



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE  
UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS  
EM MANIPULADORES ROBÓTICOS  
INDÚSTRIAS**

**PLÍNIO COLEN BUSTAMANTE**

**Belo Horizonte, 18 de dezembro de 2012.**

**PLÍNIO COLEN BUSTAMANTE**

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE  
UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS  
EM MANIPULADORES ROBÓTICOS  
INDÚSTRIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projetos Mecânicos

Orientador: Prof. Eduardo José Lima II – UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE**  
**UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS**  
**EM MANIPULADORES ROBÓTICOS**  
**INDÚSTRIAS**

**PLÍNIO COLEN BUSTAMANTE**

Dissertação defendida e aprovada em 18 de dezembro de 2012, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, na área de concentração de “Projetos Mecânicos”.

---

**Prof./Dr. Eduardo José Lima II - (DEMEC - UFMG) – Orientador**

---

**Prof./Dr. Alexandre Queiroz Bracarense - (DEMEC - UFMG) – Examinador**

---

**Prof./Dr. Antônio Augusto Torres Maia - (DEMEC - UFMG) – Examinador**



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que me apoiaram durante a elaboração deste trabalho e em especial ao professor Eduardo José Lima II, pela orientação, dedicação e confiança, a Rômulo Penido, cuja curiosidade e capacidade de observação inspiraram as bases deste trabalho e a Cacau pela paciência e apoio incondicional.

*“Knowledge is indivisible. When people grow wise in one direction, they are sure to make it easier for themselves to grow wise in other directions as well. On the other hand, when they split up knowledge, concentrate on their own field, and scorn and ignore other fields, they grow less wise — even in their own field.”*

*Isaac Asimov*

# SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                       | 1  |
| <b>1.1.Objetivos</b>                                       | 4  |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                            | 6  |
| <b>2.1.Manipuladores robóticos</b>                         | 6  |
| 2.1.1.Definição e classificação                            | 6  |
| 2.1.2.Cinemática de manipuladores                          | 9  |
| 2.1.3.Velocidade e aceleração                              | 11 |
| 2.1.4.Estática e dinâmica                                  | 13 |
| 2.1.5.Planejamento de trajetórias                          | 16 |
| 2.1.6.Projeto de manipuladores                             | 19 |
| <b>2.2.Materiais compósitos</b>                            | 21 |
| 2.2.1.Definição e aplicações usuais                        | 21 |
| 2.2.2.Macromecânica Unidirecional                          | 25 |
| 2.2.3.Constantes Elásticas no Sistema de Referência Global | 28 |
| 2.2.4.Aplicações em robótica                               | 29 |
| <b>2.3.Elementos Finitos</b>                               | 31 |
| 2.4.1.Introdução   | 31 |
| 2.4.2.Tipos de Análises                                    | 33 |
| <b>3. METODOLOGIA</b>                                      | 35 |
| <b>3.1.Simulações virtuais</b>                             | 35 |
| 3.1.1.Análise de corpos rígidos                            | 35 |
| 3.1.2.Análise de corpos flexíveis                          | 55 |
| <b>4. RESULTADOS</b>                                       | 59 |
| <b>4.1.Potência e Torque</b>                               | 59 |
| <b>4.2.Estrutura</b>                                       | 61 |
| <b>5. DISCUSSÃO</b>  | 75 |
| <b>6. CONCLUSÃO</b>  | 80 |
| <b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                       | 82 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Desenho esquemático de um manipulador cartesiano. Adaptado de [6].   | 7  |
| Figura 2.2 - Desenho esquemático de um manipulador cilíndrico. Adaptado de [6].   | 7  |
| Figura 2.3 - Desenho esquemático de um manipulador esférico. Adaptado de [6].   | 7  |
| Figura 2.4 - Desenho esquemático de um manipulador cartesiano. Adaptado de [7].   | 8  |
| Figura 2.5 - Desenho esquemático de um manipulador articulado verticalmente. Adaptado de [6].   | 8  |
| Figura 2.6 – Relação ângulos-posição na cinemática direta.  | 10 |
| Figura 2.7 – Relação ângulos-posição na cinemática inversa.   | 11 |
| Figura 2.8 – Curvas de ângulo, velocidade e aceleração para movimentação suave do manipulador. Adaptado de [8].   | 17 |
| Figura 2.9 – Curvas dos ângulos das juntas em função do número de pontos intermediários, de um manipulador com duas ligações, para uma movimentação em linha reta entre os pontos (2, 0, 0) e (0.4812, 0, 8771).                              | 19 |
| Figura 2.10 – (a) Unidirecional contínua, (b) unidirecional descontínua, (c) sem orientação planar, (d) sem orientação tridimensionais, (e) laminado, (f) tecido de fibra, (g) híbrido de fibra e partícula e (h) trançado. Adaptado de [11]. | 23 |
| Figura 2.11 – Ilustração do sistema de coordenadas principal do material laminar. Adaptado de [10].   | 25 |
| Figura 2.12 – Elemento infinitesimal de tensão de um material reforçado com fibras. Adaptado de [13].   | 26 |
| Figura 3.1 (a) – Desenhos ilustrativos do robô KR 16-2. Adaptado de [29].   | 35 |
| Figura 3.1(b) – Desenhos ilustrativos do robô KR 150-2. Adaptado de [29].   | 36 |
| Figura 3.2 – Representação gráfica no plano XY – fora de escala - da trajetória comum.  | 39 |
| Figura 3.3 (a) – Velocidade e aceleração angular da junta 01 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.  | 40 |
| Figura 3.3 (b) – Velocidade e aceleração angular da junta 02 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.  | 41 |
| Figura 3.3 (c) – Velocidade e aceleração angular da junta 03 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.  | 41 |
| Figura 3.3 (d) – Velocidade e aceleração angular da junta 04 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.  | 41 |
| Figura 3.3 (e) – Velocidade e aceleração angular da junta 05 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.  | 42 |
| Figura 3.3 (f) – Velocidade e aceleração angular da junta 06 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.  | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.4 (a) – Velocidade e aceleração angular da junta 01 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.                 | 42 |
| Figura 3.4 (b) – Velocidade e aceleração angular da junta 02 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.                 | 43 |
| Figura 3.4 (c) – Velocidade e aceleração angular da junta 03 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.                 | 43 |
| Figura 3.4 (d) – Velocidade e aceleração angular da junta 04 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.                 | 43 |
| Figura 3.4 (e) – Velocidade e aceleração angular da junta 05 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.                 | 44 |
| Figura 3.4 (f) – Velocidade e aceleração angular da junta 05 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.                 | 44 |
| Figura 3.5 – Modelos tridimensionais do KR 6-2 com a numeração das juntas, eixos de rotação e ligações. Adaptado de [33].   | 46 |
| Figura 3.6 – Modelos tridimensionais do KR 150-2 com a numeração das juntas, eixos de rotação e ligações. Adaptado de [33]. | 47 |
| Figura 3.7 – Modelos CAD das ligações 01 e 02 dos manipuladores KR 16-2.  | 48 |
| Figura 3.8 – Modelos CAD das ligações 01 e 02 dos manipuladores KR 150-2.   | 49 |
| Figura 3.9 – Modelo tridimensional cinemático KR 16-2 - MD ADAMS.   | 50 |
| Figura 3.10 – Modelo tridimensional cinemático KR 150-2 - MD ADAMS.   | 51 |
| Figura 3.11 – Localização limite da carga de trabalho para (a) KR 16-2 e (b) KR 150-2. Adaptado de [33].                    | 52 |
| Figura 3.12(a) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR16-2/A356.   | 52 |
| Figura 3.12(b) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR16-2/AZ91.   | 53 |
| Figura 3.12(c) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR16-2/AS4/3501-6.   | 53 |
| Figura 3.12(d) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR150-2/A356.  | 53 |
| Figura 3.12(e) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR150-2/AZ91.  | 54 |
| Figura 3.12(f) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR150-2/AS4/3501-6.  | 54 |
| Figura 3.13 – Malhas criadas para as ligações número quatro, respectivamente para KR 16-2 e KR 150-2.                       | 56 |
| Figura 3.14 – Elemento SOLID72 do ANSYS.  | 57 |
| Figura 4.1 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 16-2 – Material:A356. Visualização ANSYS.                      | 67 |
| Figura 4.2 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 16-2. Material:AZ91. Visualização ANSYS.                       | 67 |
| Figura 4.3 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 16-2. Material: AS4/3501-6. Visualização ANSYS.                | 68 |
| Figura 4.4 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 150-2. Material:A356.  | 68 |

|   |    |
|---|----|
| Visualização ANSYS.   |    |
| Figura 4.5 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 150-2. Material:AZ91.  | 69 |
| Visualização ANSYS.   |    |
| Figura 4.6 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 150-2. Material:AS4/3501-6.  | 69 |
| Visualização ANSYS.   |    |
| Figura 4.7 – Deformação linear na ligação L3 com carregamentos da trajetória otimizada – KR 16-2. Material: AZ91. Visualização ANSYS.         | 72 |
| Figura 4.8 – Deformação linear na ligação L3 com carregamentos da trajetória otimizada – KR 16-2. Material: AS4/3501-6. Visualização ANSYS.   | 72 |
| Figura 4.9 – Deformação linear na ligação L3 com carregamentos da trajetória otimizada – KR 150-2. Material:AZ91. Visualização ANSYS.         | 73 |
| Figura 4.10 – Deformação linear na ligação L3 com carregamentos da trajetória otimizada – KR 150-2. Material: AS4/3501-6. Visualização ANSYS. | 73 |
| Figura 5.1 – Tempo de operação em função da tarifa de energia.  | 77 |
| Figura 5.2 – Tempo de produção em função do parâmetro de processo.  | 79 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Principais características dos modelos estudados.  | 36 |
| Tabela 3.2 – Limites de posicionamento e velocidades das juntas dos manipuladores.  | 37 |
| Tabela 3.3 – Parâmetros de DH para o modelo KR 16-2.  | 37 |
| Tabela 3.4 – Parâmetros de DH para o modelo KR 150-2.   | 37 |
| Tabela 3.5 – Pontos e sequencia para a trajetória comum.  | 38 |
| Tabela 3.6 – Coordenadas cartesianas dos pontos a trajetória comum.   | 39 |
| Tabela 3.7 – Sequencias e tempos da trajetória comum.   | 40 |
| Tabela 3.8 – Principais propriedades dos materiais estudados.   | 45 |
| Tabela 3.9 – Orientação das fibras, direção principal e propriedades mecânicas transformadas para o AS4/3501-6.             | 58 |
| Tabela 4.1 – Torques máximos e potências RMS – Trajetória comum – KR 16-2.  | 59 |
| Tabela 4.2 – Torques máximos e potências RMS – Trajetória comum - KR 150-2.   | 59 |
| Tabela 4.3 – Torques máximos e potências RMS – Trajetória otimizada – KR 16-2.  | 60 |
| Tabela 4.4 – Torques máximos e potências RMS – Trajetória otimizada - KR 150-2.   | 60 |
| Tabela 4.5 – Massa das ligações – Unidade: kg - KR 16-2.  | 61 |
| Tabela 4.6 – Massa das ligações – Unidade: kg - KR 150-2  | 62 |
| Tabela 4.7 – Momentos principais de inércia - Unidade: $\text{kg}/\text{mm}^2$ - KR 16-2.                                   | 62 |
| Tabela 4.8 – Momentos principais de inércia – Unidade: $\text{kg}/\text{mm}^2$ - KR 150-2.                                  | 63 |
| Tabela 4.9 – Carregamentos normalizados máximos na trajetória comum - Unidade: N - KR 16-2.                                 | 64 |
| Tabela 4.10 – Carregamentos normalizados máximos na trajetória comum - Unidade: N - KR 150-2.                               | 64 |
| Tabela 4.11 – Deslocamentos absolutos lineares e angulares máximos na trajetória comum – Unidades: mm e radianos – KR 16-2. | 66 |
| Tabela 4.13 – Carregamentos normalizados máximos na trajetória otimizada – Unidade: N - KR 16-2.                            | 70 |
| Tabela 4.14 – Carregamentos normalizados máximos na trajetória otimizada - Unidade: N - KR 150-2.                           | 70 |
| Tabela 4.15 – Deslocamentos lineares e angulares máximos na trajetória otimizada - Unidades: mm e radianos - KR 16-2.       | 71 |
| Tabela 4.16 – Deslocamentos lineares e angulares máximos na trajetória otimizada – Unidades: mm e radianos - KR 150-2.      | 71 |
| Tabela 4.17 – Primeiras frequências naturais das ligações dos manipuladores - Unidade: Hz.                                  | 74 |
| Tabela 5.1 – Custos das estruturas e servomotores, em dólares.  | 76 |
| Tabela 5.2 – Comparação entre custo total, respostas dinâmicas e estáticas.   | 76 |

