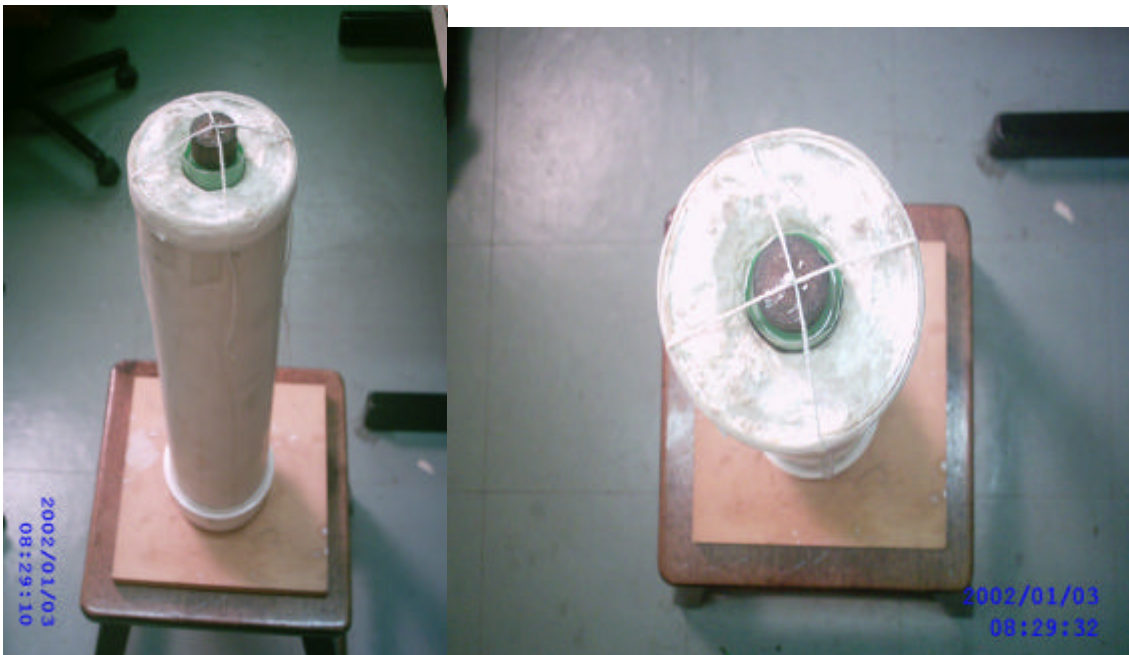


Fig2: Molde para artéria de silicone e vista superior.

10. São produzidos corpos de prova com a mesma borracha para análise de propriedades mecânicas da borracha.

11. O molde é posto para secar em local arejado por alguns dias.
12. Retira-se o toro de madeira e posteriormente o tubo de borracha.

