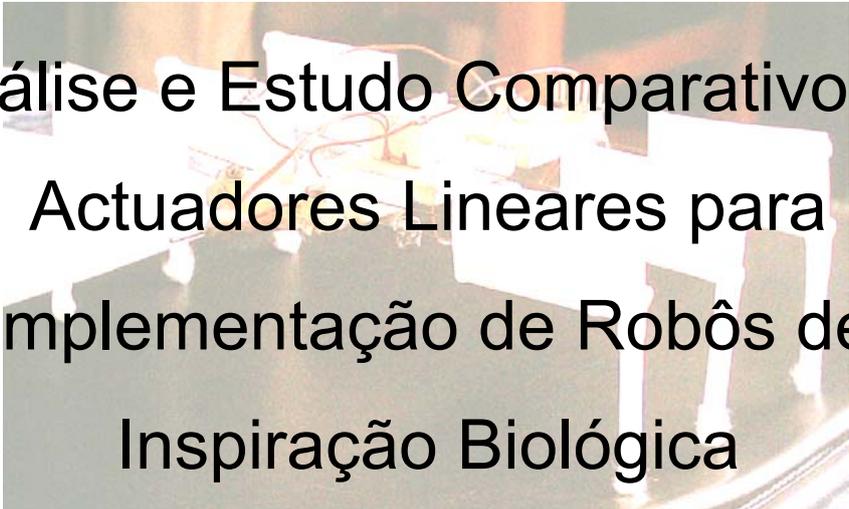


Projecto de Automação

Relatório Final



Análise e Estudo Comparativo de
Actuadores Lineares para
Implementação de Robôs de
Inspiração Biológica

Departamento de Mecânica – Universidade de Aveiro

Realizado por:

Marco Melo 14805

Vasco Quinteiro 16410

Orientadores:

Prof. Dr. Filipe Silva

Prof. Dr. Vítor Santos

Índice

1 – Introdução.....	2
2 – Objectivos.....	3
3 – Músculos Artificiais Eléctricos	4
3.1 – “Muscle Wires” (Nitinol).....	4
3.1.1 – Princípio de Funcionamento	5
3.1.2 – Material Utilizado	7
3.2 – Robô Hexápode Actuado por “Muscle Wires”	7
3.2.1 – Montagem da Estrutura do Boris	7
3.2.2 – Instalação dos “Muscle Wires”	13
3.2.3 – Ligações Eléctricas	15
3.2.4 – Número de Músculos e Padrão de Locomoção	16
3.2.5 – Método Utilizado para o Controlo do Robô	17
4 – Músculos Artificiais Pneumáticos.....	20
4.1 – Construção do Actuador	20
4.2 – Princípio de Funcionamento	21
4.3 – Propriedades e Características dos Músculos	22
4.4 – Comparação com outros Músculos Existentes.....	27
4.5 – Modelo Estático Teórico do Actuador	28
4.6 – Braço Robótico Actuado por Músculos Artificiais Pneumáticos	36
4.6.1 – Estrutura Biomecânica do Braço Humano	36
4.6.2 – Modelo Geométrico	36
4.6.1.1 – O Ombro	37
4.6.1.2 – O Cotovelo	38
4.6.3 – Programa de Simulação em MATLAB.....	40
4.6.4 – Estudo dos Pontos de Inserção.....	43
4.7 – Sistema de Controlo na Simulação de Movimento.....	47
4.7.1 – Método de Controlo Clássico.....	47
4.7.2 – Método de Controlo no Espaço dos Músculos	48
4.8 – Projecto Mecânico e Estrutural	50
4.8.1 – Junta Rotacional no Ombro	51
4.8.2 – Junta Rotacional no Cotovelo.....	51
4.8.3 – Idealização da Estrutura do Braço	52
4.9 – Primeiros Conceitos de Controlo	53
5 – Conclusões.....	56
6 – Questões em Aberto	58
7 – Referências	59
8 – Anexos	60

1 – Introdução

A robótica trata de máquinas multi-funcionais e reprogramáveis, que podem executar tarefas normalmente associadas a seres humanos. É notória a aspiração patente desde os primórdios da evolução da robótica até aos equipamentos mais recentes, de construção de sistemas aptos a copiar as capacidades físicas e mentais do humano.

Esta disciplina evoluiu muito desde a sua altura de maior expansão nos meados dos anos oitenta. No entanto, muito trabalho tem ainda de ser feito, nomeadamente em termos de controlo de força, retroacção visual, integração sensorial e até sobre novas estruturas mecânicas e novos materiais conduzindo a robôs mais leves e flexíveis.

Um dos mais complexos problemas é ainda, capacitar um sistema robótico para interagir num ambiente não controlado [7].

Actualmente, um sistema robótico é constituído por vários elementos rígidos ligados por juntas. As juntas são geralmente actuadas por motores eléctricos, redutores e combinação de mecanismos de transmissão.

A ineficiência evidenciada pelos actuadores rotacionais, devida em grande medida aos elevados requisitos de actuação impostos pelos transitórios das tarefas em causa, é também um factor para demandar um novo caminho de evolução. Na realidade os sistemas “*joint-actuated*” apresentam-se incapazes de propiciar as compensações possibilitadas pelos sistemas “*muscle-actuated*” existentes ao nível biomecânico. Assim sendo, torna-se um caminho lógico a tomar, a cópia possível dos sistemas biológicos, tal como os seus funcionalismos e respectivos mecanismos.

Uma abordagem exequível é a *biorrobótica* que envolve conhecimentos na área da fisiologia neuromuscular e biomecânica com vista ao design e concepção de sensores robóticos, actuadores, circuitos e algoritmos de controlo [8].

Com o aumento do interesse em redor destes temas dá-se um desenvolvimento, directamente relacionado, de uma nova geração de actuadores que evidenciam propriedades similares aos músculos reais.

Estes actuadores surgem pois, para muitos elementos da comunidade científica, como um caminho a tomar tendo em vista uma aproximação ao factor mais eficiente que continua a ser o factor humano, de forma a desenvolver robôs mais eficientes, competentes ao nível de efectuar tarefas complexas com um baixo consumo de energia e um peso mais reduzido.

A concepção, aplicação, benefício destes actuadores requer numa fase anterior o estudo dos aspectos biomecânicos tal como a investigação na área das estruturas e materiais passíveis de os constituir.

Actuadores e sistemas mecânicos que imitam as alavancas providenciadas pelas estruturas ósseas e muscular revelam-se uma opção fundamental no sentido do desenvolvimento de uma nova geração de manipuladores robóticos [5].

2 – Objectivos

O principal objectivo delineado para o trabalho é, efectivamente, o estudo de uma nova geração de actuadores lineares, reputados como músculos artificiais e a respectiva quantificação do potencial de aproveitamento no campo da robótica. Este objectivo principal é seccionado, na medida em que serão dois tipos de músculos artificiais analisados. É também um propósito do trabalho, a comparação, se praticável, entre os músculos em análise.

Assim teremos, representando a actuação eléctrica os “*muscle-wires*” sendo o segundo tipo de músculos actuados de forma pneumática, denominados “*air muscles*”.

No caso dos “*air muscles*” para que o estudo tenha um desenvolvimento governado e conseqüente apresenta-se como necessário não só o conhecimento do músculo no seu todo mas também das possibilidades providenciadas pelas suas partes constituintes.

Para que o objectivo primordial seja atingido é indispensável o alcance de metas intermediárias como o conhecimento claro das potencialidades de cada músculo e as limitações impostas pela sua natureza. Para isso conduz-se uma série de experiência de complexidade crescente que, pelo que implicam, pressupõem um adquirir de conhecimentos. No final, o pretendido é realmente construir dispositivos robóticos usando a tecnologia em estudo, colocando as soluções ao nível dos mecanismos de actuação solicitados de uma forma, mais próxima possível de um hipotético formato de aplicação.

Com esta finalidade em mente, propõem-se a construção de um braço robótico para verificar e observar os “*air muscles*” e um robô hexápode simples para a análise dos “*muscles wires*” em uso prático. Desta forma a classificação da qualidade do desempenho dos músculos artificiais toma uma orientação mais vasta, alargando por conseguinte, os parâmetros de avaliação que porventura inicialmente se pudessem ter como adquiridos.

3 – Músculos Artificiais Eléctricos

3.1 – “Muscles Wires” (Nitinol)

Os “*muscle Wires*” são fios de pequeno diâmetro de uma liga de 50% de Níquel e 50% de titânio. Quando submetidos à passagem de uma determinada corrente eléctrica são capazes de desenvolver uma movimentação mecânica, chegando a contrair cerca de 5% a 10% do seu comprimento inicial. O nitinol constitui um deste tipo de actuação sendo a sua estrutura cristalina dinâmica e sensível à variação da temperatura externa. Quando a temperatura de transição da liga na sua fase martensítica é ultrapassada existe uma alteração de comprimento e forma, será precisamente esta característica que pretendemos aproveitar para elaborar o nosso estudo.

O flexinol, que é um derivado do nitinol, possui características no que diz respeito à resistência à passagem da corrente eléctrica interessantes, pois ao ser percorrido por uma corrente eléctrica este contrai. Devido ao aumento da sua temperatura provocado pela passagem de uma corrente eléctrica a sua temperatura de transição é ultrapassada conseqüentemente proporcionando uma actuação linear relevante para a sua implementação em estruturas mecânicas.

Pretende-se pois, implementar esta tecnologia na concepção de um robô hexápode e saber até que ponto é que esta se revela suficientemente eficaz no que concerne à sua capacidade de controlo. Através da facilidade ou não do controlo associado a esta tecnologia procura-se também elaborar testes de padrão de locomoção para assim saber se se trata de uma solução alternativa ao tipo de actuação convencional.

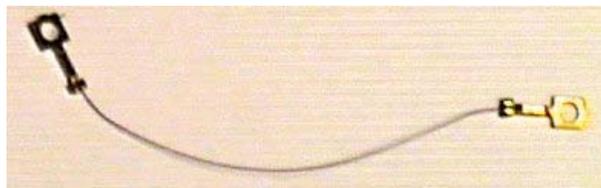


Figura 1 – “Muscle Wire” (Nitinol)

3.1.1 – Princípio de Funcionamento

Os “*muscles wires*” pertencem a uma classe de ligas metálicas que possuem uma característica chamada de “*Shape Memory Effect*” (SME). Estas ligas (“*shape memory*” alloys, SMAs) têm uma estrutura cristalina uniforme que altera radicalmente para uma estrutura diferente consoante uma temperatura diferente. Quando estas ligas se encontram a uma temperatura abaixo da temperatura de transição, esta pode ser esticada e deformada sem que ocorram danos permanentes. Este comportamento é mais evidente neste tipo de ligas do que na maior parte dos restantes metais. Uma vez a liga esticada, e caso esta seja aquecida (quer pela passagem de corrente eléctrica, quer pela existência de uma fonte de temperatura exterior), abaixo da sua temperatura de transição, a liga recupera a sua posição inicial, isto é, contrai e elimina a deformação provocada pelo facto de esta ter sido esticada.

Este tipo de actuador é normalmente utilizado em forma de pequenos fios, e uma vez neste estado, estas ligas podem ser esticadas até 10% do seu comprimento inicial, quando a temperatura se encontra abaixo da temperatura de transição. Quando aquecidas, estas ligas voltam ao seu comprimento original e contraem com uma adequada aplicação de uma força no processo. A figura que se segue demonstra este processo.

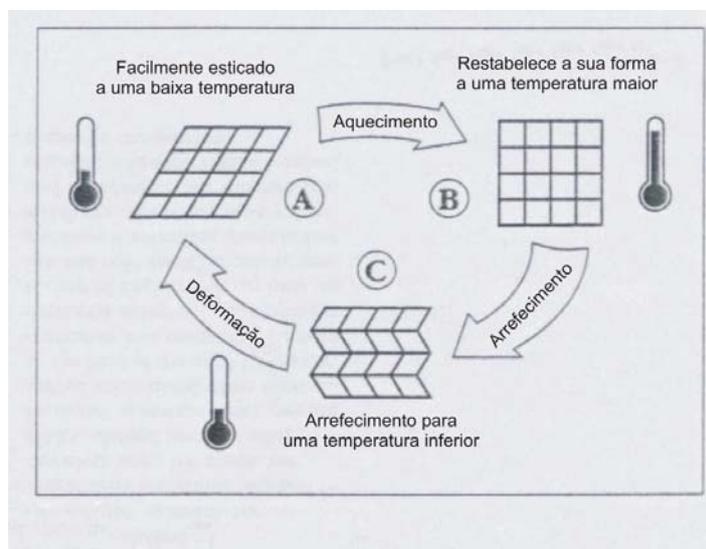


Figura 2 – Mecanismo do “Shape Memory Effect”

Descrição da figura 2: As grelhas representam a estrutura cristalina de um tradicional “Shape Memory Alloy” (SMA), em que cada quadrado contém uma mistura uniforme dos componentes da liga. O metal deforma-se facilmente quando abaixo da sua temperatura de transição (A) e a deformação dos limites do cristal não sofrem danos permanentes.

Aquecendo a liga acima da sua temperatura de transição provoca nos cristais uma fase em que a sua forma original é restabelecida (B); este fenómeno acontece mesmo quando está aplicada sobre a liga uma força bastante grande, muita das vezes esta força é superior à força que foi necessária para a deformar. Finalmente quando a liga é arrefecida para uma temperatura abaixo da sua temperatura de transição o esta pode ser novamente deformada (C).

SMA têm sido feitas através de um série de combinações de vários elementos metálicos. A temperatura de transição varia para cada liga, e pode ser estabelecida durante a manufactura, através de um cuidado controlo das proporções dos componentes metálicos, e pela presença de outros elementos.

A liga mais utilizada é o nitinol, que consiste numa praticamente igual quantidade de níquel e titânio. Diferenças com menos de 1% nas suas proporções podem alterar a temperatura de transição da liga. As ligas utilizadas a uma temperatura ambiente (20°C) têm uma temperatura de transição perto dos 70°C.

As ligas que têm uma temperatura de transição muito alta têm um ciclo mais rápido, uma vez que arrefecem mais rapidamente à temperatura ambiente, mas por outro lado necessitam de um maior aquecimento para activar.

As ligas que têm uma temperatura de transição abaixo da temperatura ambiente geralmente necessitam de ser arrefecidas para atingir o seu estado de relaxamento, mas continuam activas quando são mantidas à temperatura ambiente. Em funcionamento as SMAs têm histerese, ou por outras palavras, têm um espaço entre a temperatura do fenómeno da contracção e temperatura do relaxamento, onde a activação ocorre a uma temperatura ligeiramente mais alta do que o relaxamento.

A figura 3 representa uma curva típica temperatura versus contracção para os “*muscle wires*” e o fenómeno da histerese.

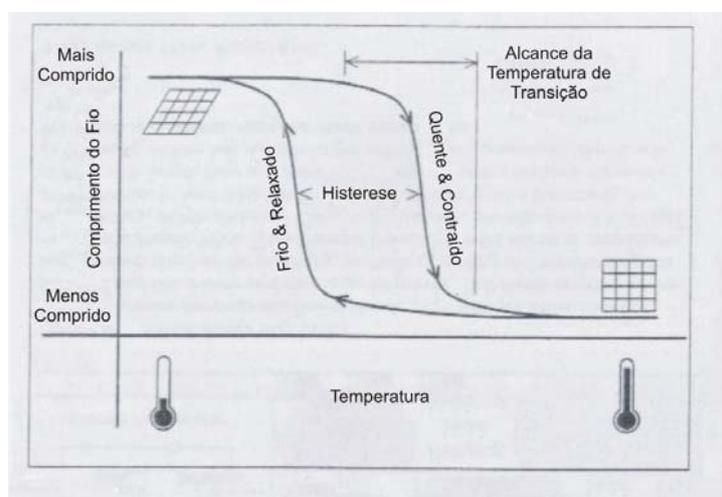


Figura 3 – Temperatura vs comprimento dos “*Muscle Wires*”

Descrição da figura 3: Este gráfico demonstra como um “Muscle Wire” sob a influência de uma força constante varia o seu comprimento com a variação da temperatura. Um típico “Muscle Wire” relaxa a uma temperatura baixa, posteriormente contrai com o aumento da temperatura. Esta diferença cria histerese, ou um estado em que o “Muscle Wire” tanto pode ser contraído ou relaxado consoante o seu ponto de partida.

3.1.2 – Material Utilizado

Para proceder ao estudo deste tipo de actuadores, utilizaram-se fios de flexinol do tipo 100 LT, com um diâmetro de 100 μm , com uma temperatura de activação de 70°C, resistência de 150 Ω/m , uma força de recuperação recomendada de 150 g, um força de deformação recomendada de 28 g, uma corrente recomendada de 180 mA e um deformação de 3-5%. Este material foi obtido através de uma empresa Norte Americana, Mondo – Tronics, que juntamente com os “Muscle Wires” fornece um livro onde são apresentados uma série de projectos, através dos quais se podem observar na prática as potencialidades deste tipo de actuadores.

3.2 – Robô Hexápode Actuado por “Muscle Wires”

3.2.1 – Montagem da Estrutura do Boris

Para observar a forma como este tipo de actuadores se comporta, optou-se por construir um pequeno robô hexápode de baixo custo e com grande potencial de expansão e adaptação. Este robô, de seu nome Boris, foi inicialmente desenvolvido pela Mondo-Tronics. Para a construção do Boris foram necessários os seguintes materiais:

70 cm fio de aço $\approx \varnothing 0.38 \text{ mm}$	1 ficha de 8 pinos
15 cm fio de aço $\approx \varnothing 1.25 \text{ mm}$	Madeira Balsa de 6 mm de espessura
16 parafusos 1/8'' e respectivas porcas	Folha de plástico de 1.25 mm de espessura
12 cm tubo de plástico $\approx \varnothing 3 \text{ mm}$ exterior; $\varnothing 1.5 \text{ mm}$ interior	Solda de estanho, Cola Epoxy
36 cm tubo de plástico $\approx \varnothing 2.5 \text{ mm}$ exterior; $\varnothing 1.25 \text{ mm}$ interior	Fio de cobre revestido com plástico
60 cm Muscle Wire, $\varnothing 100 \mu\text{m}$	

Cortar e dobrar o fio de aço num rectângulo tal como se mostra na figura a seguir.



Figura 4 – Componente da perna

O fio de aço providencia a estrutura e a força de recuperação para cada uma das pernas.

Em seguida soldar o rectângulo utilizando o estanho e pasta desoxidante própria para soldas de estanho. No mesmo sítio onde se soldar o rectângulo juntar 12 cm de fio de cobre tal como se demonstra na figura.

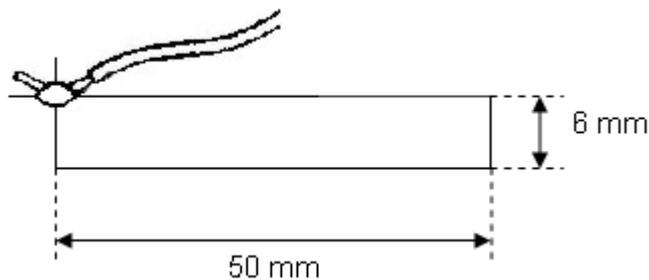


Figura 5 – Componente da perna com fio soldado

Este processo deverá ser repetido seis vezes.

Soldar a porca a um rectângulo tal como mostra a figura.

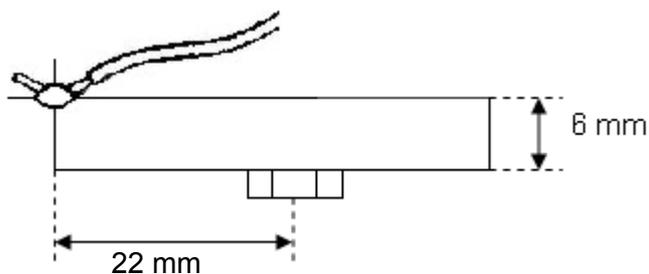


Figura 6 – Componente da perna com porca soldada

Fazer 3 pernas direitas e 3 pernas esquerdas.

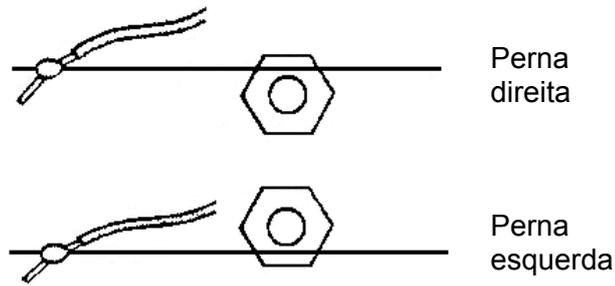


Figura 7 – Componente da perna com porca e fio soldados

Soldar nas restantes 10 porcas uma ponta de fio de cobre com aproximadamente 12 cm de comprimento.

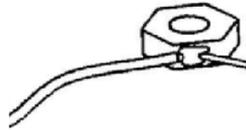


Figura 8 – Porca com fio soldado

Ter cuidado para em qualquer uma das porcas não deixar entrar solda para a rosca, caso isso aconteça é conveniente substituí-la. Em relação ao corpo do robô, cortar 3 pequenos bocados de madeira de balsa com as dimensões de 35 mm X 35 mm e cortes como mostra a figura a seguir.

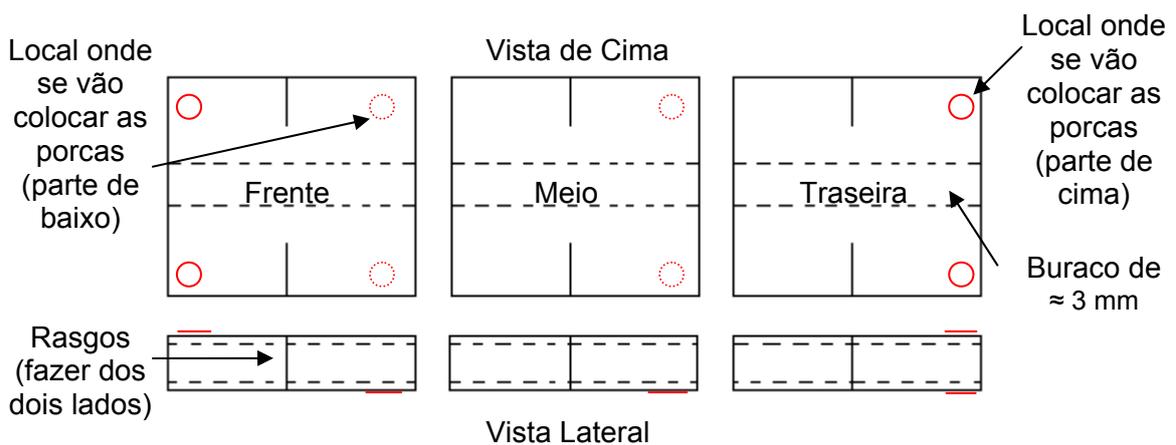


Figura 9 – Módulos de madeira de balsa

Colocar o rectângulo direito e esquerdo nas respectivas ranhuras de cada um dos módulos, colocando a porca segundo a posição indicada. Para fixar o rectângulo nos módulos utilizar a cola epoxy.

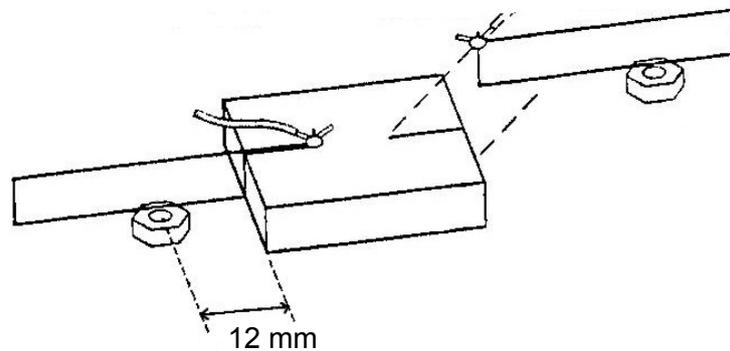


Figura 10 – Montagem do componente da perna no módulo

A parte de cima e de baixo do rectângulo devem ficar coincidentes com a parte de cima e de baixo, respectivamente da madeira. Repetir o processo para os restantes dois módulos.

Preparar as 10 porcas com os fios soldados a elas e colá-las nos locais indicados na figura anterior. O resultado final deverá ser o seguinte.

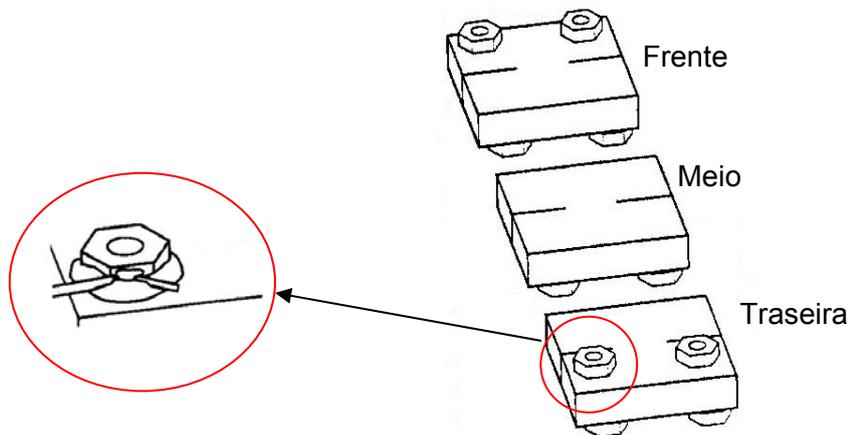


Figura 11 – Módulos de balsa da estrutura

No buraco que existe no centro de cada um dos módulos inserir um tubo de plástico com aproximadamente 4 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro, centrando-o de forma a que ambas as pontas tenham o mesmo comprimento quando de fora.

Colocar cola epoxy na saída de cada um dos buracos do módulo de forma a fixar o tubo de plástico à madeira. Repetir o processo para os restantes dois módulos.

Depois de colocados os três pedaços de tubo de plástico no interior de cada um dos módulos, introduzir o fio de aço com 15 cm de comprimento nos buracos dos tubos de plástico, segundo a ordem indicada.

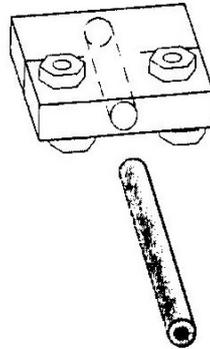


Figura 12 – Tubo de plástico central

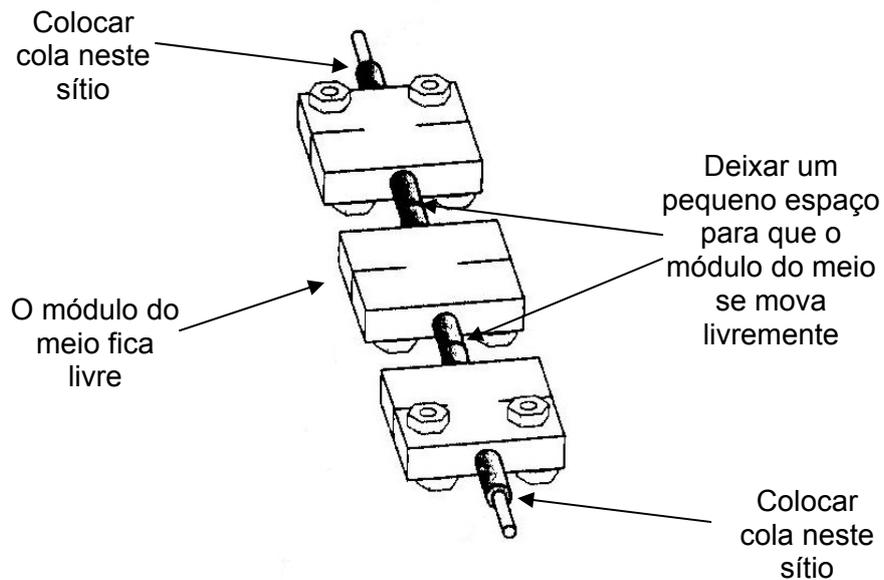


Figura 13 – Conjunto dos três módulos com o tubo de plástico central

Cortar os painéis para as pernas da folha de plástico com 1.25 mm de espessura e colá-los aos rectângulos. Para cada rectângulo de fio são necessários dois painéis com as seguintes dimensões 50 mm X 25 mm.

Colocar cola neste sítio, para garantir a fixação do painel de plástico no rectângulo de fio de aço

Garantir que os dois painéis fiquem correctamente colocados um contra o outro.

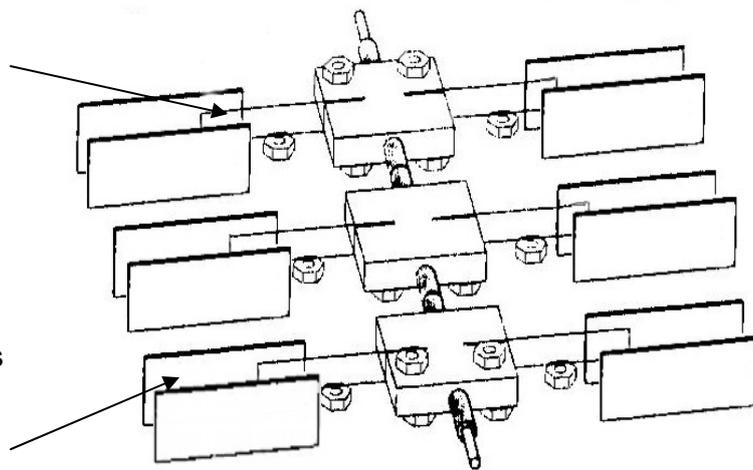


Figura 14 – Colocação das folhas de plástico nos rectângulos das pernas

Colocar o conjunto sobre um bloco de cassetes e lápis e colar as pernas de plástico com aproximadamente 5 cm de comprimento nos painéis, ajustando-as por forma a que estas fiquem em contacto com a superfície.

Colar neste sítio as pernas de plástico

Garantir que todas as pernas fiquem com o mesmo comprimento

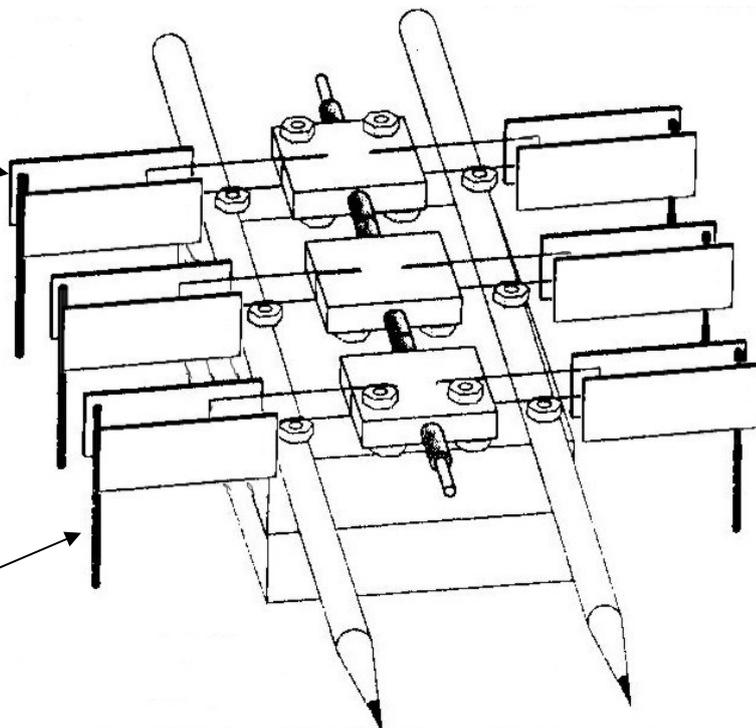


Figura 15 – Colocação das pernas

Cortaram-se dois pedaços de madeira com 20 mm X 15 mm e 2 bocados de tubo de plástico. Colaram-se os pedaços de madeira no topo do módulo do meio da estrutura e os dois pedaços de tubo em cima dos dois bocados de balsa.

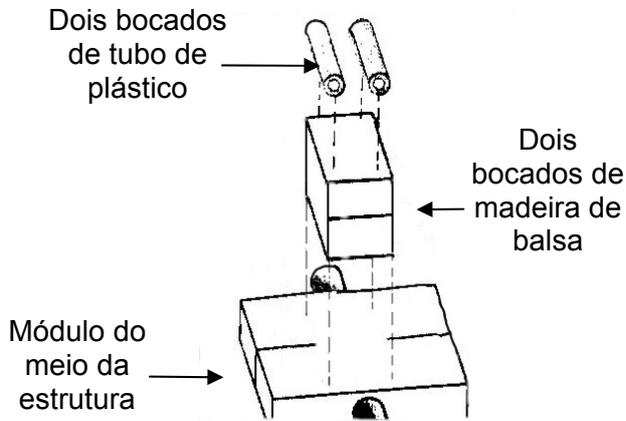


Figura 16 – Parte superior da estrutura

3.2.2 – Instalação dos “Muscle Wires”

Depois da construção da estrutura estar finalizada procede-se à instalação dos actuadores lineares, para tal introduzir os parafusos nas respectivas porcas existentes no Boris e colocar um determinado comprimento de Muscle Wire com 100 µm de diâmetro numa das pernas de modo a que fique entre o parafuso e a porca.

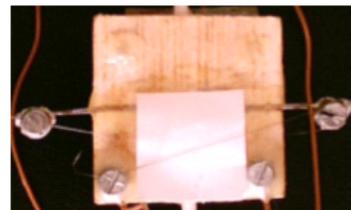
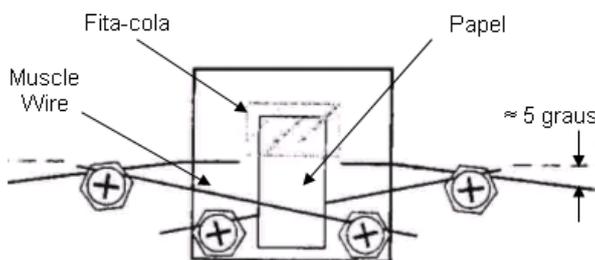


Figura 17 – Parte de baixo de um dos módulos

Foram fixados os “Muscle Wire” debaixo do parafuso na parte de baixo do módulo tal como na figura. Manter um tensão suficiente no músculo por forma a dobrar ligeiramente e em seguida apertar o parafuso para o segurar. Esta tensão fornece a

força de recuperação necessária para estender o “Muscle Wire” depois deste arrefecer. Cortar o músculo, deixando em bocado extra para futuros ajustes e repetir este procedimento para as restantes pernas.

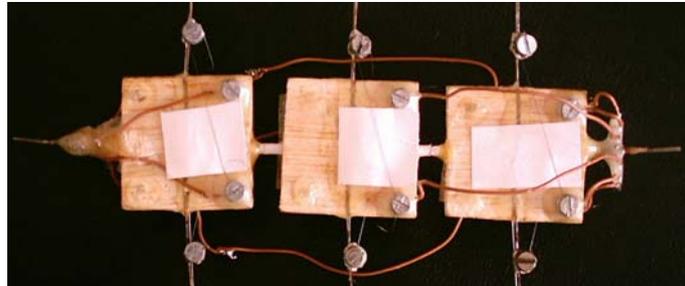


Figura 18 – Parte de baixo da estrutura

Em cada módulo como os músculos se cruzam e para evitar curto circuito, separá-los com um bocado de papel.

Na parte de cima da estrutura colocar um determinado comprimento de músculo para o levantamento da parte esquerda e para o da parte direita. Fazer passar os músculos no separador central, evitando assim qualquer curto circuito. Ajustar os músculos por forma a que estes tenham suficiente folga para deixar o módulo do meio mover-se para cima e para baixo aproximadamente 1 cm de altura como mostra a figura.

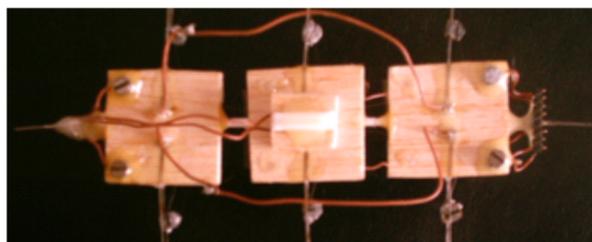
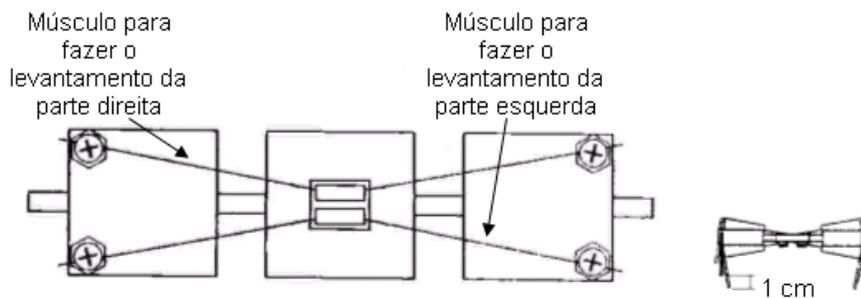


Figura 19 – Parte de cima da estrutura

Estes músculos puxam o módulo do meio de um lado para o outro para promover o movimento de levantamento das pernas.

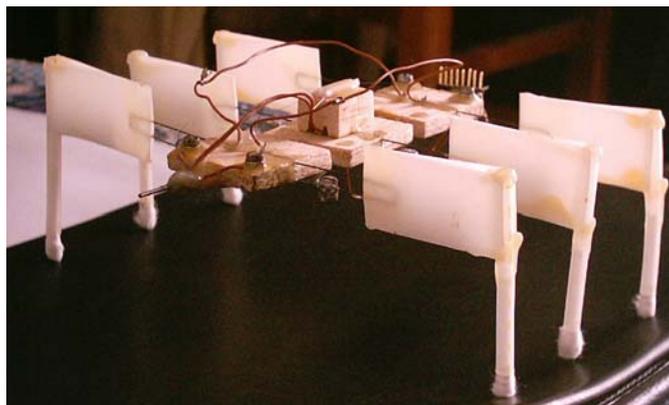


Figura 20 – Aspecto final da estrutura

3.2.3 – Ligações Eléctricas

O esquema que se segue descreve as ligações físicas e eléctricas da estrutura. O fio de aço do meio actua como um fonte de energia comum para todos os “Muscle Wire”.

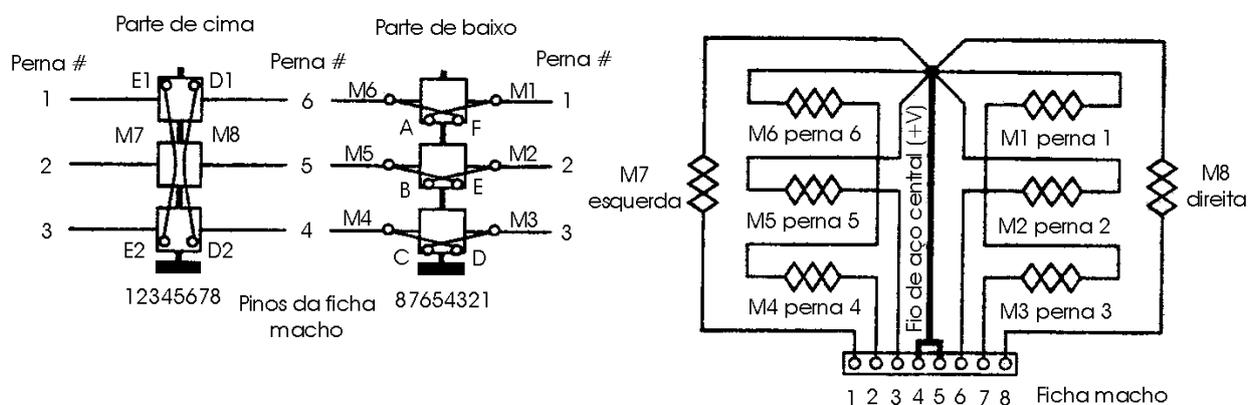


Figura 21 – Esquema Eléctrico

Ligações na parte de cima

Fios das porcas E1 e D1 ligados ao fio de aço central

Fio da porca E2 ligado ao pino 1

Fio da porca D2 ligado ao pino 8

Ligações na parte de baixo

Fio da porca A ligado ao fio da perna 3

Fio da porca B ligado ao pino 6

Fio da porca C ligado ao pino 7

Fio da porca D ligado ao pino 2

Fio da porca E ligado ao pino 3

Fio da porca F ligado ao fio da perna 4

Fios das pernas 1, 2, 5 e 6 ligados ao fio de aço central

Pino 4 e 5 ligados ao fio de aço central

Foi soldado ao pino 4 e 5 o fio de aço do meio para uma boa ligação eléctrica e física.