## RESUMO

A utilização de materiais compósitos aumenta cada vez mais, expandindo-se para novas áreas em que antes não se havia interesse e nem sequer possibilidade de aplicação. A alta rigidez e baixa densidade deste tipo de material é o que o torna atraente para utilização em novos designs que buscam otimizar projetos de máquinas novas e tradicionais. A grande restrição que existe hoje para a utilização em larga escala destes materiais é o elevado custo que agregam ao projeto quando comparados aos materiais convencionais. Apesar de existir uma ocasional literatura, a aplicação de materiais compósitos em robôs manipuladores industriais se resume a poucos exemplos dentro do âmbito da pesquisa e indústria, sendo os principais aqueles relacionados a projetos singulares que demandam uma combinação de propriedades não obtível com a utilização de materiais convencionais. Objetivando preencher uma lacuna, este trabalho apresenta um estudo detalhado sobre o impacto – ganhos, perdas e custos - da utilização de um material compósito comercial na estrutura de um robô manipulador antropomórfico industrial, avaliando-se as possíveis estratégias de mitigações do investimento.

*Palavras chave: materiais compósitos, fibra de carbono, matrix epóxi, manipuladores, robôs, robótica industrial, simulação computacional, dinâmica de manipuladores robóticos, dinâmica de corpos rígidos, elementos finitos, automação industrial, cast light alloys.*

## ABSTRACT

The utilization of composite materials increases rapidly, expanding into new areas in which there was no previously interest and not even possibility of application. The high stiffness and low density of this kind of materials is the core attractive for its employment in new projects that seek to optimize designs of new and traditional machines. The major constraint that exists today for large-scale employment of these materials is the high cost added to the project when compared to conventional materials. Although there is an occasional literature, the application of composite materials in industrial manipulators robot is restricted to few examples within the scope of research and industry, mainly those projects that demand a unique combination of properties not obtainable with the use of conventional materials. Aiming to fill a gap, this paper presents a detailed study on the impact - gains, losses and costs – in the employment of a commercial composite material in the structure of an industrial anthropomorphic robot manipulator, evaluating the possible investment mitigation strategies.

*Keywords: composite materials, carbon fiber, epoxy matrix, manipulators, robots, industrial robotics, computer simulation, dynamics of robotic manipulators, rigid body dynamics, finite elements, industrial automation, cast light alloys.*

# 1. INTRODUÇÃO

A história da robótica industrial teve seu início na década de 60 quando do esforço conjunto do empreendedor Joseph Engelberger e do inventor George Devol, ambos estadunidenses, surgiu o Unimate, um robô manipulador antropomórfico focado nos desejos da indústria automobilística americana da época, que buscava caminhos mais seguros e ágeis para a realização de tarefas tediosas e/ou perigosas no dia-a-dia de suas plantas. A partir desse fato histórico, uma verdadeira revolução foi desencadeada e hoje os manipuladores robóticos romperam a barreira de serem tratados como um maquinário de alta especificidade e custo, e tornaram-se um negócio consolidado em todo o mundo, que movimenta anualmente cifras na casa das centenas de milhões de dólares.

Em concordância com esse avanço no mundo dos negócios, a ciência envolvida neste ramo também evoluiu. Diversos estudos foram conduzidos nas cinco décadas que se passaram, focando os mais variados campos que envolvem a robótica industrial. Novos projetos foram propostos, novas formas de controle foram desenvolvidas, novos softwares e interfaces homem máquina, novos programas de simulação e novos algoritmos para otimização. Isso para se dizer o mínimo, dentre outros avanços notáveis que aproximaram ainda mais os robôs manipuladores das indústrias de produção de bens de consumo.

A robótica, por se tratar de uma área multidisciplinar, permite a análise de inúmeras variáveis para a melhoria do desempenho de seus sistemas. Um foco relativamente novo é a discussão do emprego de materiais não convencionais na fabricação dos componentes de manipuladores industriais. Um tipo de material não convencional são os compósitos baseados em uma matriz polimérica e uma fibra sintética, como por exemplo, resina epóxi e fibra de carbono.

Materiais compósitos vêm sendo utilizados em alguns ramos da indústria como alternativa para projetos que exigem uma combinação de propriedades quase sempre impossível de serem encontrados em materiais convencionais, mais especificamente metais. É o caso das indústrias aeroespacial e aeronáutica, pioneiras no emprego desse tipo de material e maiores consumidores do mesmo.

As ótimas propriedades mecânicas destes materiais, aliadas ao seu baixo peso específico, os tornam ideais para aplicações que exigem uma estrutura leve, mas que seja capaz de resistir a grandes solicitações sem grandes deslocamentos. Existe ainda uma ideia relativamente nova para estes materiais, que é a possibilidade de desenvolvê-los com propriedades específicas, através da manipulação de suas variáveis de fabricação, e customizadas de acordo com as demandas de desempenho do projeto. Essa nova mentalidade de seleção de materiais os torna ainda mais atraentes para diversos ramos de aplicação.

Apesar das grandes evoluções nas últimas décadas, ao se analisar as características dos robôs manipuladores antropomórficos industriais comercializados em grande escala, pode-se chegar a uma rápida e simples conclusão: quando se compara os valores de massa total do robô, com a massa que o mesmo é capaz de suportar no seu *end effector*, quase toda potência dos servomotores/atuadores do manipulador está sendo empregada na movimentação de sua estrutura, o que leva a uma razão, carga paga/massa total muito baixa. Sendo assim, duas hipóteses podem ser levantadas: se os manipuladores possuíssem uma estrutura mais leve, poderiam manusear as cargas com maior velocidade, utilizando os mesmo servomotores/atuadores – economizando energia na movimentação de sua estrutura - ou então poderiam manipular a mesma carga a mesma velocidade, porém utilizando servomotores/atuadores menos potentes e por consequência com menos gasto energético, o que reduziria o custo total de equipamento e o tempo de retorno de investimento.

Baseando-se nesta hipótese, os materiais compósitos parecem ser a escolha perfeita para otimizar a razão carga paga/massa total dos manipuladores robóticos, uma vez que são capazes de reduzir o massa da estrutura significativamente e ainda assim atender as solicitações a qual ela está submetida, sem afetar sua precisão de posicionamento.

O grande empecilho é que os materiais compósitos possuem um custo muito alto em relação aos materiais tradicionais. Isso pode ser explicado devido à demanda dos tipos de indústria nas quais ele começou a ser utilizado em grandes quantidades – aeronáutica e aeroespacial - estar fortemente atrelada com a esférica bélica. No momento da introdução desse tipo de tecnologia de materiais, por se tratar de aplicações específicas e com pouca demanda, não houve preocupação em relação ao custo elevado que ele possuía na época e que, em comparação a outros materiais, ainda possui. Porém, não existe nenhum estudo conhecido

pelo autor deste trabalho, que analise o quanto deste alto custo material pode ser mitigado com ganhos nos aspectos citados à priori: substituição dos servomotores, melhoria das características dinâmicas, diminuição de consumo de potência elétrica, aumento da precisão de posicionamento e aumento na velocidade de realização de tarefas. Estes aspectos passíveis de melhor entendimento são o escopo do estudo deste trabalho.

Este trabalho analisa dois modelos de robôs manipuladores atualmente em uso na indústria: um de alta (KR 150-2) e outro de baixa (KR 16-2) carga de trabalho, respectivamente: 150 e 16 kg. Ambos são fabricados, e estão entre os líderes de vendas, da empresa alemã KUKA [1], um dos expoentes na robótica industrial, com sedes nos grandes mercados do planeta. A escolha foi feita devido ao fato desta empresa ter sido a pioneira na utilização de materiais compósitos em robôs manipuladores, quando no ano de 2005, lançou uma edição especial de um de seus produtos, o KR 100-2 PA<sup>TM</sup>, em que uma ligação é feita em compósito com reforço em fibra de carbono [2].

Os dois robôs selecionados tiveram suas estruturas atuais analisadas virtualmente empregando-se a todas as suas ligações móveis três tipos diferentes de materiais: compósito unidirecional de fibra de carbono (AS4) e resina epóxi (3501-6), liga de alumínio A356 e liga de magnésio AZ91. O material compósito escolhido é um prepreg comercial da empresa HEXCEL, uma das maiores e mais importantes empresa no ramo de compósitos. Sendo o AS4/3501-6 um de seus produtos principais e mais vendidos [3]. As ligas metálicas foram selecionadas a partir do critério de baixa densidade, uma característica fundamental para a aplicação estudada. Além disso, vale a pena resaltar que o A356, assim como o AZ91, são ligas altamente utilizadas pelo setor automotivo e aeronáutico [4].

Após o levantamento das características inerciais de cada ligação móvel para cada material, uma trajetória comum, definida a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, foi criada para exigir que cada junta atingisse seu limite de velocidade angular, ou um valor próximo a ele. Através de simulações cinemáticas, utilizando esta trajetória comum, as características dinâmicas de cada estrutura: torques, acelerações e potência, são avaliadas. A partir destes dados de torque e potência foi proposto um aumento de velocidade na execução da trajetória para as estruturas em AS4/3501-6 e AZ91 - empregando-se a mesma potência requerida pela estrutura em alumínio - e comparou-se o ganho obtido no tempo de execução da trajetória.

Além disso, comparou-se a potência requerida para a movimentação de cada junta, definindo-se assim as potências necessárias para os servomotores de cada estrutura.

As forças realizadas em cada junta durante a movimentação foram avaliadas e tratadas para determinar uma situação de carregamento máximo, que serve de entrada para uma simulação estática utilizando o método de elementos finitos. Além de checar os esforços realizados em cada ligação e os deslocamentos lineares e angulares, a simulação de elementos finitos também é utilizada para avaliar as frequências naturais das ligações, grandeza que influencia diretamente a precisão de posicionamento e velocidade máxima do manipulador.

Como resultado final, esse estudo apresenta os custos gerados e mitigados, de acordo com as simulações realizadas, e compara o custo material das três estruturas, gerando assim uma relação entre os ganhos e perdas para o emprego do material compósito para manipuladores robóticos industriais.

O segundo capítulo será dedicado a uma revisão bibliográfica dos conceitos básicos de engenharia envolvendo robôs manipuladores, materiais compósitos e o método dos elementos finitos, além de contemplar uma análise breve da indústria robótica mundial nos últimos anos e apresentar o estado da arte encontrado na literatura quanto ao uso de materiais compósito em manipuladores industriais. No terceiro capítulo, a metodologia empregada para as simulações de corpos rígidos e flexíveis será apresentada, assim como os critérios utilizados para comparação das estruturas compostas pelos diferentes materiais. No quarto capítulo desta dissertação, os resultados das análises realizadas serão apresentados para posteriormente, no quinto capítulo, serem discutidos com foco no objetivo do trabalho - a relação dos custos e benefícios. O sexto capítulo trás a conclusão final do trabalho e é seguido pelo sétimo, e último, capítulo contendo as referências bibliográficas utilizadas.

