

3 Análise experimental

A análise experimental abrange os ensaios de uma membrana hiperelástica homogênea, circular, inicialmente plana, que é penetrada no eixo normal à superfície por um endentor cilíndrico rígido feito de alumínio.

Consideram-se dois estágios no ensaio: o primeiro é a endentação, e o segundo é a penetração. O fim da endentação e começo da penetração é o momento em que a membrana entra em contato com a superfície lateral do endentor.

3.1. Material utilizado

A pesquisa experimental de endentação de membranas circulares hiperelásticas iniciou-se com a escolha do material mais apropriado para a realização dos experimentos. No início da pesquisa diversas membranas comercialmente disponíveis foram levantadas. Descartou-se a possibilidade de fabricar uma membrana devido às dificuldades de se produzir uma membrana de espessura constante. O material mais adequado para ser ensaiado foi uma membrana dentária de látex da marca *Angelus* (Figura 3.1). Este material foi escolhido pelo fato de já ter sido utilizado em ensaios para outra finalidade no laboratório de membranas. Estas são produzidas por processos de fabricação muito rigorosos, o que se reflete em uma membrana altamente isotrópica e de dimensões e parâmetros elásticos praticamente iguais, mesmo em lotes de produtos distintos.



Figura 3.1 - Lençol de borracha

3.2. Preparação da membrana de borracha

As membranas vêm embaladas individualmente para evitar que colem umas nas outras, e livres de quaisquer contaminações, assim, não se mostrou necessário fazer lavagens ou preparações antes dos ensaios. A preparação da membrana para os ensaios consiste então em cortá-la nas dimensões adequadas e fixá-la ao aparato a ser usado no ensaio. O procedimento específico para cada ensaio está descrito nas seções 3.4, 3.5 e 3.6.

3.3. Descrição do aparato

Dois equipamentos foram utilizados para a realização dos ensaios que compõem a análise experimental desta dissertação. O primeiro é uma máquina de ensaios da marca Instron® modelo 3343 (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Instron 3343

Este equipamento é originalmente projetado para realizar ensaios de tração e compressão, mas também foi modificado para realizar ensaios de atrito conforme será descrito na seção 3.5. A modificação consistiu na colocação de uma base de madeira MDF presa à base do equipamento, uma polia montada sobre um mancal com rolamentos para que o atrito neste seja o menor possível (Figura 3.3). O sistema é acionado por meio de um fio de Kevlar® multi-filamentos com alta resistência a tração, baixa deformação para as cargas envolvidas, e alta maleabilidade evidenciado pela seta na Figura 3.3. Assim, o movimento vertical da garra móvel do equipamento é transformado em um movimento horizontal, tangente à superfície da membrana.

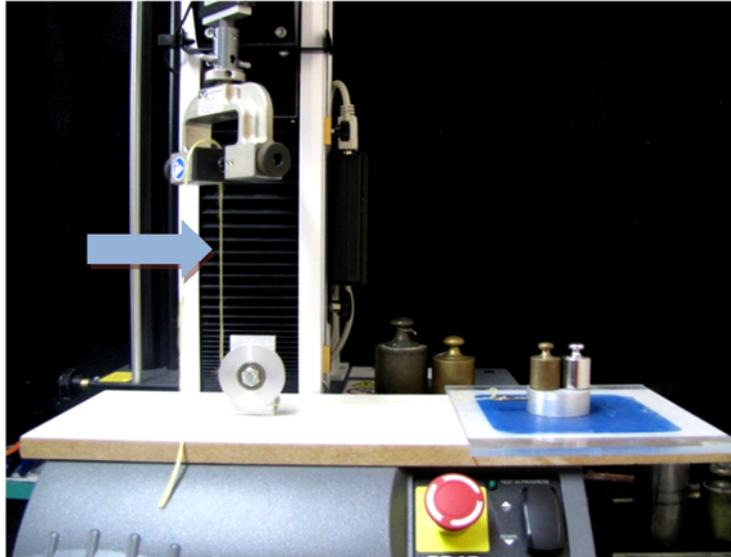


Figura 3.3 - Configuração para ensaios de atrito

O segundo aparato utilizado (Figura 3.4) foi desenvolvido no laboratório de membranas especificamente para realizar ensaios de endentação. Ele é composto por uma base para a membrana e um mecanismo acionador do endentor, constituído por sua vez por um motor elétrico que aciona um fuso. A posição vertical do fuso e a força normal do endentor são medidas através de um sistema de aquisição de dados tipo *cDaq* da *National Instruments* que registra as variáveis medidas por uma célula de carga marca *Kratos* com 100N de capacidade e um LVDT marca *Gefran* com 300mm de curso.



Figura 3.4 - Equipamento para ensaios de endentação

3.4. Caracterização do material – ensaios

Para determinar experimentalmente as características mecânicas do látex utilizado, foram inicialmente realizados ensaios de tração uniaxial no equipamento modelo *Instron* 3343. Este equipamento possui capacidade de extensão de até 150 cm e de carga de até 50N. Esta configuração de grandes deslocamentos e pequenas cargas é essencial para a caracterização de materiais hiperelásticos como o látex utilizado.

Há diversas equações que se propõem a descrever o comportamento mecânico de materiais hiperelásticos, cada um deles tem equações características e parâmetros próprios. Os materiais são descritos em função de w , que é o potencial elástico medido por unidade de volume do corpo indeformado, ou seja, está relacionada a uma característica intrínseca do material utilizado. Os potenciais utilizados para caracterizar o material da membrana de teste foram neo-Hookeano, Mooney Rivlin, Ogden 1ª ordem e Ogden 2ª ordem (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Funcionais de energia potencial elástica

Neo-Hookeana	$w = C_1(I_1 - 3)$
Mooney Rivlin	$w = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3)$
Ogden	$w = \sum_{i=1}^n \mu_n \frac{(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3)}{\alpha_n}$

A fim de realizar os ensaios de tração uniaxial foram confeccionados a partir das membranas originais, corpos de prova de 40mm de largura (L) por 30mm de altura (H). As medições de espessura dos corpos de prova foram realizadas no laboratório de metrologia da PUC-Rio, com o uso de um micrômetro. Foram realizadas cinco medições em diferentes pontos da membrana e a partir de então, uma média com os valores medidos foi calculada, encontrando-se um valor médio de 0,46mm, valor este utilizado nos cálculos experimentais deste trabalho.

Evidenciou-se a necessidade de colar (cola do tipo Ciano-acrilato) palitos de madeira ao látex (Figura 3.5 - Corpo de Prova) para que este não escorregasse nas

garras da máquina de ensaios, fornecendo assim um dado incorreto de deslocamento.

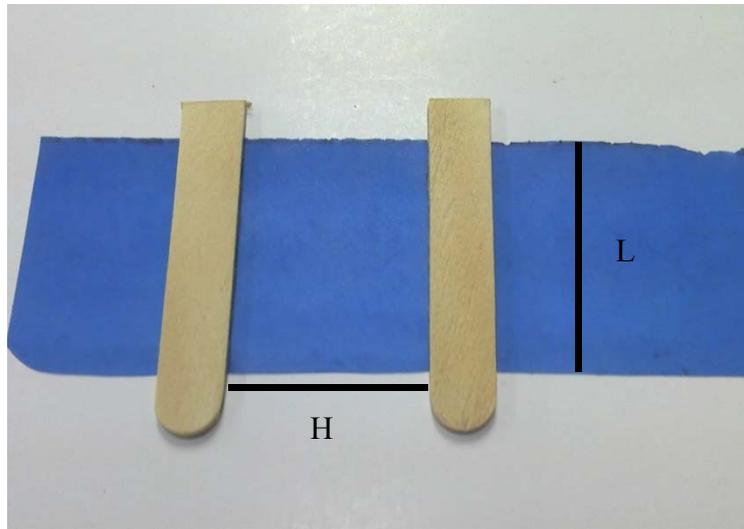


Figura 3.5 - Corpo de Prova

Antes do ensaio foram inseridas no software BlueHill da *Instron* as dimensões do corpo de prova e as restrições do ensaio como carga máxima, deslocamento máximo, velocidade de alongamento. Determinou-se também, o tipo de controle, como por exemplo: Controle por Força Constante, Derivada de Força Constante, Deslocamento Constante. No ensaio realizado, foi utilizado o método de controle de alongamento constante com uma taxa de 150 mm por minuto.

Na Figura 3.6, pode ser observado o grande deslocamento intrínseco ao ensaio de tração do látex. Nesta imagem observa-se um alongamento de aproximadamente seis vezes no tamanho inicial.

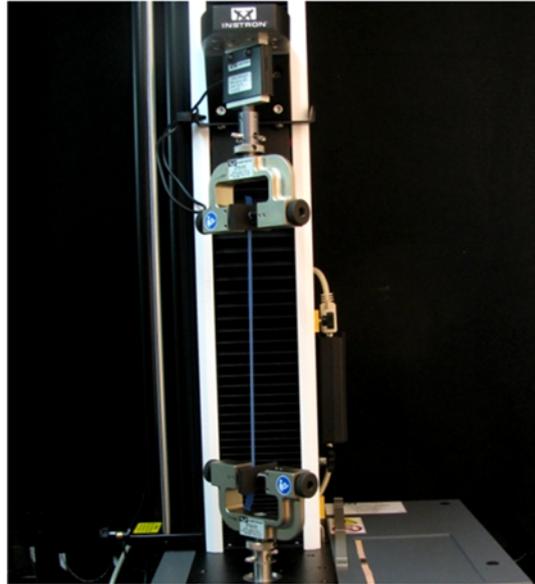


Figura 3.6 - Ensaio de caracterização

O software *BlueHill* (Figura 3.7) já fornece, ao fim do ensaio de tração, uma tabela de dados brutos, de onde são filtrados os dados de tensão (Pa) e de alongamento do material (Strain). Na tela principal de ensaio, pode ser visto o deslocamento, a força e o gráfico “Força vs. Deslocamento”, dos corpos de prova ensaiados. Esta tela é totalmente customizável, de modo que pode ser ajustada para mostrar as informações importantes para cada tipo de ensaio.

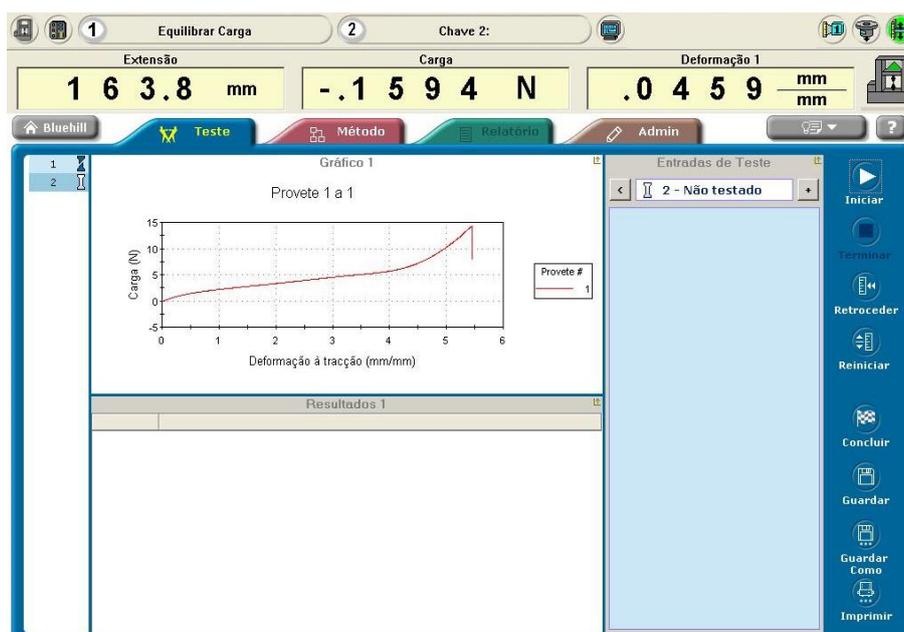


Figura 3.7 - Software BlueHill

Os dados brutos de saída do ensaio (Figura 3.8) são exportados para o software *Excel*, sendo feita uma conversão de unidades e uma redução da matriz de valores. Isto se deve ao fato de que o número de dados brutos é demasiadamente grande para ser colocado no software de elementos finitos utilizado.

