



*Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade de Aveiro*

Estudos funcionais de uma plataforma para um sistema robótico humanóide

Relatório de Progresso

Autores:

Luís Rêgo-----nº mec: 20008
Renato Barbosa -----nº mec: 18382

Orientadores:

Professor Vítor Santos.
Professor Filipe Teixeira Dias.

Aveiro, 12 de Dezembro de 2003

Índice:

1. TAREFAS REALIZADAS	2
2. ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA	2
2.1. Nomenclatura	2
2.2. Parâmetros Arbitrados	4
2.3. Cinemática Directa da perna no plano ZX	6
2.4. Análise dos momentos das juntas da perna no plano ZX	7
2.4.1. Ângulos de rotação das juntas	8
2.5. Análise no MatLab	10
2.5.1. Estudo do centro de massa	15
2.5.1.1. Caso 1: perna apoiada	16
2.5.1.1.1. Cálculo do momento $t2L$	21
2.5.1.1.2. Cálculo do momento $t3L$	24
2.5.1.1.3. Cálculo do momento $t4L$	28
2.5.1.1.4. Conclusão	31
2.5.1.2. Caso 2: perna no ar	31
3. ANÁLISE ESTRUTURAL DAS JUNTAS 4 E 5	32
3.1. Parâmetros	33
3.2. Estudo do centro de massa	35
4. ANÁLISE ESTRUTURAL DO ROBOT	36
4.1. Hipóteses de Elos	37
4.2. Análise estrutural	39
5. JUNTA UNIVERSAL	40
6. BIBLIOGRAFIA	44

1. TAREFAS REALIZADAS

Numa primeira fase do nosso trabalho fizemos uma pesquisa na Internet a fim de reunir toda a informação existente sobre robots humanóides. Esta compilação de informação de projectos semelhantes ao nosso, desenvolvidos por outras universidades ou entidades privadas, foi usada para conhecermos os desenvolvimentos existentes nesta área, e é constantemente usada para retirarmos ideias que podemos utilizar no âmbito do nosso projecto.

A decisão de parâmetros iniciais, tais como o tamanho do robot, o seu peso, a sua estrutura e o n.º de graus de liberdade em cada junta e a localização destas foi o segundo passo.

De seguida passamos a análise estrutural estática do robot utilizando como ferramenta de trabalho o MatLab, e tendo em conta os parâmetros iniciais estabelecidos. Esta análise vai permitir conhecer os momentos desenvolvidos em cada junta, para podermos proceder a escolha dos motores necessários.

A tarefa seguinte foi desenhar a estrutura do robot e das juntas universais.

Após a modelação dos elos em Catia, fizemos uma análise estrutural para estudar os esforços causados pelas forças e momentos que neles actuam.

Estamos nesta altura ainda a pesquisar os materiais mais indicados para usar no corpo, tendo como factores a ter em conta as características mecânicas, peso, preço, entre outros.

2. ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA

2.1. Nomenclatura:

A nomenclatura usada para os ângulos das juntas e para os momentos existentes foi escolhida de modo a simplificar a sua identificação.

Para os momentos é usada a letra t , do inglês *torque*, e para os ângulos de rotação das juntas é usada a letra q . A perna esquerda ou direita é identificada pelo uso das letras L e R, do inglês, *left* e *right*.

- **Ângulos de junta:**

q_{1L} } Junta 1 Tornozelo
 q_{2L} }

q_{3L} } Junta 2 Joelho

q_{4L} } Junta 3 Anca
 q_{5L} }
 q_{6L} }

- **Momentos:**

t_{1L}

t_{2L}

t_{3L}

t_{4L}

t_{5L}

Para a realização do estudo estrutural para a perna do robot, realizamos um desenho esquemático e definimos alguns parâmetros iniciais.

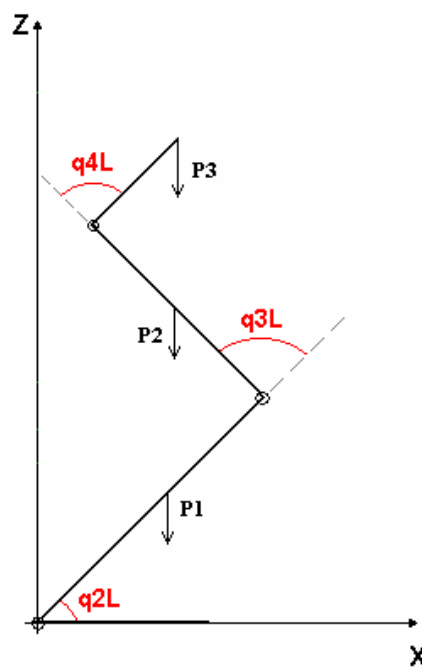


Fig. 1: Esquema de uma perna.

2.2. Parâmetros Arbitrados

Para podermos desenvolver os vários estudos foi necessário arbitrar valores para o peso e dimensões do robot. Tivemos em linha de conta as informações que recolhemos acerca dos robots humanóides existentes (que serviram de exemplo e objecto de estudo), as regras de participação no concurso de robótica Robocup e algum bom senso. Após a discussão deste assunto nas reuniões chegamos aos valores abaixo indicados e que foram utilizados numa primeira análise. Como concluímos que estes valores eram demasiado elevados, estabelecemos um segundo conjunto de valores que foram utilizados numa segunda análise.

- **Peso:**

1ª Análise:

Peso total do robot = 14Kg

Elo 1: do tornozelo ao joelho

$$m1 = 1,5\text{Kg} \longrightarrow P1=14,715\text{N} \quad \text{com } g = 9.81\text{m/s}^2$$

Elo2: do joelho à anca

$$m2 = 1,5\text{Kg} \longrightarrow P2=14,715\text{N}$$

Elo 3: da anca ao centro do corpo

$$m3 = 8,0\text{Kg} \longrightarrow P3=78,48\text{N}$$

2ª Análise:

Peso total do robot = 7Kg

Elo 1: do tornozelo ao joelho

$$m1 = 0,75\text{Kg} \longrightarrow P1 = 7,3575\text{N} \quad \text{com } g = 9.81\text{m/s}^2$$

Elo2: do joelho a anca

$$m_2 = 0,75\text{Kg} \longrightarrow P_2 = 7,3575\text{N}$$

Elo 3: da anca ao centro do corpo

$$m_3 = 5,5\text{Kg} \longrightarrow P_3 = 53,955\text{N}$$

- **Comprimento do entre eixo dos elos:**

Altura total do robot = 0,8m

1ª Análise:

Elo 1: $L_{12} = 0,175\text{m}$

Elo 2: $L_{23} = 0,175\text{m}$

Tronco: $L_{34} = 0,4\text{m}$

2ª Análise:

Elo 1: $L_{12} = 0,16\text{m}$

Elo 2: $L_{23} = 0,16\text{m}$

Tronco: $L_{34} = 0,4\text{m}$

Distâncias da junta ao centro de massa:

$$\text{Elo 1: } r_1 = \frac{L_{12}}{2}$$

$$\text{Elo 2: } r_2 = \frac{L_{23}}{2}$$

$$\text{Tronco: } r_3 = \frac{L_{34}}{2}$$

Consideramos numa primeira análise que o centro de massa de cada elo se encontra no centro geométrico, embora isto possa não acontecer na realidade.

2.3. Cinemática Directa da perna no plano ZX

Para a realização desta tarefa utilizamos conhecimentos recém adquiridos de Robótica Industrial e também de Mecânica das Estruturas.

- **Junta 1:**

Elo 1: centro de massa, P1 em relação à junta 1:

$$b_{11} = r_1 * \cos(q_2L)$$

Elo 2: centro de massa, P2 em relação à junta 1:

$$b_{12} = L_{12} * \cos(q_2L) + r_2 * \cos(q_3L + q_2L)$$

Tronco: centro de massa, P3 em relação à junta 1:

$$b_{13} = L_{12} * \cos(q_2L) + L_{23} * \cos(q_3L + q_2L) + r_3 * \cos(q_2L + q_3L + q_4L)$$

- **Junta 2:**

Elo 2: centro de massa, P2 em relação à junta 2:

$$b_{22} = r_2 * \cos(q_2L + q_3L)$$

Tronco: centro de massa, P3 em relação à junta 2:

$$b_{23} = L_{23} * \cos(q_2L + q_3L) + r_3 * \cos(q_2L + q_3L + q_4L)$$

- **Junta 3:**

Tronco: centro de massa, P3 em relação à junta 3:

$$b_{33} = r_3 * \cos(q_2L + q_3L + q_4L)$$

2.4. Análise dos momentos das juntas da perna no plano ZX

Após definição das forças e dos braços estamos em condições de definir as equações para o cálculo dos momentos nas três juntas:

- **Momento na junta do tornozelo, t_{2L} :**

$$t_{2L} = P_1 * b_{11} + P_2 * b_{12} + P_3 * b_{13}$$

Substituindo:

$$t_{2L} = P_1 * r_1 * \cos(q_{2L}) + P_2 * (L_{12} * \cos(q_{2L}) + r_2 * \cos(q_{3L} + q_{2L})) + \\ + P_3 * (L_{12} * \cos(q_{2L}) + L_{23} * \cos(q_{3L} + q_{2L}) + r_3 * \cos(q_{2L} + q_{3L} + q_{4L}))$$

- **Momento na junta do joelho, t_{3L} :**

$$t_{3L} = P_2 * b_{22} + P_3 * b_{23}$$

Substituindo:

$$t_{3L} = P_2 * r_2 * \cos(q_{2L} + q_{3L}) + P_3 * (L_{23} * \cos(q_{2L} + q_{3L}) + \\ + r_3 * \cos(q_{2L} + q_{3L} + q_{4L}))$$

- **Momento na junta da anca, t_{4L} :**

$$t_{4L} = P_3 * b_{33}$$

Substituindo:

$$t_{4L} = P_3 * r_3 * \cos(q_{2L} + q_{3L} + q_{4L})$$

2.4.1. Ângulos de rotação das juntas:

Para melhor definirmos os ângulos de rotação das juntas, decidimos realizar dois objectos de estudo para as pernas do robot. Um em 2D em cartolina e outro em 3D em cartão.

O 2D tem como propósito facilitar a medição dos ângulos de acordo com a posição em que se encontra.

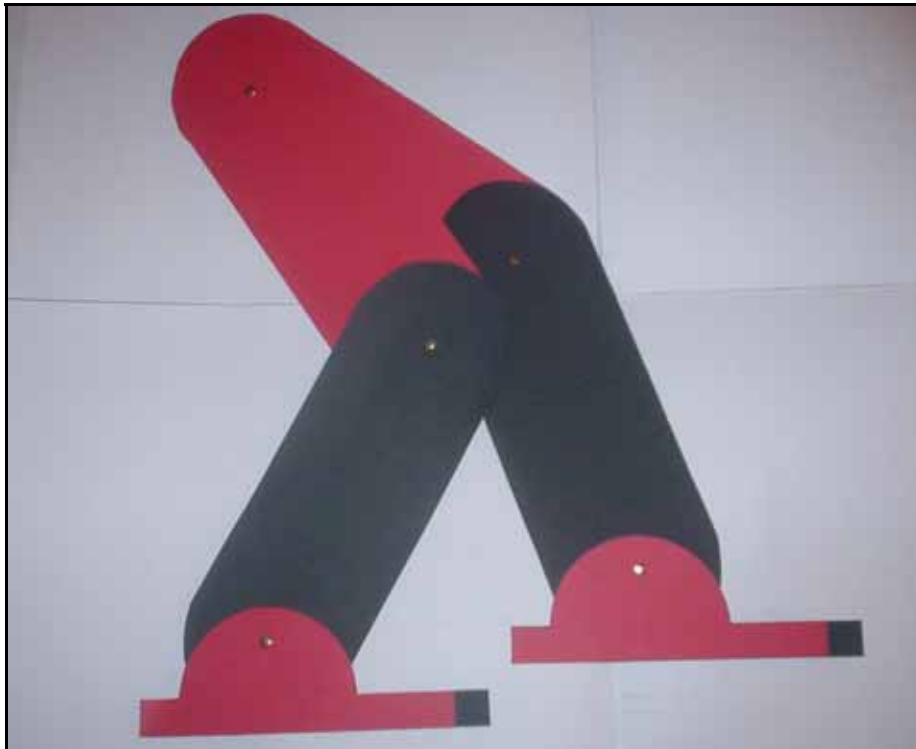


Fig. 2: Modelo 2D das pernas em cartolina.

O modelo 3D permite simular e observar os movimentos das juntas que são necessários para dar um passo, usando as três juntas rotacionais definidas.



Fig. 3: Modelo 3D das pernas em cartão.

A observação de outros robots humanóides e análise dos movimentos das juntas levou-nos a usar para esta primeira análise, os seguintes ângulos de junta:

- Junta 1: q_{2L} [45° ; 110°]
- Junta 2: q_{3L} [0° ; 90°]
- Junta 3: q_{4L} Uma restrição cinemática dependente dos ângulos de junta q_{2L} e q_{3L} , necessária para manter o corpo numa posição vertical.

$$q_{4L} = 90^\circ - (q_{2L} + q_{3L})$$

2.5. Análise no MatLab

Para proceder à análise matemática efectuamos um programa em MatLab em que foi introduzido:

- comprimentos dos elos;
- peso dos elos;
- distâncias dos centros de massa;
- equações dos momentos;
- relação entre $q4L$ e $q3L$, $q2L$.

Os três gráficos 3D obtidos são os momentos em cada junta em função da variação de $q3L$ e $q2L$. Através deles podemos observar qual vai ser o momento gerado na junta de acordo com a variação dos ângulos.

1º análise:

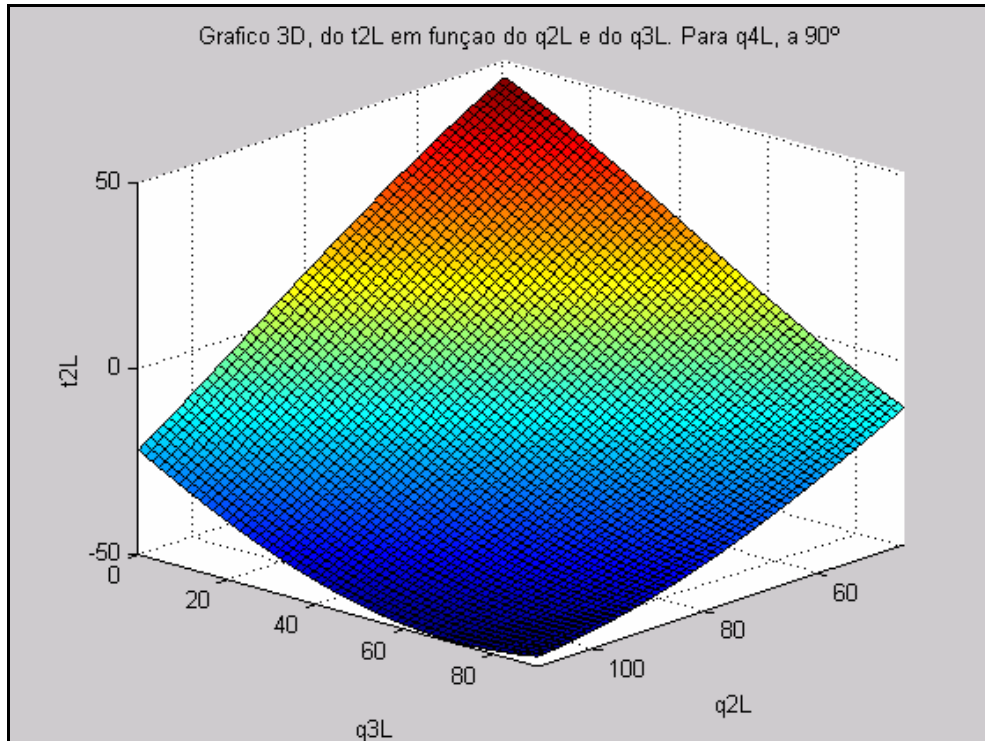


Fig. 4: Variação do momento $t2L$.

