

6 Resultados

6.1 Teste de Deformação

O teste foi realizado com a montagem mostrada na Figura 41. No centro da circunferência branca (moldura de nylon) encontra-se a região ativa com duas linhas pretas correspondendo aos contatos elétricos com a região.

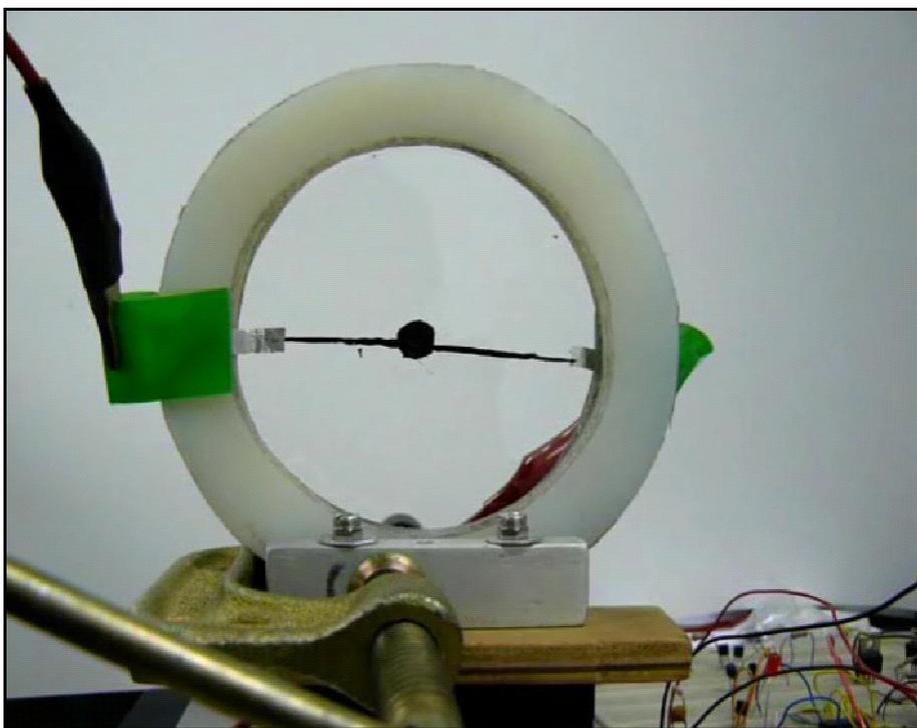


Figura 41: Montagem do teste de deformação.

A Figura 42 mostra o resultado do teste realizado com uma ampliação da região ativa. Nela, duas imagens (convertidas para tons de cinza) são mostradas, uma ao lado da outra. A imagem da esquerda mostra uma quase circunferência de aproximadamente 8mm de diâmetro, representando a região ativa não excitada. Do lado direito é exibida a imagem da mesma região ativa (instantes antes da quebra do dielétrico do polímero devido à alta tensão) com uma excitação de 4,1kV. A deformação da área encontrada entre as imagens é de 223%, implicando

num aumento de 79% do raio inicial. Wissler e Mazza reportaram uma deformação radial de 70% no seu trabalho, sobre as mesmas condições de pré-deformação e condições de contorno, que seriam 400% de pré-deformação em ambas as direções planas (x e y) e uma razão de 1:10 entre o raio da região ativa e o raio interno da estrutura de nylon onde o polímero foi fixado. Essa razão foi estipulada pelos pesquisadores do trabalho referência, e foi reproduzida aqui para efeitos de comparação entre resultados. Essa diferença entre os resultados pode ser explicada principalmente pelo perfil de tensão aplicado. Enquanto no trabalho referência a tensão aplicada foi de 3,5kV, nesta pesquisa optou-se por aplicar o máximo possível até a quebra do dielétrico. Isso faz com que as forças eletrostáticas sobre o material sejam maiores, levando a uma maior deformação. Outro fator que contribui para uma força eletrostática inferior (e conseqüentemente uma deformação menor) no trabalho de Wissler e Mazza, é que o polímero utilizado tinha o dobro de espessura (VHB4910, que tem 1mm de espessura). Em contrapartida, o que os ajudou a obter uma deformação próxima, mesmo com um campo elétrico menor, foi o tempo em que a tensão foi aplicada. Este ocorreu durante 15min, tempo suficiente para que os efeitos viscoelásticos ajam significativamente. Isso significa que, devido ao relaxamento do material, se eles tivessem deixado a tensão aplicada por mais tempo, uma deformação ainda maior poderia ter sido alcançada. Da mesma forma, a deformação de 79% encontrada neste trabalho poderia ter sido bem maior. No entanto, para fins de aplicabilidade do material como atuador de deslocamentos, as deformações desejadas são as imediatamente após a atuação da fonte de tensão.