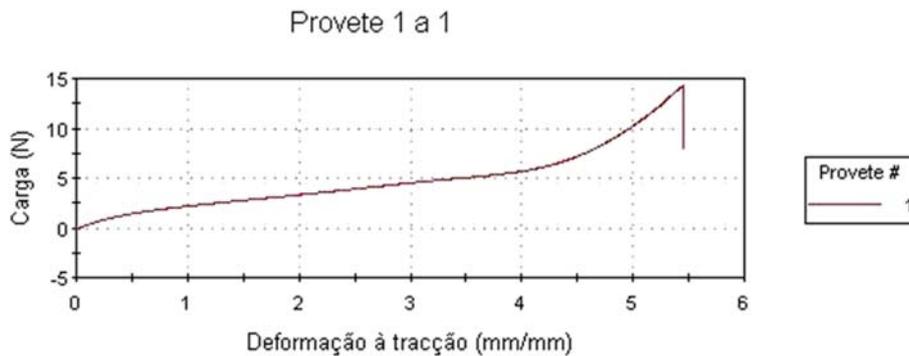


Figura 3.8 - Gráfico carga vs. deformação

Foram realizados três ensaios com corpos de prova de dimensões iguais, a fim de se obter uma média dos valores que reduzisse os efeitos de erros no resultado final. Observa-se na curva carga vs. deformação da Figura 3.8 dois pontos de inflexão, onde o mais evidente caracteriza um enrijecimento próximo a uma deformação de 4.5, e uma queda abrupta na carga medida a 5.5 de deformação que indica o ponto de rompimento do corpo ensaiado. Inseriu-se os dados aquisitados no software de elementos finitos, *Abaqus* versão 6.10.

No software, gerou-se um modelo virtual do corpo de prova ensaiado e aplicadas restrições e deslocamentos similares às presentes no ensaio real com o objetivo de determinar os parâmetros que descrevem o material para cada um dos funcionais de energia testados. Realizada a simulação, o software *Abaqus* fornece uma tabela com os valores de deformação e de tensão do ensaio realizado, dos valores encontrados para as tensões no cálculo de elementos finitos, e o valor dos parâmetros do funcional de energia definido.

Foram então comparados diversos funcionais de energia para analisar qual deles caracteriza melhor o latex utilizado. No gráfico da Figura 3.9 estão os resultados do ensaio e dos funcionais de energia analisados.

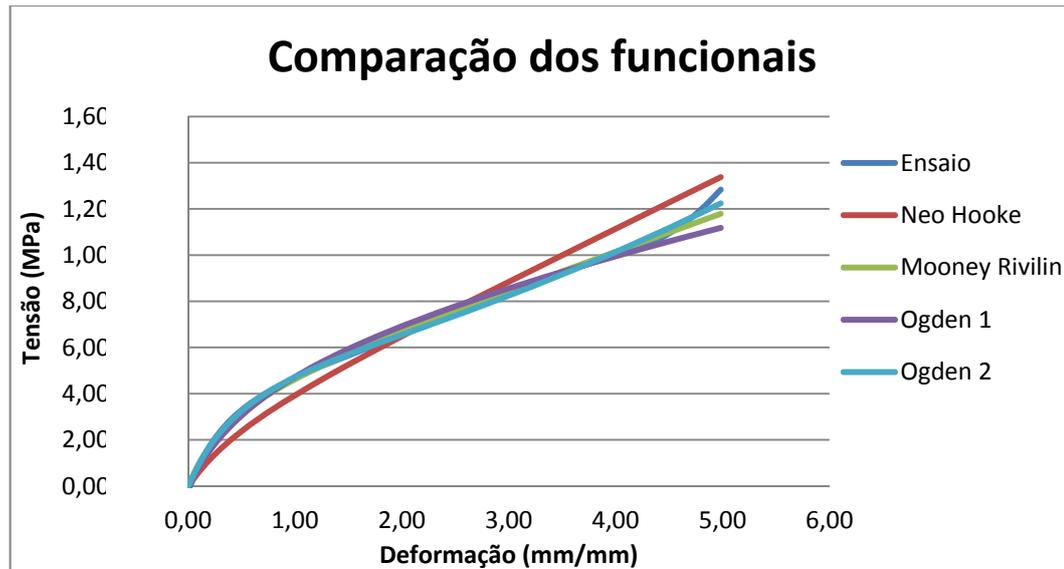


Figura 3.9 - Gráfico comparativo dos funcionais

Concluiu-se que o funcional Neo Hookeano era o menos adequado para descrever o material, pois seu gráfico é praticamente reto e o ensaio tem características de uma função de segunda ou terceira ordem, com duas inflexões. Até um alongamento de 5 os funcionais Mooney-Rivlin e Ogden 1 apresentam bons resultados, contudo, acima desse valor de alongamento eles começam a divergir e o que melhor descreve passa a ser o Ogden de 2ª ordem.

Este funcional foi o escolhido como o que melhor representa o látex utilizado em um ensaio uniaxial.

Os parâmetros encontrados para os funcionais de energia simulados estão descritos na Tabela 3.2, com os parâmetros C_1 e C_2 expressos em Pascal:

Tabela 3.2 - Parâmetros dos funcionais de energia da membrana

Material	C_1 (Pa)	C_2 (Pa)	α_1	α_2
Neo-Hookeano	112.319	-	-	-
Mooney Rivlin	82.405	99.241	-	-
Ogden 1ª Ordem	30.697	-	1.608	-
Ogden 2ª Ordem	64.881	294.097	2.619	0.385

3.5. Caracterização do atrito

As medições de atrito foram realizadas com uso do equipamento Instron 3343 configurado para medição de atrito conforme a Figura 3.10. O objetivo deste experimento foi levantar experimentalmente o coeficiente de atrito da membrana de látex utilizada com o alumínio, com lixas de gramatura 600 e 100, e com um bloco de alumínio lubrificado.

Para tal, uma membrana foi fixada uniformemente com cola em uma base de acrílico e esta base posicionada sobre a plataforma do equipamento conforme a figura abaixo:

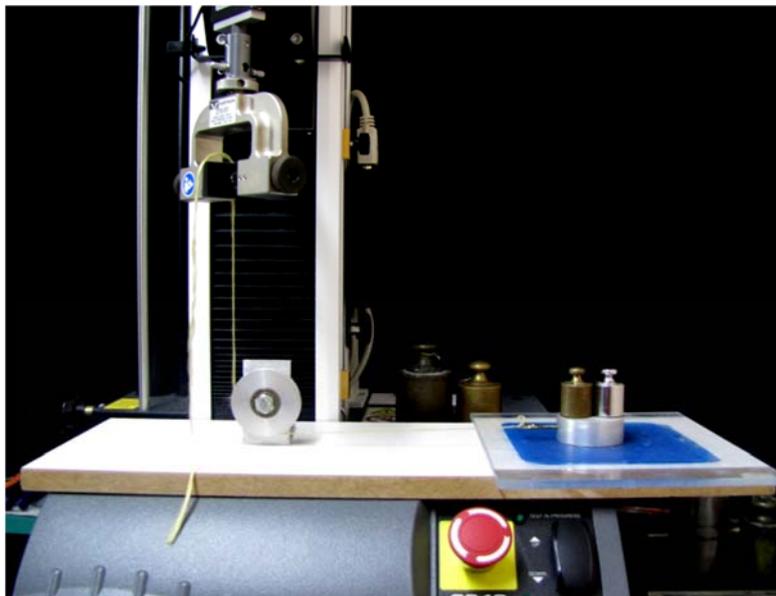


Figura 3.10 - Ensaio de atrito

Foi usinado um bloco circular de alumínio com massa 98.6g. Este bloco é tracionado horizontalmente e a força necessária para move-lo é medida por uma célula de carga com capacidade 50N e precisão de medida de 0,5%.

Neste estudo de caracterização de atrito busca-se medir experimentalmente e de maneira simples o coeficiente de atrito da membrana de borracha com o alumínio, com lixas de gramatura 600 e 100, e com alumínio lubrificado. Os cálculos dos coeficientes de atrito seco estático ($V_c=0$) e cinético ($V_c \neq 0$) aonde V_c é a velocidade relativa entre os corpos na região do contato, foram baseados nas teorias tradicionais de contato, sendo as principais:

- Primeira lei de Amontons*: A força de atrito é diretamente proporcional à carga aplicada.
- Segunda lei de Amontons*: A força de atrito não depende da área de contato entre os corpos. (corpos inelásticos, rígidos)
- Lei de Coulomb#: O atrito cinético não depende da velocidade relativa entre os corpos.

* Guillaume Amontons (1699)

Charles-Augustin de Coulomb (1785)

Foi implementada a função média móvel com 10 *samples*, para o tratamento de dados brutos para obter o valor máximo do coeficiente de atrito nos ensaios, este valor é o do coeficiente de atrito estático. Outra função calcula a média dos valores do coeficiente de atrito para a parte plana do gráfico dos ensaios, o valor desta média é o coeficiente de atrito cinético ou dinâmico. Um gráfico força vs. deslocamento de um ensaio de atrito indica um pico de força no início que caracteriza o atrito estático, após isso a força toma um valor constante e menor que este máximo, esta força constante é a de atrito cinético. Foram feitos diversos ensaios de atrito variando-se a massa que produz a força normal, a velocidade, a taxa de aquisição de dados e o material em contato com a membrana.

Para cada uma das configurações foram realizados três ensaios para certificar a repetibilidade dos resultados. Seguem abaixo os valores dos coeficientes de atrito estático μ medidos.

3.5.1. Valores dos coeficientes de atrito estático dos ensaios sem lubrificação

Nesta seção encontram-se os valores medidos nos ensaios para o coeficiente de atrito realizado para caracterizar a interface alumínio-borracha sem lubrificação.

Tabela 3.3 – Resultado dos coeficientes de atrito estático para os ensaios com velocidade 100mm/min sem lubrificação

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média

98.6g	0.339	0.375	0.328	0.347
198.6g	0.422	0.389	0.410	0.407
298.6g	0.440	0.459	0.463	0.454
598.6g	0.461	0.481	0.460	0.467

Tabela 3.4 - Resultado dos coeficientes de atrito estático para os ensaios com velocidade 400mm/min sem lubrificação

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
598.6g	0.462	0.486	0.473	0.473

Concluimos que há uma discrepância de até de até 25% nos valores referentes aos ensaios com massa menor (98.6g). Por esta razão, estes ensaios foram excluídos da análise. Os valores dos coeficientes de atrito para os casos em que a massa é 598.6g para ambas as velocidades estudadas são muito similares. Assumiu-se então com 0,45 o valor do coeficiente de atrito para o caso sem lubrificante e sem lixa.

3.5.2.

Valores médios do coeficiente de atrito dinâmico para os ensaios sem lubrificação

Tabela 3.5 - Resultado dos coeficientes de atrito dinâmico para os ensaios com velocidade 100mm/min sem lubrificação

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
98.6g	0.285	0.295	0.297	0.292
198.6g	0.363	0.364	0.325	0.350
298.6g	0.418	0.419	0.420	0.419
598.6g	0.440	0.450	0.436	0.442

Tabela 3.6 - Resultado dos coeficientes de atrito dinâmico para os ensaios com velocidade 400mm/min sem lubrificação

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
598.6g	0.454	0.474	0.459	0.462

Como esperado temos um valor médio menor que o de atrito estático máximo assim como uma maior discrepância dos valores para massas pequenas.

3.5.3. Gráficos dos ensaios sem lubrificação

Na Figura 3.11 temos o resultado para 98.6g de massa e velocidade 100mm/min. Observamos um comportamento muito similar nos três ensaios.