## **1.1.Objetivos**

- Estudar através de simulações de corpos rígidos (cinemática e dinâmica), os torques e as potências necessárias para a movimentação dos manipuladores robóticos quando suas partes móveis são compostas idealmente e singularmente por três materiais: A356, AZ91 e AS4/3501-6;

- Propor um aumento na velocidade das juntas e por consequência uma diminuição do tempo da trajetória comum para os manipuladores idealizados que exigem menos torque e potência para realizar as movimentações;
- Realizar simulações de corpos flexíveis, através do método dos elementos finitos, para cada ligação, afim de determinar os deslocamento máximos e as diferentes frequências naturais;
- Comparar os dados e identificar as melhorias dinâmicas e estáticas das estruturas compostas pelo AS4/3501-6;
- Calcular um valor total de investimento para a estrutura mais os servomotores, para cada conjunto manipulador/material;
- Comparar os resultados de cada investimento e obter uma relação de “mitigação” do custo da estrutura mais servomotores a partir da redução do consumo de energia dos mesmos, idealizados a partir da potência RMS, para cada grupo manipulador/material;
- Comparar os resultados de diminuição de tempo de execução da trajetória e obter uma relação de tempo de execução de tarefas e retorno de investimento para cada grupo manipulador/material.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Manipuladores robóticos

#### 2.1.1. Definição e classificação

Um braço manipulador é uma estrutura cinemática aberta constituída por ligações e juntas que possuem movimentação restrita a movimentação da ligação anterior, em que uma base fixa é a referência estática global de localização [5]. Uma ferramenta (*end effector*) posicionada na extremidade livre da estrutura é a responsável pela execução da tarefa desejada e possui as características e geometria necessária para tanto.

As juntas que conectam as ligações entre si são as responsáveis pela sua liberdade de movimentação. A capacidade de movimentação de cada junta no espaço define o número de graus de liberdade que a mesma possui. Somados os graus de liberdade das juntas de um manipulador, têm-se os graus de liberdade do mesmo e por consequência sua capacidade de realizar ou não determinada tarefa.

Juntas são definidas como prismáticas, de revolução ou esféricas, sendo que as duas primeiras possuem apenas um grau de liberdade e a última três. O braço humano, por exemplo, é uma estrutura cinemática que possui sete graus de liberdade, sendo três graus de liberdade no ombro (junta prismática), um grau de liberdade no cotovelo (junta de revolução) e três graus de liberdades no punho (junta prismática).

Em um manipulador robótico, geralmente as suas três primeiras juntas, em relação a sua base fixa, são definidas como as juntas principais do robô, e são elas as responsáveis pela localização do manipular. Em contrapartida, quando se refere a um manipulador de seis graus de liberdade, as suas outras três juntas localizadas próximas a ferramenta são definidas como juntas do punho, e são elas as principais responsáveis pela orientação do *end effector* no espaço. Considerando-se as juntas principais, os robôs são classificados dentro das seguintes categorias:

1. Cartesianos: três juntas prismáticas.

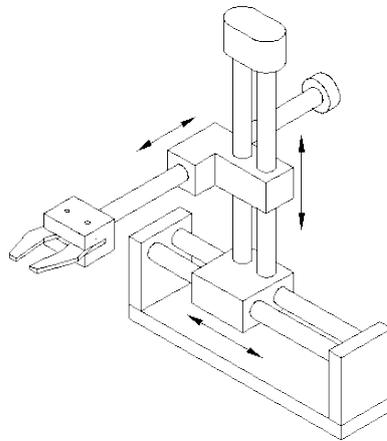


Figura 2.1 – Desenho esquemático de um manipulador cartesiano. Adaptado de [6].

2. Cilíndricos: duas juntas prismáticas e uma de revolução.

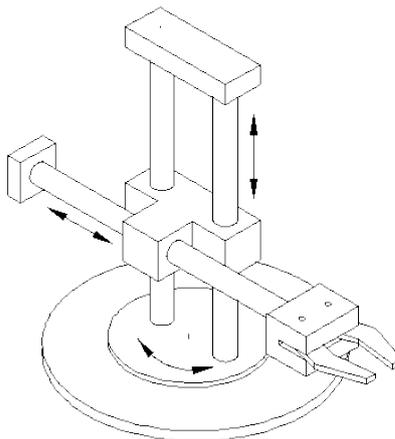


Figura 2.2 - Desenho esquemático de um manipulador cilíndrico. Adaptado de [6].

3. Esféricos: duas juntas de revolução e uma prismática.

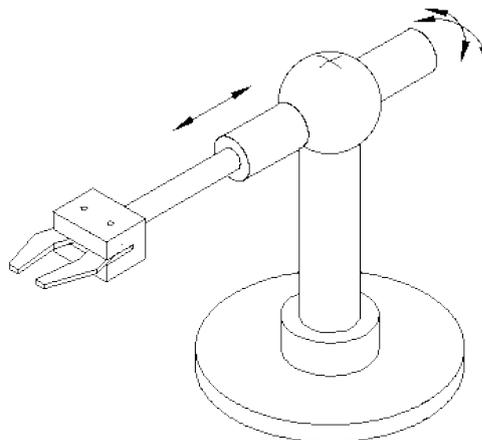


Figura 2.3 - Desenho esquemático de um manipulador esférico. Adaptado de [6].

4. Articulados horizontalmente: duas juntas de revolução - articuladas horizontalmente e paralelamente- e uma prismática. São também chamados de SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm).

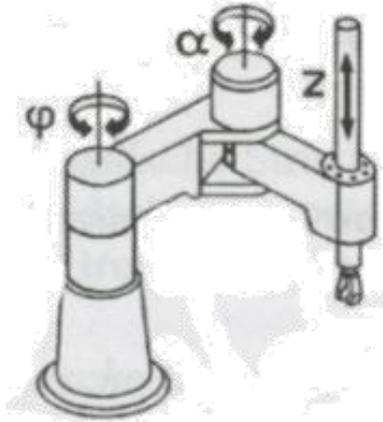


Figura 2.4 - Desenho esquemático de um manipulador cartesiano. Adaptado de [7].

5. Articulados verticalmente: três juntas de revolução.

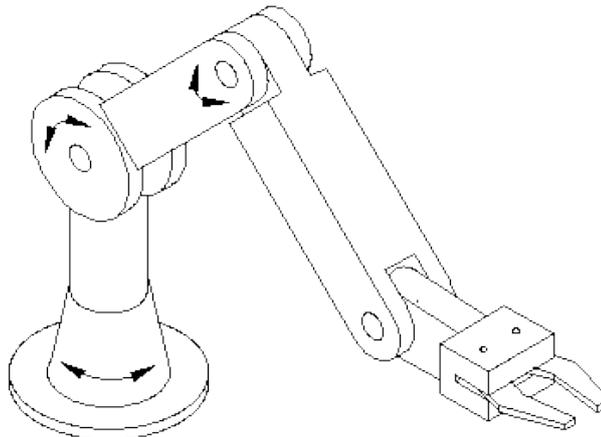


Figura 2.5 - Desenho esquemático de um manipulador articulado verticalmente. Adaptado de [6].

Um braço robótico possui um espaço de trabalho definido pela movimentação que ele é capaz de realizar, resultado do número de graus de liberdade do mecanismo e do arranjo cinemático da estrutura (distribuição das juntas e localização dos eixos das juntas). O espaço de trabalho mapeia os pontos que o robô é ou não capaz de atingir formando um envelope que compreende um volume no espaço cartesiano que depende da classificação do robô (uma das cinco citadas acima). A estrutura do braço manipulador pode assumir duas características de estrutura cinemática: aberta ou fechada. A estrutura cinemática aberta é aquela em que as ligações são conectadas pelas juntas de maneira contínua, como se formassem uma corrente.

As estruturas fechadas são formadas por ligações que se conectam de uma forma fechada (loop).

### 2.1.2. Cinemática de manipuladores

A cinemática de um robô manipulador trata do estudo dos seus movimentos em função do tempo, sem levar em consideração as forças que os causam. A cinemática equaciona a transformação das coordenadas tomadas a partir de uma base fixa, ou seja, qual a posição e a orientação de uma ligação em relação aos movimentos realizados pela outra ligação. Assim, é possível determinar a posição do *end effector* que realiza a tarefa, em função das movimentações realizadas pelas juntas. O estudo da cinemática aborda conceitos básicos de geometria analítica, como, transformação de coordenadas, rotação entre eixos e translação entre eixos [5].

Para manipuladores, tanto de estrutura cinemática aberta ou fechada, uma convenção é adotada para descrevê-los cinematicamente. A notação de Denavit-Hartenberg ou D.H. apresenta um equacionamento baseado em três parâmetros dimensionais do manipulador, chamados de parâmetros de ligação, e outro independente chamado de variável de junta [5]. Como resultado, tem-se uma fórmula geral capaz de relacionar todas as transformações em todos os planos em que as juntas possam atuar. Esses quatro parâmetros são características individuais de cada robô, a partir das localizações e dimensões referentes às juntas e as ligações que o compõe. São enumerados a seguir, os quatro parâmetros definidos por convenção, sendo os três primeiros parâmetros dimensionais e o último o parâmetro de junta [5]:

1. O comprimento da ligação,  $a_i$  = distância entre os planos  $Z_i$  e  $Z_{i+1}$  ao longo do plano  $X_i$ .
2. Ângulo de rotação da ligação,  $\alpha_i$  = ângulos formando entre os planos  $Z_i$  e  $Z_{i+1}$  em relação ao plano  $X_i$ .
3. Distância entre as ligações,  $d_i$  = distância entre os planos  $X_{i-1}$  e  $X_i$  medido no plano  $Z_i$ .
4. Ângulo da junta,  $\theta_i$  = Ângulo entre  $X_{i-1}$  e  $X_i$  em relação ao plano  $Z_i$ .

Os valores dos índices  $i$  utilizados nos parâmetros se referem à enumeração das ligações, sendo a referência imóvel índice  $i = 0$ , a partir da qual se começa a contagem até a ligação final [5].

Na equação (2.1), uma matriz 4x4, agrega as transformações de rotação e translação entre as juntas e as ligações, a partir dos parâmetros  $\alpha_{i-1}$ ,  $a_{i-1}$ ,  $d_i$  e  $\theta_i$ , obtidos na convenção de D.H.

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Com essa relação é possível descobrir a localização do ponto final de uma ligação em relação a sua antecessora, ou antecessoras. Multiplicando-se as matrizes geradas partindo da base (utilizando a regra de múltiplas transformações de sistemas - multiplicação de matrizes), chega-se a uma equação geral na forma matricial, que representa a cinemática direta do robô.

Com a equação geral da cinemática do robô é possível saber em relação à base, qual a localização (posição e orientação) da ferramenta (*end effector*) em função dos ângulos das juntas. Assim, dado os valores de rotação das juntas (ângulos de giro dos motores/atuadores – para juntas de rotação) e/ou os valores de deslocamento (no caso de robôs com juntas prismáticas) sabe-se qual a posição e orientação exata em que a ferramenta estará localizada. A Figura 2.6 mostra a relação encontrada com a cinemática direta entre posição/orientação, e os ângulos rotacionados em cada junta.

$$\emptyset (\theta_1 \theta_2 \theta_3, \dots, \theta_n) \xrightarrow{\text{Cinemática direta - } {}^0_n T} (X, Y, Z, \theta_x \theta_y \theta_z)$$

Figura 2.6 – Relação ângulos-posição na cinemática direta.