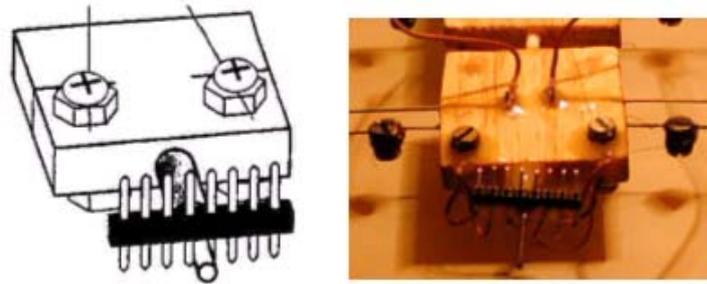


Figura 22 – Ligação da ficha macho com 8 pinos ao fio de aço central

3.2.4 – Número de Músculos e Padrão de Locomoção

Esta estrutura, requer o uso de 8 “Muscle Wires” a funcionar independentemente para criar todos os movimentos; 1 “Muscle Wires” em cada uma das pernas para fazer o movimento para a frente e para trás, e 2 para levantar alternadamente as pernas para cada um dos passos.

Para obter os diferentes tipos de movimento possíveis utilizando os 8 músculos independentes foram utilizados os seguintes padrões de locomoção:

Movimento pretendido	Activar na porta paralela	Correspondente perna	Correspondente músculo
Andar para a frente	Bit 6 ; Bit 0	Perna 1, 3 ; Perna 5	M1, M3 ; M5
	Bit 2	Levantamento da parte esquerda	M7
	Bit 7 ; Bit 1	Perna 2 ; Perna 4, 6	M2 ; M4, M6
	Bit 5	Levantamento da parte direita	M8
Andar para trás	Bit 6 ; Bit 0	Perna 1, 3 ; Perna 5	M1, M3 ; M5
	Bit 5	Levantamento da parte direita	M8
	Bit 7 ; Bit 1	Perna 2 ; Perna 4, 6	M2 ; M4, M6
	Bit 2	Levantamento da parte esquerda	M7
Andar para a esquerda	Bit 6 ; Bit 1	Perna 1, 3 ; Perna 4, 6	M1, M3 ; M4, M6
	Bit 5	Levantamento da parte direita	M8
	Bit 7 ; Bit 0	Perna 2 ; Perna 5	M2 ; M5
	Bit 2	Levantamento da parte esquerda	M7
Andar para a direita	Bit 6 ; Bit 1	Perna 1, 3 ; Perna 4, 6	M1, M3 ; M4, M6
	Bit 2	Levantamento da parte esquerda	M7
	Bit 7 ; Bit 0	Perna 2 ; Perna 5	M2 ; M5
	Bit 5	Levantamento da parte direita	M8

Tabela 1 – Padrões de Locomoção

O ciclo correspondente a cada movimento pretendido repete-se assim que é activado o último bit, para que o robô mantenha o seu movimento.

Como exemplo apresenta-se em seguida uma sequência de imagens que tentam descrever o ciclo correspondente ao movimento para a frente. Juntamente com o

movimento das pernas pode-se visualizar os correspondentes bit's na placa a serem activados.

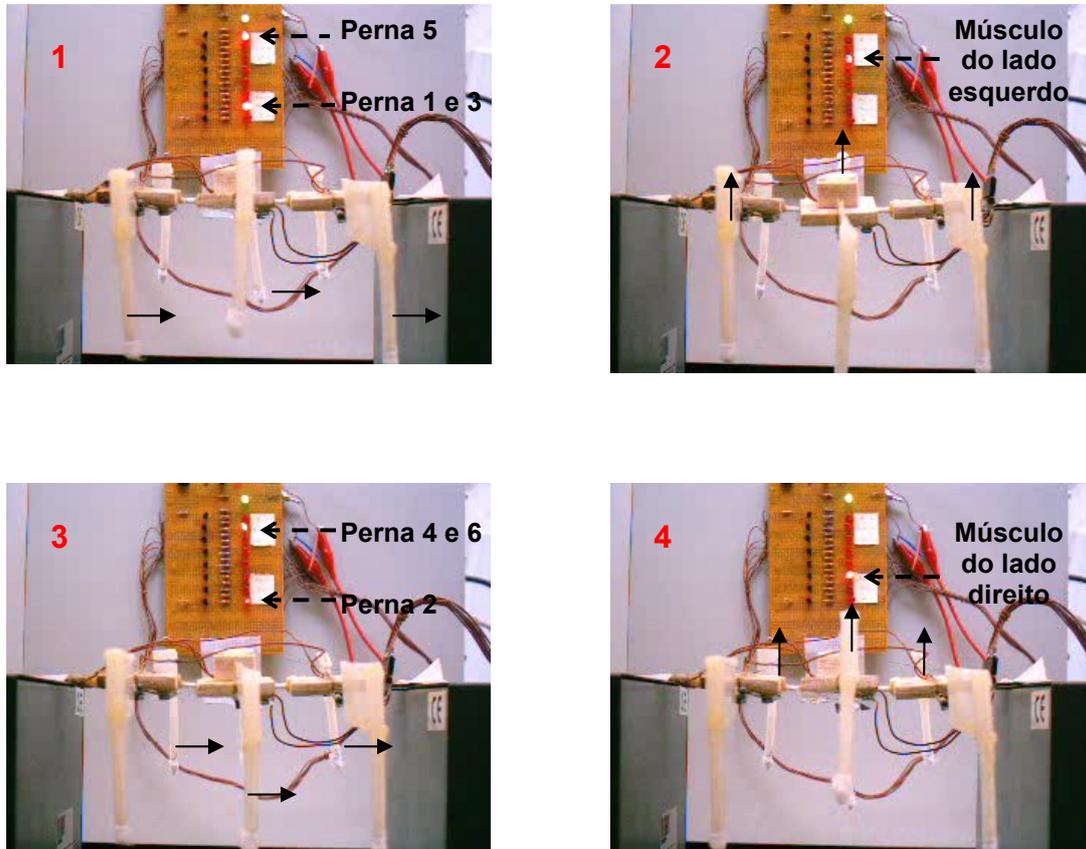


Figura 23 – Ciclo correspondente ao movimento para a frente

A direcção das setas indica o resultado da contracção dos respectivos músculos de cada perna. No caso dos músculos colocados em cima da estrutura estes fazem levantar 3 pernas (o músculo da esquerda levanta as pernas 1, 3 e 5; o músculo da direita levanta as pernas 2, 4 e 6). Consoante o tempo de cada um dos passos descritos anteriormente, o robô pode andar mais depressa ou mais devagar.

3.2.5 – Método Utilizado para o Controlo do Robô

Para a construção do circuito de interface através da porta paralela foram necessárias as seguintes peças:

8 R1-8 resistências 10K Ω , ¼ W
9 R9-17 Resistências 100 Ω , ¼ W
1 R18 Resistências 1K Ω , ¼ W
2 R19, 20 Resistências 5 Ω , ¼ W

1 RV1 Resistência variável 2K Ω , ¼ W
8 L1-8 LED, vermelho, tamanho T-1
1 L9 LED, verde, tamanho T-1
8 Q1-8 Transistores, MPS A13 NPN

1 U1 IC, 317K Regulador	1 J3 Conector, ficha de alimentação
1 IN1 Interruptor	20 metros de fio de cobre
1 J1 Conector D-25 macho	Placa de circuitos eléctricos perfurada
1 J2 Conector 8 pinos	Solda de estanho

Foi desenvolvida a placa da figura 24. Este circuito recebe os sinais da porta paralela do computador e fornece uma tensão ajustável aos músculos do robô. Testou-se o circuito, medindo cuidadosamente e ajustando a tensão de saída antes de o ligar ao Boris. Utilizando o programa BASIC e correndo o programa 1 (em anexo) verificou-se que todos os sinais accionados pelo teclado do computador acenderam os respectivos LED's no circuito. Finalmente ligou-se ao robô o circuito e correu-se o programa 2 (anexo) verificando o efeito das respectivas acções (frente, trás, esquerda, direita).

Funcionamento da placa

Quando o programa a correr em BASIC no computador envia um comando para a porta paralela, cria um modelo de 8 bits, que a porta paralela representa como tensões para os 8 fios (D0 até D7). Uma tensão perto de +5 Volts representa um 1 e uma tensão perto de 0 Volts representa 0. O comando BASIC "LPRINT CHR\$(bits);" envia um único carácter de 8 uns e zeros. O modelo a enviar depende do número introduzido para "bits", de 0 a 255. O ponto e virgula (;) no final da linha de comando fixa o modelo dos bits na porta paralela, caso contrário o programa envia uma linha de erro que pode confundir o padrão de locomoção do robô.

Os 8 bits ligam ao circuito através de um conector D-25 e dos respectivos fios de cobre. Um nono fio fornece uma ligação à terra entre o circuito e o computador. Quando por exemplo o bit D0 está a 1 o LED L1 acende e liga o transístor Q1 que por sua vez fornece energia através do fio à perna 5 do Boris. As resistências R19 e R20 igualam a resistência total do circuito para as pernas 2 e 5. Sem elas, uma resistência menor evitaria uma contracção total de outros "Muscle Wires" quando se activassem 2 ou mais circuitos juntos. As resistências de R1 até R8 limitam a corrente na base dos transístores e de R9 até R16 limitam a corrente que passa pelos LED's de L1 até L8. O regulador 317K U1 juntamente com a resistência variável RV1 e a resistência R18, controlam a tensão proveniente da fonte de alimentação ligada a J3. Ajustando RV1 para aumentar ou diminuir a tensão e logo a potência para o BORIS.

O IN1 serve como medida de precaução para ligar a energia ao BORIS. Com IN1 ligado o LED L9 acende significando que a alimentação esta a ser feita para o BORIS.

Com o programa a correr, este muda o padrão de bit's que saem da porta paralela, activando os diferentes transístores, que por sua vez activam os diferentes “Muscle Wires” e fazem o BORIS andar. Com os devidos tempos e sequências correctas dos padrões de bit's o BORIS pode andar para a frente, para trás, para a esquerda e para a direita.

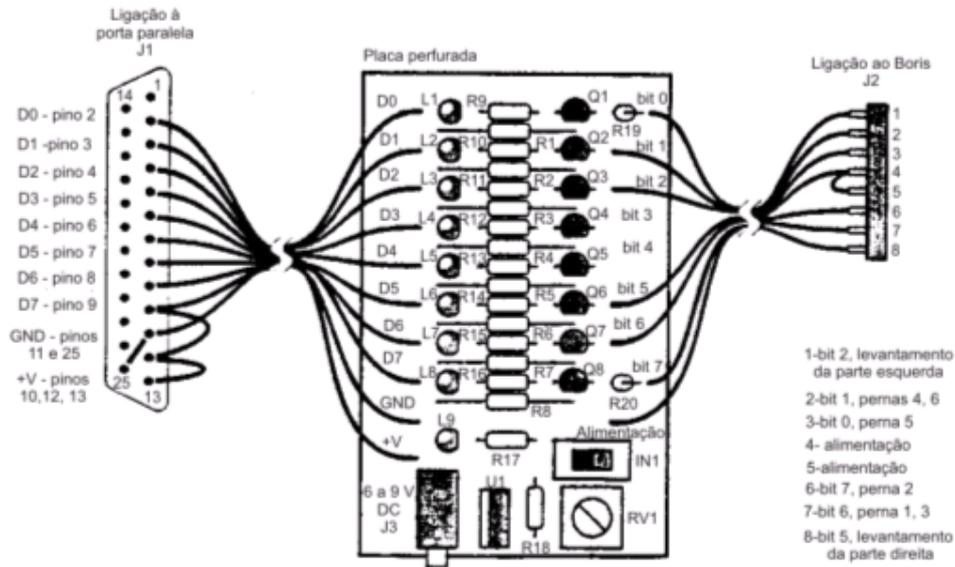


Figura 24 – Esquema da placa para ligar à porta paralela

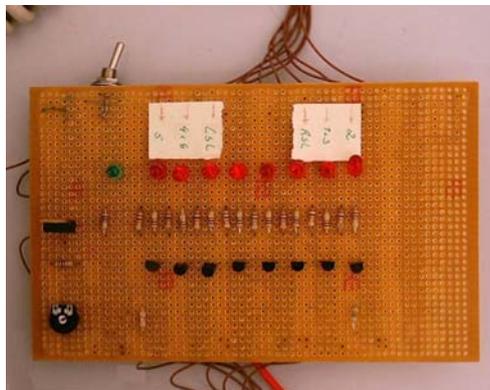


Figura 25 – Aspecto final da placa

Em anexo são apresentados os programas 1 e 2 em BASIC utilizados para interagir com a placa e por sua vez com o BORIS, além disso também é apresentado um esquema eléctrico mais pormenorizado da placa com as respectivas ligações a efectuar.

4 – Músculos Artificiais Pneumáticos

Os “*air muscles*” são dispositivos de solicitação pneumática que apresentam muitas das propriedades encontradas no músculo humano.

O músculo pneumático é um conversor de energia pneumática em energia mecânica, traduzida por uma tensão quando o actuador se encontra sobre o efeito de uma carga. Apresentam-se como um tipo de actuador leve, custo reduzido, boa flexibilidade física permitindo uma fácil adaptação a qualquer tipo de estrutura funcionando mesmo quando torcido axialmente. O tipo de resposta é imediato, além disso o seu funcionamento é natural e suave. Estes actuadores possuem uma relação muito elevada entre força/peso e exibem propriedades não lineares de força – comprimento.

Dentro dos músculos pneumáticos o músculo Mckibben é tido como sendo o mais famoso e usado [3]. Os músculos de Mckibben são actuadores lineares desenvolvidos inicialmente, na década de 50, em aplicações ortopédicas para pacientes de poliomielite [9].

4.1 – Construção do Actuador

O corpo do músculo pneumático é constituído por um tubo de látex, com características elásticas, dentro de uma malha de cobre de um diâmetro maior e com uma estrutura menos flexível, sendo que esta malha serve essencialmente para impedir uma mudança desmesurada do tamanho e forma do látex, quando solicitado por acção do ar comprimido que alimenta o actuador.

O uso do látex é explicado atendendo-se às suas capacidades de elasticidade e flexibilidade mas também ao seu limite de fadiga, que é elevado e que por exemplo, é aproximadamente, 24 vezes superior à dos actuadores fabricados com borracha de silicone [8]. Em relação à malha de cobre, que é de um tipo não usual na construção deste tipo de actuador acaba por ser, sem presunções, um contributo para que o actuador revele novas faculdades, ou pelo menos, diferentes, consoante os estímulos que afectam as suas variáveis. A utilização desta malha de cobre explica por si só (não sendo a razão de tal) a necessidade dos estudos a nível das respostas do actuador, que mais adiante serão apresentadas.

Para além dos componentes do músculo descritos anteriormente, são necessários dois fios de nylon que servirão de tendões para o suporte na estrutura e duas abraçadeiras para permitir a fixação dos tendões e dos conectores, de forma robusta nas extremidades do tubo de látex.

O músculo pneumático pode ser construído de diferentes tamanhos consoante a performance que se pretende obter, tanto a nível de extensão e flexão máximas mas também de forças suportáveis.

Começa-se por colocar o tubo de látex no interior da malha de cobre. Introduzem-se os conectores em cada uma das extremidades do tubo de látex. Finalmente é colocado um fio de nylon em cada uma das pontas e faz-se com que as extremidades da malha de cobre fiquem justas às do tubo de látex. Através das abraçadeiras fixar o conjunto nas extremidades, constituído pelo fio de nylon, conector, tubo de látex e malha de cobre.



Figura 26 – Componentes do músculo pneumático

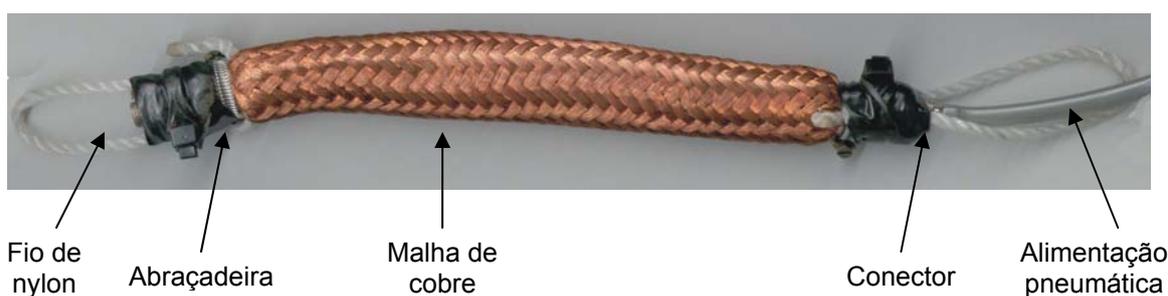


Figura 27 – Músculo pneumático

4.2 – Princípio de Funcionamento

Em consequência da introdução do ar comprimido no interior do tubo de látex, este devido à sua elasticidade, expande radialmente provocando o aumento do

diâmetro do tubo e conseqüentemente a diminuição do comprimento axial do conjunto (látex+malha). O músculo contrai (diminui o seu comprimento total – as suas partes extremas aproximam-se), dando origem a um tipo de actuação linear que se anuncia como uma hipótese perfeitamente válida e a aproveitar para a implementação em estrutura robóticas.



Figura 28 – Efeito da solicitação pneumática no músculo

Fundamentalmente este tipo de actuadores requer a existência de uma instalação pneumática que disponibilize ar comprimido, pelo menos, até 6 bar. Para ser obtido um maior controlo sobre o músculo será necessário uma válvula proporcional que permita uma variação da pressão linear com uma determinada corrente, proporcionando deste modo, uma variação do comprimento do músculo, faseada.

4.3 – Propriedades e Características dos Músculos

Uma das formas que encontramos para quantificar as propriedades e características dos nossos músculos foi submetendo-os a uma determinada pressão e massa para depois retirar o comprimento do músculo resultante desse estado. Para melhor perceber a forma como foram elaboradas estas medições, apresentamos a seguir umas imagens do método utilizado.



Figura 29 – Esquema do método utilizado para a obtenção das medições

O cálculo dos comprimentos do músculo foi feito em função da variação da pressão interna e da massa colocada numa das suas extremidades. Foram consideradas massas a variar aproximadamente de 500g a 11000g e pressões entre os 0 e 6 bar. Para uma determinada massa variou-se a pressão de 0 a 6 bar com intervalos de 1 bar, para cada um destes estados retirou-se o respectivo comprimento do músculo. Esta experiência foi efectuada para dois diferentes tipos de malha de cobre (17 e 22mm) e para cada uma destas malhas optou-se por considerar três diferentes comprimentos entre as abraçadeiras (11, 16 e 22 mm). Com o objectivo de tentar perceber qual a influência do diâmetro da malha de cobre e do seu comprimento no comportamento geral de um músculo, foram feitos estes seis diferentes tipos de músculos. A seguir apresenta-se um quadro correspondente às medições efectuadas para um desses músculos e os restantes encontram-se em anexo.

Músculo (Malha D-22mm; Comprimento 22cm)	Força (N)										
	6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23	
Pressão (bar)	0	20,7	20,9	21,5	21,7	21,9	21,9	22,0	22,0	22,1	22,2
	1	20,6	20,7	20,7	20,7	20,7	21,2	21,4	21,4	21,9	21,9
	2	17,9	17,9	18,1	18,1	18,5	18,7	19,1	19,3	19,6	19,7
	3	16,6	16,7	16,8	17,3	17,3	17,4	17,4	17,5	18,2	18,3
	4	15,9	16,0	16,0	16,3	16,3	16,5	16,5	16,8	16,9	17,2
	5	15,5	15,5	15,6	15,8	15,8	16,0	16,0	16,2	16,3	16,4
	6	15,1	15,2	15,2	15,4	15,4	15,5	15,5	15,8	15,9	16,0

Tabela 2 – Variações do comprimento do músculo (Malha de cobre D22mm – Comprimento inicial 22cm) em função da força e pressão

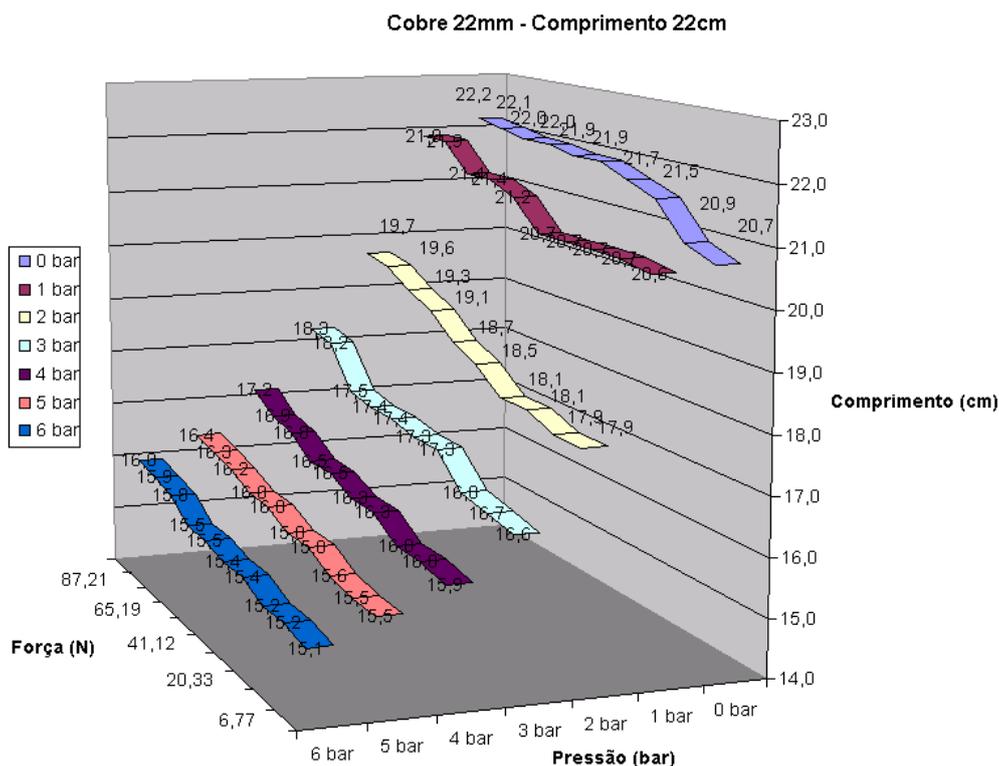


Figura 30 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Força (N)	6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
Pressão (bar)	hd (cm)									
0	22,1	22,6	23,5	23,9	24	24,1	24,2	24,2	24,4	24,6
1	21,9	22,2	22,9	23	23	23,2	23,5	23,7	24	24,2
2	20,6	20,2	21,3	21,3	21,9	21,6	22,6	22,6	23,3	23,3
3	19,3	19,3	19,8	20	20,3	20,3	20,9	20,9	21,9	21,9
4	18,5	18,5	18,9	19,1	19,2	19,3	19,7	19,9	20,4	20,6
5	18,1	18,2	18,4	18,5	18,7	18,8	19	19,2	19,8	19,8
6	17,8	17,8	18	18,2	18,3	18,3	18,5	18,8	19,1	19,3
P6-P1	4,1	4,4	4,9	4,8	4,7	4,9	5	4,9	4,9	4,9
[] _{Max} compressão	5	4,1								
% compressão	22,73	18,64								
h _{min} músculo	17,8									
h _{max} músculo	24,6									
delta h _{max}	6,8									

Tabela 3 – Variações do comprimento do músculo (Malha de cobre D17mm – Comprimento inicial 22cm) em função da força e pressão, sendo P6-P1 a diferença entre o comprimento alcançado quando a pressão é máxima e quando ela é mínima. []_{Max} compressão (máximo e mínimo da linha anterior). % compressão (valores máximos e mínimos do comprimento atingido sobre o comprimento inicial). h_{min} músculo, h_{max} músculo (valores do comprimento mínimo e máximo do músculo atingidos). Delta h_{max} (diferença entre h_{max}, h_{min}).

Um caminho a seguir para o conhecimento do músculo, seria o de estabelecer um comportamento tipo geral que caracterizasse o efeito provocado pela aplicação de diferentes forças e pressões. Tendo em conta este propósito, linearizaram-se os

valores correspondentes às variações do comprimento devidas à variação da pressão, para uma determinada força.

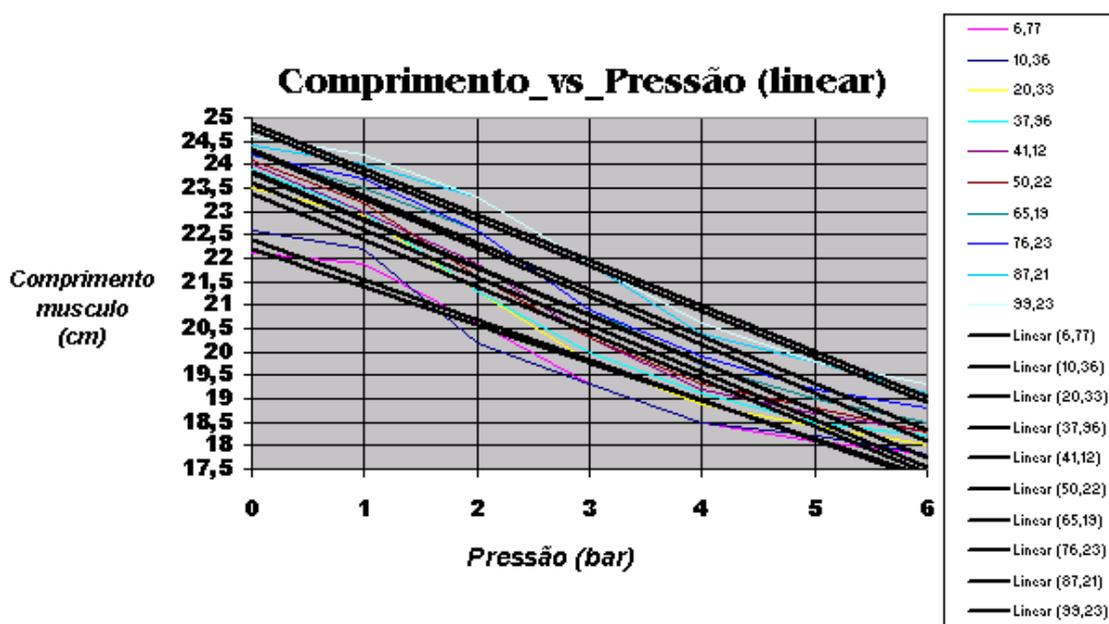


Figura 31 – Gráfico da linearização dos valores da tabela 3

Força (N)	6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
y=	-0.8071x + 22.986	-0.8607x + 23.271	-0.9964x + 24.386	-1.0107x + 24.614	-1.0143x + 24.829	-1.0179x + 24.871	-1.0357x + 25.343	-0.9964x + 25.314	-0.9714x + 25.729	-0.9786x + 25.871
r ²	0,9522	0,9321	0,9573	0,9562	0,9681	0,9657	0,9777	0,9709	0,9751	0,9794
m	-0,8071	-0,8607	-0,9964	-1,0107	-1,0143	-1,0179	-1,0357	-0,9964	-0,9714	-0,9786
b	22,986	23,271	24,386	24,614	24,829	24,871	25,343	25,314	25,729	25,871
intervalo	6,77-10,36	10,36-20,33	20,33-37,96	37,96-41,12	41,12-50,22	50,22-65,19	65,19-76,23	76,23-87,21	87,21-99,23	
m medio	-0,8339	-0,92855	-1,00355	-1,0125	-1,0161	-1,0268	-1,01605	-0,9839	-0,975	
b medio	23,1285	23,8285	24,5	24,7215	24,85	25,107	25,3285	25,5215	25,8	
y medio	-0.8339x+23.1285	-0.92855x+23.8285	-1.00355x+24.5	-1.0125x+24.7215	-1.0161x+24.85	-1.0268x+25.107	-1.01605x+25.3285	-0.9839x+25.5215	-0.975x+25.8	

Tabela 4 – Valores das rectas $y=mx+b$ obtidas para cada força e para determinados intervalos de força.

Os valores apresentados como recta linearizada de um intervalo de forças, poderão ser utilizados para eventuais caracterizações do comportamento do músculo (em termos de dimensões) aquando a solicitação com uma força nesse intervalo. Assim ter-se-ia hipoteticamente a possibilidade de conhecer a dimensão de um músculo sabendo-se a força de solicitação e a pressão de alimentação (aproximação a um modelo estático).

Como forma de discussão dos resultados obtidos foi possível constatar que o facto de se aumentar o diâmetro da malha de cobre implica que o comprimento do músculo varie numa gama de valores menores, no entanto, para um dos músculos esta regra parece não se verificar por umas décimas (Para o músculo de comprimento 22mm). Em relação à variação dos comprimentos é verificável que com a diminuição

os comprimentos iniciais dos músculos, há também uma diminuição da gama de valores dos comprimentos.

Estas considerações foram feitas tendo em conta o comportamento dos músculos dentro de um intervalo de pressões iguais 0 a 6 bar e um intervalo de forças também iguais 6 a 100 N. Para além destas relações acerca do comportamento dos músculos, outros pormenores podem ser apontados no que diz respeito às observações efectuadas durante as medições. Em relação às variações dos comprimentos iniciais dos músculos verificou-se que com o aumento destes, o tempo de resposta foi mais lento, isto é, quanto mais pequeno o comprimento do músculo mais rapidamente este enchia. Quanto à variação do diâmetro da malha de cobre constatou-se que o tempo de resposta aumentou com o aumento deste. Além disso o aumento do diâmetro tornava o músculo mais susceptível de ceder com o adicionamento de uma carga suplementar, isto é tornava-se menos rígido.

Para melhor perceber as relações existentes entre as variáveis, pressão, força, comprimento e diâmetros da malha apresenta-se um esquema que melhor retrata os comportamentos dos músculos.

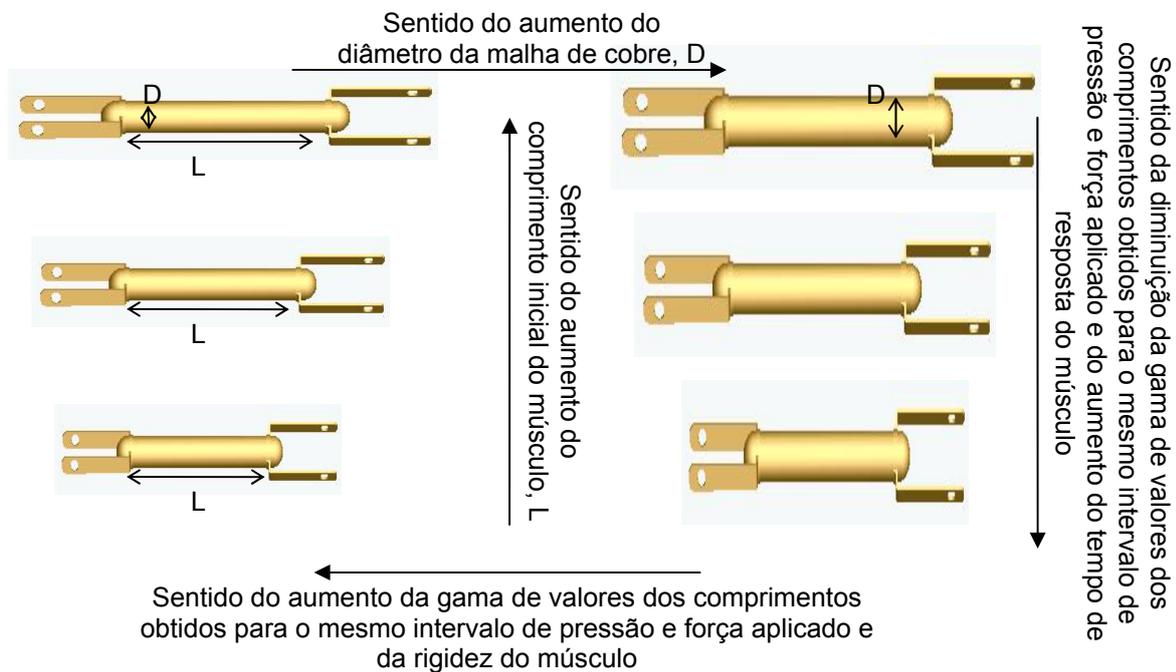
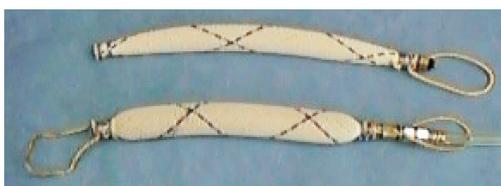


Figura 31 – Esquema do comportamento dos músculos consoante as variações do diâmetro da malha e do seu comprimento inicial

4.4 – Comparação com outros Músculos Existentes

Existem actualmente outro tipo de músculos que apesar de apresentarem o mesmo tipo de funcionamento que os desenvolvidos, podem variar em termos de propriedades, forças desenvolvidas e contracções obtidas. Alguns destes outros músculos aparentam um tipo de construção diferente, podendo ou não revelar-se mais robustos, resistentes e até mesmo mais leves.



BioRobotics Laboratory
Center for Bioengineering
Universidade de Washington



Shadow Robot Company Ltd
(UK)



Image SI INC
(USA)



Fluidic Muscle MAS

Festo AG & Co
(Alemanha)

Figura 32 – Músculos pneumáticos existentes

Após o estudo efectuado (capítulo 4.3) e confrontando estes com os valores declarados para os vários músculos apresentados, podemos seguramente afirmar que as diferenças são mínimas. Por exemplo no caso dos músculos desenvolvidos pela Shadow, estes chegam a obter valores na ordem dos 70 kg como força máxima obtida para um músculo com as seguintes dimensões 30 mm de diâmetro e 290 mm de comprimento.

Os músculos desenvolvidos apresentam uma característica diferente no que diz respeito à malha utilizada, já que os restantes músculos utilizam uma malha de poliéster entrelaçada, ao contrário da malha de cobre. Apesar da utilização da malha de cobre apresentar à partida desvantagens evidentes, tal como o facto de o peso final do músculo ser maior, o possível aquecimento deste ser mais provável devido ao seu uso contínuo e o atrito resultante do contacto com o tubo interior de látex ser maior, é claro que existem algumas vantagens no que diz respeito à robustez.

4.5 – Modelo Estático Teórico do Actuador

Tendo em mente que quando sob o efeito de uma qualquer carga a energia mecânica despendida pelo actuador é equivalente a uma dada tensão, procura-se encontrar matematicamente a tensão em função da pressão e da dimensão axial do músculo (variáveis interligadas e directamente responsáveis pela alteração de forma e características do músculo).

A espessura da parede exterior do músculo é aproximada a zero e as partes extremas não cilíndricas, podem ser desprezadas. O músculo pode ser modelado como sendo um cilindro perfeito [1].

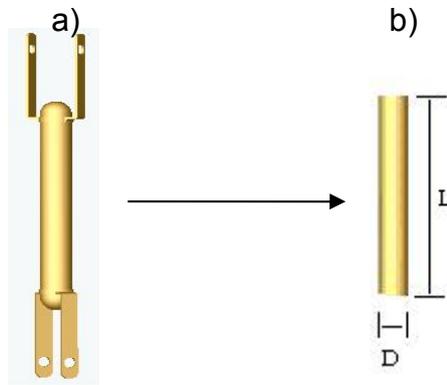


Figura 33 a) e b) – Aproximações geométricas do músculo. a) Geometria real aproximada do músculo. b) Aproximação geométrica ao músculo e suas dimensões.

As dimensões do músculo são o comprimento, L e o diâmetro, D, sendo que nenhuma das duas se mantém constante.

Pretende-se chegar a uma aproximação teórica baseada na conservação da energia. O trabalho à entrada (W_{in}) é efectuado no músculo quando o ar é introduzido na superfície interna do tubo de látex [4].

$$dW_{in} = \int_{S_i} (P - P_0) dl_i \cdot ds_i = (P - P_0) \int_{S_i} dl_i \cdot ds_i = P' dV \quad (4.5.1)$$

Sendo P é a pressão absoluta interna do ar; P_0 , a pressão ambiente (1atm, 1.0336bar); P' , a pressão relativa ($P - P_0$); S_i , a superfície total interna do tubo de látex; ds_i , vector de área; dl_i , deslocamento da superfície interna do tubo de látex; dV , variação do volume.

O trabalho à saída (W_{out}) é efectuado quando o actuador encurta, ou seja, há uma diminuição do seu comprimento, L , devido à variação do volume. Traduz-se da seguinte forma

$$dW_{out} = -Fdl \quad (4.5.2)$$

Onde F é a tensão axial, e dl , o deslocamento axial. Do ponto de vista da conservação da energia, o trabalho à entrada deverá ser igual ao trabalho à saída, se o sistema não tiver qualquer tipo de perdas e se não houver armazenamento de energia.

O pressuposto de que o músculo se trata de um sistema ideal é aplicável [2].

$$dW_{out} = dW_{in} \quad (4.5.3)$$

Como resultado das duas anteriores equações, (4.5.2) e (4.5.3) temos que

$$\begin{aligned} -FdL &= P'dV \\ F &= P' \frac{dV}{dL} \end{aligned} \quad (4.5.4)$$

Para estimar dV/dL , assume-se que a extensibilidade dos vários fios de cobre que constituem a malha é muito baixa, logo o volume do actuador irá somente depender do seu comprimento. Necessitamos numa primeira instância da descrição do volume, V .

O volume de um cilindro é dado por

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 L \quad (4.5.5)$$

Da figura seguinte podemos retirar uma expressão para L .

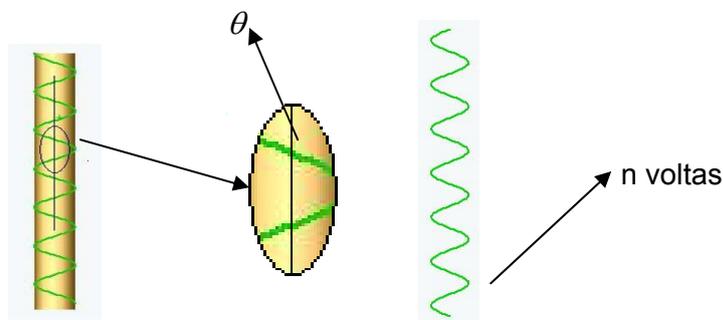


Figura 34 – Definição dos parâmetros θ e n . θ é o ângulo entre a malha entrelaçada e eixo longitudinal do cilindro; n o número de voltas de um fio da malha entrelaçada. D é o diâmetro do cilindro e b o comprimento do fio (filamento).

$$L = b \cos \theta \quad (4.5.6)$$

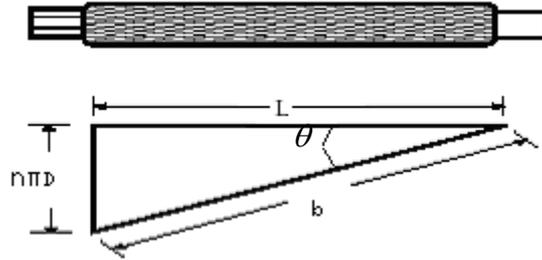


Figura 35 – Definição dos parâmetros D, b e L.