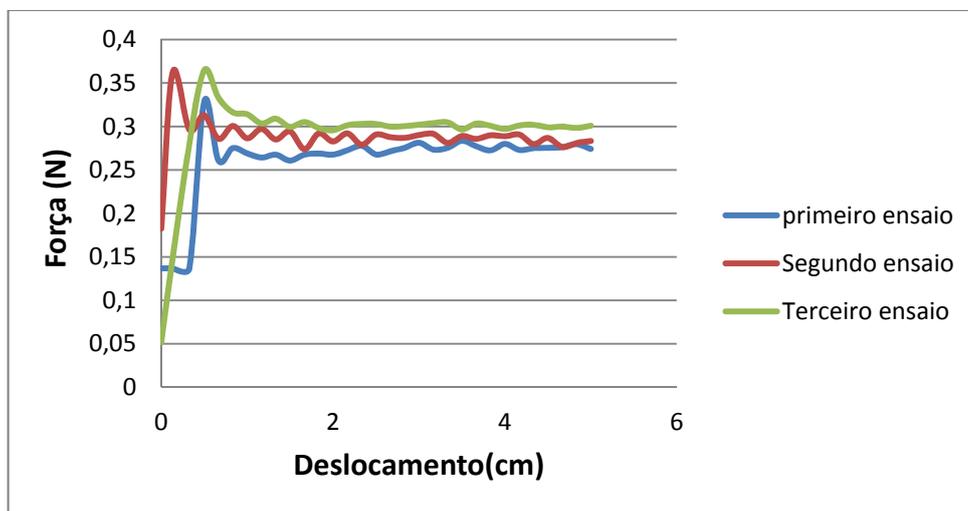


Figura 3.11 - Gráfico para 98.6g e 100mm/min sem lubrificação

Na Figura 3.12 temos o resultado para uma massa de 198.6g e uma velocidade de 100mm/min. Observa-se uma maior diferença de comportamento no terceiro ensaio, mas os valores de máximo e o valor médio da força não variam significativamente. A rampa de crescimento da força antes do pico máximo descreve o comportamento de extensão da linha de Kevlar e folgas no sistema de transmissão de força da garra para o bloco de alumínio.

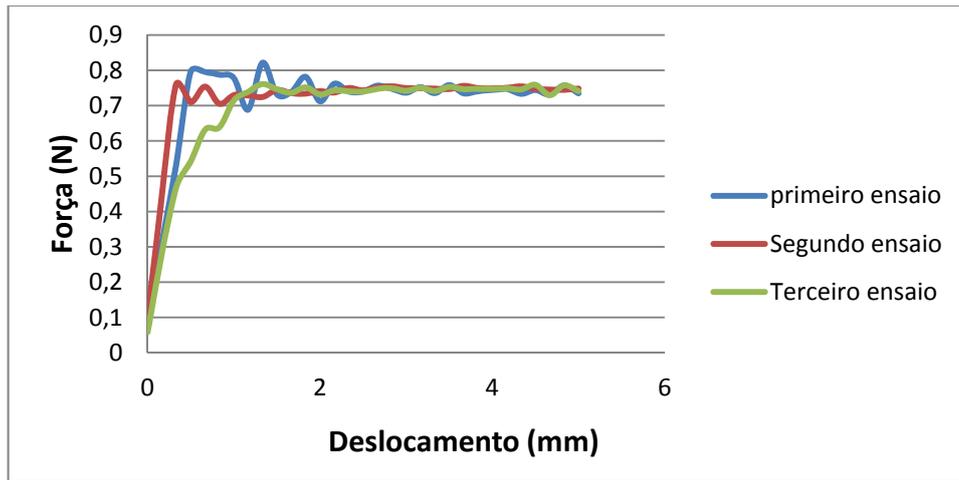


Figura 3.12 - Gráfico para 198.6g e 100mm/min sem lubrificação

Na Figura 3.13 apresenta-se o resultado para uma força de 298.6g e uma velocidade de 100mm/min. Como pode ser visto na Tabela 3.2, temos em comparação com a Figura 3.11 - Gráfico para 98.6g e 100mm/min e a Figura 3.12 um resultado muito melhor e menos divergente entre os ensaios.

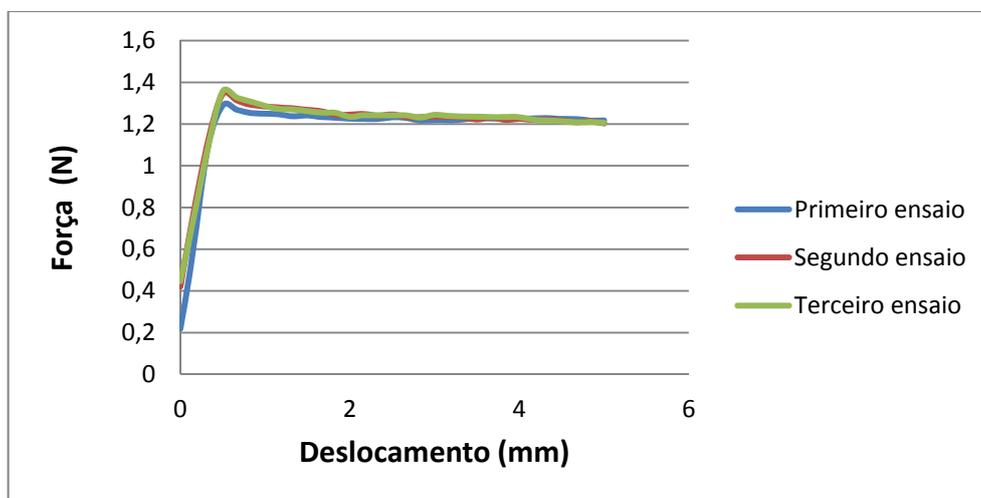


Figura 3.13 - Gráfico para 298.6g e 100mm/min sem lubrificação

Na Figura 3.14 - Gráfico para 598.6g e 100mm/min temos o resultado para uma massa de 598.6g e velocidade 100mm/min. Os gráficos têm comportamentos similares apesar de estarem defasados entre si. Esta defasagem é explicada por um erro no posicionamento do bloco de alumínio antes do ensaio que cria uma zona de força crescente no início. Contudo, este comportamento não altera a medição da

força máxima ou da tendência das forças que são os dados importantes para esta análise.

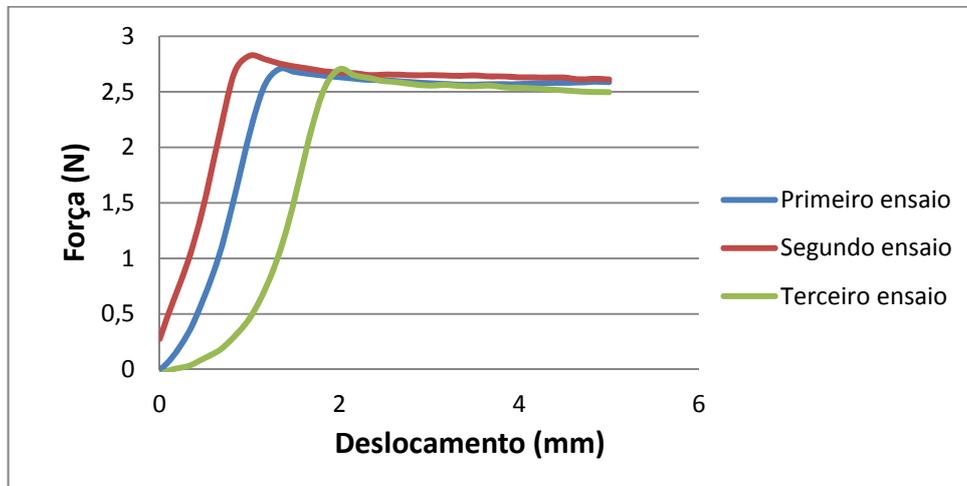


Figura 3.14 - Gráfico para 598.6g e 100mm/min sem lubrificação

3.5.4. Verificação da taxa de aquisição de dados

A fim de verificar se a taxa de aquisição de dados utilizada estava adequada foram realizados ensaios com uma taxa de aquisição 10 vezes maior, isto é, 10kHz ao invés de 1kHz. A motivação para este estudo foi investigar se a medição de força no pico inicial (atrito estático) estava sendo devidamente registrada. Os resultados dos coeficientes de atrito pouco mudaram, mas os gráficos se tornaram mais uniformes. A desvantagem é que uma taxa de aquisição desnecessariamente maior acarreta uma tabela de dados demasiadamente grande, o que dificulta sua posterior manipulação. Abaixo encontram-se os resultados com o teste utilizando uma taxa de aquisição de dados maior.

Tabela 3.7 – Valores do coeficiente de atrito para os ensaios com taxa de aquisição alta

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
198.6g	0.450	0.445	0.474	0.456
298.6g	0.551	0.520	0.525	0.532

Na Figura 3.15 vemos o resultado para 198.6g, velocidade 100mm/min. Observa-se que há pouca diferença em relação a Figura 3.12 - Gráfico para 198.6g e 100mm/min que havia sido obtida com uma taxa de aquisição menor.

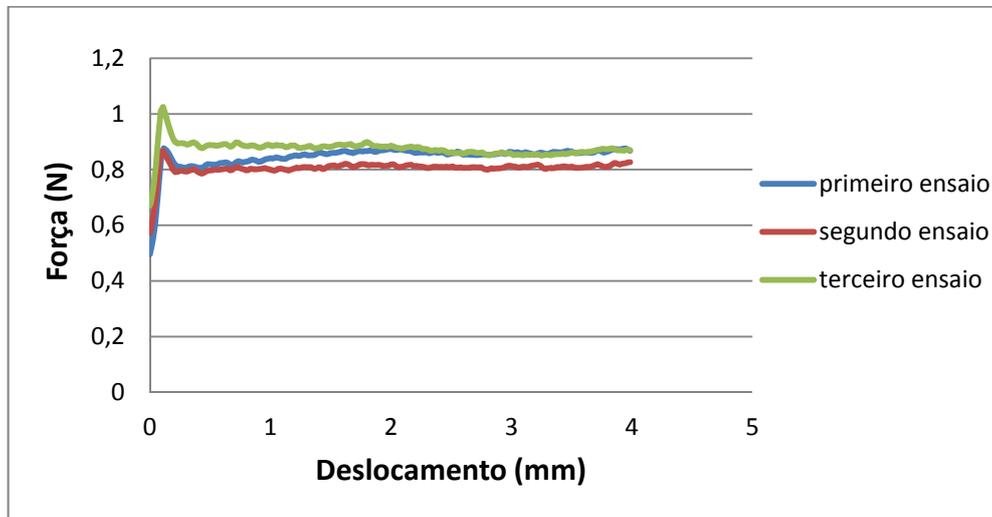


Figura 3.15 - Ensaio com 198.6g e taxa de aquisição maior

Na Figura 3.16 vemos o resultado para uma massa de 298.6g e uma velocidade de 100mm/min.

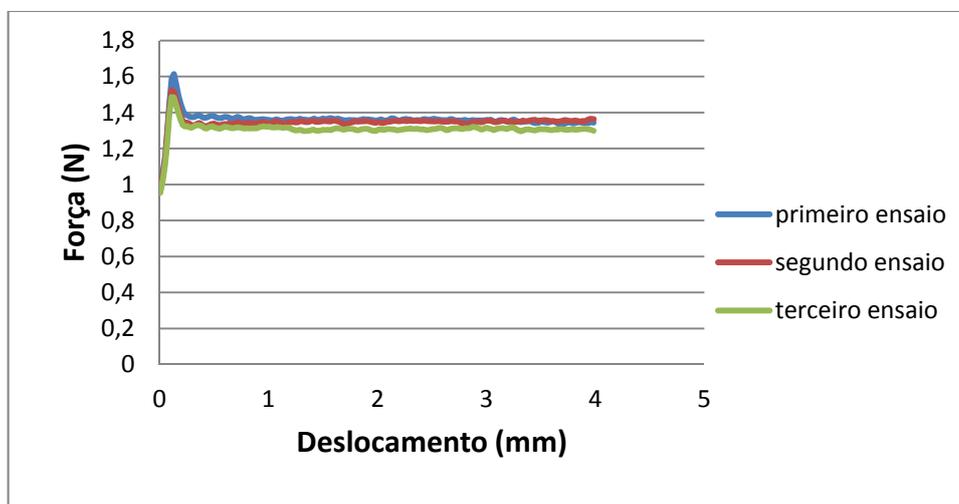


Figura 3.16 - Ensaio com 298.6g e taxa de aquisição maior

Pela análise dos dados apresentados acima em comparação com os mesmos resultados obtidos para uma taxa de aquisição menor conclui-se que não houveram mudanças significativas nos resultados que embasassem a utilização da taxa de aquisição de dados de 10kHz, pelos motivos já apresentados.