A última coluna da matriz da equação geral da cinemática do robô é formada pelos pontos X, Y e Z que a ferramenta assume para valores de rotação ou deslocamento entre as ligações/juntas.

A cinemática inversa do manipulador trata do problema contrário. Ao invés de se definirem ângulos/deslocamentos e calcular a posição a orientação da ferramenta, na cinemática inversa é conhecida a posição e orientação do ponto que se deseja chegar com a ferramenta, porém não se sabe ângulos/deslocamentos. Além disso, uma vez descobertos os valores, deseja-se saber quais os melhores a serem utilizados, no caso em que existem múltiplas soluções. A Figura 2.7 mostra a relação encontrada com a cinemática inversa entre posição/orientação, e os ângulos rotacionados em cada junta.

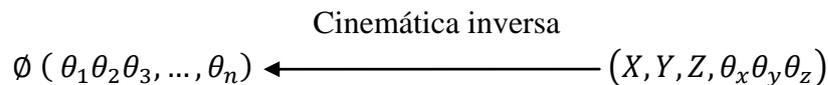


Figura 2.7 – Relação ângulos-posição na cinemática inversa.

A maioria das vezes para robôs “simples” com 6 graus de liberdade do tipo articulado verticalmente, a matriz  ${}^0T_n$  possui 16 elementos, sendo 4 triviais e 12 equações com 6 incógnitas. Porém, da parte rotacional da matriz somente 3 termos são independentes (dimensões do braço), o que resulta em 6 equações com 6 incógnitas. Essas 6 equações são não-lineares e transcendentais. Assim, deve-se preocupar com a existência de soluções, com a multiplicidade de soluções e com o método de solução [5].

A existência de soluções está relacionada com limitações do envelope de trabalho do robô e de suas dimensões. A multiplicidade das mesmas deve ser solucionada por um método de otimização, ou seja, utilizar um critério que defina uma hierarquia de movimentação das ligações [8]. Por exemplo: revolução mínima, a partir da pose inicial, para as juntas principais do manipulador.

### 2.1.3. Velocidade e aceleração

A velocidade de uma ligação de um manipulador robótico não depende somente da velocidade angular de sua junta, mas também da “propagação” da velocidade das juntas e ligações anteriores a ela. Ou seja, a velocidade de uma ligação  $i + 1$ , é aquela causada pela rotação da junta  $i$ , mais quaisquer componentes de velocidade acrescentados pela ligação  $i$  [5].

Dessa forma, analisando a “propagação” da velocidade angular de uma ligação  $i + 1$ , pode ser apresentada segundo a equação:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R \ {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \ {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2.2)$$

Onde,  ${}^{i+1}R$  é a matriz de rotação entre os sistemas,  ${}^i\omega_i$  a velocidade angular da ligação anterior,  $\dot{\theta}_{i+1}$  a velocidade da junta da ligação  $i+1$  e  ${}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$  o vetor unitário na direção Z do sistema de coordenadas da junta da ligação  $i+1$ .

No caso da velocidade linear, a velocidade é a mesma para as duas ligações sequenciais, mais a adição de uma componente linear causada pela velocidade angular da junta da ligação anterior, como apresenta a equação:

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}R ( {}^iv_i + {}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1} ) \quad (2.3)$$

Onde,  ${}^{i+1}R$  é a matriz de rotação entre os sistemas,  ${}^iv_i$  a velocidade linear da ligação anterior,  ${}^i\omega_i$  a velocidade angular da ligação anterior, e  ${}^iP_{i+1}$  o ponto de localização no espaço da junta da ligação  $i+1$ , em referência ao sistema de coordenadas da ligação  $i$ .

Esse par de equações é suficiente para descrever e calcular toda “propagação” de velocidade entre as ligações de um manipulador e portanto as velocidades de cada uma das suas ligações em relação ao seu próprio sistema de coordenadas, ou, através da utilização das matrizes de rotação de vários sistemas, a velocidade em relação a outro sistema de referência.

Uma importante ferramenta para o estudo das velocidades que ocorrem durante a movimentação de um manipulador é o Jacobiano. Ele é definido como a derivada multidimensional de uma função [1]. No caso particular de manipuladores, dentre outros objetivos, eles são utilizados para relacionar a velocidade no espaço cartesiano, com a velocidade no espaço de juntas, de acordo com a equação:

$${}^0V = {}^0J(\theta)\dot{\theta} \quad (2.4)$$

Onde,  ${}^0V$  é o vetor de velocidades no espaço cartesiano, descrito pelos valores lineares e angulares das ligações,  ${}^0J(\theta)$  o jacobiano do sistema  $\{0\}$  e  $\dot{\theta}$  a velocidade no espaço de juntas, ou seja, a velocidade de cada junta do manipulador. O cálculo do Jacobiano pode ser feito a partir da diferenciação do vetor de velocidades do manipulador, que pode ser encontrado utilizando as técnicas descritas anteriormente.

Da mesma forma que ocorre com a velocidade, também ocorre a “propagação” da aceleração entre as ligações do manipulador. Diferenciando as equações (2.2) e (2.3), obtêm-se, respectivamente, as acelerações angulares e lineares para ligações com juntas rotacionais.

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}{}_iR \dot{\omega}_i + {}^{i+1}{}_iR \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2.5)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}{}_iR [ \dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + \omega_i \times ( \omega_i \times {}^iP_{i+1} ) + \dot{v}_i ] \quad (2.6)$$

Porém, um fator a mais que deve ser considerado é a aceleração do centro de massa da ligação – equação (2.7).

$${}^i\dot{v}_{c_i} = {}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{c_i} + {}^i\omega_i \times ( {}^i\omega_i \times {}^iP_{c_i} ) + {}^i\dot{v}_i \quad (2.7)$$

Onde,  ${}^iP_{c_i}$  é o ponto de localização no espaço do centro de inércia da ligação  $i$ , na referência do sistema de coordenadas da mesma ligação  $i$ .

#### 2.1.4. Estática e dinâmica

As forças estáticas em uma estrutura cinemática em cadeia, como a de um manipulador, agem para manter equilíbrio estático de cada ligação a partir de um torque fornecido pela junta da mesma [5]. Da mesma forma como a aceleração e a velocidade, também ocorrerá uma “propagação” das forças e torques pela cadeia da estrutura.

Para descrever as forças e torques de cada ligação em relação a seu próprio sistema de coordenadas, são utilizadas as equações (2.8) e (2.9), respectivamente.

$${}^i f_i = {}^{i+1}{}_iR {}^{i+1} f_{i+1} \quad (2.8)$$

Onde,  ${}^i_{i+1}R$  é a matriz de rotação do sistema  $i$  em relação ao sistema  $i+1$  e  ${}^{i+1}f_{i+1}$  a força da ligação  $i+1$  no sistema de  $i+1$ .

$${}^i n_i = {}^i_{i+1}R {}^{i+1}n_{i+1} + {}^i P_{i+1} \times {}^i f_i \quad (2.9)$$

Onde,  ${}^i_{i+1}R$  é a matriz de rotação do sistema  $i$  em relação ao sistema  $i+1$  e  ${}^{i+1}n_{i+1}$  o torque da ligação  $i+1$  no sistema de  $i+1$ .

Todos os componentes dos vetores de torque e força das ligações têm reação contrária e igual feita pela própria estrutura da ligação, exceto pelo torque sobre o eixo da de rotação da junta da ligação [5]. Portanto, a equação (2.10) é utilizada para encontrar o torque das juntas.

$$\tau_i = {}^i n_i^T {}^i \hat{Z}_i \quad (2.10)$$

Outra maneira utilizada, para cálculo das forças e torques estáticos da estrutura do manipulador é o princípio do trabalho virtual. Com essa premissa, pode-se relacionar o trabalho realizado no espaço cartesiano como trabalho realizado no espaço das juntas através do uso do Jacobiano de acordo com a equação:

$$\tau = J^T \mathcal{F} \quad (2.11)$$

Onde,  $\mathcal{F}$  é o vetor de força-torque no espaço cartesiano atuando em uma determinada ligação,  $J^T$  o Jacobiano entre os sistemas de coordenadas das ligações desejadas e  $\tau$  o vetor com os torques nas juntas de cada ligação do manipulador, anteriores aquelas da ligação a que as forças estão sendo aplicadas.

A utilização dessa técnica para cálculo das forças estáticas permite um cálculo muito mais eficiente e direto para dimensionamento de motores e carregamentos nas juntas das ligações. Porém, para uma quantificação geral dos esforços a que a estrutura está submetida, é necessário conhecer não somente os torques nos eixos das juntas como também os outros componentes destes vetores. Assim é possível dimensionar a estrutura considerando os deslocamentos que a mesma pode sofrer.

Considerando que as ligações estão em movimento ao longo do tempo, tem-se uma nova distribuição de forças e torque que são necessárias para acelerar e desacelerar a estrutura. Essa nova distribuição é função das acelerações das ligações e das suas características geométricas e inerciais.

Conhecendo as acelerações lineares e angulares dos centros de massa de cada ligação, já desenvolvidas na seção 2.1.3, pode-se utilizar as equações clássicas de Newton-Euler (que relacionam, respectivamente, aceleração linear com massa e força, e torque com momento de inércia e aceleração angular) para desenvolver um algoritmo básico capaz de calcular a partir de uma posição, velocidade e aceleração no espaço de juntas, os vetores de torque e força a que a estrutura de cada ligação está sujeita e, por consequência, os torque das juntas que realizam a movimentação.

O algoritmo calcula os valores de aceleração angular, linear e do centro de massa, iniciando da primeira ligação até a última, iterativamente, utilizando as equações já apresentadas nesse trabalho. Após cada cálculo das acelerações, as equações (2.12) e (2.13), computam a força e torque dos centros de massa das ligações.

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{c_{i+1}} \quad (2.12)$$

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{i+1}c_{I_{i+1}} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}c_{I_{i+1}} {}^{i+1}\omega_{i+1} \quad (2.13)$$

Com os vetores de força e torque de cada uma das ligações, inicia-se um processo reverso, a partir da última ligação até a primeira, iterativamente, para se calcular os vetores de torque e força das ligações que atuam nas juntas de cada uma, com todos os seus componentes e por fim apenas aquela do seu componente em direção ao eixo de rotação. Para tanto se utilizam as equações (2.8), (2.9) e (2.10).

Para qualquer tipo de manipulador, a sua equação dinâmica pode ser descrita conforme a equação:

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (2.14)$$

Onde,  $M(\theta)$  é a matriz de inércia do manipulador,  $V(\theta, \dot{\theta})$  o vetor das forças centrífugas e de Coriolis e  $G(\theta)$  o vetor das forças gravitacionais atuando no sistema. Essa equação que descreve a dinâmica do manipulador é chamada de *equação de espaço de estados*, porque a parcela  $V(\theta, \dot{\theta})$ , diferente das outras que dependem apenas da posição do manipulador, também depende da velocidade [1].

Pode-se escrever a equação (2.13), utilizando em vez de variáveis do espaço de juntas, as variáveis do espaço cartesiano.

$$F = M_x(\theta)\ddot{X} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta) \quad (2.15)$$

Onde,  $F$  é o vetor de força e torque atuando no *end-effector* do manipulador e  $X$  é um vetor no espaço cartesiano que indica a posição e orientação do *end-effector*.

