

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



*DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE BIOMEMBRANAS*

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA MECÂNICA DE ANEURISMAS

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

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO/ OBJETIVO.....	3
2. METODOLOGIA / RESULTADOS	3
3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....	4
4. CONCLUSÕES / TRABALHOS FUTUROS	20
AGRADECIMENTOS.....	20
REFERÊNCIAS.....	20

Introdução

Esta pesquisa abrange as análises numérica e experimental da mecânica da formação de aneurismas na aorta abdominal. A análise experimental iniciou-se em tubos de látex cilíndricos. Atualmente ela é realizada em tubos de silicone com a geometria da aorta. Após ser aplicada tração no tubo, aumenta-se a pressão interna, através de bombeamento suave de água, até que o bulbo forma-se, o volume do bulbo e a pressão interna aumentam até atingir uma pressão limite, a que denominamos de crítica. Essas simulações permitiram a análise da mecânica dos aneurismas relacionando a pressão crítica, volume, posicionamento e dimensões para diferentes cargas de tração e pre-condicionamento. Realizamos esses mesmos ensaios em tubos de látex com imperfeições locais e algumas artérias de animais. Esta pesquisa tem recebido reconhecimento da parte das agencias financiadoras, tendo sido contemplada no Cientista do Estado e Edital Universal.

Objetivo

Modelar experimentalmente a formação de aneurismas na aorta abdominal (AAA), realizando ensaios mecânicos em moldes da artéria para comparação com estudos numéricos com elementos finitos.

Servir de base de dados para comparação com análises numéricas para uma tese de mestrado [1].

Metodologia

A partir de artigos foram determinadas dimensões da artéria estatisticamente mais propensa ao AAA, com as quais são moldadas artérias de silicone com diferentes dosagens de catalisador para se observar a variação das propriedades mecânicas do material.

Para cada molde da artéria são produzidas e ensaiadas pelo menos três amostras com o mesmo silicone e catalisador para se obter as constantes elásticas dessa artéria.

O ensaio da artéria consiste em primeiramente tracionar o tubo e posteriormente aumentar a pressão interna, bombeando-se água com um aparato. Quando o aneurisma ocorrer ou quando for observado escoamento do material é determinada uma pressão crítica. São realizados também ensaios com imperfeições locais e com pré-condicionamento.

Descrição dos ensaios

1-Ensaio de junções de camadas:

Foram testadas junções entre os dois tipos de silicone, o bege e o vermelho, para futuros moldes com duas camadas. Foi testado também o uso de gaze como fibra.

Em todos os testes a aderência na junção foi total. É viável o uso da gaze junto com o silicone, proporcionando maior resistência à tração nas direções das fibras.

2-Ensaio de tração com diferentes dosagens de catalisador

Foram realizados ensaios de tração unidirecional com amostras de silicone vermelho e bege, nas seguintes dosagens de catalisador 0.5%, 2% e 5% para se obter as constantes do material e comprovar a incompressibilidade do material, bem como determinar a concentração ideal de catalisador a ser utilizada nos tubos arteriais.

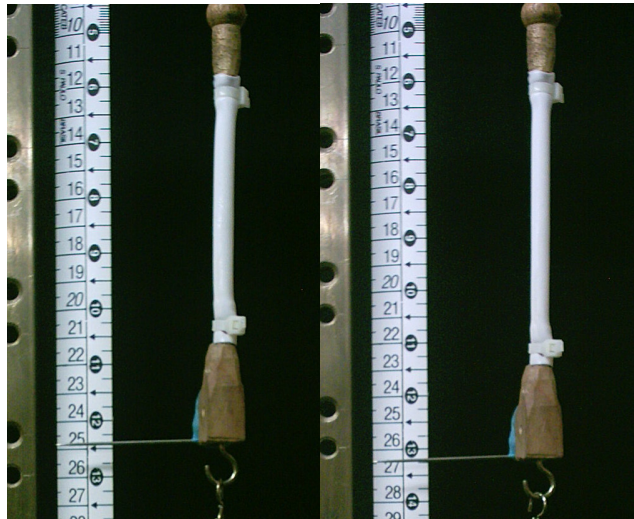


Foto1.: Teste de tração nas amostras de prova.

Os resultados obtidos nos ensaios são colocados em tabelas para serem analisados:

MÉDIA BEGE 0,5%				
σ (Pa)	L/L0	d/d0	desvpad L	desvpad D
7152,25421	1	1	0	0
23046,1525	1,07159547	0,9661499	0,0100925	0,0008951
38940,0507	1,12728185	0,9282515	0,0081831	0,0192439
54833,949	1,19092278	0,8984496	0,0122746	0,0223839
70727,8472	1,25077583	0,8795866	0,010222	0,0178855
86621,7454	1,32044085	0,8533161	0,0085821	0,0225582
102515,644	1,37426981	0,8270457	0,012475	0,0278067
118409,542	1,42616831	0,8120586	0,0051658	0,0333737
134303,44	1,48185469	0,8044789	0,0068185	0,0278403
150197,338	1,54185834	0,7893196	0,0104163	0,0188831
166091,237	1,63421413	0,7743325	0,0253274	0,0126122
181985,135	1,66595929	0,7556417	0,0200917	0,0111121
197879,033	1,70512961	0,7367786	0,0054452	0,0170627
MÉDIA BEGE 2%				
σ (Pa)	L/L0	d/d0	desvpad	desvpad D

			L	
7592,701	1	1	0	0
24465,37	1,032366	0,980159	0,017476	0,002065
41338,04	1,073612	0,957824	0,020435	0,00428
58210,71	1,122909	0,936202	0,020113	0,005988
75083,37	1,184531	0,912319	0,020293	0,006158
91956,04	1,229997	0,892389	0,02293	0,013444
108828,7	1,287011	0,866804	0,033675	0,016526
125701,4	1,328204	0,84951	0,028134	0,025463
142574	1,373227	0,834431	0,022008	0,028175
159446,7	1,435571	0,818118	0,029025	0,034497
176319,4	1,479765	0,801271	0,012142	0,039369
193192,1	1,516738	0,786842	0,013386	0,04702
210064,7	1,557542	0,77553	0,010462	0,047285
226937,4	1,594073	0,765591	0,015654	0,048817
243810,1	1,626827	0,755735	0,009916	0,050323

MEDIA BEGE 5%

σ (Pa)	L/L0	d/d0	desvpad L	desvpad D
7618,34057	1	1	0	0
24997,9582	1,03573718	0,9803109	0,0039156	0,0071482
42237,9293	1,08418803	0,95539	0,0159141	0,0081392
59477,9005	1,11773504	0,9382049	0,0090674	0,0087881
76717,8716	1,16399573	0,9169766	0,0148004	0,001138
93957,8428	1,21014957	0,9004463	0,0092023	0,0077545
111197,814	1,24797009	0,8833122	0,0096172	0,0053345
128437,785	1,28162393	0,8693155	0,011473	0,0122197
145677,756	1,31517094	0,8457992	0,0133286	0,0100928
162917,727	1,34455128	0,8379047	0,0188013	0,0083979
180157,698	1,39102564	0,8253069	0,030442	0,0121467
197397,67	1,40779915	0,8065286	0,0307197	0,0062082
214637,641	1,43717949	0,7898392	0,0327112	0,0174123
231877,612	1,45811966	0,7837884	0,0286843	0,0076668
249117,583	1,4832265	0,7750743	0,031437	0,0105901