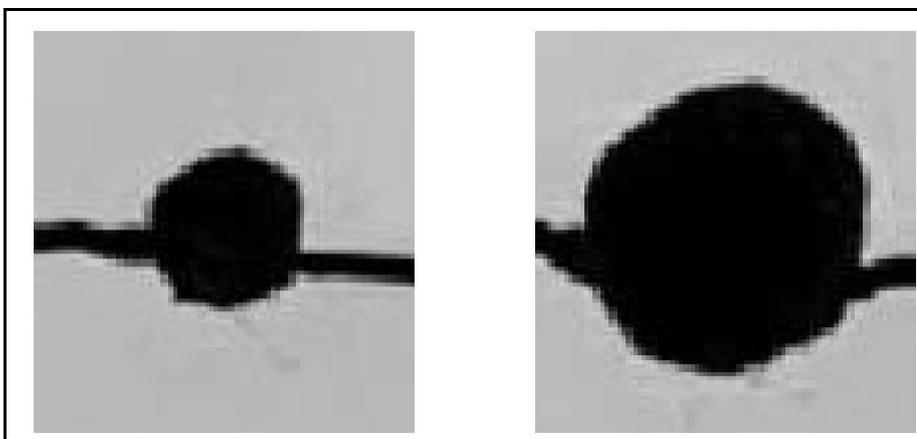


Figura 42: À esquerda: região ativa sem excitação com 201mm^2 . À direita: a mesma região ativa mas com uma excitação de 4,1kV provocando uma deformação da área de 223%.

6.2 Curva Característica de Força por Deformação

Esse teste foi feito de forma a produzir a curva característica do polímero relacionando a força exercida pelo atuador (e conseqüentemente a tensão mecânica de tração) para diferentes deformações. No entanto, devido à viscosidade do material e a maneira como os suportes do polímero foram elaborados, não foi possível evitar o escorregamento do elastômero pelas placas de fenolite para altas deformações. Isso ocasionou uma diminuição da força para essas deformações. A Figura 43 mostra a resposta da força do atuador durante todo experimento.

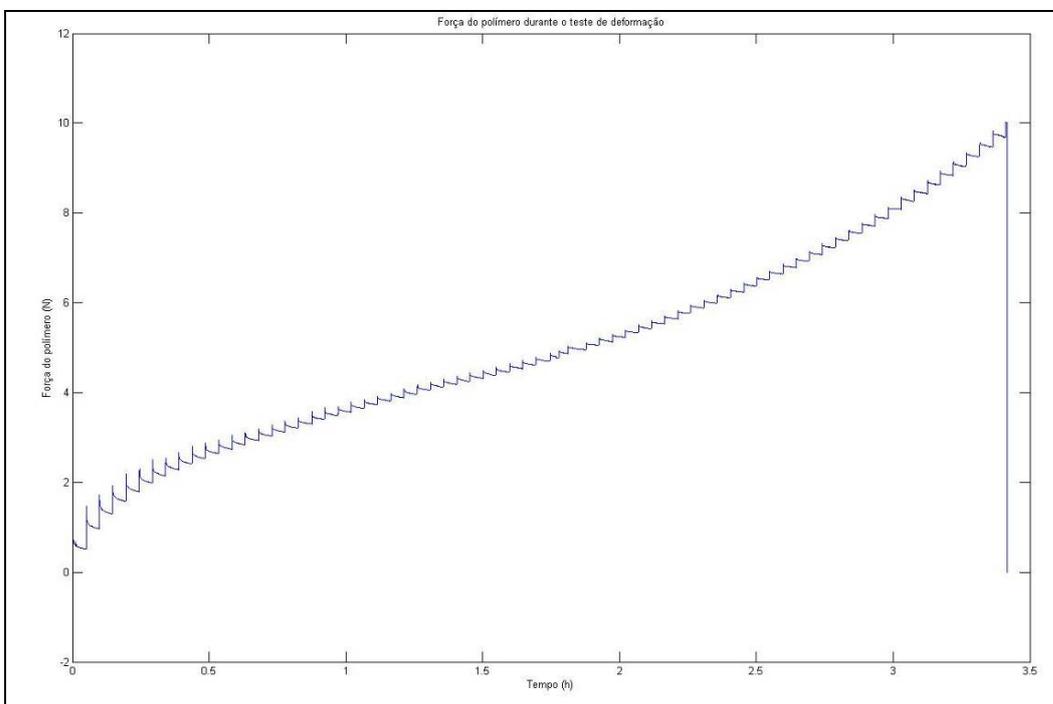


Figura 43: Resposta de força do polímero para deformações de até 1000%.

Depois de cada incremento na deformação do polímero (visto na Figura 43 como um aumento abrupto na força), há uma rápida decaída da força até sua estabilização em um valor bastante inferior ao inicial. Isso se deve as propriedades visco-elásticas do material, que cede depois de qualquer variação do seu comprimento. Para uma análise do comportamento do material quanto à tensão mecânica produzida, utilizou-se os pontos mínimos de força em cada incremento na deformação do material como sendo o valor representativo para aquele comprimento e com isso as curvas de caracterização do material foram geradas e as mesmas são mostradas nas Figuras 44 e 45.

