

5

SIMULACAO, EXPERIMENTOS E CALIBRAÇÃO DO ATUADOR

5.1. Simulação do Atuador

O software MATLAB foi usado para a simulação do sistema. As rotinas programadas, com 120 funções e cerca de 4000 linhas de código, dividem-se em 4 sub-grupos:

- *Atuador*, onde se simula o equilíbrio e a dinâmica do atuador para cada modelo matemático do músculo .
- *Medição 3D*, onde estão os programas para a medição com as webcams.
- *Calibração do atuador*, que é a parte que contém os programas para a calibração.
- *Calibração da Mola*, que contém os programas para calibrar a mola fora do atuador.

Para construir os gráficos é preciso ter o valor de $X = (\alpha \ \beta \ \gamma \ O_x \ O_y \ O_z)^T$ que contém a informação da orientação da base superior e a posição de seu centro O . Como o deslocamento do músculo é essencialmente vertical, como foi explicado no Capítulo anterior do modelo matemático, então este é dividido em colunas. Pode-se observar na Figura 55 um quadro da simulação do atuador.

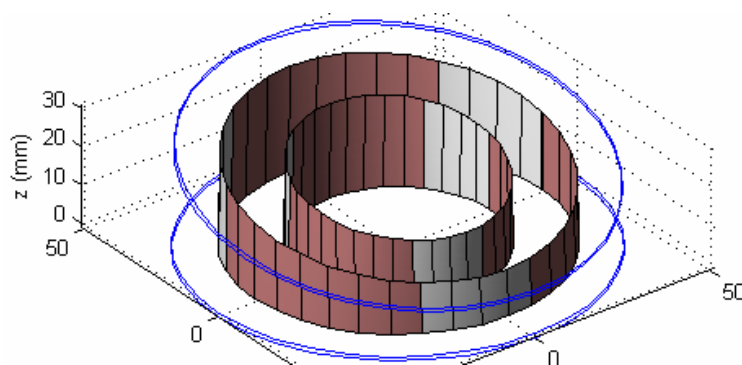


Figura 55: Simulação do atuador de duas camadas.

Os parâmetros que contêm X se podem obter por medição mediante os webcams como foi explicado no Capítulo 4. A Figura 56 mostra um par de quadros. A Figura 57 mostra uma imagem do atuador e uma de sua correspondente imagem da simulação.

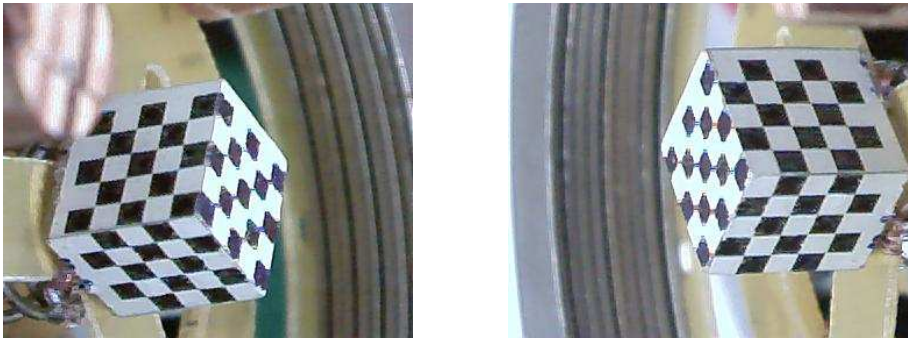


Figura 56: Par de quadros capturados pelo par de webcams.

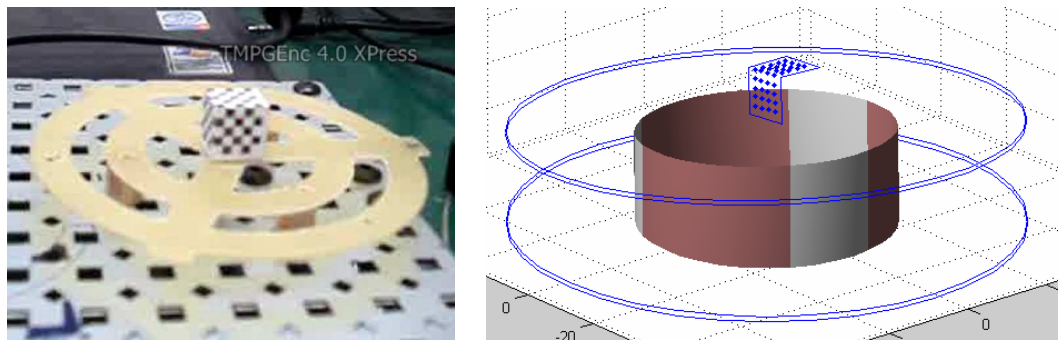


Figura 57: Imagem real na parte esquerda e Imagem da simulação na parte direita.

5.2. Sistema Experimental

Para fazer os experimentos foi necessário ter dispositivos eletrônicos e mecânicos não convencionais, por isso eles foram construídos no laboratório. O elevador de tensão elétrica [4, 5] conseguiu aproximadamente na sua saída até 10 KV (contínuo) com uma entrada de 9V (contínuo) e tem um emissor de luz para sincronizar ao par de imagens estéreo (ver Capítulo 4) . As partes do elevador de tensão elétrica se pode observar na Figura 58

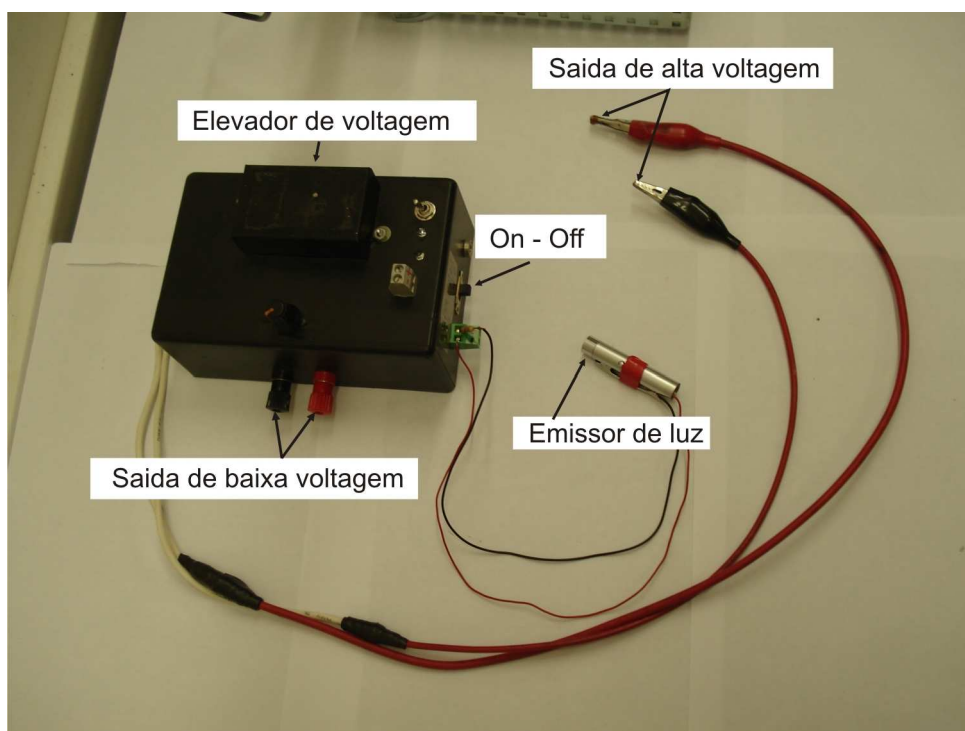


Figura 58: Partes do elevador de tensão elétrica.