MEDIA ROSA 0,5%

σ (Pa)	L/L0	d/d0	desvpad L	desvpad D
7394,6775	1	1	0	0
23827,294	1,07348	0,96999	0,005143	0,022567
40259,911	1,1339626	0,928991	0,010725	0,020509
56692,527	1,2119471	0,894964	0,008124	0,018748
73125,144	1,2899316	0,865307	0,005642	0,034948
89557,761	1,3679161	0,827618	0,003538	0,044112
105990,38	1,4459006	0,819233	0,00284	0,010472
122422,99	1,5151071	0,800565	0,003378	0,01958
138855,61	1,5843677	0,778234	0,004694	0,025705
155288,23	1,6493548	0,75555	0,004183	0,024511
171720,84	1,7143419	0,736882	0,004825	0,030126
188153,46	1,7708361	0,728849	0,012224	0,016642
204586,08	1,8355381	0,713844	0,002254	0,021319
221018,69	1,8917472	0,695176	0,007061	0,024002

MEDIA ROSA 2%

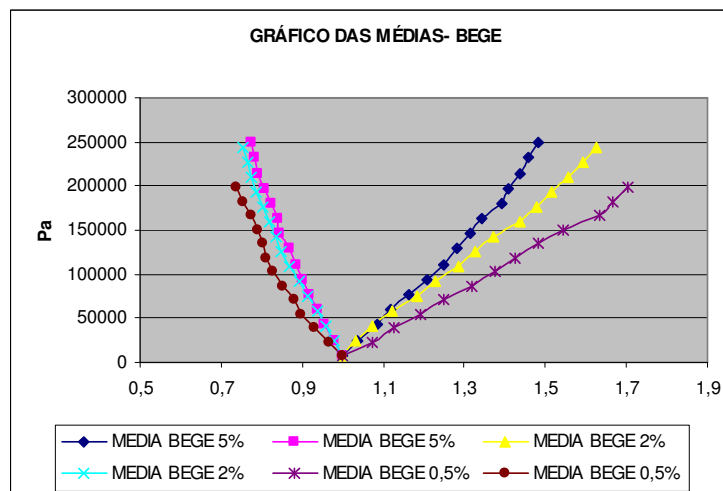
σ (Pa)	L/L0	d/d0	desvpad	desvpad D
---------------	------	------	---------	-----------

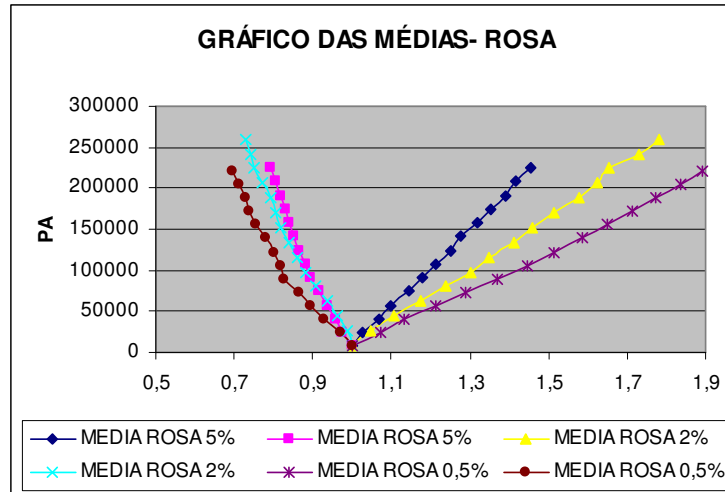
			L	
8100,942	1	1	0	0
26103,04	1,047627	0,985763	0,016523	0,008148
44105,13	1,104777	0,963978	0,01659	0,001082
62107,23	1,176216	0,937638	0,016729	0,002499
80109,32	1,238061	0,907958	0,020898	0,007264
98111,41	1,299974	0,883803	0,012653	0,010109
116113,5	1,347601	0,862298	0,028917	0,010871
134115,6	1,414072	0,841396	0,033276	0,020763
152117,7	1,457071	0,81985	0,025811	0,021947
170119,8	1,514222	0,806293	0,02559	0,020289
188121,9	1,576134	0,7921	0,01748	0,009744
206124	1,623828	0,77206	0,020727	0,022406
224126,1	1,652405	0,752062	0,045456	0,015589
242128,2	1,728602	0,740055	0,012745	0,015516
260130,3	1,78099	0,727808	0,005708	0,016679

MEDIA ROSA 5%

σ (Pa)	L/L0	d/d0	desvpad L	desvpad D
7517,8203	1	1	0	0
24224,088	1,026103	0,975283	0,0008	0,003223
40930,355	1,0695311	0,95761	0,006632	0,003122
57636,622	1,0999076	0,936907	0,004601	0,0095
74342,89	1,1433356	0,917601	0,009567	0,007725
91049,157	1,1779857	0,894463	0,015129	0,007283
107755,42	1,2128667	0,882894	0,015551	0,007066
124461,69	1,2520213	0,863545	0,014905	0,001432
141167,96	1,2781243	0,851976	0,014513	0,001279
157874,23	1,3172788	0,840407	0,013991	0,00116
174580,49	1,3521599	0,828839	0,006448	0,001088
191286,76	1,3910834	0,81727	0,016895	0,00107
207993,03	1,4171864	0,805701	0,016385	0,00111
224699,3	1,456341	0,794132	0,015665	0,001203

São plotados gráficos onde a curva crescente representa a variação de comprimento do tubo (L/L0) com a pressão aplicada e a curva decrescente representa a variação do diâmetro externo (d/d0)





Conclusão

A concentração de catalisador escolhida para moldar a artéria é de 1%, entre 0,5% e 2%, pois com 0,5% de catalisador a artéria possui comportamento de membrana, dilatando-se de forma global quando pressurizada. Já a concentração de 2% é menos elástica, rasgando a pressões menores e com tempo de manuseio do silicone na moldagem ser curto.

3- Ensaio com moldes da artéria

Foram realizados ensaios onde o tubo é pressurizado até que se forme o bulbo. Inicialmente foi usado o ar comprimido a partir de um compressor ajustável onde o ar é bombeado lentamente.

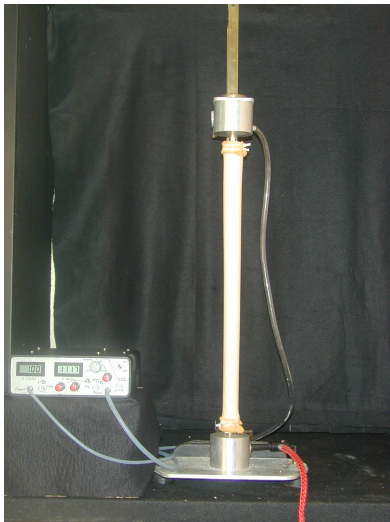


foto2: Aparato em estado inicial

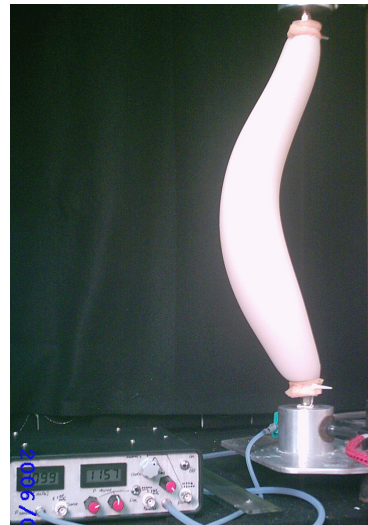


foto3: Aparato com tubo pressurizado

Ensaio do dia 5/12/2006- Silicone bege 0,5% de catalizador

Serie de 4 ensaios com o mesmo tubo (i, ii, iii,iv)