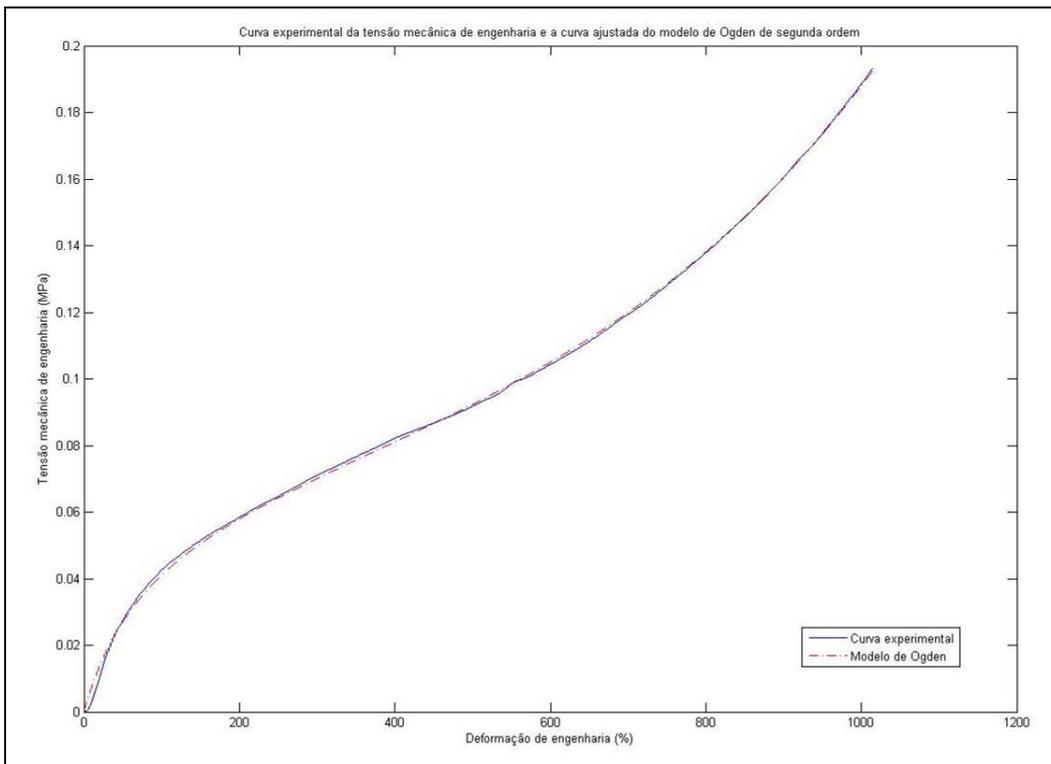


Figura 44: Curvas experimental e teórica de tensão mecânica de engenharia pela deformação de engenharia sem estímulo elétrico.

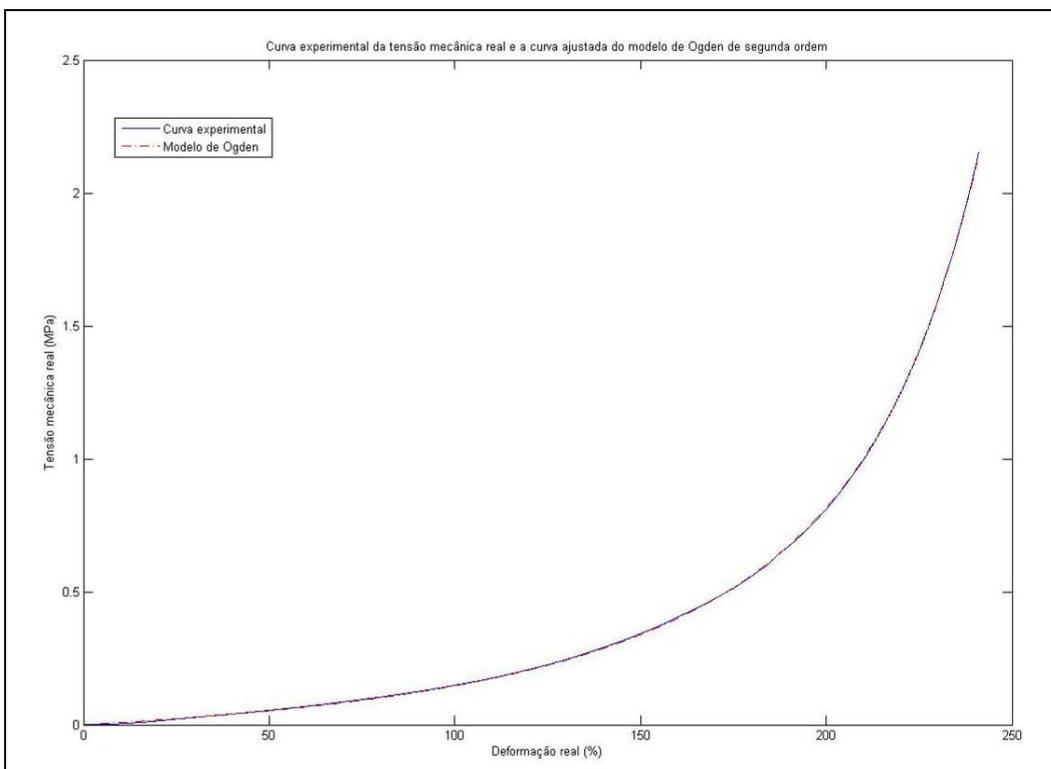


Figura 45: Curvas experimental e teórica de tensão mecânica real pela deformação real sem estímulo elétrico.

