

3 Análise experimental

Apesar de um crescente número de artigos publicados sobre aneurismas nos últimos anos, encontrar as propriedades físicas e mecânicas do material da aorta tem se mostrado uma tarefa árdua. Até o presente momento, para a realização da análise experimental foram obtidas da revisão bibliográfica duas geometrias para a aorta. A primeira geometria foi obtida através de Simão da Silva e outros (1999) e a segunda geometria foi obtida do artigo de D. P. Sokolis (2007).

A geometria obtida através de Simão da Silva e outros (1999) está descrita abaixo:

- Comprimento inicial: 20 cm.
- Raio superior externo: 9,5 mm.
- Raio superior interno: 7,0 mm.
- Raio inferior externo: 7,3 mm.
- Raio inferior interno: 5,9 mm.

Por falta de informações mais precisas foi considerado que a variação da espessura e do raio ao longo do comprimento arterial se dá de forma linear.

A geometria obtida através de D. P. Sokolis (2007) apresenta algumas diferenças em relação à de Simão da Silva, principalmente no que se refere a variação da espessura ao longo do comprimento e aos valores dos raios inferiores. Os dados abaixo são referentes à D. P. Sokolis.

Na figura 3.1 podemos observar o gráfico que representa a variação da espessura da parede arterial em função do seu comprimento (representado pela subdivisão da aorta).

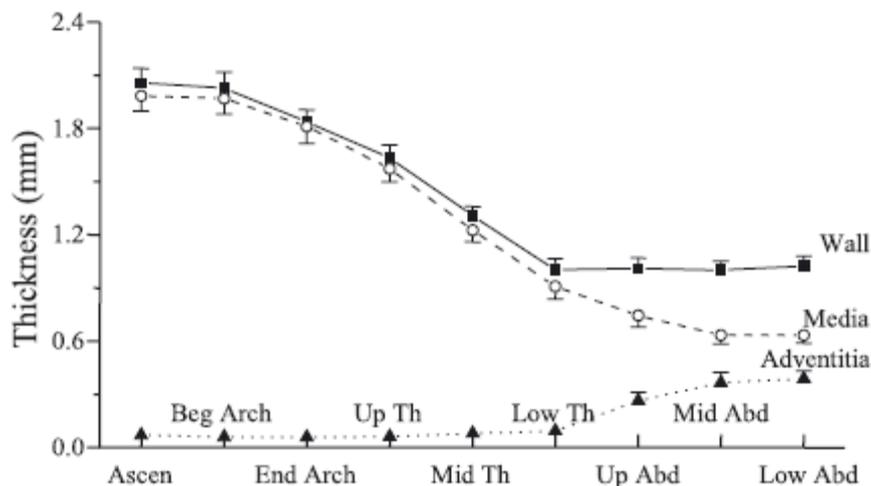


Figura 3.1 - Variação da espessura da parede arterial proposta por D. P. Sokolis (2007)

Na figura 3.2 podemos observar o gráfico que representa a variação do diâmetro interno e externo da parede arterial em função do seu comprimento.

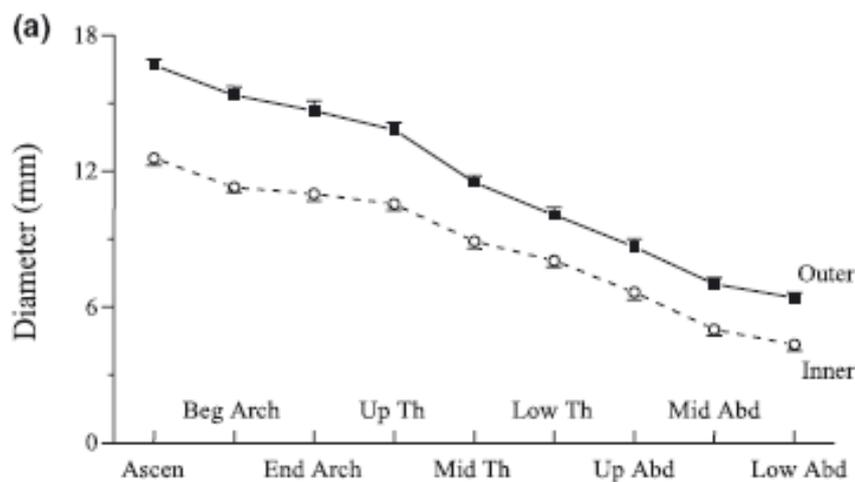


Figura 3.2 - Variação do diâmetro interno e externo da parede arterial proposta por D. P. Sokolis (2007)

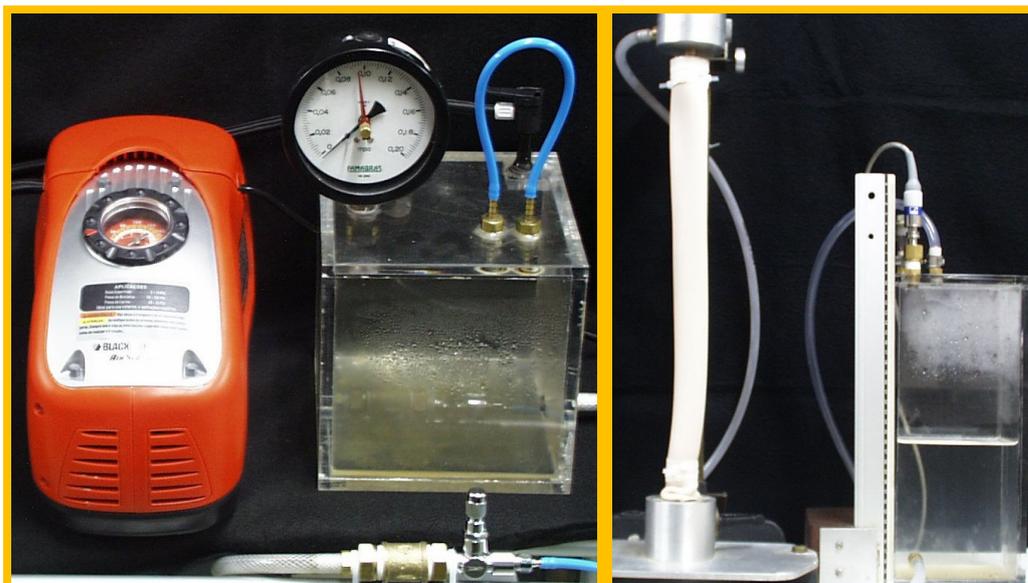
Para a confecção do tubo de silicone foi realizada uma mudança de escala das medidas obtidas, pelo fato da espessura real na parte inferior da aorta abdominal ser muito pequena. Isso faria com que um pequeno erro na confecção do tubo provocasse a inutilidade do molde e uma grande imperfeição.

3.1. Aparato utilizado na análise experimental

Para realizar a análise experimental foram utilizados os equipamentos descritos abaixo:

- Um tubo de silicone, confeccionando no laboratório de Biomembranas da PUC - Rio com as geometrias parametrizadas da aorta humana.
- Um aparato metálico, com finalidade de prender o tubo de silicone e tracioná-lo quando necessário, apresentado na figura 3.3(b).
- Um vaso de pressão primário com um manômetro acoplado, apresentado na figura 3.3(a).
- Um vaso de pressão secundário com um sensor de pressão acoplado, apresentado na figura 3.3(b).
- Uma válvula de ligação entre o vaso primário e o vaso secundário, apresentado na figura 3.3(a).
- Um compressor de ar ligado ao vaso primário, apresentado na figura 3.3(a).
- Um sistema de aquisição de dados e sensor de pressão NATIONAL que realiza a medição instantânea da pressão interna do vaso secundário, que é a mesma no tubo de silicone usando o programa LABVIEW.

Na figura 3.3 podemos observar os equipamentos descritos acima.



(a)

(b)

Figura 3.3 - Equipamentos utilizados na análise experimental

3.2.

Descrição do procedimento realizado na análise experimental

Para a realização da análise experimental foram realizados os procedimentos listados abaixo, na ordem apresentada, e tem como objetivo obter a pressão crítica:

- 1) Fixação do tubo de silicone no aparato metálico com o auxílio de braçadeiras plásticas. Existe uma abertura no aparato metálico, através da qual o tubo de silicone é ligado ao vaso secundário por meio de uma mangueira.
- 2) Aferição do comprimento entre as braçadeiras.
- 3) Retirada de todo o ar contido no interior do tubo de silicone.
- 4) O vaso primário contém apenas ar e o vaso secundário contém $\frac{3}{4}$ de água e $\frac{1}{4}$ de ar. O vaso primário e o vaso secundário são ligados por uma válvula.
- 5) Pressurização do vaso primário, mantendo-se a válvula de ligação entre o vaso primário e o vaso secundário fechada, até a pressão de 0,08 MPa, que equivale a 600,06 mmHG; com o auxílio do pressurizador.
- 6) Realiza-se uma abertura controlada da válvula de ligação do vaso primário e do vaso secundário, aumentando-se assim a pressão no interior do vaso secundário e do tubo de silicone, que está cheio de água.
- 7) Através o sensor de pressão acoplado no vaso secundário e ligado ao sistema de aquisição de dados é realizado a leitura da pressão interna do vaso secundário.
- 8) O ensaio estende-se até ser alcançada a pressão crítica (pressão na qual se verifica a estabilização da mesma). Essa fase do ensaio é chamada de fase A.
- 9) Após a pressão crítica ser alcançada promove-se a despressurização do aparato.
- 10) O procedimento é repetido a partir do item 5 (utilizando-se a mesma artéria) até a determinação da nova pressão crítica. Essa fase do ensaio é chamada de B.

Para exemplificar a nomenclatura adotada toma-se como exemplo o ensaio 1. Realiza-se então todo o procedimento descrito anteriormente até o item 8, essa pressão será a pressão crítica do Ensaio 1A, a pressão encontrada no item 10 será a pressão do Ensaio 1B.

3.3. Escolha do material

O material escolhido para a confecção dos moldes representativos da aorta foi o silicone, matéria prima que tem um manuseio relativamente simples e de fácil confecção.

Para a determinação da concentração de catalisador a ser empregada na confecção dos tubos de silicone foram confeccionados corpos de prova com diferentes concentrações de catalisador. Os testes permitiram quantificar a mudança das características elásticas do silicone em função da quantidade de catalisador. Na figura 3.4 podemos observar os corpos de prova confeccionados.

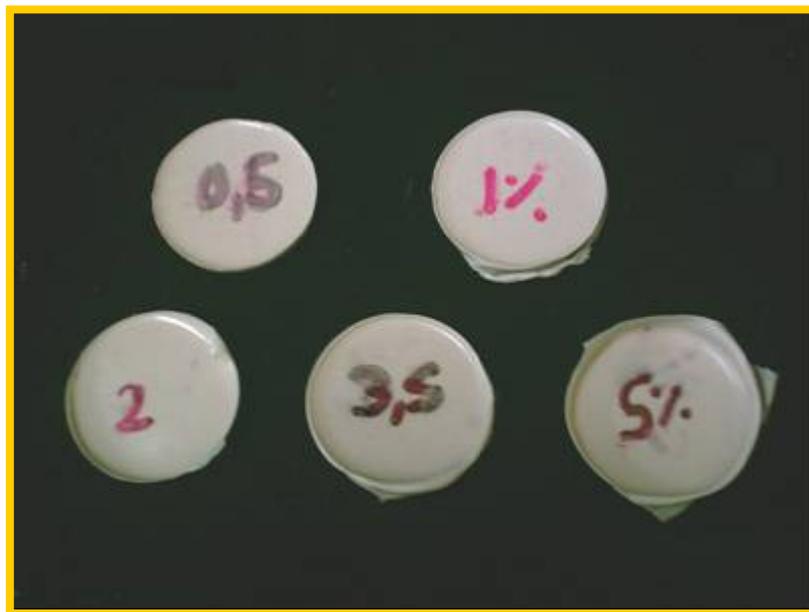


Figura 3.4 - Corpos de prova para determinação da concentração de catalisador

Os corpos de prova apresentavam concentrações de 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%, de catalisador.