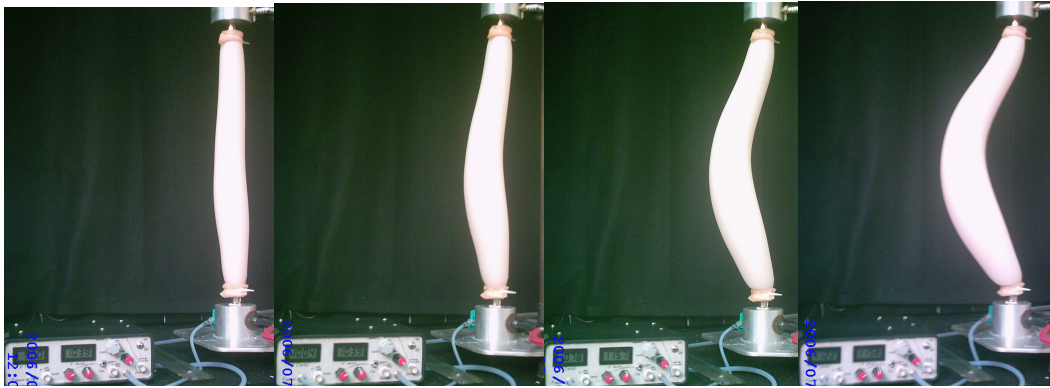
Ensaio i

Pressão por ar

Comprimento inicial entre abraçadeiras : 40cm

Comprimento final: 47,5cm Tração de 18%

Flambagem acentuada, não há bulbo bem definido (comportamento de membrana)



Fotos do ensaio i

Ensaio ii

Pressão por ar

Comprimento inicial entre abraçadeiras : 40cm

Comprimento final: 42,5cm Tração de 6%

Flambagem para trás, pequeno bulbo na parte inferior, pressão max.:0,009MPa

Ensaio iii

Pressão por ar

Comprimento inicial entre abraçadeiras : 40cm

Comprimento final: 50cm Tração de 25%

Nesse ensaio, ao se colocar uma pressão inicial de 508 daPa com a bomba o bulbo se forma na parte inferior.

Ensaio iv

Pressão por ar

Comprimento inicial entre abraçadeiras : 40cm

Comprimento final: 42,5cm Tração de 6%

O bulbo se forma em 450 daPa e vai aumentando até 840 daPa quando o tubo flamba.

Pressão máxima 0,0105MPa

Ensaio v

Pressão por ar

Silicone bege (tubo reutilizado)

Comprimento inicial entre abraçadeiras : 40cm

Comprimento final: 47,5cm Tração de 18%

Foram feitas imperfeições, na forma de furos na parte inferior do tubo para observações. O bulbo não se forma na área dos furos. Pressão máxima: 1512MPa

Ensaio vi

Pressão por ar

Silicone bege (tubo reutilizado)

Comprimento inicial entre abraçadeiras : 40cm
Comprimento final: 47,5cm Tração de 18%
Foi feita uma raspagem na região inferior. Um pequeno bulbo se formou a 730daPa
O tubo se rompeu na região da raspagem a 0,012MPa

Ensaio vii
Pressão por água
Silicone bege, 5% de catalisador
Comprimento inicial entre abraçadeiras : 40cm
Comprimento final: 45cm Tração de 12,5%
A artéria flambou e se rompeu na base a 0,028MPa.

Ensaio viii
Pressão por água
Silicone bege, 5% de catalisador
Comprimento inicial entre abraçadeiras : 32cm
Comprimento final: 37,5cm Tração de 17%
Ensaio realizado com o tubo do ensaio vii, retirando-se a parte inferior.
Este tubo flambou mais que o anterior e estourou em 0,034MPa, na parte central, provavelmente devido à uma bolha interna.

Ensaio ix dia 23/01/07
Pressão por água
Silicone bege, 5% de catalisador
Comprimento inicial entre abraçadeiras : 37cm
Comprimento final: 47cm Tração:27%
A pressão aumentou até 0,016~0,018MPa quando o tubo começou a flambar, aumentando o volume sem aumentar a pressão.O tubo estourou na parte inferior, provavelmente devido a uma bolha interna , a uma pressão de 0,02 MPa

Ensaio do dia 27/02/2007

Artéria de silicone bege produzida com 1% de catalisador.
Comprimento inicial entre abraçadeiras: 40 cm.
Comprimento final entre abraçadeiras: 50 cm. Tração: 25%

Observações:

1º foto: pressão 0,004 MPa.
2ºfoto: pressão 0,014MPa, já pode ser observado um pequeno bulbo na parte inferior.
3ºfoto: pressão 0,16MPa, há formação de um segundo bulbo n parte central no tubo.
4ºfoto: pressão 0,016MPa, pressão se mantém, há aumento do volume interno de forma global
5º foto: pressão 0,02MPa (pressão crítica) a flambagem se acentua e não há aumento sensível da pressão, há aumento do volume interno, a partir do momento o qual os bulbos param de aumentar o tubo começa a flambar.
6º foto: pressão 0,02 MPa instantes antes de o tubo se romper.
7º foto: local de rompimento, na direção de flambagem.