Pode-se notar pela Figura 44 que, diferentemente do comportamento de outros materiais como o aço, antes da ruptura há um aumento no módulo de

elasticidade do material, característico dos elastômeros. Esse aumento ocorre quando as longas cadeias poliméricas estão terminando de se desenrolar, ficando praticamente alinhadas com o carregamento, e refletindo assim a rigidez das ligações fortes nas cadeias. Junto às curvas experimentais de tensão mecânica encontram-se as curvas ajustadas utilizando o modelo de Ogden. O ajuste foi feito com o método dos mínimos quadrados resultando em um RMSE (*Root Mean Square Error* – raiz quadrada do erro médio quadrático) de $9,17 \times 10^{-4}$ MPa e um erro máximo de 3,7% do valor experimental para a tensão mecânica de engenharia e um RMSE de $3,792 \times 10^{-3}$ MPa e um erro máximo de 0,47% do valor experimental para a tensão mecânica real.

6.3 Teste de Força Blocante

Neste experimento testou-se o modelo matemático desenvolvido da força do atuador em função da tensão elétrica aplicada. Os testes foram feitos com um atuador construído com uma camada dupla de polímero VHB4905, pré-deformado de 400% na direção x e com uma deformação de 360% na direção y. Para verificar o modelo desenvolvido, foi aplicada uma tensão com perfil de rampa crescente até a quebra do dielétrico (aproximadamente 7,5kV depois de 2min de teste). A Figura 46 mostra a comparação direta entre a curva experimental e a teórica, obtidas pelas Equações 3.17 à 3.21.

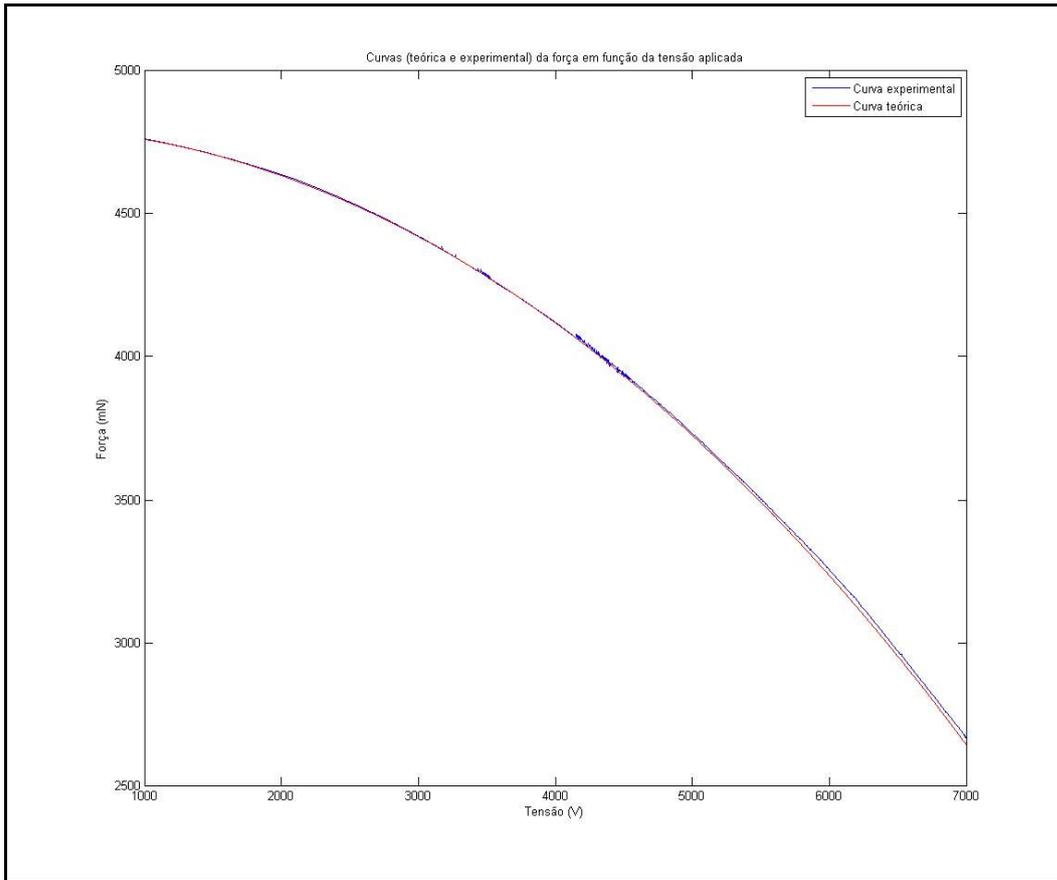


Figura 46: Comparação entre as curvas experimental e teórica da variação da força em função da tensão aplicada no músculo artificial.

O RMSE do resultado obtido é de 10,5mN. O erro máximo do modelo desenvolvido é de 26,7mN, significando um erro de 1% do valor experimental. Esse erro máximo ocorreu para uma tensão de aproximadamente 7kV. Isso se deve ao fato do modelo desenvolvido não contemplar as viscoelasticidade do material. Com isso, o efeito de relaxamento do polímero, sobreposto à atuação, se tornou significativo no final do experimento. Provavelmente, se a taxa de incremento da atuação fosse mais lenta, esse erro final seria maior.