Após realizarmos testes mecânico com os corpos de prova citados acima, optamos por empregar a concentração de 0,5% de catalisador, em relação à massa

de silicone empregada. Para concentrações menores que 0,5% o material tornou-se muito flexível não sendo possível a visualização do bulbo na pressão crítica, em alguns casos a massa de silicone não solidificou.

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, e se fosse muito flexível sofreria deformação como um todo e o bulbo do aneurisma não ficaria caracterizado.

3.4. Confeção do tubo de silicone

O tubo de silicone foi confeccionado com o auxílio de um molde de gesso e um núcleo central de madeira onde a massa de silicone era despejada e permanecia por 48 horas, o silicone utilizado após a mistura com o catalisador e colocado em uma bomba de vácuo para retirada das bolhas de ar incorporadas a massa devido à mistura. O molde de gesso e o núcleo central de madeira apresentam seção variável ao longo de seu comprimento para simular a geometria arterial proposta por Simão da Silva e outros (1999).

Na figura 3.5 podemos observar a mistura de silicone e catalisador passando pelo processo de retirada de bolhas de ar.



Figura 3.5 – Processo para retirada de bolhas da mistura

Na figura 3.6 podemos observar o molde de gesso e o núcleo central de madeira utilizados na confecção dos tubos de silicone.

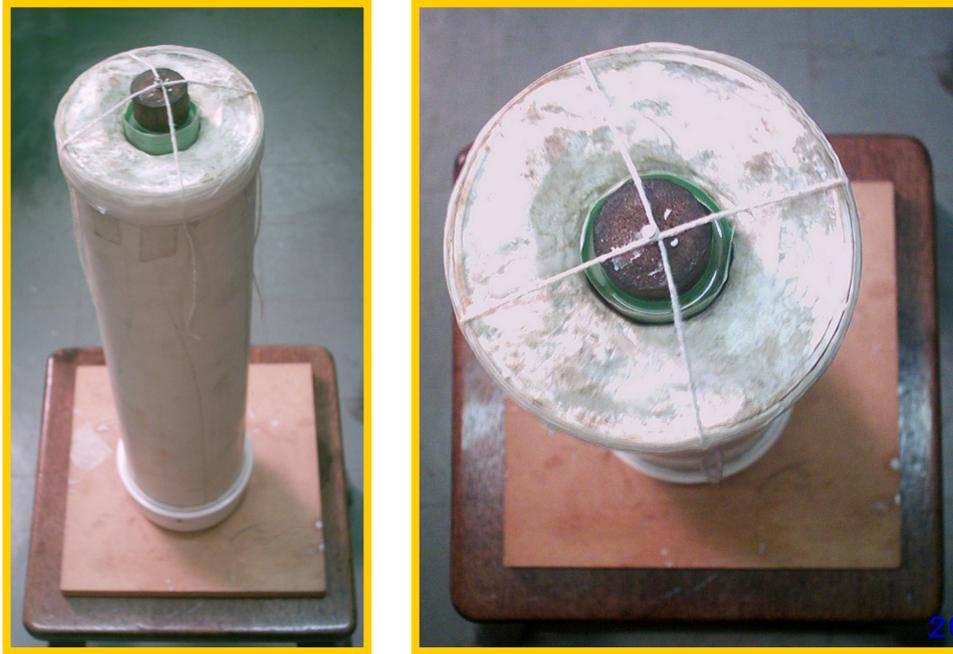


Figura 3.6 – Imagem ilustrativa dos detalhes do molde de gesso utilizado na confecção do tubo de silicone

Para centralização do núcleo central de madeira é colocada uma tampa. A imagem apresentada na figura 3.6 é meramente ilustrativa do ponto de vista da centralização do núcleo central de madeira.

3.5. Obtenção das propriedades do silicone

Foram realizados testes de tração, no Instituto Tecnológico – Laboratório de Ensaio Mecânicos (ITUC – LEM). Com corpos de prova moldados com o mesmo material e no mesmo instante em que foram confeccionados os moldes das artérias a serem ensaiadas. Os corpos de prova eram ensaiados no mesmo dia em que se realizava o ensaio das artérias.

Os moldes das artérias e os corpos de prova eram ensaiados uma semana após serem confeccionados. Este intervalo de tempo foi rigorosamente obedecido, pelo fato das propriedades elásticas do material mudarem com o passar do tempo.

Na figura 3.7 podemos observar o detalhe da garra utilizada no ensaio de tração.

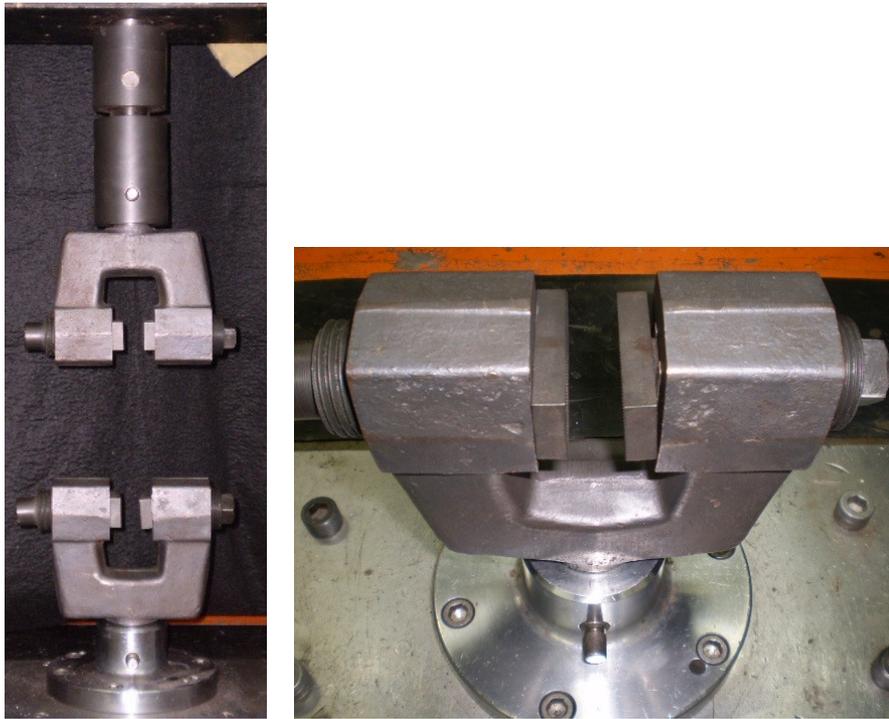


Figura 3.7 - Detalhe da garra utilizada no ensaio de tração do corpo de prova

Na figura 3.8 podemos observar o ensaio de tração realizado no ITUC - LEM.

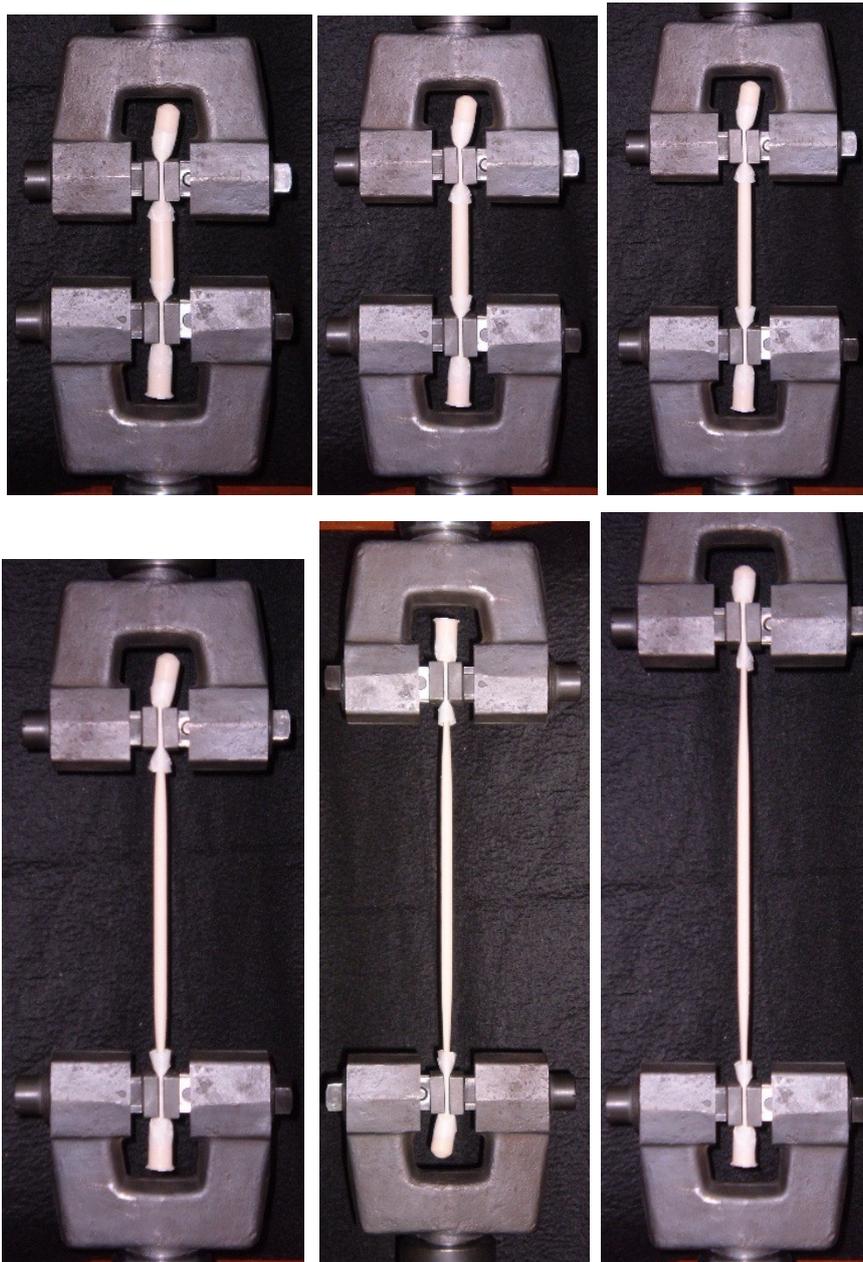


Figura 3.8 - Detalhe do ensaio de tração

O ensaio de tração tem por objetivo determinar a relação tensão-deformação do material estudado. Esta relação é utilizada para se chegar as constantes elásticas dos funcionais de energia a serem modelados na análise numérica do material por meio do programa de elementos finitos ABAQUS.

3.5.1. Corpo de prova

O corpo de prova utilizado no ensaio era confeccionado no interior de tubos de ensaio de vidro e apresentava geometria descrita abaixo:

- Comprimento: 12,5cm.
- Raio: 0,67cm.

Os corpos de prova são confeccionados com o mesmo material utilizado da confecção de cada artéria.

Na figura 3.9 estão representados dois corpos de prova e uma artéria.