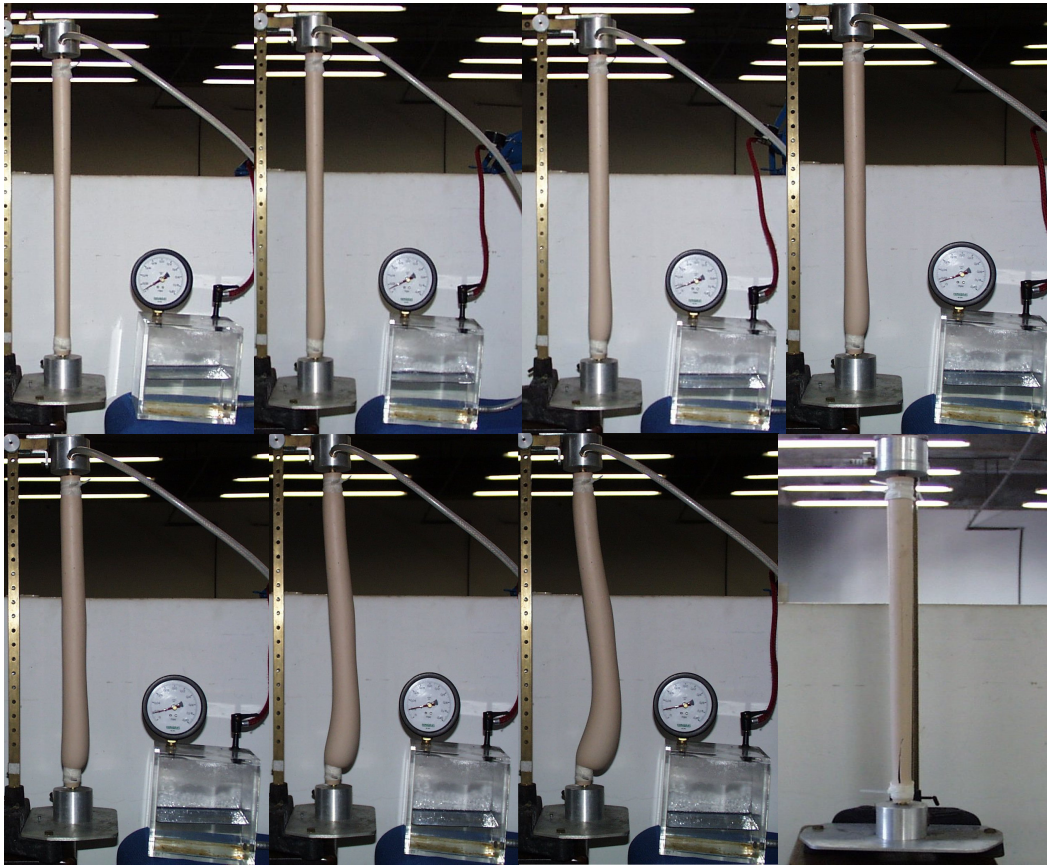


foto4: comportamento do tubo quando submetido a pressão, e conseqüente formação do bulbo.

Ensaio I do dia 02/03/07

Artéria de silicone bege produzida com 1% de catalisador, já testada anteriormente.

Comprimento inicial entre abraçadeiras: 32 cm.

Comprimento final entre abraçadeiras: 42 cm.

Tração: 30%

Observações:

1° foto: pressão 0,004 MPa início do ensaio

3°foto: pressão 0,018MPa,

4°foto: pressão 0,018MPa, pressão se mantém, há aumento do volume interno de forma global

5° foto: pressão 0,02MPa, o tubo começa a flambar, sem aumento sensível da pressão, há aumento do volume interno.

8° foto: pressão 0,022MPa, pressão crítica, a flambagem se acentua.

10° foto: pressão 0,022 MPa instantes antes de o tubo se romper.

11° foto: local de rompimento.

A parte inferior do tubo foi cortada para a reutilização do mesmo, devido a isso a pressão crítica chegou a 0,022MPa, mesmo com a carga de tração elevada.

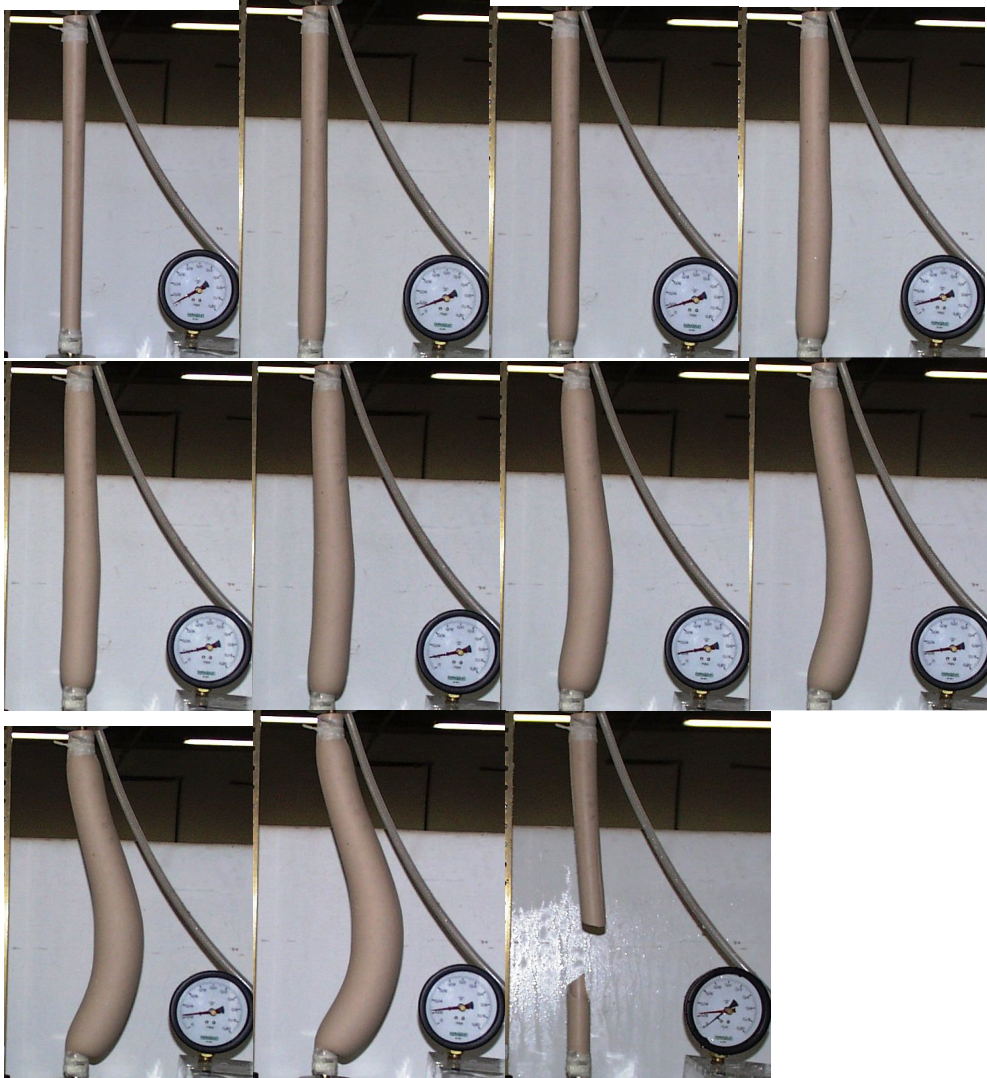


foto5: tubo pressurizado ate o rompimento na região de formação do bulbo

Ensaio II do dia 02/03/07

Artéria de silicone bege produzida com 1% de catalisador

Comprimento inicial entre abraçadeiras: 42,5 cm.

Comprimento final entre abraçadeiras: 52,5 cm.

Tração: 20%

Observações:

1° foto: pressão 0,004 MPa início do ensaio

3°foto: pressão 0,012MPa,

5°foto: pressão 0,018MPa, há aumento do volume interno de forma global.

6° foto: pressão 0,02MPa (pressão crítica) o tubo começa a flambar, sem aumento da pressão, há aumento do volume interno.

Demais fotos: na parte inferior o bulbo tem seu volume aumentado sem que a pressão aumente.