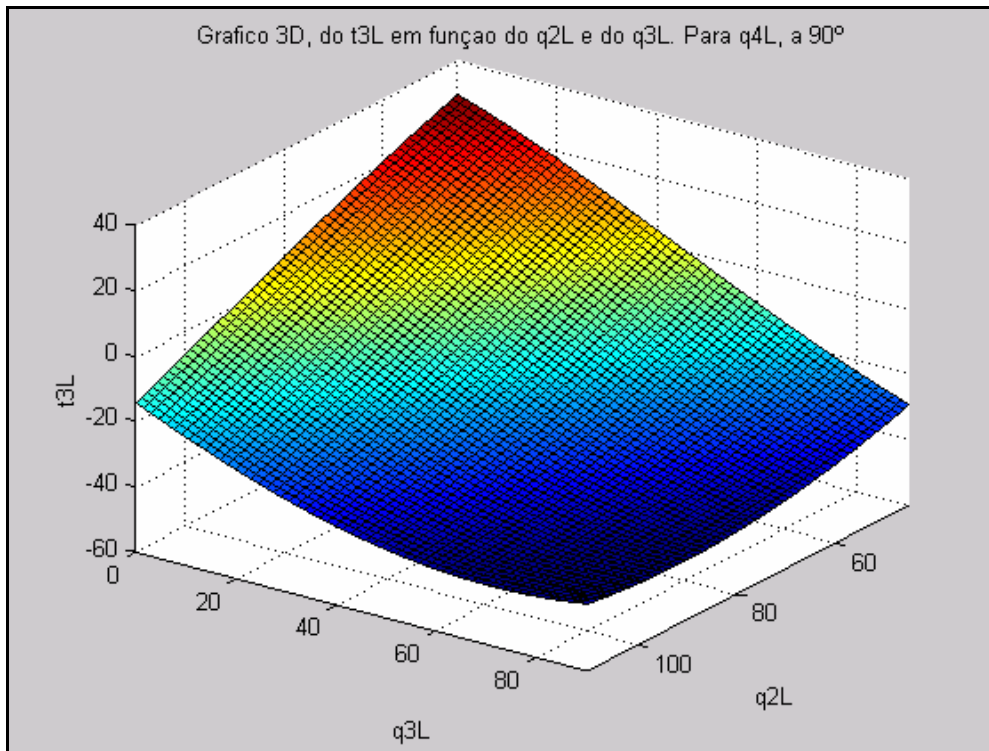


Fig. 5: Variação do momento t_{3L} .

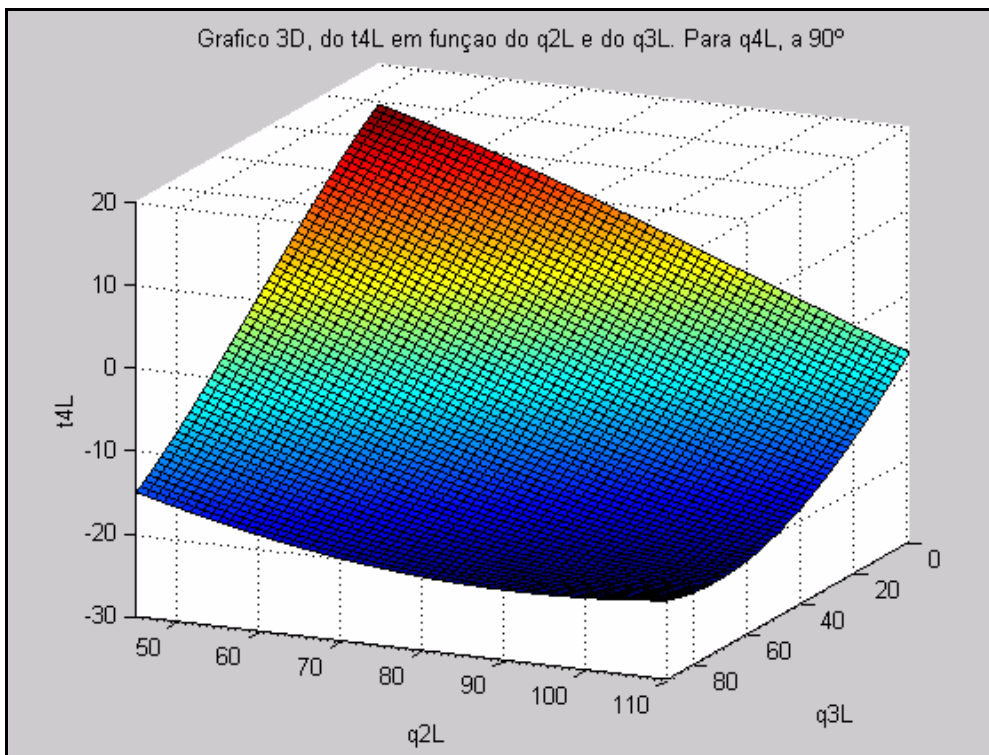


Fig. 6: Variação do momento t_{4L} .

Os resultados obtidos para a variação dos momentos, tendo em conta todas as configurações de ângulos são:

$$t2L = [-50 ; 50] \text{ N.m}$$

$$t3L = [-45 ; 30] \text{ N.m}$$

$$t4L = [-22 ; 15] \text{ N.m}$$

2ª análise:

Como estes momentos são obviamente muito grandes tentamos fazer uma restrição, através do centro de massa da perna e da variação dos ângulos de junta, mas os momentos continuavam mesmo assim demasiado elevados, por isso decidimos baixar o peso total do robot. Tendo como base os robots que encontramos na pesquisa, de entre os quais o PINO, que possui um peso total de 4,5Kg, mudamos os pesos para um total de 7Kg.

Os novos gráficos para os momentos são:

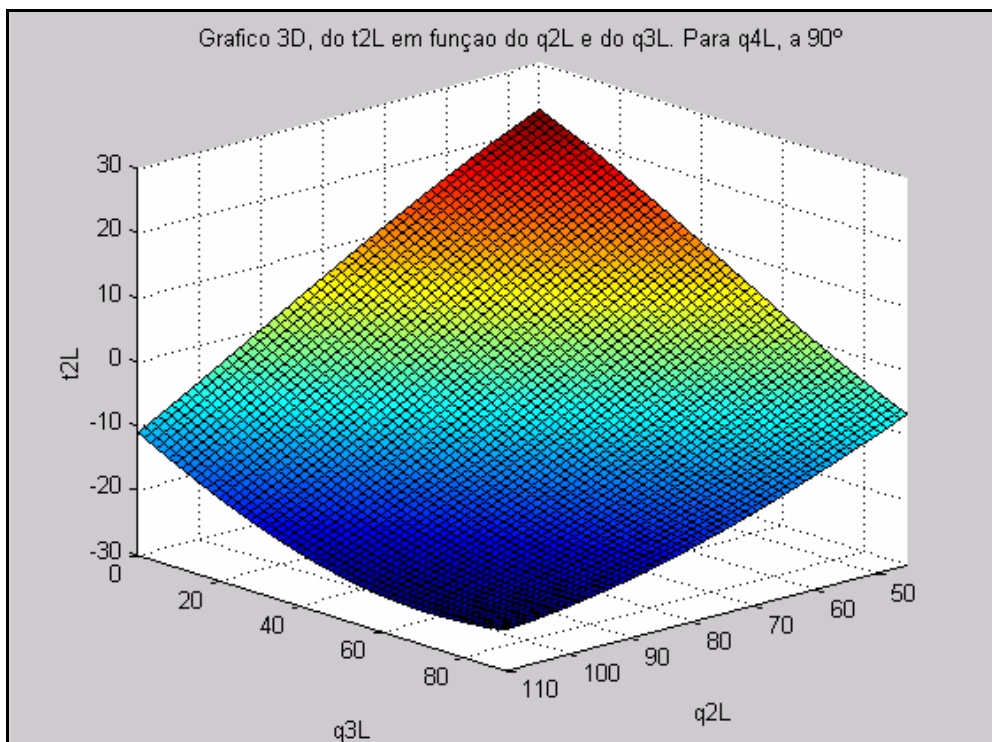


Fig. 7: Variação do momento $t2L$.

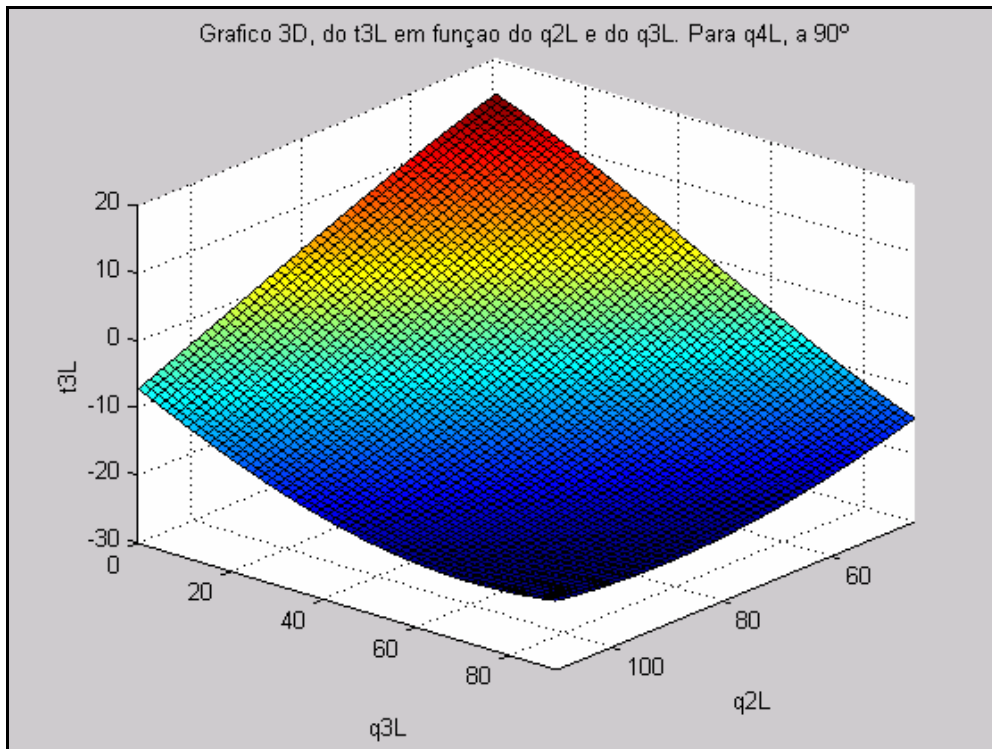


Fig.8: Variação do momento t_{3L} .

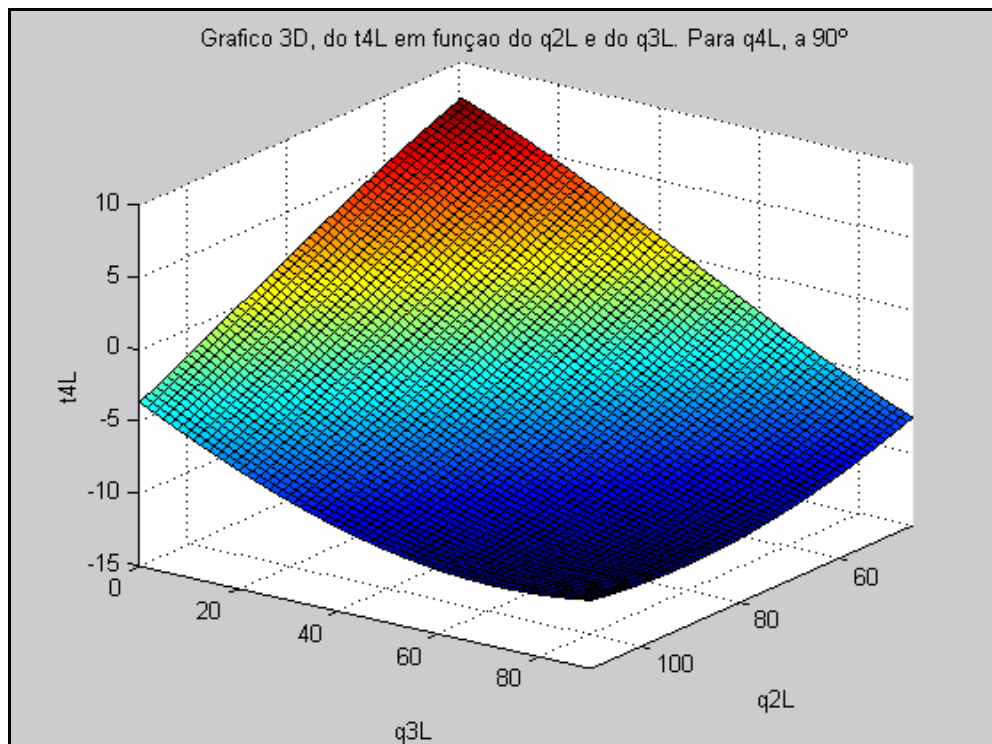


Fig. 9: Variação do momento t_{4L} .

Os resultados obtidos para a variação dos momentos, tendo em conta todas as configurações de ângulos são:

$$t2L = [-25 ; 25] \text{ N.m}$$

$$t3L = [-20 ; 15] \text{ N.m}$$

$$t4L = [-12 ; 7,5] \text{ N.m}$$

Nem todas as configurações de ângulos são lógicas, de acordo com o fim a que se destina, ou seja posições da perna, que não são de todo utilizadas e que por isso não interessam ao nosso estudo.