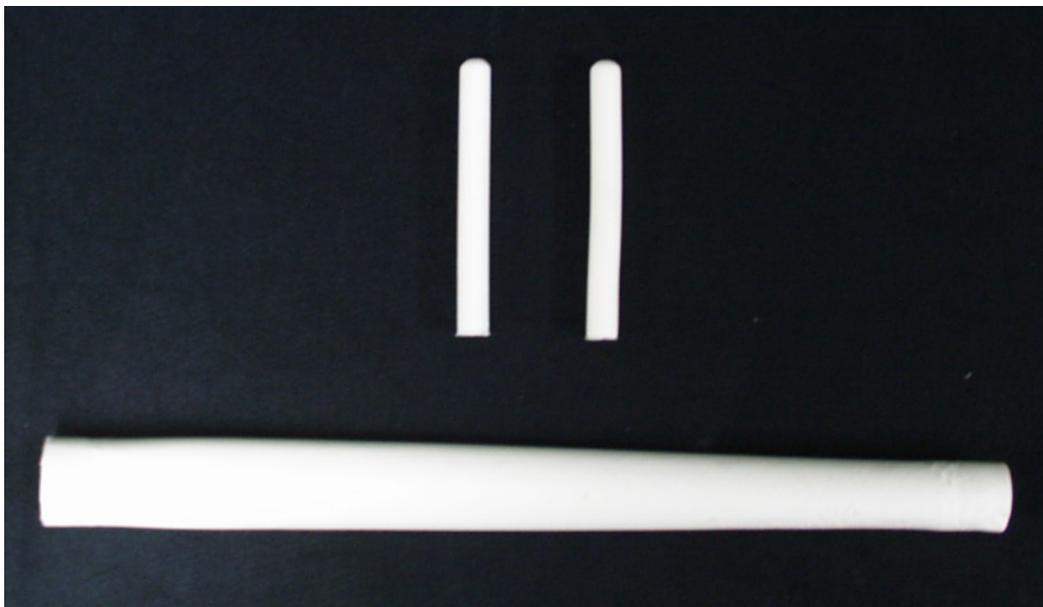


Figura 3.9 - Representação dos corpos de prova e da artéria

3.5.2. Pré-condicionamento

Antes de ser instalado no aparato metálico e de se realizar o teste de tração, o tubo de silicone e os corpos de prova foram submetidos a um pré-condicionamento.

O pré-condicionamento consistia em tracionar o tubo de silicone em 30% de seu comprimento inicial em um único ciclo de 15 repetições. Somente após este procedimento realizavam-se os ensaios. Em tecidos biológicos o pré-condicionamento tem por objetivo realizar o alinhamento das fibras.

3.6. Resultados dos ensaios com tubos de silicone

Foram realizados ensaios com diferentes níveis de alongamento nos tubo de silicone para que se observasse o comportamento da pressão crítica.

O primeiro conjunto de ensaios apresenta a geometria obtida através de Simão da Silva e outros (1999). A geometria é descrita abaixo:

- Comprimento inicial: 40 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.

Esta geometria foi parametrizada a partir da geometria descrita no início do capítulo, isso foi necessário, pois a espessura na parte inferior é muito delgada. Mesmo após a parametrização a parte inferior apresenta ainda muitas imperfeições. Para uma melhor padronização do ensaio foi retirada uma porção da parte inferior, com isso o comprimento inicial reduziu-se para 36 cm.

O segundo conjunto de ensaios apresenta a geometria obtida através do artigo de D. P. Sokolis, esta geometria será utilizada na análise numérica, e os resultados comparados com a geometria de Simão da Silva e outros.

3.7. Estudo da pressão

Para o conjunto de ensaios anteriores foi realizado um estudo da variação da pressão interna da aorta ao longo de todo o ciclo de carga, isto é enchimento da artéria com líquido sob pressão. Para este estudo foram realizados dois ciclos de carga e descarga obtendo-se a pressão interna correspondente a cada volume de líquido inserido.

Através dos gráficos podemos observar a variação da pressão (mmHg) em função do tempo (s) ou do volume inserido. Na realização da pressurização foi realizada um abertura controlada e padronizada para todos os ensaios. O estudo de

aferição da pressão interna ao longo do tempo tem como objetivo demonstrar à estabilização da pressão, sendo esta pressão estabilizada considerada a pressão crítica do ensaio experimental. Apesar de o bulbo formado continuar a crescer com o passar do tempo, a pressão permanece constante.

3.8. Estudo da variação volumétrica

Para o conjunto de ensaios anteriores foi realizado um estudo da variação do volume interno da aorta ao longo de todo o ciclo de carga. Para este estudo foram realizados dois ciclos de carga e descarga aferindo-se o volume interno correspondente.

Através dos gráficos podemos observar a variação do volume (cm^3) em função da pressão interna (mmHg).

3.9. Resultados experimentais

3.9.1. Ensaio 1

No ensaio 1 o tubo de silicone não estava alongado.

Para este conjunto de ensaio as pressões críticas encontradas foram:

Ensaio 1	Pressão Crítica (mmHg)
Ensaio 1A	108,8
Ensaio 1B	119,2

Tabela 3.1 – Pressões críticas do ensaio 1

Na figura 3.10 podemos observar a seqüência de imagens obtidas ao longo do ensaio.

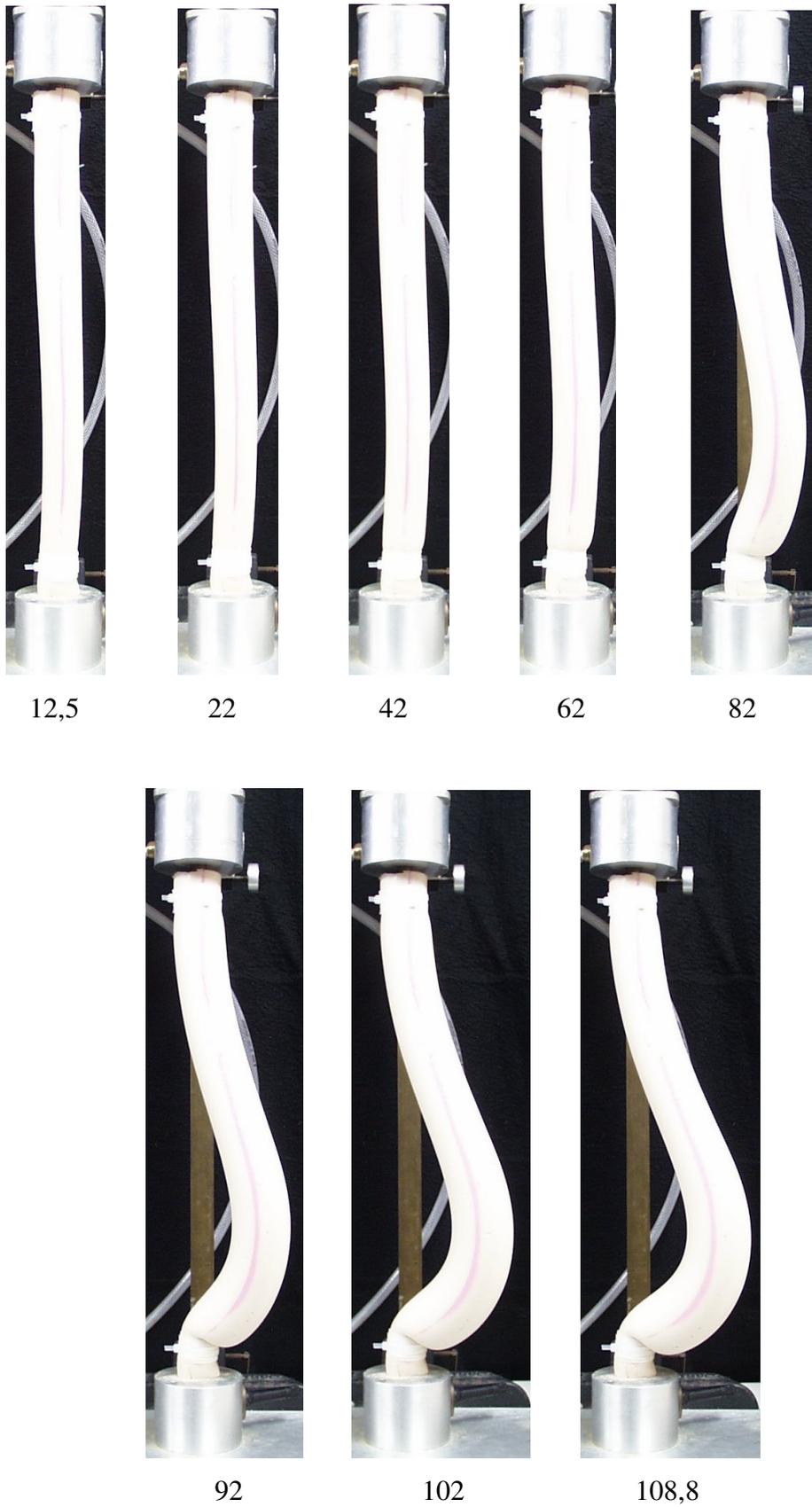


Figura 3.10 – Sequência de fotos ao longo do ensaio (pressões em mmHg)

Na figura 3.11 segue o gráfico tensão deformação obtido com os corpos de prova do ensaio 1 para a caracterização do material do ensaio 1.

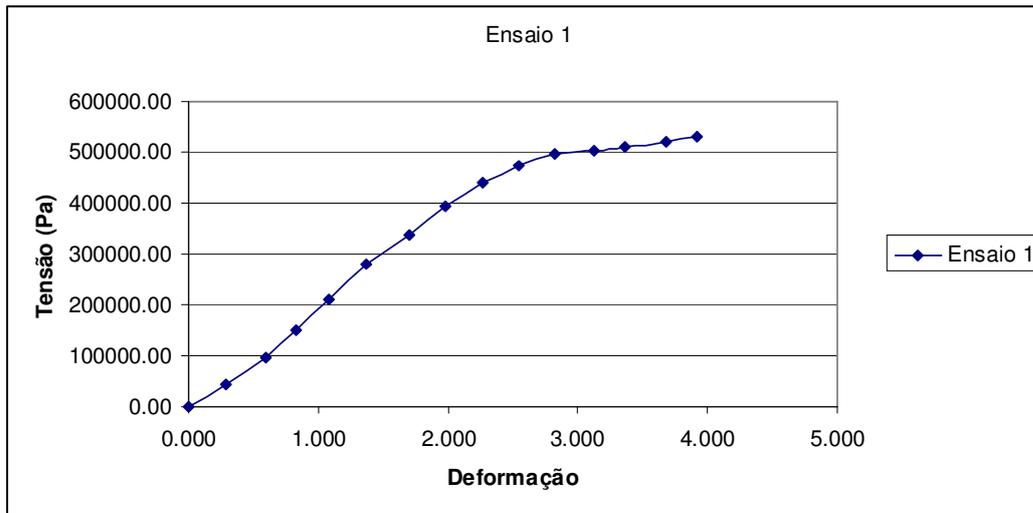


Figura 3.11 – Gráfico de caracterização do ensaio 1

Na figura 3.12 podemos observar a variação da pressão interna (mmHg) ao longo do tempo para o ensaio 1, tempo este correspondente ao enchimento da artéria com líquido a uma velocidade constante. Após atingir certa pressão, que chamaremos de crítica, apesar do aumento do volume de líquido no interior da aorta não há acréscimo da pressão.