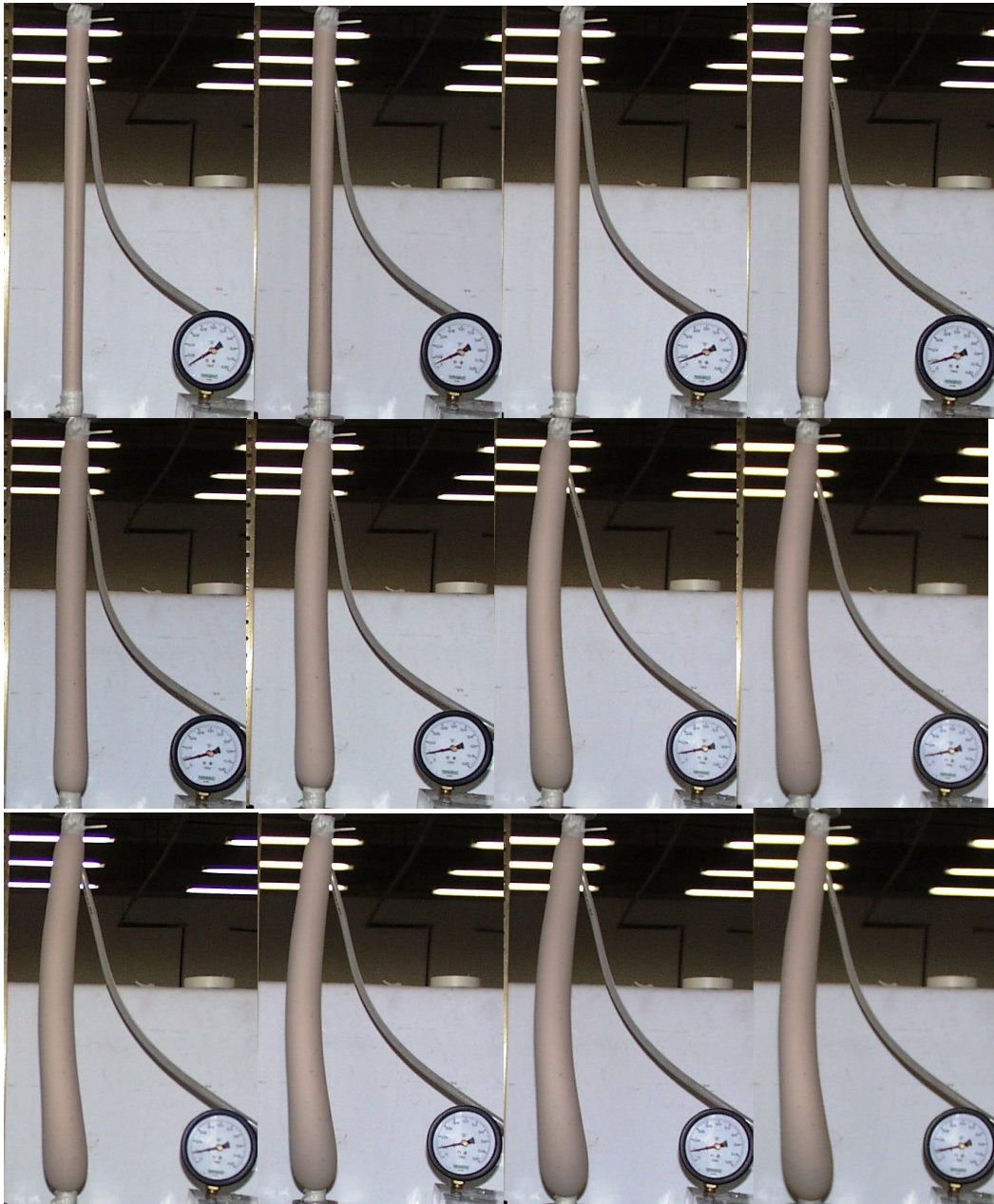


foto6: devido a tração o tubo apresenta pequena flambagem

Ensaio I do (dia 20/03/07)

Artéria de silicone bege produzida com 1% de catalisador (1° ensaio)

Comprimento inicial entre abraçadeiras: 42,5cm.

Comprimento final entre abraçadeiras: 57,5 cm.

Tração: 35%

Observações:

1° foto: pressão 0,005 MPa início do ensaio

2°foto: pressão 0,016MPa,

3°foto: pressão 0,018MPa,

4° foto: pressão 0,02MPa

5° foto: pressão 0,022MPa,

6º foto: pressão 0,022 MPa.

A metade inferior do tubo sofreu maior deformação, tubo com comportamento de membrana, não há bulbo bem definido, porem nota-se que a área central detém maior volume.

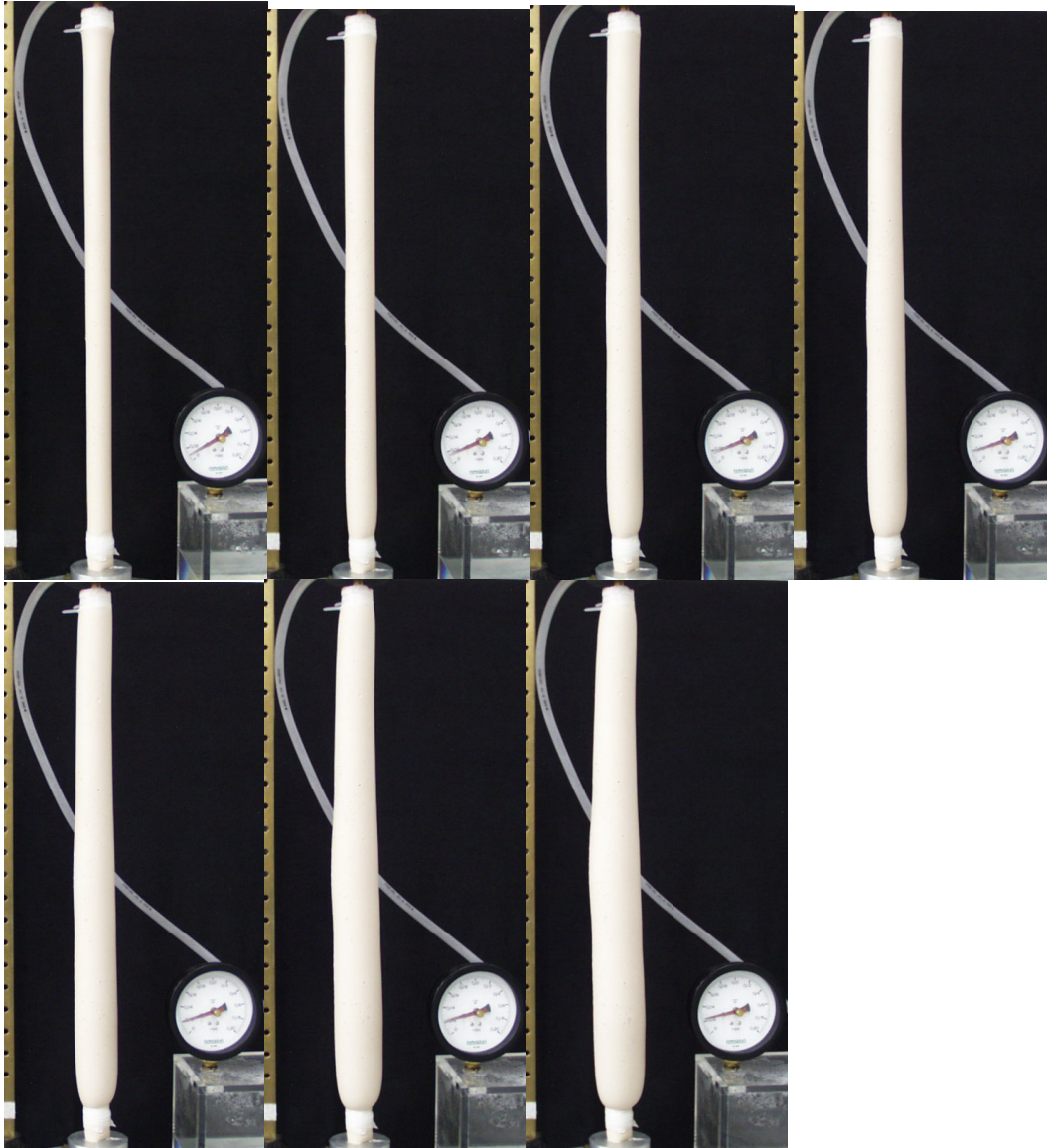


foto7: devido a elevada carga trativa o tubo não flamba e o bulbo é distribuído por toda metade inferior do tubo

Ensaio II do dia 20/03/07

Artéria de silicone bege produzida com 1% de catalisador (2ºensaio)

Comprimento inicial entre abraçadeiras: 42,5cm.