As Figuras 47 e 48 mostram as curvas de tensão mecânica pela deformação para tensões elétricas variando de 1,5kV até 5,5kV. Em cada figura existem 9 curvas, cada uma gerada com um estímulo elétrico diferente. Cada curva corresponde a um estímulo elétrico de 500V a mais que a curva logo acima, sendo que a curva com os maiores valores de tensão mecânica corresponde ao menor estímulo elétrico aplicado (1,5kV). Nota-se, como era esperado, que quanto maior o estímulo elétrico aplicado, menor a tensão mecânica gerada pelo atuador. No entanto as curvas não se encontram igualmente espaçadas, apesar do estímulo

elétrico entre uma curva e a imediatamente superior ser o mesmo da curva imediatamente inferior.

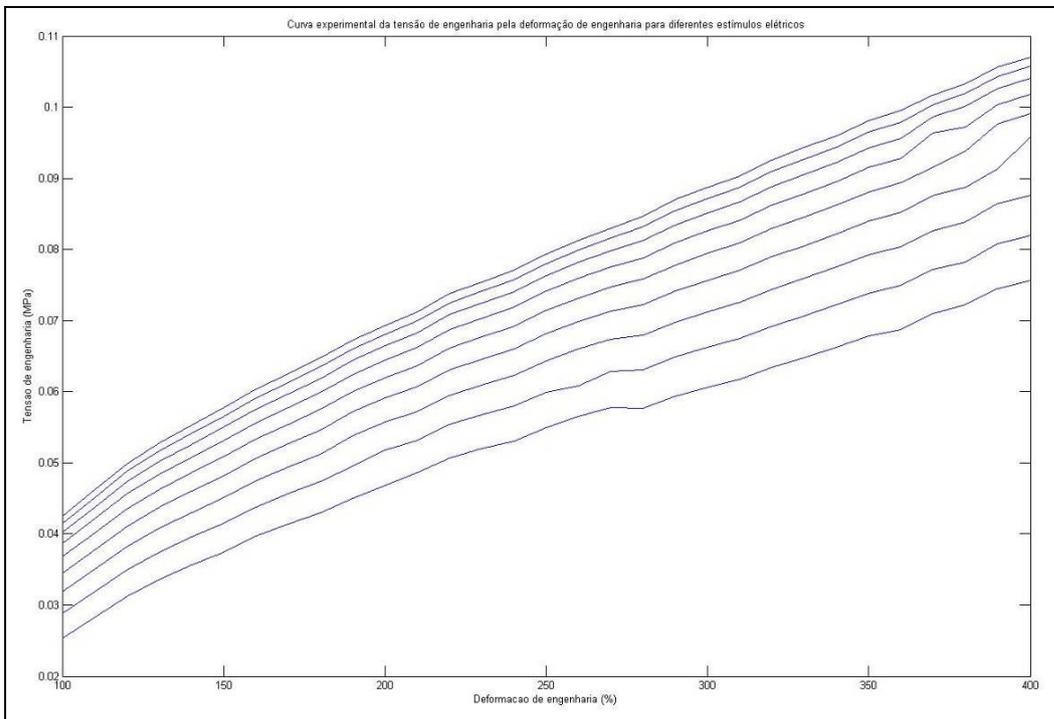


Figura 47: Curvas de tensão mecânica de engenharia pela deformação de engenharia para diferentes estímulos elétricos.

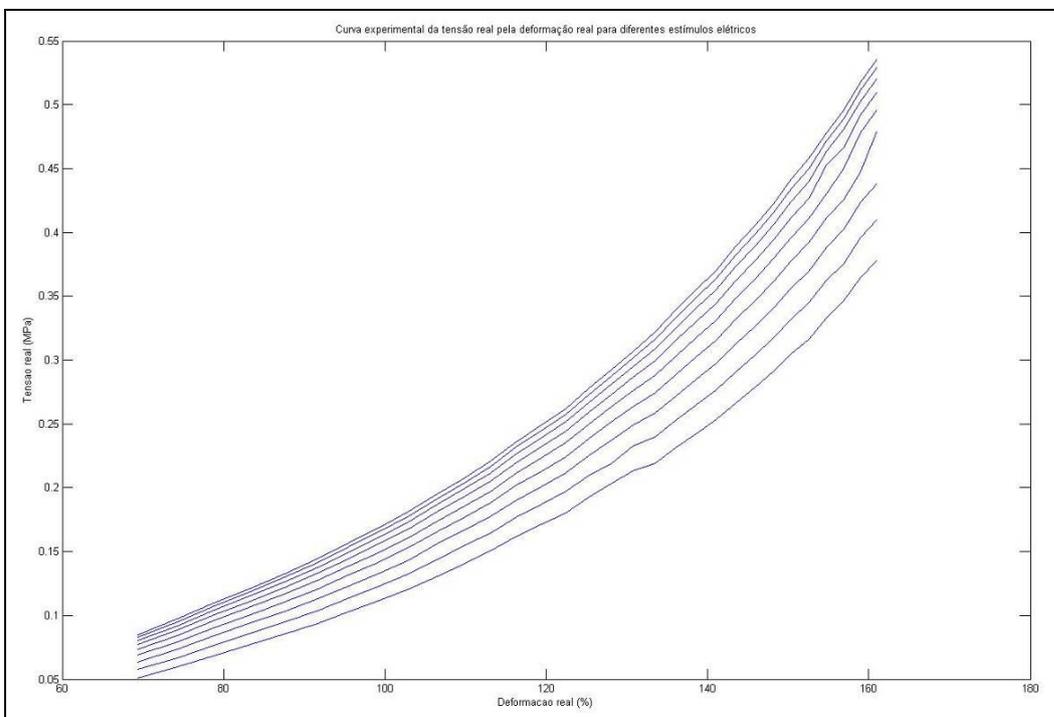


Figura 48: Curvas de tensão mecânica real pela deformação real para diferentes estímulos elétricos.