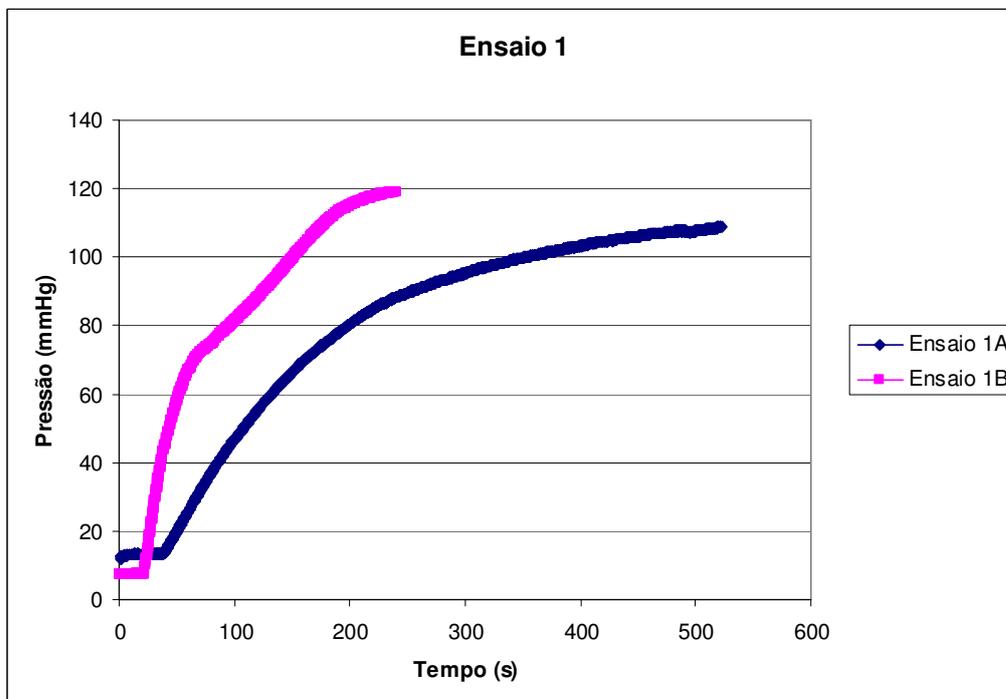


Figura 3.12 – Variação da pressão do ensaio 1

Na figura 3.13 podemos observar a variação do volume interno (cm^3) em função da pressão para o ensaio 1.

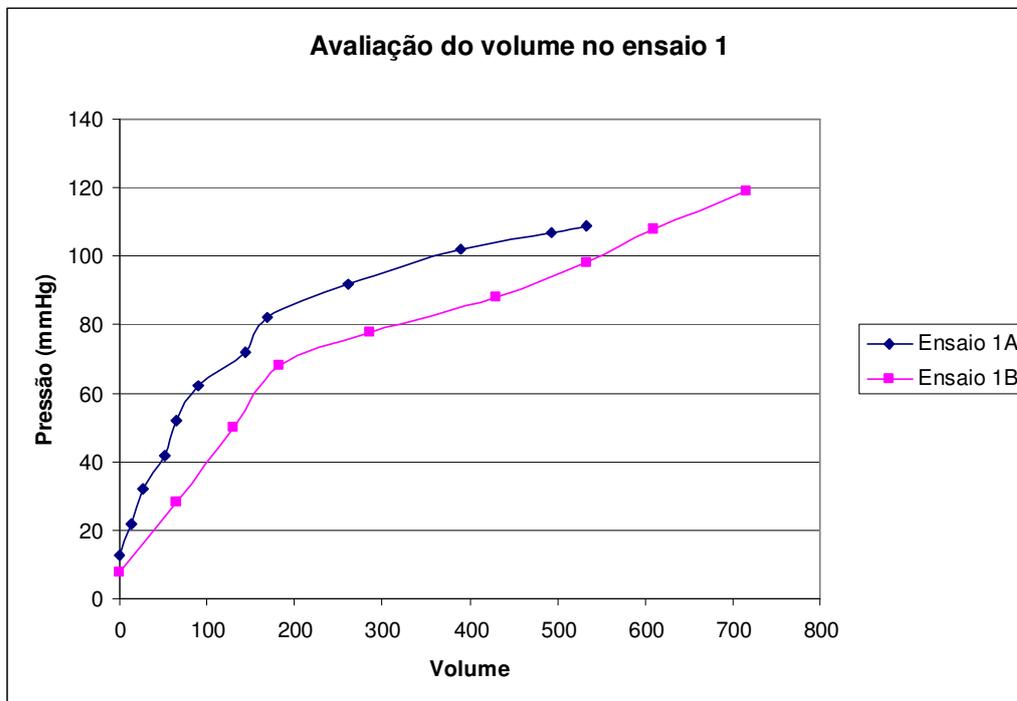


Figura 3.13 – Variação do volume do ensaio 1

3.9.2. Ensaio 2

No ensaio 2 o tubo de silicone não estava alongado.

Para este conjunto de ensaio as pressões críticas encontradas foram:

Ensaio 2	Pressão Crítica (mmHg)
Ensaio 2A	125,8
Ensaio 2B	116,5

Tabela 3.2 – Pressões críticas do ensaio 2

Na figura 3.14 segue o gráfico tensão-deformação obtido com os corpos de prova do ensaio 2 para a caracterização do material do ensaio 2.

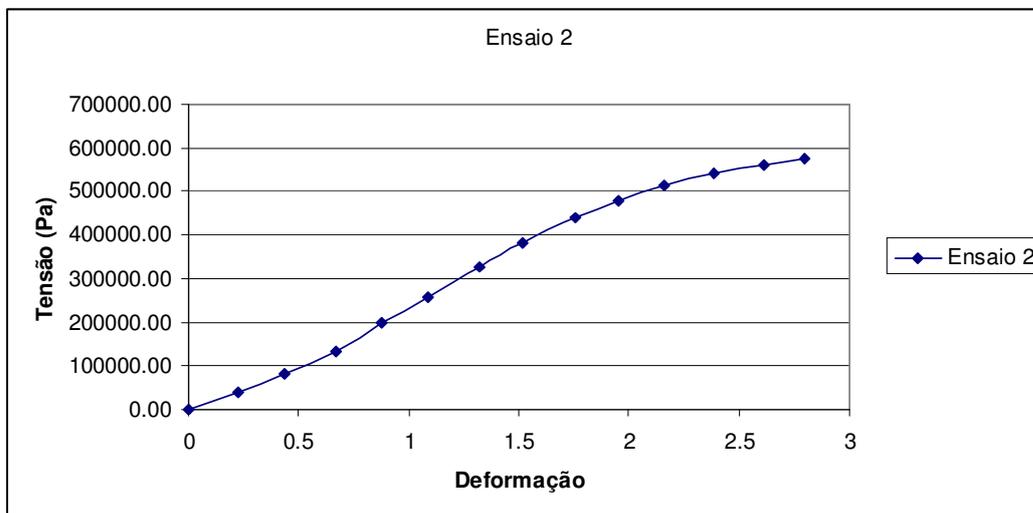


Figura 3.14 – Gráfico de caracterização do ensaio 2

Na figura 3.15 podemos observar a variação da pressão interna (mmHg) ao longo do tempo para o ensaio 2.

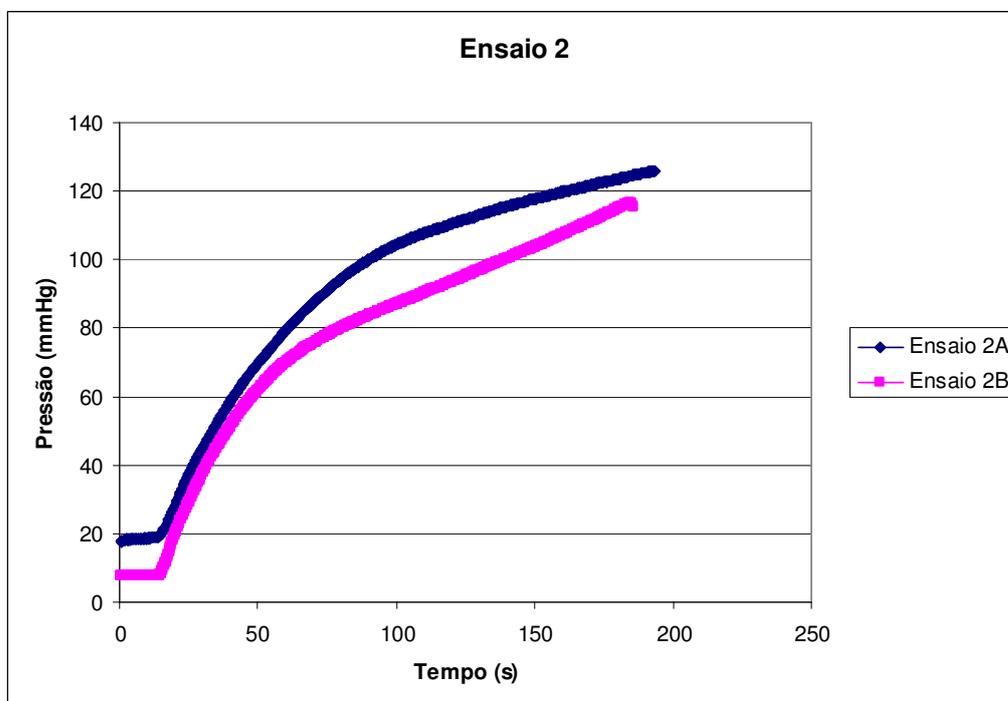


Figura 3.15 – Variação da pressão do ensaio 2

Na figura 3.16 podemos observar a variação do volume interno (cm^3) em função da pressão para o ensaio 2. O ensaio 2 não estava alongado.

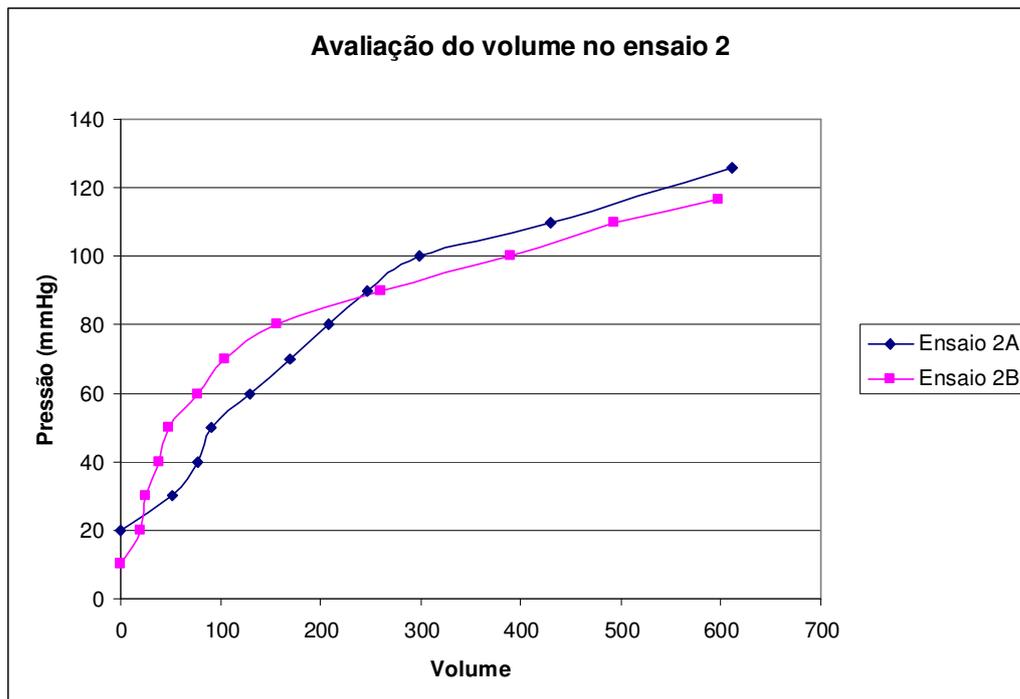


Figura 3.16 – Variação do volume do ensaio 2

3.9.3. Ensaio 3

No ensaio 3 o tubo de silicone estava alongado de 10% de seu comprimento inicial.

Para este conjunto de ensaio as pressões críticas encontradas foram:

Ensaio 3	Pressão Crítica (mmHg)
Ensaio 3A	109,8
Ensaio 3B	107,5

Tabela 3.3 – Pressões críticas do ensaio 3

Na figura 3.13 podemos observar a seqüência de imagens obtidas ao longo do ensaio.