Comprimento final entre abraçadeiras: 52,5cm.

Tração: 23%

Observações:

1º foto: pressão 0,005 MPa início do ensaio

2ºfoto: pressão 0,016MPa,

3ºfoto: pressão 0,018MPa, parte inferior ganha volume mais rápido que no ensaio anterior.

4º foto: pressão 0,02MPa (pressão crítica)

5º foto: pressão 0,02MPa flambagem na parte inferior do tubo.

6° foto: pressão 0,02MPa, local do rompimento.

Note que o pré-condicionamento do tubo provocou queda da pressão crítica.

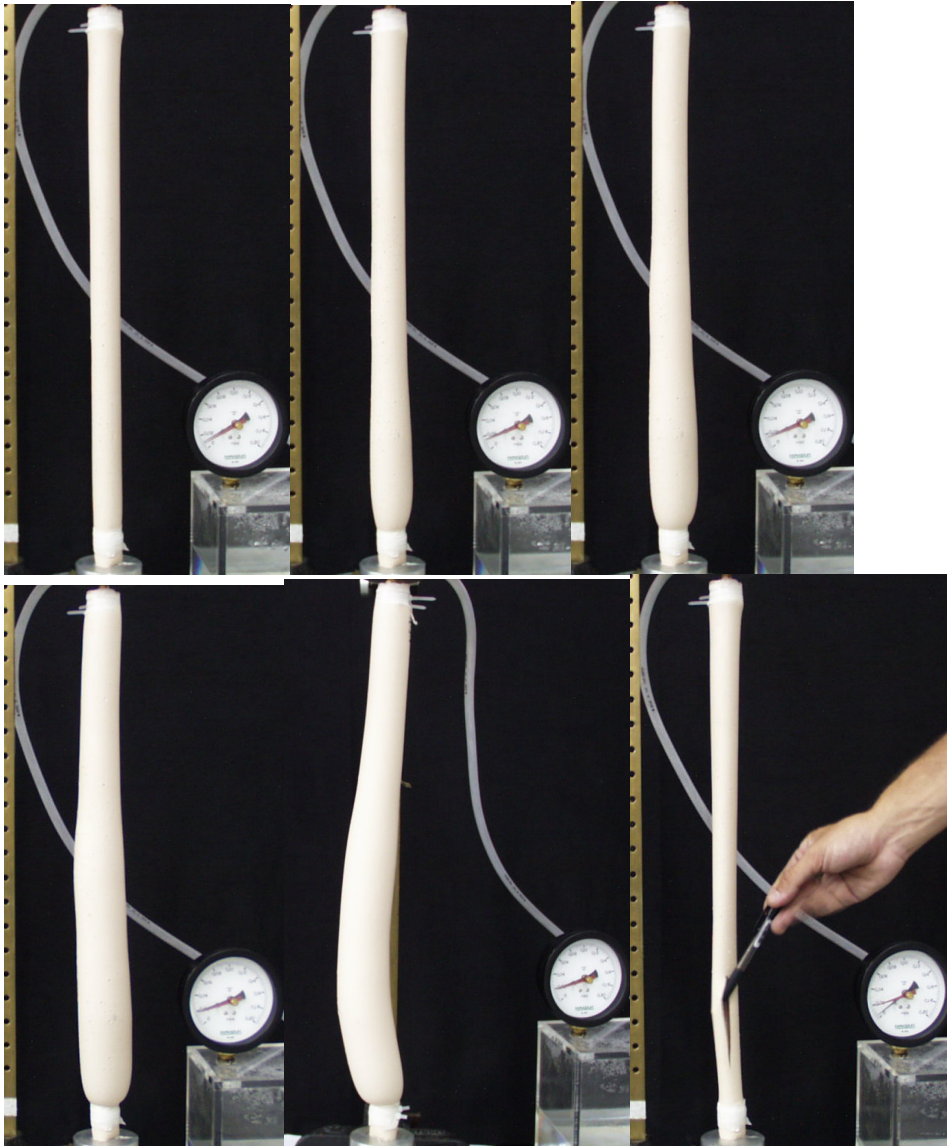


foto8: note que no tubo pré-condicionado a PC é menor e o tubo se rompe.

Ensaio III (20/03/07)

Artéria de silicone bege produzida com 1% de catalisador, base cortada.

Comprimento inicial entre abraçadeiras: 37,5cm.

Tração: 0%

Observações:

1° foto: pressão 0,004 MPa início do ensaio

2°foto: pressão 0,019MPa,

3°foto: pressão 0,02MPa,

4° foto: pressão 0,022MPa

5° foto: pressão 0,03MPa, pressão crítica (p.c.).

6° foto: pressão 0,03 MPa, após atingir a p.c.tubo começa a flambar.

8° foto: pressão 0,03 MPa ensaio interrompido.

Quase não há aumento no volume do tubo, porém a pressão crítica é elevada, pois a base do tubo foi cortada, além do tubo não estar tracionado.