O mesmo pode ser visto ao longo do eixo da deformação. Quanto maior a deformação, maior a distância entre as curvas, apesar do incremento no comprimento do atuador ter sido constante durante o experimento. Esse comportamento se deve às não linearidades apontadas na seção 3.3 onde é mostrado que a força do polímero varia proporcionalmente ao quadrado do estímulo elétrico aplicado e inversamente proporcional à espessura do material. Logo, quanto maior a deformação do atuador no seu comprimento, menor a sua espessura e com isso maior a força produzida.

6.4 Controlador PID com Ganhos Variáveis

Foram testados diversos valores para os ganhos do PID de forma a encontrar uma resposta estável e rápida para a malha fechada de controle de força, baseado nas medições em tempo real do sensor de força utilizado. O que se percebeu é que os ajustes feitos para baixos valores desejados de força não eram bons para altos valores desejados. O sistema passava a ter um aumento considerável na amplitude das oscilações e um aumento também na sua frequência. Esse comportamento está de acordo com o modelo desenvolvido da malha de controle com o PID padrão. As não-linearidades do sistema o tornam muito sensível para atuações próximas ao estado de quebra do dielétrico. Um pequeno degrau na atuação tem respostas bastante diferentes se o atuador encontra-se perto da sua tensão limite ou longe da mesma.

Foi implementado o PID com ganhos compensados automaticamente de acordo com a espessura e força do polímero. Para tal, inicialmente os ganhos foram ajustados de forma empírica. Em seguida, implementou-se o ajuste automático desses ganhos a partir dos modelos não-lineares do sistema, e gravaram-se as respostas do sistema. Para que possam ser feitas comparações diretas entre os controladores, utilizou-se o ganho proporcional do PID compensado ($K_p \sqrt{\frac{z}{F}}$ adquirido para altos valores desejados de força) no PID sem compensação. Com isso espera-se que o comportamento dos dois controladores seja muito parecido para esses valores de força, pois ambos terão ganhos proporcionais, derivativos e integrais muito próximos.

Deve-se levar em consideração que provavelmente existe uma combinação melhor de ganhos para o controlador que forneça uma resposta mais rápida e menos oscilatória, no entanto a obtenção de um controle ótimo está fora do escopo desse trabalho.

A principal diferença entre os comportamentos (mostrados na Figura 49 e Figura 50) é a regularidade da atuação do PID compensado para todos os valores desejados de força. Enquanto que o PID padrão possui um bom comportamento para valores desejados próximos a 4000mN, e outro pior para valores menores, o PID compensado não sente essa diferença. Outro fator importante é que devido às grandes oscilações do PID padrão, não foi possível alcançar valores desejados abaixo de 3100mN, pois as oscilações na tensão de atuação chegavam a 6kV, que era o limite estabelecido para esse teste. Com o PID compensado, foi possível chegar a valor de 2800mN com perfis de tensão tão suaves quanto os para alcançar 4000mN. É preciso ressaltar que as maiores forças geradas pelo atuador correspondem às menores tensões elétricas aplicadas, como descrito na seção 3.3.

Nas duas figuras seguintes (Figura 51 e Figura 52) é mostrado o perfil de tensão aplicado experimentalmente no atuador durante o controle com PID padrão e PID compensado, respectivamente. Nelas pode-se ver a viscoelasticidade do material através da tensão de controle. Principalmente pelos gráficos correspondentes ao desempenho do sistema com o PID compensado (Figura 50 e Figura 52), percebe-se que depois de atingido um baixo valor desejado de força (correspondente a altas tensões elétricas aplicadas), a tensão decai um pouco. Isso se deve ao relaxamento do material depois de uma mudança nas tensões mecânicas internas. O material tende a voltar ao estado de deformação anterior e por isso, depois de esticá-lo mecanicamente ou depois de diminuir a tensão elétrica aplicada, sua força diminui um pouco até atingir uma variação desprezível. Do mesmo jeito, depois de diminuir seu comprimento ou aumentar a tensão de atuação, a força exercida pelo material tende a aumentar até atingir um regime permanente.