Considerando a simulação dos sistemas dos manipuladores robóticos, é necessário avaliar, usando um modelo dinâmico, as acelerações causadas devido à aplicação de um vetor de torques específicos nas juntas das ligações [5]. Utilizando a equação (2.14) e isolando o componente de aceleração, obtém-se a equação:

$$\ddot{\theta} = M(\theta)^{-1}[\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta) - F(\theta, \dot{\theta})] \quad (2.16)$$

Onde,  $F(\theta, \dot{\theta})$  é a parcela de efeitos de atrito considerados para o modelo dinâmico, que será negligenciado neste trabalho.

A aplicação da equação (2.16) está condicionada ao desenvolvimento de um algoritmo iterativo, numérico, capaz de computar as saídas de aceleração para diversas poses, velocidades e torques à medida que o manipulador se movimenta por uma trajetória.

### **2.1.5. Planejamento de trajetória**

A trajetória de um manipulador pode ser descrita como a geração de uma história temporal da variação das juntas para um caminho descrito no espaço pela ferramenta. É interessante que esse caminho seja suave, de uma maneira que todos os pontos pelos quais a ferramenta passa sejam “unidos” por uma função [5].

As trajetórias podem ser especificadas em coordenadas de juntas ou cartesianas. A programação da tarefa de robôs pode ser realizada das seguintes maneiras [8]:

- Espaço das juntas: não há necessidade de implementação de um modelo geométrico e a operação de programação é realizada diretamente, junta a junta, pelo operador.
- Espaço das tarefas: nesse caso, o controle do robô está relacionado com a ferramenta de trabalho, havendo necessidade de um modelo cinemático que relacione as coordenadas de junta com o sistema de coordenadas cartesianas solidário à base do robô [8].

Quando a trajetória desejada é dentro do espaço das juntas, ela pode ser modelada com objetivo de obter uma curva suave durante todo o caminho percorrido.

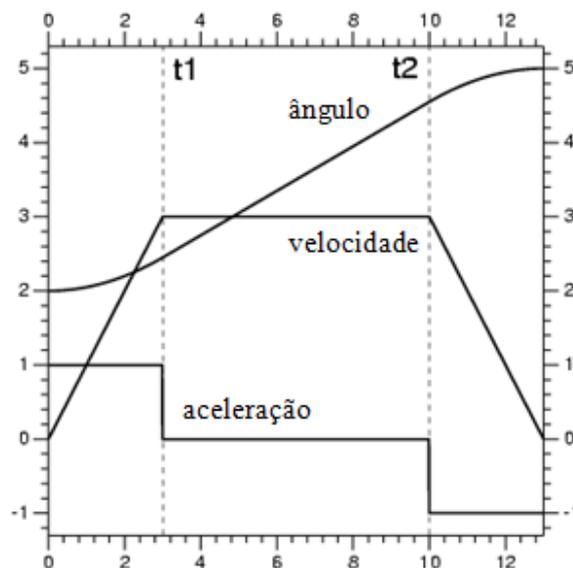


Figura 2.8 – Curvas de ângulo, velocidade e aceleração para movimentação suave do manipulador. Adaptado de [8].

Considerando a primeira modelagem, uma boa abordagem é imprimir ao movimento velocidade inicial e final igual a zero e uma desaceleração linear a medida que o manipulador se aproxima na posição final. Para tanto, uma curva polinomial pode descrever a trajetória do manipulador no espaço das juntas em função do tempo (tanto do *end-effector* quanto das outras juntas). A Figura 2.8 apresenta um exemplo de curvas polinomiais de segunda ordem (quadráticas) geradas para este tipo de modelagem de trajetória.

Considerando a segunda abordagem, os pontos de trajetória no espaço do *end-effector* são os valores determinantes. Na geração de trajetórias no espaço cartesiano, as funções utilizadas

para unir uma trajetória a outra, *splines*, são funções temporais que representam variáveis cartesianas. Os caminhos podem ser planejados diretamente pelo usuário a partir da escolha dos pontos desejados. Porém com essa modelagem, faz-se necessário o uso da cinemática inversa para calcular os valores dos ângulos das juntas para tais posições.

Normalmente se deseja ser capaz de especificar facilmente uma movimentação espacial em função da ponta da ferramenta do manipulador cursando uma trajetória reta. Obviamente, se forem especificados pontos intermediários muito próximos, o manipulador parecerá estar realizando um caminho reto. Porém, é muito mais conveniente que a ponta da ferramenta realmente siga uma linha reta independente da escolha de uma curva suave de transição entre os pontos intermediários [5].

Para computar os valores nos segmentos retos da trajetória, pode-se utilizar as equações:

$$x = x_j + \dot{x}_j t \quad (2.50)$$

$$\dot{x} = \dot{x}_j \quad (2.51)$$

$$\ddot{x} = 0 \quad (2.52)$$

Onde,  $x$  é o ponto espaço que se deseja chegar,  $x_j$  o ponto anterior,  $\dot{x}_{jk}$  a velocidade no ponto anterior e  $t$  o tempo.

Na região de união entre duas retas, pode se utilizar uma equação polinomial de maneira análoga a como foi feita para a descrição da trajetória no espaço das juntas. A Figura 2.9 mostra um exemplo das respectivas movimentações no espaço de juntas para as juntas de revolução de um manipulador de dois links para uma trajetória reta no espaço cartesiano.

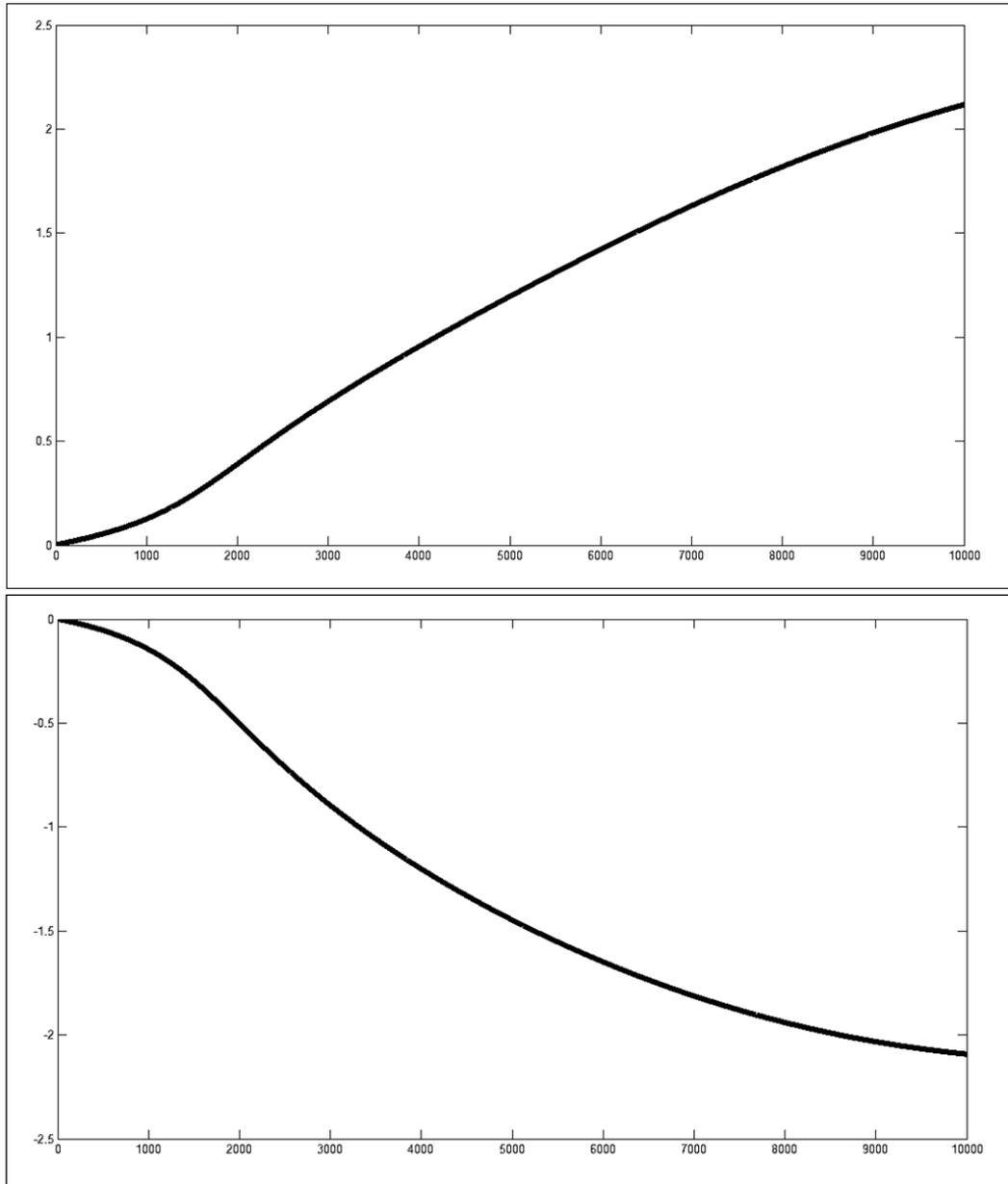


Figura 2.9 – Curvas dos ângulos das juntas em função do número de pontos intermediários, de um manipulador com duas ligações, para uma movimentação em linha reta entre os pontos  $(2, 0, 0)$  e  $(0.4812, 0, 8771)$ .

É importante ressaltar que devido à correspondência entre o caminho seguido no espaço cartesiano e no das juntas, o planejamento de trajetória via um caminho reto está sujeito a vários problemas de singularidades e espaço de trabalho [5].

### 2.1.6. Projeto de manipuladores

Existem cinco aspectos básicos que devem ser os primeiros a serem considerados quando se inicia o projeto de um manipulador robótico:

1. Número de graus de liberdade.
2. Espaço de trabalho.
3. Capacidade de carga.
4. Velocidade.
5. Acurácia e repetibilidade.

O número de graus de liberdade do manipulador é que o vai definir sua capacidade ou não de realizar determinada tarefa, uma vez que determinadas posições e orientação podem não ser atingidas por cadeias cinemáticas com graus de liberdade limitados.

O espaço de trabalho do manipulador determina seu limite físico de alcance, dentro de um volume imaginário criado pelos pontos extremos que ele pode alcançar. Esse espaço influencia em muito no tipo de solução para o posicionamento do manipulador na realização de determinadas tarefas.

A capacidade de carga é caracterizada não apenas como aquela do *end-effector*, mas também como aquela que cada ligação pode suportar. Ela é determinada basicamente a partir da capacidade de torque que as juntas do manipulador são capazes de realizar a partir do cálculo das forças estáticas do manipulador.

A velocidade está diretamente relacionada com o tipo de operação e tarefa que o manipulador irá executar. Para aplicações de altas produções ou tempos de ciclos baixos é necessária altíssima velocidade para que a produtividade se mantenha. Isso reflete diretamente no tipo de motores, na leveza da estrutura, no design da cadeia cinemática e no tipo de material a ser utilizado.

Por fim, a repetibilidade e acurácia, são características cada vez mais essenciais nos manipuladores e são também influenciados pelo tipo de material e pelas características de resposta dinâmica da estrutura do manipulador. Além disso, o tipo de controle eletrônico também influencia diretamente este aspecto e com as técnicas modernas de controle robusto é possível se atingir um alto nível de excelência.

## **2.2.Materiais compósitos**

### **2.2.1.Definição e aplicações usuais**

Um composto é criado através da combinação de diferentes materiais para criar um novo. Um exemplo bastante rudimentar é a mistura de barro e palha para formar tijolos de adobe. Essa mistura leva dois materiais que, por si só, não costumam ser utilizados para a mesma finalidade, mas que quando combinados em um material composto são de interesse para a construção civil [7].