O elevador comunica a alta tensão elétrica a uma, duas ou a os três capacitores do atuador (Figura 59)

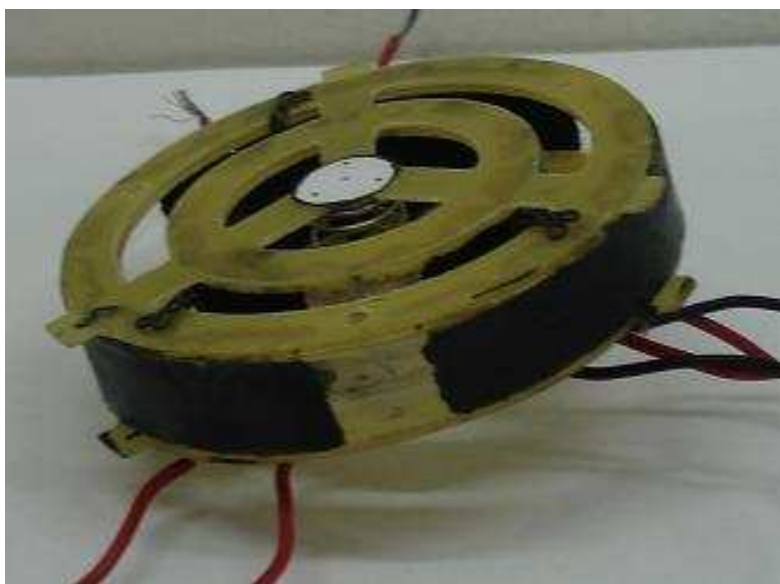


Figura 59: Atuador.

Para fazer as medições se colocam as duas câmeras *webcam* para formar um par estéreo, além disso, se coloca o emissor de luz que indica o momento em que a alta tensão elétrica é aplicada. A Figura 60 mostra o par estéreo e o emissor de luz.

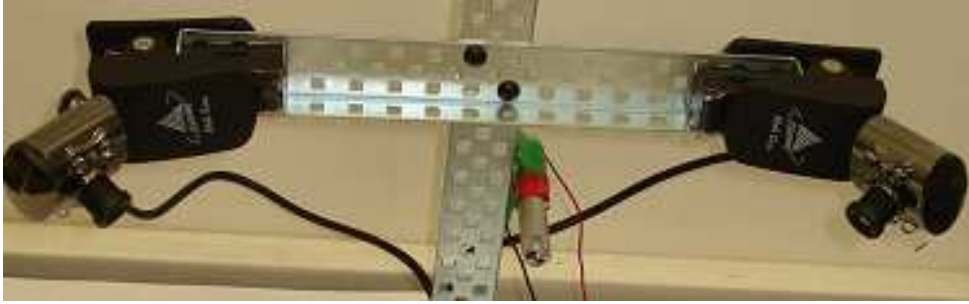


Figura 60: Par estéreo e o emissor de luz

Uma terceira câmera *webcam* (Figura 61) é usada para obter o vídeo real do atuador para ser comparado com a simulação correspondente o modelo matemático do atuador.



Figura 61: Câmera *webcam* para obter o vídeo do atuador.

Como os experimentos usam três câmeras e não sempre vai ser possível usar só um computador, então os vídeos gerados estariam fora de sincronia. Para sincronizar os vídeos se buscam os quadros onde a luz gerada pelo emissor de luz faça sua primeira aparição. Este emissor é colocado apontando ao atuador como se vê na Figura 62 onde também se pode observar o experimento completo excluindo os computadores (um computador para o par estéreo e um para a câmera que filma o atuador).

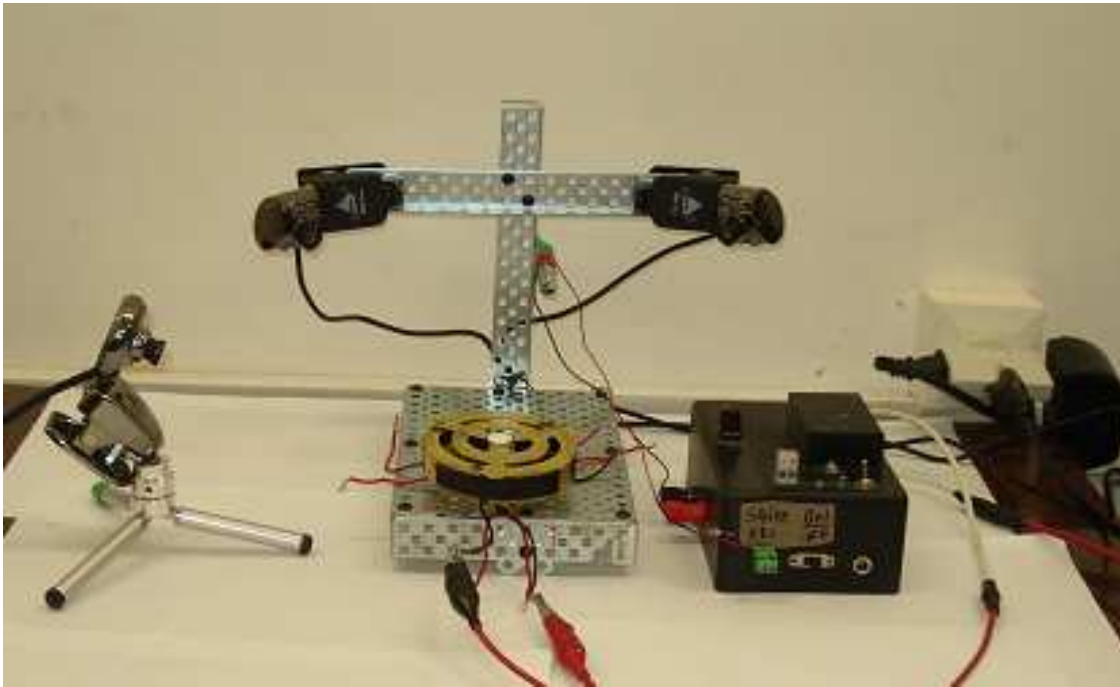


Figura 62: Componentes do experimento excluindo os computadores.

Os experimentos com o atuador de duas camadas têm menos movimento considerável que o uma camada só por dois motivos, a primeira é que o fato de ter maior área de músculo artificial faz que o deslocamento seja menor, então, o campo elétrico exerce força, com menor intensidade, aos capacitores, e a segunda é que ao ficar a camada exterior mais longe gera ângulos de rotação pequenos na base superior do atuador. Por tanto, como se vê na Figura 63b, se usara uma camada só. Coloca-se o objeto de medição na base superior do atuador e uma massa que é 10 vezes maior que a de atuador. As propriedades do objeto pesado se pode ver na Figura 63a.

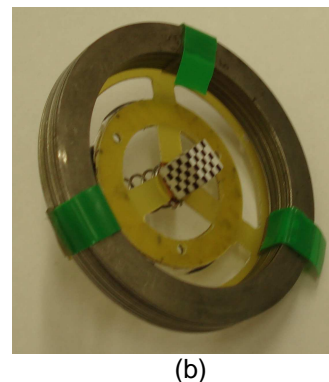
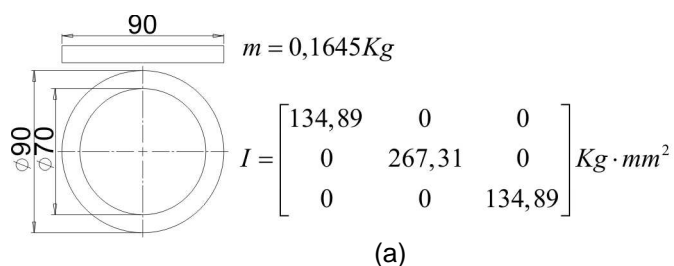


Figura 63: (a) Propriedades da carga. (b) Se coloca a massa e o objeto de medição ao atuador de uma camada.