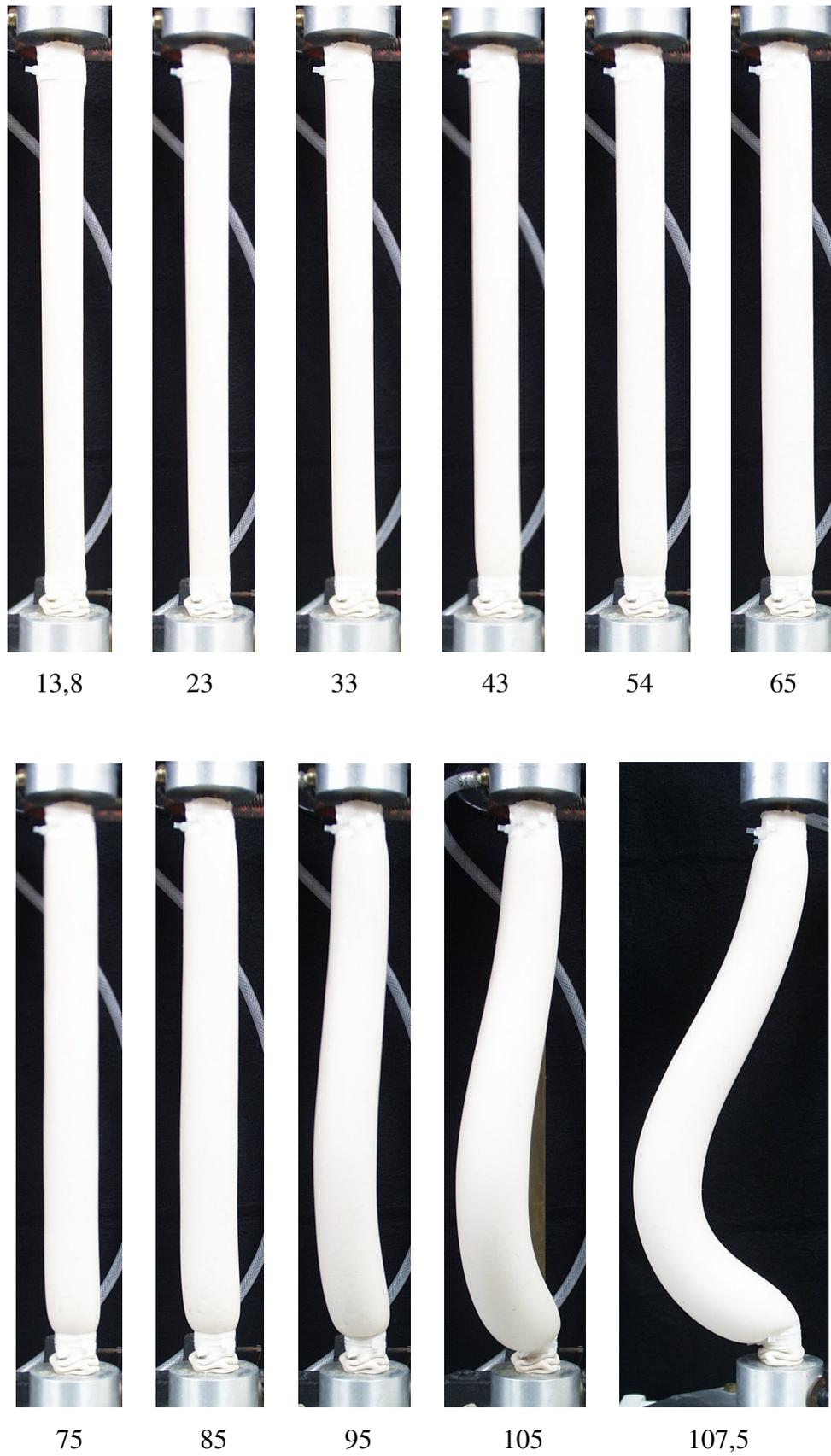


Figura 3.17 – Seqüência de fotos ao longo do ensaio (pressões em mmHg)

Na figura 3.18 segue o gráfico tensão-deformação obtido com os corpos de prova do ensaio 3 para a caracterização do material do ensaio 3.

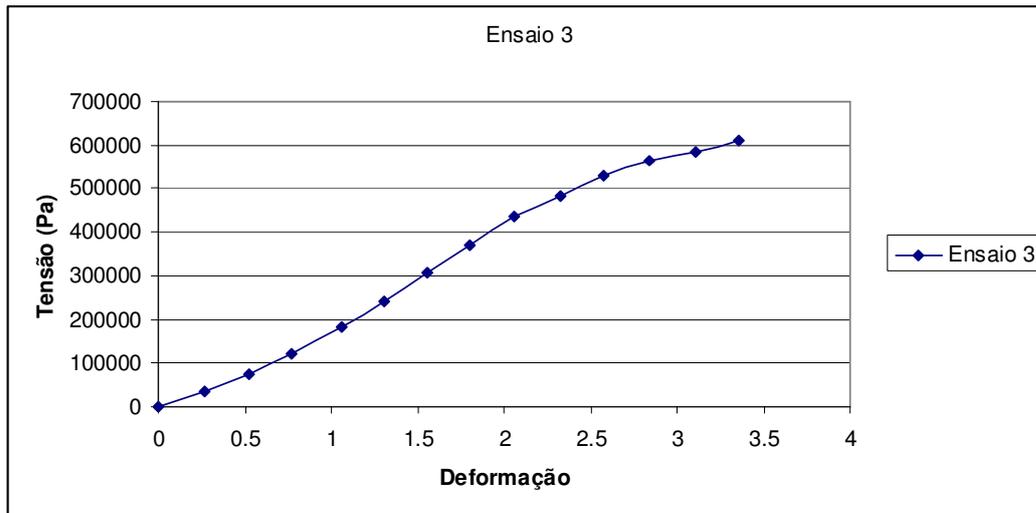


Figura 3.18 – Gráfico de caracterização do ensaio 3

Na figura 3.19 podemos observar a variação da pressão interna (mmHg) ao longo do tempo para o ensaio 3. O ensaio 3 estava alongado de 10% de seu comprimento inicial.

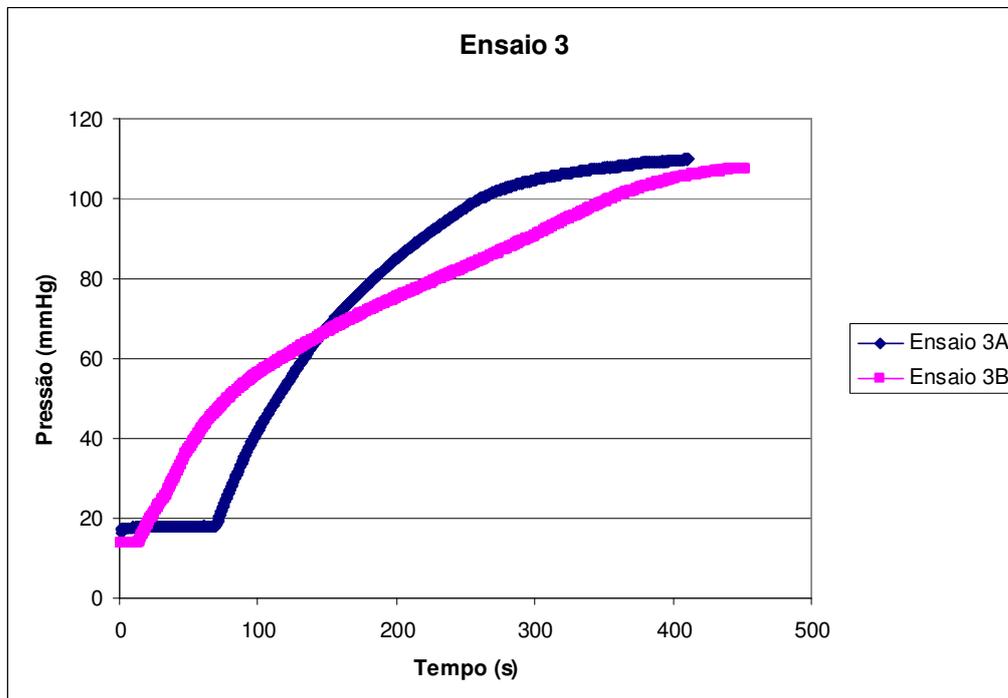


Figura 3.19 – Variação da pressão do ensaio 3

Ma figura 3.20 podemos observar a variação do volume interno (cm^3) em função da pressão para o ensaio 3. O ensaio 3 estava alongado de 10% de seu comprimento inicial.

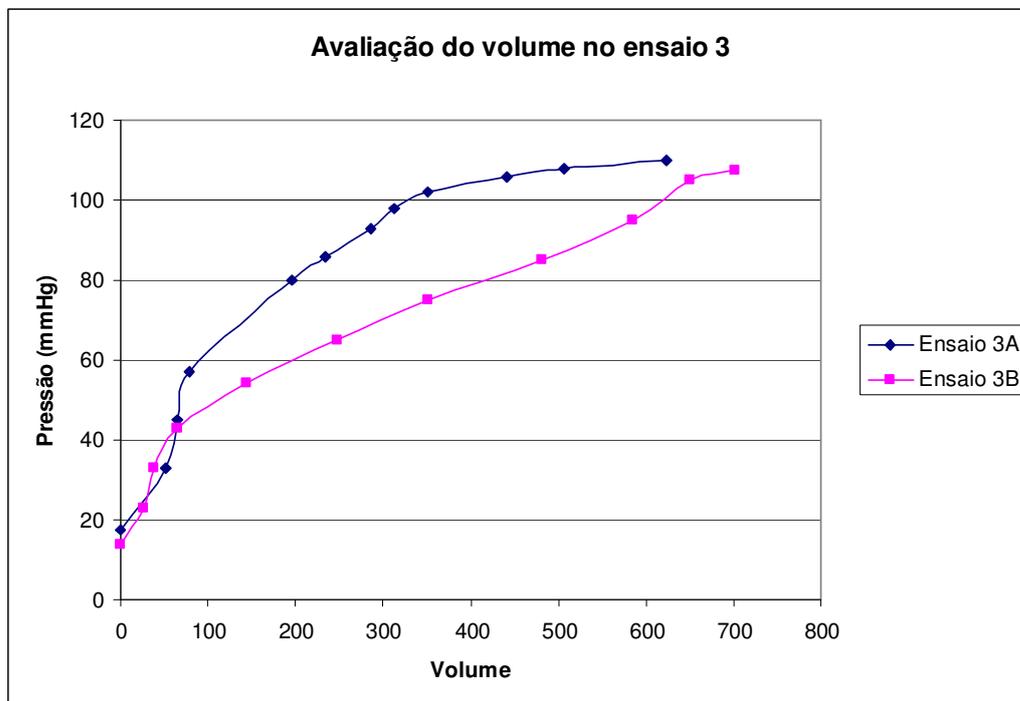


Figura 3.20 – Variação do volume do ensaio 3

3.9.4. Ensaio 4

No ensaio 4 o tubo de silicone estava alongado de 10% de seu comprimento inicial.

Para este conjunto de ensaio as pressões críticas encontradas foram:

Ensaio 4	Pressão Crítica (mmHg)
Ensaio 4A	109,7
Ensaio 4B	116,7

Tabela 3.4 – Pressões críticas do ensaio 4

Na figura 3.21 segue o gráfico tensão-deformação obtido com os corpos de prova do ensaio 4 para a caracterização do material do ensaio 4.