3.5.5. Ensaio com Lubrificante

Nesta parte foi usado o endentor de alumínio coberto com lubrificante a base d'água. Este lubrificante foi escolhido para assegurar que não sejam alteradas as características da membrana. Foram depositados 0,5ml de lubrificante sobre a membrana antes do primeiro ensaio. Os valores máximos do coeficiente de atrito estático para os ensaios são:

Tabela 3.8 – Resultado do coeficiente de atrito estático dos ensaios lubrificadas com velocidade 100mm/min

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
598.6g	0.038	0.053	0.042	0.044
1098.6g	0.050	0.060	0.055	0.055

Tabela 3.9 - Resultado do coeficiente de atrito estático dos ensaios lubrificadas com velocidade 400mm/min

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
598.6g	0.066	0.060	0.062	0.062
1098.6g	0.039	0.037	0.036	0.037

E os valores médios do coeficiente de atrito dinâmico para os ensaios com lubrificante são:

Tabela 3.10 - Resultado do coeficiente de atrito dinâmico dos ensaios lubrificadas com velocidade 100mm/min

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
598.6g	0.035	0.047	0.058	0.046
1098.6g	0.040	0.052	0.072	0.054

Tabela 3.11 - Resultado do coeficiente de atrito dinâmico dos ensaios lubrificadas com velocidade 100mm/min

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
-------	-----------	-----------	-----------	-------

598.6g	0.047	0.059	0.064	0.056
1098.6g	0.032	0.037	0.045	0.038

Abaixo serão apresentados os gráficos dos ensaios com lubrificação:

Na Figura 3.17 temos o resultado para o ensaio com uma massa de 598.6g e velocidade de 100mm/min usando lubrificante. Devido a não reaplicação do lubrificante entre os ensaios observa-se uma força de atrito crescente devido à diminuição do filme lubrificante existente na interface de contato.

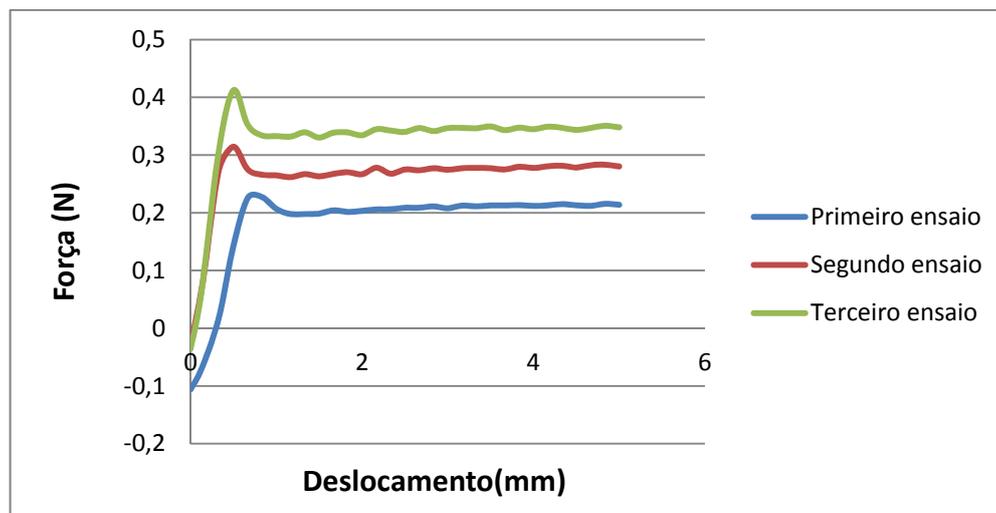


Figura 3.17 - Gráfico para 598.6g e velocidade 100mm/min

Na Figura 3.18, temos o resultado de ensaios lubrificados para uma massa de 598.6g e velocidade 400mm/min. Observamos um comportamento similar ao descrito na Figura 3.17, pelos mesmos motivos, contudo, neste caso vemos que os picos iniciais de força possuem valores similares.

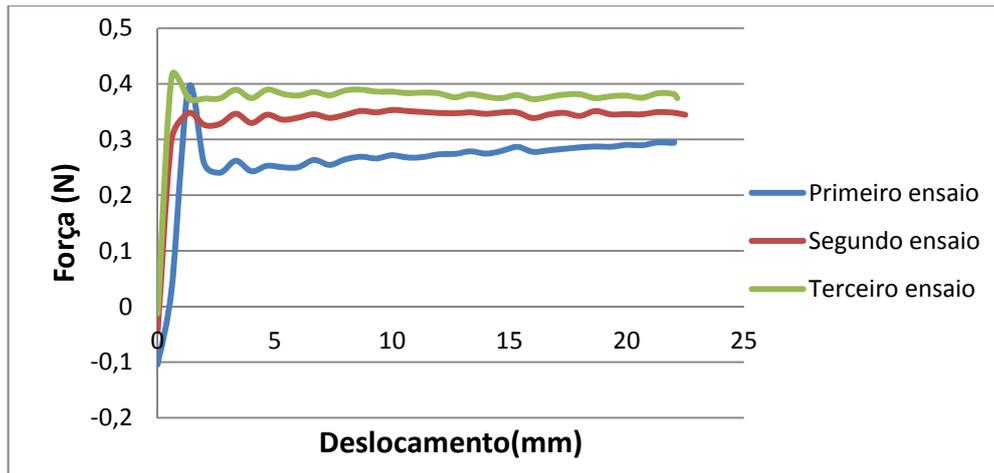


Figura 3.18 - Gráfico para 598.6g e velocidade 400mm/min

A Figura 3.19 mostra o resultado para uma massa de 1098.6g e uma velocidade de 100mm/min para o endentor lubrificado apenas antes do primeiro ensaio.

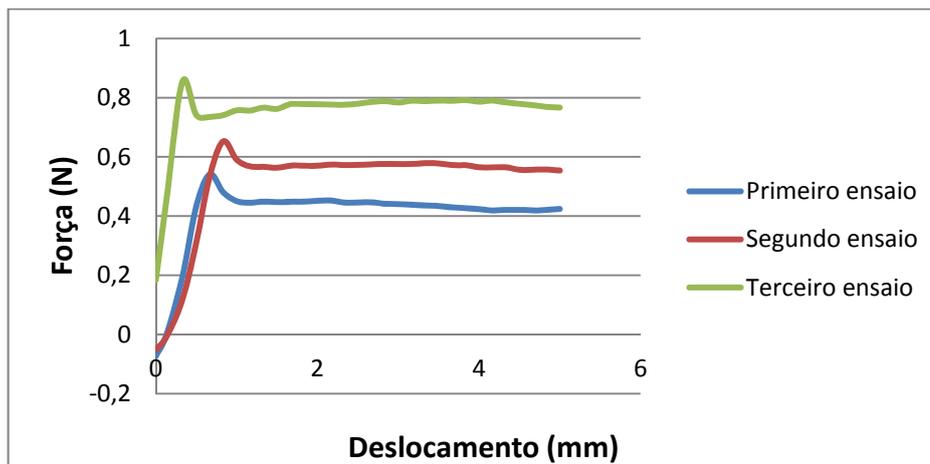


Figura 3.19 - Gráfico para 1098.6g e velocidade 100mm/min

Observa-se que em função da não reaplicação de lubrificante a cada ensaio temos um comportamento característico da força que aumenta a cada ensaio. Isso se deve ao fato da camada de lubrificante ir se reduzindo a cada ensaio pela ação do movimento do corpo de prova.

A Figura 3.20 mostra o resultado para uma massa de 2022,6g e velocidade 100mm/min com lubrificante aplicado unicamente no início:

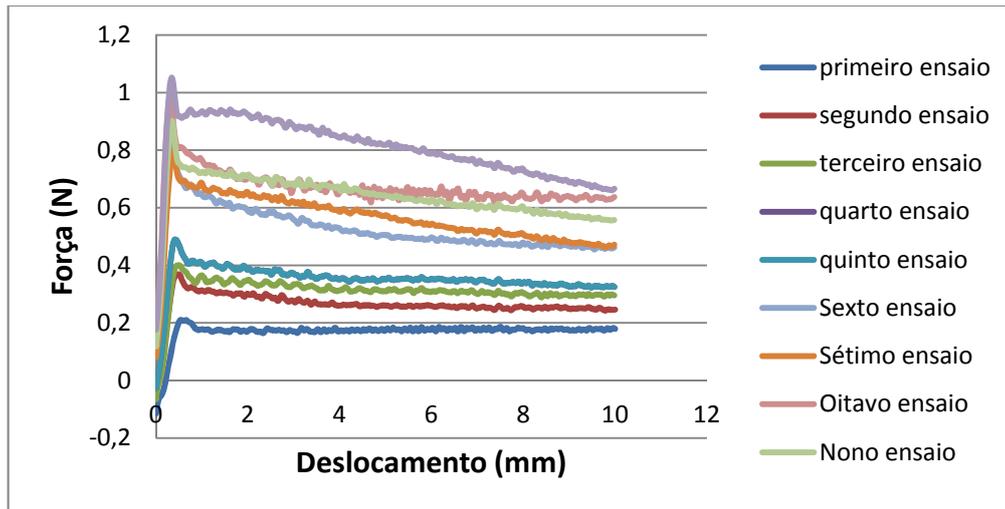


Figura 3.20 - Gráfico com nove ensaios sem re-lubrificação

Neste ensaio, foram realizados dez testes lubrificando-se a zona de contato entre os corpos apenas uma vez, antes do primeiro ensaio. Percebe-se que a cada ensaio a força de atrito e conseqüentemente o coeficiente de atrito estático e cinético aumenta. Isto se dá porque não há reposição do lubrificante entre os ensaios, assim, a cada teste a espessura do filme lubrificante diminui alterando o coeficiente de atrito.

A Figura 3.21 mostra o resultado para uma massa de 2022,6g e uma velocidade de 100mm/min com lubrificante reaplicado a cada ensaio.

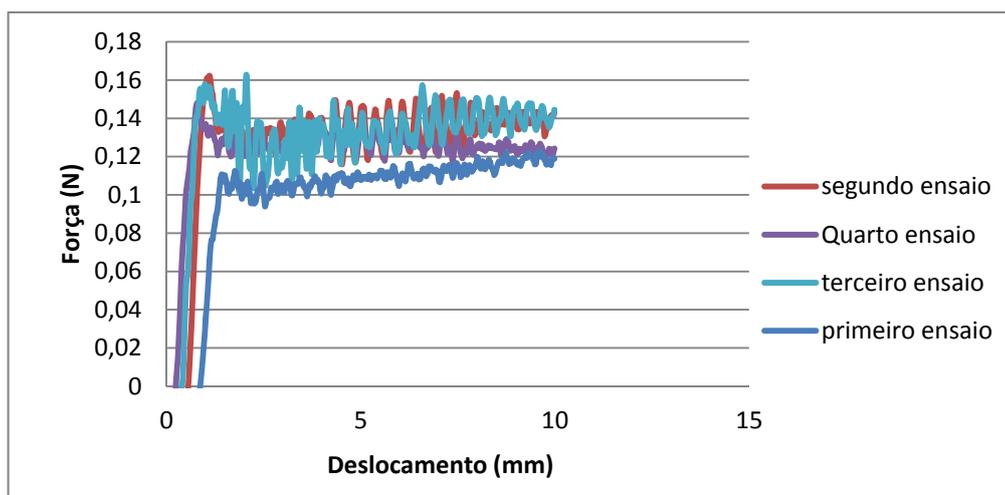


Figura 3.21 - Gráfico dos ensaios com re-lubrificação

Neste ensaio em que a camada de lubrificante foi reaplicada após cada ensaio, observa-se um comportamento diferente, em todos os ensaios temos forças similares já que a camada de filme lubrificante é semelhante.

A seguir foram realizados ensaios cobrindo a interface do bloco de alumínio com uma lixa de gramatura 100. Os resultados do coeficiente de atrito estático com velocidade 100mm/min são os mostrados na Tabela 3.12:

Tabela 3.12 – Resultados do coeficiente de atrito estático para os ensaios com lixa gramatura 100

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
98.6g	1.204	1.181	1.184	1.189
198.6g	1.301	1.363	1.431	1.365

Resultados do coeficiente médio de atrito dinâmico com o teste com velocidade 100mm/min (Tabela 3.13) e utilizando uma lixa número 100 na interface:

Tabela 3.13 – Resultados do coeficiente de atrito dinâmico para os ensaios com lixa gramatura 100

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
98.6g	1.152	1.137	1.147	1.145
198.6g	1.263	1.291	1.335	1.296

Vemos na Figura 3.22 o gráfico força vs. deslocamento para uma massa de 98.6g e uma velocidade de 100mm/min estando o corpo de prova coberto com uma lixa numero 100. Os resultados são muito similares apesar da massa de 98.6g que havia gerado um resultado não confiável no ensaio sem lubrificante. Neste caso, o coeficiente de atrito, e conseqüentemente a força de atrito são maiores e podem ser melhor medidos.