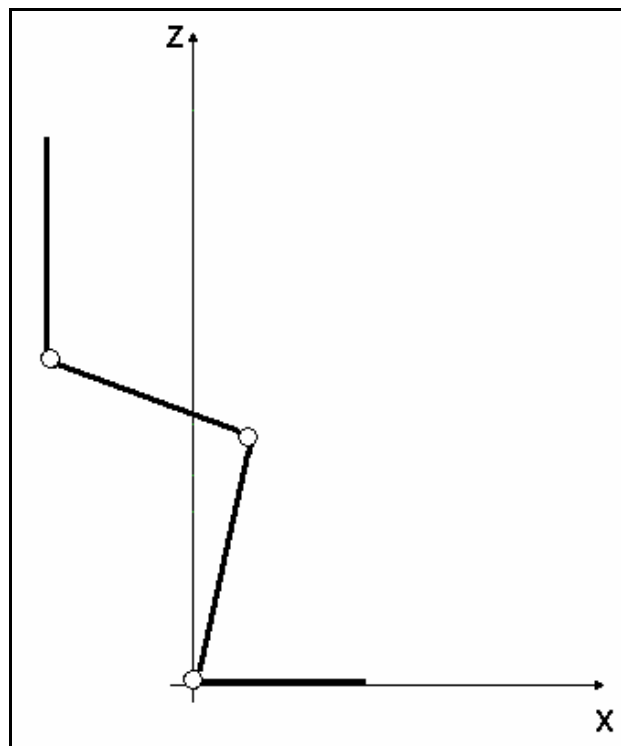


Fig. 10: Exemplo de configuração desinteressante.

Para eliminar configurações de ângulos impossíveis, realizamos um estudo do centro de massa que nos permite visualizar onde “cai” o centro de massa total da perna.

A partir deste ponto todos os resultados apresentados são relativos à segunda análise, já que concluímos que a primeira era impraticável, por isso não vamos mostrar os estudos que fizemos relativos à mesma, de qualquer forma estão em anexo os ficheiros de MatLab que foram realizados para o estudo.

2.5.1. Estudo do Centro de Massa

Para podermos interpretar melhor os resultados obtidos para o estudo dos momentos, efectuamos um programa em MatLab que nos indica se para uma dada configuração de ângulos de junta o centro de massa do robot está dentro da área do pé. Ou seja, se o robot “se aguenta em pé” para uma dada configuração de ângulos de junta. Projectando o centro de massa sobre o eixo dos xx, deverá “cair” dentro do pé.

Considerando que, no máximo, as dimensões do pé são:

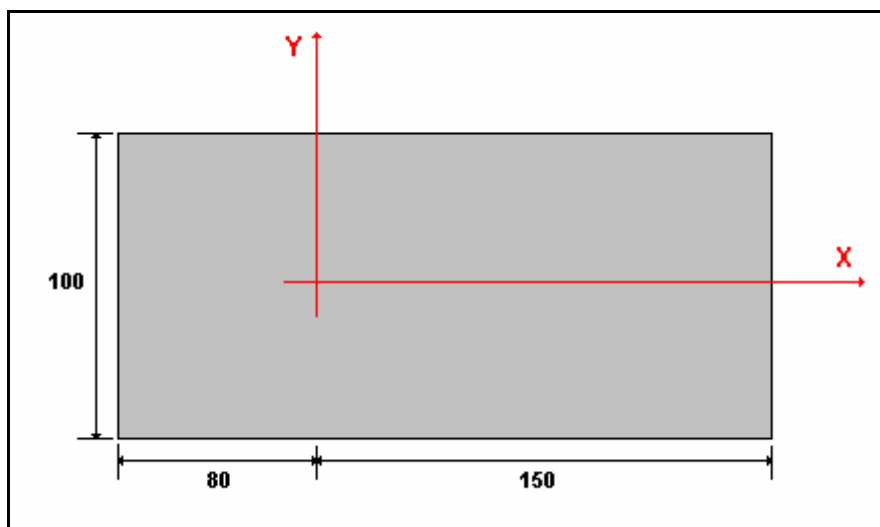


Fig. 11: Área do pé.

Usando a expressão:

$$X_{cm} = \frac{m_1 \cdot b_{11} + m_2 \cdot b_{12} + m_3 \cdot b_{13}}{m_1 + m_2 + m_3}$$

E, fazendo variar q_{2L} entre $[45^\circ \text{ e } 110^\circ]$ e o q_{3L} entre $[0^\circ \text{ e } 90^\circ]$. Restringindo o q_{4L} em função de q_{2L} e q_{3L} . Obtêm-se, o seguinte gráfico:

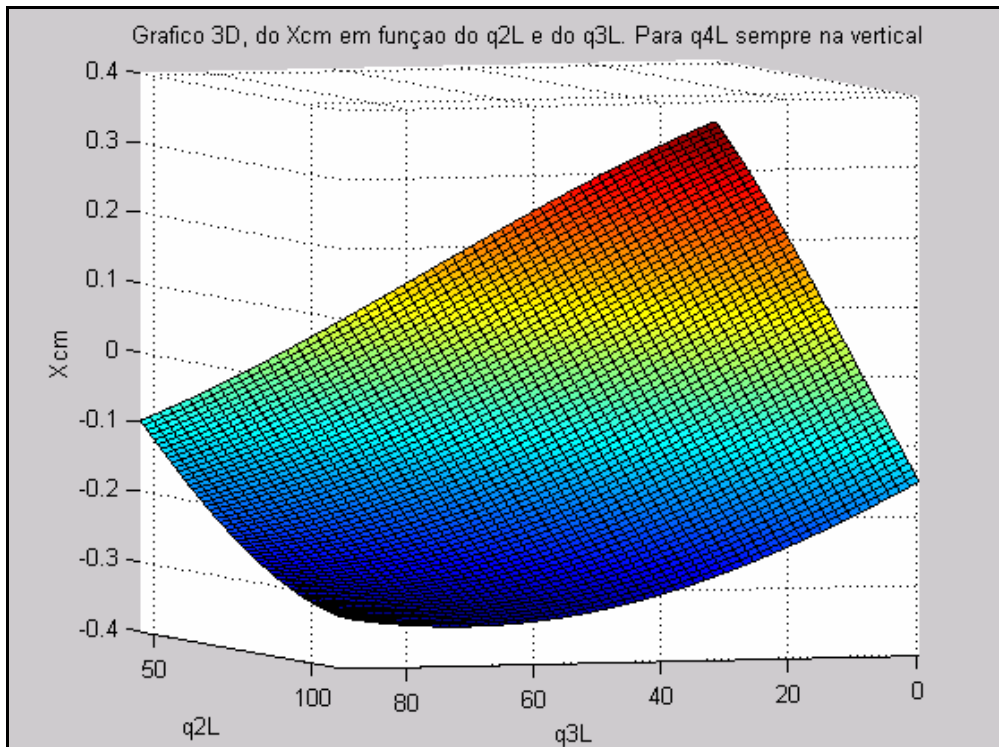


Fig. 12: Gráfico 3D do centro de massa.

Do gráfico concluímos que o centro de massa, para esta variação máxima dos ângulos, está entre:

$$X_{cm} = [-0,4 ; 0,4] \text{ m}$$

Concluímos que a variação do centro de massa é muito elevada para as dimensões definidas para o pé.

Logo, restringimos a duas posições da perna. Uma em que a perna se encontra apoiada no chão (suportando todo o peso do robot) e outra em que a perna se encontra no ar, ou seja, o peso do tronco esta localizado sobre a perna que está apoiada.

2.5.1.1. Caso 1: Perna apoiada no chão

Para definirmos, finalmente quais os momentos sofridos nas juntas do tornozelo (junta 1), do joelho (junta 2) e na anca (junta 3), decidimos verificar qual a variação possível dos ângulos de rotação das juntas do tornozelo e do joelho, mantendo a restrição cinemática anteriormente referida à junta 3. Para isto, optamos por fazer variar uma das juntas e fixar a outra num máximo, médio e num mínimo.

Realizamos, um gráfico 3D com a nova variação de ângulos para esta posição, e gráficos 2D que explicam como restringimos a variação dos ângulos.

Para o primeiro caso, quando a perna esta apoiada no chão, define-se a seguinte variação extrema dos ângulos de junta:

$$q2L = [60^\circ ; 90^\circ]$$

$$q3L = [0^\circ ; 40^\circ]$$

$$q4L = 90^\circ - (q2L + q3L)$$

O gráfico 3D obtido é o seguinte:

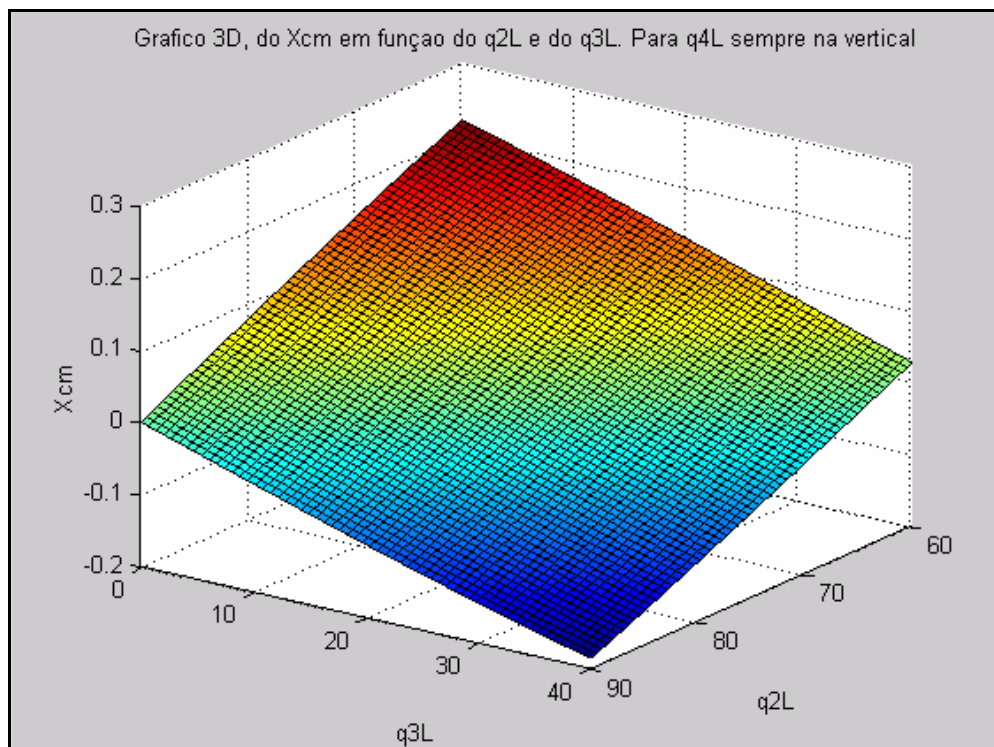


Fig. 13: Gráfico do XCM em função de q2L e q3L, para q4L = 90°

- **Variação possível de q_{2L} , com q_{3L} fixo no seu máximo, médio e mínimo:**

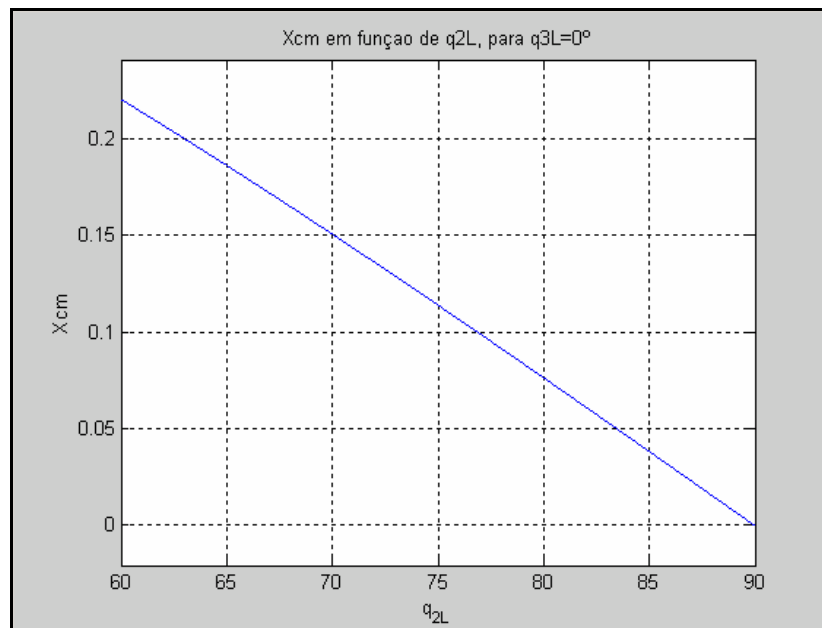


Fig. 14: Posição do centro de massa em função de q_{2L} , para $q_{3L} = 0^\circ$

Variação de ângulos de junta:

Para um máximo de $q_{2L} = [70^\circ ; 90^\circ]$ e $q_{3L} = 0^\circ$

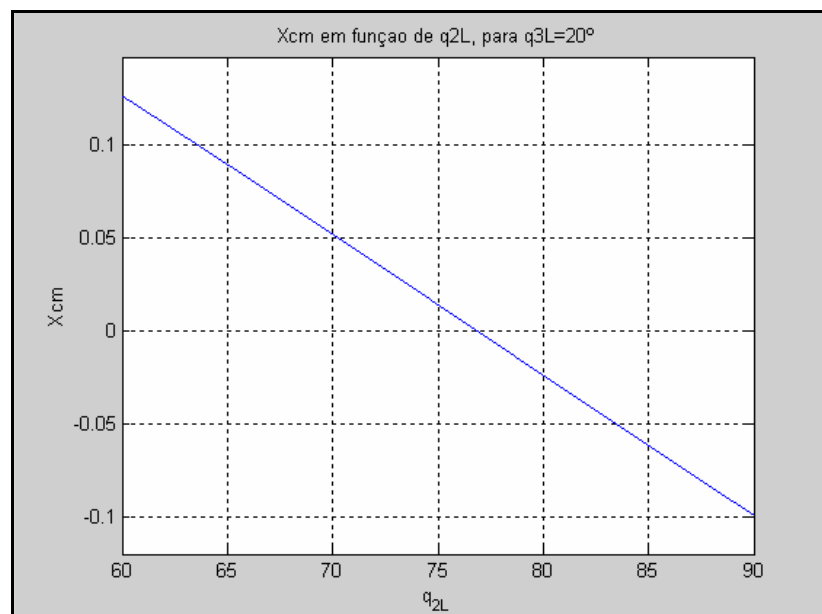


Fig. 15: Posição do centro de massa em função de q_{2L} , para $q_{3L} = 20^\circ$

Variação de ângulos de junta:

Para um máximo de $q_{2L} = [60^\circ ; 87,5^\circ]$ e $q_{3L} = 20^\circ$

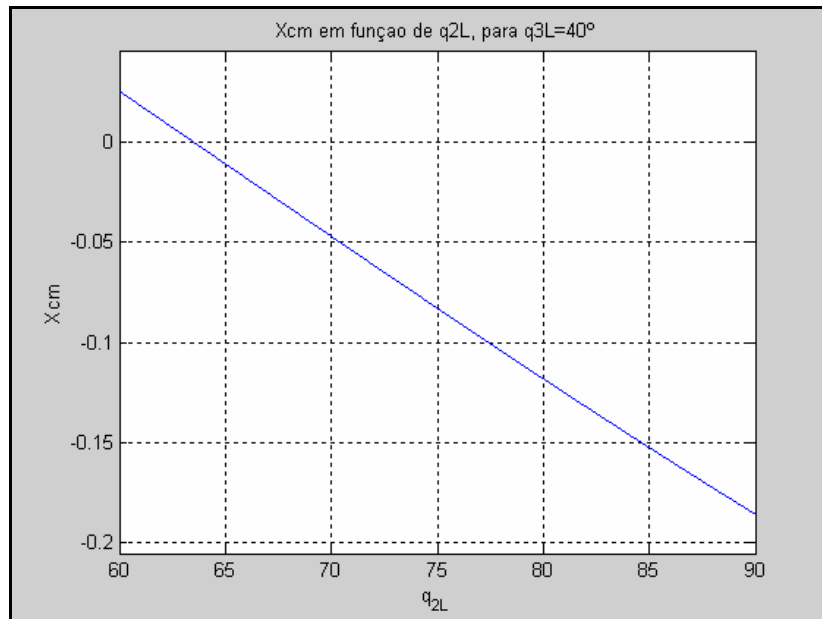


Fig. 16: Posição do centro de massa em função de q_{2L} , para $q_{3L} = 40^\circ$.