É possível agora exprimir o diâmetro, D em função de θ , com valores de n e b constantes.

$$D = \frac{b \sin \theta}{n\pi} \quad (4.5.7)$$

Substituindo-se (4.5.7) em (4.5.5), temos uma equação equivalente para o volume, V.

$$V = \frac{b^3}{4\pi n^2} \sin^2 \theta \cos \theta \quad (4.5.8)$$

Recuperando (4.5.4) e tendo em conta a última equação e o facto de que o comprimento mínimo do actuador é alcançado quando o seu volume máximo fisicamente possível é atingido (correspondendo este acontecimento à contracção máxima do músculo) é alcançável uma nova forma de definir F.

F pode ser então, expresso em função de P' e de θ e assim:

$$F = -P' \frac{dV}{dL} = -P' \frac{dV/d\theta}{dL/d\theta} = \frac{P' b^2 (2 \cos^2 \theta - \sin^2 \theta)}{4\pi n^2} = \frac{P' b^2 (3 \cos^2 \theta - 1)}{4\pi n^2} \quad (4.5.9)$$

Se definirmos uma nova variável D_0 (diâmetro ideal quando θ é igual a 90°) e igualando-a a $b/n\pi$, teremos

$$F = \frac{\pi D_0^2 P'}{4} (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (4.5.10)$$

Logo a força é directamente proporcional à pressão, e é função do ângulo do fio da malha que tem valores de $0 < \theta < 90^\circ$. O encurtamento maior do músculo será alcançado quando $F=0$, com $\theta=54.7^\circ$ [4].

O objectivo de desenvolver, em termos de evolução, equações que permitam uma correcta formulação do problema é neste ponto perfeitamente alcançado. Porém as variáveis geométricas usadas anteriormente, necessitam de ser alteradas de forma a puderem ser utilizadas na prática, isto é encontrar procedimentos eficazes de as mensurar. Torna-se, assim, necessário e essencial desenvolver um método mais preciso de obter a medida do comprimento de um fio da malha, b , e contar o número de fios entrelaçados. Utilizaremos o método desenvolvido por Caldwell, Medrano-Cerda, e Goodwin (1995).

Se a malha cilíndrica for aberta e estendida horizontalmente (como mostra a figura 36), a geometria trapezoidal é facilmente observada.

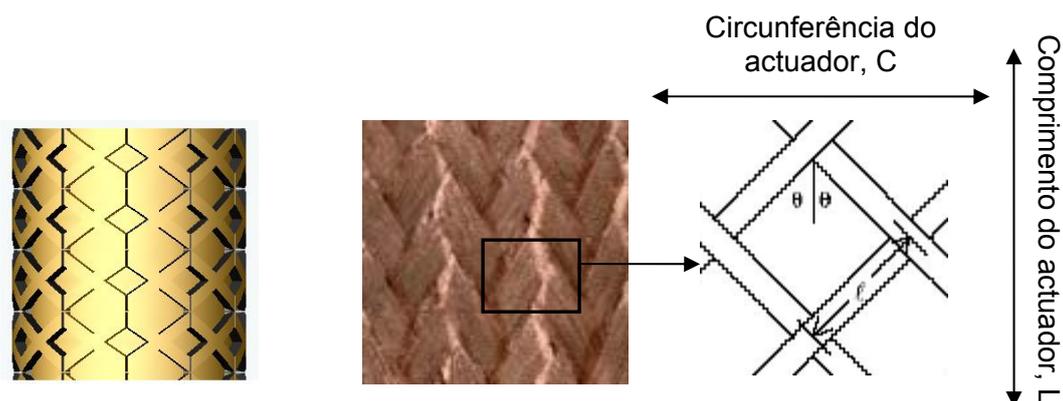


Figura 36 – Malha exterior.

A forma do trapézio é função do ângulo θ , e comprimento do lado do trapézio, l . Como comprimento e circunferência do actuador temos:

$$L = 2Al \cos \theta \quad (4.5.11)$$

$$C = 2Bl \sin \theta \quad (4.5.12)$$

Onde: A = número de trapézios longitudinais

B = número de trapézios circunferenciais (em redor do actuador)

Como o diâmetro é proporcional à circunferência podemos escrever,

$$D = \frac{2Bl}{\pi} \sin \theta \quad (4.5.13)$$

Substituindo (4.5.6) em (4.5.11) retiramos

$$b = 2Al \quad (4.5.14)$$

Da mesma forma substitui-se (4.5.7) em (4.5.13) obtendo-se

$$n = \frac{A}{B} \quad (4.5.15)$$

Assim sendo, tendo como dados ou medições o tamanho e número de trapézios, o actuador é praticamente caracterizado e definido. Como é evidente, o valor de θ é difícil de se obter durante a actuação do músculo, é portanto notória a necessidade de se evoluir para equações onde θ não seja uma variável activa e portanto as equações sejam controláveis. A escrita das equações em função da força, pressão e comprimento é justificada precisamente devido a que estas variáveis podem ser facilmente mediadas.

Partindo do principio de que θ pode ser escrito em função de b e L [2],

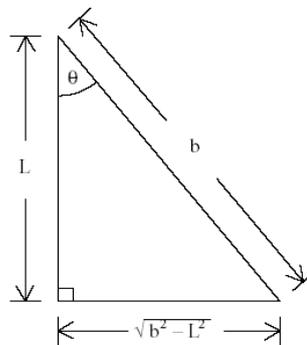


Figura 37 – Escrita de θ em função de b e L .

Estabelece-se uma relação entre θ , L e b

$$\cos \theta = \frac{L}{b} \quad (4.5.16)$$

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{b^2 - L^2}}{b} \quad (4.5.17)$$

Substituindo estas relações nas equações do volume e da força teremos por fim,

$$V = \frac{L(b^2 - L^2)}{4\pi n^2} \quad (4.5.18)$$

$$F = \frac{P'b^2}{4\pi n^2} \left(\frac{3L^2}{b^2} - 1 \right) \quad (4.5.19)$$

Seguindo os princípios apresentados anteriormente decidiu-se verificar quais os comprimentos esperados para uma determinada pressão e força aplicadas.

$$L = \sqrt{\left(\frac{4F\pi n^2}{P'b^2} + 1 \right) \frac{b^2}{3}} \quad (4.5.20)$$

Tal como já foi descrito no ponto 4.3, para cada malha de cobre utilizada (17 e 22 mm) estipulou-se uma determinada força aplicada sobre o músculo e variou-se a pressão de 0 a 6 bar. Antes de qualquer cálculo determinaram-se os valores de n e b para uma malha de cobre em função de um determinado comprimento L. Depois de esticada a malha completamente, retirou-se o valor de L e D, em seguida para um fio da malha e determinou-se para o L correspondente o número de voltas que esta dava (valor n). Finalmente, depois de retirado esse mesmo fio mediu-se o seu comprimento b. O quadro com esses valores e as malhas utilizadas apresenta-se a seguir.

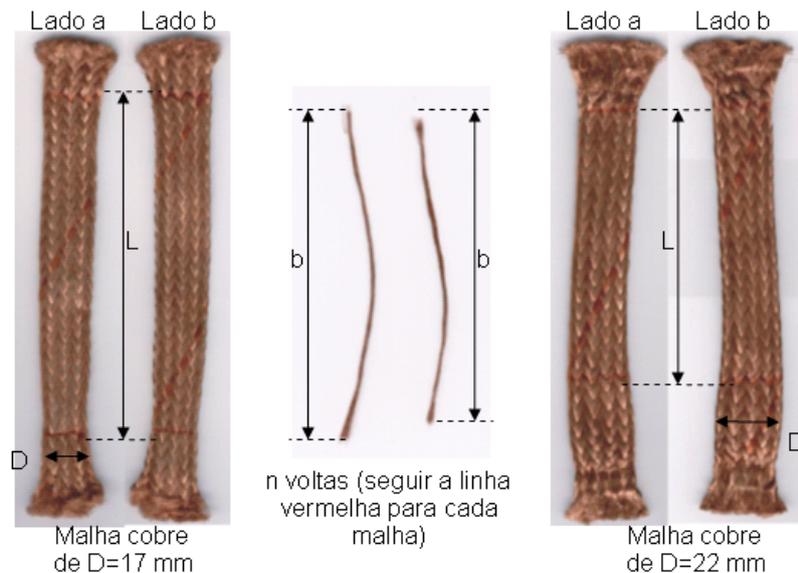


Figura 38 – Parâmetros a considerar D, L, b e n

	Diâmetro (mm)	Comprimento L (cm)	n (nº de voltas)	Comprimento b (cm)
Malha 1	22	12,9	1	13,8
Malha 2	17	14,4	1,5	15,1

Tabela 5 – Valores obtidos de n e b

Utilizando estes valores e as relações existentes entre eles, escolheram-se três comprimentos L para cada uma das malhas e determinaram-se os respectivos valores de b e n.

	Diâmetro (mm)	Comprimento L (cm)	n (nº de voltas)	Comprimento b (cm)
Músculo1	22	11	0,85	11,77
Músculo2	22	16	1,24	17,12
Músculo3	22	22	1,71	23,53

Tabela 6 – Valores de n e b para os respectivos comprimentos considerados

	Diâmetro (mm)	Comprimento L (cm)	n (nº de voltas)	Comprimento b (cm)
Músculo1	17	11	1,15	11,53
Músculo2	17	16	1,67	16,78
Músculo3	17	22	2,29	23,07

Tabela 7 – Valores de n e b para os respectivos comprimentos considerados

Em anexo encontram-se os cálculos efectuados para os valores de L obtidos em função da variação da pressão e da força.

Após uma análise pormenorizada dos valores obtidos e confrontando estes com os valores obtidos (capítulo 4.3), conclui-se que apesar do comportamento tipo apresentado pelo modelo estático, aproximar-se de alguma forma com o comportamento dos músculos desenvolvidos, isto é, com um aumento da força existe um aumento do comprimento, com um aumento da pressão existe uma diminuição do comprimento e as gamas de valores dos comprimentos variam de igual forma para as respectivas variações de diâmetro da malha e comprimento inicial do músculo, as variações do valor de L não são semelhantes. Como exemplo apresenta-se um quadro com os valores de L para o comportamento de um músculo segundo o modelo estático apresentado.

Músculo 1 D22		Pressão (bar)										
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Força (N)	5	7,01	6,91	6,87	6,85	6,84	6,83	6,83	6,82	6,82	6,82	6,81
	10	7,23	7,01	6,94	6,91	6,88	6,87	6,86	6,85	6,84	6,84	6,83
	15	7,44	7,12	7,01	6,96	6,93	6,91	6,89	6,88	6,87	6,86	6,85
	20	7,64	7,23	7,09	7,01	6,97	6,94	6,92	6,91	6,89	6,88	6,87
	25	7,83	7,33	7,16	7,07	7,01	6,98	6,95	6,93	6,92	6,91	6,90
	30	8,03	7,44	7,23	7,12	7,06	7,01	6,98	6,96	6,94	6,93	6,92
	35	8,21	7,54	7,30	7,18	7,10	7,05	7,01	6,99	6,97	6,95	6,94
	40	8,40	7,64	7,37	7,23	7,14	7,09	7,05	7,01	6,99	6,97	6,96
	45	8,58	7,74	7,44	7,28	7,19	7,12	7,08	7,04	7,01	6,99	6,97
	50	8,75	7,83	7,50	7,33	7,23	7,16	7,11	7,07	7,04	7,01	6,99
	55	8,93	7,93	7,57	7,38	7,27	7,19	7,14	7,10	7,06	7,04	7,01
	60	9,09	8,03	7,64	7,44	7,31	7,23	7,17	7,12	7,09	7,06	7,03
	65	9,26	8,12	7,70	7,49	7,35	7,26	7,20	7,15	7,11	7,08	7,05
	70	9,42	8,21	7,77	7,54	7,39	7,30	7,23	7,18	7,13	7,10	7,07
	75	9,58	8,31	7,83	7,59	7,44	7,33	7,26	7,20	7,16	7,12	7,09
	80	9,74	8,40	7,90	7,64	7,48	7,37	7,29	7,23	7,18	7,14	7,11
85	9,90	8,49	7,96	7,69	7,52	7,40	7,32	7,25	7,20	7,16	7,13	
90	10,05	8,58	8,03	7,74	7,56	7,44	7,35	7,28	7,23	7,19	7,15	

Tabela 8 – Valores teóricos para um músculo com malha de cobre D22mm e comprimento inicial 11cm

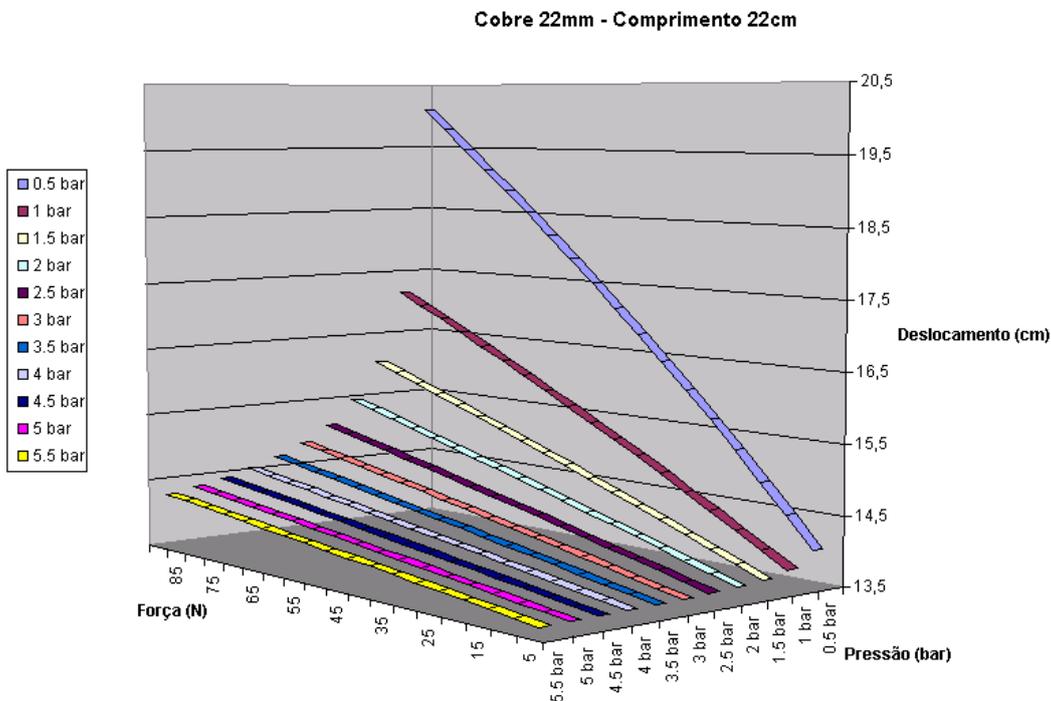


Figura 38 – Representação gráfica dos valores da tabela 8

Como já foi referido os valores de L obtidos pelo modelo estático são um pouco diferentes dos por desenvolvidos, isto porque, na nossa opinião, o modelo estático tem como objectivo apenas descrever o comportamento dos músculos pneumáticos, objectivo que consegue plenamente. Outra das explicações para a diferença de valores do modelo, poderá ser o facto de se ter utilizado a malha de cobre em vez da malha de poliéster.

4.6 – Braço Robótico Actuado por Músculos Artificiais Pneumáticos

4.6.1 – Estrutura Biomecânica do Braço Humano

A análise biomecânica do braço humano mostra que o seu movimento envolve uma estrutura muscular complexa e um controlo neurológico sofisticado [5].

Confinaremos, deste modo, a análise do braço humano às estruturas e músculos mais relevantes no plano vertical (plano sagital) de forma a encontrar e desenvolver um modelo geométrico simplificado do braço humano, tendo em conta assim, as propriedades cinemáticas do braço humano referidas a uma estrutura RR planar vertical. No plano considerado, o braço humano apela à movimentação do ombro e cotovelo sendo que em ambas as articulações, os músculos directamente envolvidos têm somente uma função, ou seja, sendo actuadores unidireccionais que provocam o deslocamento do braço num só sentido fazendo uso das suas propriedades de extensão ou flexão da sua biologia.

Parte-se do princípio que, os sistemas biomecânicos de alavancas inerentes ao braço humano, o capacitam para um desempenho mais elevado comparado com os manipuladores robóticos contemporâneos. Torna-se evidente então, a possibilidade de descrever aproximadamente a acção do braço humano como uma simples combinação de roldanas e alavancas.

4.6.2 – Modelo Geométrico

Em concordância com a observação anatómica das estruturas ósseas e musculares envolvidas no accionamento do ombro e do cotovelo poder-se-á, desde logo, fazer uma primeira aproximação e considerar somente o bicípide braquial e o tricipede braquial como responsáveis pelo accionamento do cotovelo e os músculos deltóide anterior e posterior como movimentadores do ombro.

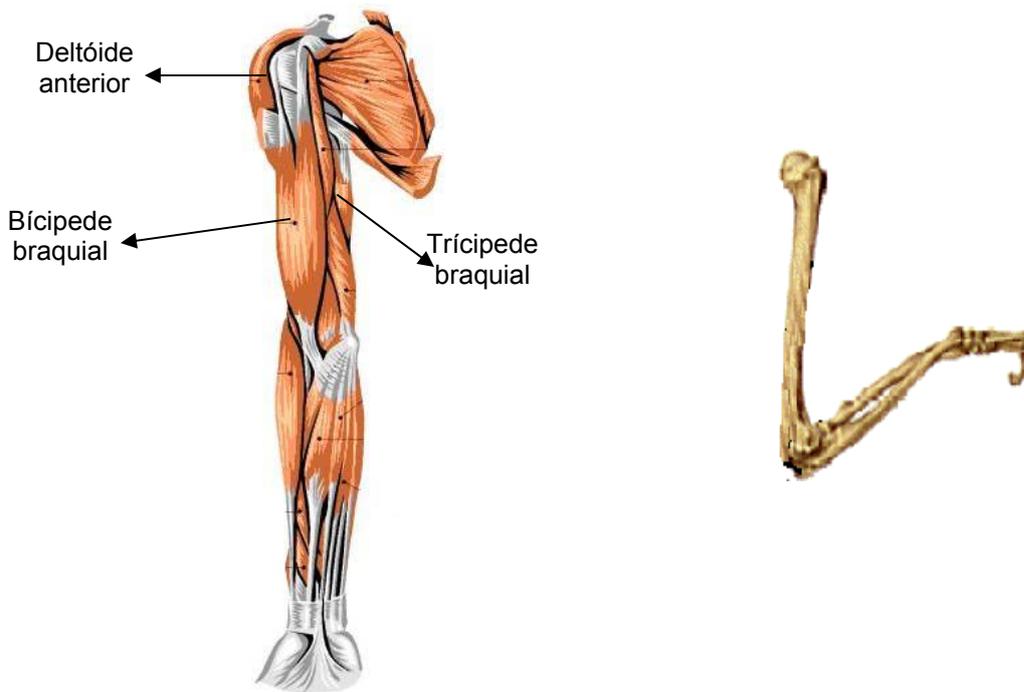


Figura 39 – Estrutura biomecânica do braço humano.

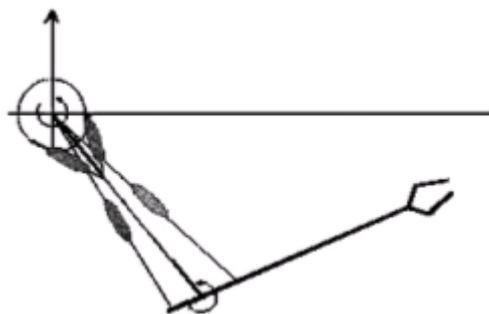
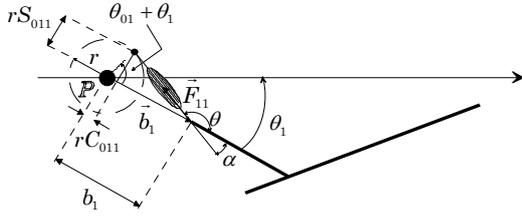


Figura 40 – Aproximação geométrica à estrutura biomecânica do braço humano.

4.6.1.1 – O Ombro

No ombro consideram-se dois mecanismos fundamentais: (1) a conjugação das estruturas ósseas da omoplata, clavícula, esterno e costelas com a estrutura muscular formada pelo denteado, trapézio, subclávio, pequeno peitoral, elevador da omoplata e rombóides; e (2) a conjugação da estrutura óssea do húmero com a estrutura muscular formada pelo deltóide anterior, deltóide posterior, grande peitoral, grande redondo e grande dorsal. O modelo geométrico simula estas estruturas através de uma roldana centrada na primeira articulação capaz de permanecer em repouso. Além disso, deve notar-se que este mecanismo deverá operar dentro de certos limites a definir ($\theta_{02} \leq \theta_1 \leq \theta_{01}$).

MÚSCULO FLEXOR

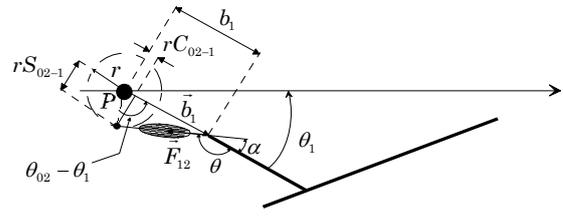


$$z_{11} = \sqrt{b_1^2 + r^2 - 2b_1r \cos(\theta_{01} - \theta_1)}$$

$$\dot{z}_{11} = - \left[\frac{b_1 r \sin(\theta_{01} - \theta_1)}{z_{11}} \right] \dot{\theta}_1$$

$$\ddot{z}_{11} = - \frac{b_1 r}{z_{11}} \left\{ \begin{array}{l} \left[-\cos(\theta_{01} - \theta_1) + \dots \right] \\ b_1 r \left(\frac{\sin(\theta_{01} - \theta_1)}{z_{11}} \right)^2 \\ \sin(\theta_{01} - \theta_1) \ddot{\theta}_1 \end{array} \right\} \dot{\theta}_1^2 + \dots$$

MÚSCULO EXTENSOR



$$z_{12} = \sqrt{b_1^2 + r^2 - 2b_1r \cos(-\theta_{02} + \theta_1)}$$

$$\dot{z}_{12} = \left[\frac{b_1 r \sin(-\theta_{02} + \theta_1)}{z_{12}} \right] \dot{\theta}_1$$

$$\ddot{z}_{12} = \frac{b_1 r}{z_{12}} \left\{ \begin{array}{l} \left[\cos(-\theta_{02} + \theta_1) - \dots \right] \\ b_1 r \left(\frac{\sin(-\theta_{02} + \theta_1)}{z_{12}} \right)^2 \\ \sin(-\theta_{02} + \theta_1) \ddot{\theta}_1 \end{array} \right\} \dot{\theta}_1^2 + \dots$$

Onde z_{1i} , \dot{z}_{1i} , \ddot{z}_{1i} representam, respectivamente, a dimensão, a velocidade e a aceleração dos músculos flexores ($i=1$) e extensores ($i=2$) do ombro. Por outro lado, as forças F_{1i} desenvolvidas nos músculos do ombro podem ser obtidas a partir das seguintes equações:

$$\alpha + \theta = \pi, \quad \sin \alpha = \frac{r \sin(\theta_{01} - \theta_1)}{z_{11}}$$

$$|\vec{M}_{11}| = F_{11} \cdot b_1 \cdot \sin(\pi - \alpha)$$

$$F_{12} = 0 \Rightarrow F_{11} = \frac{z_{11}}{b_1 r \sin(\theta_{01} - \theta_1)} \tau_1$$

$$\alpha + \theta = \pi, \quad \sin \alpha = \frac{r \sin(-\theta_{02} + \theta_1)}{z_{12}}$$

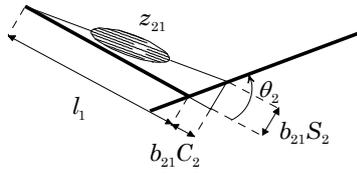
$$|\vec{M}_{12}| = F_{12} \cdot b_1 \cdot \sin(\pi - \alpha)$$

$$F_{11} = 0 \Rightarrow F_{12} = \frac{z_{12}}{b_1 r \sin(-\theta_{02} + \theta_1)} \tau_1$$

4.6.1.2 – O Cotovelo

A movimentação do cotovelo no plano sagital deve-se à interacção da estrutura óssea (húmero, cúbito e rádio) com a estrutura muscular (bícepede braquial, braquial, tricépede braquial e ancóneo). Neste caso, as equações cinemáticas, no espaço dos músculos, são obtidas considerando a restrição $0 \leq \theta_2 \leq \pi$.

MÚSCULO FLEXOR

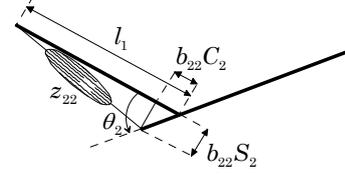


$$z_{21} = \sqrt{l_1^2 + b_{21}^2 - 2l_1 b_{21} \cos(\theta_2)}$$

$$\dot{z}_{21} = - \left[\frac{l_1 b_{21} \sin(\theta_2)}{z_{21}} \right] \dot{\theta}_2$$

$$\ddot{z}_{21} = - \frac{l_1 b_{21}}{z_{21}} \left\{ \begin{array}{l} \cos(\theta_2) + \dots \\ l_1 b_{21} \left(\frac{\sin(\theta_2)}{z_{21}} \right)^2 \end{array} \right\} \dot{\theta}_2^2 + \sin \theta_2 \ddot{\theta}_2$$

MÚSCULO EXTENSOR



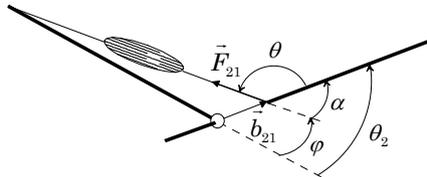
$$z_{22} = \sqrt{l_1^2 + b_{22}^2 - 2l_1 b_{22} \cos(\theta_2)}$$

$$\dot{z}_{22} = \left[\frac{l_1 b_{22} \sin(\theta_2)}{z_{22}} \right] \dot{\theta}_2$$

$$\ddot{z}_{22} = \frac{l_1 b_{22}}{z_{22}} \left\{ \begin{array}{l} \cos(\theta_2) - \dots \\ l_1 b_{22} \left(\frac{\sin(\theta_2)}{z_{22}} \right)^2 \end{array} \right\} \dot{\theta}_2^2 + \sin \theta_2 \ddot{\theta}_2$$

onde z_{2i} , \dot{z}_{2i} , \ddot{z}_{2i} representam, respectivamente, a dimensão, a velocidade e a aceleração dos músculos flexores ($i = 1$) e extensores ($i = 2$) do cotovelo. Por outro lado, as equações que descrevem os fenômenos dinâmicos no espaço dos músculos constituem uma representação alternativa.

MÚSCULO FLEXOR



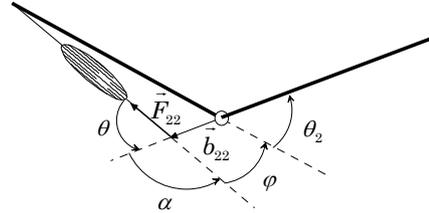
$$\theta_2 = \varphi + \alpha, \quad \alpha + \theta = \pi \Rightarrow \theta = \pi - (\theta_2 - \varphi)$$

$$\sin \varphi = \frac{b_{21} \sin(\theta_2)}{Z_{21}}, \quad \cos \varphi = \frac{l_1 + b_{21} \cos(\theta_2)}{Z_{21}}$$

$$|\vec{M}_{21}| = F_{21} \cdot b_{21} \cdot \sin(\theta_2 - \varphi)$$

$$F_{22} = 0 \Rightarrow F_{21} = \frac{z_{21}}{l_1 b_{21} \sin(\theta_2)} \tau_2$$

MÚSCULO EXTENSOR



$$\theta_2 + \varphi + \alpha = \pi, \quad \alpha + \theta = \pi \Rightarrow \theta = \theta_2 + \varphi$$

$$\sin \varphi = \frac{b_{22} \sin(\theta_2)}{Z_{22}}, \quad \cos \varphi = \frac{l_1 - b_{22} \cos(\theta_2)}{Z_{22}}$$

$$|\vec{M}_{22}| = F_{22} \cdot b_{22} \cdot \sin(\theta_2 + \varphi)$$

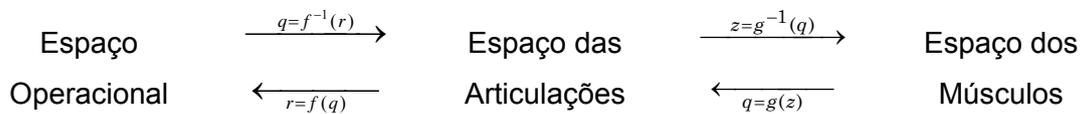
$$F_{21} = 0 \Rightarrow F_{22} = \frac{z_{22}}{l_1 b_{22} \sin(\theta_2)} \tau_2$$

onde F_{2i} representa a força dos músculos flexores ($i = 1$) e extensores ($i = 2$) do cotovelo.

4.6.3 – Programa de Simulação em MATLAB

A utilidade e o propósito da definição de um modelo geométrico do braço são agora mais facilmente explicados, na medida em que, para simular a integração e efeito da acção dos actuadores (*“air muscles”*) num modelo simplificado de um braço, procura-se uma evolução no que concerne à definição habitual de espaços de trabalho. Então, o considerado é de facto, uma aproximação do braço a um manipulador 2R sendo que assim, o espaço das articulações (braço) corresponderá ao espaço das juntas (manipulador) e fazendo proveito da análise que conduziu à formulação geométrica introduzir-se-á um novo espaço, dos músculos. Este novo espaço possibilitará não só a definição das dimensões do actuador em cada posição temporal mas também a velocidade e aceleração requeridas. É possível, também com a introdução do espaço dos músculos, a descrição das forças envolvidas em cada músculo (actuador) a cada solicitação de movimento e posicionamento.

Nesta conformidade, os fenómenos cinemáticos podem agora ser descritos no espaço dos músculos o que constitui uma alternativa às representações clássicas no espaço operacional ou no espaço das articulações conforme o esquema:



Assim, o efeito das singularidades e as eventuais compensações a introduzir podem ser estudadas num espaço com características próprias [10].

Seguindo esta ordem de ideias foi aperfeiçoado e desenvolvido um programa em código MATLAB que possibilita, fazendo uso do descrito até ao momento, a manipulação e visualização dos valores teóricos, atribuídos às variáveis em estudo dos músculos, no seu espaço próprio (comprimento, velocidade, aceleração, forças). O modo como o programa se desdobra é explicado e apresentado na figura seguinte.

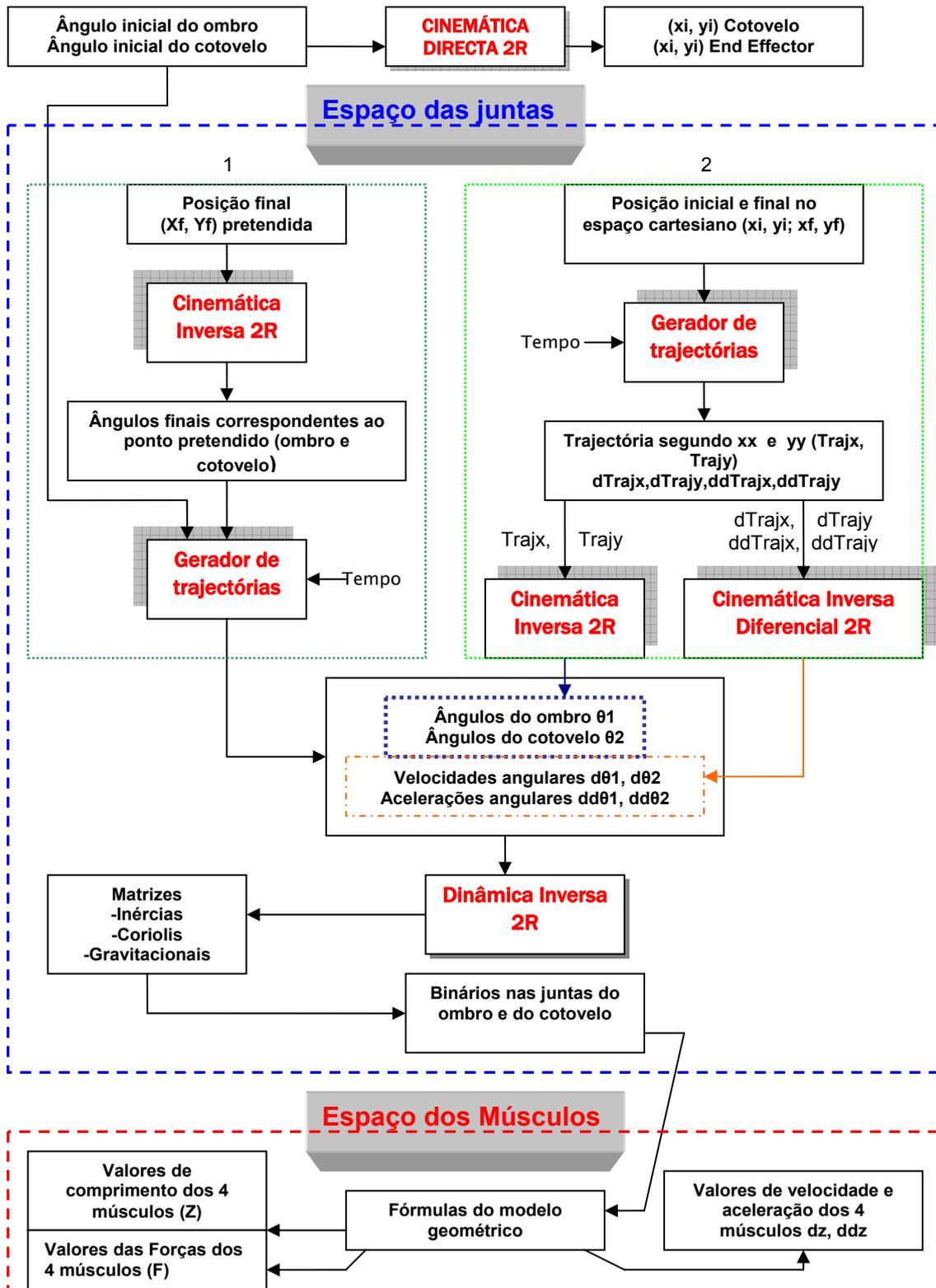


Figura 41 – Descrição do funcionamento do programa em MATLAB

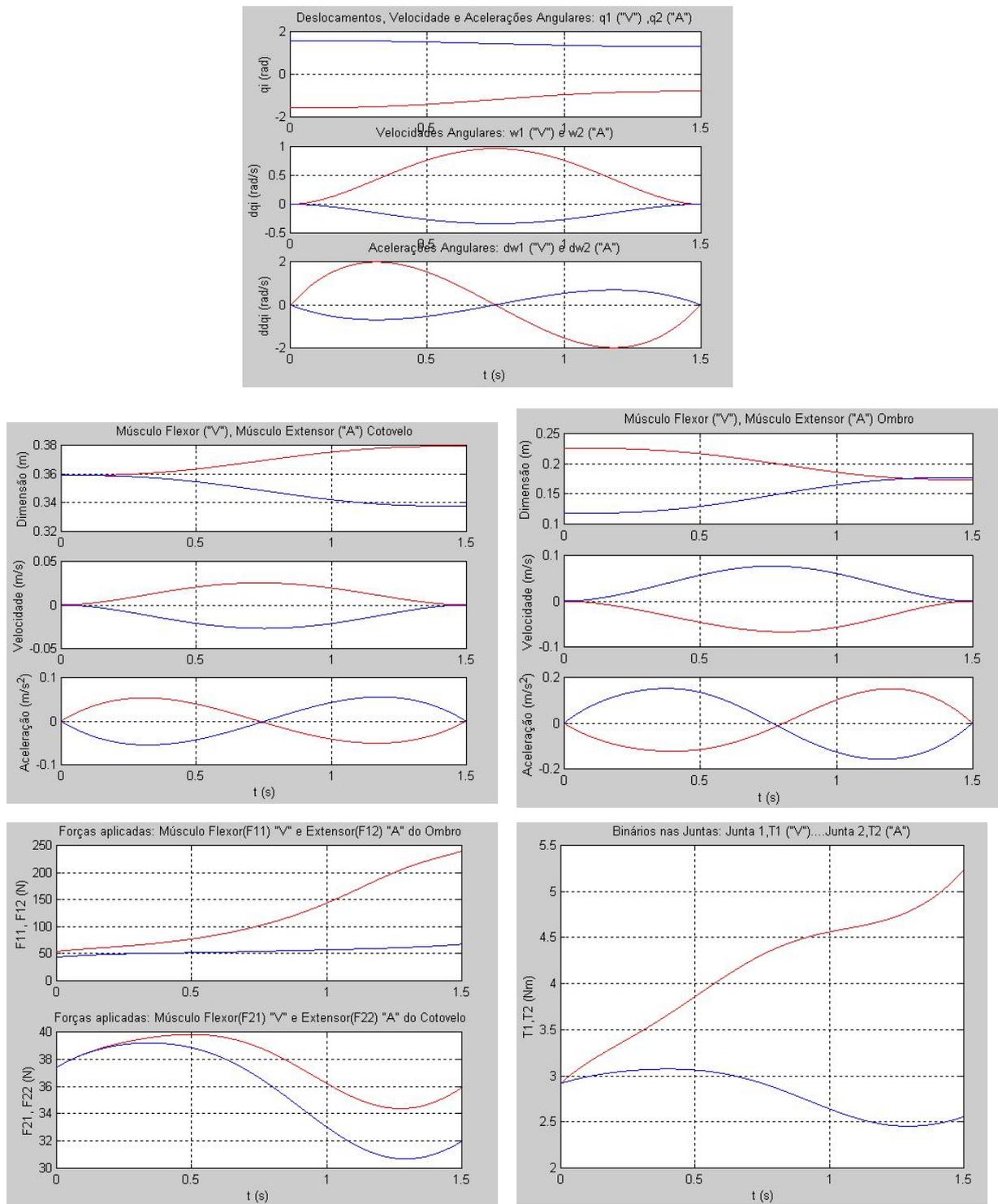


Figura 42 – Exemplo de gráficos possíveis de obter com o programa em MATLAB. Neste caso variação dos ângulos nas juntas, velocidades e acelerações angulares. Dimensões dos músculos, velocidades e acelerações. Binário nas juntas e forças aplicadas em cada um dos músculos.

4.6.4 – Estudo dos Pontos de Inserção

Tendo em vista o efectivo trabalho de simulação do programa MATLAB e também a concepção do braço, é de extrema importância clarificar os pontos de fixação dos músculos no elo correspondente, já que, é óbvio que o ponto de fixação interfere no desempenho do actuador tanto a nível de comprimento, como em relação a forças a desenvolver.

Para que a escolha dos pontos de fixação seja a mais propícia a um melhor desempenho foram testadas várias opções para a geometria do braço. Deste modo para seis pontos no espaço introduziram-se modificações ao nível de θ_{01} , θ_{02} , b_1 , b_{21} e b_{22} .