De modo geral, considera-se um compósito qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, de tal forma que uma melhor combinação de propriedades é atingida. De acordo com este princípio de ação conjunta, as melhores combinações de propriedades são formadas pela combinação de dois ou mais materiais de características distintas [8].

Os materiais compósitos são compostos de dois ou mais componentes distintos combinados em escala macroscópica para formar um material funcional. Os materiais compósitos são diferentes de ligas de materiais normais, como no caso de ligas metálicas, aonde materiais diferentes podem ser combinados em um escala microscópica, mas o material resultante é macroscopicamente homogêneo. Os materiais compósitos são tipicamente macroscopicamente heterogêneos [9].

A fase contínua do material, que é a menos forte, é chamada de matriz ou fase de matriz. Normalmente as propriedades da matriz são melhoradas ao se incorporar outro componente (reforço) para produzir um composto. As matrizes podem ser de materiais cerâmicos, metálicos ou poliméricos. Geralmente, os polímeros são fortes e possuem baixo módulo de Young; a cerâmica é forte, dura e quebradiça; e os metais são intermediariamente fortes e possuem boa ductilidade. Outro componente importante de um composto é uma fase de reforço ou reforços, que na maioria dos casos é descontínua, mas é mais dura, mais forte e mais rígida do que a matriz [9].

Quando o reforço é feito por partículas de um material, elas possuem dimensões aproximadamente iguais em todas as direções, e os formatos podem ser dos mais variados

desde esférico, de plaquetas, cúbico, ou qualquer geometria regular ou irregular. O arranjo do reforço particulado pode ser aleatório ou com uma preferência orientação. Na maioria dos compósitos reforçados com partículas, a orientação das partículas é considerada aleatória.

Um reforço fibroso é aquele que possui o comprimento de uma de suas dimensões muito maior do que aquele de sua transversal. As diferentes maneiras possíveis para a colocação das fibras dão origem a diversas características para o material final. Sendo assim, a colocação das fibras pode ser moldada de acordo com aos requisitos da estrutura que está sendo fabricada. Essa vantagem levou ao desenvolvimento de vários tipos de compósitos que utilizam esse tipo de reforço.

A orientação das fibras pode ser aleatória ou direcional. Podem ser colocadas em paralelo (compósito de fibra contínua), orientadas perpendicularmente umas as outras (*crossply* ou compósito de tecido de fibra), ou orientadas ao longo de várias direções (compósito de fibra multidirecional) [9].

Compósitos multicamada ou laminados são outra categoria de compósitos reforçados com fibras que são feitos de pilhas de lâminas (também chamados de folhas) em uma sequencia específica de empilhamento.

Compósitos híbridos podem consistir de uma mistura de fibras e partículas ou de diferentes tipos de fibras, como por exemplo, vidro/carbono. A mistura de fibras de vidro e de carbono incorporadas a uma matriz polimérica resulta em um composto relativamente barato, devido ao baixo custo de fibras de vidro, mas com melhores propriedades mecânicas – devido a alta rigidez da fibra de carbono e a alta resistência mecânica da fibra de vidro.

A Figura 2.10 apresenta seis desenhos esquemáticos de alguns dos tipos de reforços para materiais compósitos.

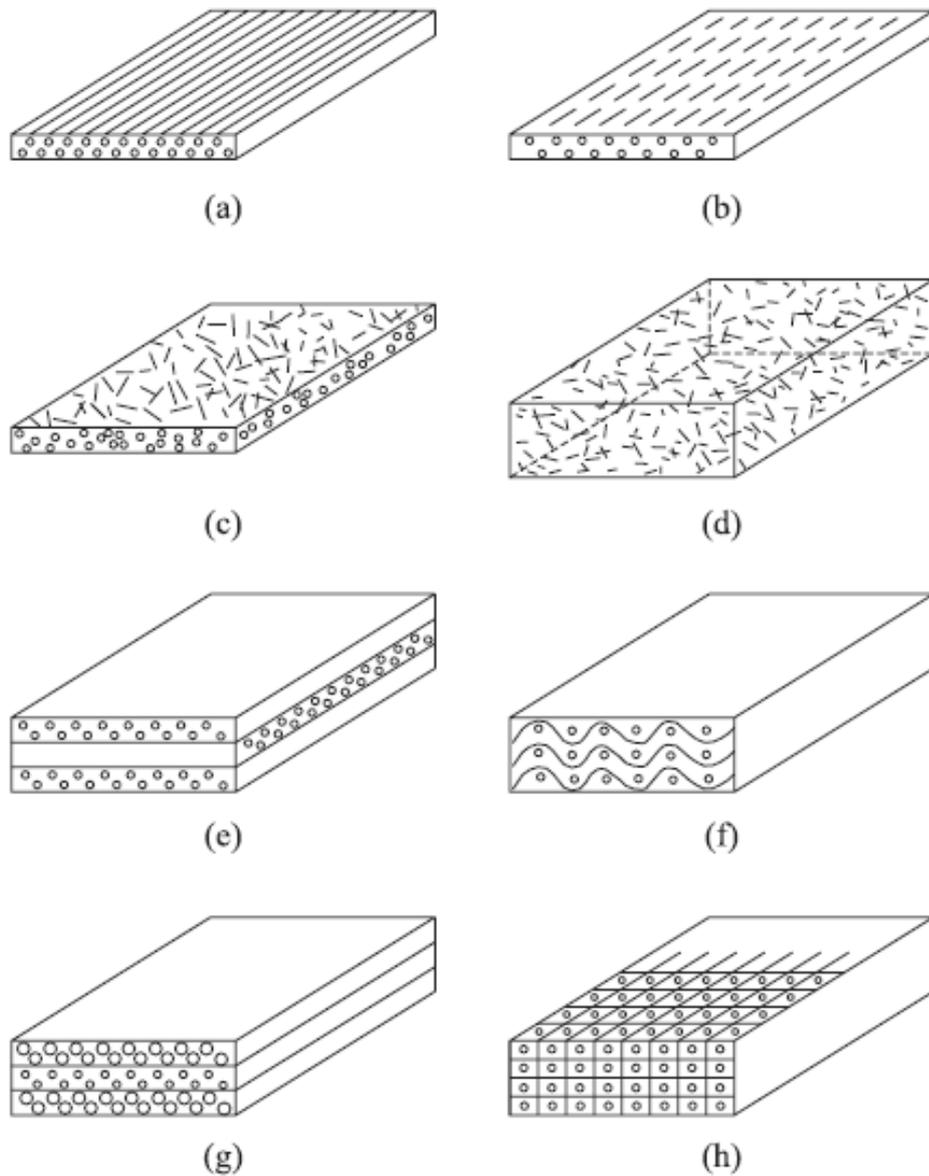


Figura 2.10 – (a) Unidirecional contínua, (b) unidirecional descontínua, (c) sem orientação planar, (d) sem orientação tridimensionais, (e) laminado, (f) tecido de fibra, (g) híbrido de fibra e partícula e (h) trançado. Adaptado de [11].

Desde a década de sessenta, aumentou-se rapidamente a produção de compósitos sintéticos que incorporam fibras finas em polímeros e metais. A veloz expansão dos compósitos ocorreu devido ao desenvolvimento das fibras de carbono, que têm elevada rigidez específica (rigidez/densidade) e resistência específica (resistência/densidade), bem superior aquelas apresentadas pelos compósitos com reforço de fibra de vidro [9]. Apesar disso, devido ao seu baixo custo, existem mais aplicações atualmente para os compósitos de fibra de vidro do que para os de fibra de carbono.

A maioria dos carros hoje tem para-choques de fibra de vidro cobrindo uma armação de aço e também algumas de suas peças estéticas. A fibra de vidro tornou-se o material padrão em embarcações de passeio. Apesar da fibra de vidro ser encontrada em carros, barcos, aviões e outros, ela também pode ser usado como isolante em fios, nos quais as fibras de vidro estão entrelaçadas com lã. A lã de fibra de vidro é um material de fina espessura usado para isolamento térmico e absorção acústica [7].

Por ser um material que atende melhor as premissas que este trabalho se propõe, os compósitos com reforço de fibras de carbono serão discutidos com maior detalhe.

O carbono é um elemento muito leve com uma densidade de  $2,27 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e que pode existir em uma variedade de formas cristalinas. A estrutura de grafite, onde os átomos de carbono são dispostos em forma de camadas hexagonais, é a melhor das variedades para o desempenho da fibra. Carbono na forma de grafite é altamente anisotrópico, com um módulo teórico de Young em uma camada igual a cerca de 1000 GPa, enquanto que ao longo do eixo igual a cerca de 35 GPa. A forte ligação entre os átomos de carbono na camada no plano explicam no elevado módulo de resistência, enquanto a fraca interação das ligações de van der Waals presente entre as camadas vizinhas originam o menor módulo de Young encontrado nessa direção. Conseqüentemente, o mais alto grau de orientação dos planos preferenciais de orientação deve ser o da direção das fibras [9].

Embora não tenha conquistado reconhecimento amplo como outros materiais convencionais, primordialmente por ser relativamente caro, o compósito com reforço em fibra de carbono tem muitas aplicações na indústria aeroespacial e automotiva, bem como em veleiros e em bicicletas e motos de alta qualidade de desempenho.

Ainda assim, a principal impulsionadora do desenvolvimento de compósitos de fibras de carbono ainda é da indústria aeroespacial com a sua necessidade de materiais com alta resistência, alta rigidez e baixa densidade. Recentemente, a indústria da construção também começou a perceber que este material tem potencial para fornecer soluções para muitos problemas associados com a deterioração ou fortalecimento de estruturas. O uso efetivo da fibra de carbono pode aumentar significativamente a vida útil de estruturas, minimizando os requisitos de manutenção. Os compósitos de fibra de carbono são usados atualmente em todo

o mundo para adaptar e reparar as infraestruturas estruturalmente deficientes, como pontes e edifícios. Usado em barras de reforço para concreto, pode eliminar potenciais problemas de corrosão e aumentar substancialmente a resistência estrutural [10].

Além disso, com o desenvolvimento de novas técnicas de fabricação, houve uma melhora sutil nos custos de fabricação, o que está tornando cada vez mais comum a sua utilização em bens de consumo como, laptops, varas de pesca, raquetes de tênis, instrumentos musicais, tacos de golfe e sinuca.

### 2.2.2. Macromecânica

Considerando-se uma única camada de fibra reforçada de material compósito, como mostrado na Figura 2.11, define-se que o sistema de coordenadas ortogonais 1-2-3 é usado quando as direções são tomadas como se segue [11]:

1. Eixo está alinhado com a direção da fibra.
2. Eixo no plano da camada e perpendicular às fibras.
3. Eixo perpendicular ao plano da camada e, portanto, também perpendicular às fibras.

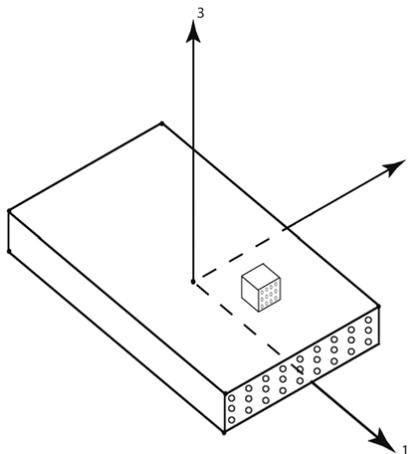


Figura 2.11 – Ilustração do sistema de coordenadas principal do material laminar. Adaptado de [10].

A direção-1 também é chamada de “direção da fibra”, enquanto a 2 - e 3 - são chamadas de direções da matriz. Este sistema de coordenadas 1-2-3 é chamado de sistema de coordenadas principal material. As tensões e deslocamentos na camada (também chamada de lâmina) serão descritos no sistema de coordenadas principal material [11].