Variação de ângulos de junta:

Para um máximo de $q_{2L} = [60^\circ ; 74,5^\circ]$ e $q_{3L} = 40^\circ$

- **Variação possível de q_{3L} , com q_{2L} fixo no seu máximo, médio e mínimo:**

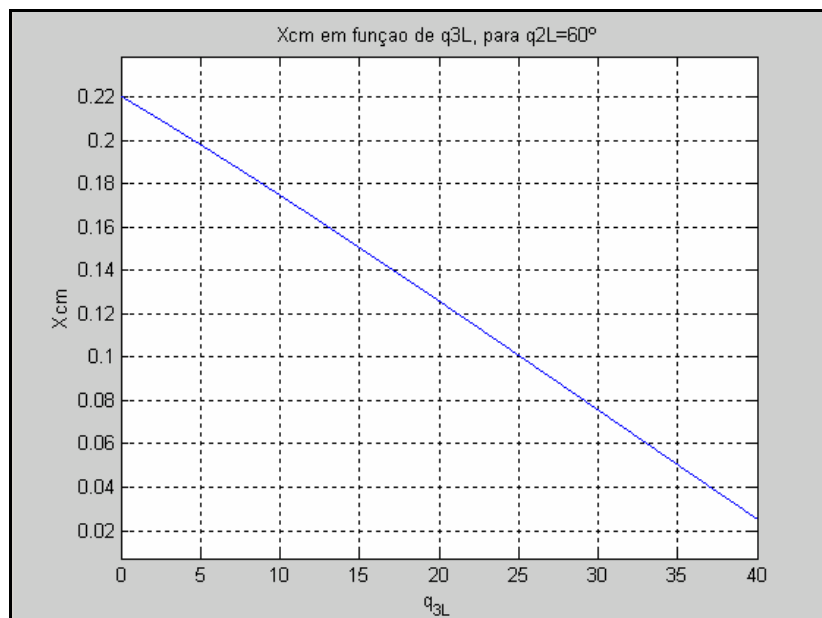


Fig. 17: Posição do centro de massa em função de q_{3L} , para $q_{2L} = 60^\circ$.

Variação de ângulos de junta:

Para um máximo de $q_{3L} = [15^\circ ; 40^\circ]$ e $q_{2L} = 60^\circ$

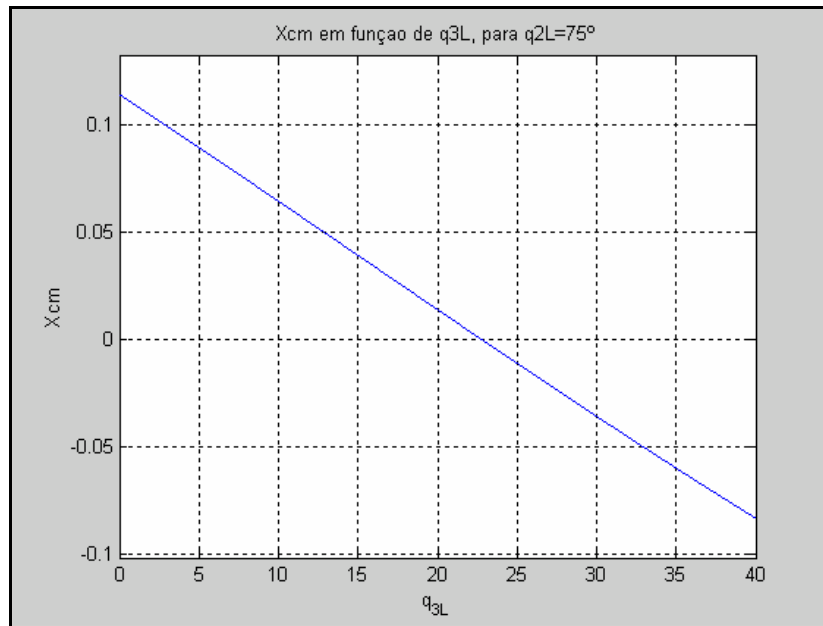


Fig. 18: Posição do centro de massa em função de q3L, para q2L = 75°.

Variação de ângulos de junta:

Para um máximo de q3L = [0° ; 39,5°] e q2L = 75°

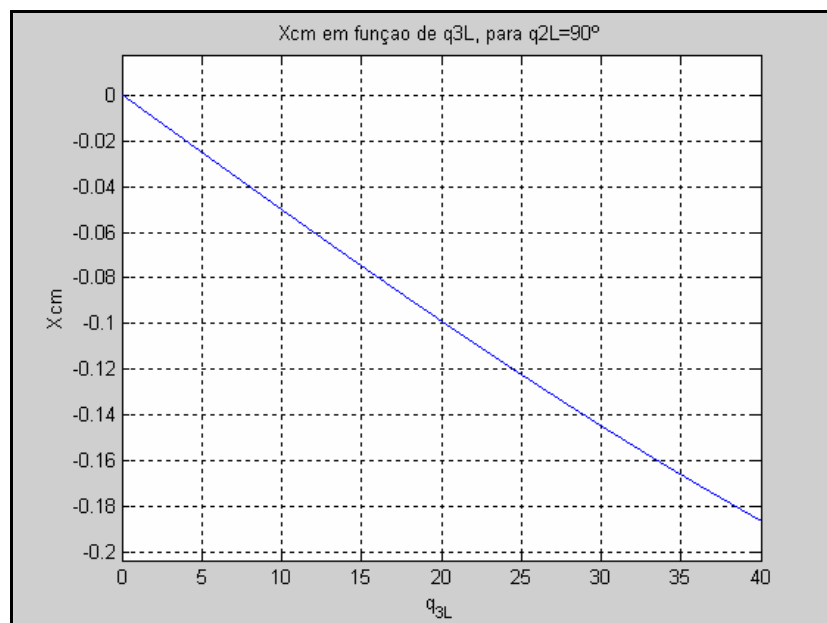


Fig. 19: Posição do centro de massa em função de q3L, para q2L = 90°.

Variação de ângulos de junta:

Para um máximo de q3L = [0° ; 16°] e q2L = 90°

Depois de se ter restringido as amplitudes das juntas 1 e 2, vamos aplicar este conjunto de restrições para o cálculo dos momentos $t2L$, $t3L$ e $t4L$:

Para isto recorreremos aos programas elaborados em MatLab.

2.5.1.1.1. Cálculo do momento $t2L$:

Tabela 1: Momento $t2L$ em função de $q2L$ e $q3L$.

Máximos	Mínimos	$q2L$	$q3L$	Momento máximo em módulo	Figura
10,3	0	$[70^\circ ; 90^\circ]$	0°	10,3	Fig. 20
8,3	-5,5	$[60^\circ ; 87,5^\circ]$	20°	8,3	Fig. 21
1,8	-5,5	$[60^\circ ; 74,5^\circ]$	40°	5,5	Fig. 22
10,5	1,8	60°	$[15^\circ ; 40^\circ]$	10,5	Fig. 23
7,85	-5,5	75°	$[0^\circ ; 39,5^\circ]$	7,85	Fig. 24
0	-5,5	90°	$[0^\circ ; 16,1^\circ]$	5,5	Fig. 25