Uma vez colocados os dispositivos se inicia a captura de imagens. Primeiro se indica ao par estéreo, desde o MATLAB, que iniciem a captura (Figura 64a), logo indicamos desde outro computador a iniciar a captura do movimento do atuador (Figura 64b). Depois de um a dois segundos é ligado manualmente o elevador de tensão elétrica, ligando também o emissor de luz e acrescentando a iluminação, durante três segundos aproximadamente. Um pequeno instante depois de o atuador ser ligado este fará um pequeno movimento rápido para depois continuar com um movimento lento. Quatro segundos depois de ser desligado o elevador de tensão elétrica se desligam as câmeras finalizando assim o experimento.

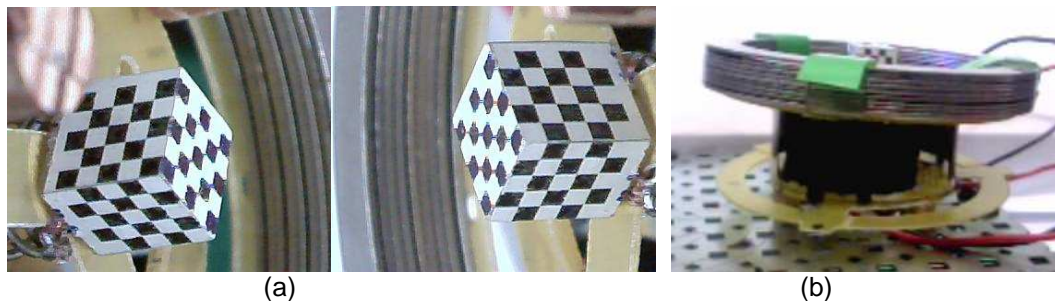


Figura 64: (a) Captura das imagens do par estéreo. (b) Captura de imagem do atuador.

Foram feitos onze experimentos, até o atuador quebrar (Figura 65), para diferentes combinações de capacitores e diferentes voltagens.

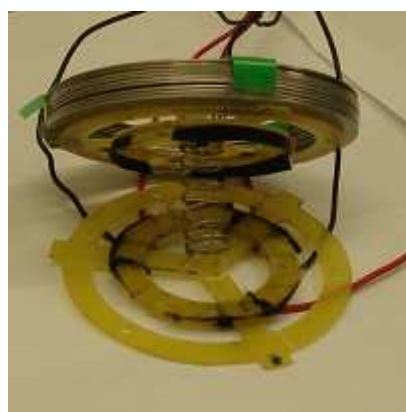


Figura 65: Atuador quebrado ao final dos experimentos.

5.3. Resultados da medição estéreo

O Capítulo 4 descreve como fazer a medição dos parâmetros de posição e orientação da base superior do atuador. Este Capítulo mostra os resultados medições dos onze experimentos realizados e a comparação com o modelo Kelvin-Voigt. Para compreender melhor os resultados se lembra (Figura 66) os parâmetros de posição, rotação da base superior e posição dos capacitores. É importante saber que a carga de massa grande faz que a base superior não fique horizontal.

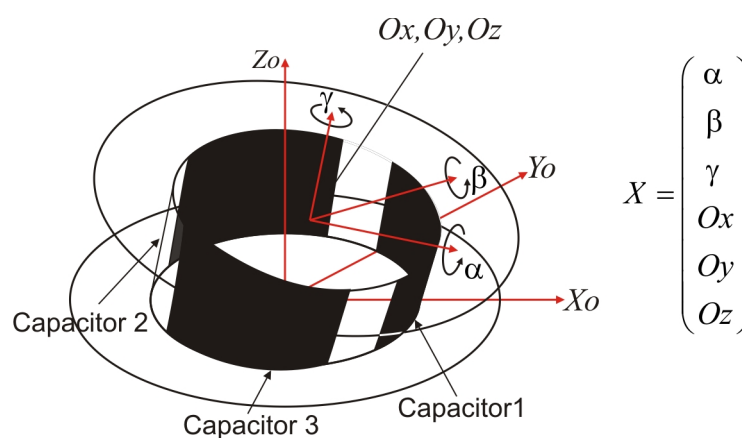


Figura 66: Partes importantes para análises dos resultados.

Um experimento segue os seguintes passos.

1. Segundos antes de aplicar tensão elétrica nas paredes do músculo se inicia a medição dos parâmetros (Capítulo 4).
2. Se aplica uma tensão elétrica nas paredes do músculo, fazendo com que a base superior do atuador se mova.
3. Se retira a tensão elétrica.
4. Quando a base superior fica estável, terminam as medições.

Cada experimento consta de três partes. A primeira (parte A dos gráficos) é quando o sistema está em repouso e as variáveis possuem valores iniciais $\alpha_o = -15^\circ$, $\beta_o = 7^\circ$, $\gamma_o = 2^\circ$, $Ox_o = 1mm$, $Oy_o = 19mm$ e $Oz_o = 19mm$. O ideal é que só Oz_o seja diferente de zero, mas, a carga sempre inclina ao atuador pela força gravidade (para evitar esta inclinação se pode colocar o atuador de cabeça para baixo). Estes valores iniciais são os mesmos para todos os experimentos. A

segunda (parte B dos gráficos) consta na ativação do um ou mais capacitores durante três segundos aproximadamente. E finalmente a terceira (parte C dos gráficos) é na desativação dos capacitores até chegar aos seis segundos. A terceira parte é ideal para a calibração dos parâmetros do músculo sem tensão elétrica. A terceira parte, quando o polímero é liberado, serve para calibrar os parâmetros da parte do polímero que tem tensão elétrica. A Figura 67 mostras as partes A, B e C na parte inferior de cada gráfico.

Para uma melhor análise dos gráficos se faz coincidir o início de cada curva com zero, para isso se resta seu valor inicial (Figura 67).

No primeiro experimento os três capacitores são acionados com tensão de 5KV. Como a área dos três capacitores fica maior não há rotação significativa, então o movimento deveria ser essencialmente no eixo Z_o . O experimento número um mostra que a maior variação é da variável O_z como se esperava.

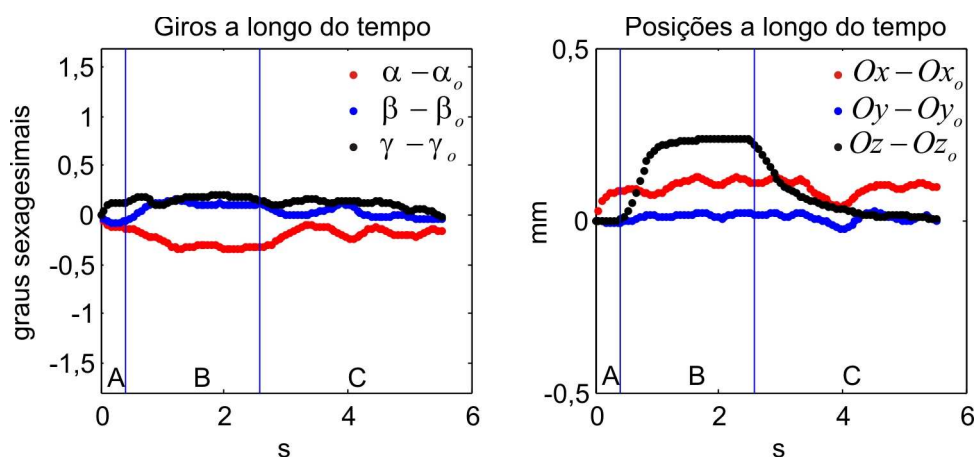


Figura 67: Giros e posições no experimento um.