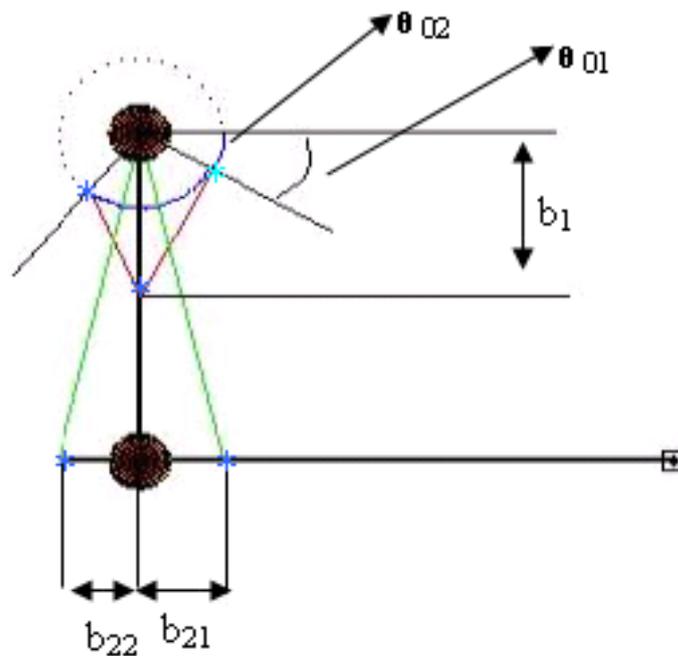


Figura 43 – Representação dos valores das mudanças.

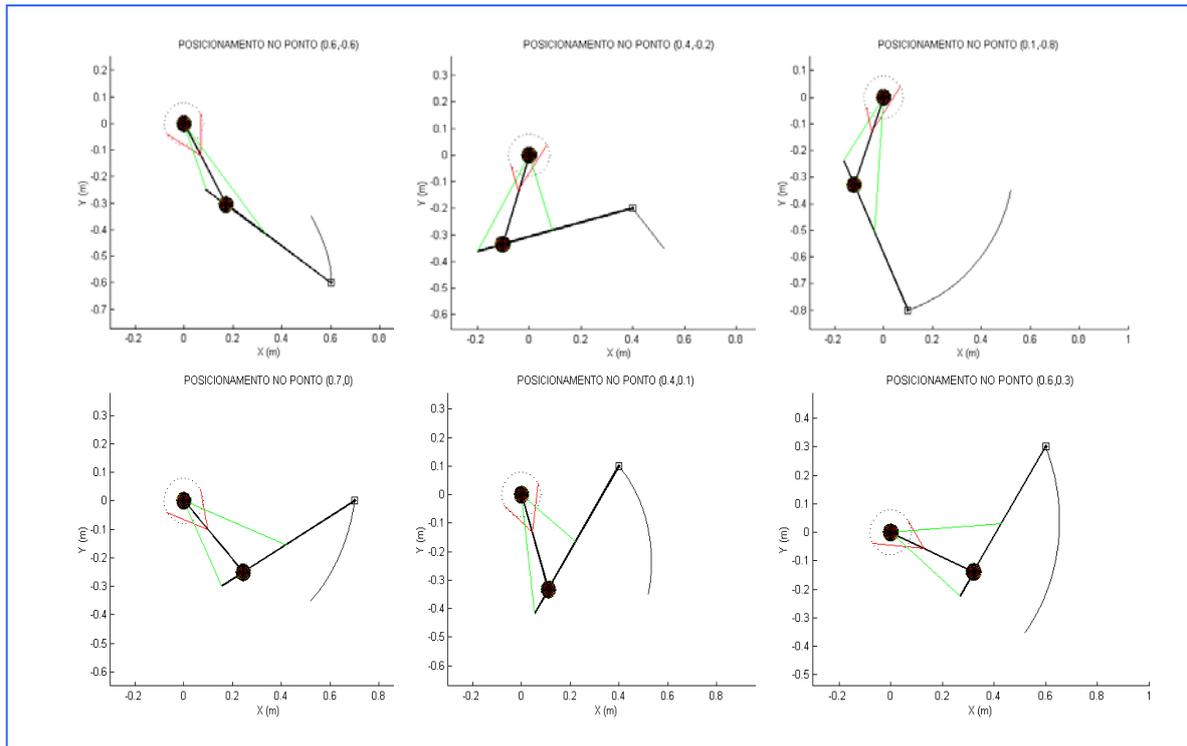


Figura 44 – Pontos experimentados. (0.6,-0.8), (0.4,-0.2),(0.1,-0.8), (0.7,0), (0.4,0.1),(0.6,0.3)

Assim para cada um dos seis pontos de destino fez-se correr o programa (2.5 segundos de simulação) 30 vezes, correspondendo cada uma delas a uma modificação ao nível das variáveis em causa. Os valores experimentados nas variáveis em causa encontram-se discriminados na tabela seguinte.

				Mudança				Valores Experimentados																					
	ELO 1	ELO 1	End-Effector	b_1 m	b_{22} m	b_{21} m	θ_{02} (rad)	θ_{01} (rad)																					
Comprimento	0,35 _m	0,52 _m	0.0 _m	0.14	0.05	0.05	-3,1416	-0.7854	0.175	0.08	0.08	-2,618	-0.6283	0.21	0.11	0.11	-2,4166	-0.5236	0.245	0.14	0.14	0.17	0.17	-2,244	0.5236	0.6283	0.7854		
Massa	0,347 _{kg}	0,744 _{kg}	0.2 _{kg}																										

Tabela 9 – a) Valores considerados de massa e comprimento para um possível hardware do braço; b) Valores considerados para as diferentes variáveis de mudança. Exemplo de um *run* do programa [ponto final (0.6, -0.6) com mudança em b_1 , valor fixado em 0.14, sendo que as variáveis que não são mudadas, para um dado *run*, são atribuídas com os valores que na figura se destacam a verde].

O programa permite retirar e escrever todos os valores afectados pela mudança introduzida, possibilitando dessa forma a análise comparativa dos valores resultantes. Deste modo obteve-se para os vários pontos, com as diferentes mudanças, diferentes implicações ao nível das variáveis no espaço dos músculos.

Ponto (0.4 , 0)							
θ_{01} (rad)	0	0.7854	0.6283	0.5236	-0.7854	-0.6283	-0.5236
max_F ₁₁ (N)	42,5526	41,7455	39,5764	38,9715	98,4094	72,6515	61,7795
om_flexor(m)	0.0248	0.0211	0.0236	0.0246	0.0162	0.0184	0.0198

Tabela 10 – Exemplo de variáveis do espaço dos músculos afectadas pela mudança e respectivos valores [caso em que o ponto de destino é o ponto (0.4,0), e a variável de mudança é o θ_{01}]. Sendo: -max_F11 o valor máximo que o músculo flexor do ombro teria que fornecer com a mudança introduzida e para o dado ponto de destino. - om_flexor o máximo da diferença entre o maior e o menor comprimento do músculo flexor do ombro ao longo da movimentação (distensão máxima do músculo flexor do ombro). Maior valor dos máximos a vermelho (mudança a evitar), menor valor dos máximos a verde (mudança a aplicar).

Ponto (0.1 , 0.8)				
b ₁ (m)	0.1	0.175	0.21	0.245
max_F ₁₂ (N)	41,9657	40,0631	38,9908	38,3297
om_flexor(m)	0.0223	0.0235	0.0243	0.0249
max_F ₁₂ (N)	41,9657	40,0631	38,9908	38,3297
om_extensor(m)	0.0259	0.0268	0.0273	0.0275

Tabela 11 – Exemplo de variáveis do espaço dos músculos afectadas pela mudança e respectivos valores [caso em que o ponto de destino é o ponto (0.1,0.8), e a variável de mudança é o b1]. Sendo: -max_F12 o valor máximo que o músculo extensor do ombro teria que fornecer com a mudança introduzida e para o dado ponto de destino. - om_flexor o máximo da diferença entre o maior e o menor comprimento do músculo extensor do ombro ao longo da movimentação (distensão máxima do músculo extensor do ombro). Maior valor dos máximos a vermelho (mudança a evitar), menor valor dos máximos a verde (mudança a aplicar).

Após o processo em que todas as combinações foram implementadas e simuladas, as ilações são retiradas da análise dos valores mais e menos elevados dos

máximos atingidos para cada variável do espaço dos músculos (as variáveis afectadas são as forças e distensões para os músculos flexor e extensor do ombro e cotovelo) e com que valor de cada mudança estes mesmos valores foram registados.

Numa primeira visualização de resultados, é claro que tanto a mudança b_1 como as b_{21} e b_{22} apresentam os valores mais elevados de máxima distensão quando são introduzidos os seus números mais elevados (0.245, 0.2 e 0.2 respectivamente) e valores mais baixos de máxima distensão quando são introduzidos os seus números mais baixos (0.14, 0.05 e 0.05 respectivamente) invariavelmente para qualquer ponto de destino. Em relação aos valores das forças para as mesmas mudanças, estas variam de uma forma perfeitamente contrária à variação dos valores de distensão, ou seja, valores mais elevados de máxima força para os números mais baixos e valores mais baixos de máxima força para os números mais baixos de mudança.

No que diz respeito às mudanças de θ_{01} e θ_{02} , as relações quantitativas não são tão facilmente extraídas. De facto, a tabela 10 é disso um exemplo.

Para além da questão de serem conhecidas as mudanças para as quais se obtêm valores mais baixos de variáveis é forçoso estabelecer qual o parâmetro mais importante nesta análise, ou seja, se é mais importante um valor baixo de máximo de distensão ou de força, isto porque geralmente variam de forma inversa. Desta forma e possuindo já observações no que diz respeito as capacidades dos músculos desenvolvidos (capítulo 4.3) podemos adiantar que as forças apresentadas como necessárias para a movimentação, para os dados pontos com as referidas mudanças, se encontram perfeitamente ao alcance das capacidades evidenciadas pelos músculos desenvolvidos. Nesta ordem de ideias a distensão máxima seria o parâmetro mais importante, também porque, é claramente o ponto mais delicado dos músculos que têm um limite de distensão que em alguns casos, não permitiria que o movimento fosse possível. No entanto todas as simulações levadas a cabo foram concebidas com um valor baixo de massa total e então, se a massa fosse aumentada, os valores de forças requeridas aumentariam seguramente. Tendo em conta o ultimo facto descrito, assumiu-se uma necessidade de impor um compromisso entre importância de distensão máxima e forças máximas, no entanto o peso da distensão continuará a ser o mais significativo.

Com todas estas considerações, estabeleceu-se como valores ideais para as mudanças b_1 , b_{21} e b_{22} (e consequentes pontos de fixação de músculos nos elos directamente envolvidos) os valores de 0.175, 0.08 e 0.08 respectivamente.

Como a análise das mudanças θ_{01} e θ_{02} é mais complexa, procurou-se encontrar um número de mudança que, mais vastas vezes, apresentasse valores médios de máxima distensão e que significasse, simultaneamente, um abaixamento de valor mais elevado de máxima força. Após estudo atento e tendo em mente estes pormenores, os números de mudanças θ_{01} e θ_{02} que mais se aproximavam destes requisitos foram um valor intermédio de 0 e -0.7854 que seria de -0.5233 ($-\pi/6$) para θ_{01} e um valor intermédio entre -2.24 ($-5\pi/7$ ou -128°) e -2.0944 ($-5\pi/7.5$ ou -120°) que teria então o valor de -2.16 ($-5\pi/7.25$ ou -124°). Os valores ditos ideais são introduzidos na configuração na configuração geométrica passando-se, a partir deste momento a simular com estes valores de pontos de fixação. Esta configuração é identificada na figura 43 que serve também para revelar o significado de cada mudança.

4.7 – Sistema de Controlo na Simulação de Movimento

4.7.1 – Método de Controlo Clássico

Numa primeira abordagem ao modelo concebido para a simulação do movimento, foi aperfeiçoado um sistema de controlo baseado no controlo clássico de um manipulador 2R.

Supõe-se que ao nível das juntas, actuariam motores rotacionais ideais que desenvolveriam binários solicitados pela informação que advinha de um regulador de binário. Estes binários influenciariam a posição e movimentação do manipulador/braço.

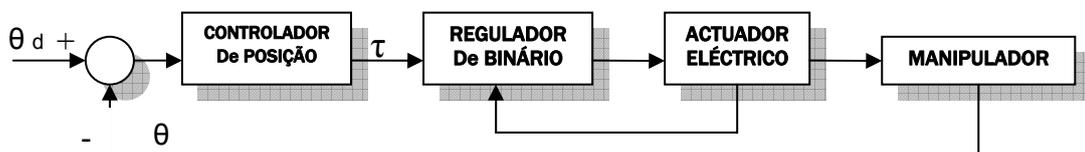


Figura 45 – modelo clássico de controlo de manipulador 2R.

Em termos práticos, de implementação no programa MATLAB, o que realmente se emprega, é a distinção/diferença entre os ângulos desejados em cada uma das juntas/articulações (ombro e cotovelo) para uma dada movimentação, e os ângulos corrigidos/reais da evolução da simulação ao longo do tempo. O erro da diferença é o objecto de entrada do controlador PID, que gerará binários apropriados segundo o

PID. Os binários gerados são usados na dinâmica directa, com recurso à formulação numérica de Runge-Kutta, calculando os valores corrigidos e em termos temporais, seguintes.

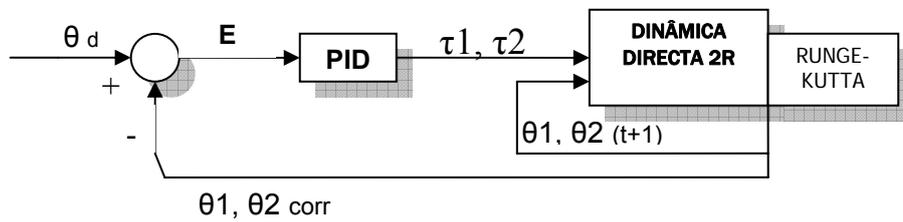


Figura 46 – Representação esquemática do controlador implementado no espaço das juntas

4.7.2 – Método de Controlo no Espaço dos Músculos

A inovação da introdução de um novo espaço de manipulação de variáveis, acarreta também a intenção de desenvolver um controlador nesse mesmo espaço. É porém evidente que este novo espaço introduz características próprias. O ideal ou, o mais teoricamente viável para implementação no uso prático dos músculos criados seria, um conjunto de implicações a nível de controlo que administrassem as dimensões, velocidades e acelerações dos músculos.

As considerações a tomar deverão ter em conta, as características dos músculos pneumáticos, que a uma dada pressão apresentam uma dada dimensão e são dispositivos capazes de possibilitar uma hipotética força.

O controlador de posição deveria retribuir a força necessária (a aplicar pelos músculos) para a concretização da movimentação a cada instante. O regulador de pressão controlaria o caudal de ar a penetrar no interior do músculo, funcionando assim como o gestor de solicitação do actuador (músculo). A reacção destes efeitos seria uma nova posição do manipulador (braço) e por conseguinte uma realimentação do sistema com as dimensões (t+1) do músculo na nova posição (t+1).



Figura 47 – Representação esquemática do controlador ideal no espaço dos músculos

Seguindo esta linha de pressupostos, foi implementado no programa MATLAB que simula o movimento do braço, um controlador no espaço dos músculos.

Este controlador retira a diferença entre a dimensão desejada e a dimensão real/corrigida de todos os 4 músculos em simulação (músculos flexores e extensores do ombro e cotovelo), a diferença das velocidades desejadas e as velocidades reais/corrigidas.

Fazendo uso de um bloco PID as diferenças são interpretadas e manipuladas no sentido de fornecerem o valor das forças consideradas necessárias em cada músculo, ou seja, F11 (músculo flexor do ombro), F12 (músculo extensor do ombro), F21 (músculo flexor do cotovelo), F22 (músculo extensor do cotovelo). As forças geradas, trabalhadas de forma inversa a partir dos momentos necessários em cada junta, fornecem os binários essenciais em cada junta. Serão estes binários que possibilitam laborar os valores da mesma forma que são aquando de um controlador no espaço das juntas. Faz-se então uso da dinâmica directa para obter os ângulos a atingir em cada junta. Estes ângulos permitirão obter, a partir da formulação geométrica (Capítulo 4.6.2) e da manipulação das suas fórmulas, as dimensões corrigidas dos músculos (Z11, Z12, Z21, Z22) e assim realimentar todo o sistema de controlo.

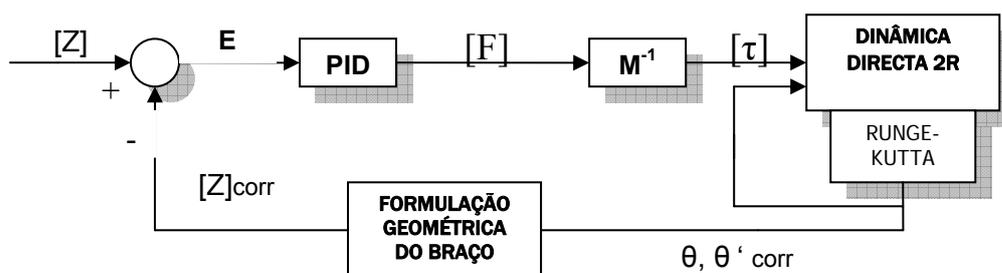


Figura 48 – Diagrama de blocos do controlador de posição no espaço dos músculos.

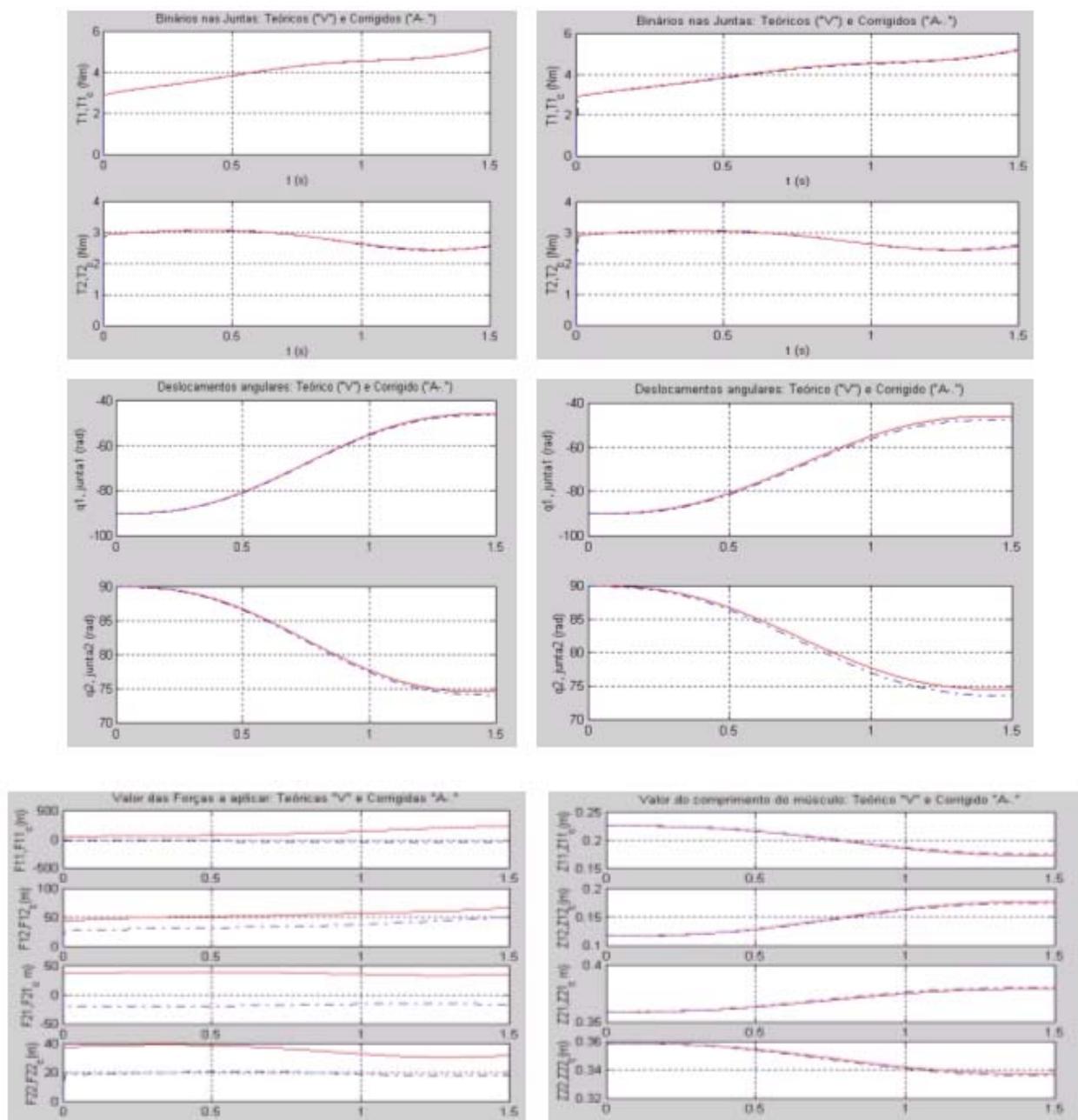


Figura 49 – Variáveis teóricas e variáveis reais controladas por controlador no espaço das juntas (lado esquerdo) e no espaço dos músculos (lado direito)

4.8 – Projecto Mecânico e Estrutural

Com vista à concepção da estrutura do braço, para a implementação real dos músculos, foi realizado um estudo de modo a idealizar o conjunto de soluções mecânicas a propor.

A idealização da estrutura tem em atenção todas as limitações da movimentação axial dos músculos e tem como ponto base de partida, o modelo

geométrico alcançado, o mesmo que é utilizado para a formulação do programa em MATLAB. São levados em linha de conta os pontos de inserção dos músculos e o modo rotacional mais adequado a cada junta (articulação).

4.8.1 – Junta Rotacional do Ombro

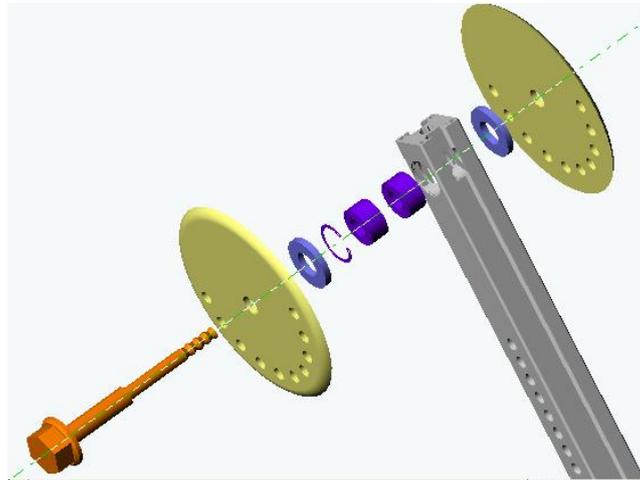


Figura 50 – Junta rotacional do ombro

4.8.2 – Junta Rotacional do Cotovelo

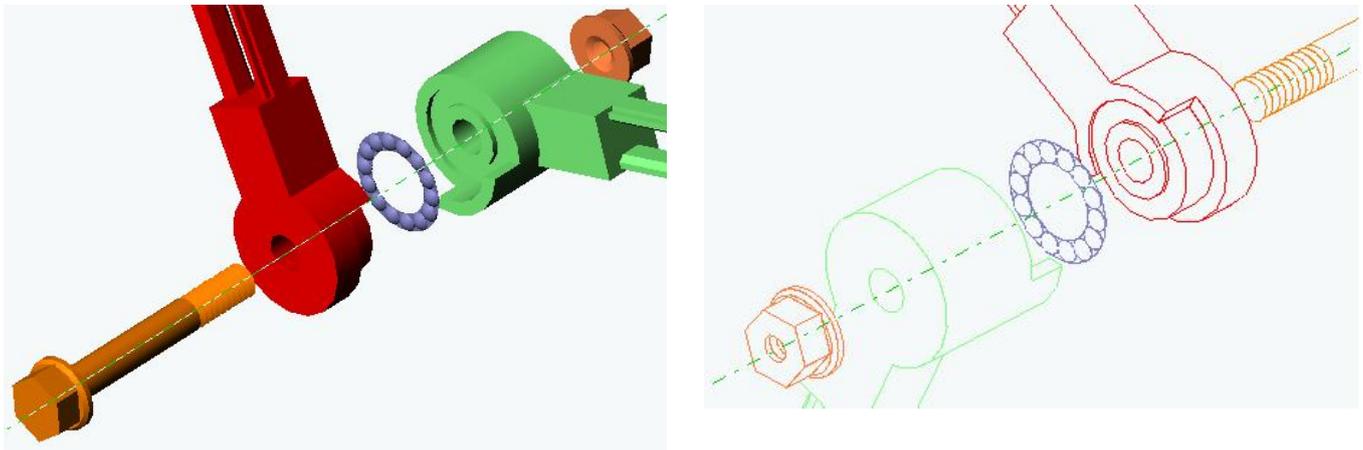


Figura 51 – Junta rotacional do cotovelo

4.8.3 – Idealização da Estrutura Mecânica do Braço

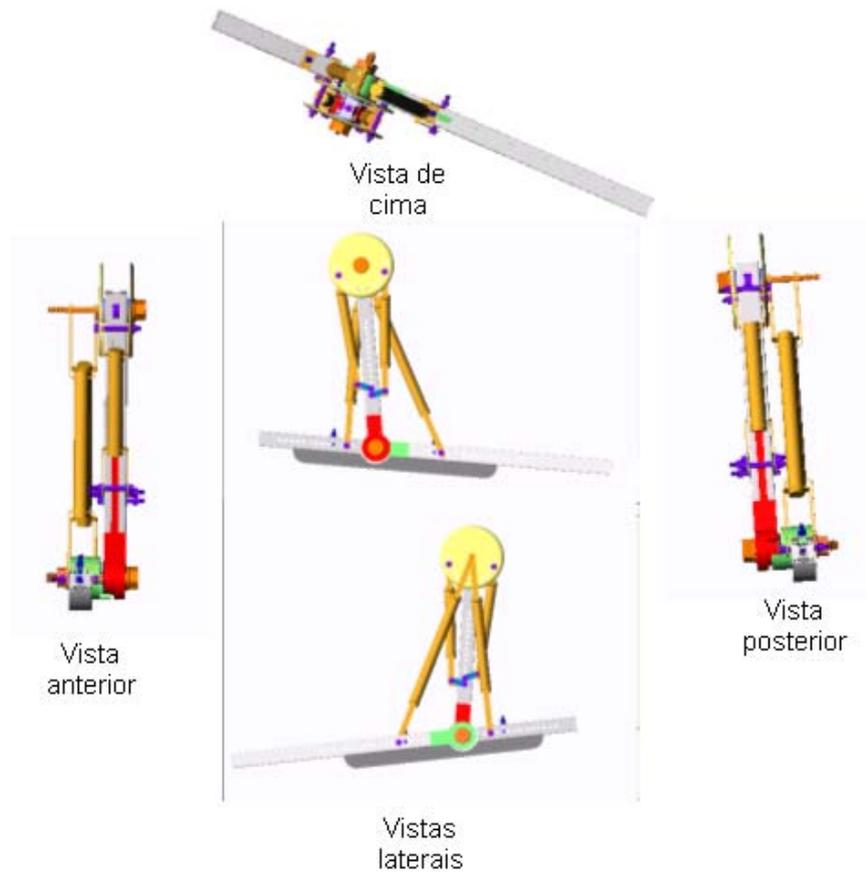


Figura 52 – Vistas do braço



Figura 53 – Aspecto final da estrutura proposta para o braço

O aspecto final da estrutura proposta tendo em conta todos os pormenores mecânicos é apresentado na figura 53.

4.9 – Primeiros Conceitos de Controlo

Material utilizado para o controlo do músculo

Após todos os estudos efectuados aos músculos desenvolveu-se uma estrutura com o objectivo de observar até que ponto este tipo de actuadores são controláveis. A estrutura inicialmente idealizada para a aplicação dos músculos vai de encontro à simulação efectuada em MATLAB e que tenta de alguma forma aproximar-se da estrutura biológica do braço humano com os principais músculos a actuar sobre este.

Para fazer actuar o músculo foi necessário a utilização de um dispositivo que permitisse o controlo da pressão do ar comprimido a introduzir no músculo de uma forma faseada, isto é, percorrer toda a gama de pressões entre 0 a 6 bar. Para tal escolheu-se uma electro-válvula proporcional pneumática ITV2030 da SMC que permite uma variação proporcional da pressão entre 0 a 5 bar (os pormenores desta válvula encontram-se em anexo).



Figura 54 – Electro-Válvula proporcional.

Esta válvula é alimentada com 24 V e utiliza um sinal de 4 a 20 mA para fazer variar a pressão à saída. Para ser possível o controlo em corrente da válvula utilizou-se a fonte em corrente que a carta analógica A1S63ADA, que se adapta aos PLC's da MITSUBISHI. Foi desenvolvido um programa em LADDER que configura a carta analógica para funcionar como fonte de corrente e também para a configuração de uma entrada analógica, na mesma carta, permitindo assim o controlo, através de uma fonte de tensão, da pressão à saída da válvula. A figura a seguir retrata a bancada utilizada para o controlo da válvula.

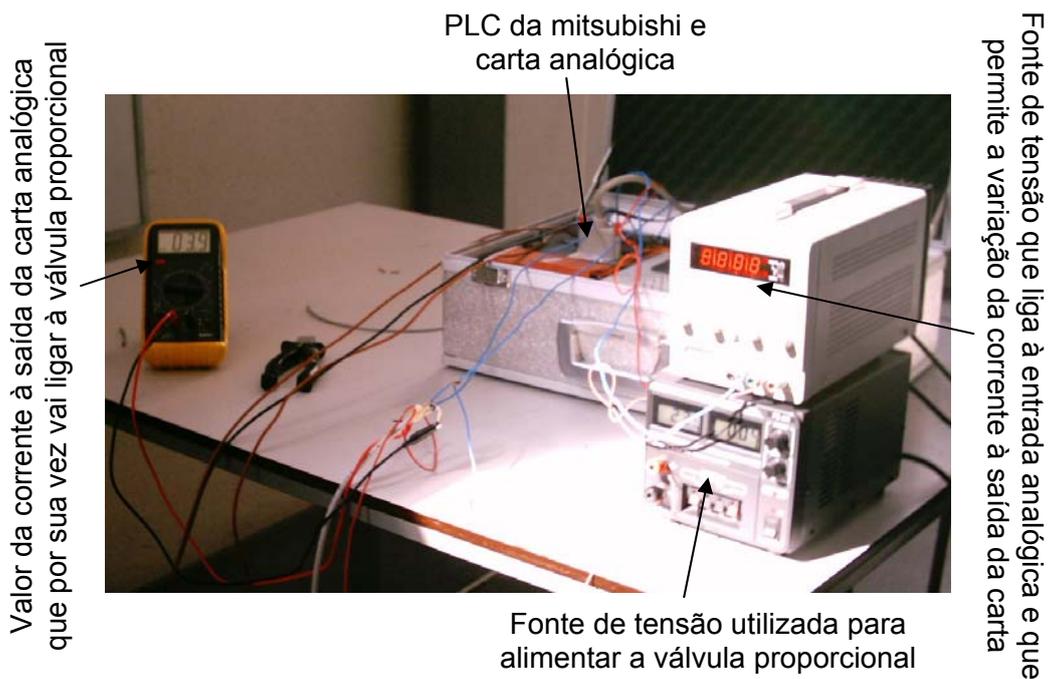


Tabela 55 – Bancada com PLC e fontes de alimentação

A existência somente de uma válvula proporcional e o facto de ser pretendido o controlo de pelo menos 2 músculos, obrigou a que o programa contemplasse a utilização da mesma válvula para fornecimento de ar comprimido alternadamente para cada um dos músculos. Foram necessárias duas electro-válvulas, uma para cada músculo, para comutar a saída de ar da válvula proporcional.



Figura 56 – Electro-Válvula

Quanto a corrente atingisse um valor de 4 mA à entrada da carta analógica o PLC comutava entre uma electro-válvula e a outra, fazendo assim que a válvula proporcional fornecesse o ar comprimido ao outro músculo.

Sistema de alavanca



Figura 57 – Estrutura utilizada

Circuito Pneumático

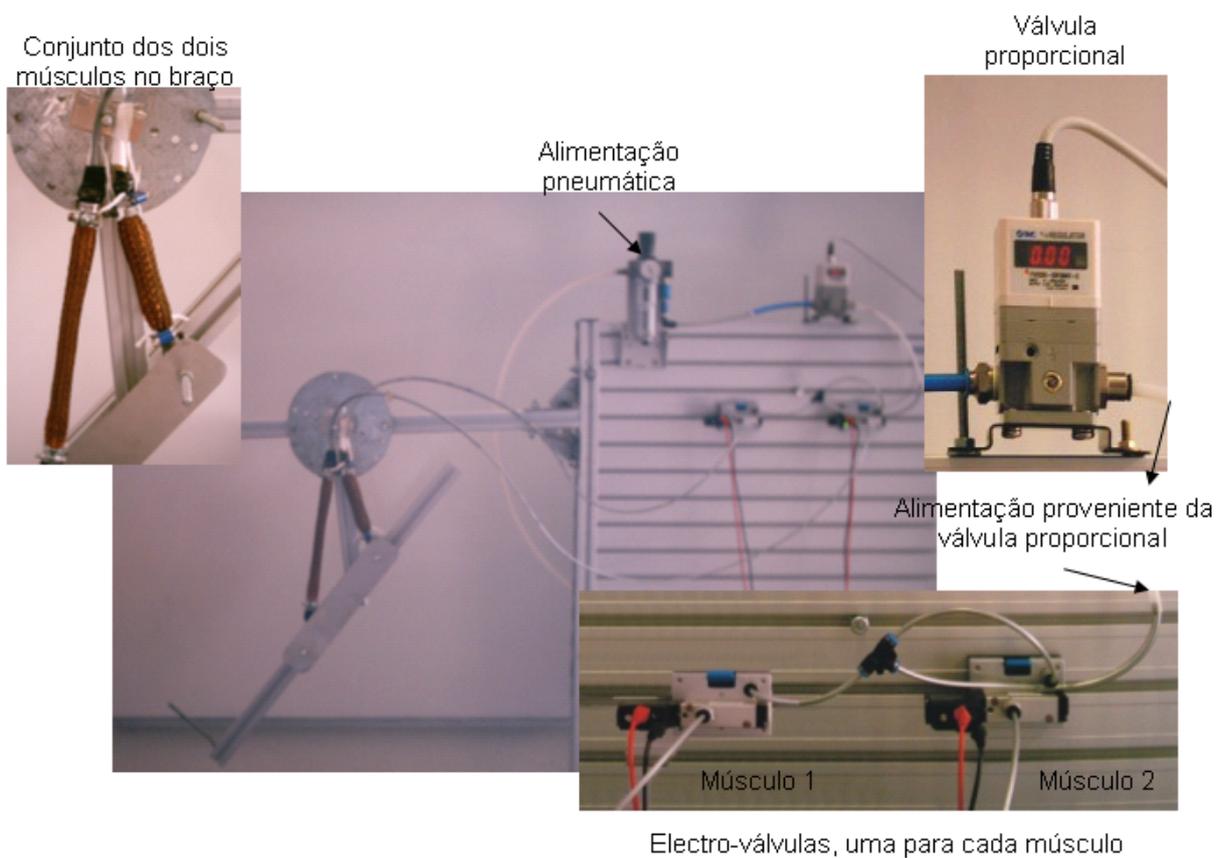


Figura 58 – Estrutura e componentes pneumáticos utilizados

5 – Conclusões

Após este estudo efectuado conclui-se que a área da robótica poderá beneficiar com o uso deste tipo de actuadores pois os seus comportamentos revelaram-se bastante satisfatórios. Em relação aos “*muscle wires*” e mais concretamente ao seu comportamento geral na estrutura desenvolvida verificou-se que apesar destes demonstrarem uma relação força\peso bastante elevada, todo o seu potencial poderá não ter sido usado. Uma das limitações verificadas para este tipo de actuadores foi o facto de ser necessário um tempo de relaxamento imposto pelo próprio material, que de certa forma condicionava a rapidez com que a estrutura se movia. Esta, na nossa opinião, constitui a maior limitação dos “*muscle wires*”. Para além disso o tempo que o próprio material permite que uma determinada corrente passe por ele também é limitada, pois o sobreaquecimento pode provocar a danificação do músculo. Dado também às dimensões do próprio actuador torna-se difícil a forma de os manter fixos convenientemente. No que diz respeito ao controlo, os “*muscle wires*” são do tipo de actuadores “tudo ou nada”, daí o seu controlo ser igualmente limitado.

Apesar dos problemas encontrados durante todo o processo de construção da estrutura e da correcta forma de conciliar a actuação dos músculos sem o risco de os danificar, o resultado final foi surpreendente pois conseguimos pôr a andar uma estrutura com dimensões mínimas com uns simples fios de nitinol.

Os músculos pneumáticos, por outro lado, revelaram-se bastante versáteis e flexíveis no que concerne ao seu controlo ao contrário do nitinol.

Depois de observados e analisados os resultados obtidos verificámos que as possibilidades de obter um actuador com as características que mais nos convêm são inúmeras, bastando para tal combinar os diferentes factores construtivos do músculo (diâmetro da malha, comprimento do músculo) de forma adequada. O estudo efectuado permitiu que fossem percebidos precisamente quais os factores que influenciavam o comportamento dos músculos, visando futuros desenvolvimentos de músculos pneumáticos.

Embora as características e capacidades dos dois tipos de músculos artificiais estudados, serem claramente de grandezas diferentes, impossibilitando desta forma uma comparação precisa a nível de valores concretos, algumas ideias gerais podem ser confrontadas.

Em algumas formas os músculos pneumáticos e os “*muscle wires*” são similares, principalmente no que diz respeito à característica mútua de contracção do comprimento total, quando activados. A experiência adquirida permite afirmar que enquanto os “*muscle wires*” podem contrair até 10% do seu comprimento total, os músculos pneumáticos possibilita a contracção até 25% do seu comprimento.

Os “*muscle wires*” são grandes consumidores de corrente eléctrica, e mesmo que consideremos o seu tempo de activação rápido, o seu ciclo (aquecimento – arrefecimento – aquecimento) é claramente um processo lento, os músculos pneumáticos de forma oposta apresentam-se como dispositivos de resposta e ciclo de variação imposta, extremamente rápidos. De fazer notar, também, que sendo os músculos pneumáticos activados por ar comprimido, o seu modo de activação não é dissipado nem dispendido mas renovável e reutilizável.

O desenvolvimento do controlo numérico no espaço dos músculos e o facto do resultado da comparação de níveis de desempenho entre este tipo de controlo de simulação e o controlador clássico não ter sido, de nenhuma forma, revelador de ineficiência por parte do controlador desenvolvido impõe-se, como um resultado importante. Isto porque, abre claramente a hipótese de este ser um caminho a ser tomado, no sentido de se evoluírem modelos de músculos pneumáticos dinâmicos. Os modelos dinâmicos introduziriam numa primeira instância, a possibilidade de uma análise do possível desempenho dinâmico contribuindo para a avaliação de binários e forças para uma dada tarefa. Então, a passagem para o controle de um sistema real e implementado com músculos pneumático seria já uma realidade mais acessível, dada a complexidade que o controlo dos músculos acarreta, nomeadamente, da passagem de forças requeridas para pressão a fornecer ao actuador, onde realmente se vislumbra uma maior dificuldade, futura, de resolução.

Um facto conclusivo e importante é também a necessidade de constantes proporcionais e derivativas, do controlo no espaço dos músculos, de grandeza bastante elevada comparadas com as usadas no controlo numérico no espaço das juntas. Esta assimetria de valores será porventura anunciadora de uma necessidade de aperfeiçoamento do controlo numérico no espaço dos músculos e uma maior facilidade de manipulação das variáveis que o compõem para que o sistema não se demonstre rígido.

Apresenta-se por fim, como uma possível linha de orientação no sentido de identificar o comportamento estático dos músculos desenvolvidos, as rectas de linearização fornecidas e que se entendem como uma mais valia na definição de um possível comportamento estático médio.

6 – Questões em Aberto

Serve este pequeno capítulo para que, de alguma forma, sejam descritas questões que mereceriam tanto no trabalho apresentado tal como num hipotético e posterior, uma maior atenção e disponibilidade no sentido de evolução dos sistemas em estudo.