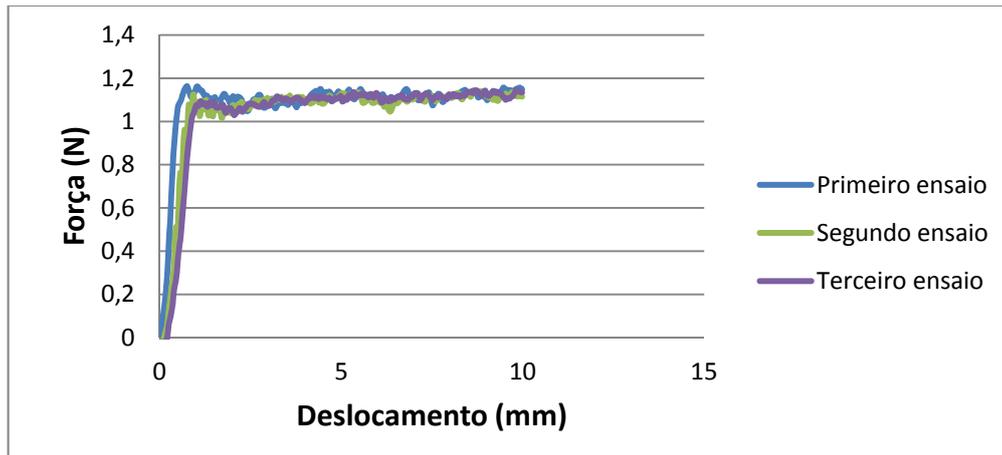


Figura 3.22 - Gráfico para 98,6g com lixa gramatura 100

A Figura 3.23 representa o gráfico de resultado para uma massa de 198.6g e uma velocidade de 100mm/min, no ensaio com lixa numero 100.

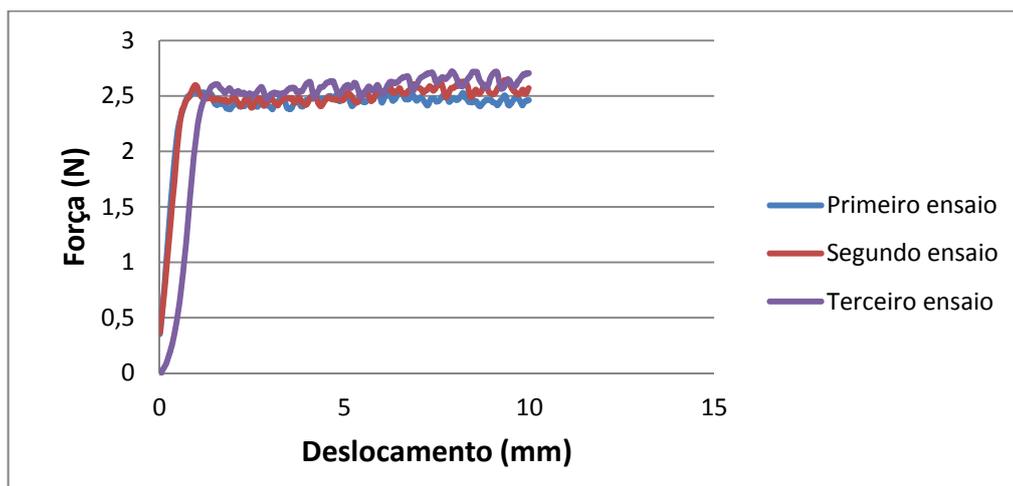


Figura 3.23 - Gráfico para 198.6g com lixa 100

Encontrou-se dificuldade em realizar ensaios constantes com a lixa 100 em função desta lixa ser muito áspera e romper a membrana em alguns ensaios. Por esta razão seguiu-se com os ensaios com lixa 600, que apresentou um atrito superior ao registrado na interface não lubrificada, mas não rompeu a membrana em nenhum dos ensaios (Tabela 3.14 e Tabela 3.15).

Tabela 3.14 – Resultados do coeficiente de atrito estático para os ensaios com lixa gramatura 600

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
98.6g	0.765	0.798	0.754	0.772
198.6g	0.830	0.834	0.832	0.832

Resultados do coeficiente médio de atrito dinâmico com o teste com velocidade 100mm/min (Tabela 3.15) e utilizando uma lixa número 600 na interface:

Tabela 3.15 – Resultados do coeficiente de atrito dinâmico para os ensaios com lixa gramatura 600

Massa	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio	Média
98.6g	0.720	0.725	0.732	0.726
198.6g	0.801	0.822	0.797	0.806

3.6. Ensaio de endentação e penetração

O ensaio de endentação começa com a colagem da membrana em um anel de acrílico (Figura 3.24). Esta colagem é necessária para garantir que a borda permaneça fixa ao anel.

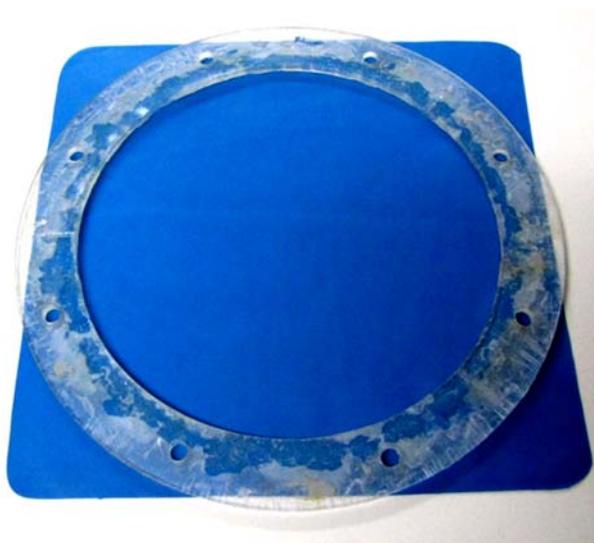


Figura 3.24 - Membrana colada ao anel

Após a colagem da membrana, este conjunto é fixado a outro suporte de acrílico e este é fixado com parafusos ao topo do equipamento de ensaios, mostrado na Figura 3.25.

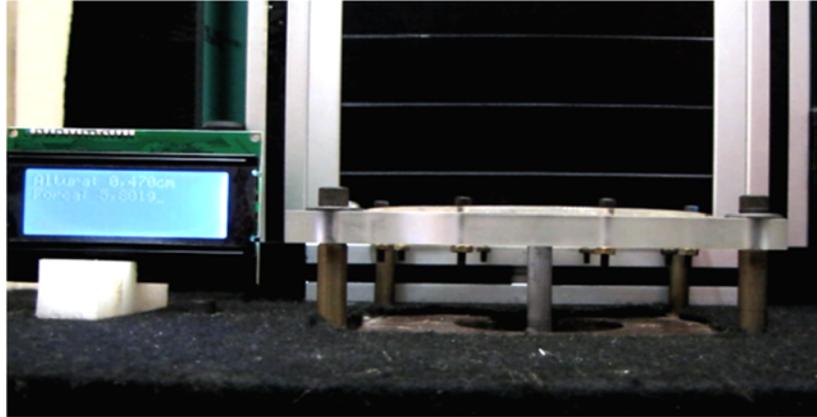


Figura 3.25 - Membrana presa ao dispositivo

Cada ensaio realizado, tem os dados de deslocamento vertical do endentor e força de reação vertical no endentor registrados pelo sistema de aquisição de dados tipo cDaq da *National Instruments*. Todos os ensaios são ainda gravados com uma câmera filmadora de alta definição (FullHD) Canon, que registra imagens de 1920 x 1080 pixels a 29 quadros por segundo do ensaio e dos dados provenientes do sistema de aquisição de dados que são mostrados em tempo real em um display de cristal líquido. Esta alta qualidade é essencial para que possam ser realizadas mais à frente, análises da geometria deformada por imagem. Ainda visando futuras medições por imagem, a câmera fica presa a um tripé para que possa registrar as imagens sem se movimentar ao longo do ensaio.

Os diversos ensaios de endentação estão descritos nas seções 3.6.1, 3.6.2 e 3.6.3 seguindo classificações de atrito no contato entre a membrana e o endentor. Os ensaios de endentação, exceto na comparação de velocidades, foram realizados com o endentor subindo a uma velocidade de 2,3mm/s.

3.6.1. Com lubrificante

Nos ensaios com lubrificante o endentor de alumínio foi coberto com 0,5ml de lubrificante a base de água. Após o levantamento experimental dos coeficientes de atrito deste contato, estipulou-se como sendo sem atrito ($\mu = 0$) o contato

lubrificado. Na Figura 3.26 observa-se os principais pontos do ensaio, sendo eles: A membrana com 30mm de deslocamento vertical do endentor (1), o ponto do fim da endentação com 50mm de deslocamento vertical (2), o ponto já no estágio de penetração com 60mm de deslocamento (3) e o deslocamento máximo analisado neste trabalho de 90mm (4).

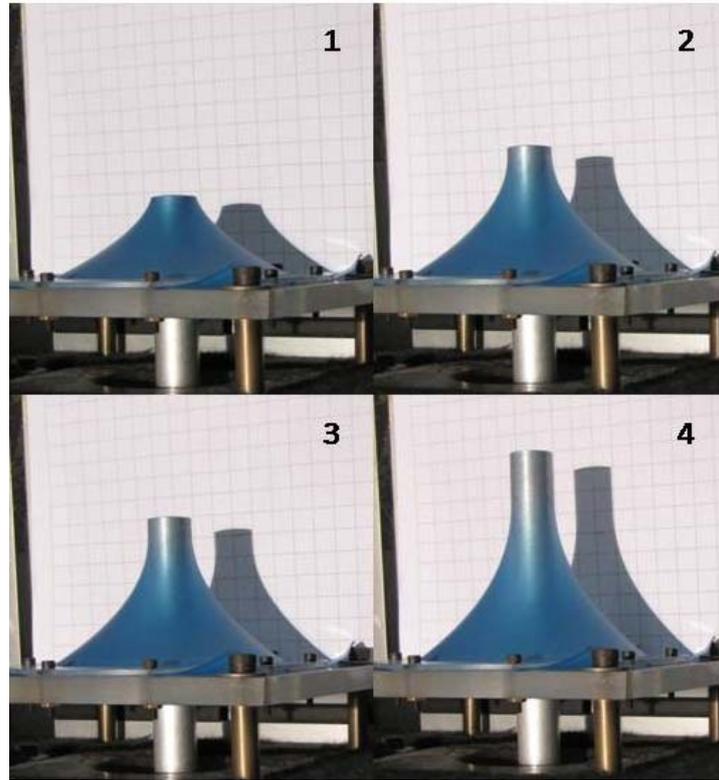


Figura 3.26 - Ensaio lubrificado com 30mm(1), 50mm(2), 60mm(3) e 90mm(4)

É evidente a grande deformação na membrana na região superior na Figura 3.26 (3 e 4), isto fica claro na imagem ao observar o topo da membrana quase transparente por efeito da grande deformação e conseqüente grande diminuição na espessura.

O caso lubrificado é onde se encontram as maiores tensões no topo da membrana. Isso se dá devido a ausência de atrito, que limitaria a deformação no topo e conseqüentemente reduziria as tensões no topo, área onde estas tensões naturalmente se concentram.