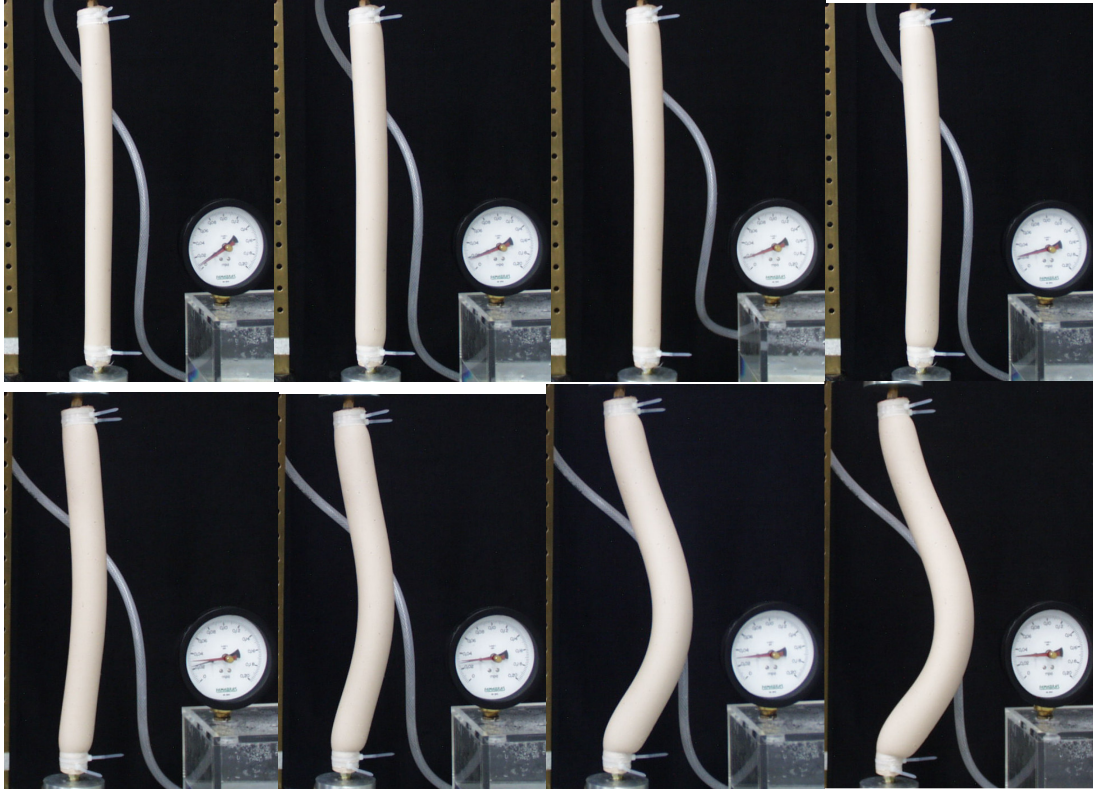


foto9: a base do tubo foi retirada, aumentando a PC, a flambagem se deve ao fato do tubo não estar tracionado.

Ensaio IV (dia 20/03/07)

Artéria de silicone bege produzida com 1% de catalisador, base cortada, testada anteriormente.

Comprimento inicial entre abraçadeiras: 37,5cm.

Comprimento final entre as braçadeiras: 42,5cm

Tração: 13%

Observações:

1° foto: pressão 0,004 MPa início do ensaio.

2°foto: pressão 0,019MPa,

3°foto: pressão 0,022MPa,

4° foto: pressão 0,024MPa

5° foto: pressão 0,03MPa, pressão crítica, tubo começa a flambar.

6° foto: pressão 0,03 MPa

8° foto: pressão 0,03 MPa local do rompimento.

Flambagem menos acentuada nesse ensaio que no anterior, porém a base do tubo se dilata mais.

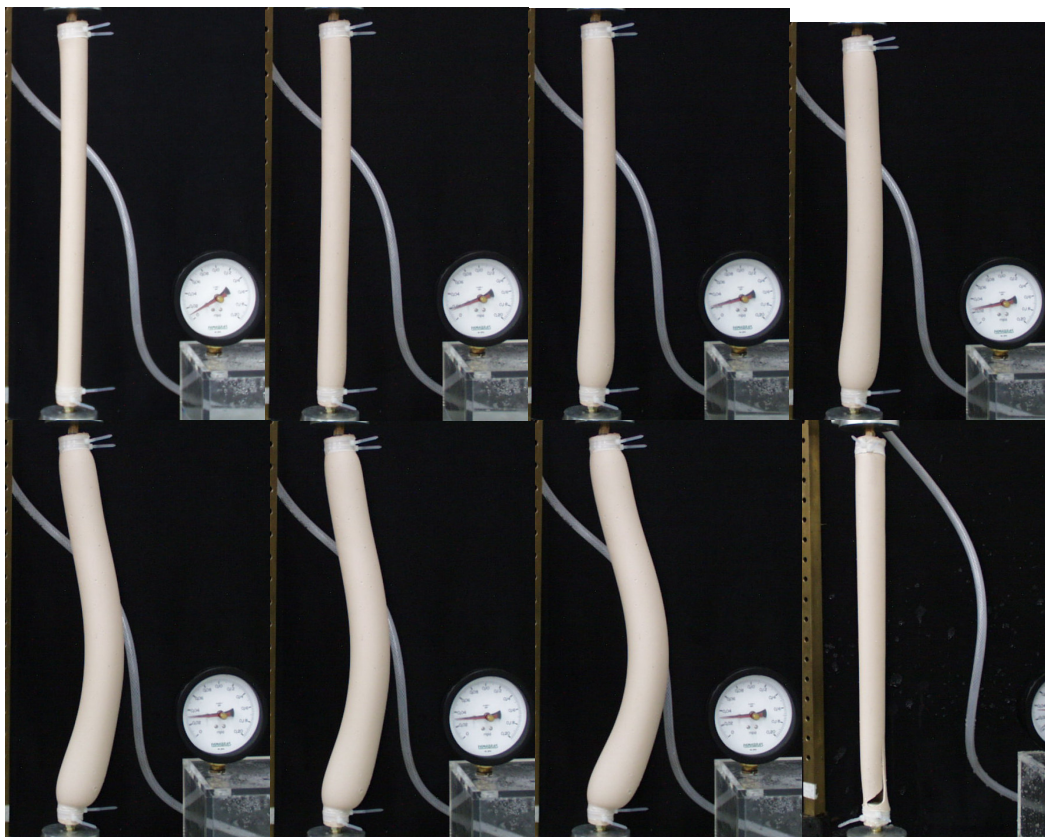


foto 10: rompimento na base

Data do ensaio: 08/05/2007

Ensaio número: 1

Concentração de catalisador (%): 1

Comprimento inicial entre as braçadeiras (L0): 43cm

Comprimento final entre braçadeiras (Lf): 43cm

Tração (%): 0

Pressão crítica: 0.016MPa



foto11:note que no tubo sem tração e pré-condicionamento o bulbo é bem localizado e há flambagem acentuada