Tornou-se claro que, a definição de um modelo que comportasse uma lei de regência do comportamento dos músculos desenvolvidos, seria de extrema importância. É evidente que para o controlo de um sistema, o conhecimento antecipado da evolução das suas variáveis em função dos elementos passíveis de se modificar é essencial. Seria então de todo essencial a apresentação e definição clara, não tão só de um modelo estático comprovado e devidamente preciso de forma a ser implementado, mas também, e talvez mais importante, a definição de um modelo dinâmico. O modelo dinâmico corresponderia a uma saída para a avaliação de variáveis dinâmicas e num sentido mais amplo colocaria o estudo mais perto da possibilidade de implementação de um braço de movimentação controlável.

Seria igualmente importante o aperfeiçoamento do controlo no espaço dos músculos (já com o conhecimento adquirido de um modelo dinâmico). A caracterização, do modo como a informação de uma dada força, necessária a um dado movimento, seria interpretada em termos de pressão a aplicar aos diferentes músculos, reveste-se de uma enorme importância até pela necessidade de interligar todos os meios de hardware precisos para o controlo dos músculos de actuação no braço.

Em termos de temas importantes relativamente ao desenvolvimento do braço robótico, a escolha do uso ou não de pares de músculos agonistas/antagonistas é também um assunto a desenvolver. Isto porque, a utilidade destes pares não é ainda um dado adquirido e portanto o seu uso deverá ser devidamente justificado e/ou amplificado de importância.

7 – Referências

- [1]-Caldwell, D.G., G.A. Medrano-Cerda, and M.J. Goodwin, "Control of Pneumatic Muscle Actuators," *"IEEE Control Systems Journal,"* Vol. 15, No. 1, pp. 40-48, Feb 1995.
- [2]-Colburn, R. W., "Design and control of robotic leg with braided pneumatic actuators", M.S.Thesis, Case Western Reserve University, Cleveland OH, 2000.
- [3]-T. Noritsugu , "Pneumatic Actuators", Journal of Robotics Society of Japan, Vol15, Nº 3 1991.
- [4]-Chou, C.P., B. Hannaford, "Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles," *"IEEE Transactions on Robotics and Automation,"* Vol. 12, No. 1, pp. 90-102, Feb 1996.
- [5]- Alexandra M. S. F. Galhano, J. A. Tenreiro Machado e J. L. Martins de Carvalho, "On the Statistical Analysis of Biological Arms ", 13th IMACS World Congress on computation and Applied Mathematics, Dublin, Ireland, 91.
- [6]- Chou, Ching - Ping, "Study of Human Motion Control with a Physiology Based Robotic Arm and Spinal Level Neural Controller", Phd Thesis, University of Washington ,1996.
- [7]- Klute, G.K., J.M. Czerniecki, and B. Hannaford, "McKibben Artificial Muscles: Pneumatic Actuators with Biomechanical Intelligence," Proceedings of the IEEE/ASME 1999 International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM '99), Atlanta, GA, September 19-22, 1999.
- [8]-Klute, G. K., B. Hannaford, "Fatigue Characteristics of McKibben Artificial Muscle Actuators." Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Victoria , B.C., Canada, October 13-17, 1998, pp.1776-1782.
- [9]-VL Nickel, J. Perry and AL Garrett, "Development of useful function in the severely paralyzed hand ." Journal of bone and Joint surgery, Vol 45A, Nº5, 1963.
- [10]- Alexandra M. S. F. Galhano, J. A. Tenreiro Machado e J. L. Martins de Carvalho, "Driving Mechanical Robots Through Linear actuators ", Institute of Engineering of the Polytechnic Institute of Porto, Porto, Portugal, 99.

8 – Anexos

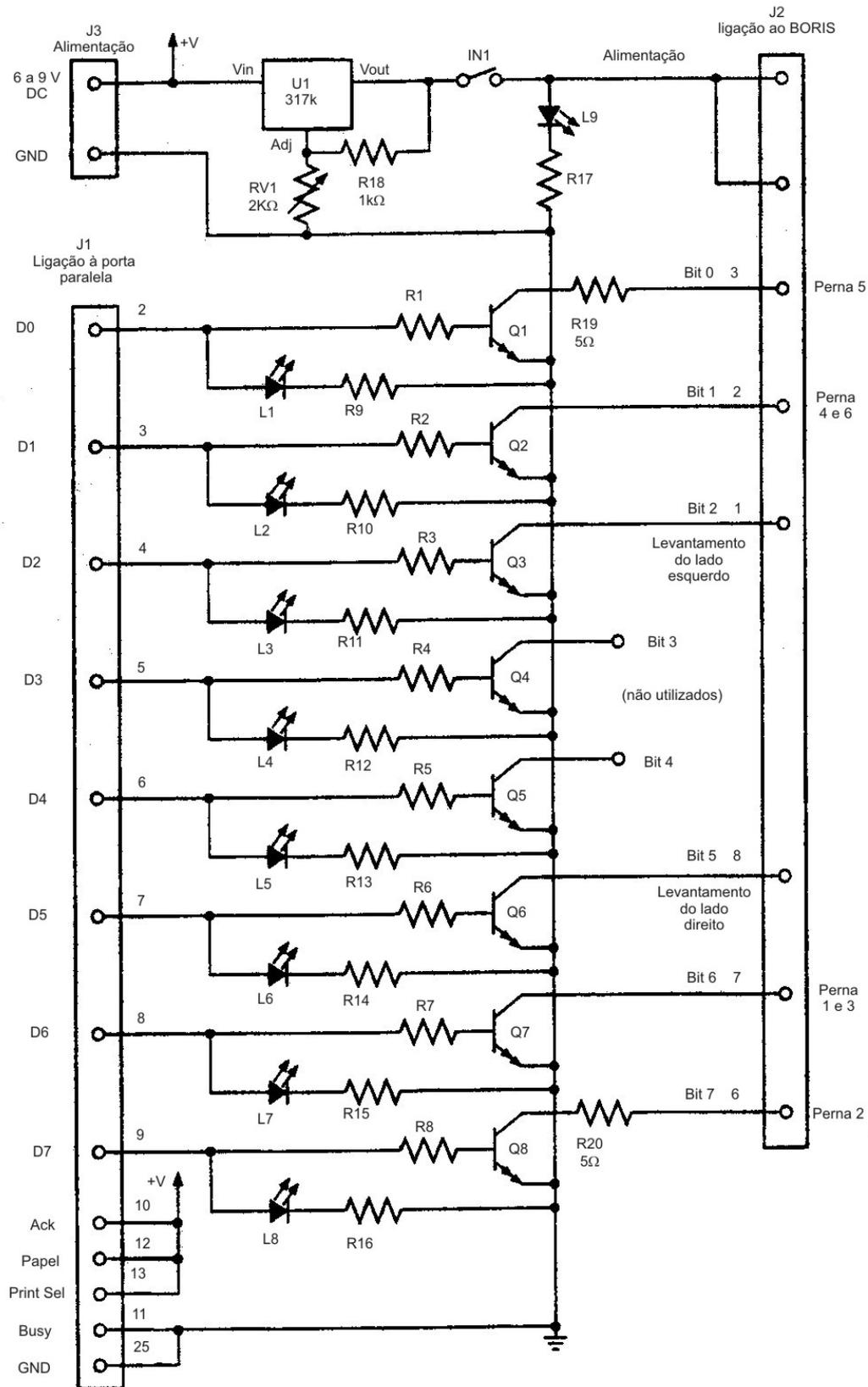


Figura 59 – Circuito eléctrico da placa de ligação à porta paralela

```

NEW
10 REM Programa de teste 1
11 REM
12 REM Activa uma linha na porta paralela por um periodo de tempo curto
13 REM
14 REM Saida do Teclado BORIS
15 REM "1" Tecla = Bit 0 = Perna 5
16 REM "2" Tecla = Bit 1 = Pernas 4 & 6
17 REM "3" Tecla = Bit 2 = Levantamento do lado esquerdo
18 REM "4" Tecla = Bit 3 = não utilizado
19 REM "5" Tecla = Bit 4 = não utilizado
20 REM "6" Tecla = Bit 5 = Levantamento do lado direito
21 REM "7" Tecla = Bit 6 = Pernas 1 & 3
22 REM "8" Tecla = Bit 7 = Perna 2
23 REM

30 DELAY = 200: REM Atraso no tempo, aumentar para ser maior
40 LPRINT CHR$(0); : REM Limpar porta
50 PRINT "Pressionar de 1 até 8 para activar os bit's, Q para terminar"

100 A$ = INKEY$: REM Qual a tecla pressionada
110 IF A$ = "1" THEN LPRINT CHR$(1); : GOTO 200: REM bit 0
120 IF A$ = "2" THEN LPRINT CHR$(2); : GOTO 200: REM bit 1
130 IF A$ = "3" THEN LPRINT CHR$(4); : GOTO 200: REM bit 2
140 IF A$ = "4" THEN LPRINT CHR$(8); : GOTO 200: REM bit 3
150 IF A$ = "5" THEN LPRINT CHR$(16); : GOTO 200: REM bit 4
160 IF A$ = "6" THEN LPRINT CHR$(32); : GOTO 200: REM bit 5
170 IF A$ = "7" THEN LPRINT CHR$(64); : GOTO 200: REM bit 6
180 IF A$ = "8" THEN LPRINT CHR$(128); : GOTO 200: REM bit 7
190 IF A$ = "q" OR A$ = "Q" THEN LPRINT CHR$(0); : END
195 GOTO 100
200 REM Loop do atraso
210 FOR I = 1 TO DELAY
220 NEXT I
230 LPRINT CHR$(0); : REM Depois do atraso, limpar a saida
240 GOTO 100

```

Tabela 12 – Programa teste1

```

NEW

10 REM Programa de teste 2
11 REM Programa para fazer andar o BORIS através da ligação à porta paralela
12 REM Controlo feito pelo teclado através das setas: seta para cima = para a frente, etc.
13 REM
14 REM Enviar os bit's para a porta paralela com LPRINT CHR$(Bits);
15 REM
16 REM Bit's = 1*n + 2*n + 4*n + 8*n + 16*n + 32*n + 64*n + 128*n
17 REM
18 REM A equação dos Bit's liga-os se n = 1 ou desligados se n = 0
19 REM Primeira posição (1*n) se bit 0
20 REM Última posição (128*n) se bit 7
21 REM Calcular com cada n a 1 ou 0 quais os padrões de saída
22 REM
23 REM Nota: Ponto e vírgula (;) no final de LPRINT fixa o
24 REM padrão dos bit's na porta paralela até ao próximo comando LPRINT
25 REM

30 DELAY = 350: REM Aumentar para andar mais devagar, diminuir para andar mais depressa

40 PRINT "Pressionar nas setas para cima, para baixo, para a esquerda, ou para a direita"
50 PRINT "Pressionar na tecla espaço para parar"
60 PRINT "Pressionar na tecla Q para terminar"

100 REM Parar de andar
110 LPRINT CHR$(0); : GOSUB 1000: REM Limpa todos os Bit's
120 GOTO 100

200 REM Andar para a frente
210 LPRINT CHR$(65); : GOSUB 1000: REM Bit 6, 0 ON
220 LPRINT CHR$(4); : GOSUB 1000: REM Bit 2 ON
230 LPRINT CHR$(130); : GOSUB 1000: REM Bit 7, 1 ON
240 LPRINT CHR$(32); : GOSUB 1000: REM Bit 5 ON
250 GOTO 200

300 REM Andar para trás
310 LPRINT CHR$(65); : GOSUB 1000: REM Bit 6, 0 ON
320 LPRINT CHR$(32); : GOSUB 1000: REM Bit 5 ON
330 LPRINT CHR$(130); : GOSUB 1000: REM Bit 7, 1 ON
340 LPRINT CHR$(4); : GOSUB 1000: REM Bit 2 ON
350 GOTO 300

400 REM Virar para a esquerda
410 LPRINT CHR$(66); : GOSUB 1000: REM Bit 6, 1 ON
420 LPRINT CHR$(32); : GOSUB 1000: REM Bit 5 ON
430 LPRINT CHR$(129); : GOSUB 1000: REM Bit 7, 0 ON
440 LPRINT CHR$(4); : GOSUB 1000: REM Bit 2 ON
450 GOTO 400

500 REM Virar para a direita
510 LPRINT CHR$(66); : GOSUB 1000: REM Bit 6, 1 ON
520 LPRINT CHR$(4); : GOSUB 1000: REM Bit 2 ON
530 LPRINT CHR$(129); : GOSUB 1000: REM Bit 7, 0 ON
540 LPRINT CHR$(32); : GOSUB 1000: REM Bit 5 ON
550 GOTO 500

1000 REM Verificar se foi pressionada alguma tecla e fazer o Loop de atraso
1010 A$ = INKEY$
1020 IF A$ = " " THEN PRINT "Parar": LPRINT CHR$(0); : GOTO 100
1030 IF A$ = CHR$(0) + "H" THEN PRINT "Para a frente": LPRINT CHR$(0); : GOTO 200
1050 IF A$ = CHR$(0) + "P" THEN PRINT "Para trás": LPRINT CHR$(0); : GOTO 300
1060 IF A$ = CHR$(0) + "K" THEN PRINT "Esquerda": LPRINT CHR$(0); : GOTO 400
1070 IF A$ = CHR$(0) + "M" THEN PRINT "Direita": LPRINT CHR$(0); : GOTO 500
1080 IF A$ = "Q" OR A$ = "q" THEN LPRINT CHR$(0); : END
1100 FOR I = 1 TO DELAY
1110 NEXT I
1120 RETURN
1900 END

```

Tabela 13 – Programa teste 2

Músculo (Malha D-22mm; Comprimento 22cm)		Força (N)									
		6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
Pressão (bar)	0	20,7	20,9	21,5	21,7	21,9	21,9	22,0	22,0	22,1	22,2
	1	20,6	20,7	20,7	20,7	20,7	21,2	21,4	21,4	21,9	21,9
	2	17,9	17,9	18,1	18,1	18,5	18,7	19,1	19,3	19,6	19,7
	3	16,6	16,7	16,8	17,3	17,3	17,4	17,4	17,5	18,2	18,3
	4	15,9	16,0	16,0	16,3	16,3	16,5	16,5	16,8	16,9	17,2
	5	15,5	15,5	15,6	15,8	15,8	16,0	16,0	16,2	16,3	16,4
	6	15,1	15,2	15,2	15,4	15,4	15,5	15,5	15,8	15,9	16,0

Tabela 14 – Valores dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

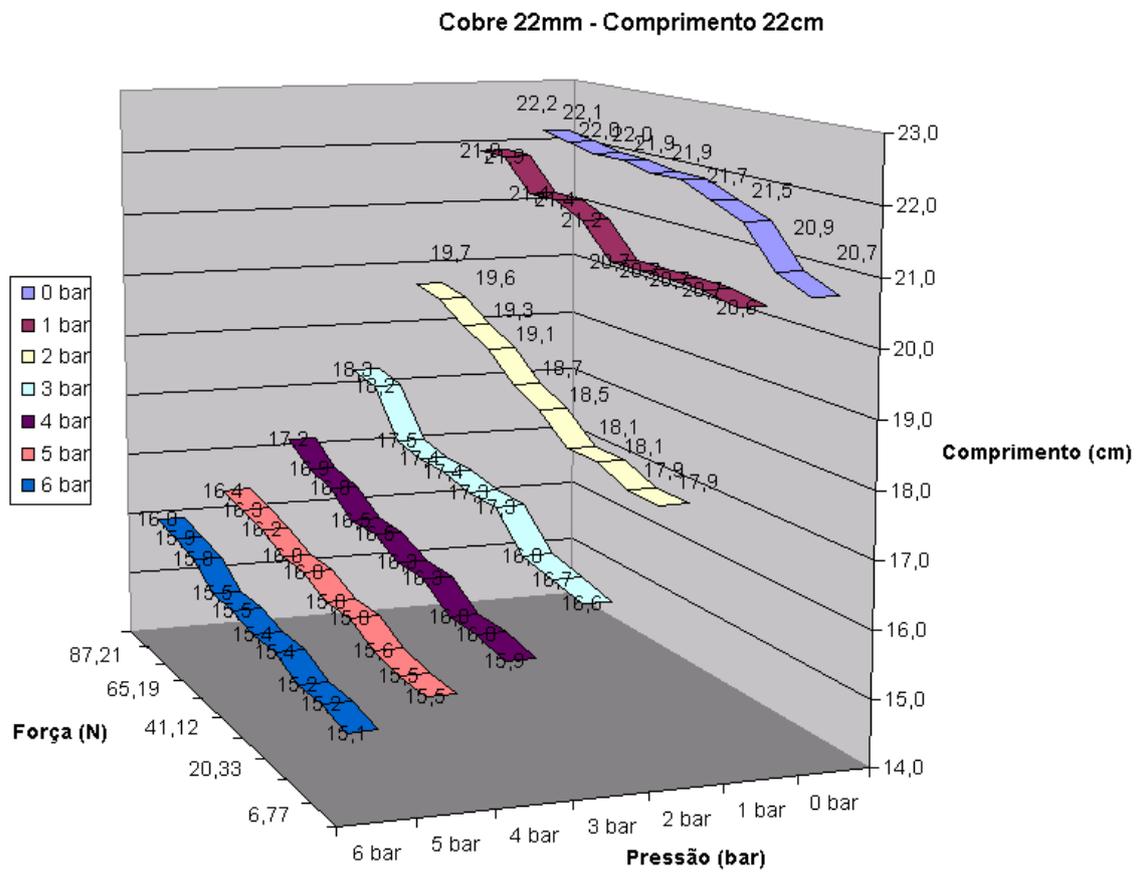


Figura 60 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Músculo (Malha D-17mm; Comprimento 22cm)		Força (N)									
		6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
Pressão (bar)	0	22,1	22,6	23,5	23,9	24,0	24,1	24,2	24,2	24,4	24,6
	1	21,9	22,2	22,9	23,0	23,0	23,2	23,5	23,7	24,0	24,2
	2	20,6	20,2	21,3	21,3	21,9	21,6	22,6	22,6	23,3	23,3
	3	19,3	19,3	19,8	20,0	20,3	20,3	20,9	20,9	21,9	21,9
	4	18,5	18,5	18,9	19,1	19,2	19,3	19,7	19,9	20,4	20,6
	5	18,1	18,2	18,4	18,5	18,7	18,8	19,0	19,2	19,8	19,8
	6	17,8	17,8	18,0	18,2	18,3	18,3	18,5	18,8	19,1	19,3

Tabela 15 – Valores dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

Cobre 17mm - Comprimento 22cm

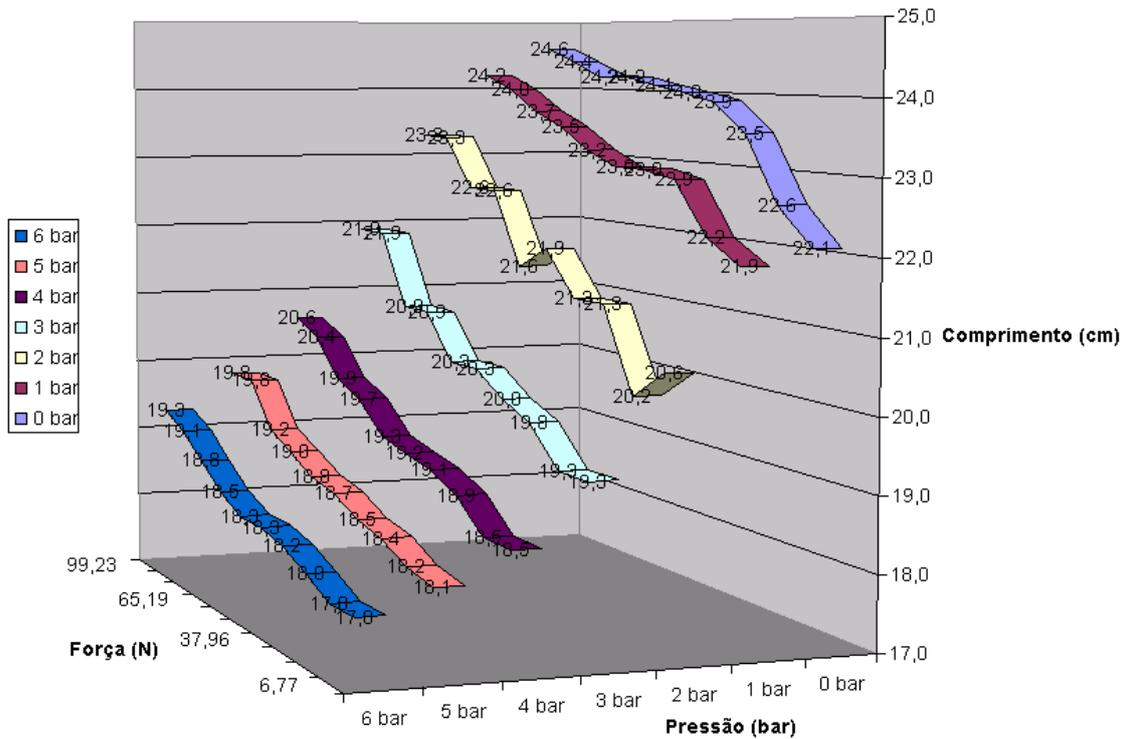


Figura 61 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Músculo (Malha D- 22mm; Comprimento 16cm)		Força (N)									
		6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
Pressão (bar)	0	16,1	16,3	16,5	16,7	16,8	16,9	16,9	17,0	17,0	17,0
	1	15,9	15,9	16,1	16,3	15,9	16,1	16,5	16,6	16,6	16,6
	2	14,2	14,6	14,6	15,2	14,8	14,6	15,4	14,9	15,3	15,1
	3	13,0	13,0	13,2	13,2	13,6	13,7	13,8	13,9	14,2	14,1
	4	12,4	12,5	12,6	12,8	12,9	12,9	13,2	13,2	13,4	13,4
	5	12,1	12,2	12,2	12,3	12,4	12,5	12,7	12,7	12,9	12,9
	6	12,0	12,0	12,0	12,2	12,2	12,3	12,4	12,4	12,5	12,6

Tabela 16 – Valores dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

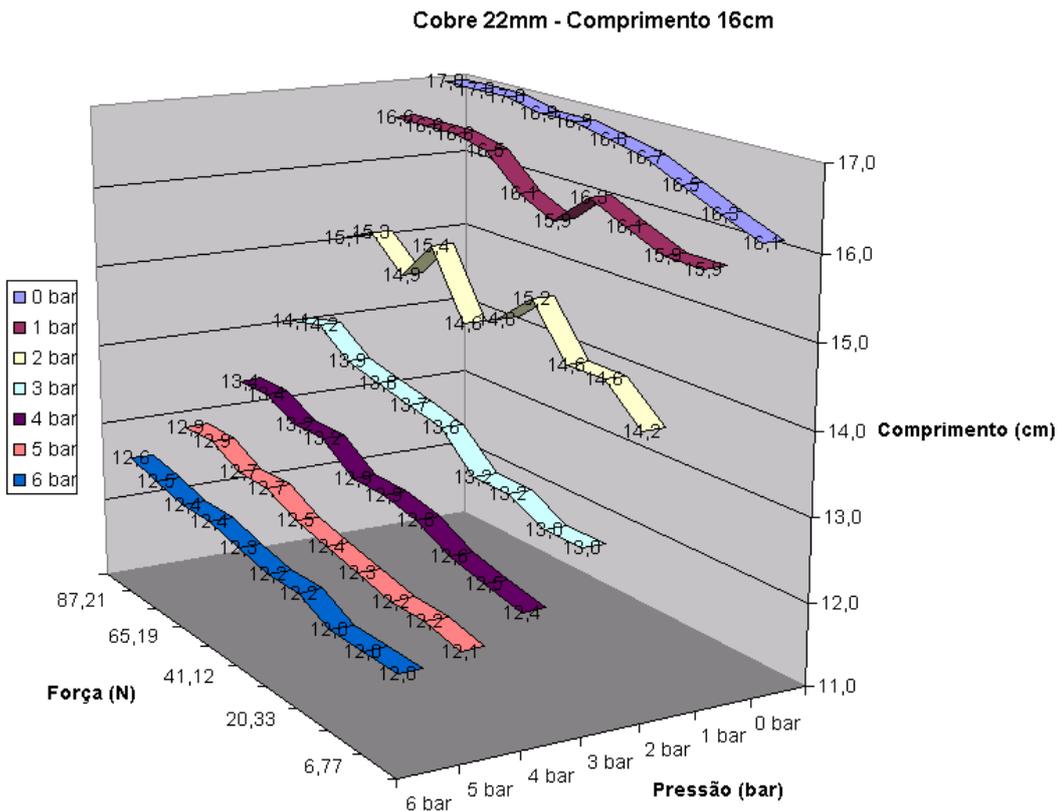


Figura 62 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Músculo (Malha D- 17mm; Comprimento 16cm)		Força (N)									
		6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
Pressão (bar)	0	16,8	17,1	18,2	19,4	19,5	19,6	19,7	19,7	19,8	19,8
	1	16,9	17,2	18,4	19,1	19,2	19,3	19,5	19,5	19,6	19,7
	2	16,7	17	17,3	17,8	18	18,1	18,5	18,8	19,1	19,1
	3	15,4	15,6	15,7	16,4	16,5	16,7	17,1	17,3	17,4	18
	4	14,8	14,7	15,1	15,5	15,6	15,8	16,1	16,4	16,8	17
	5	14,5	14,5	14,8	15	15,1	15,3	15,6	15,7	16,1	16,4
	6	14,3	14,4	14,5	14,8	14,8	15	15,2	15,4	15,7	15,8

Tabela 17 – Valores dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

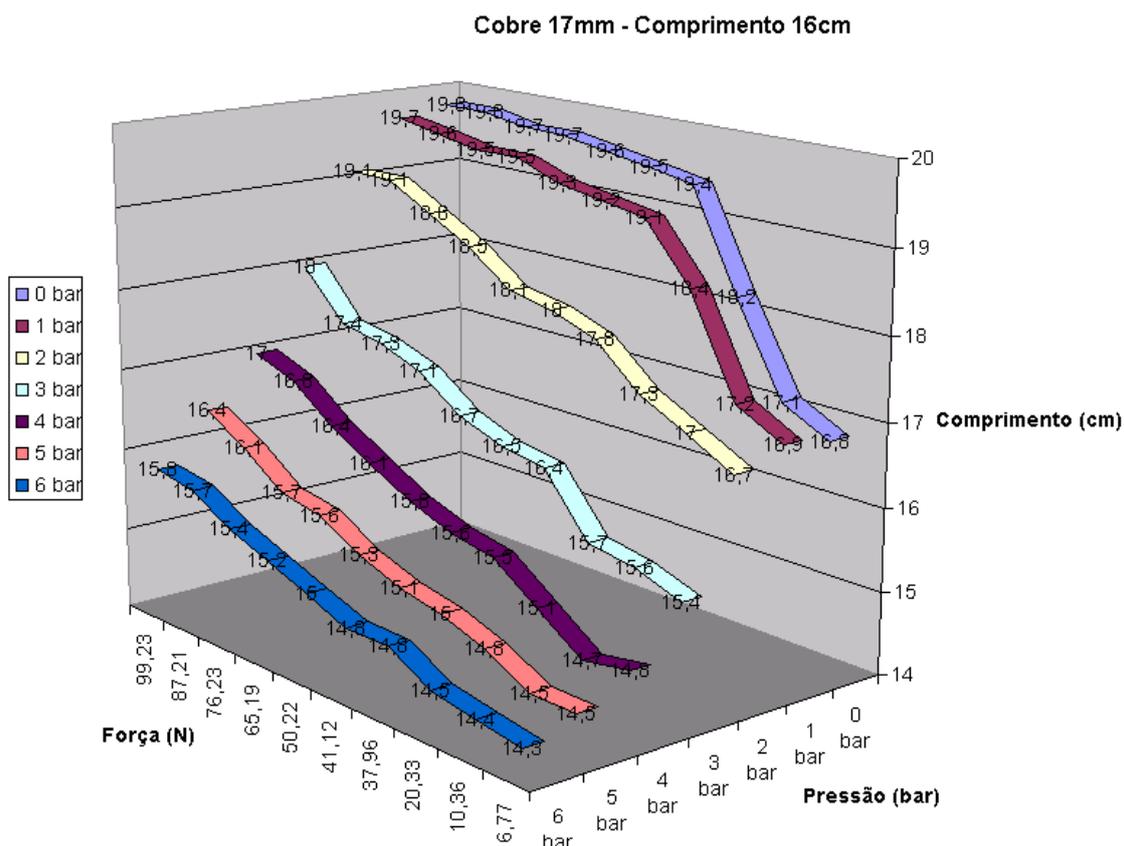


Figura 63 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Músculo (Malha D-22mm; Comprimento 11cm)		Força (N)									
		6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
Pressão (bar)	0	11,2	11,4	11,7	11,9	11,9	11,9	12	12	12,1	12,1
	1	11,2	11,4	11,6	11,7	11,5	11,6	11,7	11,8	11,8	11,8
	2	10,6	10,1	10,7	10,5	10,9	10,70	11,2	11	11,4	11,1
	3	9,4	9,5	9,6	9,6	9,8	9,9	10	10	10,2	10,2
	4	8,4	8,9	9,1	9,2	9,2	9,2	9,4	9,5	9,5	9,5
	5	8,6	8,7	8,8	8,9	8,9	8,9	9	9,1	9,2	9,2
	6	8,5	8,5	8,7	8,7	8,7	8,8	8,8	8,9	8,9	9

Tabela 18 – Valores dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

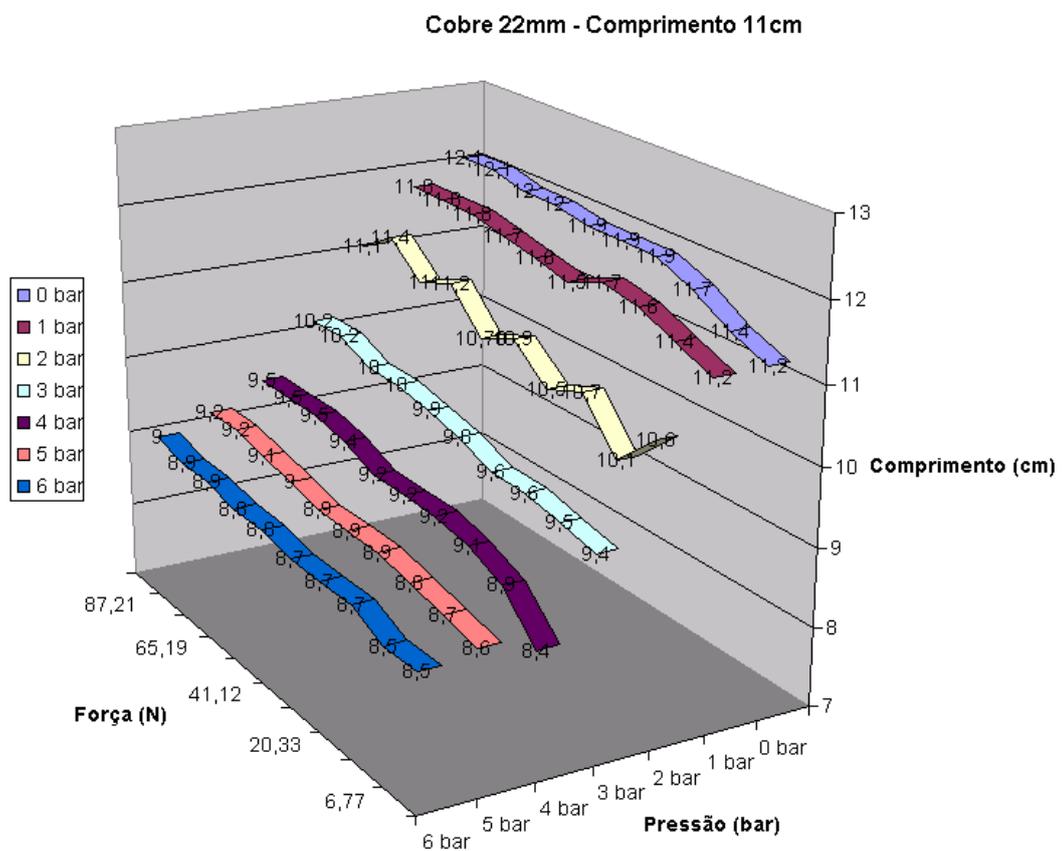


Figura 64 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Músculo (Malha D-17mm; Comprimento 11cm)		Força (N)									
		6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
Pressão (bar)	0	11,4	11,9	12,8	13,5	13,5	13,5	13,5	13,6	13,7	13,7
	1	11,9	12,1	12,7	13,0	13,1	13,3	13,3	13,3	13,5	13,6
	2	10,8	11,4	11,7	12,2	12,3	12,5	12,5	12,5	13,0	13,0
	3	10,4	10,5	10,8	11,3	11,3	11,3	11,5	11,8	12,0	12,0
	4	10,1	10,2	10,4	10,7	10,7	10,8	11,0	11,2	11,3	11,4
	5	10,0	10,0	10,1	10,4	10,4	10,5	10,7	10,7	10,9	10,9
	6	9,7	9,8	10,0	10,1	10,2	10,2	10,4	10,5	10,7	10,7

Tabela 19 – Valores dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

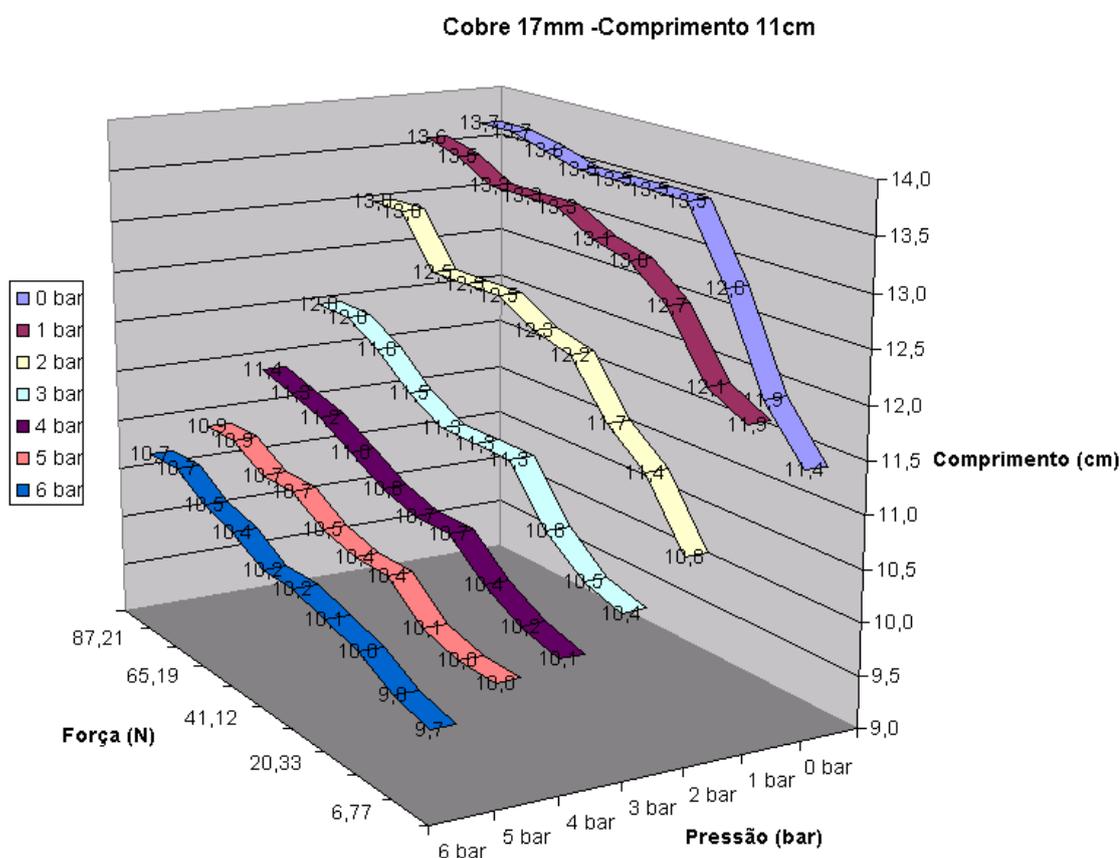


Figura 65 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

	Diâmetro (mm)	Comprimento L (cm)	n (nº de voltas)	Comprimento b (cm)
Músculo1	17	11	1,15	11,53
Músculo2	17	16	1,67	16,78
Músculo3	17	22	2,29	23,07

Tabela 20 – Valores de n e b para uma malha com as dimensões de L e Diâmetro correspondentes

Músculo 1 D17		Pressão (bar)										
		0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50
Força (N)	5	7,06	6,86	6,80	6,76	6,74	6,73	6,72	6,71	6,71	6,70	6,70
	10	7,44	7,06	6,93	6,86	6,82	6,80	6,78	6,76	6,75	6,74	6,73
	15	7,80	7,25	7,06	6,96	6,90	6,86	6,83	6,81	6,80	6,78	6,77
	20	8,15	7,44	7,19	7,06	6,98	6,93	6,89	6,86	6,84	6,82	6,81
	25	8,48	7,62	7,32	7,16	7,06	7,00	6,95	6,91	6,89	6,86	6,84
	30	8,79	7,80	7,44	7,25	7,14	7,06	7,00	6,96	6,93	6,90	6,88
	35	9,10	7,97	7,56	7,35	7,21	7,13	7,06	7,01	6,97	6,94	6,92
	40	9,40	8,15	7,68	7,44	7,29	7,19	7,12	7,06	7,02	6,98	6,95
	45	9,69	8,31	7,80	7,53	7,37	7,25	7,17	7,11	7,06	7,02	6,99
	50	9,97	8,48	7,92	7,62	7,44	7,32	7,23	7,16	7,10	7,06	7,02
	55	10,24	8,64	8,03	7,71	7,51	7,38	7,28	7,20	7,15	7,10	7,06
	60	10,50	8,79	8,15	7,80	7,59	7,44	7,33	7,25	7,19	7,14	7,10
	65	10,76	8,95	8,26	7,89	7,66	7,50	7,39	7,30	7,23	7,18	7,13
	70	11,02	9,10	8,37	7,97	7,73	7,56	7,44	7,35	7,27	7,21	7,17
	75	11,26	9,25	8,48	8,06	7,80	7,62	7,49	7,39	7,32	7,25	7,20
	80	11,50	9,40	8,58	8,15	7,87	7,68	7,54	7,44	7,36	7,29	7,24
85	11,74	9,54	8,69	8,23	7,94	7,74	7,60	7,49	7,40	7,33	7,27	
90	11,97	9,69	8,79	8,31	8,01	7,80	7,65	7,53	7,44	7,37	7,30	

Tabela 21 – Valores teóricos dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