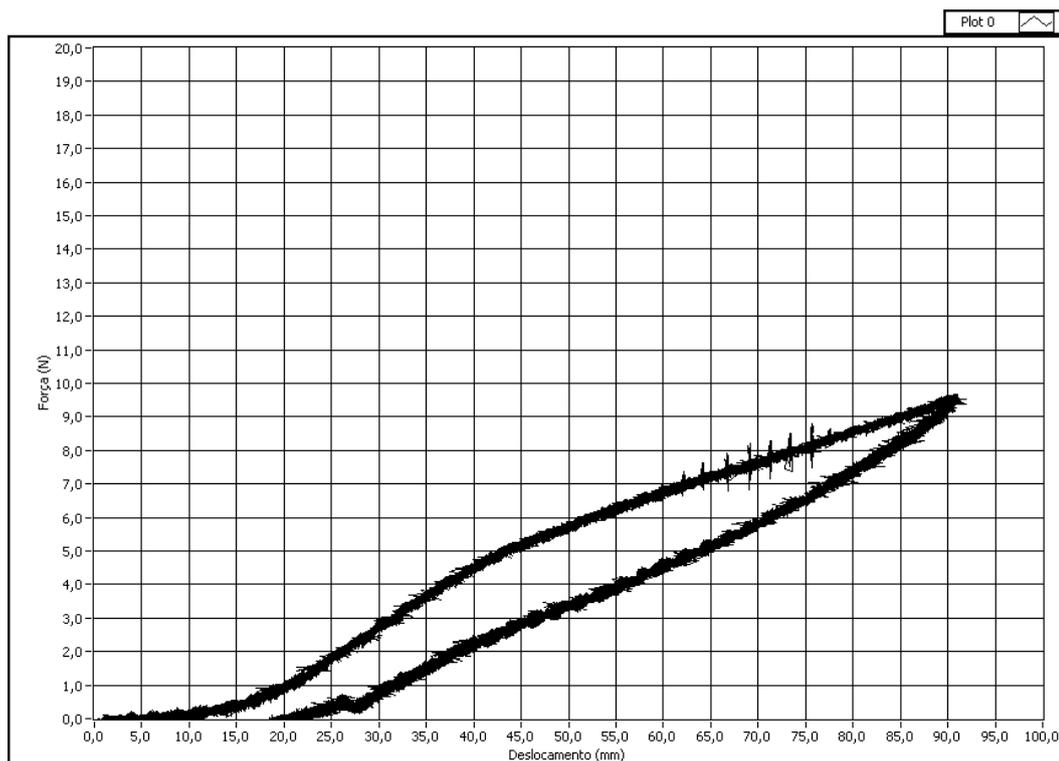


Figura 3.27 - Gráfico de carregamento e descarregamento

Na Figura 3.27 está um gráfico de força vs. deslocamento de um ensaio de penetração em uma membrana lubrificada. Observa-se na linha superior o carregamento da membrana e na linha inferior o descarregamento. A diferença nas forças observadas nas duas linhas se deve ao fato do material ser viscoelástico, isto é, há perda de energia durante o ensaio de carregamento e descarregamento. No caso lubrificado observa-se uma maior diferença entre o comportamento de carregamento e descarregamento, pois há maiores deformações na membrana. Ainda por conta desta maior deformação observa-se a menor força máxima dentre os ensaios. Após o descarregamento a membrana retornou ao seu estado plano inicial.

3.6.2. Sem lubrificante

O ensaio sem lubrificante é aquele onde o contato ocorre entre o alumínio e a membrana de látex diretamente. Pelas medições de atrito feitas, considerou-se o coeficiente de atrito desta configuração como $\mu=0,47$. A primeira diferença em relação ao ensaio lubrificado é que como pode ser observado na Figura 3.28 o limite

do fim da endentação ocorre aos 52mm de deslocamento, um pouco acima do que foi observado no caso sem atrito (Figura 3.26). Isso é esperado já que conforme aumenta-se o atrito, menos a membrana no topo se deforma.

Na Figura 3.28 vemos os instantes do ensaio de uma membrana sem lubrificante e sem lixa para um deslocamento de 30mm (1), o ponto do fim da endentação com 52mm de deslocamento vertical (2), o ponto intermediário do estágio de penetração com 60mm de deslocamento (3) e o deslocamento máximo analisado neste trabalho de 90mm (4).

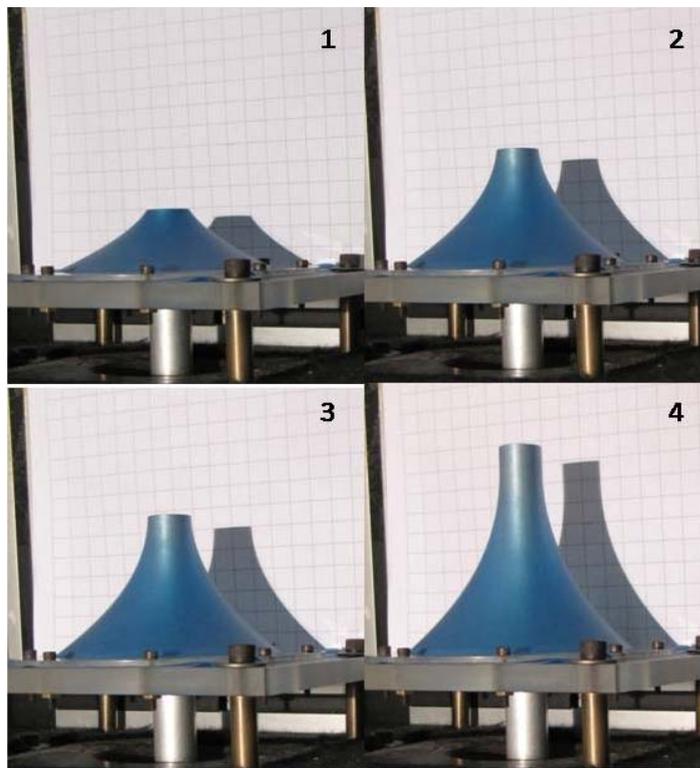


Figura 3.28 - Ensaio sem lubrificante com 30mm(1), 52mm(2), 60mm(3) e 90mm(4)

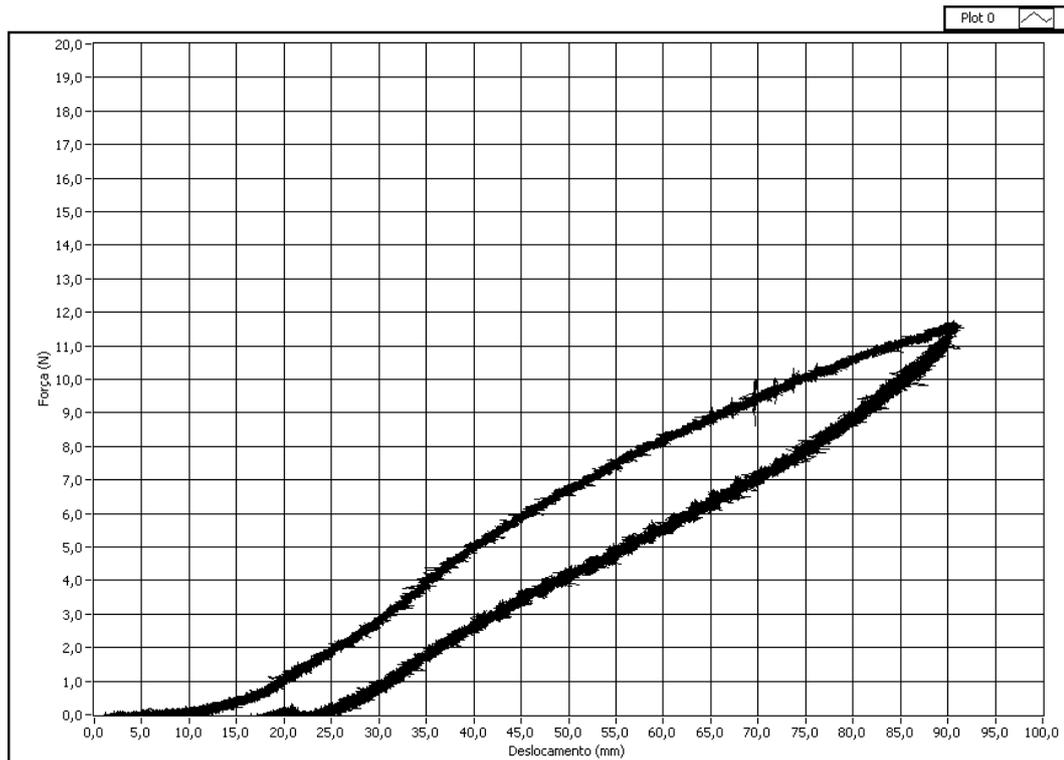


Figura 3.29 - Gráfico força vs. deslocamento sem lubrificante

A Figura 3.29 mostra um gráfico força vs. deslocamento de uma membrana sem lubrificação. Observa-se uma força de reação final maior que no caso lubrificado (Figura 3.27), o que é decorrência da menor deformação do topo da membrana devido ao atrito.

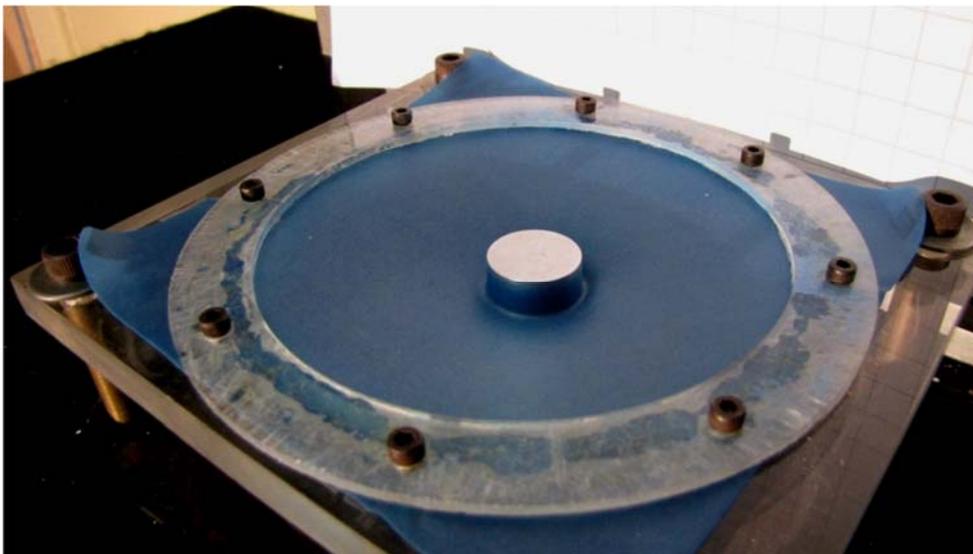


Figura 3.30 - Membrana após o descarregamento

Na Figura 3.30 vê-se a membrana após um ciclo de carregamento e descarregamento, observa-se que a membrana ficou presa ao topo do endentor

devido ao atrito que existe na interface. O topo possui coloração mais clara devido à grande deformação e conseqüente afinamento da membrana nessa região.

3.6.3.Com lixa

Após a realização dos ensaios com o alumínio com e sem lubrificação foi testado o mesmo ensaio com uma lixa de gramatura 600 na região de contato do endentor com a membrana para efeitos de verificação dos dados do ensaio com um coeficiente de atrito maior. O coeficiente de atrito medido para essa lixa foi $\mu=0,8$.

Na Figura 3.31 se observa o ensaio de endentação para o caso onde a interface do endentor com a membrana está coberto com lixa estando aplicado um deslocamento do endentor de 30mm (1), o ponto intermediário do estágio de penetração com 60mm de deslocamento, o ponto do fim da endentação com 65mm de deslocamento vertical (3) e o deslocamento máximo analisado neste trabalho de 90mm (4).

Observa-se em relação à figura logo acima que o fim da endentação ocorre num ponto de deslocamento maior, o que é esperado devido à restrição da membrana escoar sobre o topo do endentor.

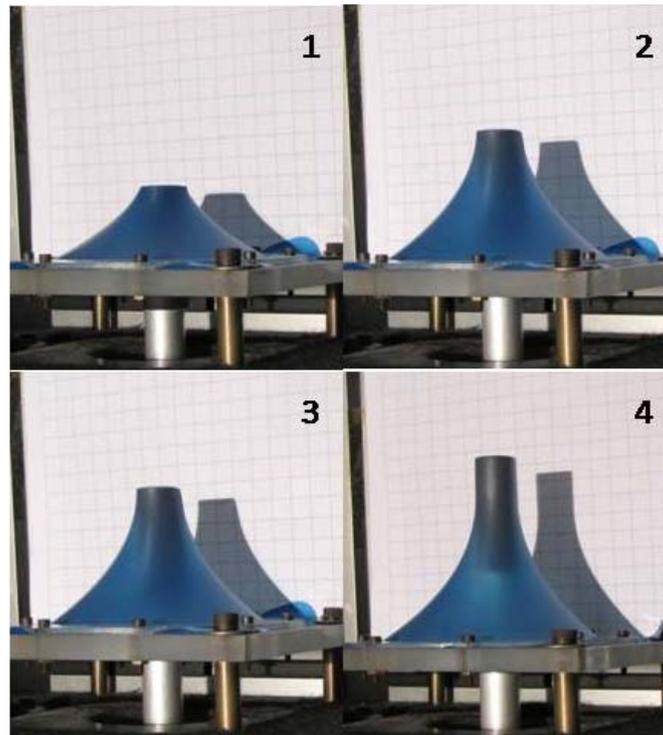


Figura 3.31 - Ensaio com lixa com 30mm(1), 60mm(2), 65mm(3) e 90mm(4)

Ao fim do ensaio, com 90mm de deslocamento vertical observa-se em comparação com a Figura 3.28 (4), que esta membrana, apesar de estar submetida ao mesmo deslocamento do endentor tem uma coloração mais escura e azulada, o que indica que houve menos deformação, ou que a deformação máxima foi menor.