Ficheiro MatLab: M12D_apoiaNP.m

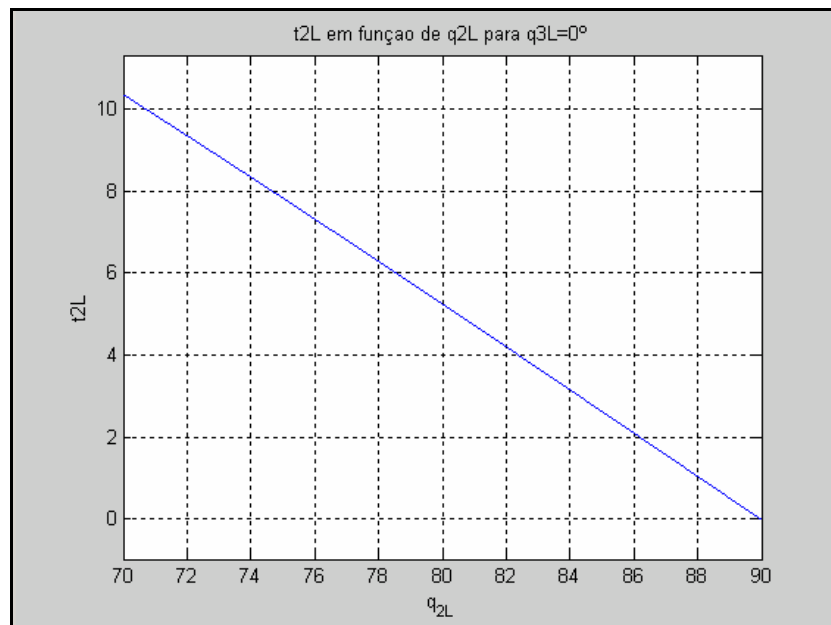


Fig. 20: Momento $t2L$ em função de $q2L$ para $q3L = 0^\circ$

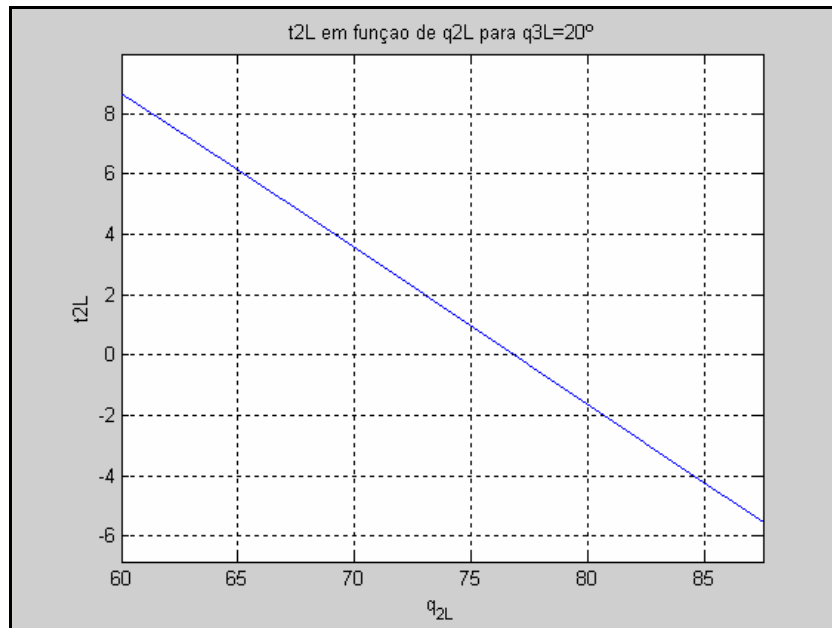


Fig. 21: Momento t_{2L} em função de q_{2L} para $q_{3L} = 20^\circ$

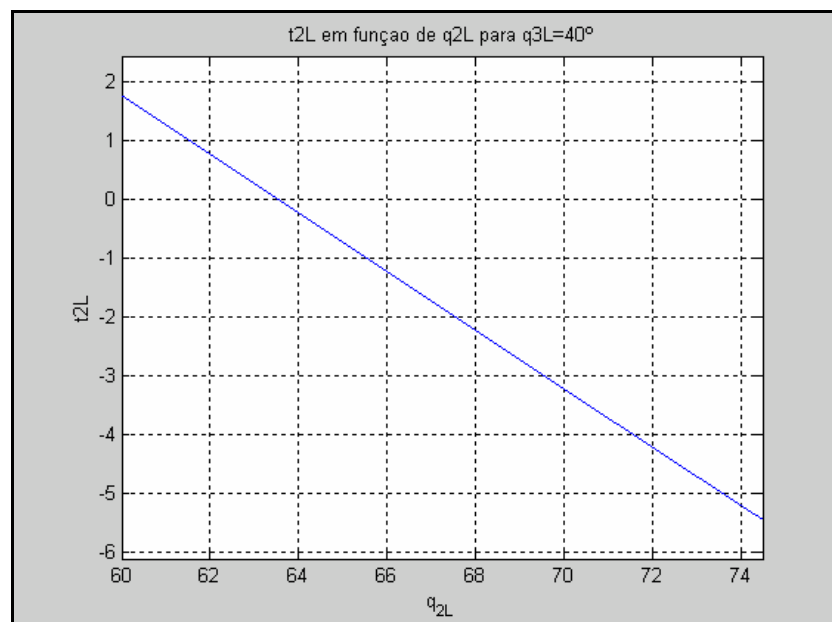


Fig. 22: Momento t_{2L} em função de q_{2L} para $q_{3L} = 40^\circ$

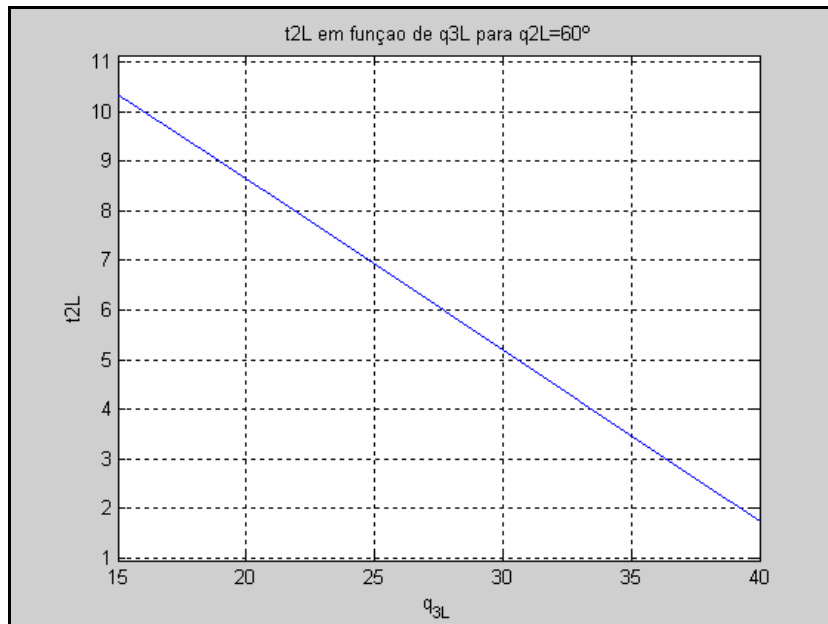


Fig. 23: Momento t_{2L} em função de q_{3L} para q_{2L} = 60°

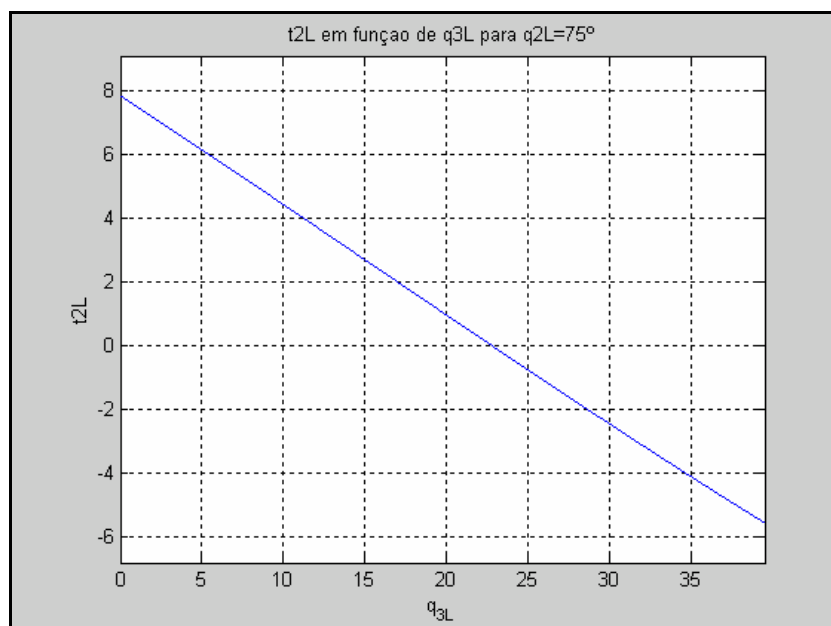


Fig. 24: Momento t_{2L} em função de q_{3L} para q_{2L} = 75°

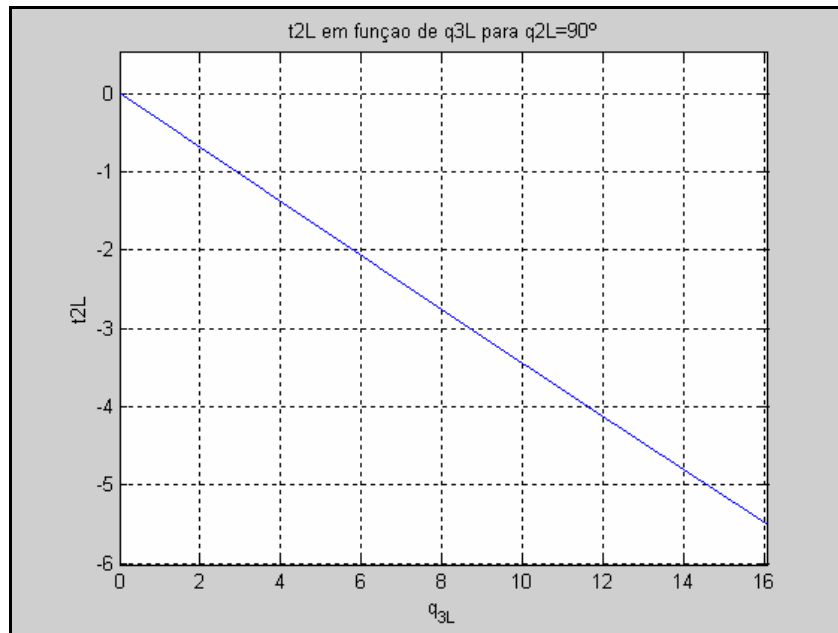


Fig. 25: Momento t_{2L} em função de q_{3L} para $q_{2L} = 90^\circ$

2.5.1.1.2. Cálculo do Momento t_{3L} :

Tabela: Momento t_{3L} em função de q_{2L} e q_{3L} .

Máximos	Mínimos	q_{2L}	q_{3L}	Momento máximo em módulo	Figura
6,3	0	[70° ; 90°]	0°	6,3	Fig. 26
3,5	-6,0	[60° ; 87,5°]	20°	6,0	Fig.27
-3,5	-8,3	[60° ; 74,5°]	40°	8,3	Fig. 28
5,1	-3,3	60°	[15° ; 40°]	5,1	Fig. 29
4,5	-8,2	75°	[0° ; 39,5°]	8,2	Fig. 30
0	-5,5	90°	[0° ; 16,1°]	5,5	Fig. 31

Ficheiro MatLab: M22D_apoiaNP.m

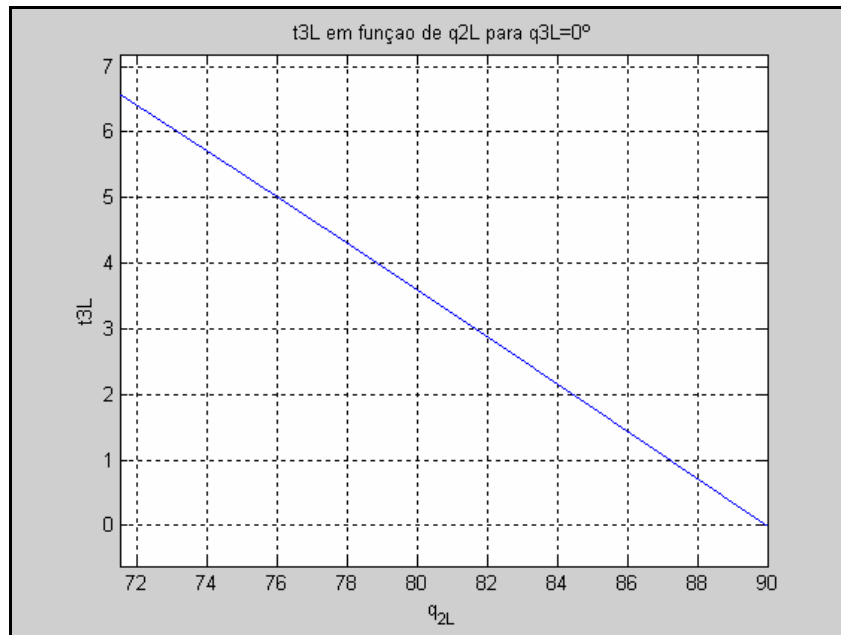


Fig. 26: Momento t3L em função de q2L para q3L = 0°

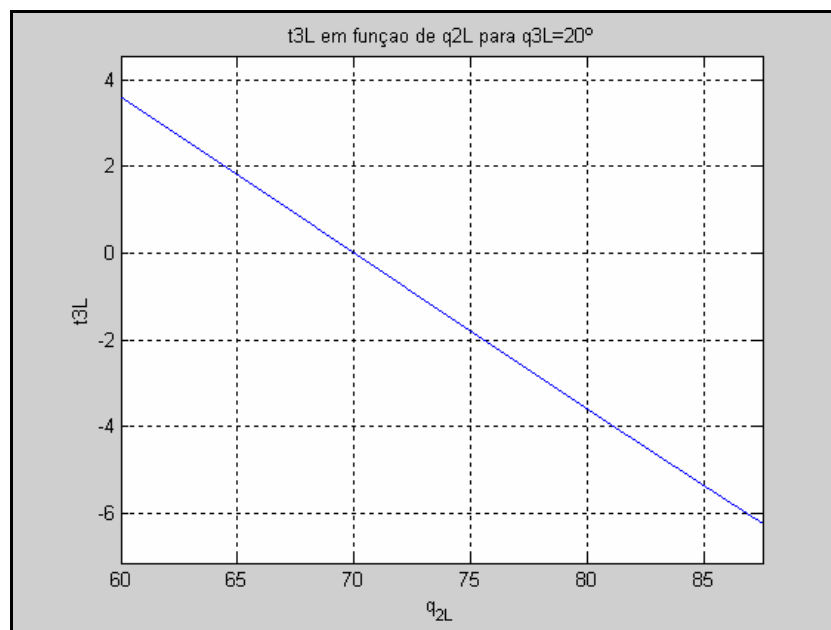


Fig. 27: Momento M2 em função de q2L para q3L = 20°

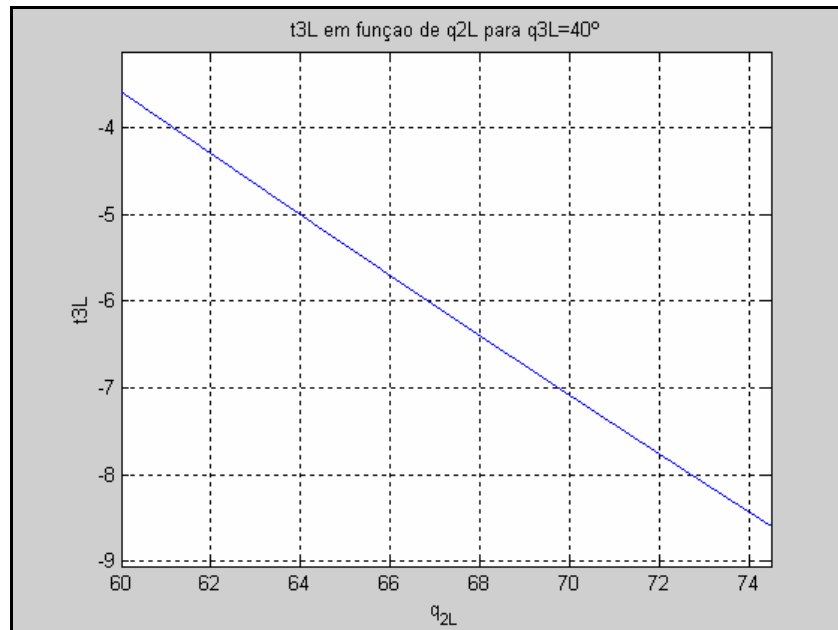


Fig. 28: Momento t3L em função de q2L para q3L = 40°

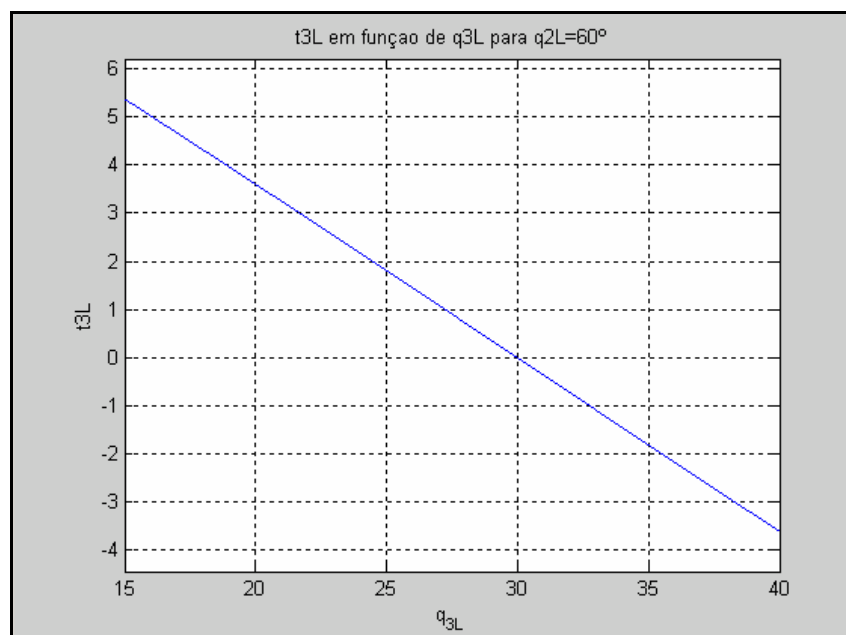


Fig. 29: Momento t3L em função de q3L para q2L = 60°

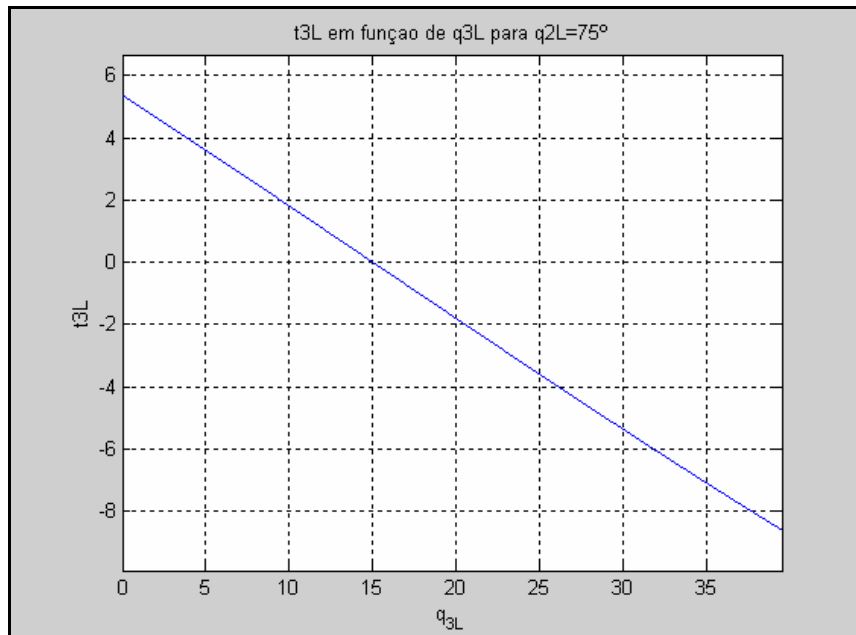


Fig. 30: Momento t_{3L} em função de q_{3L} para $q_{2L} = 75^\circ$

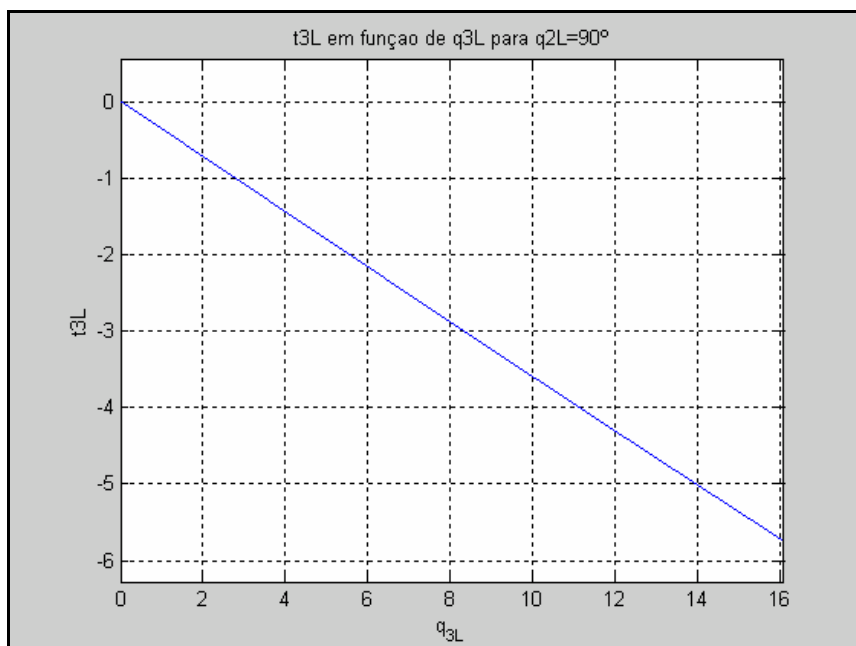


Fig. 31: Momento t_{3L} em função de q_{3L} para $q_{2L} = 90^\circ$

2.5.1.1.3. Cálculo do Momento $t4L$:

Tabela : Momento $t4L$ para $q2L$ para $q3L$.