Cobre 17mm - Comprimento 11cm

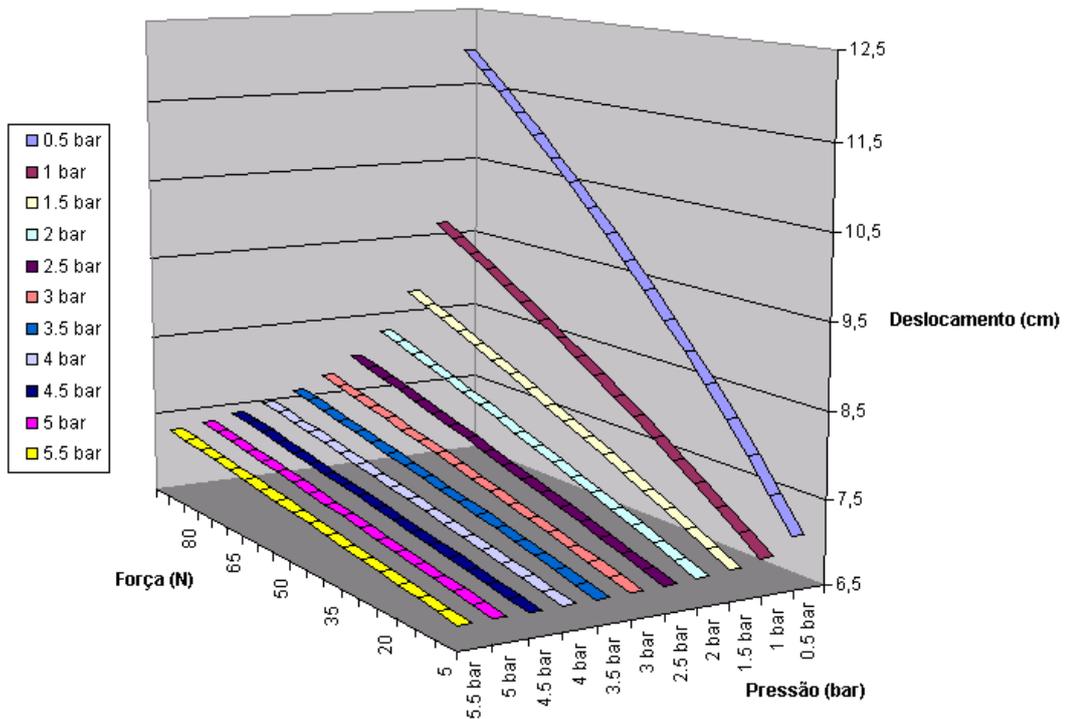


Figura 66 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Músculo 2 D17		Pressão (bar)										
		0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50
Força (N)	5	10,27	9,98	9,88	9,84	9,81	9,79	9,77	9,76	9,75	9,75	9,74
	10	10,82	10,27	10,08	9,98	9,92	9,88	9,86	9,84	9,82	9,81	9,80
	15	11,35	10,55	10,27	10,13	10,04	9,98	9,94	9,91	9,88	9,87	9,85
	20	11,85	10,82	10,46	10,27	10,16	10,08	10,02	9,98	9,95	9,92	9,90
	25	12,33	11,09	10,64	10,41	10,27	10,17	10,11	10,06	10,01	9,98	9,96
	30	12,79	11,35	10,82	10,55	10,38	10,27	10,19	10,13	10,08	10,04	10,01
	35	13,24	11,60	11,00	10,69	10,49	10,36	10,27	10,20	10,14	10,10	10,06
	40	13,67	11,85	11,17	10,82	10,60	10,46	10,35	10,27	10,21	10,16	10,11
	45	14,09	12,09	11,35	10,95	10,71	10,55	10,43	10,34	10,27	10,21	10,17
	50	14,50	12,33	11,52	11,09	10,82	10,64	10,51	10,41	10,33	10,27	10,22
	55	14,89	12,56	11,68	11,22	10,93	10,73	10,59	10,48	10,39	10,33	10,27
	60	15,28	12,79	11,85	11,35	11,03	10,82	10,67	10,55	10,46	10,38	10,32
	65	15,66	13,02	12,01	11,47	11,14	10,91	10,74	10,62	10,52	10,44	10,37
	70	16,02	13,24	12,17	11,60	11,24	11,00	10,82	10,69	10,58	10,49	10,42
	75	16,38	13,46	12,33	11,72	11,35	11,09	10,90	10,75	10,64	10,55	10,47
	80	16,73	13,67	12,49	11,85	11,45	11,17	10,97	10,82	10,70	10,60	10,52
85	17,08	13,88	12,64	11,97	11,55	11,26	11,05	10,89	10,76	10,66	10,57	
90	17,41	14,09	12,79	12,09	11,65	11,35	11,12	10,95	10,82	10,71	10,62	

Tabela 22 – Valores teóricos dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

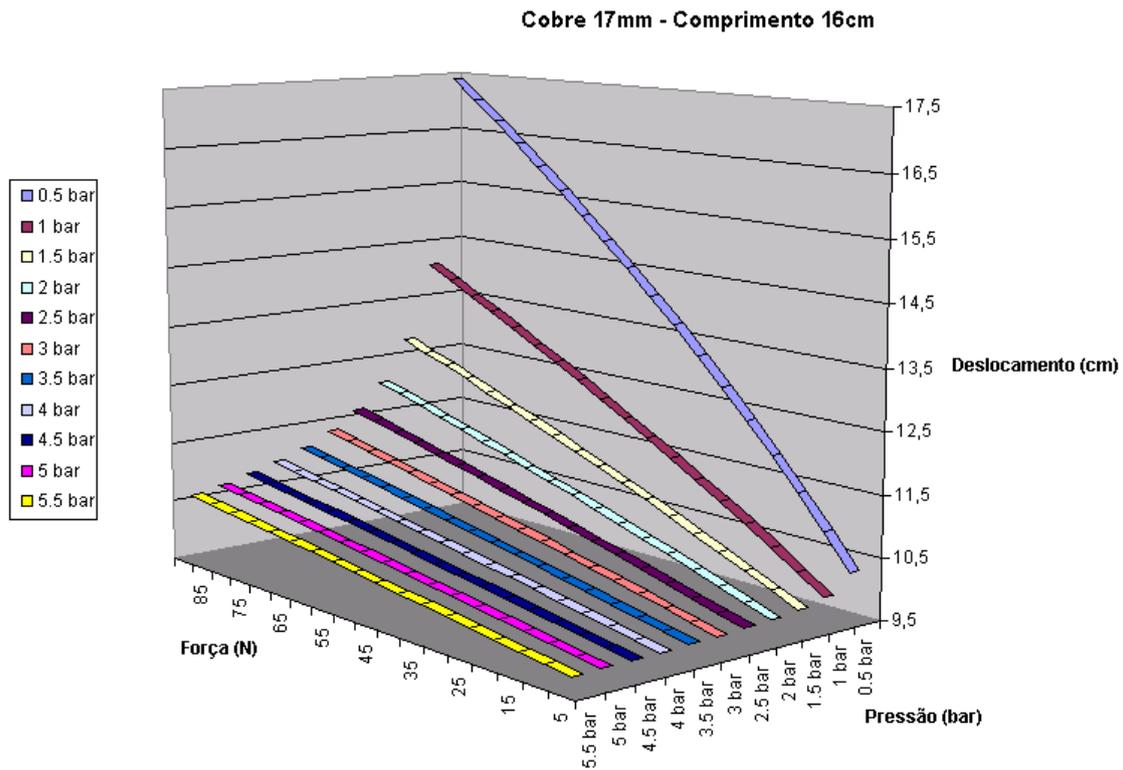


Figura 67 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Músculo 3 D17		Pressão (bar)										
		0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50
Força (N)	5	14,12	13,73	13,59	13,52	13,48	13,46	13,44	13,42	13,41	13,40	13,39
	10	14,88	14,12	13,86	13,73	13,65	13,59	13,55	13,52	13,50	13,48	13,47
	15	15,60	14,51	14,12	13,92	13,81	13,73	13,67	13,63	13,59	13,56	13,54
	20	16,29	14,88	14,38	14,12	13,96	13,86	13,78	13,73	13,68	13,65	13,62
	25	16,95	15,24	14,63	14,31	14,12	13,99	13,90	13,83	13,77	13,73	13,69
	30	17,59	15,60	14,88	14,51	14,28	14,12	14,01	13,92	13,86	13,81	13,76
	35	18,20	15,95	15,12	14,69	14,43	14,25	14,12	14,02	13,95	13,89	13,83
	40	18,80	16,29	15,36	14,88	14,58	14,38	14,23	14,12	14,03	13,96	13,91
	45	19,37	16,63	15,60	15,06	14,73	14,51	14,34	14,22	14,12	14,04	13,98
	50	19,93	16,95	15,83	15,24	14,88	14,63	14,45	14,31	14,21	14,12	14,05
	55	20,48	17,27	16,06	15,42	15,03	14,76	14,56	14,41	14,29	14,20	14,12
	60	21,01	17,59	16,29	15,60	15,17	14,88	14,67	14,51	14,38	14,28	14,19
	65	21,53	17,90	16,51	15,78	15,32	15,00	14,77	14,60	14,46	14,35	14,26
	70	22,03	18,20	16,73	15,95	15,46	15,12	14,88	14,69	14,55	14,43	14,33
	75	22,53	18,50	16,95	16,12	15,60	15,24	14,98	14,79	14,63	14,51	14,40
	80	23,01	18,80	17,17	16,29	15,74	15,36	15,09	14,88	14,71	14,58	14,47
	85	23,48	19,09	17,38	16,46	15,88	15,48	15,19	14,97	14,80	14,66	14,54
90	23,95	19,37	17,59	16,63	16,02	15,60	15,30	15,06	14,88	14,73	14,61	

Tabela 23 – Valores teóricos dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

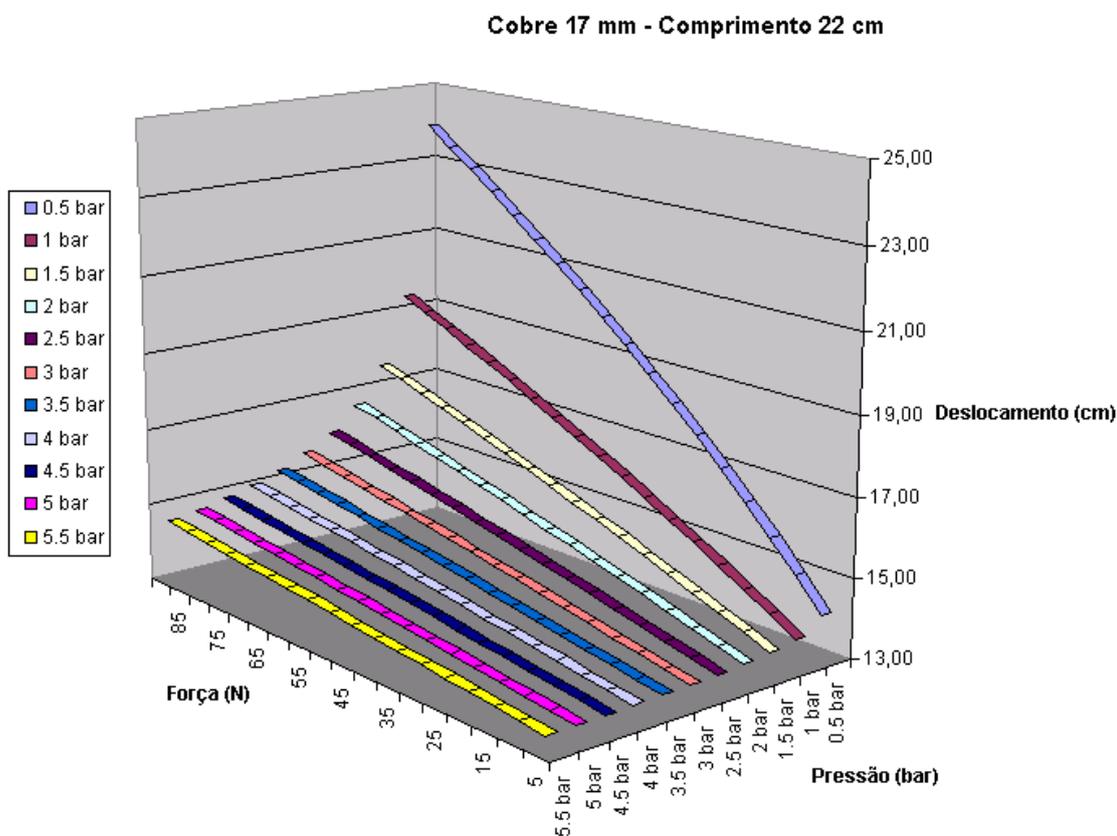


Figura 68 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

	Diâmetro (mm)	Comprimento L (cm)	n (nº de voltas)	Comprimento b (cm)
Músculo1	22	11	0,85	11,77
Músculo2	22	16	1,24	17,12
Músculo3	22	22	1,71	23,53

Tabela 24 – Valores de n e b para uma malha com as dimensões de L e Diâmetro correspondentes

Músculo 1 D22		Pressão (bar)										
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Força (N)	5	7,01	6,91	6,87	6,85	6,84	6,83	6,83	6,82	6,82	6,82	6,81
	10	7,23	7,01	6,94	6,91	6,88	6,87	6,86	6,85	6,84	6,84	6,83
	15	7,44	7,12	7,01	6,96	6,93	6,91	6,89	6,88	6,87	6,86	6,85
	20	7,64	7,23	7,09	7,01	6,97	6,94	6,92	6,91	6,89	6,88	6,87
	25	7,83	7,33	7,16	7,07	7,01	6,98	6,95	6,93	6,92	6,91	6,90
	30	8,03	7,44	7,23	7,12	7,06	7,01	6,98	6,96	6,94	6,93	6,92
	35	8,21	7,54	7,30	7,18	7,10	7,05	7,01	6,99	6,97	6,95	6,94
	40	8,40	7,64	7,37	7,23	7,14	7,09	7,05	7,01	6,99	6,97	6,96
	45	8,58	7,74	7,44	7,28	7,19	7,12	7,08	7,04	7,01	6,99	6,97
	50	8,75	7,83	7,50	7,33	7,23	7,16	7,11	7,07	7,04	7,01	6,99
	55	8,93	7,93	7,57	7,38	7,27	7,19	7,14	7,10	7,06	7,04	7,01
	60	9,09	8,03	7,64	7,44	7,31	7,23	7,17	7,12	7,09	7,06	7,03
	65	9,26	8,12	7,70	7,49	7,35	7,26	7,20	7,15	7,11	7,08	7,05
	70	9,42	8,21	7,77	7,54	7,39	7,30	7,23	7,18	7,13	7,10	7,07
	75	9,58	8,31	7,83	7,59	7,44	7,33	7,26	7,20	7,16	7,12	7,09
	80	9,74	8,40	7,90	7,64	7,48	7,37	7,29	7,23	7,18	7,14	7,11
85	9,90	8,49	7,96	7,69	7,52	7,40	7,32	7,25	7,20	7,16	7,13	
90	10,05	8,58	8,03	7,74	7,56	7,44	7,35	7,28	7,23	7,19	7,15	

Tabela 25 – Valores teóricos dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

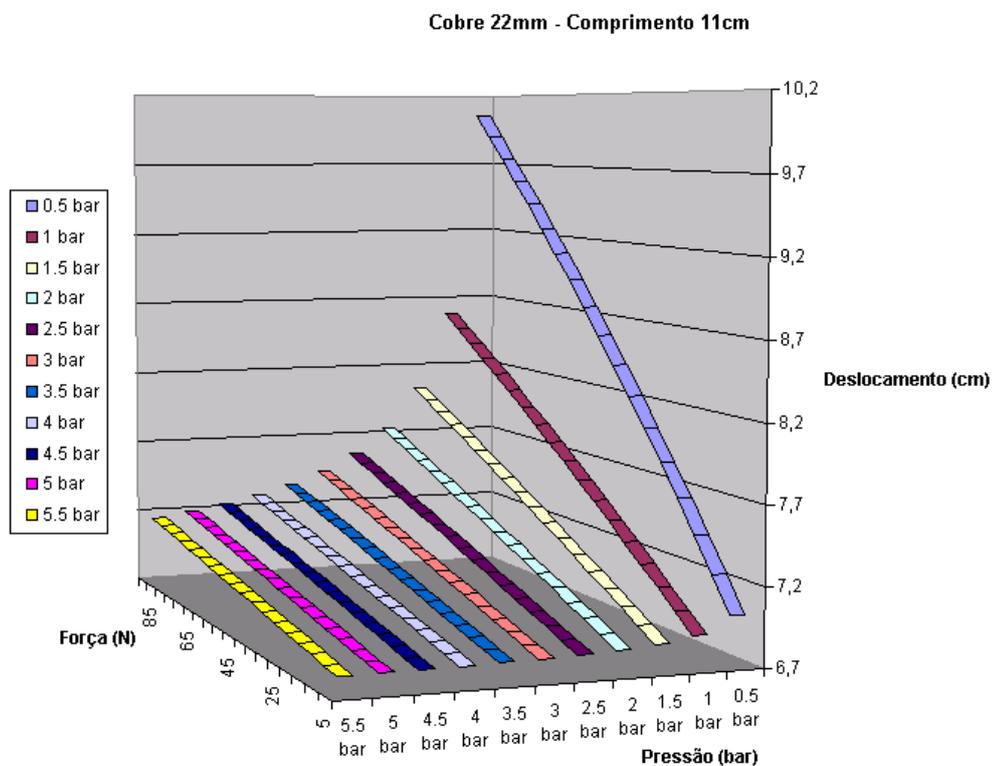


Figura 69 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Músculo 2 D22		Pressão (bar)										
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Força (N)	5	10,20	10,04	9,99	9,96	9,95	9,94	9,93	9,92	9,92	9,91	9,91
	10	10,51	10,20	10,10	10,04	10,01	9,99	9,97	9,96	9,95	9,95	9,94
	15	10,82	10,36	10,20	10,12	10,08	10,04	10,02	10,00	9,99	9,98	9,97
	20	11,11	10,51	10,31	10,20	10,14	10,10	10,07	10,04	10,03	10,01	10,00
	25	11,40	10,67	10,41	10,28	10,20	10,15	10,11	10,08	10,06	10,04	10,03
	30	11,68	10,82	10,51	10,36	10,27	10,20	10,16	10,12	10,10	10,08	10,06
	35	11,95	10,96	10,62	10,44	10,33	10,26	10,20	10,16	10,13	10,11	10,09
	40	12,22	11,11	10,72	10,51	10,39	10,31	10,25	10,20	10,17	10,14	10,12
	45	12,48	11,25	10,82	10,59	10,45	10,36	10,29	10,24	10,20	10,17	10,15
	50	12,73	11,40	10,91	10,67	10,51	10,41	10,34	10,28	10,24	10,20	10,17
	55	12,98	11,54	11,01	10,74	10,58	10,46	10,38	10,32	10,27	10,23	10,20
	60	13,23	11,68	11,11	10,82	10,64	10,51	10,43	10,36	10,31	10,27	10,23
	65	13,47	11,81	11,21	10,89	10,70	10,56	10,47	10,40	10,34	10,30	10,26
	70	13,71	11,95	11,30	10,96	10,76	10,62	10,51	10,44	10,38	10,33	10,29
	75	13,94	12,08	11,40	11,04	10,82	10,67	10,56	10,48	10,41	10,36	10,32
	80	14,17	12,22	11,49	11,11	10,88	10,72	10,60	10,51	10,45	10,39	10,35
	85	14,39	12,35	11,58	11,18	10,93	10,77	10,64	10,55	10,48	10,42	10,37
90	14,62	12,48	11,68	11,25	10,99	10,82	10,69	10,59	10,51	10,45	10,40	

Tabela 26 – Valores teóricos dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

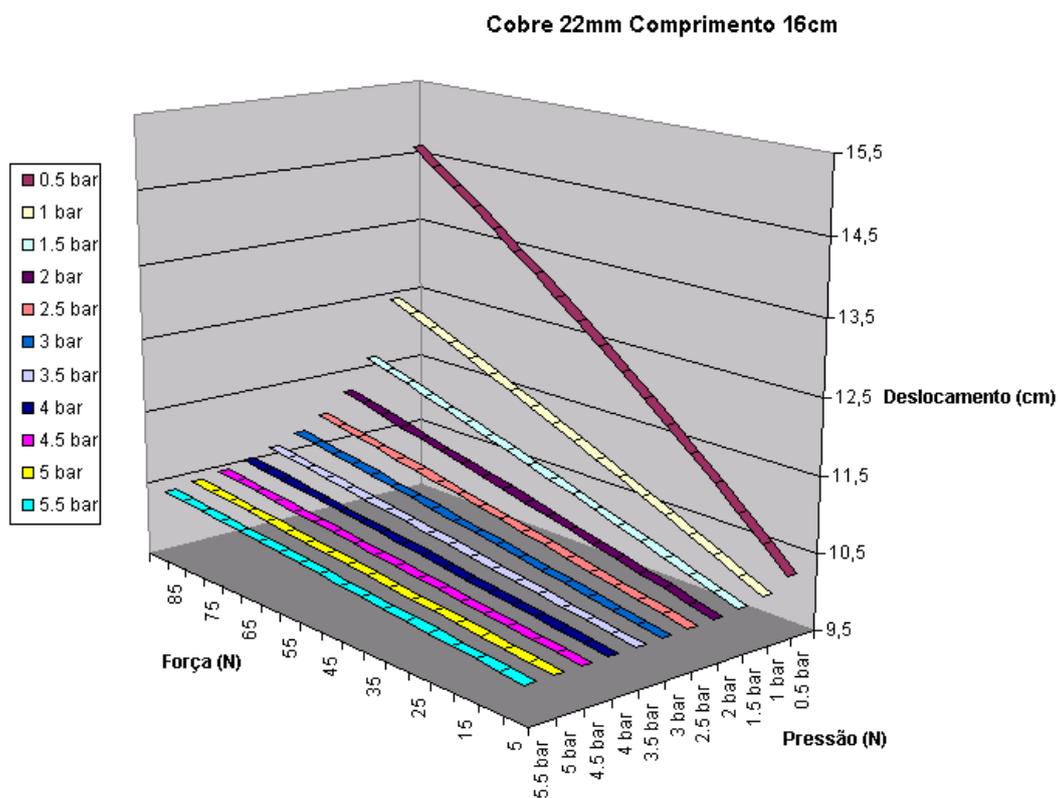


Figura 70 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Músculo 3 D22		Pressão (bar)										
		0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50
Força (N)	5	14,03	13,81	13,74	13,70	13,68	13,66	13,65	13,64	13,64	13,63	13,63
	10	14,46	14,03	13,88	13,81	13,77	13,74	13,72	13,70	13,69	13,68	13,67
	15	14,87	14,24	14,03	13,92	13,85	13,81	13,78	13,75	13,74	13,72	13,71
	20	15,28	14,46	14,17	14,03	13,94	13,88	13,84	13,81	13,79	13,77	13,75
	25	15,67	14,67	14,32	14,14	14,03	13,96	13,90	13,87	13,83	13,81	13,79
	30	16,05	14,87	14,46	14,24	14,12	14,03	13,97	13,92	13,88	13,85	13,83
	35	16,43	15,08	14,60	14,35	14,20	14,10	14,03	13,97	13,93	13,90	13,87
	40	16,80	15,28	14,73	14,46	14,29	14,17	14,09	14,03	13,98	13,94	13,91
	45	17,15	15,47	14,87	14,56	14,37	14,24	14,15	14,08	14,03	13,99	13,95
	50	17,51	15,67	15,01	14,67	14,46	14,32	14,21	14,14	14,08	14,03	13,99
	55	17,85	15,86	15,14	14,77	14,54	14,39	14,27	14,19	14,13	14,07	14,03
	60	18,19	16,05	15,28	14,87	14,62	14,46	14,34	14,24	14,17	14,12	14,07
	65	18,52	16,24	15,41	14,97	14,71	14,53	14,40	14,30	14,22	14,16	14,11
	70	18,85	16,43	15,54	15,08	14,79	14,60	14,46	14,35	14,27	14,20	14,15
	75	19,17	16,61	15,67	15,18	14,87	14,67	14,52	14,40	14,32	14,24	14,19
	80	19,48	16,80	15,80	15,28	14,95	14,73	14,58	14,46	14,36	14,29	14,23
85	19,79	16,98	15,93	15,38	15,04	14,80	14,64	14,51	14,41	14,33	14,26	
90	20,10	17,15	16,05	15,47	15,12	14,87	14,70	14,56	14,46	14,37	14,30	

Tabela 27 – Valores teóricos dos comprimentos obtidos para um músculo com as dimensões acima mencionadas

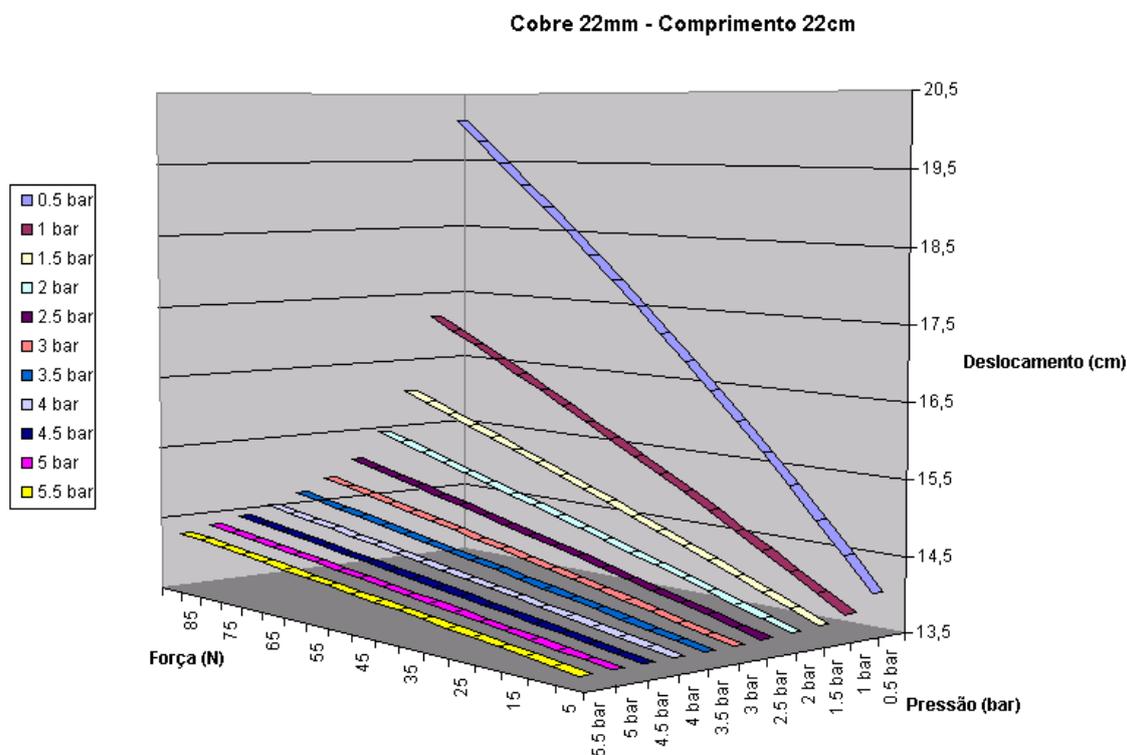


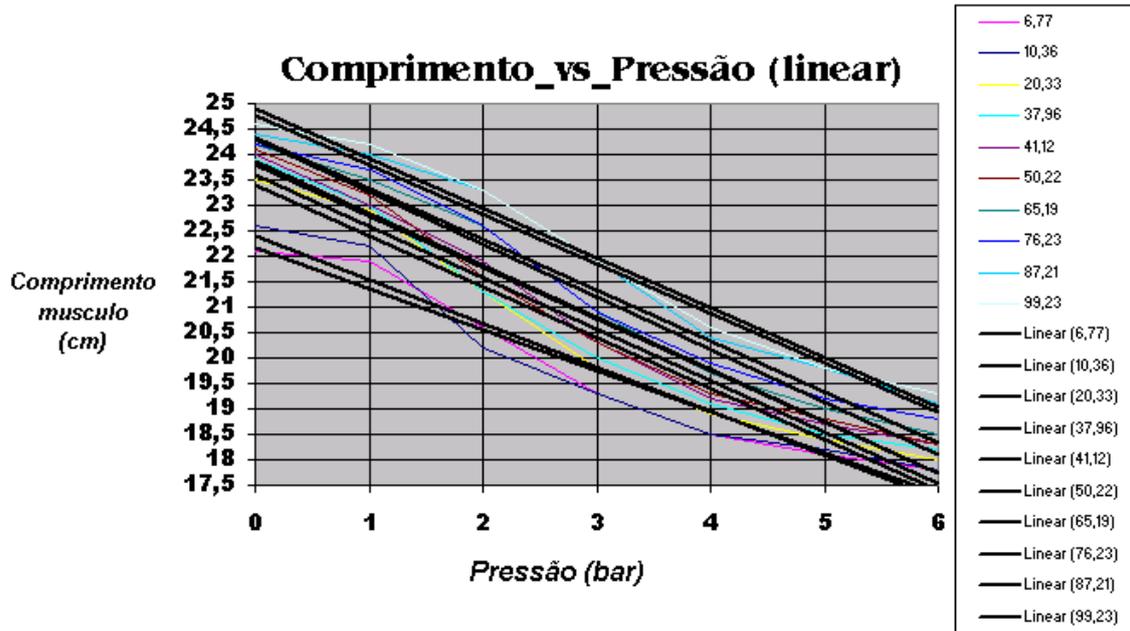
Figura 71 – Gráfico correspondente aos valores da tabela anterior

Informação do produto Series ITV2000~3000

Regulador pneumático-eléctrico SERIES ITV			
Modelo	ITV201*	ITV203*	ITV205*
	ITV301*	ITV303*	ITV305*
Pressão mínima de abastecimento		Pressão +0.1MPa	
Pressão máxima de abastecimento		0.2MPa	1.0MPa
Alcance da pressão reguladora		0.005 a 0.1MPa	0.005 a 0.5MPa
Alimentação		24V DC \pm 10%, 12 to 15V DC	
	Tensão	24V DC \pm 10%, 12 to 15V DC	
	Consumo de corrente	Tensão de alimentação 24V DC : 0.12A Tensão de alimentação 12 to 15V DC : 0.18A	
Sinal de entrada		4 a 20 mA, 0 a 20mA	
	Corrente¹	4 a 20 mA, 0 a 20mA	
	Tensão	0 a 5V DC, 0 a 10V DC	
	Preset Input	4 pontos	
Impedância de entrada		250 Ohms	
	Corrente¹	250 Ohms	
	Tensão	Aprox. 6.5k Ohms	
	Preset Input	Aprox. 2.7k Ohms	
Sinal de saída² (saída monitorizada)		1 a 5V DC (impedância: 1k Ohms) 4 a 20mA (impedância: 250 Ohms)	
	Saída analógica	1 a 5V DC (impedância: 1k Ohms) 4 a 20mA (impedância: 250 Ohms)	
	Interruptor da saída	NPN collector aberto saída: Max. 30V, 30mA PNP colector aberto saída: Max. 30 mA	
Linearidade		\pm 1%	
Histerese		0.5%	
Repetibilidade		\pm 0.5%	
Sensibilidade		0.2%	
Características de temperature		\pm 0.12% /°C	
Mostrador da pressão de saída		\pm 3%	
	Precisão	\pm 3%	
	Unidade mínima	Mpa: 0.01, kgf/cm ² : 0.01, bar: 0.01, PSI: 0.1 ³ , kPA: 1	
Temperatura do ambiente		0 to 50°C (sem condensação)	
Enclosure		IP65 equivalente	
Peso		350g	
¹⁾ Tensão de alimentação (24V DC ou 12 a 15V DC) é necessário			
²⁾ Seleccionar ou saída analogical ou interruptor de saída. Quando se escolher a opção de interruptor de saída, seleccionar ou NPN saída ou PNP saída.			
³⁾ The minimum unit for ITV205* is 1PSI			

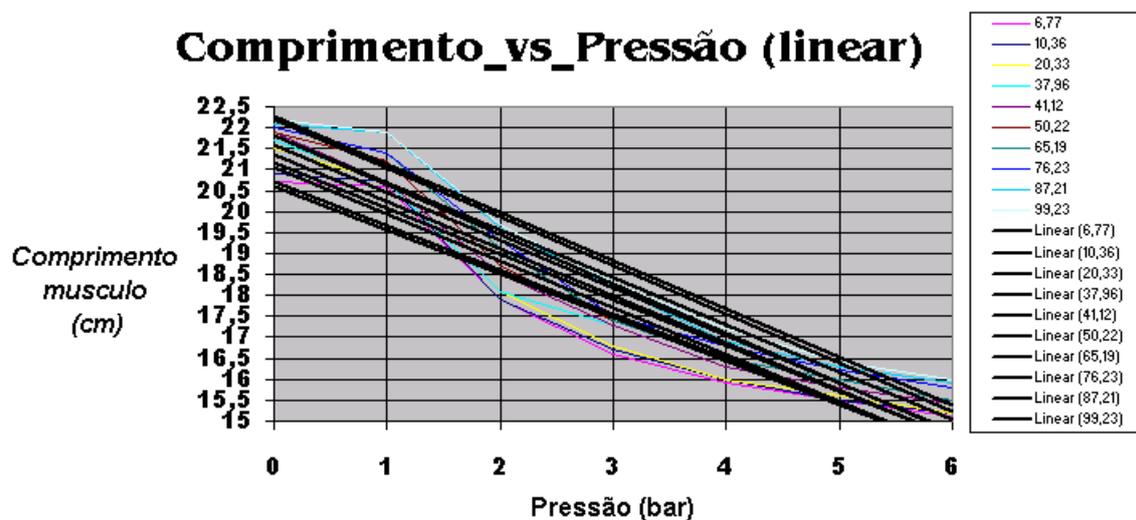
Tabela 28 – Características da válvula proporcional

Comprimento 22cm – Malha de cobre D17mm



Força (N)	6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
g=	-0,807x + 22,986	-0,8607x + 23,271	-0,9964x + 24,386	-1,0107x + 24,614	-1,0143x + 24,829	-1,0179x + 24,871	-1,0357x + 25,343	-0,9964x + 25,314	-0,9714x + 25,729	-0,9786x + 25,871
r ²	0,9522	0,9321	0,9573	0,9562	0,9681	0,9657	0,9777	0,9709	0,9751	0,9794
m	-0,8071	-0,8607	-0,9964	-1,0107	-1,0143	-1,0179	-1,0357	-0,9964	-0,9714	-0,9786
b	22,986	23,271	24,386	24,614	24,829	24,871	25,343	25,314	25,729	25,871
intervalo	6,77-10,36	10,36-20,33	20,33-30,96	37,96-41,12	41,12-50,22	50,22-65,19	65,19-76,23	76,23-87,21	87,21-99,23	
m _{media}	-0,8339	-0,92855	-1,00355	-1,0125	-1,0161	-1,0268	-1,01605	-0,9839	-0,975	
b _{media}	23,1285	23,8285	24,5	24,7215	24,85	25,107	25,3285	25,5215	25,8	
q _{media}	-0,8339x+23,1285	-0,92855x+23,8285	-1,00355x+24,5	-1,0125x+24,7215	-1,0161x+24,85	-1,0268x+25,107	-1,01605x+25,3285	-0,9839x+25,5215	-0,975x+25,8	

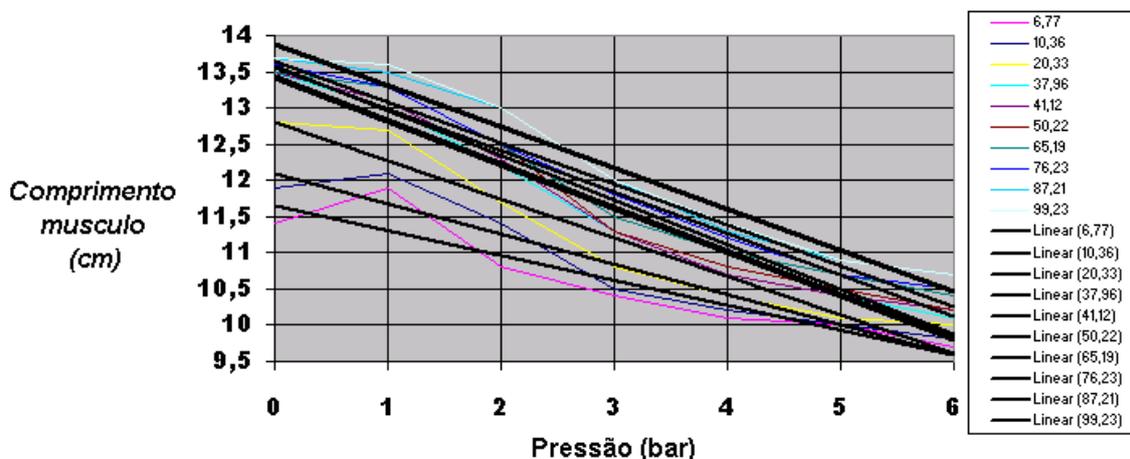
Comprimento 22cm – Malha de cobre D22mm



Força (N)	6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
g=	-1,0357x + 21,614	-1,05x + 21,757	-1,1143x + 22,157	-1,0893x + 22,257	-1,125x + 22,486	-1,1357x + 22,714	-1,175x + 22,971	-1,125x + 22,929	-1,1607x + 23,343	-1,1464x + 23,4
r ²	0,9065	0,9048	0,9159	0,9254	0,9393	0,9358	0,9402	0,9391	0,9502	0,9586
m	-1,0350	-1,0500	-1,1143	-1,0893	-1,1250	-1,1357	-1,1750	-1,1250	-1,1607	-1,1464
b	21,614	21,757	22,157	22,257	22,486	22,714	22,971	22,929	23,343	23,4
intervalo	6,77-10,36	10,36-20,33	20,33-30,96	37,96-41,12	41,12-50,22	50,22-65,19	65,19-76,23	76,23-87,21	87,21-99,23	
m _{media}	-1,0425	-1,08215	-1,1018	-1,10715	-1,13035	-1,15535	-1,15	-1,14285	-1,15355	
b _{media}	21,6855	21,957	22,207	22,3715	22,6	22,8425	22,95	23,136	23,3715	
q _{media}	-1,0425x+21,6855	-1,08215x+21,957	-1,1018x+22,207	-1,10715x+22,3715	-1,13035x+22,6	-1,15535x+22,8425	-1,15x+22,95	-1,14285x+23,136	-1,15355x+23,3715	

Comprimento 11cm – Malha de cobre D17mm

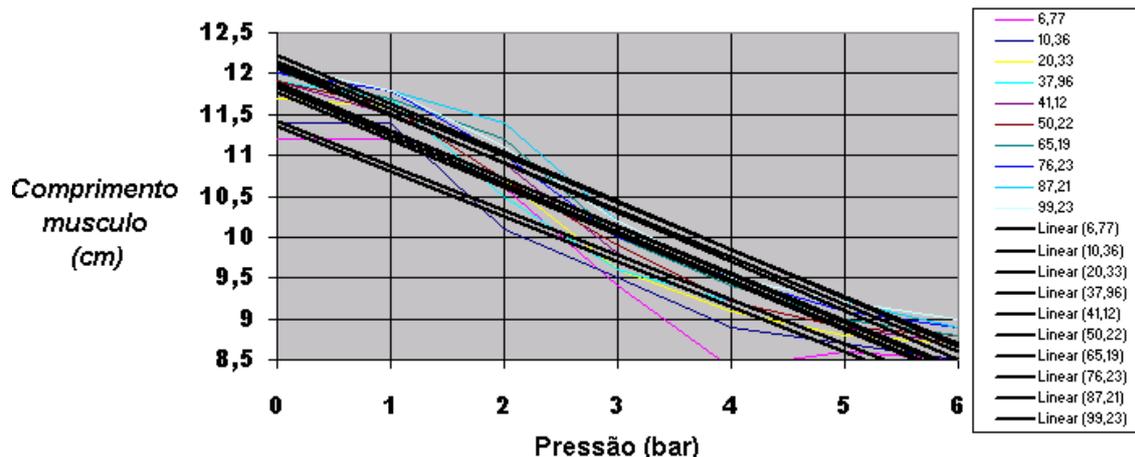
Comprimento_vs_Pressão (linear)



Força (N)	6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
y=	-0.3429x + 11.986	-0.4179x + 12.514	-0.5321x + 13.343	-0.6036x + 14.014	-0.6036x + 14.057	-0.6143x + 14.186	-0.5714x + 14.129	-0.5643x + 14.2	-0.5679x + 14.429	-0.5714x + 14.471
r ²	0,8597	0,916	0,9319	0,9696	0,9689	0,9524	0,9607	0,9801	0,9649	0,9656
m	-0,3429	-0,4179	-0,5321	-0,6036	-0,6036	-0,6143	-0,5714	-0,5643	-0,5679	-0,5714
b	11,986	12,514	13,343	14,014	14,057	14,186	14,129	14,2	14,429	14,471
intervalo	6,77-10,36	10,36-20,33	20,33-30,96	37,96-41,12	41,12-50,22	50,22-65,19	65,19-76,23	76,23-87,21	87,21-99,23	
m média	-0,3804	-0,475	-0,56785	-0,6036	-0,60895	-0,59285	-0,56785	-0,5661	-0,56965	
b média	12,25	12,9285	13,6785	14,0355	14,1215	14,1575	14,1645	14,3145	14,45	
y média	(-0.3804)x + 12.25	(-0.475)x + 12.9285	(-0.56785)x + 13.6785	(-0.6036)x + 14.0355	(-0.60895)x + 14.1215	(-0.59285)x + 14.1575	(-0.56785)x + 14.1645	(-0.5661)x + 14.3145	(-0.56965)x + 14.45	