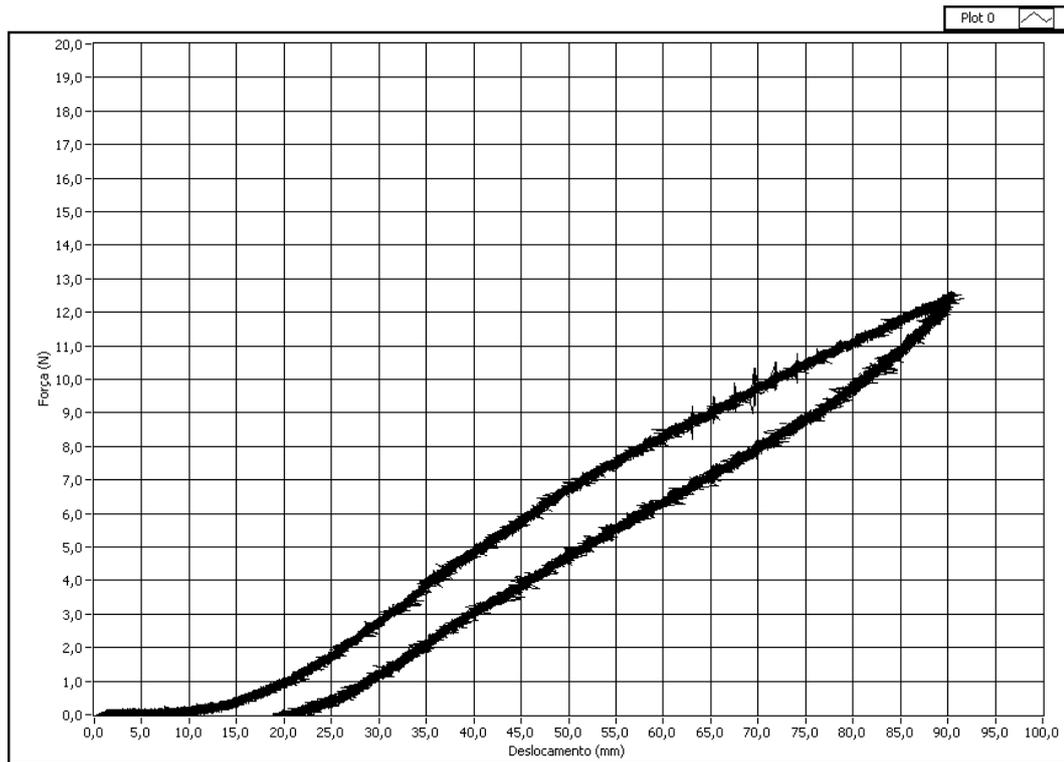


Figura 3.32 - Gráfico força vs. deslocamento com lixa

No gráfico força vs. deslocamento na Figura 3.32 observa-se o mesmo comportamento de aumento da força máxima com o aumento do coeficiente de atrito, assim como fica evidente a menor diferença de força entre o carregamento e o descarregamento, decorrente da menor deformação máxima da membrana.

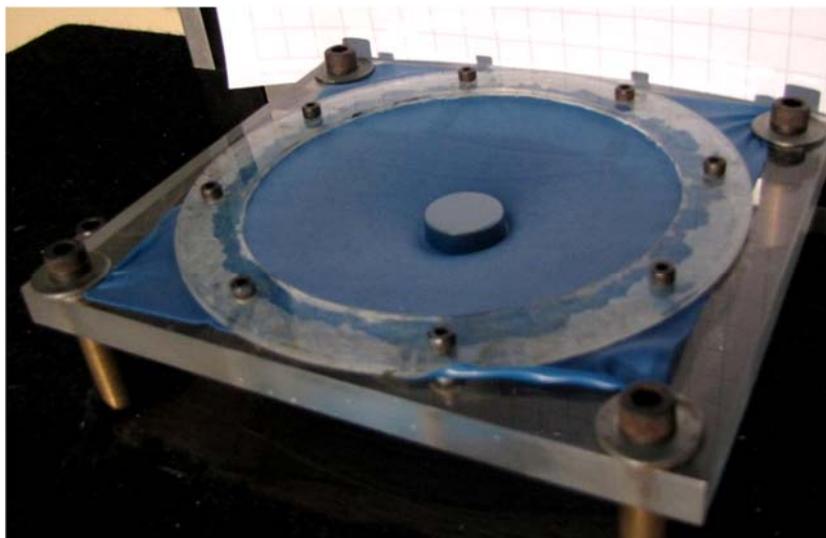


Figura 3.33 - Membrana após um ciclo de carga e descarga

Na Figura 3.33, assim como na Figura 3.30 fica evidente o efeito que a força de atrito causa na membrana, contudo, nesta última observa-se que a membrana tem uma coloração mais escura devido à menor deformação no topo por razão do maior atrito.

3.6.3.1. Rompimento

Para o caso com lixa foi estudado o rompimento da membrana, isto é, o ponto em que o endentor perfura a membrana. A perfuração ocorre com 132mm de deslocamento vertical e uma força de 16N como visto na Figura 3.34 abaixo.

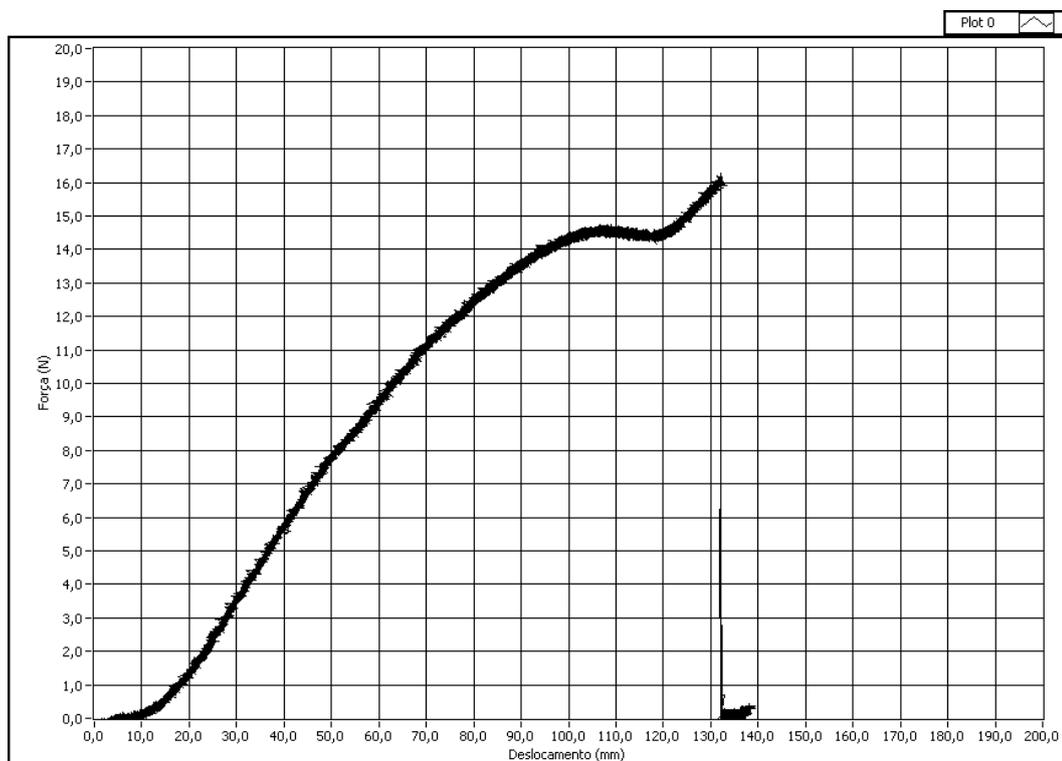


Figura 3.34 - Gráfico de rompimento

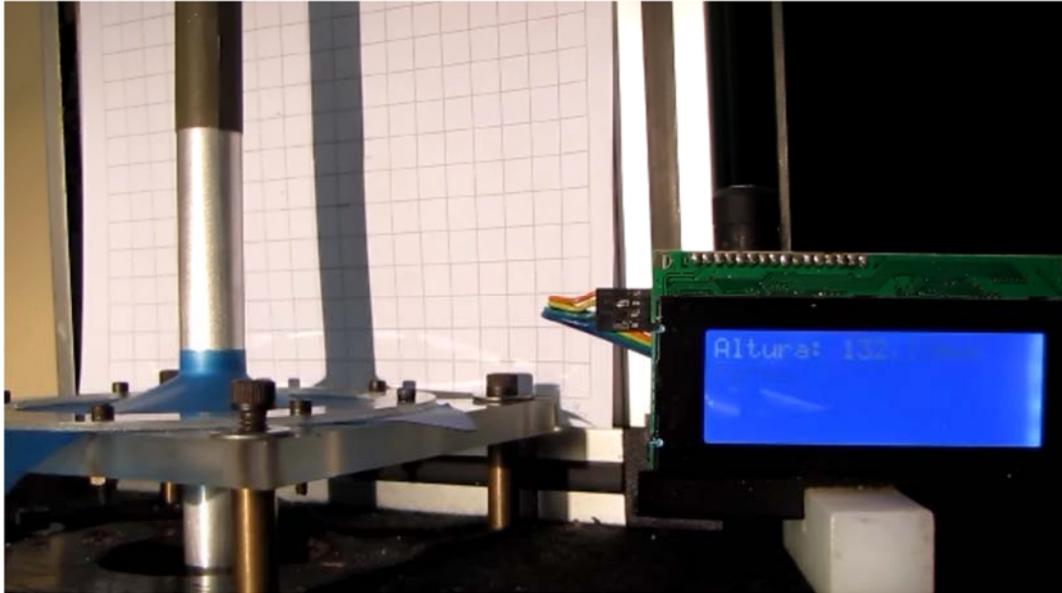


Figura 3.35 - Ensaio de rompimento

Como observa-se na figura Figura 3.35 acima, há uma grande região de contato entre a membrana e o endentor após a perfuração devido à grande deformação da membrana no instante do rompimento.

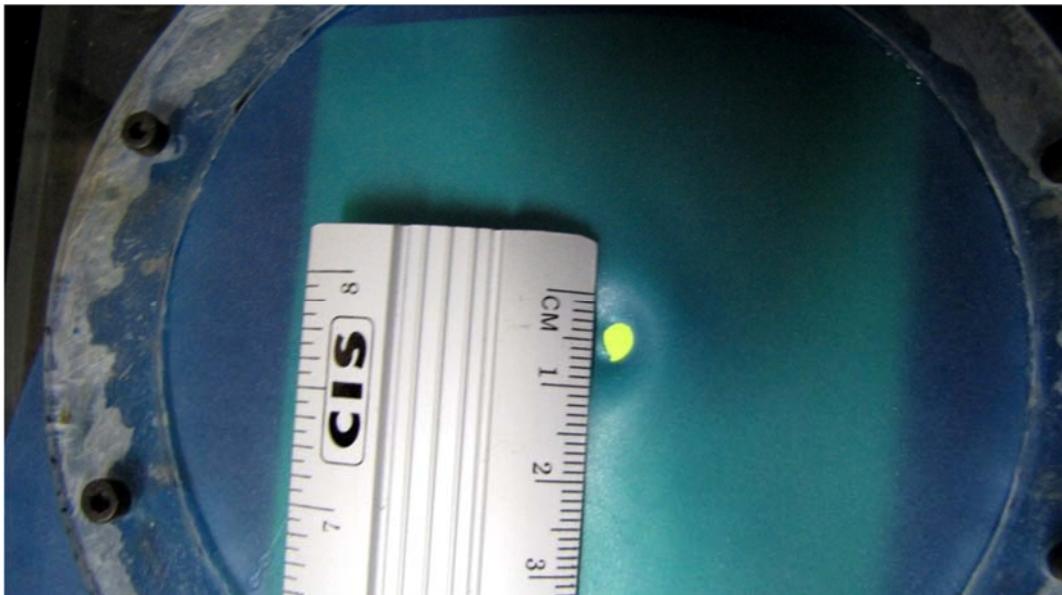


Figura 3.36 - Membrana perfurada

Na Figura 3.36 observa-se uma membrana rompida, como a membrana rompe na borda do endentor, local aonde concentram-se as maiores tensões podemos afirmar que a borda deste buraco no instante de rompimento tinha as dimensões do endentor, passando de aproximadamente 3,5mm de diâmetro indeformado para

18mm de diâmetro quando deformado. Uma deformação de aproximadamente 3,6 vezes excluindo-se as deformações plásticas da membrana que visivelmente estão presentes.