Neste nível de análise, a tensão de uma fibra individual ou um elemento de matriz não é considerado. O efeito do reforço de fibra se espalha sobre o volume do material. Supomos que as duas fases (reforço e matriz) do sistema são substituídas por um material único e homogêneo. Obviamente, esse material único não tem as mesmas propriedades em todas as direções. Tal material, com propriedades diferentes em três direções ortogonais, é chamado de material ortotrópico.

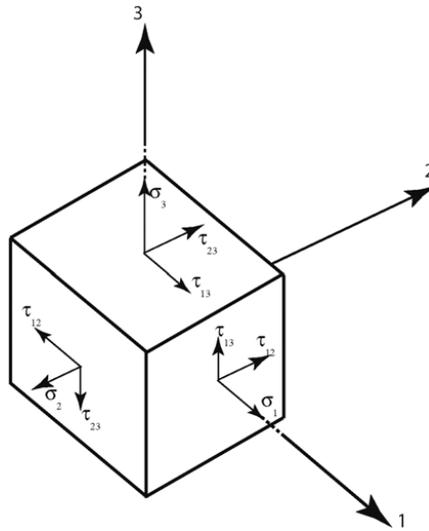


Figura 2.12 – Elemento infinitesimal de tensão de um material reforçado com fibras. Adaptado de [13].

As tensões em um pequeno elemento infinitesimal retirado da camada são ilustradas na Figura 2.12. Há três tensões normais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , e três tensões de cisalhamento  $\tau_{12}$ ,  $\tau_{23}$  e  $\tau_{13}$ . Estas tensões estão relacionadas com as deslocamentos  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ ,  $\gamma_{12}$ ,  $\gamma_{23}$  e  $\gamma_{13}$  da seguinte forma [10]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.53)$$

Na equação (2.53),  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  e são os módulos de elasticidade ao longo das direções 1, 2 e 3, respectivamente. Além disso,  $\nu_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) são os diferentes coeficientes de Poisson,

enquanto  $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{13}$  e são os três módulos de cisalhamento. A equação (2.53) pode ser escrita de forma compacta como se segue [11]:

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \quad (2.54)$$

Onde,  $\{\varepsilon\}$  e  $\{\sigma\}$  representam os vetores de tensão e stress, respectivamente, e  $[S]$  é chamada de matriz de flexibilidade. A matriz inversa da matriz de flexibilidade  $[S]$  é chamada de matriz de rigidez  $[C]$  dada, em geral, como segue:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.55)$$

As constantes do material que aparecem na matriz de flexibilidade não são todas independentes. Isso fica claro uma vez que a matriz de flexibilidade é simétrica. Portanto, temos as seguintes equações relacionando as constantes do material [11]:

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (2.56)$$

$$\frac{\nu_{13}}{E_1} = \frac{\nu_{31}}{E_3} \quad (2.57)$$

$$\frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3} \quad (2.58)$$

As equações (2.56), (2.57) e (2.58) são chamadas de relações constantes de reciprocidade do material. As relações de reciprocidade podem ser derivadas independentemente da simetria da matriz de flexibilidade - na verdade, concluí-se que a matriz de flexibilidade é simétrica ao se usar essas relações. Assim, existem nove constantes independentes de material, para materiais ortotrópicos.

Um material é chamado transversalmente isotrópico se o seu comportamento na direção 2 é idêntico ao seu comportamento na direção 3. Para este caso,  $E_2 = E_3, \nu_{23} = \nu_{13}, e G_{12} = G_{13}$ . Além disso, temos a seguinte relação:

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \quad (2.59)$$

### 2.2.3. Constantes Elásticas no Sistema de Referência Global

As propriedades de engenharia ou constantes elásticas com respeito ao sistema de coordenadas da lâmina 1-2-3, porém pode-se também definir constantes elásticas no que diz respeito ao sistema de coordenadas XYZ global [11]. As constantes elásticas com base no sistema de coordenadas global XYZ são dadas como seguinte:

$$E_x = \frac{E_1}{m^4 + \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12}\right)n^2m^2 + \frac{E_1}{E_2}n^4} \quad (2.60)$$

$$\nu_{xy} = \frac{\nu_{12}(m^4 + n^4) - \left(1 + \frac{E_1}{E_2} - \frac{E_1}{G_{12}}\right)n^2m^2}{m^4 + \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12}\right)n^2m^2 + \frac{E_1}{E_2}n^4} \quad (2.61)$$

$$E_y = \frac{E_2}{m^4 + \left(\frac{E_2}{G_{12}} - 2\nu_{21}\right)n^2m^2 + \frac{E_2}{E_1}n^4} \quad (2.62)$$

$$\nu_{yx} = \frac{\nu_{21}(m^4 + n^4) - \left(1 + \frac{E_2}{E_1} - \frac{E_2}{G_{12}}\right)n^2m^2}{m^4 + \left(\frac{E_2}{G_{12}} - 2\nu_{21}\right)n^2m^2 + \frac{E_2}{E_1}n^4} \quad (2.63)$$

$$G_{xy} = \frac{G_{12}}{n^4 + m^4 + 2\left(\frac{2G_{12}}{E_1}(1 + 2\nu_{12} + \frac{2G_{12}}{E_1} - 1)\right)n^2m^2} \quad (2.64)$$

Onde,  $m$  é o coseno do ângulo de inclinação das fibras e  $n$  o seno.

Estas propriedades têm como base o fato de um elemento de fibra reforçada com material compósito suas fibras orientadas em um ângulo arbitrário apresenta um deslocamento de corte quando sujeitos a uma tensão normal, e que também exibe uma estirpe extensional quando sujeito a um esforço transversal.[11]

#### **2.2.4. Aplicações em robótica**

Existem vários exemplos de aplicações dos materiais compósitos e mais especificamente daqueles com reforço de fibra de carbono na área da robótica, principalmente naquele voltada para os robôs móveis, alvos de pesquisas ou de atividades de hobby. Na robótica industrial, porém, ainda não existe a cultura de utilização em larga escala deste material.

No ano de 2005, a fabricante alemã de manipuladores robóticos KUKA, lançou o primeiro robô industrial com (ao menos em grande quantidade) uma de suas ligações toda fabricada de um compósito de epóxi e fibra de carbono [13][14]. Os benefícios dessa substituição foram notórios em relação à velocidade de operação do manipulador e do ganho na razão: carga paga/massa total. Porém, antes que a idéia de utilizar esse material chegasse a indústria que fabrica robôs manipuladores, já havia pesquisas investigando o assunto. Desde abordagens experimentais até o campo de investigação dos robôs manipuladores flexíveis.

Young Goo Kim et. al. [14] aborda a construção de uma das ligações – especificamente a terceira, e maior - de um manipulador robótico de seis eixos, de duas maneiras diferentes: um híbrido entre material compósito – reforço em fibra de carbono – e alumínio e outro somente com peças com reforço em fibra de carbono e matriz epóxi – com exceção de uma. Chang Sup Lee et. al. [15] trata sobre uma opção de manufatura de uma estrutura sanduiche para as ligações de um manipulador de telas de LCD de grandes dimensões.

Dai Gil Lee et. al. [16] discute a aplicação de materiais compósitos em diferentes áreas onde a sua aplicação ainda não é difundida. Dividida nas três áreas citadas no título, a parte referente a robôs define as vantagens de se utilizar o material. O mesmo autor em [17] avalia a partir da construção de um robô antropomórfico feito de material compósito com reforço de fibra de carbono, valores experimentais de resposta dinâmica da estrutura e os compara aqueles de uma mesma estrutura feita de aço. Em [18], ainda do mesmo autor, a mesma proposta é feita,

porém, o objeto de discussão é um robô do tipo SCARA e a comparação das respostas dinâmicas do manipulador é feita para uma estrutura semelhante de liga de alumínio.

A. Ghazavi et. al. em [19] investiga através de análises experimentais, as deflexões e respostas dinâmicas de um manipulador articulado cuja uma das ligações, anteriormente feita em alumínio, é substituída por uma de compósito de fibra de grafite. B.S Thompson et. al. [20] discute também os ganhos do uso desse material, à luz de um novo teorema de variação para a análise dinâmica da estrutura e faz uma avaliação preliminar comparando essas respostas com aqueles de uma estrutura semelhante em aço.

G. Caprino et. al. [21] trata da otimização da utilização de materiais compósitos em robôs manipuladores a partir do exemplo de um braço manipulador com medidores a laser no end effector. A idéia é otimizar o projeto a partir da frequência natural da estrutura. Ou seja, fundamentar todo o projeto em função de obter um grande valor de frequência natural para o primeiro modo ou frequência fundamental de vibração de maneira a evitar que ocorra ressonância durante as realizações das tarefas por mais rápida que sejam realizadas.

Muzio M. Gola et. al.[22] discursa sobre projeto de robôs com compósitos com reforço de fibra de carbono destrinchando vários aspectos de avaliação durante a fase de desenvolvimento de maneira a escolher o material ideal que atende um valor ótimo dentre as necessidades do projeto. S. Ramachandran et. al. [23] apresenta os resultados de simulações feitas utilizando os métodos dos elementos finitos para comparar a resposta dinâmica de três tipos de materiais para robôs manipuladores de estrutura cinemática fechada: aço, alumínio e duas laminas diferentes de epoxy-carbono. O estudo conclui como superior a resposta encontrada para os manipuladores feitos de materiais compósitos.

No campo dos robôs manipuladores com estrutura flexível, D.X. Liao et. al. [24] discute a otimização das orientações das fibras de carbono no reforço do compósito de maneira a adequar as necessidades do ponto de vista de vibrações residuais durante as movimentações do manipulador. Uma comparação com um manipulador real é feita comprovando a eficácia da otimização realizada pelo estudo quando comparados aos efeitos da vibração da ferramenta no momento de parada do manipulador.

N.G. Chalhoub et. al. [25] utiliza também de simulação em elementos finitos para comprovar a eficácia da melhoria na resposta dinâmica quando se utiliza o material compósito em substituição ao material comum para um manipulador. O trabalho se baseia na substituição de apenas uma das ligações do manipulador, a maior, e utilizando a teoria de vigas de Timoshenko, consegue realizar o modelamento necessário para a avaliação proposta.

F. Gordaninejad et. al. [26] analisa as características dinâmicas e os efeitos dos deslocamentos que ocorrem durante a movimentação de uma estrutura que teoricamente é tratada como rígida, mas que uma vez estudada como flexível trás grandes vantagens do ponto de vista de precisão e acurácia da estrutura. A utilização do material compósito aqui se justifica uma vez que é possível atingir ótimo amortecimento da estrutura. Todas as análises são baseadas em simulação via elementos finitos, incluindo deflexões em várias direções e as interações nas interfaces ente os corpos rígidos e flexíveis.

É importante ressaltar que de todos os estudos encontrados na literatura a cerca do assunto apenas um [20] lida com a questão dos custos envolvidos na substituição dos materiais convencionais por materiais compósitos, e mais especificamente, aqueles com reforço de fibra de carbono e matriz de resina epóxi. Porém, não lida diretamente com os custos envolvidos comparados com os ganhos que todo mecanismo pode obter quando a substituição de outros componentes (como servomotores) e ou ganhos diretamente baseados em uma análise cinemática do manipulador. Essas são as premissas desta dissertação, unir as vantagens já bem descritas na literatura aos ganhos em termos financeiros, para que seja justificável do ponto de vista de fabricação em grande escala, manipuladores robóticos feitos em materiais compósitos.