Comprimento 11cm – Malha de cobre D22mm

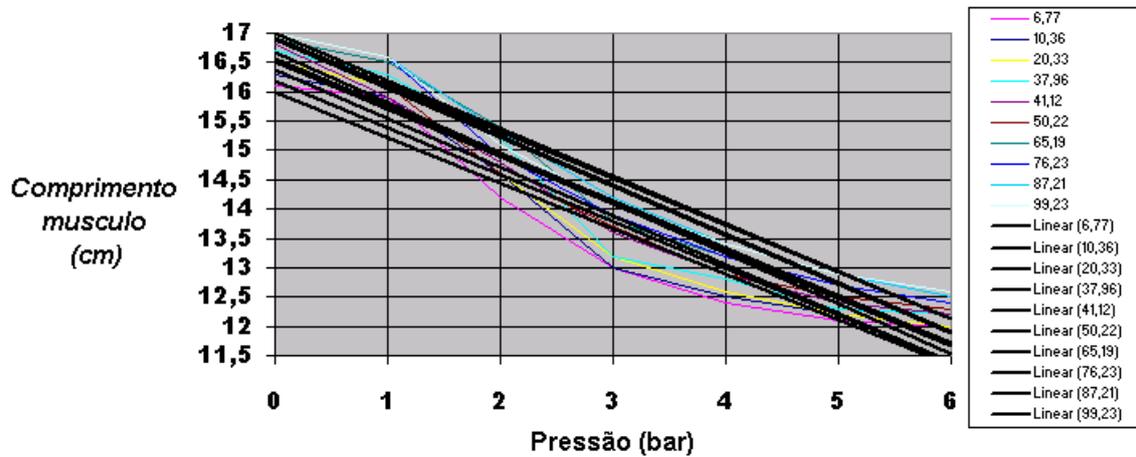
Comprimento_vs_Pressão (linear)



Força (N)	6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
y=	-0.5536x + 11.914	-0.5464x + 11.971	-0.5786x + 12.343	-0.5893x + 12.429	-0.5893x + 12.486	-0.5786x + 12.457	-0.6x + 12.7	-0.5786x + 12.643	-0.5964x + 12.829	-0.575x + 12.714
r ²	0,8809	0,928	0,9341	0,9336	0,9594	0,9547	0,96	0,9609	0,9598	0,9655
m	-0,5536	-0,5464	-0,5786	-0,5893	-0,5893	-0,5786	-0,6	-0,5786	-0,5964	-0,575
b	11,914	11,971	12,343	12,429	12,486	12,457	12,7	12,643	12,829	12,714
intervalo	6,77-10,36	10,36-20,33	20,33-30,96	37,96-41,12	41,12-50,22	50,22-65,19	65,19-76,23	76,23-87,21	87,21-99,23	
m média	-0,55	-0,5625	-0,58395	-0,5893	-0,58395	-0,5893	-0,5893	-0,5875	-0,5857	
b média	11,9425	12,157	12,386	12,4575	12,4715	12,5785	12,6715	12,736	12,7715	
y média	-0.55x + 11.9425	-0.5625x + 12.157	-0.58395x + 12.386	-0.5893x + 12.4575	-0.58395x + 12.4715	-0.5893x + 12.5785	-0.5893x + 12.6715	-0.5875x + 12.736	-0.5857x + 12.7715	

Comprimento 16cm – Malha de cobre D22mm

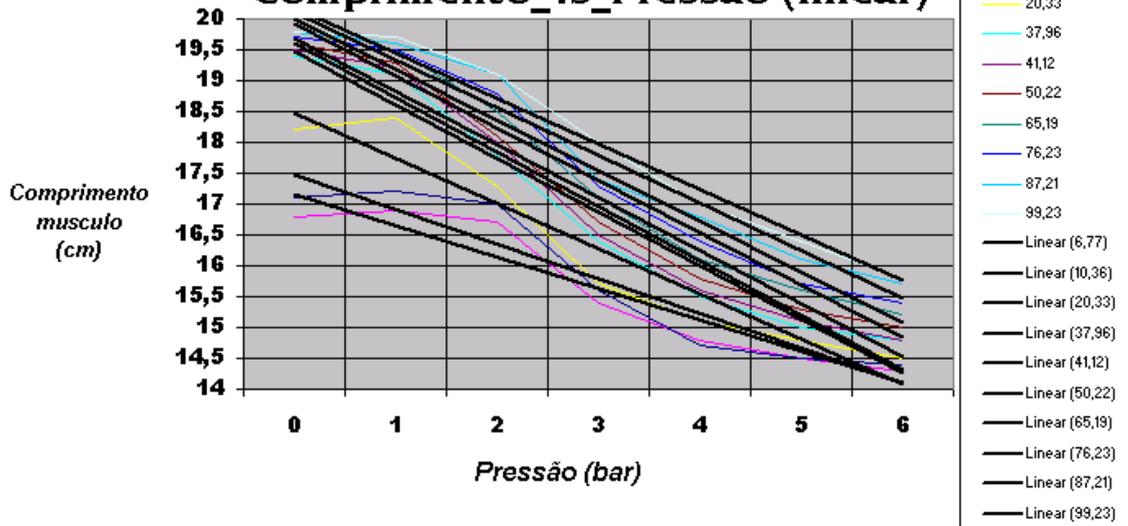
Comprimento_vs_Pressão (linear)



Força (N)	6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
y=	-0.775x + 16.771	-0.8x + 16.986	-0.8321x + 17.214	-0.8536x + 17.514	-0.8107x + 17.329	-0.8107x + 17.386	-0.8321x + 17.743	-0.8321x + 17.714	-0.8143x + 17.814	-0.7964x + 17.714
r ²	0,9103	0,9224	0,9336	0,9206	0,9581	0,9449	0,9528	0,9491	0,9701	0,9572
m	-0,775	-0,8	-0,8321	-0,8536	-0,8107	-0,8107	-0,8321	-0,8321	-0,8143	-0,7964
b	16,771	16,986	17,214	17,514	17,329	17,386	17,743	17,714	17,814	17,714
intervalo	6,77-10,36	10,36-20,33	20,33-30,96	37,96-41,12	41,12-50,22	50,22-65,19	65,19-76,23	76,23-87,21	87,21-99,23	
m média	-0,7875	-0,81605	-0,84285	-0,83215	-0,8107	-0,8214	-0,8321	-0,8232	-0,80535	
b média	16,8785	17,1	17,364	17,4215	17,3575	17,5645	17,7285	17,764	17,764	
y média	-0.7875x+16.8785	-0.81605x+17.1	-0.84285x+17.364	-0.83215x+17.4215	-0.8107x+17.3575	-0.8214x+17.5645	-0.8321x+17.7285	-0.8232x+17.764	-0.80535x+17.764	

Comprimento 16cm – Malha de cobre D17mm

Comprimento_vs_Pressão (linear)



Força (N)	6,77	10,36	20,33	37,96	41,12	50,22	65,19	76,23	87,21	99,23
y=	-0.5071x + 17.657	-0.5643x + 18.043	-0.7321x + 19.214	-0.8679x + 20.329	-0.8821x + 20.486	-0.8607x + 20.557	-0.8464x + 20.771	-0.8179x + 20.814	-0.7714x + 20.871	-0.7393x + 20.929
r ²	0,9099	0,8926	0,9203	0,9535	0,9583	0,9608	0,9659	0,9646	0,9583	0,9726
m	-0,5071	-0,5643	-0,7321	-0,8679	-0,8821	-0,8607	-0,8464	-0,8179	-0,7714	-0,7393
b	17,657	18,043	19,214	20,329	20,486	20,557	20,771	20,814	20,871	20,929
intervalo	6,77-10,36	10,36-20,33	20,33-30,96	37,96-41,12	41,12-50,22	50,22-65,19	65,19-76,23	76,23-87,21	87,21-99,23	
m média	-0,5357	-0,6482	-0,8	-0,875	-0,8714	-0,85355	-0,83215	-0,79465	-0,75535	
b média	17,85	18,6285	19,7715	20,4075	20,5215	20,664	20,7925	20,8425	20,9	
y média	-0.5357x+17.85	-0.6482x+18.6285	-0.8x+19.7715	-0.875x+20.4075	-0.8714x+20.5215	-0.85355x+20.664	-0.83215x+20.7925	-0.79465x+20.8425	-0.75535x+20.9	

Tabelas representativas dos valores fornecidos pelo programa MATLAB para diferentes configurações geométricas do braço. (Diferentes pontos de inserção dos músculos)

θ_{01} (rad) = 0	θ_{01} (rad) = 0	θ_{01} (rad) = 0	θ_{01} (rad) = 0
θ_{02} (rad) = -3,1416	θ_{02} (rad) = -3,1416	θ_{02} (rad) = -3,1416	θ_{02} (rad) = -3,1416
b_1 (m) = 0.1400	b_1 (m) = 0.1750	b_1 (m) = 0.2100	b_1 (m) = 0.2450
b_{21} (m) = 0.1400	b_{21} (m) = 0.1400	b_{21} (m) = 0.1400	b_{21} (m) = 0.1400
b_{22} (m) = 0.1400	b_{22} (m) = 0.1400	b_{22} (m) = 0.1400	b_{22} (m) = 0.1400
valor de x_f = 0.1m valor de y_f = 0.8m			
$\max_{F_{11}}$ (N) = 41,9657	$\max_{F_{11}}$ (N) = 40,0631	$\max_{F_{11}}$ (N) = 38,9908	$\max_{F_{11}}$ (N) = 38,3297
\max_{T_1} (Nm) = 2,9149	\max_{T_1} (Nm) = 2,9149	\max_{T_1} (Nm) = 2,9149	\max_{T_1} (Nm) = 2,9149
$\text{dif}_{\text{om_flexor}}$ (m)= 0.0223	$\text{dif}_{\text{om_flexor}}$ (m)= 0.0235	$\text{dif}_{\text{om_flexor}}$ (m)= 0.0243	$\text{dif}_{\text{om_flexor}}$ (m)= 0.0249
$\max_{F_{12}}$ (N) = 41,9657	$\max_{F_{12}}$ (N) = 40,0631	$\max_{F_{12}}$ (N) = 38,9908	$\max_{F_{12}}$ (N) = 38,3297
$\text{dif}_{\text{om_extensor}}$ (m)= 0.0259	$\text{dif}_{\text{om_extensor}}$ (m)= 0.0268	$\text{dif}_{\text{om_extensor}}$ (m)= 0.0273	$\text{dif}_{\text{om_extensor}}$ (m)= 0.0275
\max_{T_2} (Nm) = 2,9149	\max_{T_2} (Nm) = 2,9149	\max_{T_2} (Nm) = 2,9149	\max_{T_2} (Nm) = 2,9149
$\max_{F_{21}}$ (N) = 23,1342	$\max_{F_{21}}$ (N) = 23,1342	$\max_{F_{21}}$ (N) = 23,1342	$\max_{F_{21}}$ (N) = 23,1342
$\text{dif}_{\text{co_flexor}}$ (m) = 0.0827	$\text{dif}_{\text{co_flexor}}$ (m) = 0.0827	$\text{dif}_{\text{co_flexor}}$ (m) = 0.0827	$\text{dif}_{\text{co_flexor}}$ (m) = 0.0827
$\max_{F_{22}}$ (N) = 22,4247	$\max_{F_{22}}$ (N) = 22,4247	$\max_{F_{22}}$ (N) = 22,4247	$\max_{F_{22}}$ (N) = 22,4247
$\text{dif}_{\text{co_extensor}}$ (m)= 0.1070	$\text{dif}_{\text{co_extensor}}$ (m)= 0.1070	$\text{dif}_{\text{co_extensor}}$ (m)= 0.1070	$\text{dif}_{\text{co_extensor}}$ (m)= 0.1070

θ_{01} (rad) = 0	θ_{01} (rad) = 0	θ_{01} (rad) = 0	θ_{01} (rad) = 0
θ_{02} (rad) = -3,142	θ_{02} (rad) = -3,142	θ_{02} (rad) = -3,142	θ_{02} (rad) = -3,142
b_1 (m) = 0.1400	b_1 (m) = 0.1750	b_1 (m) = 0.2100	b_1 (m) = 0.2450
b_{21} (m) = 0.1400	b_{21} (m) = 0.1400	b_{21} (m) = 0.1400	b_{21} (m) = 0.1400
b_{22} (m) = 0.1400	b_{22} (m) = 0.1400	b_{22} (m) = 0.1400	b_{22} (m) = 0.1400
valor de x_f ? .4			
valor de y_f ? -.2			
$\max_{F_{11}}$ (N) = 41,966	$\max_{F_{11}}$ (N) = 40,063	$\max_{F_{11}}$ (N) = 38,991	$\max_{F_{11}}$ (N) = 38,330
\max_{T_1} (Nm) = 2,9149	\max_{T_1} (Nm) = 2,9149	\max_{T_1} (Nm) = 2,9149	\max_{T_1} (Nm) = 2,9149
$\text{dif}_{\text{om_flexor}}$ (m)= 0.0192	$\text{dif}_{\text{om_flexor}}$ (m)= 0.0202	$\text{dif}_{\text{om_flexor}}$ (m)= 0.0209	$\text{dif}_{\text{om_flexor}}$ (m)= 0.0213

max_F ₁₂ (N) =			
41,966	40,063	38,991	38,330
dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =
0.0218	0.0226	0.0230	0.0233
max_T ₂ (Nm) =			
2,9556	2,9556	2,9556	2,9556
max_F ₂₁ (N) =			
22,619	22,619	22,619	22,619
dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =
0.0767	0.0767	0.0767	0.0767
max_F ₂₂ (N) =			
29,845	29,845	29,845	29,845
dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=
0.0635	0.0635	0.0635	0.0635

θ ₀₁ (rad) =			
0	0	0	0
θ ₀₂ (rad) =			
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b ₁ (m) =			
0.1400	0.1750	0.2100	0.2450
b ₂₁ (m) =			
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b ₂₂ (m) =			
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
valor de xf?.6	valor de xf?.6	valor de xf?.6	Xf=0.6
valor de yf?-.6	valor de yf?-.6	valor de yf?-.6	Yf=-06
max_F ₁₁ (N) =			
53,800	53,606	53,988	54,506
max_T ₁ (Nm) =			
4,285	4,285	4,285	4,285
dif_om_flexor (m)=	dif_om_flexor (m)=	dif_om_flexor (m)=	dif_om_flexor (m)=
0.0388	0.0398	0.0403	0.0405
max_F ₁₂ (N) =			
84,453	79,147	75,765	73,437
dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =
0.0311	0.0329	0.0341	0.0350
max_T ₂ (Nm) =			
2,915	2,915	2,915	2,915
max_F ₂₁ (N) =			
54,414	54,414	54,414	54,414
dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =
0.1028	0.1028	0.1028	0.1028
max_F ₂₂ (N) =			
26,415	26,415	26,415	26,415
dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=
0.1445	0.1445	0.1445	0.1445

θ ₀₁ (rad) =			
0	0	0	0
θ ₀₂ (rad) =			

-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b_1 (m) =	b_1 (m) =	b_1 (m) =	b_1 (m) =
0.1400	0.1750	0.2100	0.2450
b_{21} (m) =	b_{21} (m) =	b_{21} (m) =	b_{21} (m) =
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b_{22} (m) =	b_{22} (m) =	b_{22} (m) =	b_{22} (m) =
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =	Xf =	Xf =	Xf =
0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
Yf =	Yf =	Yf =	Yf =
0	0	0	0
$\max_{F_{11}}$ (N) =	$\max_{F_{11}}$ (N) =	$\max_{F_{11}}$ (N) =	$\max_{F_{11}}$ (N) =
66,394	68,983	71,508	73,661
\max_{T_1} (Nm) =	\max_{T_1} (Nm) =	\max_{T_1} (Nm) =	\max_{T_1} (Nm) =
5,230	5,230	5,230	5,230
$\text{dif}_{\text{om}_{\text{flexor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{om}_{\text{flexor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{om}_{\text{flexor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{om}_{\text{flexor}}}$ (m) =
0.0595	0.0602	0.0603	0.0601
$\max_{F_{12}}$ (N) =	$\max_{F_{12}}$ (N) =	$\max_{F_{12}}$ (N) =	$\max_{F_{12}}$ (N) =
133,100	124,115	118,258	114,150
$\text{dif}_{\text{om}_{\text{extensor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{om}_{\text{extensor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{om}_{\text{extensor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{om}_{\text{extensor}}}$ (m) =
0.0428	0.0454	0.0472	0.0485
\max_{T_2} (Nm) =	\max_{T_2} (Nm) =	\max_{T_2} (Nm) =	\max_{T_2} (Nm) =
30,021	30,021	30,021	30,021
$\max_{F_{21}}$ (N) =	$\max_{F_{21}}$ (N) =	$\max_{F_{21}}$ (N) =	$\max_{F_{21}}$ (N) =
23,537	23,537	23,537	23,537
$\text{dif}_{\text{co}_{\text{flexor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{co}_{\text{flexor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{co}_{\text{flexor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{co}_{\text{flexor}}}$ (m) =
0.0332	0.0332	0.0332	0.0332
$\max_{F_{22}}$ (N) =	$\max_{F_{22}}$ (N) =	$\max_{F_{22}}$ (N) =	$\max_{F_{22}}$ (N) =
22,950	22,950	22,950	22,950
$\text{dif}_{\text{co}_{\text{extensor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{co}_{\text{extensor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{co}_{\text{extensor}}}$ (m) =	$\text{dif}_{\text{co}_{\text{extensor}}}$ (m) =
0.0364	0.0364	0.0364	0.0364

θ_{01} (rad) =	θ_{01} (rad) =	θ_{01} (rad) =	θ_{01} (rad) =
0	0	0	0
θ_{02} (rad) =	θ_{02} (rad) =	θ_{02} (rad) =	θ_{02} (rad) =
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b_1 (m) =	b_1 (m) =	b_1 (m) =	b_1 (m) =
0.1400	0.1750	0.2100	0.2450
b_{21} (m) =	b_{21} (m) =	b_{21} (m) =	b_{21} (m) =
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b_{22} (m) =	b_{22} (m) =	b_{22} (m) =	b_{22} (m) =
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =	Xf =	Xf =	Xf =
0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
Yf =	Yf =	Yf =	Yf =
0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
$\max_{F_{11}}$ (N) =	$\max_{F_{11}}$ (N) =	$\max_{F_{11}}$ (N) =	$\max_{F_{11}}$ (N) =
45,167	43,178	42,075	41,408
\max_{T_1} (Nm) =	\max_{T_1} (Nm) =	\max_{T_1} (Nm) =	\max_{T_1} (Nm) =

3,182	3,182	3,182	3,182
dif_om_flexor (m)=	dif_om_flexor (m)=	dif_om_flexor (m)=	dif_om_flexor (m)=
0.0237	0.0246	0.0250	0.0253
max_F ₁₂ (N) =			
48,505	45,696	43,954	42,895
dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =
0.0206	0.0218	0.0225	0.0230
max_T ₂ (Nm) =			
30,593	30,593	30,593	30,593
max_F ₂₁ (N) =			
23,337	23,337	23,337	23,337
dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =
0.0905	0.0905	0.0905	0.0905
max_F ₂₂ (N) =			
24,166	24,166	24,166	24,166
dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=
0.0726	0.0726	0.0726	0.0726

θ_{01} (rad) =	θ_{01} (rad) =	θ_{01} (rad) =	θ_{01} (rad) =
0	0	0	0
θ_{02} (rad) =	θ_{02} (rad) =	θ_{02} (rad) =	θ_{02} (rad) =
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b ₁ (m) =			
0.1400	0.1750	0.2100	0.2450
b ₂₁ (m) =			
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b ₂₂ (m) =			
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =	Xf =	Xf =	Xf =
0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
Yf =	Yf =	Yf =	Yf =
0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
max_F ₁₁ (N) =			
84,279	97,277	106,805	113,921
max_T ₁ (Nm) =			
5,081	5,081	5,081	5,081
dif_om_flexor (m)=	dif_om_flexor (m)=	dif_om_flexor (m)=	dif_om_flexor (m)=
0.0875	0.0860	0.0845	0.0832
max_F ₁₂ (N) =			
246,531	228,916	217,233	208,924
dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =	dif_om_extensor(m) =
0.0545	0.0580	0.0605	0.0623
max_T ₂ (Nm) =			
3,086	3,086	3,086	3,086
max_F ₂₁ (N) =			
23,879	23,879	23,879	23,879

dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =	dif_co_flexor (m) =
0.0199	0.0199	0.0199	0.0199
max_F ₂₂ (N) =			
23,642	23,642	23,642	23,642
dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=	dif_co_extensor (m)=
0.0210	0.0210	0.0210	0.0210

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
b22 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
valor de xf?.1					
valor de yf?-.8					
max_F11 =					
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
max_T1 =					
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
dif_om_flexor =					
0.0239	0.0239	0.0239	0.0239	0.0239	0.0239
max_F12 =					
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
dif_om_extensor =					
0.0271	0.0271	0.0271	0.0271	0.0271	0.0271
max_T2 =					
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
max_F21 =					
58,890	37,376	28,215	23,134	19,922	17,725
dif_co_flexor =					
0.0334	0.0514	0.0678	0.0827	0.0961	0.1081
max_F22 =					
22,425	22,425	22,425	22,425	22,425	22,425
dif_co_extensor =					
0.1070	0.1070	0.1070	0.1070	0.1070	0.1070

θ_{01} (rad) =					
0	0	0	0	0	0
θ_{02} (rad) =					
-3,1416	-3,1416	-3,1416	-3,1416	-3,1416	-3,1416
b ₁ (m) =					
0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
b ₂₁ (m) =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
b ₂₂ (m) =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
valor de xf = 0.4m valor de yf = -0.2m	valor de xf = 0.4m valor de yf = -0.2m	valor de xf = 0.4m valor de yf = -0.2m	valor de xf = 0.4m valor de yf = -0.2m	valor de xf = 0.4m valor de yf = -0.2m	valor de xf = 0.4m valor de yf = -0.2m
max_F ₁₁ (N) =					
39,4576	39,4576	39,4576	39,4576	39,4576	39,4576
max_T ₁ (Nm) =					

2,9149	2,9149	2,9149	2,9149	2,9149	2,9149
dif_om_flexor (m)= 0.0206					
max_F ₁₂ (N) = 39,4576					
dif_om_extensor(m) = 0.0228					
max_T ₂ (Nm) = 2,9556					
max_F ₂₁ (N) = 61,8958	max_F ₂₁ (N) = 37,740	max_F ₂₁ (N) = 28,0298	max_F ₂₁ (N) = 22,6187	max_F ₂₁ (N) = 19,2212	max_F ₂₁ (N) = 16,9227
dif_co_flexor (m) = 0.0273	dif_co_flexor (m) = 0.0440	dif_co_flexor (m) = 0.0606	dif_co_flexor (m) = 0.0767	dif_co_flexor (m) = 0.0919	dif_co_flexor (m) = 0.1059
max_F ₂₂ (N) = 29,8446					
dif_co_extensor (m)= 0.0635					

q01 = 0					
q02 = -3,142					
b1 = 0.1925					
b21 = 0.0500	b21 = 0.0800	b21 = 0.1100	b21 = 0.1400	b21 = 0.1700	b21 = 0.2000
b22 = 0.1400					
Xf = 0.6000					
Yf = -0.6000					
max_F11 = 53,764					
max_T1 = 4,285					
dif_om_flexor = 0.0401					
max_F12 = 77,285					
dif_om_extensor = 0.0336					
max_T2 = 2,915					
max_F21 = 125,833	max_F21 = 84,035	max_F21 = 65,169	max_F21 = 54,414	max_F21 = 47,474	max_F21 = 42,628
dif_co_flexor = 0.0420	dif_co_flexor = 0.0643	dif_co_flexor = 0.0846	dif_co_flexor = 0.1028	dif_co_flexor = 0.1192	dif_co_flexor = 0.1338
max_F22 = 26,415					
dif_co_extensor = 0.1445					

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
b22 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =					
0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
Yf =					
0	0	0	0	0	0
max_F11 =					
70,286	70,286	70,286	70,286	70,286	70,286
max_T1 =					
5,230	5,230	5,230	5,230	5,230	5,230
dif_om_flexor =					
0.0603	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603
max_F12 =					
120,906	120,906	120,906	120,906	120,906	120,906
dif_om_extensor =					
0.0464	0.0464	0.0464	0.0464	0.0464	0.0464
max_T2 =					
3,002	3,002	3,002	3,002	3,002	3,002
max_F21 =					
61,014	38,887	29,029	23,537	20,085	17,744
dif_co_flexor =					
0.0130	0.0202	0.0270	0.0332	0.0389	0.0439
max_F22 =					
22,950	22,950	22,950	22,950	22,950	22,950
dif_co_extensor =					
0.0364	0.0364	0.0364	0.0364	0.0364	0.0364

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
b22 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =					
0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
Yf =					
0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
max_F11 =					
42,553	42,553	42,553	42,553	42,553	42,553
max_T1 =					
3,182	3,182	3,182	3,182	3,182	3,182
dif_om_flexor =					
0.0248	0.0248	0.0248	0.0248	0.0248	0.0248
max_F12 =					
44,732	44,732	44,732	44,732	44,732	44,732
dif_om_extensor =					

0.0222	0.0222	0.0222	0.0222	0.0222	0.0222
max_T2 =					
3,059	3,059	3,059	3,059	3,059	3,059
max_F21 =					
61,567	38,999	28,940	23,337	19,821	17,444
dif_co_flexor =					
0.0317	0.0514	0.0712	0.0905	0.1089	0.1260
max_F22 =					
24,166	24,166	24,166	24,166	24,166	24,166
dif_co_extensor =					
0.0726	0.0726	0.0726	0.0726	0.0726	0.0726

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
b22 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =					
0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
Yf =					
0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
max_F11 =					
102,404	102,404	102,404	102,404	102,404	102,404
max_T1 =					
5,081	5,081	5,081	5,081	5,081	5,081
dif_om_flexor =					
0.0852	0.0852	0.0852	0.0852	0.0852	0.0852
max_F12 =					
222,537	222,537	222,537	222,537	222,537	222,537
dif_om_extensor =					
0.0594	0.0594	0.0594	0.0594	0.0594	0.0594
max_T2 =					
3,086	3,086	3,086	3,086	3,086	3,086
max_F21 =					
62,493	39,713	29,548	23,879	20,316	17,904
dif_co_flexor =					
0.0077	0.0120	0.0161	0.0199	0.0233	0.0264
max_F22 =					
23,642	23,642	23,642	23,642	23,642	23,642
dif_co_extensor =					
0.0210	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400

b22 =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
valor de xf?.1					
valor de yf?-.8					
max_F11 =					
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
max_T1 =					
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
dif_om_flexor =					
0.0239	0.0239	0.0239	0.0239	0.0239	0.0239
max_F12 =					
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
dif_om_extensor =					
0.0271	0.0271	0.0271	0.0271	0.0271	0.0271
max_T2 =					
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
max_F21 =					
23,134	23,134	23,134	23,134	23,134	23,134
dif_co_flexor =					
0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827
max_F22 =					
58,890	37,376	27,777	22,425	19,062	16,786
dif_co_extensor =					
0.0369	0.0601	0.0837	0.1070	0.1296	0.1509

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
valor de xf?.4					
valor de yf?-.2					
max_F11 =					
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
max_T1 =					
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
dif_om_flexor =					
0.0206	0.0206	0.0206	0.0206	0.0206	0.0206
max_F12 =					
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
dif_om_extensor =					
0.0228	0.0228	0.0228	0.0228	0.0228	0.0228
max_T2 =					
2,956	2,956	2,956	2,956	2,956	2,956
max_F21 =					
22,619	22,619	22,619	22,619	22,619	22,619
dif_co_flexor =					
0.0767	0.0767	0.0767	0.0767	0.0767	0.0767
max_F22 =					
71,876	47,216	36,115	29,845	25,839	23,074
dif_co_extensor =					
0.0253	0.0392	0.0519	0.0635	0.0740	0.0834

q01 =				
0	0	0	0	0
q02 =				
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =				
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =				
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =				
0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
Xf =				
0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
Yf =				
-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000
max_F11 =				
53,764	53,764	53,764	53,764	53,764
max_T1 =				
4,285	4,285	4,285	4,285	4,285
dif_om_flexor =				
0.0401	0.0401	0.0401	0.0401	0.0401
max_F12 =				
77,285	77,285	77,285	77,285	772.852,000
dif_om_extensor =				
0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336
max_T2 =				
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
max_F21 =				
54,414	54,414	54,414	54,414	54,414
dif_co_flexor =				
0.1028	0.1028	0.1028	0.1028	0.1028
max_F22 =				
55,688	36,965	26,415	19,753	16,786
dif_co_extensor =				
0.0787	0.1111	0.1445	0.1782	0.2116

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
Xf =					
0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
Yf =					
0	0	0	0	0	0
max_F11 =					
70,286	70,286	70,286	70,286	70,286	70,286
max_T1 =					
5,230	5,230	5,230	5,230	5,230	5,230
dif_om_flexor =					
0.0603	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603
max_F12 =					

120,906	120,906	120,906	120,906	120,906	120,906
dif_om_extensor =					
0.0464	0.0464	0.0464	0.0464	0.0464	0.0464
max_T2 =					
3,002	3,002	3,002	3,002	3,002	3,002
max_F21 =					
23,537	23,537	23,537	23,537	23,537	23,537
dif_co_flexor =					
0.0332	0.0332	0.0332	0.0332	0.0332	0.0332
max_F22 =					
60,464	38,321	28,450	22,950	19,498	17,163
dif_co_extensor =					
0.0135	0.0214	0.0292	0.0364	0.0432	0.0493

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
Xf =					
0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
Yf =					
0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
max_F11 =					
42,553	42,553	42,553	42,553	42,553	42,553
max_T1 =					
3,182	3,182	3,182	3,182	3,182	3,182
dif_om_flexor =					
0.0248	0.0248	0.0248	0.0248	0.0248	0.0248
max_F12 =					
44,732	44,732	44,732	44,732	44,732	44,732
dif_om_extensor =					
0.0222	0.0222	0.0222	0.0222	0.0222	0.0222
max_T2 =					
3,059	3,059	3,059	3,059	3,059	3,059
max_F21 =					
23,337	23,337	23,337	23,337	23,337	23,337
dif_co_flexor =					
0.0905	0.0905	0.0905	0.0905	0.0905	0.0905
max_F22 =					
62,287	39,755	29,736	24,166	20,669	18,297
dif_co_extensor =					
0.0291	0.0449	0.0594	0.0726	0.0845	0.0951

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.2000	0.2000	0.2000	0.1400	0.1400	0.1400

b22 =					
0.0500	0.0800	0.1100	0.1400	0.1700	0.2000
Xf =					
0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
Yf =					
0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
max_F11 =					
102,404	102,404	102,404	102,404	102,404	102,404
max_T1 =					
5,081	5,081	5,081	5,081	5,081	5,081
dif_om_flexor =					
0.0852	0.0852	0.0852	0.0852	0.0852	0.0852
max_F12 =					
222,537	222,537	222,537	222,537	222,537	222,537
dif_om_extensor =					
0.0594	0.0594	0.0594	0.0594	0.0594	0.0594
max_T2 =					
3,086	3,086	3,086	3,086	3,086	3,086
max_F21 =					
17,904	17,904	17,904	23,879	23,879	23,879
dif_co_flexor =					
0.0264	0.0264	0.0264	0.0199	0.0199	0.0199
max_F22 =					
62,242	39,465	29,305	23,642	20,086	17,681
dif_co_extensor =					
0.0079	0.0124	0.0168	0.0210	0.0248	0.0282

q01 =						
0	0.7854	0.6283	0.5236	-0.7854	-0.6283	-0.5236
q02 =						
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =						
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =						
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =						
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
valor de xf?.1						
valor de yf?-.8						
max_F11 =						
39,458	39,412	37,253	36,609	68,369	58,049	53,024
max_T1 =						
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
dif_om_flexor =						
0.0239	0.0273	0.0278	0.0278	0.0118	0.0146	0.0164
max_F12 =						
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
dif_om_extensor =						
0.0271	0.0271	0.0271	0.0271	0.0271	0.0271	0.0271
max_T2 =						
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
max_F21 =						
23,134	23,134	23,134	23,134	23,134	23,134	23,134
dif_co_flexor =						
0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827
max_F22 =						
22,425	22,425	22,425	22,425	22,425	22,425	22,425
dif_co_extensor =						
0.1070	0.1070	0.1070	0.1070	0.1070	0.1070	0.1070

q01 =						
0,000	0.7854	0.6283	0.5236	-0.7854	-0.6283	-0.5236
q02 =						
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =						
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =						
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =						
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
valor de xf?.4						
valor de yf?-.2						
max_F11 =						
39,458	40,222	37,253	36,609	68,369	58,049	53,024
max_T1 =						
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
dif_om_flexor =						
0.0206	0.0230	0.0236	0.0236	0.0104	0.0127	0.0143
max_F12 =						
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
dif_om_extensor =						
0.0228	0.0228	0.0228	0.0228	0.0228	0.0228	0.0228
max_T2 =						
2,956	2,956	2,956	2,956	2,956	2,956	2,956
max_F21 =						
22,619	22,619	22,619	22,619	22,619	22,619	22,619
dif_co_flexor =						
0.0767	0.0767	0.0767	0.0767	0.0767	0.0767	0.0767
max_F22 =						
29,845	29,845	29,845	29,845	29,845	29,845	29,845
dif_co_extensor =						
0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635

q01 =						
0	0.7854	0.6283	0.5236	-0.7854	-0.6283	-0.5236
q02 =						
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =						
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =						
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =						
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =						
0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
Yf =						
-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000
max_F11 =						
53,764	39,421	37,270	36,656	235,306	144,872	114,346
max_T1 =						

4,285	4,285	4,285	4,285	4,285	4,285	4,285
dif_om_flexor =						
0.0401	0.0298	0.0349	0.0373	0.0280	0.0313	0.0334
max_F12 =						
77,285	77,285	77,285	77,285	77,285	77,285	77,285
dif_om_extensor =						
0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336
max_T2 =						
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
max_F21 =						
54,414	54,414	54,414	54,414	54,414	54,414	54,414
dif_co_flexor =						
0.1028	0.1028	0.1028	0.1028	0.1028	0.1028	0.1028
max_F22 =						
26,415	26,415	26,415	26,415	26,415	26,415	26,415
dif_co_extensor =						
0.1445	0.1445	0.1445	0.1445	0.1445	0.1445	0.1445

q01 =						
0	0.7854	0.6283	0.5236	-0.7854	-0.6283	-0.5236
q02 =						
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b1 =						
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =						
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =						
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =						
0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
Yf =						
0	0	0	0	0	0	0
max_F11 =						
70,286	41,969	40,113	41,181	565,780	397,358	237,371
max_T1 =						
5,230	5,230	5,230	5,230	5,230	5,230	5,230
dif_om_flexor =						
0.0603	0.0347	0.0448	0.0500	0.0460	0.0506	0.0532
max_F12 =						
120,906	120,906	120,906	120,906	120,906	120,906	120,906
dif_om_extensor =						
0.0464	0.0464	0.0464	0.0464	0.0464	0.0464	0.0464
max_T2 =						
3,002	3,002	3,002	3,002	3,002	3,002	3,002
max_F21 =						
23,537	23,537	23,537	23,537	23,537	23,537	23,537
dif_co_flexor =						
0.0332	0.0332	0.0332	0.0332	0.0332	0.0332	0.0332
max_F22 =						
22,950	22,950	22,950	22,950	22,950	22,950	22,950
dif_co_extensor =						
0.0364	0.0364	0.0364	0.0364	0.0364	0.0364	0.0364

θ_{01} (rad) = 0	θ_{01} (rad) = 0.7854	θ_{01} (rad) = 0.6283	θ_{01} (rad) = 0.5236	θ_{01} (rad) = -0.7854	θ_{01} (rad) = -0.6283	θ_{01} (rad) = -0.5236
θ_{02} (rad) = -3,1416						
b_1 (m) = 0.1925						
b_{21} (m) = 0.1400						
b_{22} (m) = 0.1400						
X_f (m) = 0.4000						
Y_f (m) = 0.1000						
$\max_{F_{11}}$ (N) = 42,5526	$\max_{F_{11}}$ (N) = 41,7455	$\max_{F_{11}}$ (N) = 39,5764	$\max_{F_{11}}$ (N) = 38,9715	$\max_{F_{11}}$ (N) = 98,4094	$\max_{F_{11}}$ (N) = 72,6515	$\max_{F_{11}}$ (N) = 61,7795
\max_{T_1} (Nm) = 3,1823						
dif_{om_flexor} (m) = 0.0248	dif_{om_flexor} (m) = 0.0211	dif_{om_flexor} (m) = 0.0236	dif_{om_flexor} (m) = 0.0246	dif_{om_flexor} (m) = 0.0162	dif_{om_flexor} (m) = 0.0184	dif_{om_flexor} (m) = 0.0198
$\max_{F_{12}}$ (N) = 44,7321						
$\text{dif}_{om_extensor}$ (m) = 0.0222						
\max_{T_2} (Nm) = 3,0593						
$\max_{F_{21}}$ (N) = 23,3374						
dif_{co_flexor} (m) = 0.0905						
$\max_{F_{22}}$ (N) = 24,1656						
$\text{dif}_{co_extensor}$ (m) = 0.0726						

q_{01} =				
0.6283	0.5236	-0.7854	-0.6283	-0.5236
q_{02} =				
-3,142	-3,142	-3,142	-3,142	-3,142
b_1 =				
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b_{21} =				
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b_{22} =				
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
X_f =				
0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
Y_f =				
0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
$\max_{F_{11}}$ =				
44,370	46,607	84,800	107,620	99,218
\max_{T_1} =				

5,081	5,081	5,081	5,081	5,081
dif_om_flexor =				
0.0467	0.0550	0.0762	0.0815	0.0842
max_F12 =				
222,537	222,537	222,537	222,537	222,537
dif_om_extensor =				
0.0594	0.0594	0.0594	0.0594	0.0594
max_T2 =				
3,086	3,086	3,086	3,086	3,086
max_F21 =				
23,879	23,879	23,879	23,879	23,879
dif_co_flexor =				
0.0199	0.0199	0.0199	0.0199	0.0199
max_F22 =				
23,642	23,642	23,642	23,642	23,642
dif_co_extensor =				
0.0210	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-2,618	-2,417	-2,244	-2,094	-1,964	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
valor de xf?.1					
valor de yf?-.8					
max_F11 =					
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
max_T1 =					
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
dif_om_flexor =					
0.0239	0.0239	0.0239	0.0239	0.0239	0.0239
max_F12 =					
36,609	38,377	42,258	49,042	63,236	39,458
dif_om_extensor =					
0.0266	0.0238	0.0198	0.0150	0.0099	0.0271
max_T2 =					
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
max_F21 =					
23,106	23,106	23,106	23,106	23,106	23,106
dif_co_flexor =					
0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827
max_F22 =					
22,425	22,425	22,425	22,425	22,425	22,425
dif_co_extensor =					
0.1070	0.1070	0.1070	0.1070	0.1070	0.1070