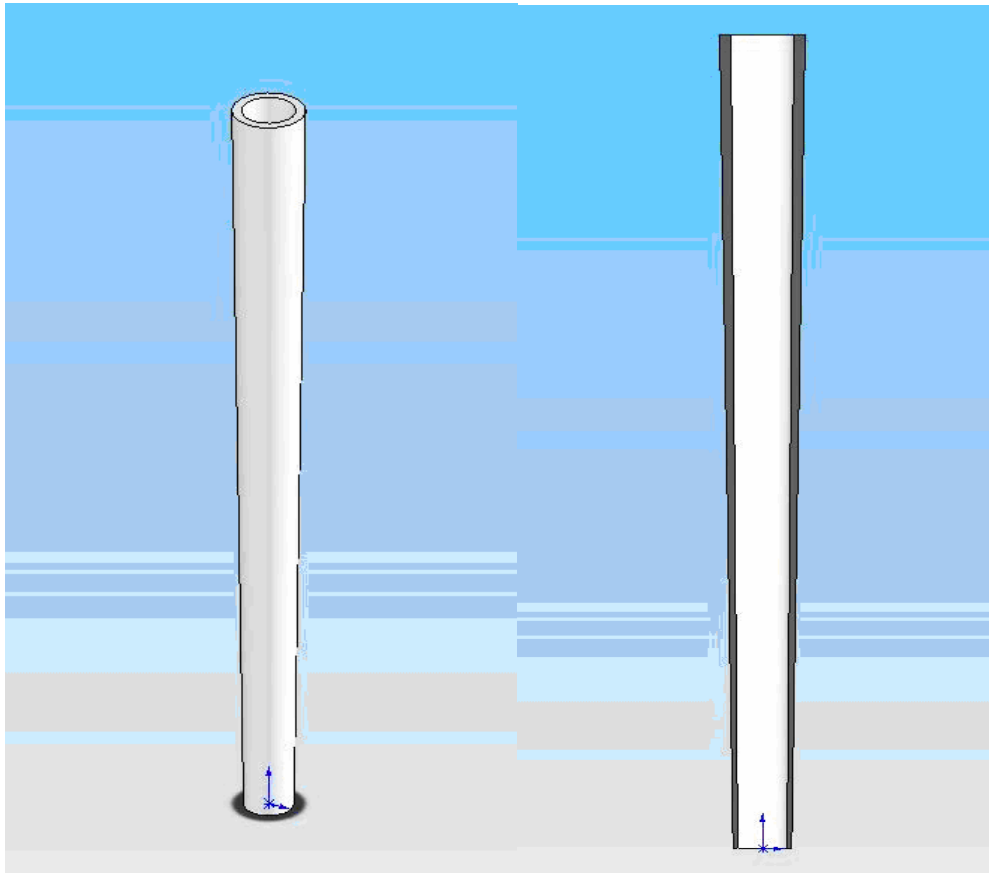


Fig3: artéria de silicone e corte longitudinal

### Procedimento para simulação com artéria de silicone

1. O tubo é fixado ao aparato através de uma camada de espuma presa por braçadeiras.
2. O tubo é tracionado ajustando-se a altura no aparato.
3. O equipamento de filmagem é montado e o aparelho pressurizador é conectado à artéria de silicone, tendo cuidado para não haver vazamentos.
4. A artéria é pressurizada lentamente e fotografada a certos intervalos de pressão. Quando a pressão está próxima da pressão crítica o tubo é então filmado.
5. Quando o bulbo se forma são medidas suas dimensões e pressão estabilizada.
6. Se o bulbo não romper o tubo é então despressurizado e fotografado como na etapa 4.