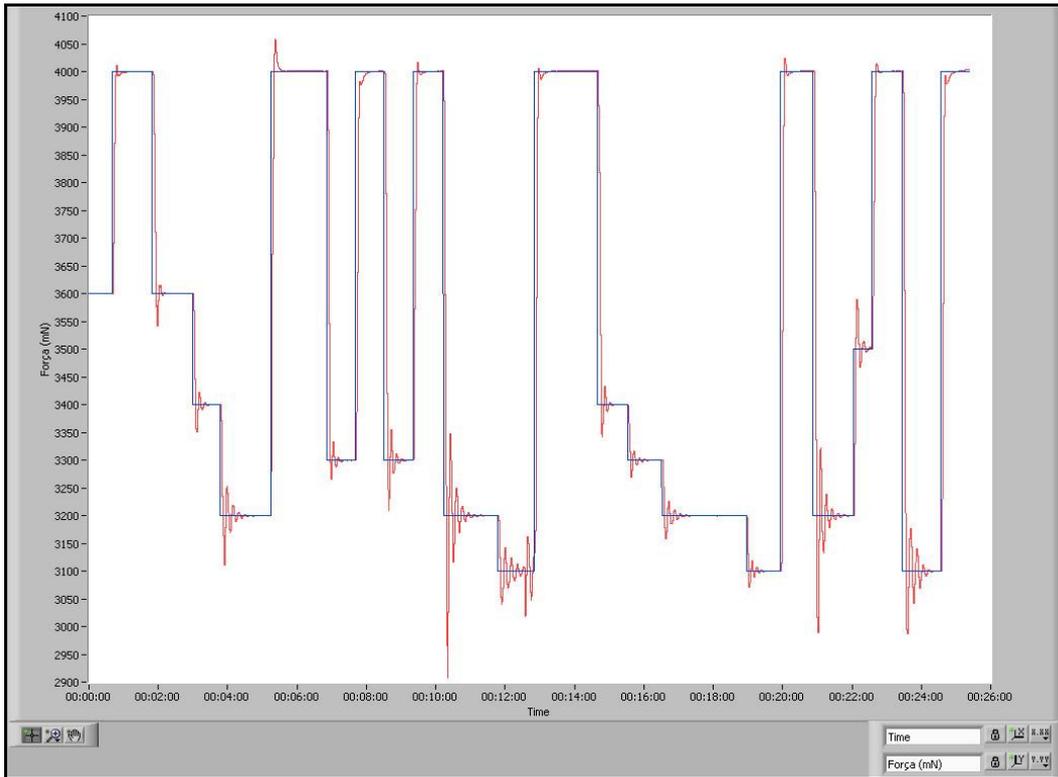


Figura 49: Resposta a diversos degraus do sistema controlado pelo PID padrão, medida experimentalmente, com ganhos ajustados para otimizar a resposta ao degrau de 4000mN. Note o comportamento oscilatório para degraus mais baixos

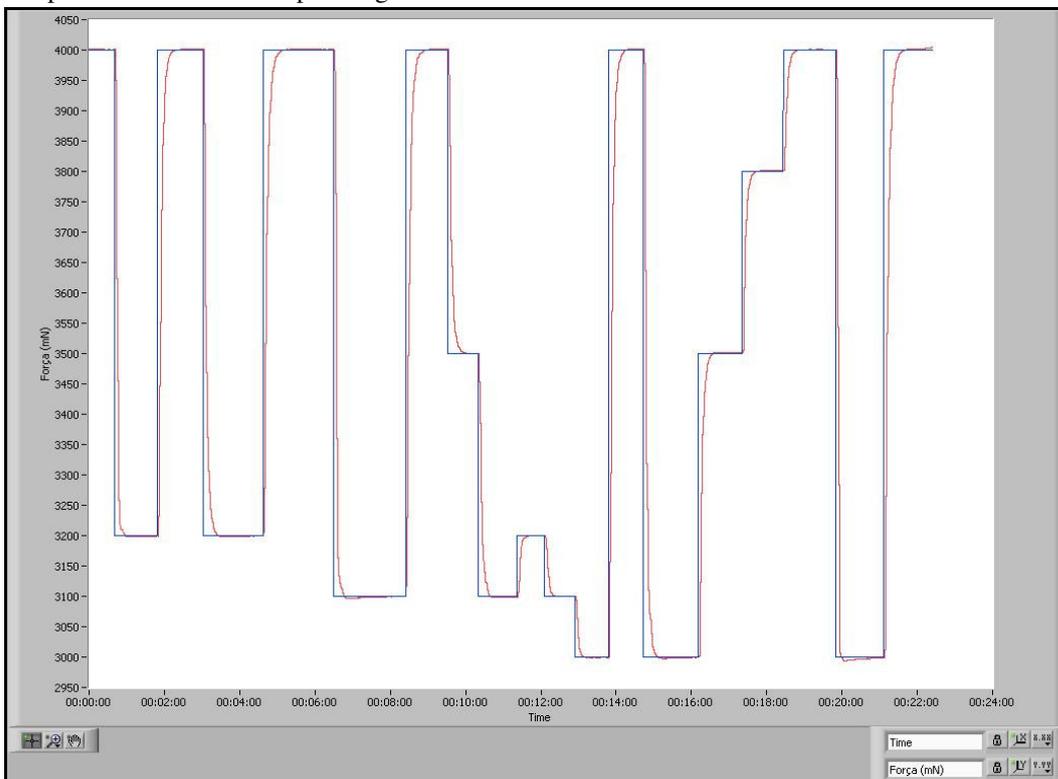


Figura 50: Resposta a diversos degraus do sistema controlado pelo PID compensado.