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-2,618	-2,417	-2,244	-2,094	-1,964	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
valor de xf?.4					
valor de yf?-.2					
max_F11 =					
39,458	39,458	39,458	39,458	39,458	39,458
max_T1 =					
2,915	2,915	2,915	2,915	2,915	2,915
dif_om_flexor =					
0.0206	0.0206	0.0206	0.0206	0.0206	0.0206
max_F12 =					
36,609	38,377	42,258	56,848	129,792	39,458
dif_om_extensor =					
0.0228	0.0207	0.0175	0.0136	0.0093	0.0228
max_T2 =					
2,956	2,956	2,956	2,956	2,956	2,956
max_F21 =					
22,619	22,619	22,619	22,619	22,619	22,619
dif_co_flexor =					
0.0767	0.0767	0.0767	0.0767	0.0767	0.0767
max_F22 =					
29,845	29,845	29,845	29,845	29,845	29,845
dif_co_extensor =					
0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-2,618	-2,417	-2,244	-2,094	-1,964	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =					
0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
Yf =					
-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000
max_F11 =					
53,764	53,764	53,764	53,764	53,764	53,764
max_T1 =					
4,285	4,285	4,285	4,285	4,285	4,285

dif_om_flexor =					
0.0401	0.0401	0.0401	0.0401	0.0401	0.0401
max_F12 =					
57,787	54,730	53,617	53,888	60,589	77,285
dif_om_extensor =					
0.0402	0.0405	0.0394	0.0371	0.0339	0.0336
max_F21 =					
26,415	26,415	26,415	26,415	26,415	26,415
dif_co_flexor =					
0.1445	0.1445	0.1445	0.1445	0.1445	0.1445

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-2,618	-2,417	-2,244	-2,094	-1,964	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =					
0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
Yf =					
0	0	0	0	0	0
max_F11 =					
70,286	70,286	70,286	70,286	70,286	70,286
max_T1 =					
5,230	5,230	5,230	5,230	5,230	5,230
dif_om_flexor =					
0.0603	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603
max_F12 =					
79,185	72,071	68,134	66,112	65,395	120,906
dif_om_extensor =					
0.0584	0.0602	0.0599	0.0578	0.0545	0.0464
max_T2 =					
3,002	3,002	3,002	3,002	3,002	3,002
max_F21 =					
23,537	23,537	23,537	23,537	23,537	23,537
dif_co_flexor =					
0.0332	0.0332	0.0332	0.0332	0.0332	0.0332
max_F22 =					
22,950	22,950	22,950	22,950	22,950	22,950
dif_co_extensor =					
0.0364	0.0364	0.0364	0.0364	0.0364	0.0364

q01 =				
0	0	0	0	0
q02 =				
-2,417	-2,244	-2,094	-1,964	-3,142
b1 =				

0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =				
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =				
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =				
0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
Yf =				
0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
max_F11 =				
42,553	42,553	42,553	42,553	42,553
max_T1 =				
3,182	3,182	3,182	3,182	3,182
dif_om_flexor =				
0.0248	0.0248	0.0248	0.0248	0.0248
max_F12 =				
41,367	45,193	52,078	63,899	44,732
dif_om_extensor =				
0.0253	0.0241	0.0222	0.0196	0.0222
max_T2 =				
3,059	3,059	3,059	3,059	3,059
max_F21 =				
23,337	23,337	23,337	23,337	23,337
dif_co_flexor =				
0.0905	0.0905	0.0905	0.0905	0.0905
max_F22 =				
24,166	24,166	24,166	24,166	24,166
dif_co_extensor =				
0.0726	0.0726	0.0726	0.0726	0.0726

q01 =					
0	0	0	0	0	0
q02 =					
-2,618	-2,417	-2,244	-2,094	-1,964	-3,142
b1 =					
0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925	0.1925
b21 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
b22 =					
0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
Xf =					
0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
Yf =					
0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
max_F11 =					
102,404	102,404	102,404	102,404	102,404	102,404
max_T1 =					
5,081	5,081	5,081	5,081	5,081	5,081
dif_om_flexor =					
0.0852	0.0852	0.0852	0.0852	0.0852	0.0852
max_F12 =					

102,187	865.789,000	77,590	72,001	68,401	222,537
dif_om_extensor =					
0.0811	0.0859	0.0878	0.0872	0.0848	0.0594
max_T2 =					
3,086	3,086	3,086	3,086	3,086	3,086
max_F21 =					
23,879	23,879	23,879	23,879	23,879	23,879
dif_co_flexor =					
0.0199	0.0199	0.0199	0.0199	0.0199	0.0199
max_F22 =					
23,642	23,642	23,642	23,642	23,642	23,642
dif_co_extensor =					
0.0210	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210

Programa em Matlab para simulação do braço 2R

```

%-----
% Ficheiro:      MUSCLES4L.m
%
% Autor:        Filipe Silva
% Data:         15Nov2001
% Objectivo:    Modelização cinemática e dinâmica do manipulador RR:
%               1) Actuado por motores rotacionais

```

```

%
%-----
%                               2) Actuado por músculos artificiais
%-----

clear all
clc

%-----
% Definição de constantes
%-----
global m1 m2 m3 l1 l2 R Ts h go %-- Variáveis globais -----

go=9.8;                               %-- Aceleração da gravidade -----
%-- Estrutura do braço manipulador -----
l1=.35;
m1=.347;                               %-- Comprimento e massa do elo ombro-cotovelo (l1, m1) -----
l2=.52;%(27)
m2=.744;                               %-- Comprimento e massa do elo cotovelo-punho (l2, m2) -----
l3=0.0;
m3=0.2;                               %-- Comprimento e massa da carga colocada na extremidade -----

%-- Roldana e braços das alavancas -----
R = 0.08;                               %-- raio: parâmetro característico da roldana -----

q01 = -pi/6      %-- origem do músculos flexor do ombro
q02 = -5*pi/7.25 %-- origem do músculos extensor do ombro
q0 = [q01; q02];
b1 = 0.5*l1      %-- b1: flexor e extensor do ombro
b21 = 0.08      %-- b21: flexor do cotovelo;
b22 = 0.08      %-- b22: extensor do cotovelo
b = [b1 b1; b21 b22];

%-- Simulação temporal -----
Ts = 0.1e-3;    %-- Período de amostragem -----
h = Ts;        %-- Período de simulação -----
Tsim = 1.5;    %-- Tempo de execução do movimento -----
t = 0:Ts:Tsim; %-- Vector tempo (virtual) -----
DIM = length(t); %-- Dimensão do vector tempo -----

%-----
% Representação gráfica do robô na configuração inicial:
%      1) Função CinDir2R: cálculo das coordenadas Cartesianas do robô RR
%      2) Script DesenharRobo: plot dos elos mecânicos, juntas e músculos
%-----
ang1i = -pi/2; ang2i = pi/2;   q = [ang1i; ang2i]; %-- Deslocamento angular inicial ---
P = CinDir2R(ang1i,ang2i);
DesenharRobo( P, q, q0, b )

%-----
% Ciclo infinito: descrição dos requisitos da tarefa operacional
%-----
Xi = P(3,1); Yi = P(4,1);
while 1,

    %-----
    % Coordenada inicial (Xi,Yi) e final (Xf,Yf: usando rato) do elemento terminal
    %-----

    figure(1)
    [Xf,Yf,button] = ginput(1); %-- Seleccionar coordenada (X,Y) desejada -----
    if isempty(Xf) | isempty(Yf), %-- Tecla ENTER para sair do ciclo infinito ----
        break
    end

%%%% ESPAÇO DAS JUNTAS *****
%-----*
% Geração de trajectórias usando interpolação polinomial *
%-----*
if button == 1, %*
    %-----*
    % Cinemática Inversa: definição da configuração desejada *
    %-----*
    [ang1f,ang2f] = CinInv2R(Xf,Yf,'b'); %-- Deslocamento angular final ---*
    MinMovJuntas %-- Selecção do caminho mais curto ---*
    %-----*
    % Planeamento de trajectórias no espaço das juntas *
    %-----*

```

```

[q1, dq1, dddq1] = GeradorTraj(t, [ang1i ang1f]); %-- Junta 1 ("ombro") ----*
[q2, dq2, dddq2] = GeradorTraj(t, [ang2i ang2f]); %-- Junta 2 ("cotovelo") -*
q = [q1; q2]; dq = [dq1; dq2]; dddq = [dddq1; dddq2]; %*
else %*
%-----*
% Planeamento de trajetórias no espaço Cartesiano *
%-----*
[trajX, dtrajX, ddtrajX] = GeradorTraj(t, [Xi Xf]); %-- Componente X (linear) *
[trajY, dtrajY, ddtrajY] = GeradorTraj(t, [Yi Yf]); %-- Componente Y (linear) *
dtraj = [dtrajX; dtrajY]; %*
%-----*
% Simulação do movimento do robô ao longo de uma linha recta *
[q, dq] = MovContínuo(t,q(:,1),dtraj); -> usando a d/dt *
%-----*
[q1,q2] = CinInv2R(trajX,trajY,'b'); %-- Deslocamento angular -----*
[dq1,dq2,dddq1,dddq2] = CinInvDif2R(trajX,trajY,dtrajX,dtrajY,ddtrajX,ddtrajY);%*
q = [q1; q2]; dq = [dq1; dq2]; dddq = [dddq1; dddq2]; %*
end %*
%-----*
% Dinâmica Inversa e PlotGrafs *
%-----*
[J C G T] = DinInv2R(q, dq, dddq); %*
PlotJuntasD %-- Evolução temporal das posições, velocidades e acelerações *

PlotBinD %-- Evolução temporal dos binários *

%%%%%%%%*****END*
%%%%%%%% ESPAÇO DOS MÚSCULOS *****

%-----*
% Ombro: músculo flexor *
%-----*
z11 = sqrt(b(1,1)^2+R^2-2*b(1,1)*R*cos(q0(1)+q(1,:))); %-- Dimensão -----*
dz11 = ( b(1,1)*R*sin(q0(1)+q(1,:)) ).*dq(1,:)./z11; %-- Velocidade -----*
ddz11 = b(1,1)*R*( cos(q0(1)+q(1,:))-b(1,1)*R*(sin(q0(1)+q(1,:))./z11).^2).*... %*
dq(1,:).^2+sin(q0(1)+q(1,:)).*ddq(1,:)./z11; %-- Aceleração -----*
F11 = T(1,:).*z11./( b(1,1)*R*sin(q0(1)-q(1,:)) ); %-- Força -----*
%-----*
% Ombro: músculo extensor *
%-----*

z12 = sqrt(b(1,2)^2+R^2-2*b(1,2)*R*cos(q0(2)-q(1,:))); %-- Dimensão -----*
dz12 = -( b(1,2)*R*sin(q0(2)-q(1,:)) ).*dq(1,:)./z12; %-- Velocidade -----*
ddz12 = -b(1,2)*R*((-cos(q0(2)-q(1,:))+b(1,2)*R*(sin(q0(2)-q(1,:))./z12).^2).*... %*
dq(1,:).^2+sin(q0(2)-q(1,:)).*ddq(1,:)./z12; %-- Aceleração -----*
F12 = T(1,:).*z12./( b(1,2)*R*sin(-q0(2)+q(1,:)) ); %-- Força -----*
%-----*
% Cotovelo: músculo flexor *
%-----*
z21 = sqrt(l1^2+b(2,1)^2+2*l1*b(2,1)*cos(q(2,:))); %-- Dimensão -----*
dz21 = -( l1*b(2,1)*sin(q(2,:)) ).*dq(2,:)./z21; %-- Velocidade -----*
ddz21 = -l1*b(2,1)*( cos(q(2,:))+l1*b(2,1)*sin(q(2,:))./z21).^2).*... %*
dq(2,:).^2+sin(q(2,:)).*ddq(2,:)./z21; %-- Aceleração -----*
F21 = T(2,:).*z21./( l1*b(2,1)*sin(q(2,:)) ); %-- Força -----*
%-----*
% Cotovelo: músculo extensor *
%-----*
z22 = sqrt(l1^2+b(2,2)^2-2*l1*b(2,2)*cos(q(2,:))); %-- Dimensão -----*
dz22 = ( l1*b(2,2)*sin(q(2,:)) ).*dq(2,:)./z22; %-- Velocidade -----*
ddz22 = l1*b(2,2)*( cos(q(2,:))-l1*b(2,2)*sin(q(2,:))./z22).^2).*... %*
dq(2,:).^2+sin(q(2,:)).*ddq(2,:)./z22; %-- Aceleração -----*
F22 = T(2,:).*z22./( l1*b(2,2)*sin(q(2,:)) ); %-- Força -----*
%-----*
% Evolução temporal das posições, velocidades e acelerações musculares *
%-----*
PlotMusD
%-----*
% Evolução temporal das forças nos músculos do ombro (F11,F12) e cotovelo (F21,F22)*
%-----*
PlotForD
%-----*
% Animação do movimento real do robô (controlo PD) *
%-----*

```

```

P = CinDir2R(q(1,:),q(2,:)); %*
% DesenharRobo( P, q, q0, b ) %*

%% %% *****END*

disp('SIMULAÇÃO E CONTROLO: prima uma tecla')
pause

%% %% SIMULAÇÃO & CONTROLO *****

%-----
% Simulação do movimento usando uma lei de controlo PD
%-----
if button == 1,
    Kp = 1000.0; Kd = 20000.0;
else
    Kp = 100.0; Kd = 30.0;
end

z11_r(1)=z11(1);
dz11_r(1)=dz11(1);
z12_r(1)=z12(1);
dz12_r(1)=dz12(1);
z21_r(1)=z21(1);
dz21_r(1)=dz21(1);
z22_r(1)=z22(1);
dz22_r(1)=dz22(1)

q1_r(1) = q1(1); q2_r(1) = q2(1); dq1_r(1) = dq1(1); dq2_r(1) = dq2(1);

for k=1:DIM,

%-- Controlador PD -----

err_z11(k) = z11(k)-z11_r(k);
err_z12(k) = z12(k)-z12_r(k);
err_z21(k) = z21(k)-z21_r(k);
err_z22(k) = z22(k)-z22_r(k);

err_dz11(k) = dz11(k)-dz11_r(k);
err_dz12(k) = dz12(k)-dz12_r(k);
err_dz21(k) = dz21(k)-dz21_r(k);
err_dz22(k) = dz22(k)-dz22_r(k);

F11s(k) = Kp*err_z11(k)+Kd*err_dz11(k);
F12s(k) = Kp*err_z12(k)+Kd*err_dz12(k);
F21s(k) = Kp*err_z21(k)+Kd*err_dz21(k);
F22s(k) = Kp*err_z22(k)+Kd*err_dz22(k);

M11(k)=F11s(k)*b1*R*(sin(q0(1)-q1_r(k))/z11_r(k));
M12(k)=F12s(k)*b1*R*(sin(-q0(2)+q1_r(k))/z12_r(k));
M21(k)=F21s(k)*b2*1*(sin(q2_r(k))/z21_r(k));
M22(k)=F22s(k)*b2*1*(sin(q2_r(k))/z22_r(k));

T1(k)= abs(M11(k)) + abs(M12(k));
T2(k)= abs(M21(k)) + abs(M22(k));

%-- Dinâmica directa -----

if k <= DIM-1,
    z1 = q1_r(k); z2 = q2_r(k); z3 = dq1_r(k); z4 = dq2_r(k);
    [q1_r(k+1),q2_r(k+1),dq1_r(k+1),dq2_r(k+1)] = DirDin2R_RK4(z1,z2,z3,z4,T1(k),T2(k));

    q_r_k1=[q1_r(k+1);q2_r(k+1)];
    dq_r_k1=[dq1_r(k+1);dq2_r(k+1)];

    [z_r,dz_r]=cal_z(b,q_r_k1,dq_r_k1,R,q0,l1);

    z11_r(k+1)=z_r(1,1);z12_r(k+1)=z_r(2,1);z21_r(k+1)=z_r(3,1);z22_r(k+1)=z_r(4,1);
    dz11_r(k+1)=dz_r(1,1);dz12_r(k+1)=dz_r(2,1);dz21_r(k+1)=dz_r(3,1);dz22_r(k+1)=dz_r(4,1);

end

```

```

end
q_r = [q1_r; q2_r];
dq_r = [dq1_r; dq2_r];

T_r = [T1; T2];
pause
%-----
% Evolução temporal das variáveis no espaço dos músculos (desejados e reais)
%-----
PlotGrafR
PlotBinariosR(t,T,T_r)
%-----
% Animação do movimento real do robô (controlo PD)
%-----
P_r = CinDir2R(q_r(1,:),q_r(2,:));
DesenharRobo( P_r, q, q0, b )

pause

plotx_xr(P,P_r,t)
plotF_Fr(F11,F11s,F12,F12s,F21,F21s,F22,F22s,t)
plotz_zr(z11,z11_r,z12,z12_r,z21,z21_r,z22,z22_r,t)

pause

%-----
% Actualizar configuração inicial
%-----
LAST_R = P_r(:,DIM);
LAST_q = q_r(:,DIM);
clear P q dq
Xi = LAST_R(3);      Yi = LAST_R(4);
P(1,1) = LAST_R(1);  P(2,1) = LAST_R(2);
P(3,1) = LAST_R(3);  P(4,1) = LAST_R(4);
q(1,1) = LAST_q(1);  q(2,1) = LAST_q(2);
ang1i = q_r(1,DIM);  ang2i = q_r(2,DIM);
end

%-----
% Sair
%-----
close all, return

```

```

function R = CinDir2R(ang1,ang2,l1,l2)

```

```

global l1 l2

%-- Elo 1 -----
x1=l1*cos(ang1);
y1=l1*sin(ang1);
%-- Elo 2 -----
x2=l1*cos(ang1)+l2*cos(ang1+ang2);
y2=l1*sin(ang1)+l2*sin(ang1+ang2);
%-----
R = [x1; y1; x2; y2];
%-----end

```

```

function DesenharRobo( P, q, q0, b )

```

```

global R
figure(1)
DIM = size(P,2);
for k=1:250:DIM,

clf, hold on
[X,Y,Z] = sphere; X= 0.03*X; Y= 0.03*Y; Z= 0.03*Z;
surf(X,Y,Z), surf(X+P(1,k),Y+P(2,k), Z)
Xc = R*cos(0:pi/9:2*pi);
Yc = R*sin(0:pi/9:2*pi);

```

```

A=plot([0 P(1,k) P(3,k)], [0 P(2,k) P(4,k)], 'k', ... %-- Elos mecânicos
[P(1,k) P(1,k)-b(2,2)*cos(q(1,k)+q(2,k)), [P(2,k) P(2,k)-b(2,2)*sin(q(1,k)+q(2,k))], 'k', ...
P(3,k), P(4,k), 'ks', Xc, Yc, 'k', ... %-- Garra e roldana
P(3,DIM), P(4,DIM), 'k', P(3,1:k), P(4,1:k), 'k', ... %-- Ponto final desejado e rasto
[R*cos(q0(1)) b(1,1)*cos(q(1,k)), [R*sin(q0(1)) b(1,1)*sin(q(1,k))], 'r', ... % OFlexor
[R*cos(q0(2)) b(1,2)*cos(q(1,k)), [R*sin(q0(2)) b(1,2)*sin(q(1,k))], 'r', ... % OExtensor
[0 P(1,k)+b(2,1)*cos(q(1,k)+q(2,k)), [0 P(2,k)+b(2,1)*sin(q(1,k)+q(2,k))], 'g', ... %CFlexor
[0 P(1,k)-b(2,2)*cos(q(1,k)+q(2,k)), [0 P(2,k)-b(2,2)*sin(q(1,k)+q(2,k))], 'g']; %CExtensor

set(A(1), 'LineWidth', 2); set(A(2), 'LineWidth', 2);
xlabel(' X (m) '), ylabel(' Y (m) '), title(' Movimentação do Braço ')
axis([-0.3 1.0 -0.5 .5]), axis('equal'), pause(0.001)

```

end

```

function [ang1,ang2] = CinInv2R(xe,ye,COTOVELO)

```

```

global l1 l2

```

```

%-- Junta 1,2 -----
for k=1:length(xe),

k1_1 = 2*l1*ye(k); k1_2 = 0;
k2_1 = 2*l1*xe(k); k2_2 = 2*l1*l2;
k3_1 = xe(k)^2+ye(k)^2+l1^2-l2^2; k3_2 = xe(k)^2+ye(k)^2-l1^2-l2^2;
if ( xe(k)>=0 & COTOVELO == 'b' ) | (xe(k)<0 & COTOVELO == 'c'),
ang1(k) = atan2(k1_1,k2_1)-atan2(sqrt(k1_1^2+k2_1^2-k3_1^2),k3_1);
ang2(k) = atan2(sqrt(k2_2^2-k3_2^2),k3_2);
else
ang1(k) = atan2(k1_1,k2_1)+atan2(sqrt(k1_1^2+k2_1^2-k3_1^2),k3_1);
ang2(k) = -atan2(sqrt(k2_2^2-k3_2^2),k3_2);
end

%-- Ângulos entre -pi e pi -----
if ang1(k) > pi, ang1(k) = ang1(k)-2*pi; end
if ang1(k) < -pi, ang1(k) = ang1(k)+2*pi; end

end
%-----

```

```

%-- SCRIPT: MinMovJuntas -----
AMP1_ang1 = ang1f-ang1i;
if ang1f > 0, AMP2_ang1 = ang1f-ang1i-2*pi;
else AMP2_ang1 = ang1f-ang1i+2*pi; end
if abs(AMP1_ang1) > abs(AMP2_ang1), ang1f = ang1i+AMP2_ang1; end
AMP1_ang2 = ang2f-ang2i;
if ang2f > 0, AMP2_ang2 = ang2f-ang2i-2*pi;
else AMP2_ang2 = ang2f-ang2i+2*pi; end
if abs(AMP1_ang2) > abs(AMP2_ang2), ang2f = ang2i+AMP2_ang2; end

```

```

function [pos,vel,ace] = GeradorTraj(t, var)
DIM = length(t);
tp = [t(1) t(DIM)];
%-- Especificação da trajectória: posição inicial e final -----
%-- Velocidade e aceleração inicial final é nula -----
p = var';
dp = [0 0]';
ddp = [0 0]';

%-- Determinação dos coeficientes da função polinomial -----
[COEFp, COEFv, COEFa] = polyfit2(tp, p, dp, ddp);

%-- Avaliação das polinomiais ao longo do tempo (t) -----

```

```

pos = polyval(COEFp, t);
vel = polyval(COEFv, t);
ace = polyval(COEFa, t);
%-----end

```

```

function [COEF,dCOEF,ddCOEF] = polyfit2( x,p,v,a )

```

```

X_dim = length(x);
ORDER = length(p)+length(v)+length(a);
for k=1:ORDER,
    if k<=X_dim,
        for l=1:ORDER,
            MATRIZ_x(k,l) = x(k)^(ORDER-l);
        end
    end
    if k>X_dim & k<=2*X_dim,
        for l=1:ORDER,
            if ORDER-l-1 >= 0,
                MATRIZ_x(k,l) = (ORDER-l)*x(k-X_dim)^(ORDER-l-1);
            else
                MATRIZ_x(k,l) = 0.0;
            end
        end
    end
    if k>2*X_dim,
        for l=1:ORDER,
            if ORDER-l-2 >= 0,
                MATRIZ_x(k,l) = (ORDER-l)*(ORDER-l-1)*x(k-2*X_dim)^(ORDER-l-2);
            else
                MATRIZ_x(k,l) = 0.0;
            end
        end
    end
end
COEF = inv(MATRIZ_x)[p; v; a];
array = ORDER-1:-1:1;
dCOEF = array'.*COEF(1:ORDER-1);
array = ORDER-2:-1:1;
ddCOEF = array'.*dCOEF(1:ORDER-2);

```

```

function [dq1,dq2,ddq1,ddq2] = CinInvDif2R(xe,ye,dxe,dye,ddxe,ddy)
global l1 l2

```

```

%-- Junta 1,2 -----
for k=1:length(xe),

    %-- Junta 1 -----
    k0 = xe(k)^2+ye(k)^2;
    k1 = k0+l1^2-l2^2;
    VAR_aux = 4.0*l1^2*k0-k1^2;
    if VAR_aux >= 0.0,    k2 = sqrt(VAR_aux);
    else disp('Erro1: CinInvDif2R sqrt...'), return, end
    k3 = xe(k)*dxe(k)+ye(k)*dye(k);
    k4 = dxe(k)*dxe(k)+dye(k)*dye(k)+xe(k)*ddxe(k)+ye(k)*ddy(k);
    k5 = l1^2-l2^2-k0;
    k6 = xe(k)*dye(k)-ye(k)*dxe(k);
    k7 = xe(k)*ddy(k)-ye(k)*ddxe(k);
    k8 = (k0*k2^2)*((k4*k5)-(2.0*k3^2));
    k8 = k8-(k3^2*k5)*((2.0*k2^2)+(4.0*l1^2*k0)-(2.0*k0*k1));

    dq1(k) = k6/k0+(k3*k5)/(k0*k2);
    ddq1(k) = ( k0*k7-2.0*k3*k6 )/( k0^2 )+k8/( k0^2*k2^3 );

    %-- Junta 2 -----
    k0 = xe(k)^2+ye(k)^2;
    k1 = k0-l1^2-l2^2;
    VAR_aux = 4.0*l1^2*l2^2-k1^2;
    if VAR_aux >= 0.0,    k2 = sqrt(VAR_aux);

```

```

else disp('\n Erro2: CinInvDif2R sqrt...'), return, end
k3 = xe(k)*dxe(k)+ye(k)*dye(k);
k4 = dxe(k)^2+dye(k)^2+xe(k)*ddxe(k)+ye(k)*ddy(k);

dq2(k) = 2.0*k3/k2;
ddq2(k) = ( 2.0*k2^2*k4+4.0*k1*k3^2 )/( k2^3 );

end
%-----

function [I, C, G, T] = DinInv2R( q, dq, ddq )

global m1 m2 m3 l1 l2 go

r1 = l1/2; r2 = l2/2;      %-- Massas dos elos colocadas no centro -----

%-- Matriz de Inércias -----
J(1,1,:) = m1*r1^2+m2*( l1^2+r2^2+2*l1*r2*cos(q(2,:)) )+m3*( l1^2+l2^2+2*l1*l2*cos(q(2,:)) );
J(1,2,:) = m2*( r2^2+ l1*r2*cos(q(2,:)) )+m3*( l2^2+ l1*l2*cos(q(2,:)) );
J(2,1,:) = J(1,2);
J(2,2,:) = m2*r2^2+m3*l2^2;

%-- Termos Coriolis/centrífugos -----
C = [ -2*l1*(m2*r2+m3*l2)*sin(q(2,:)).*( dq(1,:).*dq(2,:)+dq(2,:).^2 );
      l1*(m2*r2+m3*l2)*sin(q(2,:)).*dq(1,:).^2 ];

%-- Termos Gravitacionais -----
G = go*[ (m1*r1+(m2+m3)*l1)*cos(q(1,:))+(m2*r2+m3*l2)*cos(q(1,:)+q(2,:));
         (m2*r2+m3*l2)*cos(q(1,:)+q(2,:)) ];

%-- Equação do movimento: T = J*ddq+C(q,dq)+G(q) -----
for k=1:length(q),
    I(1,k) = J(1,1,k)*ddq(1,k)+J(1,2,k)*ddq(2,k);
    I(2,k) = J(2,1,k)*ddq(1,k)+J(2,2,k)*ddq(2,k);
end
T = I + C + G;
%-----end

function [q1,q2,dq1,dq2] = DirDin2R_RK4(z1,z2,z3,z4,T1,T2)

global h

%-- Avaliação dos 1's -----
[M1,N1] = InerciasTCG(z1,z2,z3,z4,T1,T2);
M1=h*M1; N1=h*N1; K1=h*z3; L1=h*z4;

%-- Avaliação dos 2's -----
[M2,N2] = InerciasTCG(z1+K1/2,z2+L1/2,z3+M1/2,z4+N1/2,T1,T2);
M2=h*M2; N2=h*N2; K2=h*(z3+M1/2); L2=h*(z4+N1/2);

%-- Avaliação dos 3's -----
[M3,N3] = InerciasTCG(z1+K2/2,z2+L2/2,z3+M2/2,z4+N2/2,T1,T2);
M3=h*M3; N3=h*N3; K3=h*(z3+M2/2); L3=h*(z4+N2/2);

%-- Avaliação dos 4's -----
[M4,N4] = InerciasTCG(z1+K3,z2+L3,z3+M3,z4+N3,T1,T2);
M4=h*M4; N4=h*N4; K4=h*(z3+M3); L4=h*(z4+N3);

%-- Formulas de Runge-Kutta -----
q1 = z1+(K1+2*K2+2*K3+K4)/6.0;
q2 = z2+(L1+2*L2+2*L3+L4)/6.0;
dq1 = z3+(M1+2*M2+2*M3+M4)/6.0;
dq2 = z4+(N1+2*N2+2*N3+N4)/6.0;
%-----end

function [M,N] = InerciasTCG( q1,q2,w1,w2,T1,T2 )

```

```

global m1 m2 m3 l1 l2 go

r1 = l1/2; r2 = l2/2;      %-- Massas dos elos colocadas no centro -----
%-----
%-- Dinâmica Directa: ddq = inv(J)*(T-C-G) -----
%-----
T = [T1;T2];
%-- Matriz de Inércias -----
J(1,1) = m1*r1^2+m2*( l1^2+r2^2+2*l1*r2*cos(q2) )+m3*( l1^2+l2^2+2*l1*l2*cos(q2) );
J(1,2) = m2*( r2^2+ l1*r2*cos(q2) )+m3*( l2^2+ l1*l2*cos(q2) );
J(2,1) = J(1,2);
J(2,2) = m2*r2^2+m3*l2^2;
%-- Termos Coriolis/centrífugos -----
C = [ -2*l1*(m2*r2+m3*l2)*sin(q2)*( w1*w2+w2^2 );
      l1*(m2*r2+m3*l2)*sin(q2)*w1^2 ];

%-- Termos Gravitacionais -----
G = go*[ (m1*r1+(m2+m3)*l1)*cos(q1)+(m2*r2+m3*l2)*cos(q1+q2);
        (m2*r2+m3*l2)*cos(q1+q2) ];

%-- Acelerações ddq -----
ddq = inv(J)*(T-C-G);
M = ddq(1);
N = ddq(2);
%-----

```

```

function [z_r,dz_r]=cal_z(b,q_r,dq_r,R,q0,l1)

```

```

q1_r=q_r(1,1);
q2_r=q_r(2,1);
dq1_r=dq_r(1,1);
dq2_r=dq_r(2,1);

% % % ESPAÇO DOS MÚSCULOS *** ( dimensões após
controlador)*****
%-----*
% Ombro: músculo flexor *
%-----*
z11_r = sqrt(b(1,1)^2+R^2-2*b(1,1)*R*cos(q0(1)+q1_r)); %-- Dimensão -----*
dz11_r = ( b(1,1)*R*sin(q0(1)+q1_r) )*dq1_r/z11_r; %-- Velocidade -----*
%-----*
% Ombro: músculo extensor *
%-----*
z12_r = sqrt(b(1,2)^2+R^2-2*b(1,2)*R*cos(q0(2)-q1_r)); %-- Dimensão -----*
dz12_r = -( b(1,2)*R*sin(q0(2)-q1_r) )*dq1_r/z12_r; %-- Velocidade -----*
%-----*
% Cotovelo: músculo flexor *
%-----*
z21_r = sqrt(l1^2+b(2,1)^2+2*l1*b(2,1)*cos(q2_r)); %-- Dimensão -----*
dz21_r = -( l1*b(2,1)*sin(q2_r) )*dq2_r/z21_r; %-- Velocidade -----*
%-----*
% Cotovelo: músculo extensor *
%-----*
z22_r = sqrt(l1^2+b(2,2)^2-2*l1*b(2,2)*cos(q2_r)); %-- Dimensão -----*
dz22_r = ( l1*b(2,2)*sin(q2_r) )*dq2_r/z22_r; %-- Velocidade -----*

z_r=[z11_r;z12_r;z21_r;z22_r];
dz_r=[dz11_r;dz12_r;dz21_r;dz22_r];

```

```

function PlotBinariosR(t,T,T_r)

```

```

figure(9)
subplot(2,1,1), plot(t,T_r(1,:), 'b-',t,T(1,:), 'r')
xlabel(' t (s)'), ylabel(' T1,T1_c (Nm) '), grid on
title(' Binários nas Juntas: Teóricos ("V") e Corrigidos ("A-") '), grid on
subplot(2,1,2), plot(t,T_r(2,:), 'b-',t,T(2,:), 'r')
xlabel(' t (s)'), ylabel(' T2,T2_c (Nm) '), grid on
pause%, close(2)

```

```

%-- SCRIPT: PlotBinD -----
figure(3)
plot(t,T(1,:),'r', t,T(2,:),'b')
xlabel(' t (s)'), ylabel(' T1, T2 (Nm) ')
title(' Binários nas Juntas: Junta 1,T1 ("V")....Junta 2,T2 ("A") ')
grid on, pause%, close(2)
figure(4)
subplot(3,1,1), plot(t,J(1,:),'r', t,J(2,:),'b')
ylabel(' T1,T2 (Nm) '), grid on
title(' Termos Inerciais, Coriolis/centrífugos e Gravitacionais: T1 ("red") e T2 ("blue") ')
subplot(3,1,2), plot(t,C(1,:),'r', t,C(2,:),'b')
ylabel(' T1,T2 (Nm) '), grid on
subplot(3,1,3), plot(t,G(1,:),'r', t,G(2,:),'b')
xlabel(' t (s)'), ylabel(' T1,T2 (Nm) '), grid on
pause%, close(2)

```

```

%-- SCRIPT: PlotGraf -----
figure(4)
plot(t,T_r(1,:),'r', t,T_r(2,:),'b', t,T(1,:),'k-', t,T(2,:),'k-')
xlabel(' t (s)'), ylabel(' T1, T2 (Nm) ')
title(' Binários nas Juntas: T1 ("red") e T2 ("blue") '), grid on
pause%, close(2)

```

```

function plotF_Fr(F11,F11s,F12,F12s,F21,F21s,F22,F22s,t)
figure(12)
subplot(4,1,1), plot(t,F11,'r',t,F11s,'b-')
ylabel(' F11,F11_c(m) '), grid on
title('Valor das Forças a aplicar: Teóricas "V" e Corrigidas "A-")',grid on
subplot(4,1,2), plot(t,F12,'r',t,F12s,'b-')
ylabel(' F12,F12_c(m) '), grid on
subplot(4,1,3), plot(t,F21,'r',t,F21s,'b-')
ylabel(' F21,F21_c(m) '), grid on
subplot(4,1,4), plot(t,F22,'r',t,F22s,'b-')
ylabel(' F22,F22_c(m) '), grid on
pause

```

```

%-- SCRIPT: PlotGraf -----
figure(7)
subplot(2,1,1), plot(t,F11,'r', t,F12,'b')
ylabel(' F11, F12 (N) '), grid on
title(' Forças aplicadas: Músculo Flexor(F11) "V" e Extensor(F12) "A" do Ombro')
subplot(2,1,2), plot(t,F21,'r', t,F22,'b')
ylabel(' F21, F22 (N) '), grid on
title(' Forças aplicadas: Músculo Flexor(F21) "V" e Extensor(F22) "A" do Cotovelo')
xlabel(' t (s) '), grid on
pause%, close(2)

```

```

%-- SCRIPT: PlotGraf -----
figure(8)
subplot(2,1,1), plot(t,q(1,:)*180/pi,'r', t,q_r(1,:)*180/pi,'b-')
ylabel(' q1, junta1 (rad) '), grid on
title(' Deslocamentos angulares: Teórico ("V") e Corrigido ("A-") ')
subplot(2,1,2), plot(t,q(2,:)*180/pi,'r', t,q_r(2,:)*180/pi,'b-')
ylabel(' q2, junta2 (rad) '), grid on
pause%, close(2)

```

```

%-- SCRIPT: PlotJuntasD -----
figure(2)
subplot(3,1,1), plot(t,q(1,:),'r', t,q(2,:),'b')
ylabel(' qi (rad) '), grid on

```

```

        title(' Deslocamentos, Velocidade e Acelerações Angulares: q1 ("V") ,q2 ("A") ')
subplot(3,1,2), plot(t,dq(1,:),'r', t,dq(2,:),'b')
        ylabel(' dq1 (rad/s) '), grid on
        title(' Velocidades Angulares: w1 ("V") e w2 ("A") ')
subplot(3,1,3), plot(t,ddq(1,:),'r', t,ddq(2,:),'b')
        xlabel(' t (s) '), ylabel(' ddqi (rad/s) '), grid on
        title(' Acelerações Angulares: dw1 ("V") e dw2 ("A") ')
pause%, close(2)

```

```

%-- SCRIPT: PlotGraf -----
figure(2)
subplot(2,1,1), plot(t,q(1,:)*180/pi,'r', t,q(2,:)*180/pi,'b',...
        t,q_r(1,:)*180/pi,'k-', t,q_r(2,:)*180/pi,'k-' )
        ylabel(' qi (rad) '), grid on
        title(' Deslocamentos e Velocidades: q1 ("red") e q2 ("blue") ')
subplot(2,1,2), plot(t,dq(1,:),'r', t,dq(2,:),'b',...
        t,dq_r(1,:),'k-', t,dq_r(2,:),'k-' )
        xlabel(' t (s) '), ylabel(' dq1 (rad/s) '), grid on
pause, close(2)

```

```

%-- SCRIPT: PlotMusD -----
figure(5)
subplot(3,1,1), plot(t,z11,'r', t,z12,'b')
        ylabel(' Dimensão (m) '), grid on
        title(' Músculo Flexor ("V"), Músculo Extensor ("A") Ombro')
subplot(3,1,2), plot(t,dz11,'r', t,dz12,'b')
        ylabel(' Velocidade (m/s) '), grid on
subplot(3,1,3), plot(t,ddz11,'r', t,ddz12,'b')
        xlabel(' t (s)'), ylabel(' Aceleração (m/s^2) '), grid on
        pause%, close(2)
figure(6)
subplot(3,1,1), plot(t,z21,'r', t,z22,'b')
        ylabel(' Dimensão (m) '), grid on
        title(' Músculo Flexor ("V"), Músculo Extensor ("A") Cotovelo')
subplot(3,1,2), plot(t,dz21,'r', t,dz22,'b')
        ylabel(' Velocidade (m/s) '), grid on
subplot(3,1,3), plot(t,ddz21,'r', t,ddz22,'b')
        xlabel(' t (s)'), ylabel(' Aceleração (m/s^2) '), grid on
pause%, close(2)

```

```

function plotx_xr(P,P_r,t)
figure(10)
subplot(2,1,1), plot(t,P(3,:),'r', t,P_r(3,:),'b-')
        ylabel(' X (m) '), grid on
        title('Evolução de X "V"..... X corrigido "A-"' )
subplot(2,1,2), plot(t,P(4,:),'r', t,P_r(4,:),'b-')
        xlabel(' t (s) '), ylabel(' Y (m) '), grid on
        title('Evolução de Y "V"..... Y corrigido "A-"' )
        pause

```

```

function plotz_zr(z11,z11_r,z12,z12_r,z21,z21_r,z22,z22_r,t)
figure(11)
subplot(4,1,1), plot(t,z11,'r',t,z11_r,'b-' )
        ylabel(' Z11,Z11_c(m) '), grid on
        title('Valor do comprimento do músculo: Teórico "V" e Corrigido "A-"' ),grid on
subplot(4,1,2), plot(t,z12,'r',t,z12_r,'b-' )
        ylabel(' Z12,Z12_c(m) '), grid on
subplot(4,1,3), plot(t,z21,'r',t,z21_r,'b-' )
        ylabel(' Z21,Z21_c m) '), grid on
subplot(4,1,4), plot(t,z22,'r',t,z22_r,'b-' )
        ylabel(' Z22,Z22_c(m) '), grid on
        pause

```