Na Figura 67 da para perceber o a influencia do ruído nas variáveis de baixo valor. Este ruído é devido, principalmente, à falta de sincronia nas imagens do para estéreo, pois, a pesar que se ordene às câmeras iniciar a captura ao mesmo tempo, isso não acontece necessariamente. Este problema pode ser solucionado capturando mais frames por segundo. Outro motivo do ruído é o tratamento de imagens para reconhecimento de linhas que pode ser melhorado analisando um erro global e não para cada linha como é explicado no Capítulo 4.

O experimento número dois aciona os capacitores um e três com 5KV. Segundo a Figura 66 pode se deduzir que α , Oy e Oz deveriam apresentar movimentação apreciável o que é conferido pelo experimento número dois. A Figura 68 mostra os resultados.

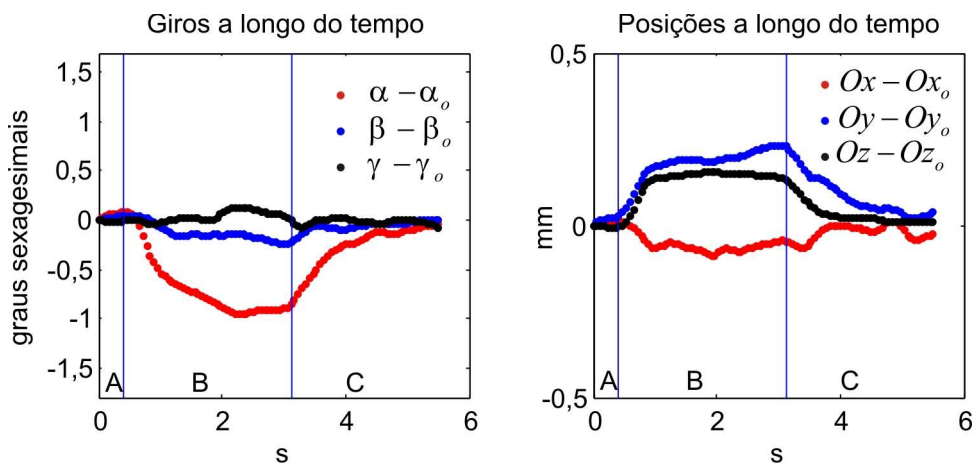


Figura 68: Giros e posições no experimento dois.

O capacitor 1 é acionado no experimento três o que deve ocasionar maior movimento em β e Ox . A Figura 69 mostra que β e Ox são os que mais variam.

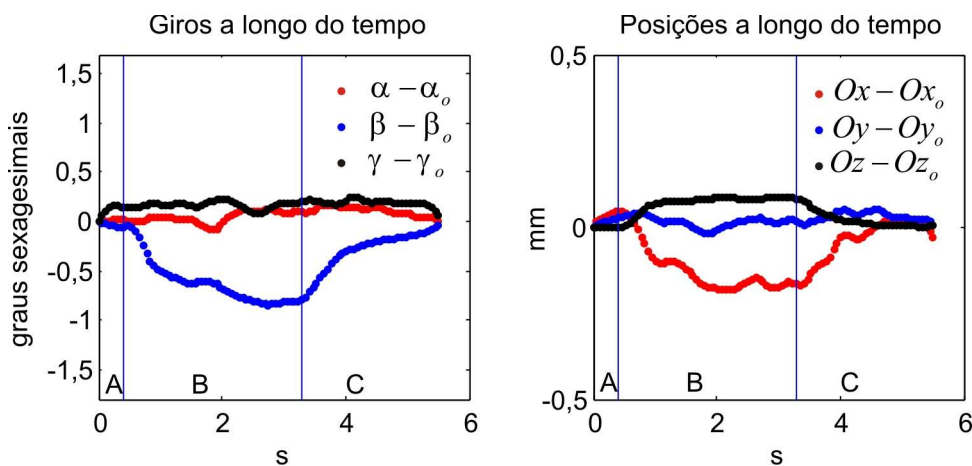


Figura 69: Giros e posições no experimento três.

O experimento quatro só é diferente do primeiro na tensão elétrica aplicada que neste caso é de 5.8 kV. Os resultados mostram maior amplitude na variável Oz (Figura 70).

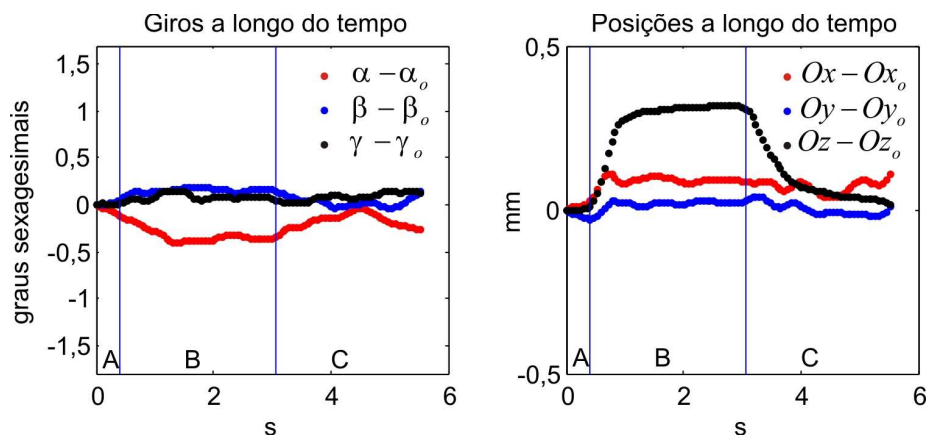


Figura 70: Giros e posições no experimento quatro.

O Experimento número cinco é parecido ao segundo só que, como no caso anterior, a tensão elétrica é de 5,8 kV. Também se aprecia maiores amplitudes na Figura 71.

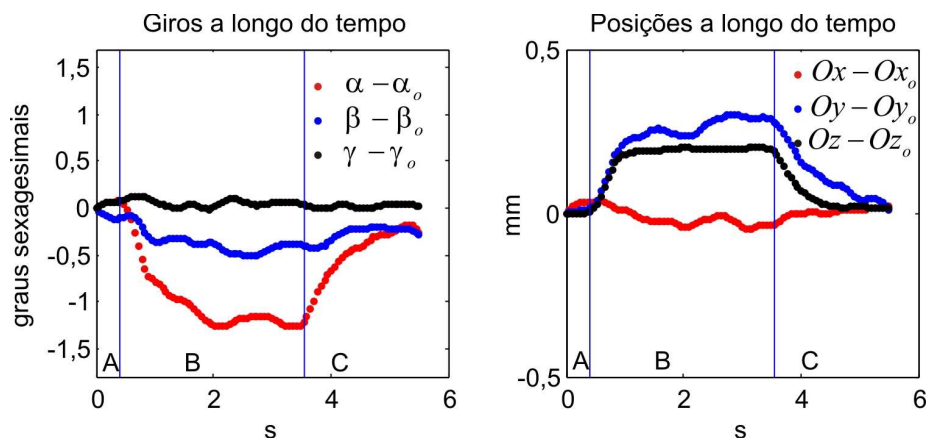


Figura 71: Giros e posições no experimento cinco.