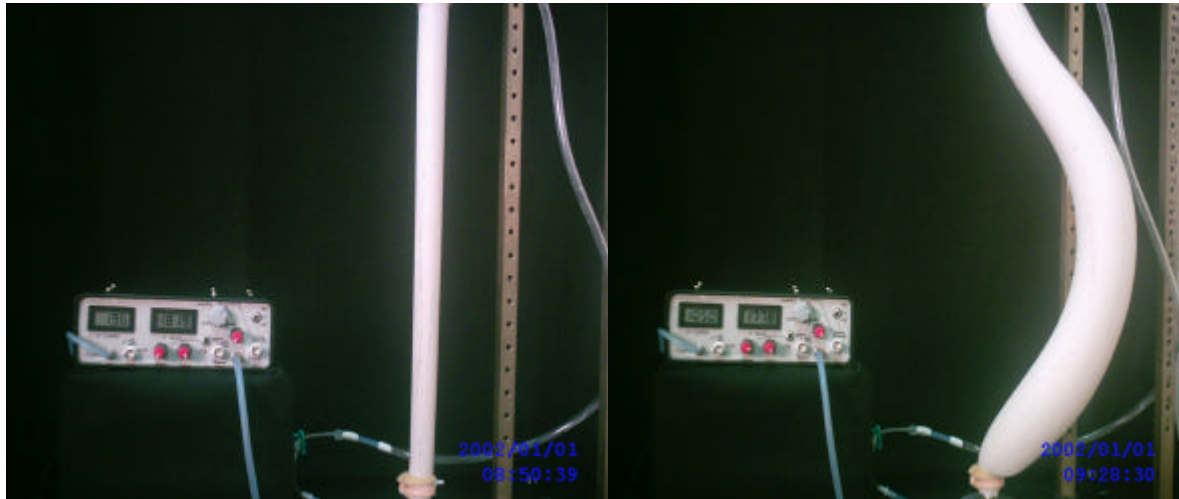


Fig.: simulação com artéria de silicone e bulbo formado à dir.

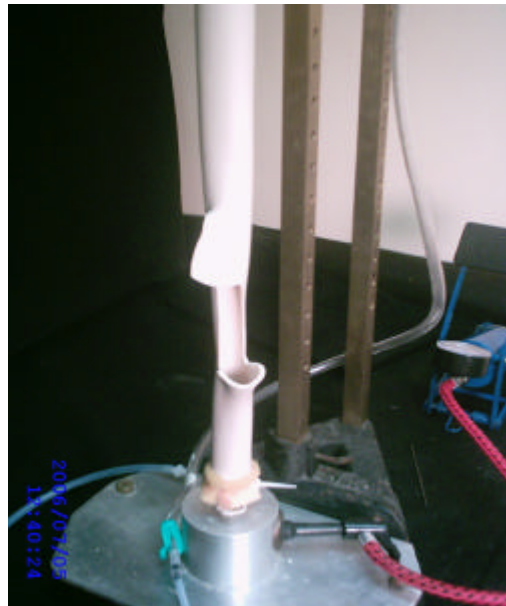
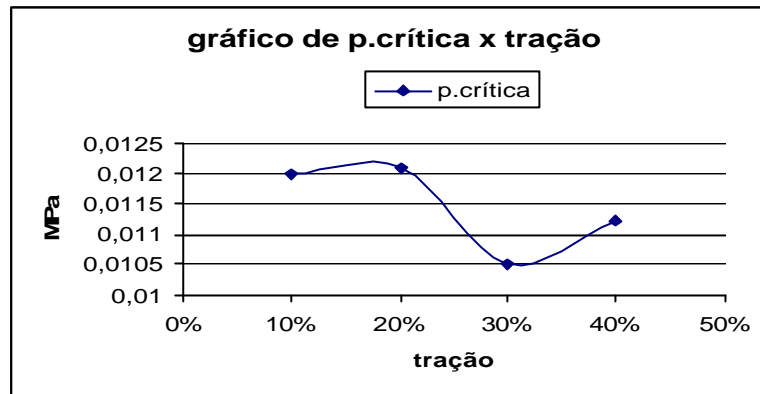


Fig.: bulbo se rompeu.

### Estudo da variação da pressão crítica devido à carga trativa

A artéria de silicone é tracionada e então pressurizada para verificar a influência da tração da p. crítica. Os quatro ensaios são realizados com o mesmo tubo.

tração	10%	20%	30%	40%
P.critica MPa	0,012	0,0121	0,01052	0,01122



### Conclusão

Os resultados obtidos nas simulações tais como a posição, geometria, volume médio do aneurisma e flambagem do tubo são coerentes com a realidade de modo que o modelo usado na simulação é eficaz quando comparado com análises numéricas e com estudos realizados anteriormente [2]. Este é um modelo experimental simples que será aperfeiçoado, tanto o molde da artéria como o procedimento experimental em si.

### Referências

1. IBRAHIM, Lucas Boabaid, **The Mechanics of Aneurysms- Numerical and Experimental Analysis**, Programa de Pós-Graduação em Estruturas, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO, Rio de Janeiro RJ Brasil , 2006
2. ELEFTERIATES, John A., Combate a um Assassino silencioso. **Scientific American**, nº 44, Janeiro de 2006