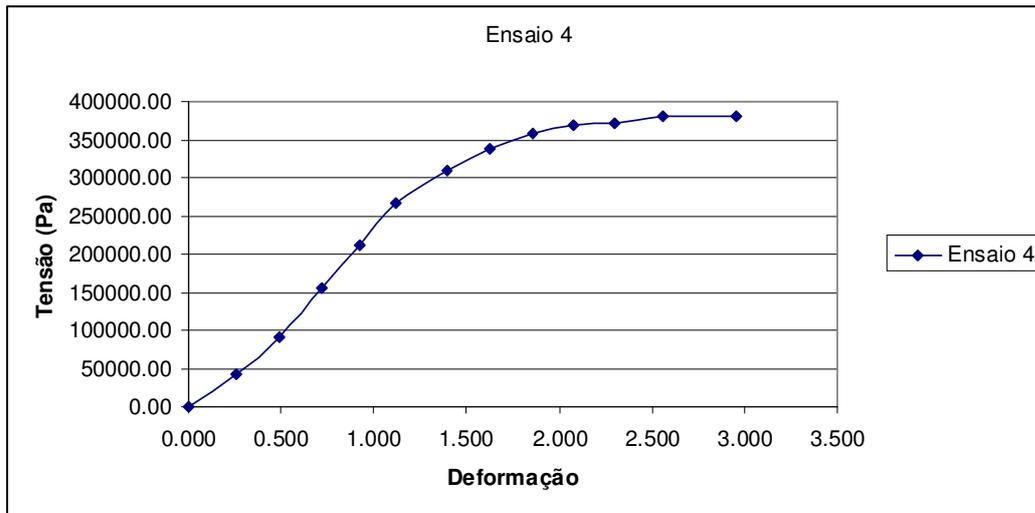


Figura 3.21 – Gráfico de caracterização do ensaio 4

Na figura 3.22 podemos observar a variação da pressão interna (mmHg) em função da pressão para o ensaio 4. O ensaio 4 estava alongado de 10% de seu comprimento inicial.

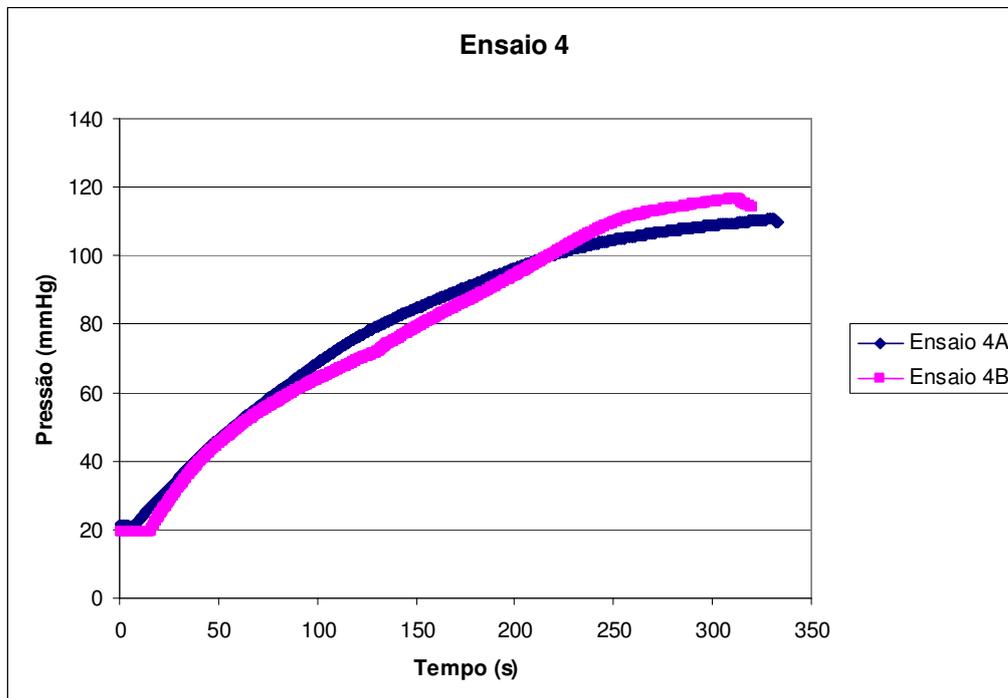


Figura 3.22 – Variação da pressão do ensaio 4

Na figura 3.23 podemos observar a variação do volume interno (cm^3) ao longo do tempo para o ensaio 4. O ensaio 4 estava alongado de 10% de seu comprimento inicial.

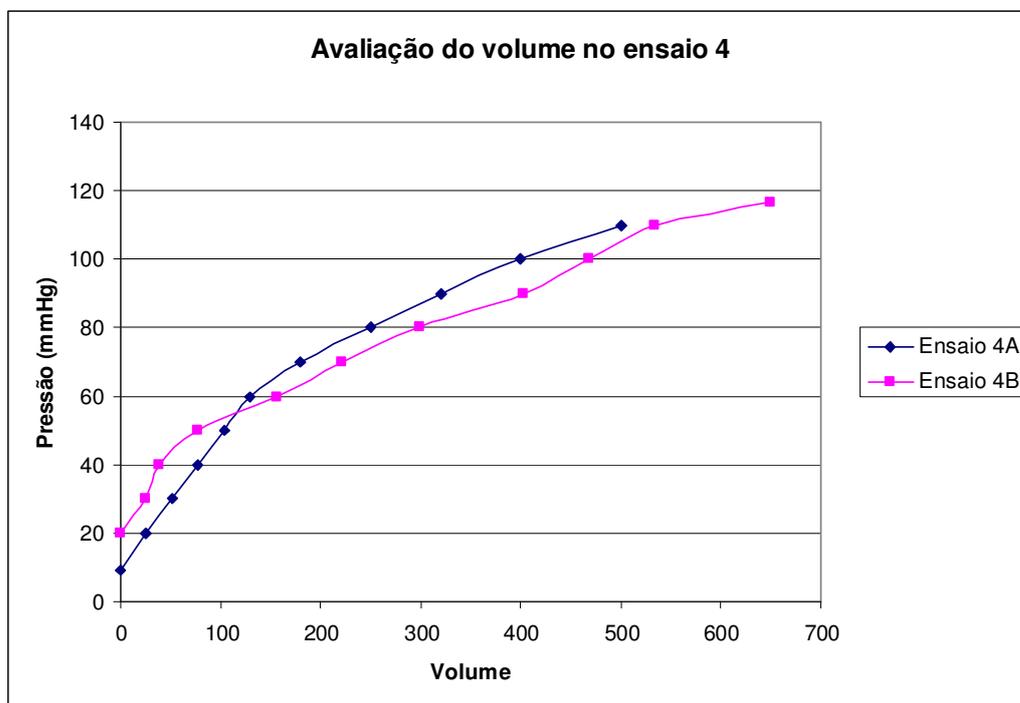


Figura 3.23 – Variação do volume do ensaio 4

3.9.5. Ensaio 5

No ensaio 5 o tubo de silicone estava alongado de 20% de seu comprimento inicial.

Para este conjunto de ensaio as pressões críticas encontradas foram:

Ensaio 5	Pressão Crítica (mmHg)
Ensaio 5A	98,6
Ensaio 5B	97,7

Tabela 3.5 – Pressões críticas do ensaio 5

Na figura 3.24 podemos observar a seqüência de imagens obtidas ao longo do ensaio.

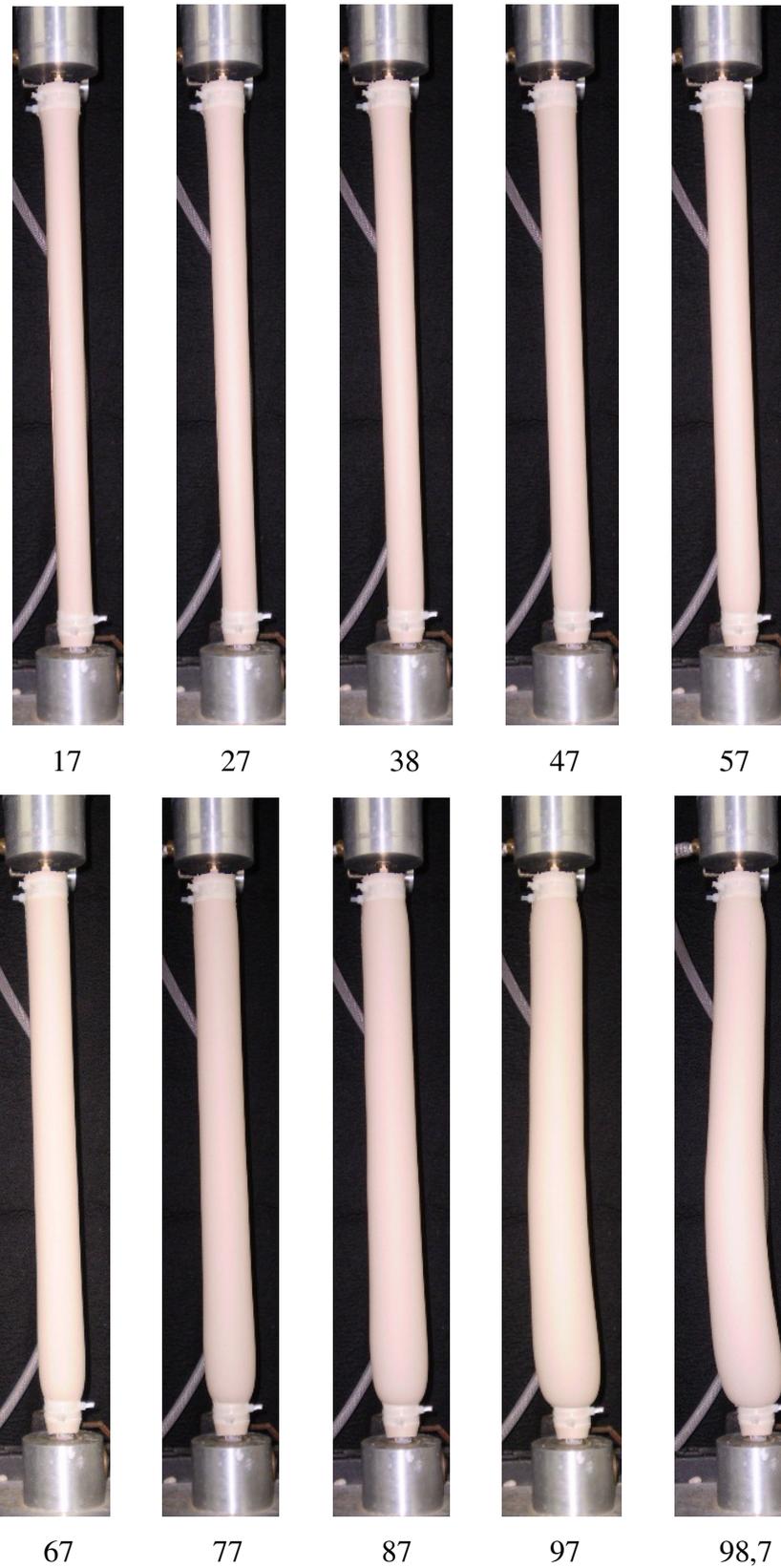


Figura 3.24 – Seqüência de fotos ao longo do ensaio (pressões em mmHg)

Na figura 3.25 segue o gráfico tensão-deformação obtido com os corpos de prova do ensaio 5 para a caracterização do material do ensaio 5.