Também se aprecia maiores amplitudes no experimento seis com o capacitor uno ativo com 5,8 kV (Figura 72)

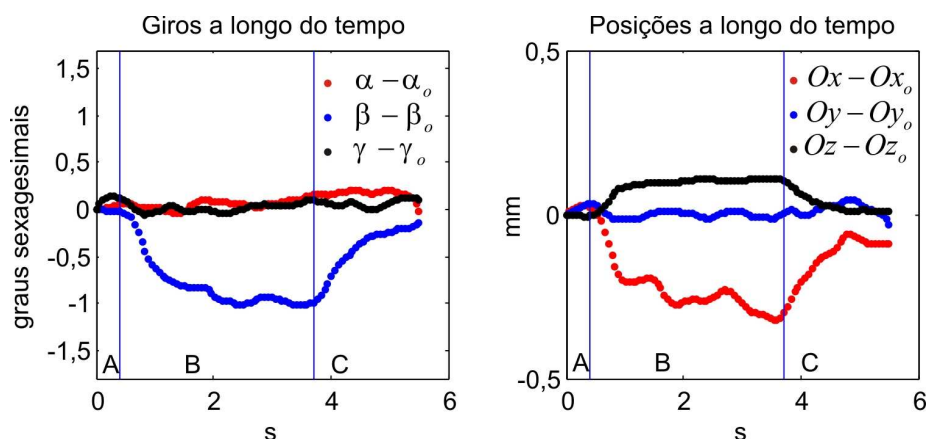


Figura 72: Giros e posições no experimento seis.

Como nos experimentos um e quatro a variável O_z tem maior amplitude para a mesma configuração de capacitores, mas com tensão elétrica de 6,5 kV. Ver Figura 73

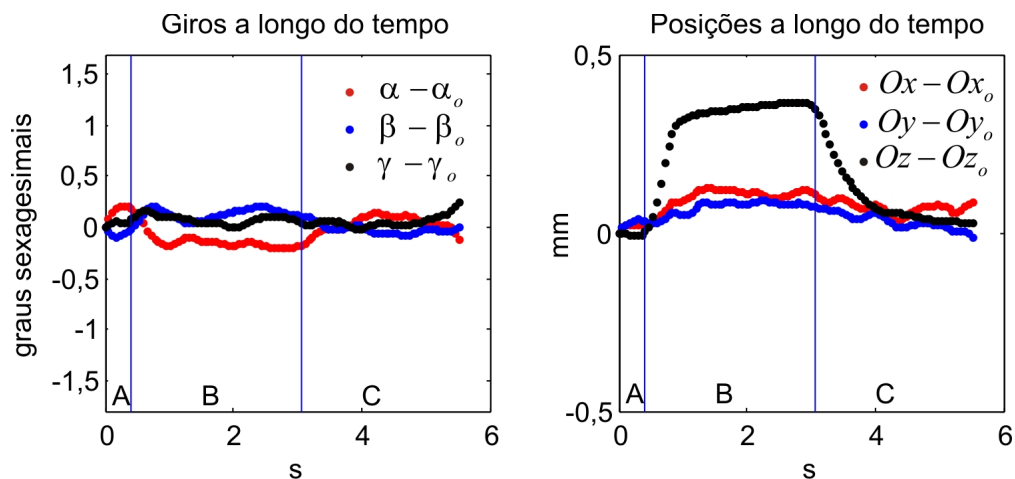


Figura 73: Giros e posições no experimento sete.

O experimento oito tem a mesma configuração de capacitores ativos que os do experimento dois e cinco pero com voltagem 6,5 kV. A Figura 74 mostra crescimento das amplitudes.

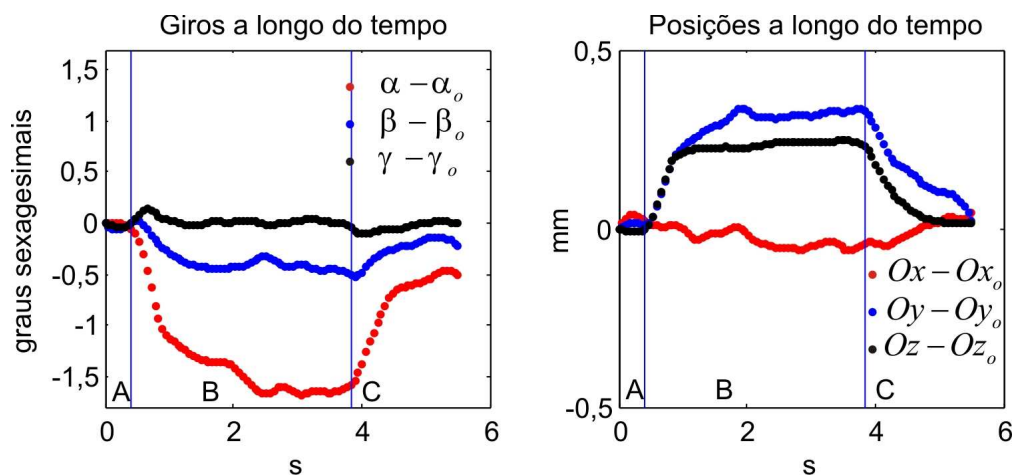


Figura 74: Giros e posições no experimento oito.

Com o capacitor uno ativado a 6,5 kV o experimento nove apresenta maiores amplitudes que os experimentos três e seis. Ver Figura 75.

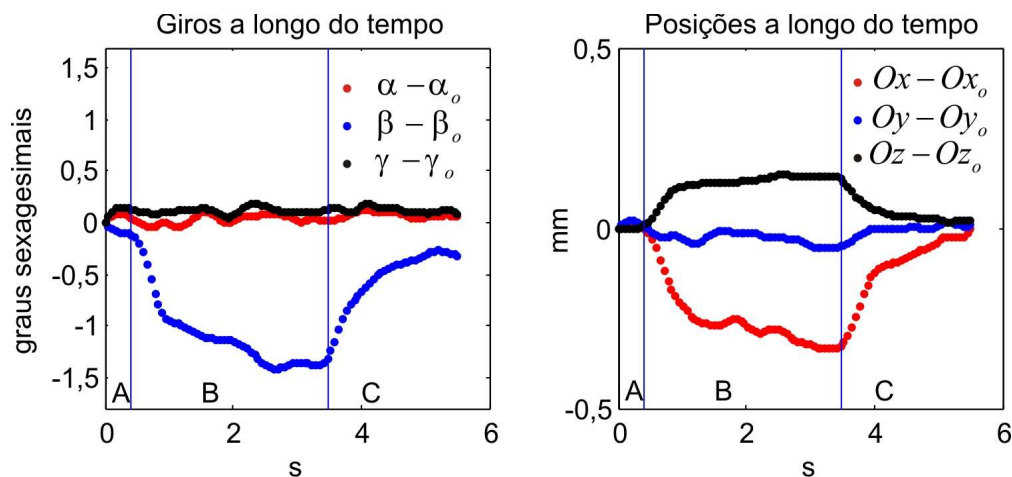


Figura 75: Giros e posições no experimento nove.

O experimento 10 repete o ciclo de experimentos. Ao igual que o primeiro inicia seu movimento com os três capacitores ativos, mas, com 7 kV. A amplitude de Oz é ainda mais apreciável (Figura 76).

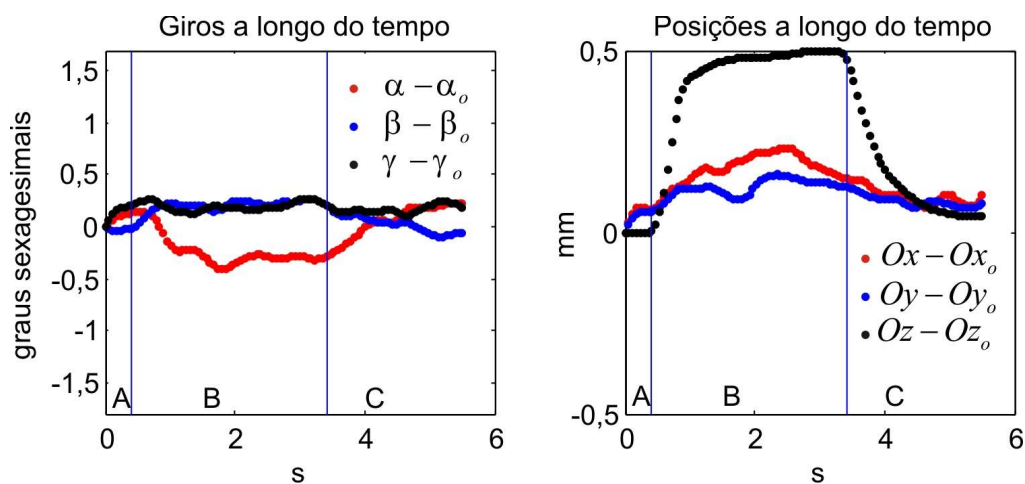


Figura 76: Giros e posições no experimento dez.