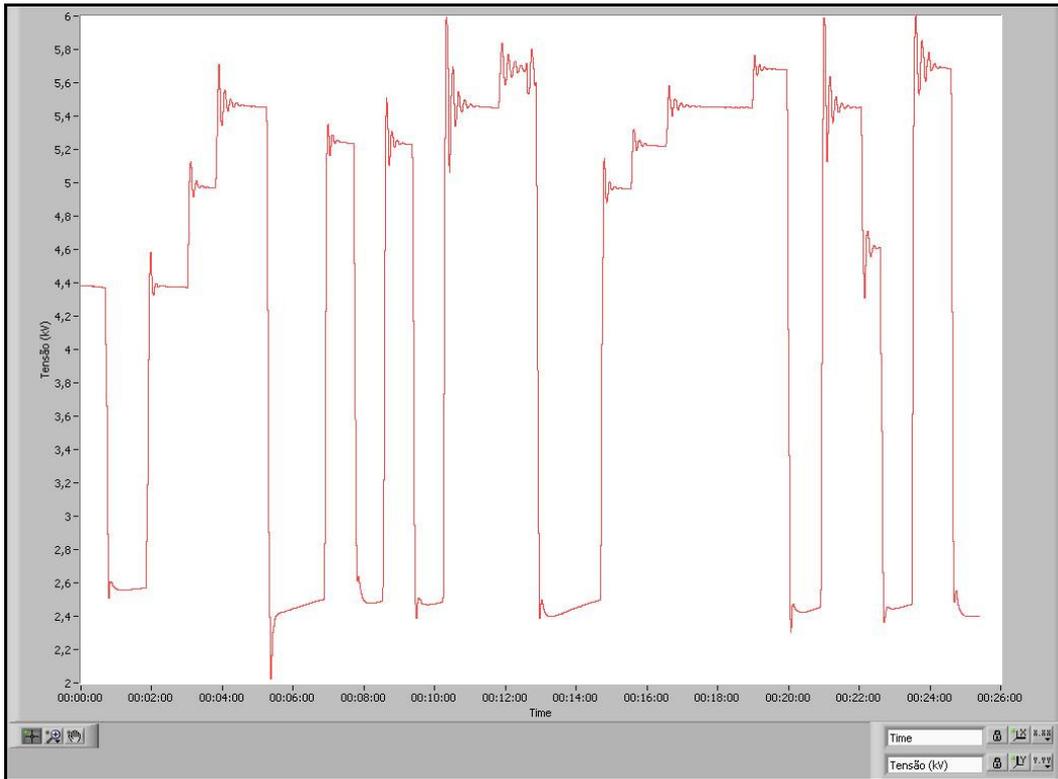


Figura 51: Curva de tensão aplicada no atuador durante o controle de força utilizando PID padrão.

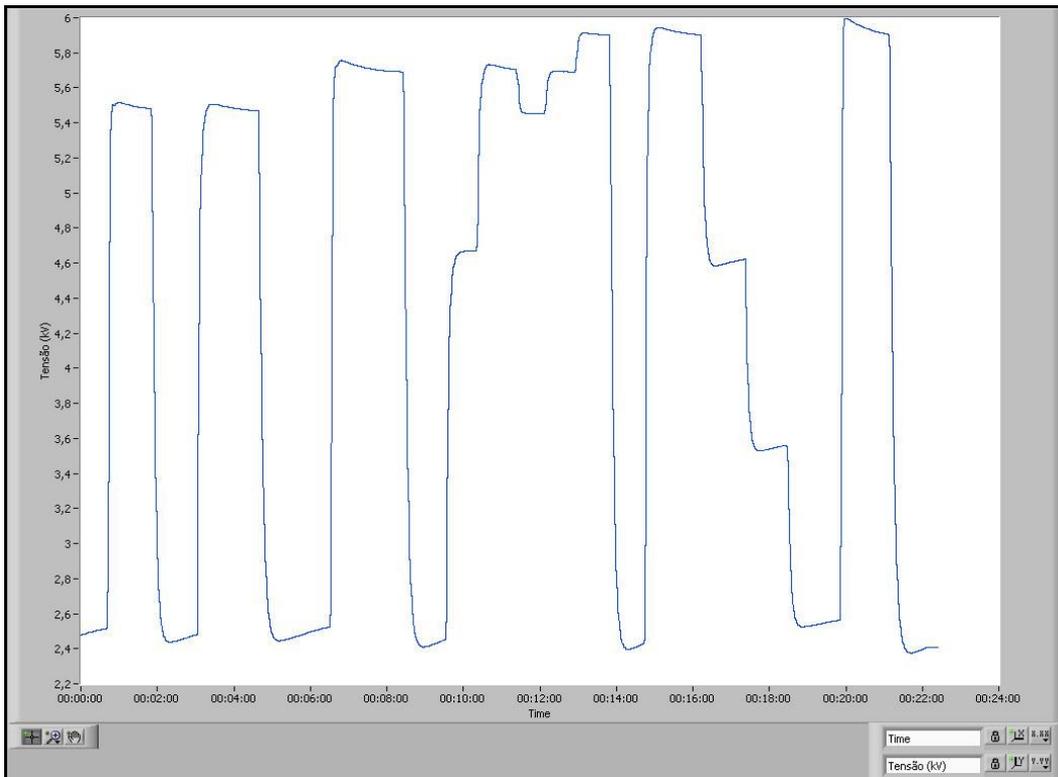


Figura 52: Curva de tensão aplicada no atuador durante o controle de força utilizando PID compensado. Note a suave variação de tensão exigida para manter o polímero em cada patamar de força, compensando-se assim os efeitos viscoelásticos.