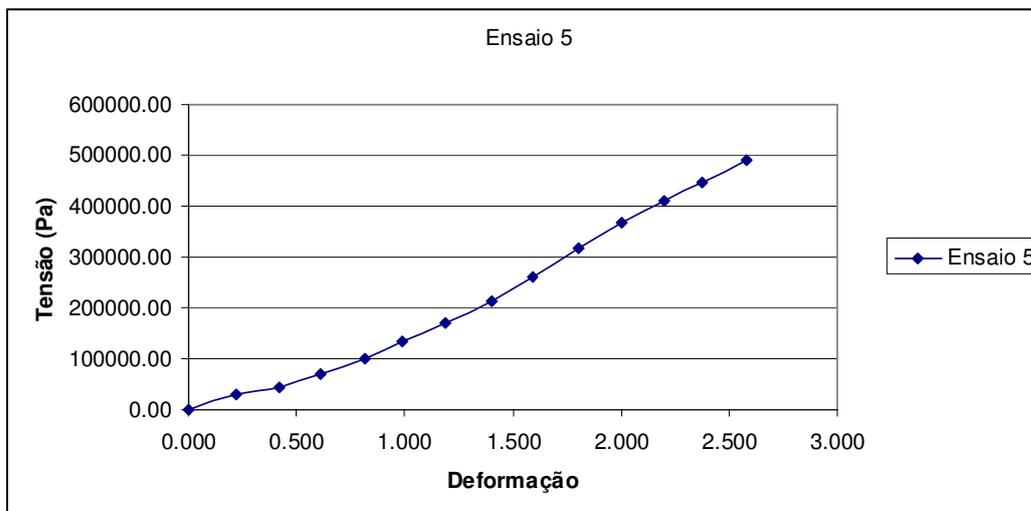


Figura 3.25 – Gráfico de caracterização do ensaio 5

Na figura 3.26 podemos observar a variação da pressão interna (mmHg) ao longo do tempo para o ensaio 5. O ensaio 5 estava alongado de 20% de seu comprimento inicial.

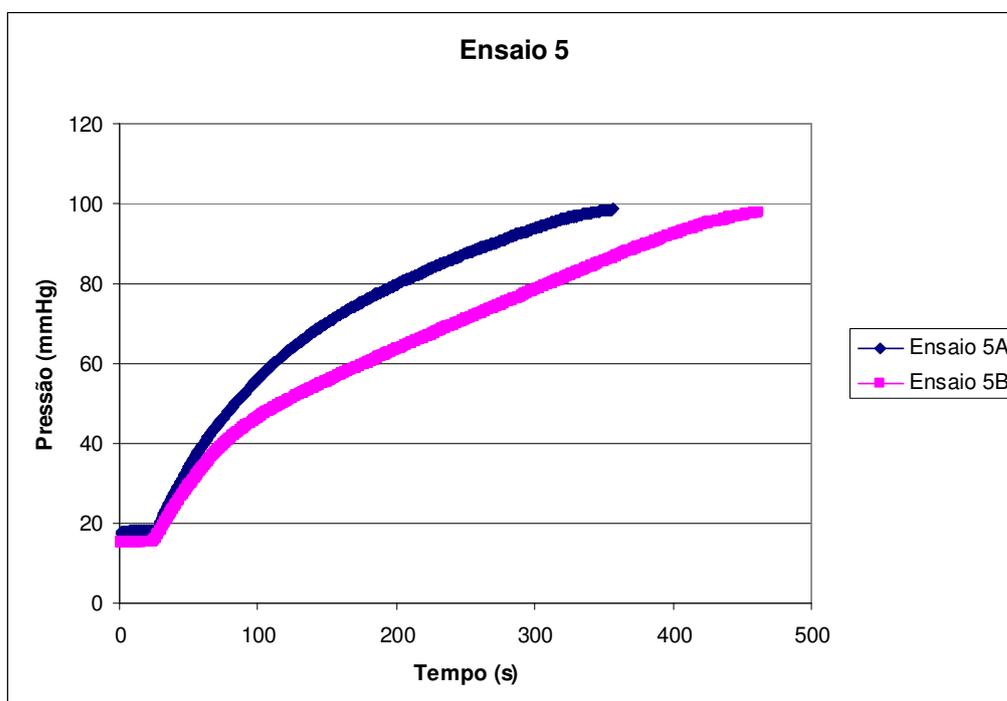


Figura 3.26 – Variação da pressão do ensaio 5

Na figura 3.27 podemos observar a variação do volume interno (cm^3) em função da pressão para o ensaio 5. O ensaio 5 estava alongado de 20% de seu comprimento inicial.

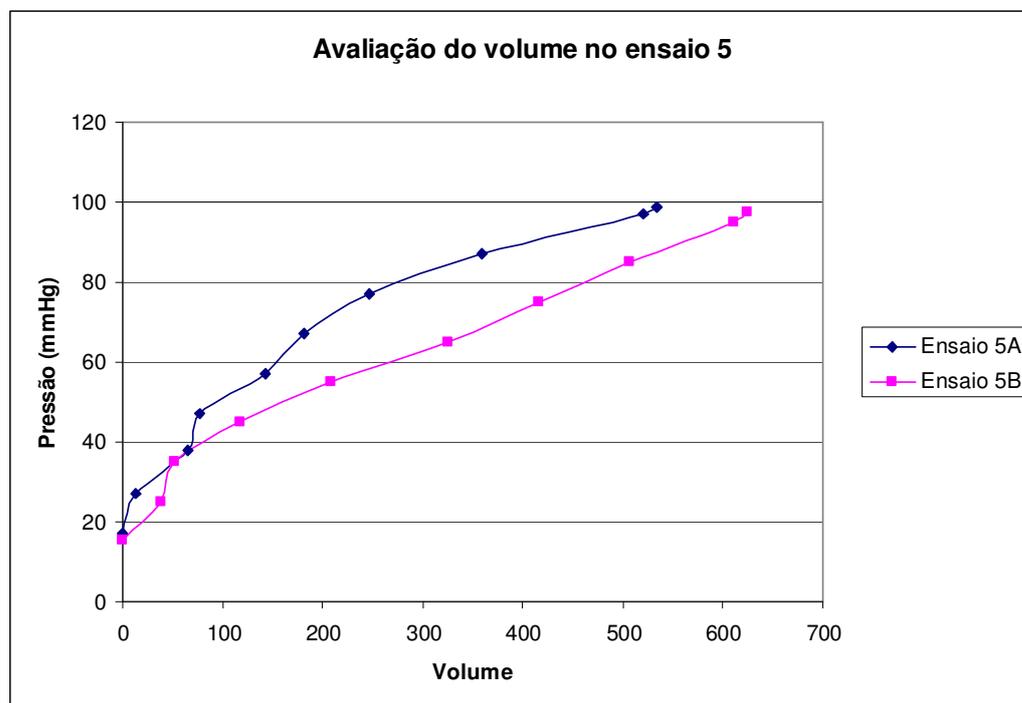


Figura 3.27 – Variação do volume do ensaio 5

3.9.6. Ensaio 6

No ensaio 6 o tubo de silicone estava alongado de 20% de seu comprimento inicial.

Para este conjunto de ensaio as pressões críticas encontradas foram:

Ensaio 6	Pressão Crítica (mmHg)
Ensaio 6A	90,5
Ensaio 6B	95,9

Tabela 3.6 – Pressões críticas do ensaio 6

Na figura 3.28 segue o gráfico tensão deformação obtido com os corpos de prova do ensaio 4 para a caracterização do material do ensaio 6.

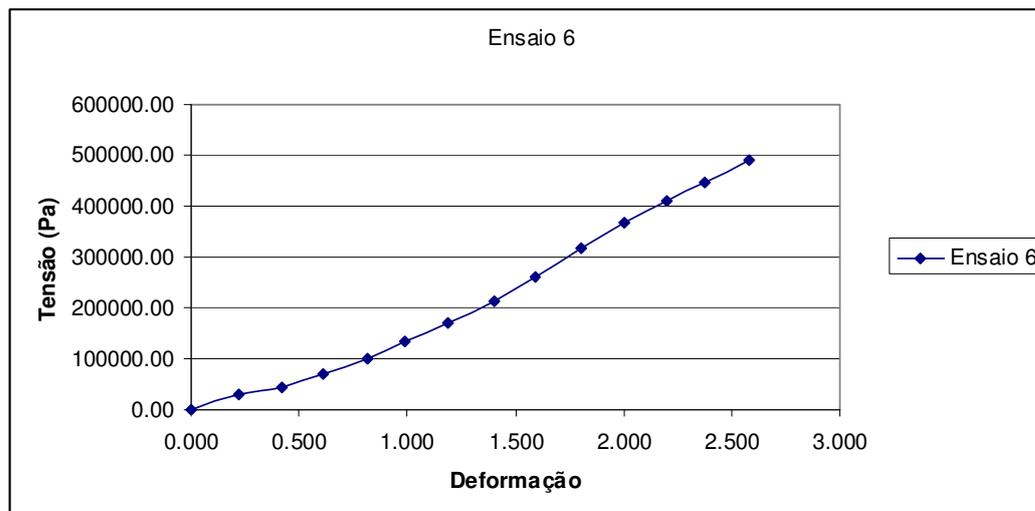


Figura 3.28 – Gráfico de caracterização do ensaio 6

Na figura 3.29 podemos observar a variação da pressão interna (mmHg) ao longo do tempo para o ensaio 6. O ensaio 6 estava alongado de 20% de seu comprimento inicial.

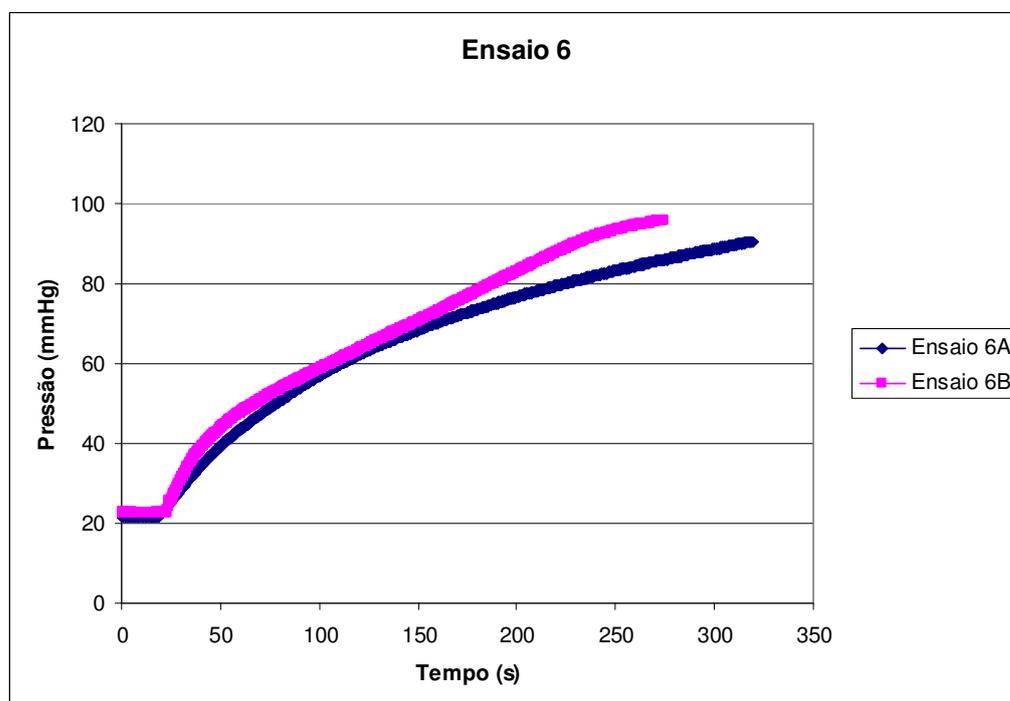


Figura 3.29 – Variação da pressão do ensaio 6

Na figura 3.30 podemos observar a variação do volume interno (cm^3) em função da pressão para o ensaio 6. O ensaio 6 estava tracionado de 20% de seu comprimento inicial.