Máximos	Mínimos	$q2L$	$q3L$	Momento máximo em módulo	Figura
3,6	0	[70° ; 90°]	0°	3,6	Fig. 32
1,9	-3,3	[60° ; 87,5°]	20°	3,3	Fig. 33
-1,8	-4,3	[60° ; 74,5°]	40°	4,3	Fig. 34
2,7	-1,8	60°	[15° ; 40°]	2,7	Fig. 35
2,8	-4,5	75°	[0° ; 39,5°]	4,5	Fig. 36
0	-2,8	90°	[0° ; 16,1°]	2,8	Fig. 37

Ficheiro MatLab: M32D_apoiaNP.m

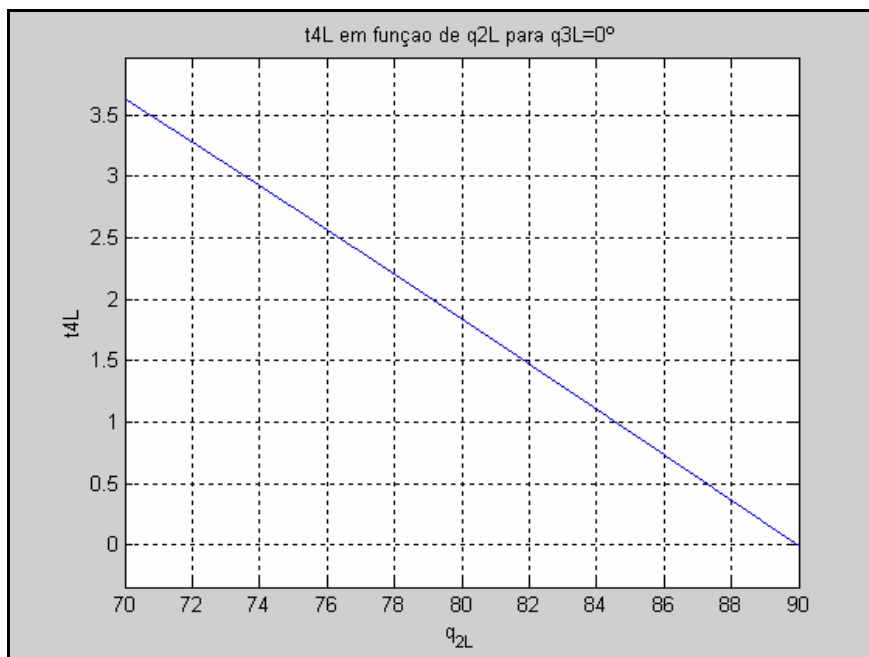


Fig. 32: Momento $t4L$ em função de $q2L$ para $q3L = 0^\circ$

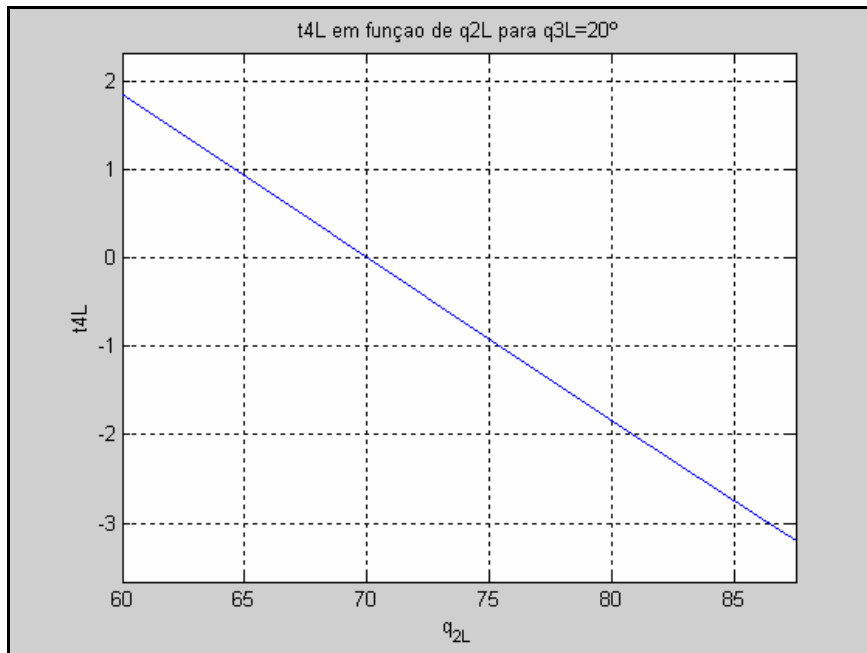


Fig. 33: Momento t_{4L} em função de q_{2L} para $q_{3L} = 20^\circ$

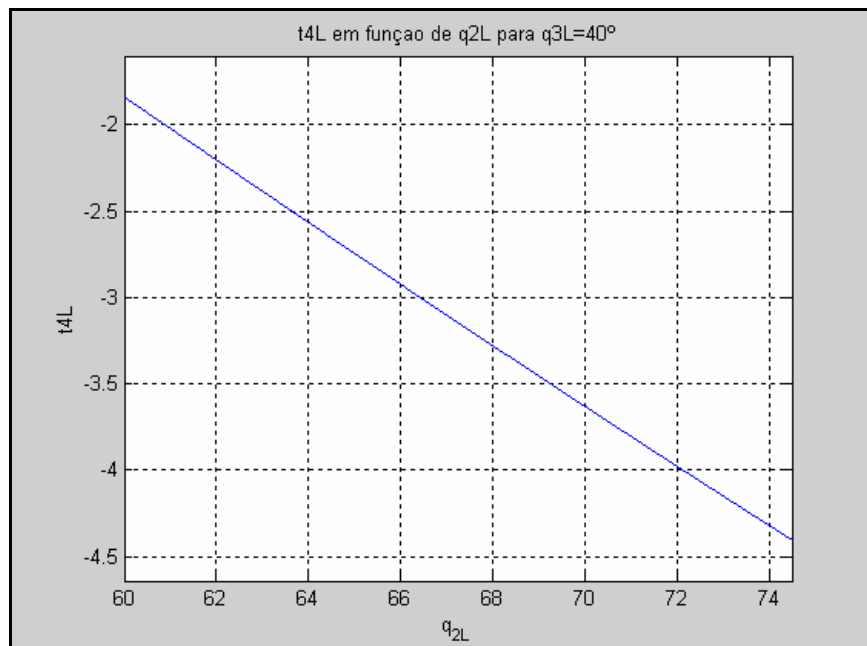


Fig. 34: Momento t_{4L} em função de q_{2L} para $q_{3L} = 40^\circ$

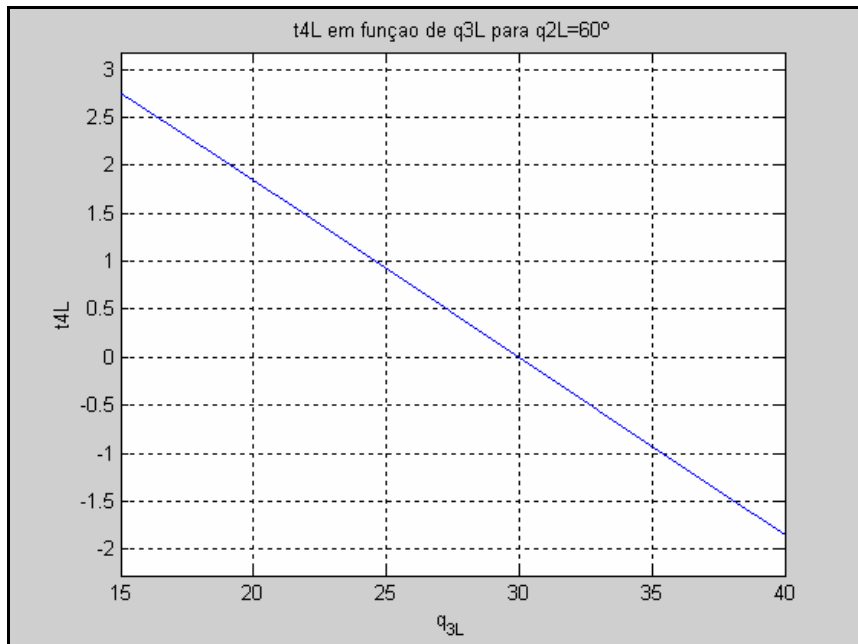


Fig. 35: Momento t_{4L} em função de q_{3L} para $q_{2L} = 60^\circ$

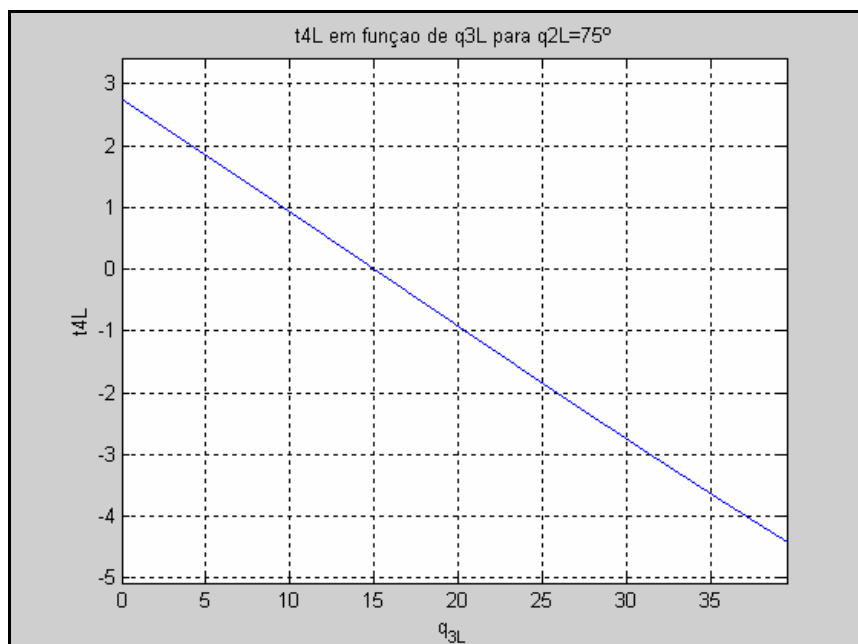


Fig. 36: Momento t_{4L} em função de q_{3L} para $q_{2L} = 75^\circ$

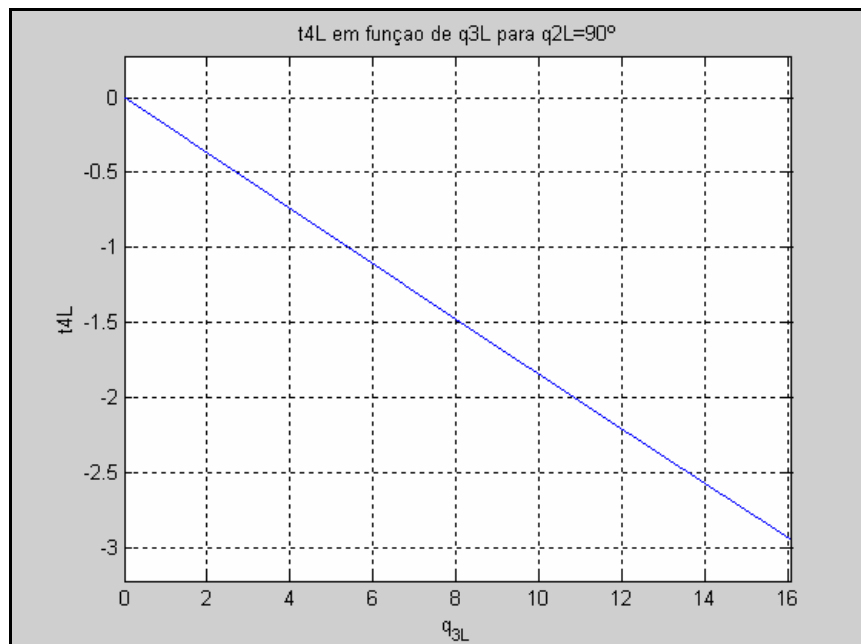


Fig. 37: Momento t_{4L} em função de q_{3L} para $q_{2L} = 90^\circ$

2.5.1.1.4. Conclusão:

Concluimos que os momentos máximos suportados pelas juntas, quando a perna se encontra apoiada, vão ser:

- Junta do Tornozelo (Junta 1): $t_{2L} = 10,5 \text{ N.m}$
- Junta do Joelho (Junta 2): $t_{3L} = 8,3 \text{ N.m}$
- Junta da Anca (Junta 3): $t_{4L} = 4,5 \text{ N.m}$

2.5.1.2. Caso 2 Perna no ar:

Efectuamos um estudo para os momentos nas juntas quando a perna não se encontra apoiada no chão, mas os resultados obtidos não foram conclusivos, por isso, não vamos apresentar esse estudo. Contudo os programas de MatLab usados para o estudo são os seguintes:

- M1_2D_ar.m
- M2_2D_ar.m
- M3_2D_ar.m

A variação dos ângulos de junta mantém-se aquela que foi definida anteriormente:

$$q_{2L} = [60^\circ ; 110^\circ]$$

$$q_{3L} = [0^\circ ; 90^\circ]$$

$$q_{4L} = 90^\circ - (q_{2L} + q_{3L})$$

3. ANÁLISE ESTRUTURAL DAS JUNTAS 4 E 5

Tal como havíamos feito anteriormente para as juntas 1,2 e 3, a análise estrutural também foi feita para as juntas 4 e 5 separadamente. Os movimentos destas juntas dão-se em torno do eixo dos xx.