3.6.3.2. Análise da velocidade

Para o caso do endentor coberto com lixa número 100 foram realizados ensaios de endentação e penetração com velocidade de subida do endentor diferentes a fim de determinar se a mudança na velocidade de endentação provocava mudanças no comportamento do gráfico força vs. deslocamento. Como pode ser observado na Figura 3.37, neste caso, não há influência da velocidade no comportamento.

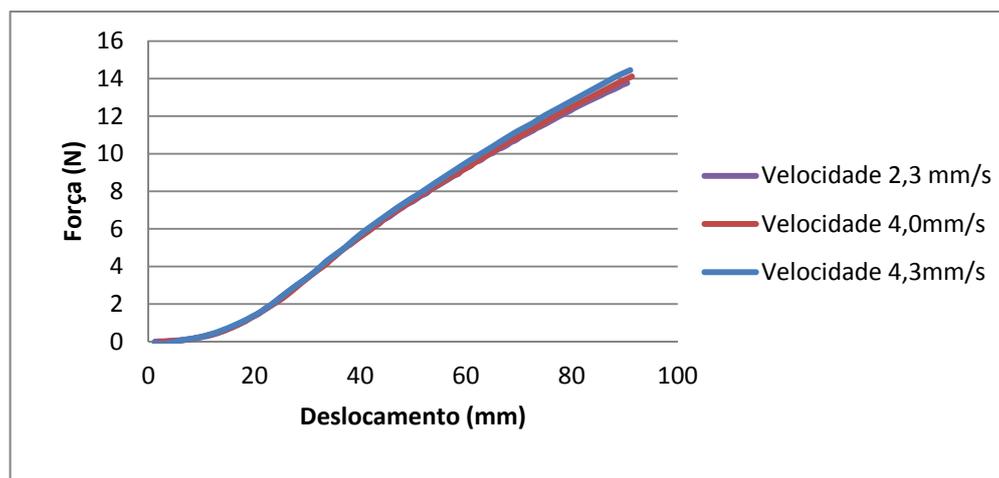


Figura 3.37 - Gráfico comparativo de velocidades de endentação

3.7. Análise da histerese

A histerese é considerada como a dependência de um material com o seu estado passado, ou seja, para descrever precisamente um material devemos conhecer o seu estado atual e o seu passado. No exemplo de borracha estudado ela se caracteriza prioritariamente pela mudança nas propriedades do material devido às perdas de energia por deformações plásticas. A borracha tem propriedades de histerese diferentes de outros materiais como metais, como ter perdas térmicas com aquecimento quando distendida e esfriamento quando a tensão é liberada. Uma

análise simples deste fato indica que podemos separar a histerese total de uma borracha em uma componente térmica e uma componente associada às perdas por atrito interno na borracha.

A histerese será apresentada neste trabalho como total, ou seja, não haverá uma discriminação de suas componentes. A análise feita será ainda qualitativa, uma vez que mensurar perdas térmicas e de energias de atrito internas são extremamente difíceis experimentalmente.

A literatura descreve a histerese como dependente da velocidade do carregamento, onde o seu comportamento se torna mais evidente com o aumento da velocidade de aplicação do carregamento. *Hopkinson, B.; Williams, G. T.* Foram realizados ensaios com três velocidades do endentor (2,3 mm/s, 4,0mm/s, 4,3mm/s) a fim de comparar os resultados encontrados e conseqüentemente o efeito da velocidade na histerese da membrana. Estas comparações foram feitas apenas para o caso de atrito maior $\mu=0,8$ que se refere ao contato do endentor coberto com uma lixa de gramatura 600.

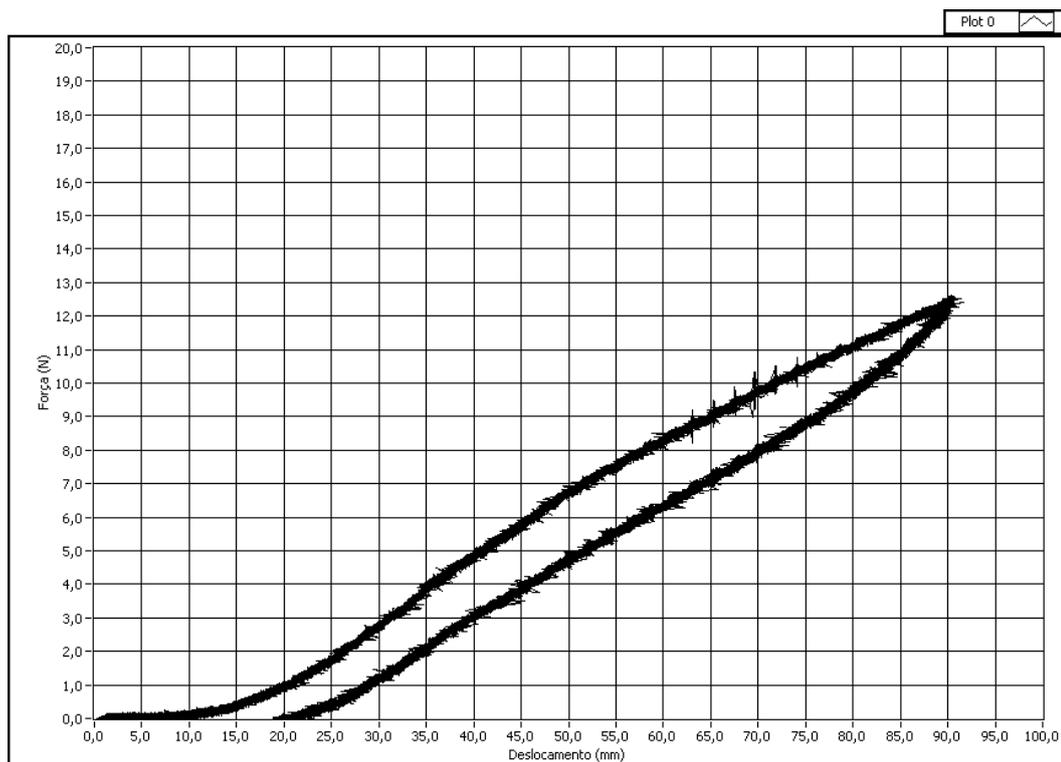


Figura 3.38 - Ensaio com velocidade 2,3 mm/s

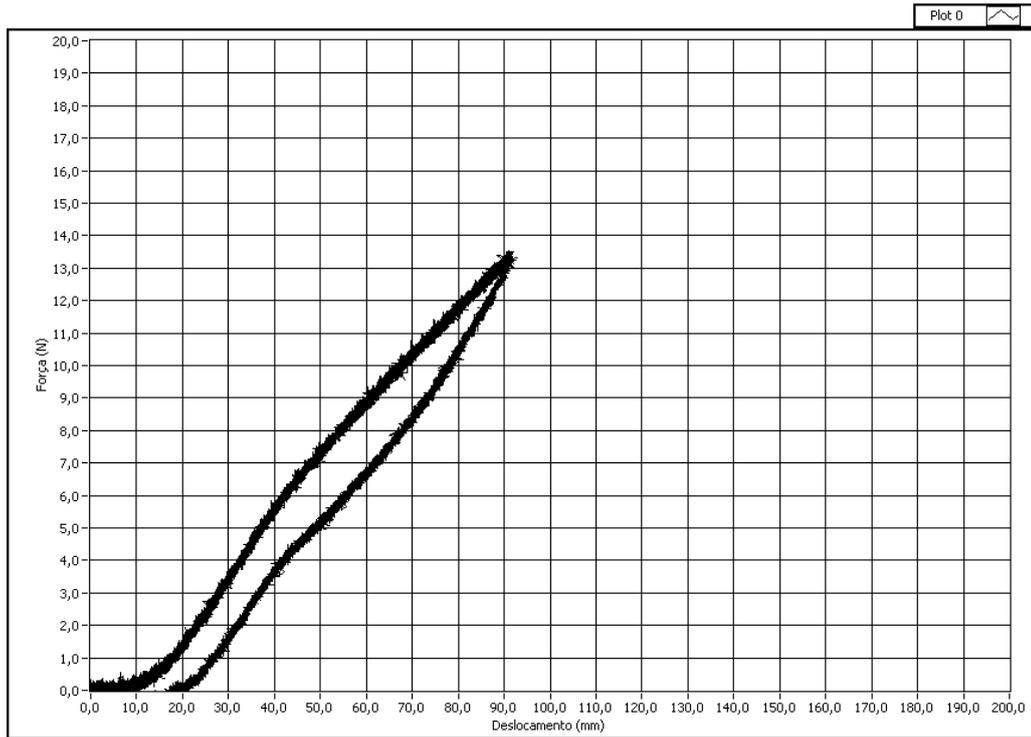


Figura 3.39 - Ensaio com velocidade 4,0mm/s

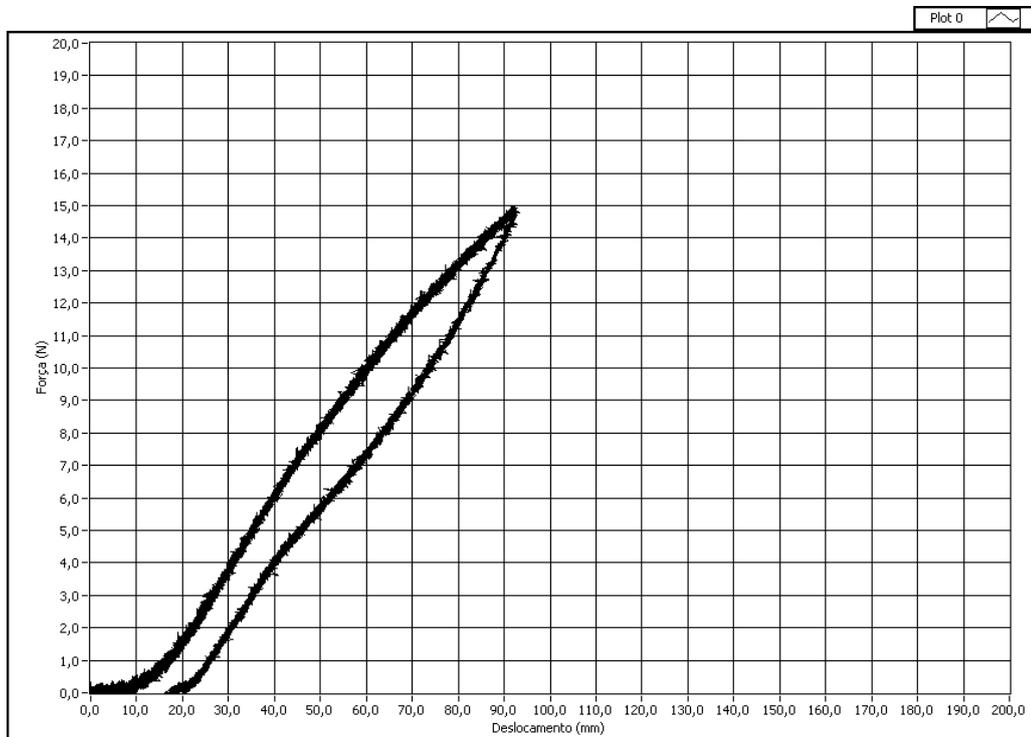


Figura 3.40 - Ensaio com velocidade 4,3mm/s

Comparando as figuras Figura 3.38, a Figura 3.39 e a Figura 3.40, observamos que com o aumento da velocidade a área dentro da curva do gráfico permanece visualmente similar, mas há um leve aumento na força final de reação que acompanha o aumento da velocidade. Isto se deve ao fato de que com o aumento da velocidade há um menor escorregamento da membrana na região de contato do endentor e conseqüentemente há menos membrana para ser deformada na região do tronco de cone. A área interna desta curva está diretamente relacionada a quantidade de energia perdida, ou dissipada durante o ciclo de carregamento e descarregamento, devido às características da borracha utilizada.