Depois de que os capacitores um e três quebraram. O último experimento foi com 8KV no capacitor dois. É apresentado na Figura 77, mas descartado para posteriores análises por apresentar rompimentos.

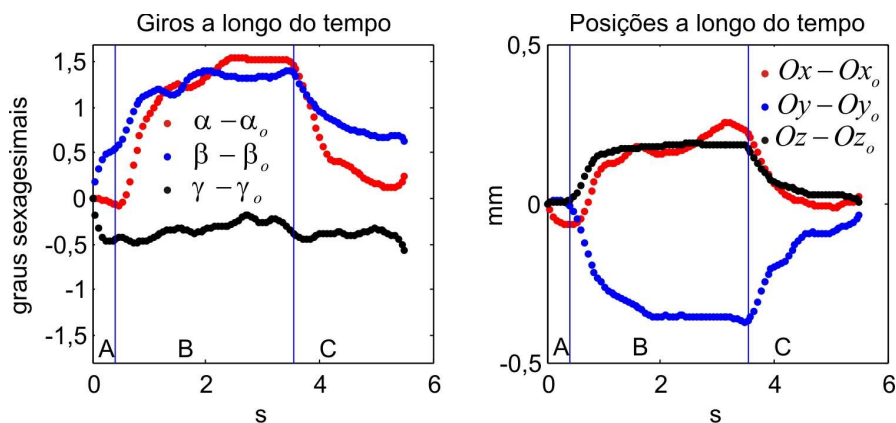


Figura 77: Giros e posições no experimento onze.

Para a análise das amplitudes se juntam os resultados dos experimentos um, quatro, sete e dez (Figura 78a). Como nestes quatro experimentos a configuração de capacitores ativos é o mesmo, de pode apreciar a diferencia de amplitudes. O da para ver que a curva de maior amplitude não conseguiu chegar à posição original, por tanto se precisa de mais tempo de capacitores ativos para uma melhor análise do comportamento visco-elástico. Segundo a Figura 78a o modelo KV deveria pelo menos seguir aquelas curvas. A Figura 78b mostra γ a longo do tempo para os 10 primeiros experimentos e não mostra muita variação, então se conclui que γ não recebe influencia no movimento do atuador e se poderia desprezar em análises dinâmicos.

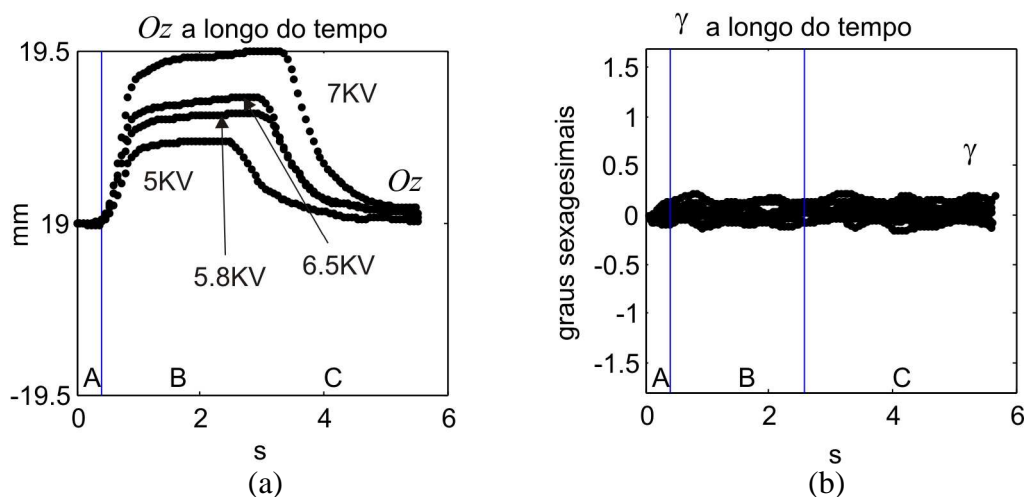


Figura 78: (a) O_z nos experimentos um, quatro, sete e dez. (b) γ nos dez primeiros experimentos.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos experimentos.

Tabela 4: Resumo de experimentos:

Num.	Tensão Elétrica	Primeira parte (0.4 s)	Segunda parte (3 s)	Terceira parte (3 s)
1	5,0KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Ativo Capacitor 3: Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
2	5,0KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
3	5,0KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
4	5,8KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Ativo Capacitor 3: Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
5	5,8KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
6	5,8KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
7	6,5KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Ativo Capacitor 3: Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
8	6,5KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
9	6,5KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
10	7,0KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Ativo Capacitor 2: Ativo Capacitor 3: Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo
11	8,0KV	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Ativo Capacitor 3: Não Ativo	Capacitor 1: Não Ativo Capacitor 2: Não Ativo Capacitor 3: Não Ativo

5.4. Calibração do Atuador

Calibrar o atuador significa estimar parâmetros que caracterizam os elementos do atuador, como suas constantes de rigidez, de amortecimento, e comprimentos naturais. Estimar estes parâmetros é muito importante, pois, ao ser o músculo um material visco-elástico, ele apresenta variações em seu comportamento físico devido a mudanças de temperatura, umidade, fadiga, etc.

Se depois de ter construído o atuador ele for levado a outro tipo de ambiente ou esteve muito tempo expandido por diferentes forças (como a da mola central ou forças externas), então ele tem que ser recalibrado pois os valores dos parâmetros calculados, com o músculo isolado, já mudaram, e para isolá-los de novo o atuador teria que ser desmontado.

Esta calibração é feita a partir da medição, a longo do tempo, das posições Ox , Oy , Oz e ângulos de rotação α , β , γ ao longo do tempo (Figura 79).

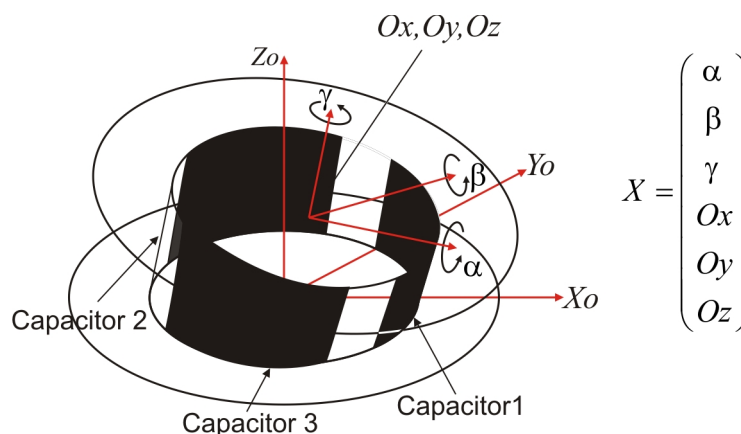


Figura 79: Posições e rotações são medidas a longo do tempo

Se consideram nt medições em intervalos de tempo Δt . O sub-índice j representa a parte do músculo onde não é possível aplicar tensão elétrica, o sub-índice k representa a parte do músculo onde é possível aplicar tensão elétrica. O sub-índice i representa a união dos dois grupos j e k . A Figura 80 mostra a carga que o atuador tem que mover (base inferior fixa) ademais mostra os sub-índices.