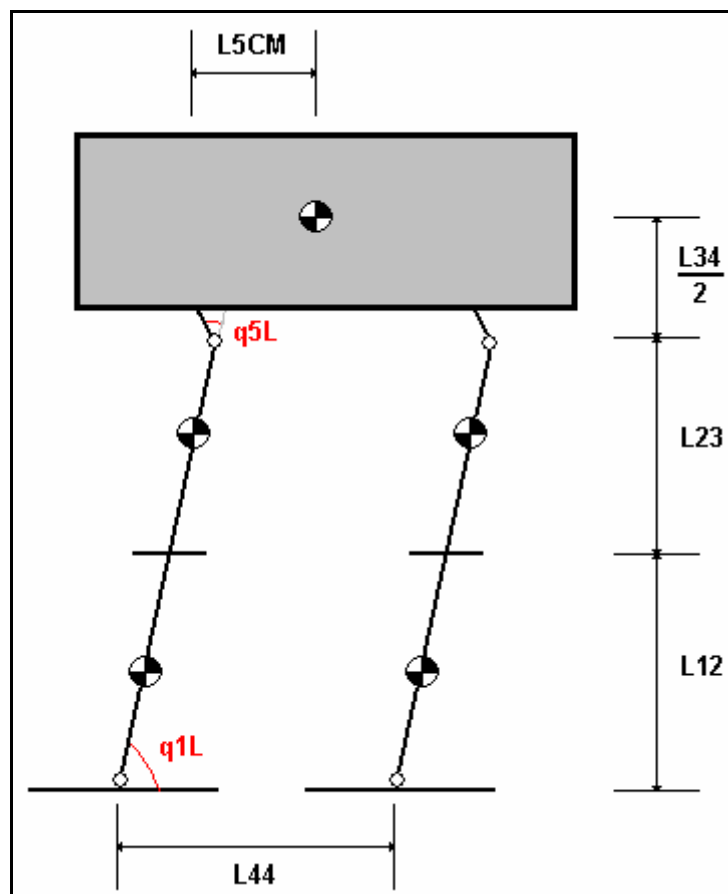


Fig. 56: Esquema da perna.

3.1. Parâmetros:

- Distância entre os pontos centrais dos dois pés

$$L44 = 0,15\text{m}$$

- Distância da anca ao centro de massa:

$$L5CM = 0,75\text{m}$$

Para a definição inicial das variações dos ângulos de junta, baseamo-nos nos robots existentes e através da observação do movimento do corpo humano.

$$q1L = [70^\circ ; 120^\circ]$$

$$q5L = [-30^\circ ; 30^\circ]$$

As expressões deduzidas para os momentos são:

- Para o tornozelo, junta 4:

$$t1L = P1 * (b41 + L44) + P2 * (b42 + L44) + P3 * (b43 * L5CM)$$

com,

$$b41 = r1 * \cos(q1L)$$

$$b42 = (L12 + r2) * \cos(q1L)$$

$$b43 = (L12 + L23) * \cos(q1L) + r3 * \cos(q1L + q5L)$$

- Para a anca, junta 5:

$$t5L = P3 * (b53 + L5CM)$$

com,

$$b_{53} = r_3 * \cos(q_{1L} + q_{5L})$$

Da análise em MatLab obtivemos os seguintes gráficos 3D:

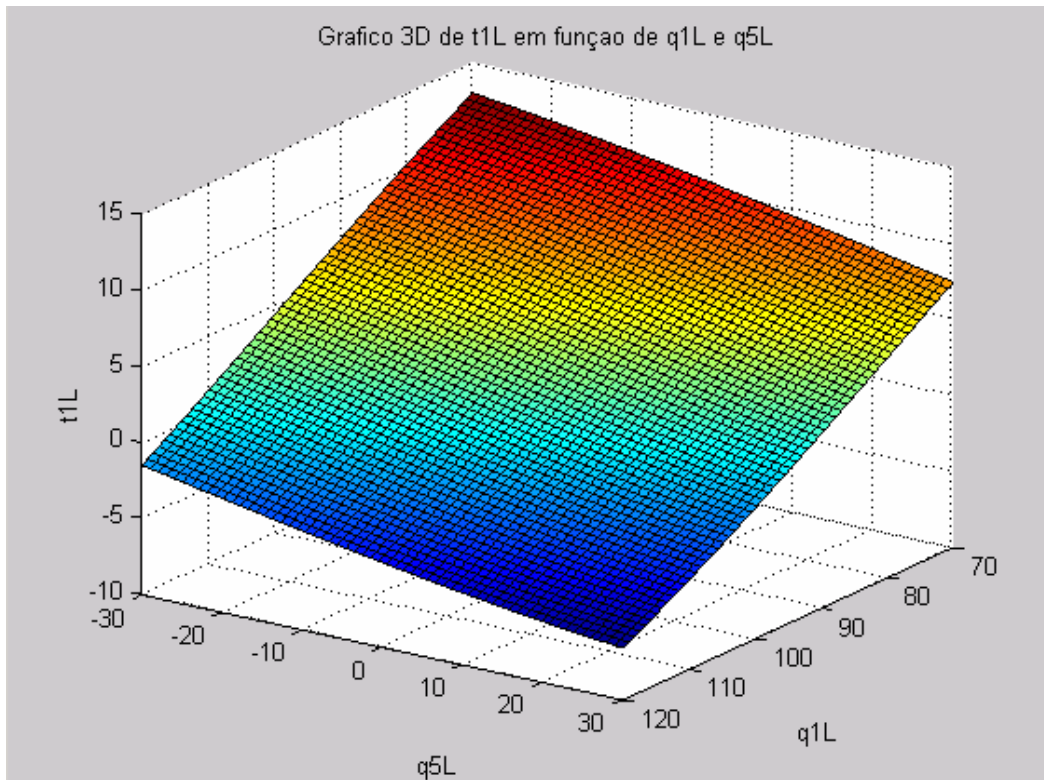


Fig. 57: Gráfico do momento t_{1L} em função de q_{1L} e q_{5L} .

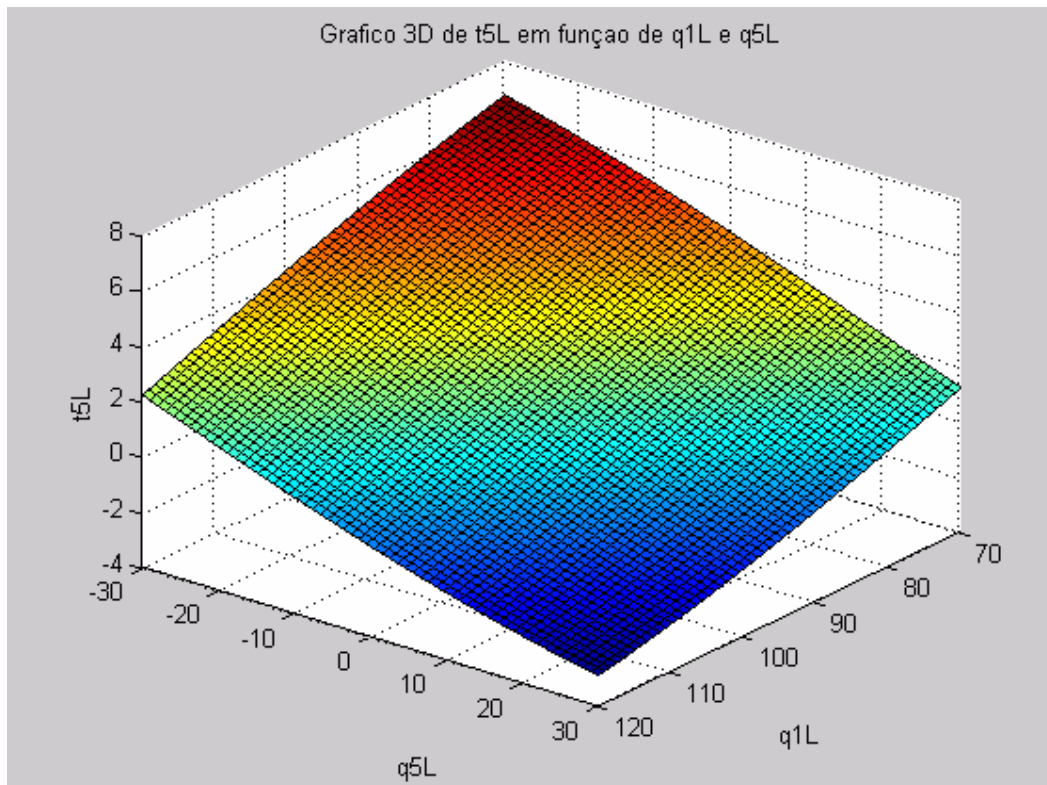


Fig. 58: Gráfico do momento $t5L$ em função de $q1L$ e $q5L$.

$$t1L = [-7,5 ; 12,5] \text{ N.m}$$

$$t5L = [-3 ; 7] \text{ N.m}$$

Pela observação dos gráficos concluímos que a variação dos momentos é muito elevada. O que nós levou a fazer uma nova análise análoga à feita anteriormente para $q2L$, $q3L$ e $q4L$. Para esta juntas a variação do centro de massa vai ser em observada segundo o eixo ZY.

3.2. Estudo do centro de massa:

Obtivemos a seguinte expressão para o Y_{cm} :

$$Y_{cm} = \frac{m1 \cdot b41 + m1 \cdot L44 + m2 \cdot b42 + m2 \cdot L44 + m3 \cdot b43 + m3 \cdot L5CM}{2m1 + 2m2 + 2m3}$$

Sendo o nosso objectivo que esta variação do centro de massa se encontra dentro da área do pé.

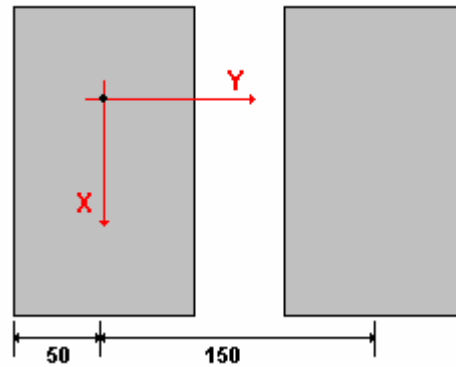


Fig. 59: Área dos pés.

Concluimos assim que podemos variar o centro de massa no seguinte intervalo:

$$Y_{cm} = [-0,05 ; 0,125]m$$

Da análise dos gráficos 3D, podemos concluir que:

$$Y_{cm} = [0,17 ; 0,25]m$$

De seguida fizemos gráficos 2D da variação do centro de massa para restringir a variação dos ângulos de junta.

Esta análise foi inconclusiva, porque estes momentos não podem ser calculados independentemente dos ângulos q_{1R} e q_{5R} . Portanto decidiu-se realizar a cinemática directa das pernas, para podermos verificar quais as variações realistas das juntas para o robot.

4. ANÁLISE ESTRUTURAL DO ROBOT

O material escolhido para formar o exo-esqueleto do robot foi o alumínio. Este material é fácil de encontrar no mercado, é leve, relativamente barato, facilmente maquinável e possui características mecânicas que vão de encontro as nossas necessidades. Para além disso existe uma grande variedade de ligas de alumínio disponíveis no mercado, algumas com propriedades mecânicas muito superiores ao alumínio corrente.

As características mecânicas do alumínio são:

- Resistência à tracção = 70 a 90 MPa
- Limite de Elasticidade = 30 a 400 MPa
- Alongamento = 40 a 30 %
- Estricção > 60 %
- Dureza = 15 a 25 HB
- Módulo de elasticidade = 6750 MPa

A forma do elo vai influenciar a rigidez estrutural do robot assim como a maneira como os componentes vão estar colocados no seu interior. É por isso importante fazer uma análise estrutural aplicando os esforços a que o elo vai estar sujeito e verificar se o material escolhido é suficientemente resistente. Foram concebidos três elos diferentes.

O programa utilizado para a modelação e análise estrutural dos elos foi o CATIA.

4.1. Hipóteses de elos:

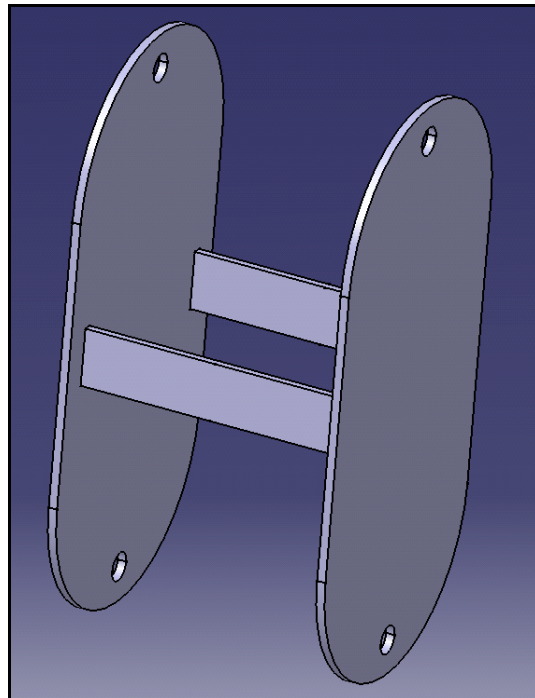


Fig. 60: Elo1 (2 barras de ligação rectangulares).

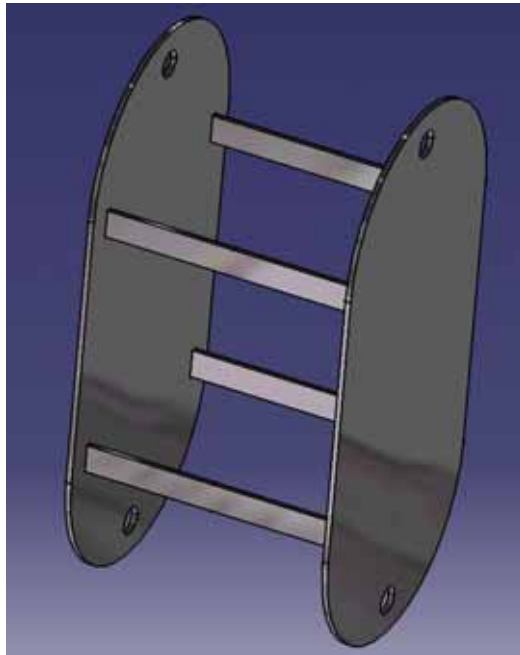


Fig. 61: Elo 2 (4 barras de ligação rectangulares).

As barras interiores que ligam as 2 chapas de alumínio, vão ter uma forma cilíndrica e não rectangular como havíamos idealizado inicialmente. A forma de ligação será por aparafusamento, devido a apresentar maiores vantagens a nível construtivo do que as soluções anteriores, em que seria preciso quinar as barras rectangulares de ligação. Através da quinagem, provavelmente não íamos conseguir obter um comprimento uniforme para todas as barras.