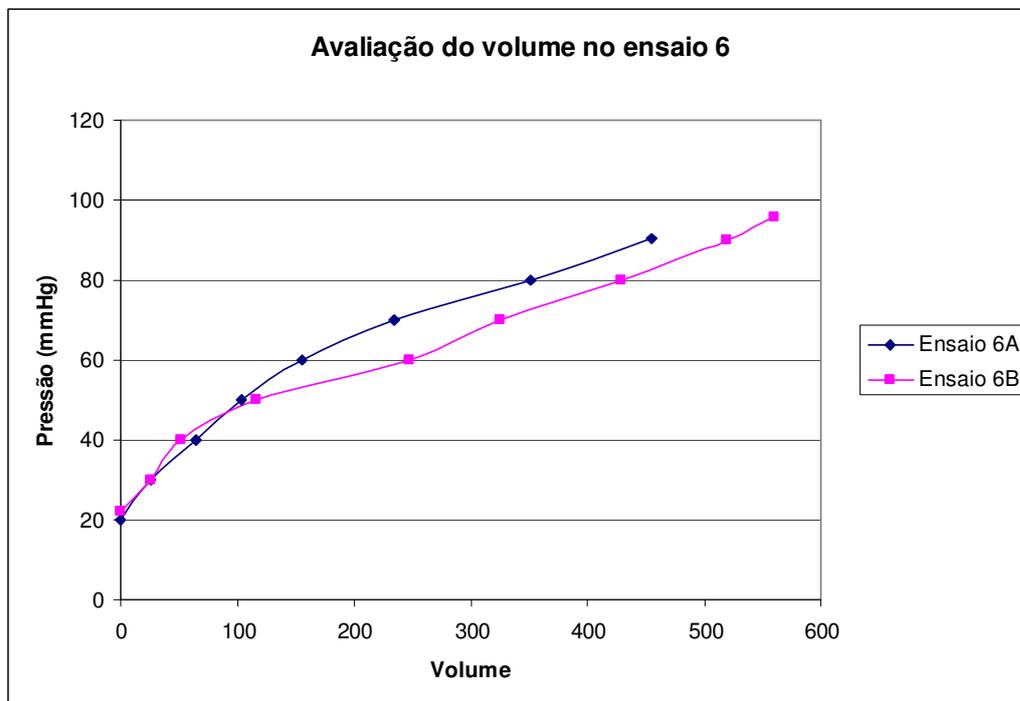


Figura 3.30 – Variação do volume do ensaio 6

3.10. Padronização das pressões críticas

Para a caracterização das pressões obtidas nos ensaios anteriores adotou-se a pressão média dos ensaios como a pressão de referencia para os diferentes níveis de alongamentos adotados.

Na tabela 3.7 podemos observar as pressões de referências obtidas.

Nível de alongamento	Pressão de referencia (mmHg)
Sem alongamento	117,6
Alongamento de 10% do comprimento	110,9
Alongamento de 20% do comprimento	95,7

Tabela 3.7 – Pressões de referências

Na figura 3.31 segue a representação gráfica dos dados apresentados na tabela anterior.

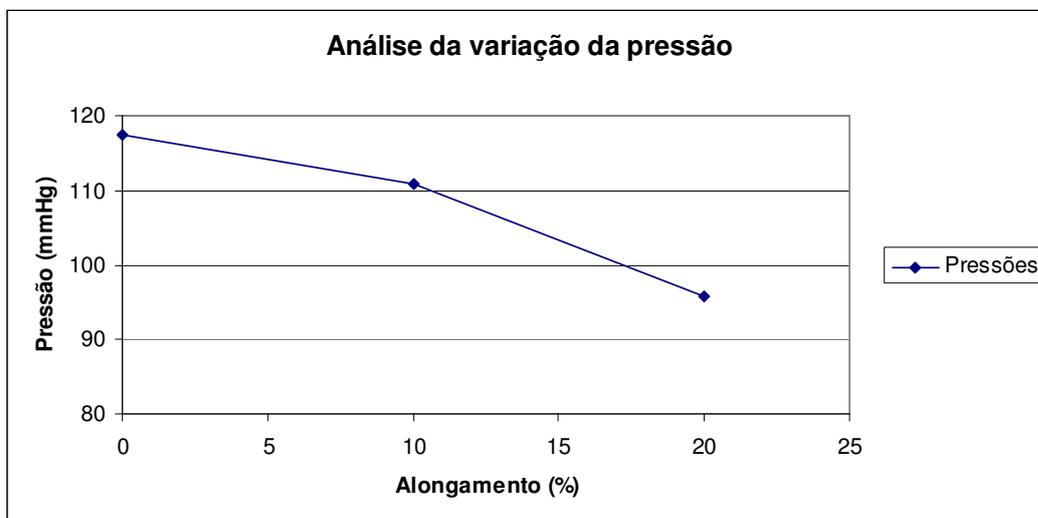


Figura 3.31 – Análise da variação da pressão

Pela análise do gráfico anterior percebemos uma variação não linear com o incremento no nível de alongamento do tubo de silicone.

3.11. Padronização da análise do volume

Para a caracterização dos volumes obtidos nos ensaios anteriores adotou-se o volume médio dos ensaios como o volume de referência para os diferentes níveis de alongamento adotados.

Na tabela 3.8 podemos observar os volumes de referência obtidos.

Nível de alongamento	Volume (cm^3)
Sem alongamento	615
Alongamento de 10% do comprimento	619
Alongamento de 20% do comprimento	543

Tabela 3.8 – Volumes de referência

Podemos observar pela análise da tabela 3.8 que com o incremento de 10% de alongamento no comprimento inicial a variação do volume interno não foi

perceptível, sendo notada apenas quando foi aplicado um alongamento de 20% do comprimento inicial.

Podemos observar na figura 3.32 que o bulbo não sofre grande alteração de formato com 10% de alongamento em relação à estrutura sem alongamento e também que com um alongamento de 20% o bulbo torna-se menor e a flambagem do material não é tão acentuada devido ao maior alongamento provocado por uma tração maior.

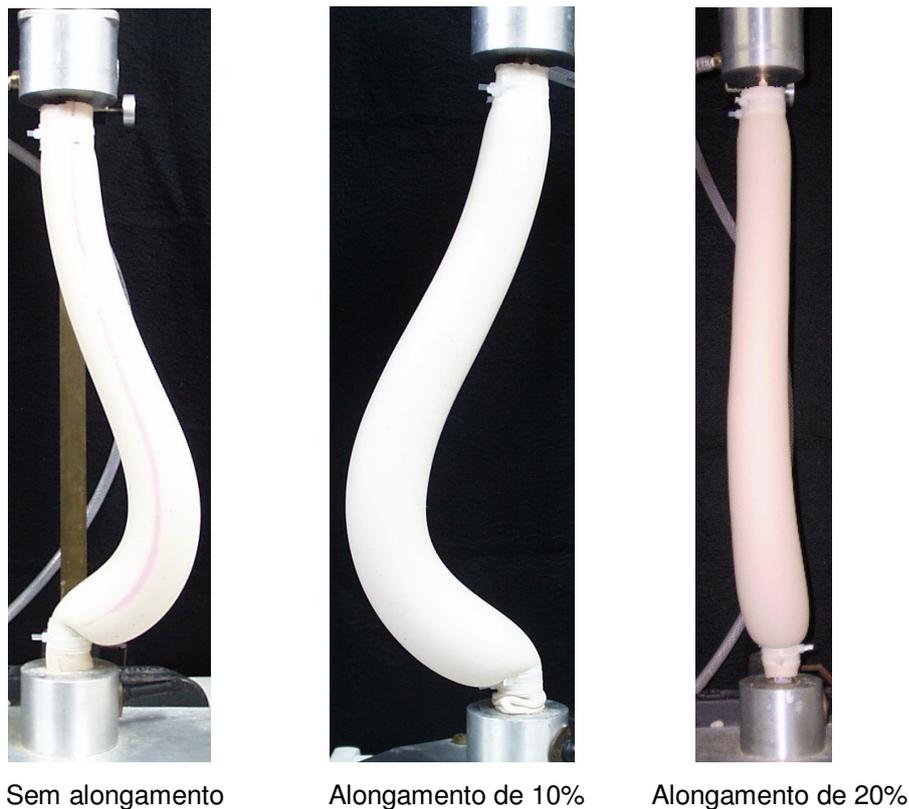


Figura 3.32 – Análise da variação do volume

3.12. Repetibilidade do ensaio

Um dos experimentos realizados apresentou um erro no procedimento de confecção do tubo de silicone. Este erro provocou um aumento da elasticidade do material.

No momento do procedimento de pressurização verificamos que o ensaio não se mostrou repetível. Na primeira pressurização do material encontramos a

pressão crítica de 74,9 mmHg, e nas segunda pressurização a pressão crítica foi de 52,2 mmHg.

Na figura 3.33 podemos observar a que o gráfico de caracterização do material torna-se muito elástico, diferindo em muito dos ensaios anteriores.

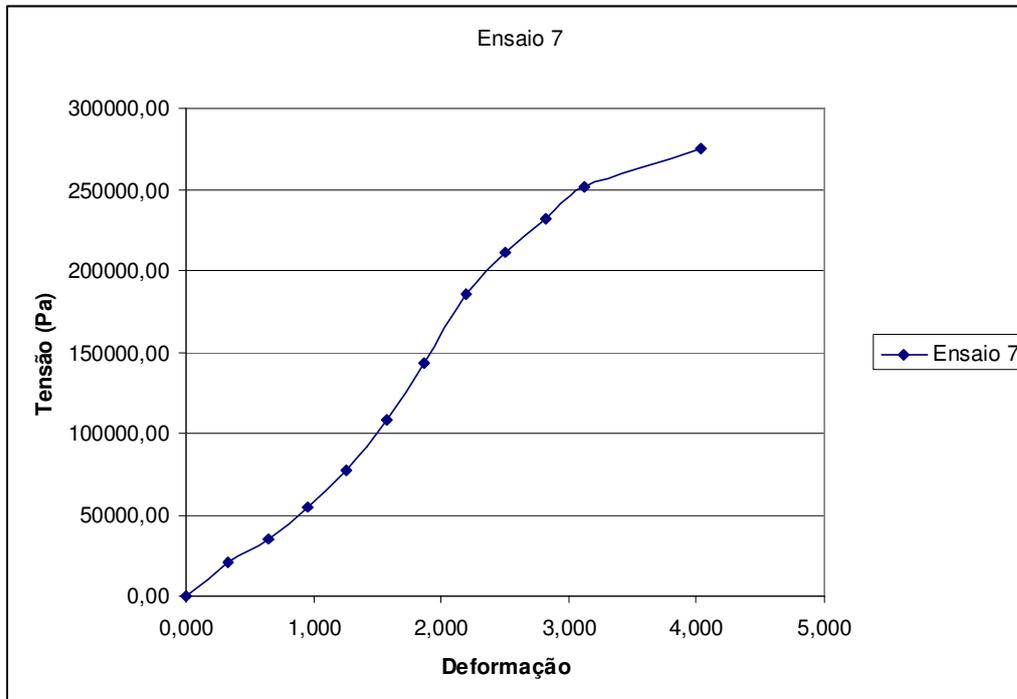


Figura 3.33 – Gráfico de caracterização do ensaio 7

3.13. Causas da variação da pressão crítica

A variação observada na pressão crítica dos ensaios anteriores deve-se basicamente a dois fatores, a saber:

- 1) Pequenas diferenças, porém muito importantes, nas propriedades mecânicas dos materiais confeccionados. Diferenças essas que podem ser observadas no gráfico tensão-deformação plotado para todos os espécimes ensaiados.
- 2) Devido ao processo de fabricação da artéria, a mesma apresentava em alguns casos uma imperfeição inicial. Devido ao posicionamento do molde, às vezes a artéria apresentava uma porção da parede mais fina do

que o lado oposto, influenciando assim no valor da pressão crítica. Podemos observar essas imperfeições na figura 3.34.



(1)

(2)

(3)

- (1) Grande imperfeição
- (2) Média imperfeição
- (3) Pequena imperfeição

Figura 3.34 – Imperfeições

Quando traçarmos uma linha de tendência com todos os dados obtidos dos ensaios de tensão-deformação será possível analisar numericamente a influência do alongamento na variação da pressão.