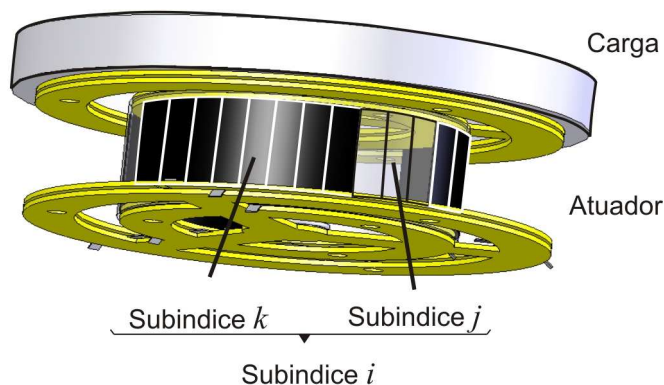


Figura 80: Sub-índice j para as partes sem tensão elétrica, k para as partes com tensão elétrica e i para todo o conjunto.

O procedimento é o seguinte.

1. Se aplica uma tensão elétrica nas paredes do músculo para assim mover a base superior do atuador, e se inicia a medição dos parâmetros (ver Capítulo 4).
2. Se retira a tensão elétrica.
3. Quando a base superior fica estável, terminam as medições.
4. Se capturam os dados obtidos entre os passos 2 e 3 e se faz o cálculo dos parâmetros do músculo no estado natural (sem tensão elétrica)
5. Se capturam os dados obtidos entre os passos 1 e 2, os parâmetros calculados em 4, e se faz o cálculo dos parâmetros do músculo com tensão elétrica.

O método de calibração é para o modelo Kelvin Voigt.

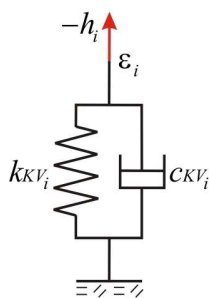


Figura 81: Modelo matemático KV.

Com equação:

$$-k_{KV_i} \cdot \epsilon_i - c_{KV_i} \cdot \dot{\epsilon}_i = h_i$$

Os parâmetros que serão calculados são:

k_{KV_j} : Coeficiente de rigidez para o modelo KV sem tensão elétrica.

c_{KV_j} : Coeficiente de amortecimento para o modelo KV sem tensão elétrica.

K : Constante de rigidez da mola central.

k_{KV_K} : Coeficiente de rigidez para o modelo KV com tensão elétrica.

c_{KV_K} : Coeficiente de amortecimento para o modelo KV com tensão elétrica.

l_K : comprimento natural para o modelo KV com tensão elétrica

Primeiro se faz a calibração do músculo no estado natural (sem tensão elétrica na suas paredes). Os parâmetros neste estado são K , k_{KV_I} e c_{KV_I} , que são calculados a partir de α , β , γ , Ox , Oy e Oz obtidos nos experimentos. As deduções das formulas estão no Apêndice B.

Para simplificar a formula que resolve K , k_{KV_I} e c_{KV_I} , primeiro se definem:

$$CVI_F = -\sum_i \dot{\epsilon}_i \cdot \hat{b}_i \quad (5.1)$$

$$CT_F = -(\|O\| - L) \cdot \hat{o} \quad (5.2)$$

$$RF = m \cdot \ddot{C}g - Fg \quad (5.3)$$

$$CEI_T = -\sum_i \epsilon_i \cdot D_i \times \hat{b}_i \quad (5.4)$$

$$CVI_T = -\sum_i \dot{\epsilon}_i \cdot D_i \times \hat{b}_i \quad (5.5)$$

$$CT_T = A \cdot d \times (\|O\| - L) \cdot \hat{o} \quad (5.6)$$

$$RT = I \cdot \dot{\omega} \quad (5.7)$$

onde A , O , \hat{o} , L , \hat{b}_i , ϵ_i , m , $\ddot{C}g$, Fg , D_i , d , I , ω são vetores e propriedades físicas descritas no Capítulo 2.

Para nt medições existem nt equações vetoriais (três dimensões) referidas às forças, e nt equações vetoriais referidas aos torques, fazendo um total $2 \cdot nt$ equações vetoriais ou $6 \cdot nt$ equações escalares. A formula matricial do sistema de equações é:

$$\begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ nt \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} \begin{matrix} {}^1CEI_F & {}^1CVI_F & {}^1CT_F \\ {}^1CEI_T & {}^1CVI_T & {}^1CT_T \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} \\ \underbrace{\begin{matrix} {}^{nt}CEI_F & {}^{nt}CVI_F & {}^{nt}CT_F \\ {}^{nt}CEI_T & {}^{nt}CVI_T & {}^{nt}CT_T \end{matrix}}_{MKV_{SV}} \end{matrix} \right\} \begin{pmatrix} k_{KV_I} \\ c_{KV_I} \\ K \end{pmatrix} = \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ nt \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} {}^1RF \\ {}^1RT \\ \vdots \\ {}^{nt}RF \\ {}^{nt}RT \end{matrix} \right\} \underbrace{\quad}_{RKV_{SV}} \quad (5.8)$$

Como há mais equações que incógnitas, se usa a matriz pseudo-inversa para obter os primeiros quatro parâmetros:

$$\boxed{\begin{pmatrix} k_{KV_I} & c_{KV_I} & K \end{pmatrix}^T = \left(MKV_{SV}^T \cdot MKV_{SV} \right)^{-1} \cdot MKV_{SV}^T \cdot RKV_{SV}} \quad (5.9)$$

Depois de calcular estes três primeiros parâmetros, se faz o cálculo dos três restantes que correspondem ao músculo com tensão elétrica na suas paredes. Estes

parâmetros são k_{KV_K} , c_{KV_K} e l_K que são calculados a partir de α , β , γ , Ox , Oy , Oz , K , k_{KV_j} e c_{KV_j} (Apêndice B).

Definem-se:

$$CBK_F = -\sum_k B_k \quad (5.10)$$

$$CDK_F = \sum_k \hat{b}_k \quad (5.11)$$

$$CVK_F = -\sum_k \dot{\epsilon}_k \cdot \hat{b}_k \quad (5.12)$$

$$RRF = m \cdot \ddot{C}g - Fmol - \sum_j f_j - Fg \quad (5.13)$$

$$CBK_T = -\sum_k D_k \times B_k \quad (5.14)$$

$$CDK_T = \sum_k D_k \times \hat{b}_k \quad (5.15)$$

$$CVK_T = -\sum_k \dot{\epsilon}_k \cdot D_k \times \hat{b}_k \quad (5.16)$$

$$RRT = I \cdot \dot{\omega} - \sum_j T_j - Tmol \quad (5.17)$$

A fórmula matricial do sistema de $6 \cdot nt$ equações é:

$$\begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ nt \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} {}^1CBK_F & {}^1CDK_F & {}^1CVK_F \\ {}^1CBK_T & {}^1CDK_T & {}^1CVK_T \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ {}^{nt}CBK_F & {}^{nt}CDK_F & {}^{nt}CVK_F \\ {}^{nt}CBK_T & {}^{nt}CDK_T & {}^{nt}CVK_T \end{matrix} \right\} \underbrace{\begin{pmatrix} k_{KV_K} \\ k_{KV_K} \cdot l_K \\ c_{KV_K} \end{pmatrix}}_{MKV_{CV}} = \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ nt \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} {}^1RRF \\ {}^1RRT \\ \vdots \\ {}^{nt}RRF \\ {}^{nt}RRT \end{matrix} \right\} \underbrace{\quad}_{RKV_{CV}} \quad (5.18)$$