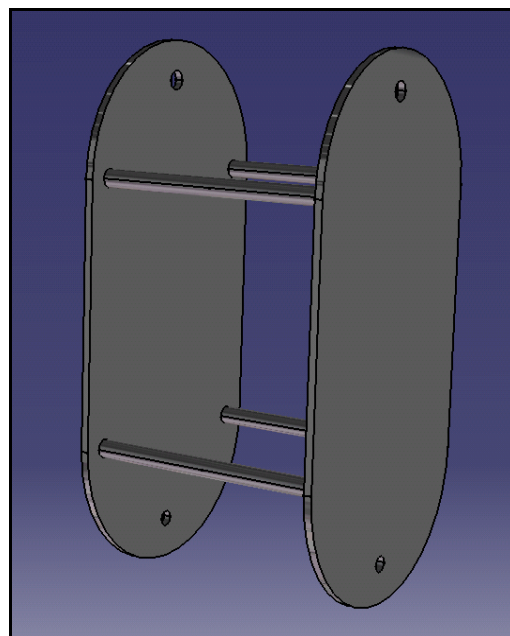


Fig. 62: Elo 3 (4 barras de ligação circulares).

4.2. Análise estrutural:

A espessura da chapa usada para este estudo foi de 3mm.

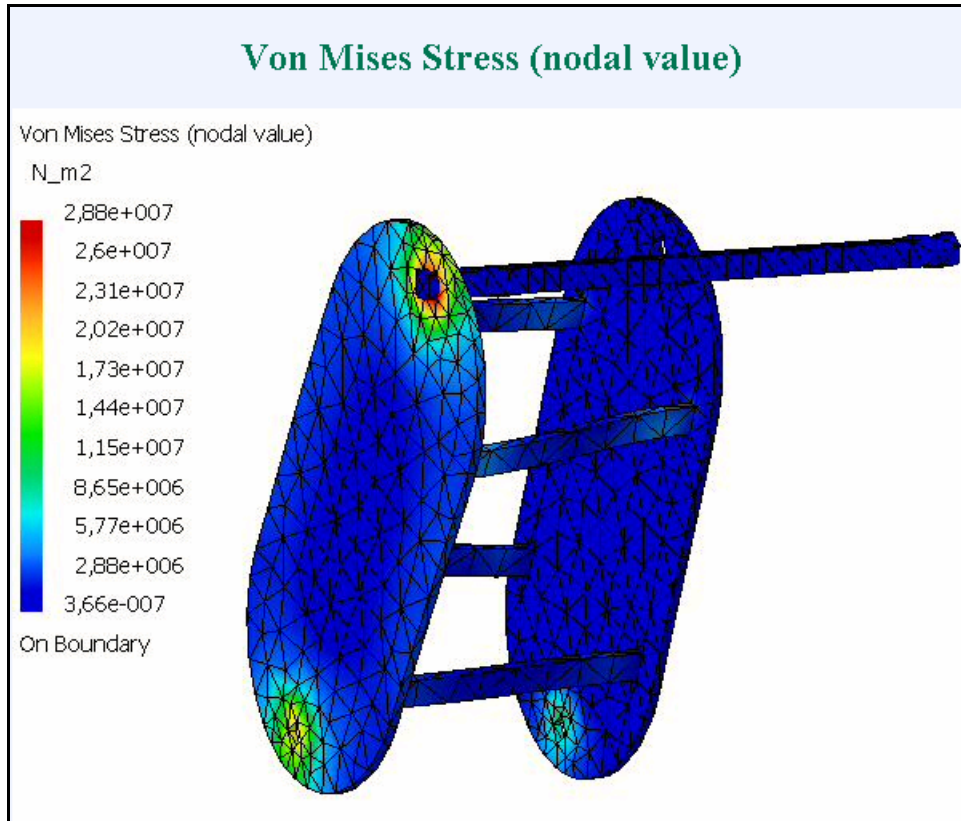


Fig. 63: Resultado da análise estrutural.

Da análise estrutural concluímos que a tensão máxima que o material teria que suportar seria de 28,8 MPa. Este valor é inferior aos limites de elasticidade tabelados para o alumínio e suas ligas. (ver ficheiro elo4veiofixo.mht)

Foi proposta a realização deste estudo para uma espessura de 2mm. Concluímos facilmente que para a vasta gama de alumínios existente, esta espessura é aceitável. Mas, compromete os mecanismos de transmissão até agora desenvolvidos. Por exemplo, não existem casquilhos de tão baixa espessura.

5. JUNTA UNIVERSAL

Uma junta universal é caracterizada por possuir dois movimentos rotacionais ortogonais. A junta em questão será utilizada no tornozelo do robot, que assim irá possuir dois graus de liberdade nesse ponto.

Até ao momento encontramos a estudar três hipóteses de juntas possíveis. O estudo dos prós e contras de cada uma delas ditará a nossa escolha.

Hipótese 1:

Esta hipótese propõe o uso de bielas para transmitir o movimento dos motores aos veios. Para isto, no movimento em torno de x , $q1L$, é utilizado um veio com casquilhos fixos à base da perna. Estes casquilhos rodam livremente, possibilitando assim o movimento, através da biela fixa ao motor e a um disco de maior diâmetro que o veio.

O movimento em torno de y , $q2L$, é feito através de um veio fixo por aperto à estrutura do elo. Existem ainda um ou dois rolamentos fixos por aperto ao veio. Utiliza-se, como podemos ver pela figura, uma chumaceira que permite a ligação entre o veio superior e o veio inferior.

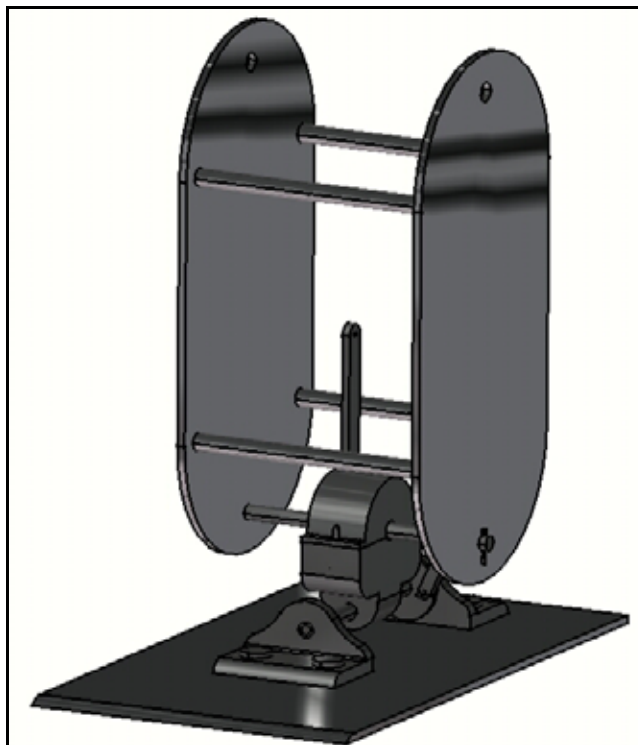


Fig. 64: Hipótese de junta universal n°1.

A principal desvantagem desta solução é a utilização de rolamentos. Após pesquisa verificamos que os rolamentos necessários para suportar os esforços axiais existentes, apresentam diâmetros interiores elevados, na ordem dos 10mm, no caso de rolamentos de esferas e 25mm no caso de rolamentos de rolos. Uma desvantagem da utilização de rolamentos de esferas é que, apesar dos diâmetros serem inferiores relativamente aos de rolos, é necessário utilizar um par de rolamentos para suportar as cargas axiais. Isto vai tornar a junta pouco compacta.

Hipótese 2:

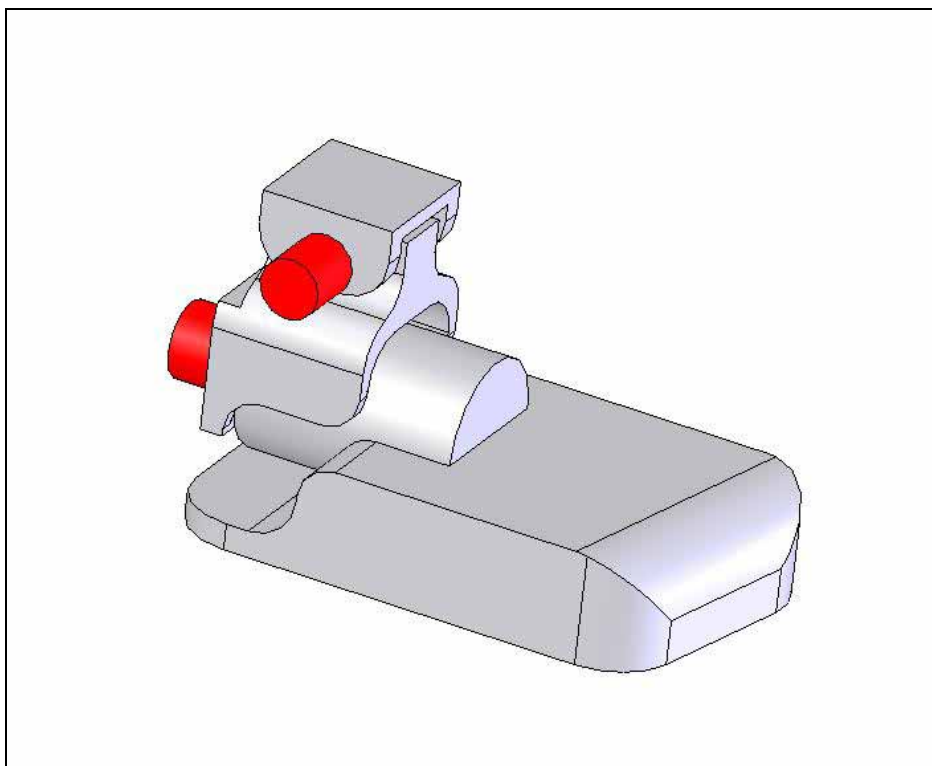


Fig. 65: Hipótese de junta universal n.º2.

Nesta hipótese, proposta pelo Eng.º Festas, recorre-se a veios estriados para a transmissão de movimento. Esta transmissão é bastante compacta e o seu funcionamento é simples. Os motores são ligados directamente aos veios estriados, que através de pequenas peças com estrias interiores nas zonas de contacto produzem o movimento das juntas. A solução apresenta como desvantagem o facto dos motores terem de ficar no exterior do elo, o que é inestético.

Hipótese 3:

A terceira hipótese faz uso de engrenagens de dentado recto exterior, para a transmissão do movimento ao veio superior, e usa uma biela para o movimento do veio inferior. O funcionamento desta transmissão é simples, a roda dentada mandante e a roda dentada mandada apresentam uma relação de 1 para 2, e são fixas aos veios por enchavetamentos, ou por aperto.

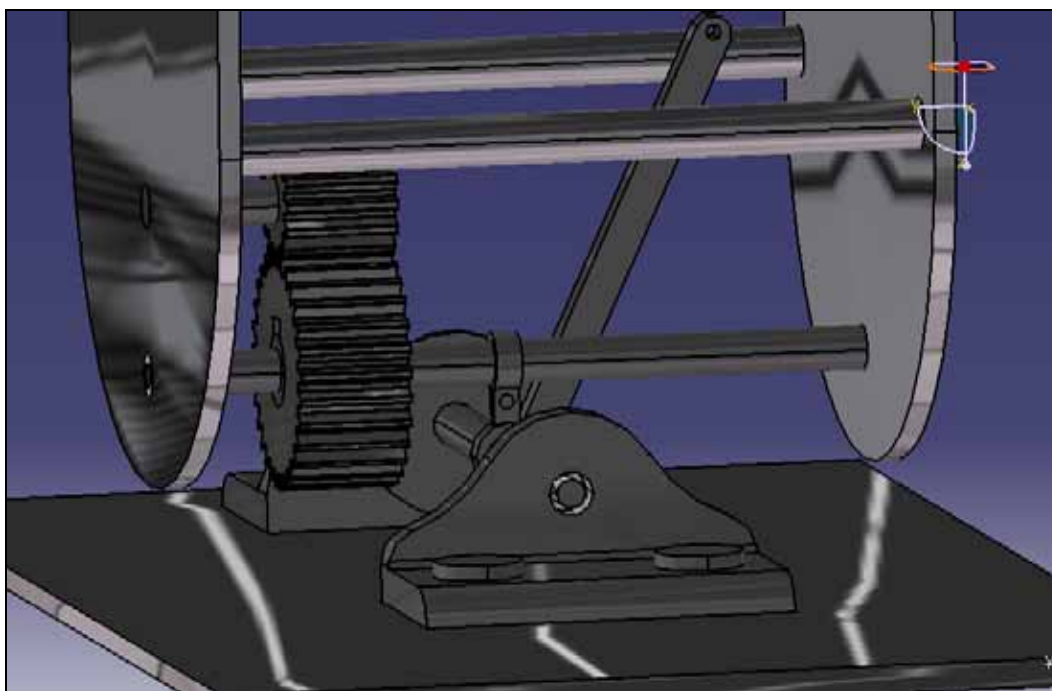


Fig. 66: Hipótese de junta universal n°3.

O fixamento por aperto foi sugerido pelo Prof. Balacó de Moraes, que justifica a utilização desta opção com o facto dos diâmetros das rodas serem bastante pequenos (Roda mandante, $D_e = 14\text{mm}$; Roda mandada, $D_e = 26\text{mm}$). Uma vantagem apresentada por estas rodas é a superfície de contacto de 15mm, o que vai diminuir possíveis folgas.

Este tipo de engrenagens são fornecidas pela *Pinhol Equipamentos Industriais, Lda*, que possui sede no Porto e um armazém em Aveiro, o que nos permite, aceder rapidamente aos equipamentos.

As folgas são provavelmente a maior desvantagem desta solução, mas consideramos que para os esforços aplicados nas engrenagens, estas são relativamente desprezáveis. Outra desvantagem é o material de fabrico das rodas, o aço C43. Este material é

demasiado pesado e de baixa qualidade. Segundo o Prof. Balacó de Moraes, a Pinhol produz rodas dentadas noutros materiais de maior qualidade, tal como aços ligados. Estamos a espera de uma resposta da *Pinhol* ao nosso pedido de informações, via correio electrónico, acerca deste assunto.

6. BIBLIOGRAFIA

Até ao momento procuramos livros que nos permitissem resolver os problemas que enfrentamos com a análise estrutural estática, a escolha dos materiais a usar, a análise estrutural ao material, e a configuração e desenho da junta universal. Consultamos ainda catálogos técnicos, para ver se o material de que precisamos existe e quais as suas características.

A bibliografia consultada até ao momento foi a seguinte:

- **Santos, M. F. Vítor.** 2003. Apontamentos de Robótica Industrial. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- **Morais, A. B.** 2002. Órgãos de Máquinas I, Textos de Apoio. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- **Davim, João Paulo.** 2000. Apontamentos de Introdução aos Materiais, Universidade de Aveiro.
- **Cunha, Luís Veiga da.** 1994. Desenho Técnico. Fundação Calouste Gulbenkian.
- **Branco, Carlos Moura.** 1989. Mecânica dos Materiais, Teoria e Aplicações. McGraw-Hill.
- **Fag.** 1996. Rolling Bearings Catalogue.
- **Ina.** Catalogo Ina 305. Ina Rolamientos.
- **Sati.** 2000/03Catologo Generale.
- **PEI.** 2003. Transmissão de Potência. Pinhol Equipamentos Industriais.