Ensaio número: 2

Concentração de catalisador (%): 1

Comprimento inicial entre as braçadeiras (L_0): 43cm

Comprimento final entre braçadeiras (L_f): 48cm

Tração (%): 11.6%

Pressão crítica: 0.015MPa

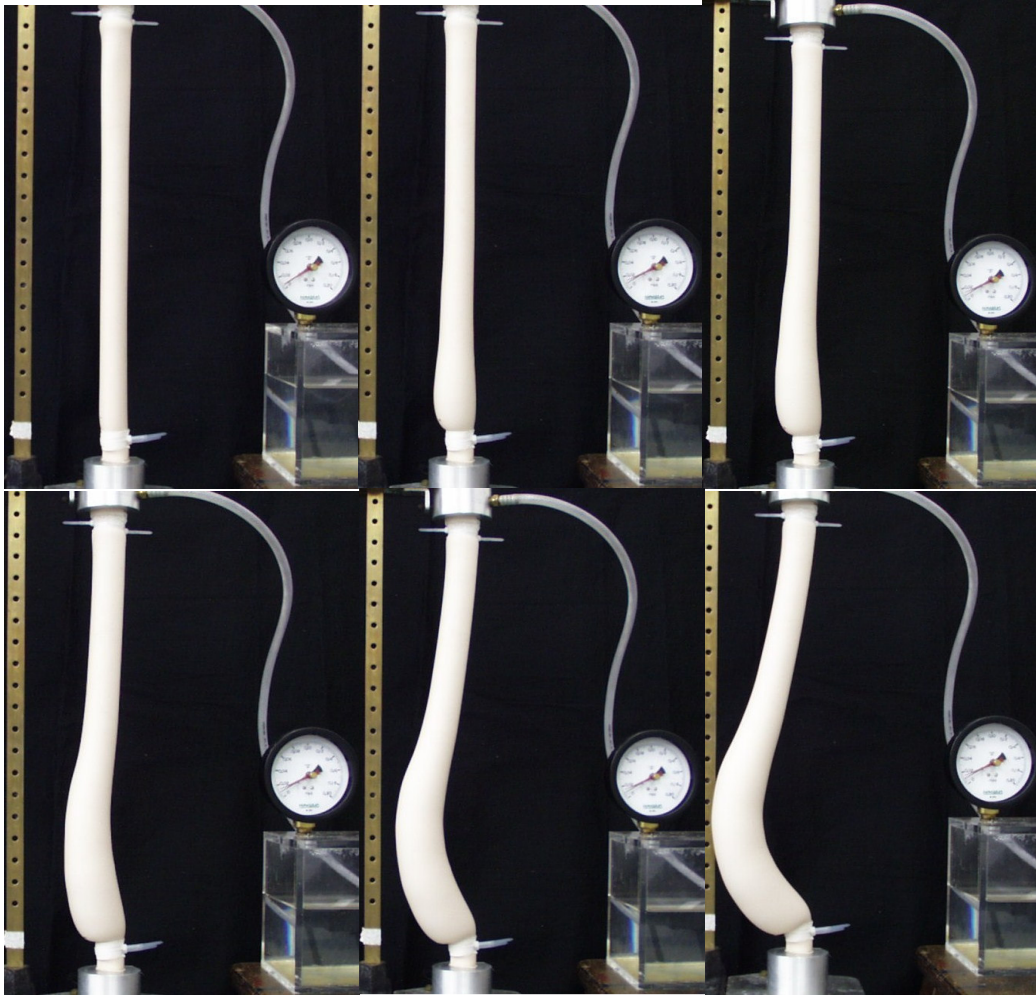


foto12: note que mesmo tracionado o bulbo e flambagem são maiores que o ensaio anterior, isso se deve ao pré-condicionamento.

Ensaio número: 3

Concentração de catalisador (%): 1

Comprimento inicial entre as braçadeiras (L_0): 43cm

Comprimento final entre braçadeiras (L_f): 53cm

Tração (%): 23.3%

Pressão crítica: 0.015MPa

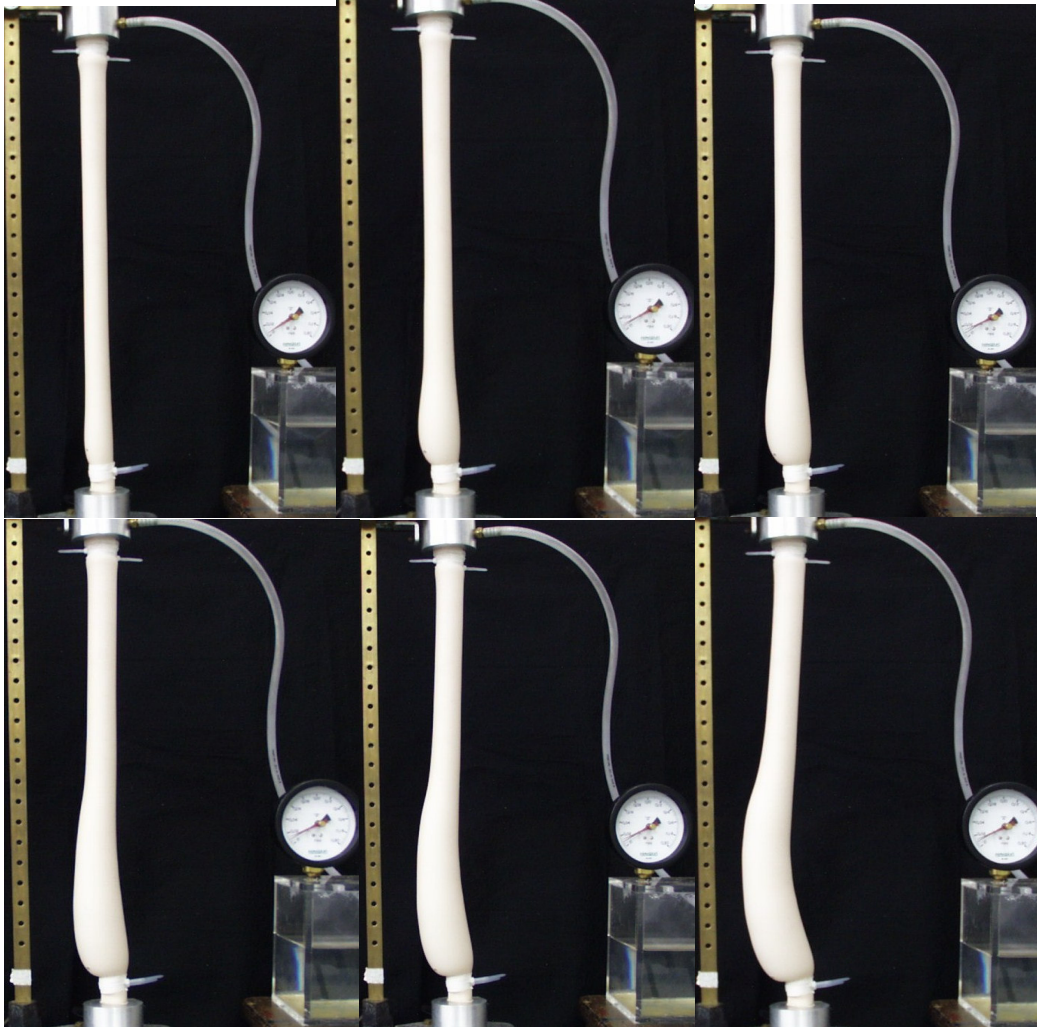


foto13: o aumento da tração faz diminuir a flambagem, porem o pré-condicionamento faz o volume do bulbo aumentar.

Teste de tração dos corpos de prova

Diâmetro (m2):

Massa (Kg)	Comprimento final (Lf) (m)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
0	0.077	0.087	0.076
0,045	0.079	0.09	0.08
0,145	0.088	0.101	0.092
0,245	0.099	0.115	0.109
0,345	0.110	0.129	0.122
0,445	0.120	0.140	0.131
0,545	0.127	0.150	0.140
0,645	0.136	0.162	0.150

0,745	0.143	0.171	0.163
0,845	0.150	0.183	0.172
0,945	0.165	0.196	0.184
1,045	0.170	0.206	0.194
1,145	0.177		
1,245	0.185		
1,345	0.195		

Conclusões sobre a pressão crítica relacionada à tração

Pressão crítica é a pressão máxima a qual o tubo é submetido, a partir da qual há formação do bulbo ou há aumento do volume sem aumento da pressão.

Para tubos de comprimento inicial em torno de 37,5cm e em média com 20% de tração a pressão crítica é 0,02MPa, já para tubos com média de 30% de tração a p.critica é 0,022Mpa. Quando a base do tubo foi cortada, a pressão crítica não passou de 0,03Mpa, para trações de 20% e 30%. Portanto podemos concluir que a pressão crítica varia pouco com a tração, o catalisador parece não influenciar significativamente na p.critica, pois para diversas dosagens a p.critica se mantém em torno de 0,02Mpa.

Já para tubos com comprimento inicial em torno de 43 cm, a pressão crítica ficou em torno de 0,01MPa. Como a diferença entre as dimensões dos tubos geralmente se devem a imperfeições provenientes do processo de moldagem e se localizam na parte inferior do tubo, onde o diâmetro e espessura não menores, podemos concluir que a pressão crítica está relacionada às dimensões do tubo, sendo estas fundamentais na modelagem mecânica.

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.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao CNPq/ PIBIC pelo seu apoio financeiro.

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**, n° 44, Janeiro de 2006