Seja:

$$\begin{pmatrix} k_{KV_K} \\ k_{KV_K} \cdot l_K \\ c_{KV_K} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{K_1} \\ N_{K_2} \\ N_{K_3} \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

Como há mais equações que incógnitas, se utiliza a matriz pseudo-inversa para obter:

$$\boxed{(N_{K_1} \quad N_{K_2} \quad N_{K_3})^T = (MKV_{CV}^T \cdot MKV_{CV})^{-1} \cdot MKV_{CV}^T \cdot RKV_{CV}} \quad (5.20)$$

Obtêm-se os últimos três parâmetros:

$$k_{KV_K} = N_{K_1} \quad (5.21)$$

$$l_K = \frac{N_{K_2}}{N_{K_1}} \quad (5.22)$$

$$c_{KV_K} = N_{K_3} \quad (5.23)$$

5.5. Resultados da calibração

A calibração é feita para o modelo KV no intervalo de tempo quando os capacitores são desligados em consequência a calibração é só para o músculo no estado natural (sem tensão elétrica). A Figura 82 mostra, para cada experimento descrito na tabela 4, na parte esquerda a constante da mola central K em N/mm, no centro, a rigidez por unidade de comprimento $\rho k_o = \frac{k_{KV_J}}{\Delta\theta \cdot Rbase}$ e por último na direita a constante de amortecimento por unidade de comprimento $\rho c_o = \frac{c_{KV_J}}{\Delta\theta \cdot Rbase}$ onde $\Delta\theta$ é o ângulo de uma volta dividido entre o numero de partições do músculo, e $Rbase$ é o radio das bases.

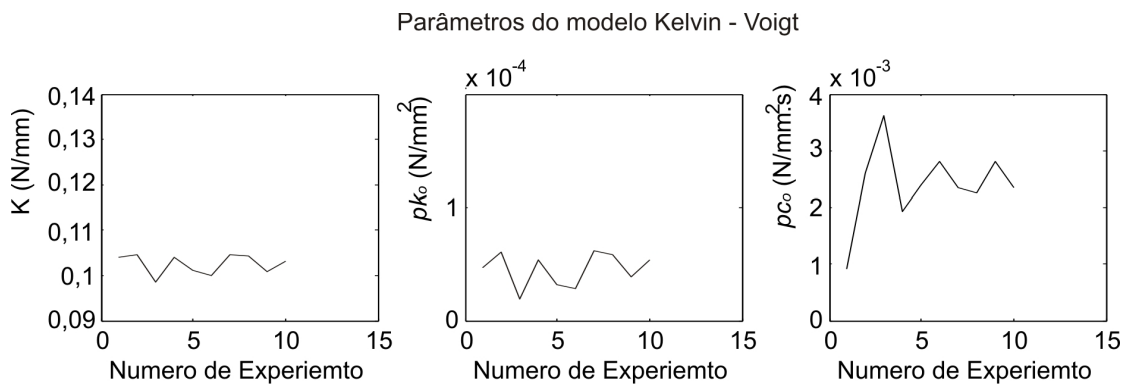


Figura 82: Parâmetros calculados nos dez experimentos.

Para K os valores são muito parecidos para ρk_o e ρc_o é muito oscilatório, mas todos estes valores geram resultados similares na hora do calculo dos ângulos de rotação.

A Figura 83 mostra o experimento dez com ajuste feito para o modelo KV com parâmetros $\rho k_o = 0,1 \times 10^{-4} \frac{N}{mm^2}$, $\rho c_o = 2,5 \times 10^{-3} \frac{N \times s}{mm^2}$ e $K = 0,1 \frac{N}{mm}$ da mola central. Pode-se apreciar um bom desempenho nos ângulos.

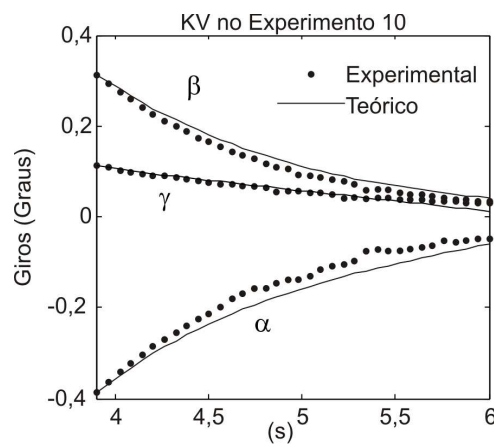


Figura 83: Ajuste para o modelo KV.

5.6. Validação

Para validar a calibração se usa um experimento para calcular os parâmetros. Estes parâmetros devem mostrar bom desempenho nos outros experimentos. Usaram-se os parâmetros obtidos a partir do experimento 10:

$$\rho k_o = 0,1 \times 10^{-4} \frac{N}{mm^2} \quad (5.24)$$

$$\rho c_o = 2,5 \times 10^{-3} \frac{N \times s}{mm^2} \quad (5.25)$$

$$K = 0,1 \frac{N}{mm} \quad (5.26)$$

Usaram-se os parâmetros calibrados com o experimento dez para calcular os as curvas do experimento oito. Os resultados apresentados na Figura 84 mostram bom desempenho nos ângulos.

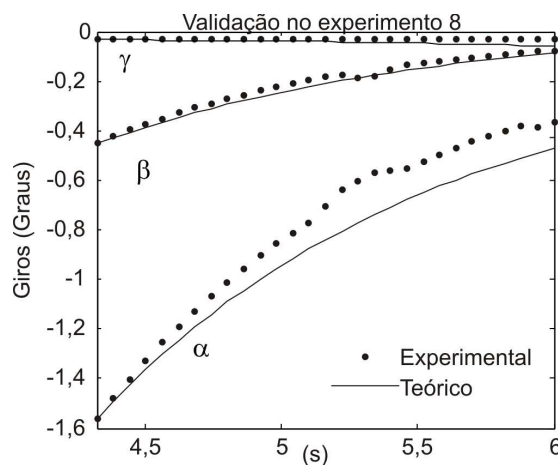


Figura 84: Resultados do experimento oito para a validação.

Agora se calcula as curvas correspondentes ao experimento onze. A Figura 85 mostra que os cálculos teóricos para ângulos fazem bom seguimento aos experimentais.

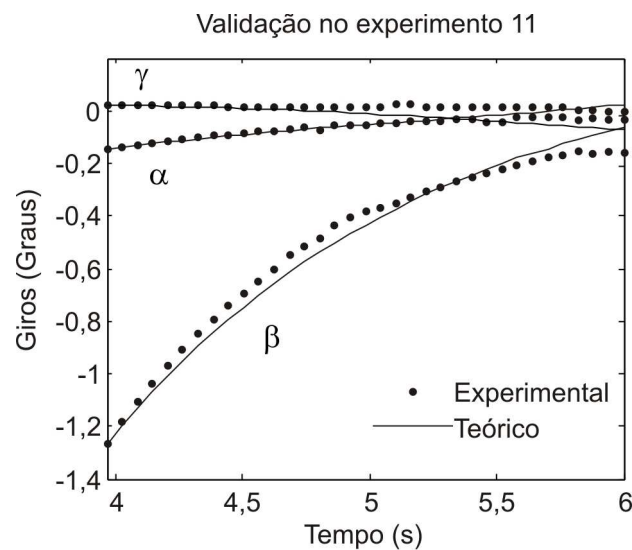


Figura 85: Resultados do experimento onze para a validação.

As três figuras anteriores mostram boa validação nos ângulos e regular nas posições. Então este modelo é útil em aplicações que implicam rotações. Os modelos de Zener, KV+A e Burgers, ao possuir mais parâmetros, são mais flexíveis ao ajuste, em consequência representam melhor o atuador.