## **2.3.Elementos finitos**

### **2.3.1.Introdução**

O método dos elementos finitos ou FEM é uma ferramenta numérica poderosa para resolver equações diferenciais parciais. Muitos problemas físicos e de engenharia em meios contínuos são descritos por equações diferenciais parciais. A solução exata destes problemas na sua forma analítica só é possível para sistemas muito simples. Assim, para sistemas mais complexos, envolvendo geometrias e condições de contorno mais sofisticadas, não é possível

se obter uma solução exata. Nestes casos deve-se optar por procedimentos de aproximação com precisão aceitável para a aplicação de engenharia em questão [27].

Antes do aparecimento do FEM, a análise dos meios contínuos era efetuada por resolução direta dos sistemas de equações de derivadas parciais que regem o fenômeno, tendo em consideração as necessárias condições fronteira. Para facilitar a aplicação desta técnica a problemas não elementares, era comum recorrer a séries de Fourier. Devido à sua complexidade, estes procedimentos só eram aplicáveis a meios contínuos homogêneos e de geometria simples [27].

Inúmeros métodos de precisão para solução destes problemas são usados em engenharia, entre eles pode-se destacar: método dos elementos de contorno, método das diferenças finitas, método dos volumes finitos, método de Galerkin, método de Rayleigh-Ritz e o método dos elementos finitos. Quando e como cada um é utilizado depende do tipo de aplicação, da solução desejada, capacidade computacional etc. que um engenheiro tem em mãos no momento de resolver um problema de engenharia. O FEM acabou se tornando o mais popular de todos, sobretudo pelo aparecimento de diferentes pacotes de software comerciais sobre o assunto, como por exemplo, o ANSYS, NASTRAN/PATRAN, ADAMS, ABAQUS, etc. [27].

A ideia básica do FEM é realizar uma divisão do domínio de integração de uma estrutura ou sistema de interesse, em um conjunto de pequenas regiões, chamadas de elementos finitos, transformando o domínio de contínuo para discreto. Esta divisão do domínio é conhecida como malha, que nada mais é do que o conjunto de elementos finitos resultante da discretização. A malha é formada de elementos compostos de faces e nós, que são pontos de intersecção e ligação entre os elementos. O FEM não busca uma função admissível que satisfaça as condições de contorno para todo o domínio, o que pode ser praticamente impossível em um problema complexo, e sim soluções em cada elemento separadamente. Suponha-se que o funcional para um elemento seja  $\Psi_i$ , sua soma sobre a malha com  $n$  elementos corresponde ao funcional de todo o domínio [27]:

$$\Psi = \sum_{n=1}^n \Psi_i \quad (2.79)$$

Para cada um dos elementos  $i$  existe uma função de interpolação  $u$  de ordem  $m$  descrita em função dos nós dos elementos (parâmetros nodais  $\alpha_j$ ) e por funções de forma ( $\phi$ ). A função de interpolação é descrita como:

$$u = \sum_{j=1}^m \alpha_j \phi_j \quad (2.80)$$

O funcional da equação (2.73) fica sendo descrito por:

$$\Psi(\alpha_j) = \sum_{i=1}^n \Psi(\alpha_j)_i \quad (2.81)$$

A aplicação das condições estacionárias gerais origina um sistema de equações algébricas lineares. A solução do sistema de equações fornece os valores dos parâmetros nodais  $\alpha_j$ . Os parâmetros nodais podem estar associados a deslocamentos, forças internas, tensões, temperaturas, pressão etc. e dependem da formulação do elemento usado.

### 2.3.2. Tipos de Análises

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. [28]

As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise de uma estrutura deveria obrigatoriamente ter em consideração os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática

Na análise de uma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos

componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, todo o estudo é feito com base na geometria inicial indeformada. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica. É também frequente considerar que, ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deslocamentos é linear. Nos casos em que esta simplificação não é considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análise não linear. [28]

As estruturas podem ser classificadas quanto à sua geometria como reticuladas, laminares ou sólidas. Estas últimas são as mais genéricas, sendo classificadas como sólidas as que não apresentarem características que as permitam enquadrar no grupo das laminares ou das reticuladas. As estruturas laminares são as que se desenvolvem para ambos os lados de uma superfície média, mantendo-se na sua vizinhança. É o caso de uma lâmina cuja espessura é muito inferior às restantes dimensões. Quando a superfície média é plana, a estrutura laminar pode ser classificada como parede, laje ou casca plana. Uma parede apenas se encontra sujeita a ações paralelas ao seu plano médio. Uma laje pode ter aplicadas forças perpendiculares ao plano médio e momentos cujo vetor está contido no plano médio. Uma estrutura laminar plana sujeita a outros tipos de ações é designada casca plana. Quando a superfície média não é plana, tem-se uma casca tridimensional. [28]

As estruturas reticuladas são as constituídas por barras prismáticas, cujas dimensões transversais são muito menores do que o comprimento do respectivo eixo. Neste tipo de estruturas é habitual distinguir os pórticos das treliças, conforme é ou não considerada a compatibilidade de rotações nas extremidades de barras adjacentes. [28]

É possível tratar com grande eficiência uma classe de problemas de análise de estruturas designados axissimétricos. Estes ocorrem quando a estrutura é um sólido de revolução e as ações são todas axissimétricas em relação ao mesmo eixo. Neste tipo de problemas é ainda possível distinguir o caso do sólido de revolução do caso da lâmina de revolução. [28]

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Simulações virtuais

##### 3.1.1. Análise de corpos rígidos

Para a análise dos torques e potências envolvidas na movimentação do manipulador, e para comparar os resultados dinâmicos das estruturas compostas pelos diferentes materiais, foi considerado que as ligações do manipulador formam uma cadeia de corpos rígidos que não sofrem deslocamento durante a movimentação ou que esses deslocamentos são muito pequenas e por isso são negligenciadas para essa primeira análise do estudo.

Uma vez que este trabalho avalia as estruturas de dois manipuladores reais, o primeiro passo foi obter os *datasheets*, especificações e modelos tri dimensionais dos mesmos. Os dois modelos de manipuladores selecionados são o KR 16-2 e o KR 150-2 da fabricante KUKA Robotics.

Acessando o site da empresa foi possível fazer o *download* de todo esse material, inclusive dos modelos tridimensionais dos robôs, disponíveis em diversos formatos para diferentes softwares de CAD. Neste trabalho, o software de CAD escolhido para realizar análises necessárias foi o UG NX 5.0 da empresa SIEMENS, devido à familiaridade do autor com o mesmo. A Figura 3.1 mostra os desenhos ilustrativos dos manipuladores contidos nos seus respectivos *datasheets*.

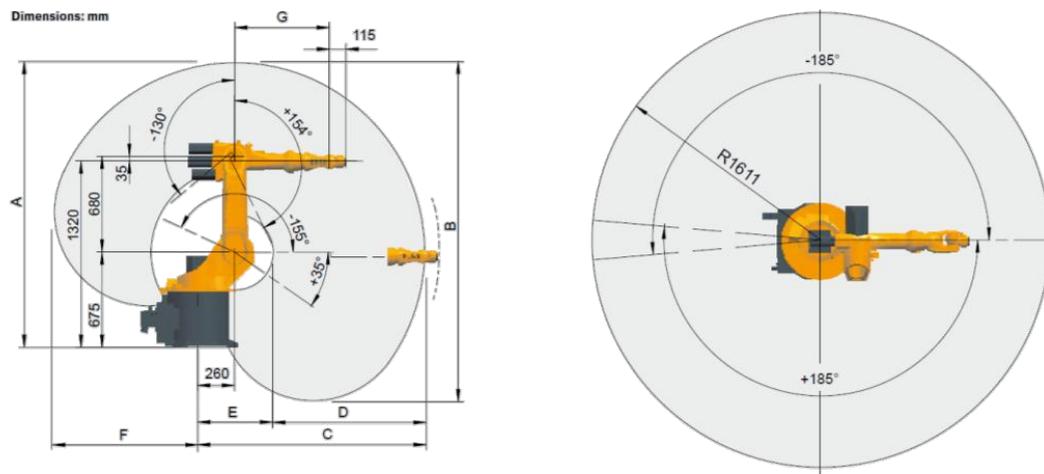


Figura 3.1 (a) – Desenhos ilustrativos do robô KR 16-2. Adaptado de [29].

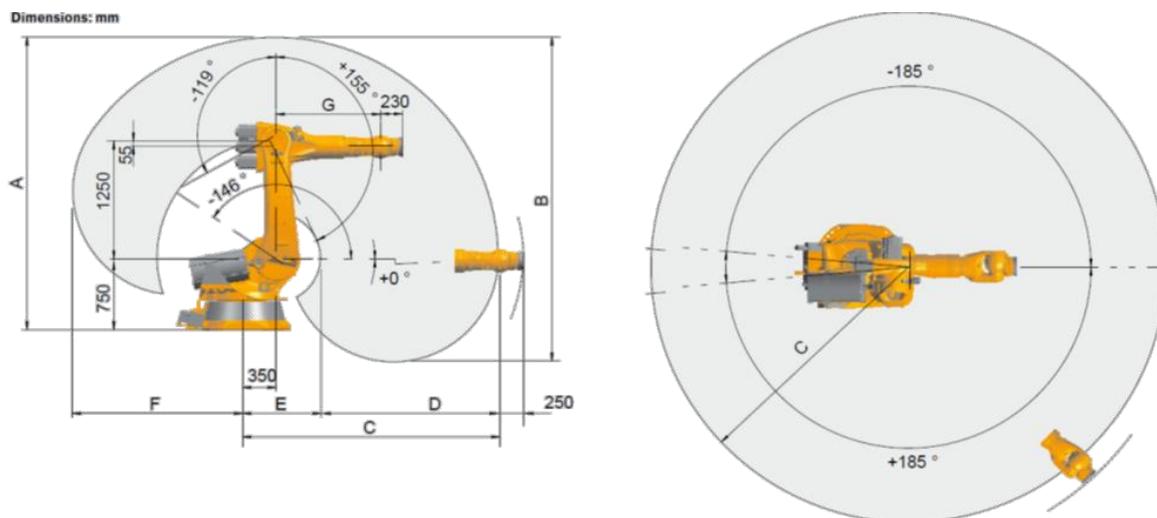


Figura 3.1(b) – Desenhos ilustrativos do robô KR 150-2. Adaptado de [29].

Estes modelos foram escolhidos devido a sua larga aplicação na indústria e por tornarem possível a avaliação de dois extremos de cargas de trabalho, 16 e 150 Kg, respectivamente para KR 16-2 e KR 150-2. As Tabelas 3.1 e 3.2 mostram, respectivamente, os dados fornecidos pelo fabricante sobre as principais características de cada manipulador e os limites de posicionamento e velocidade de suas juntas.

Tabela 3.1 – Principais características dos modelos estudados.

| <b>Modelo</b>   | <b>Número de eixos</b> | <b>Potências dos Motores instalados</b> | <b>Carga de trabalho</b> | <b>Repetibilidade de posicionamento</b> | <b>Massa total</b> |
|-----------------|------------------------|---|--------------------------|---|--------------------|
| <b>KR 16-2</b>  | 6                      | 8.8 kW                                  | 16 kg                    | ± 0.05 mm                               | 235 Kg             |
| <b>KR 150-2</b> | 6                      | 21.4 kW                                 | 150 kg                   | ± 0.06 mm                               | 1245 kg            |

Tabela 3.2 – Limites de posicionamento e velocidades das juntas dos manipuladores.

| Junta | KR 16-2                   |                           | KR 150-2                  |                           |
|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|       | Limites de posicionamento | Velocidade angular máxima | Limites de posicionamento | Velocidade angular máxima |
| 1     | $\pm 185^\circ$           | 156°/s                    | $\pm 185^\circ$           | 110°/s                    |
| 2     | +35°/-155°                | 156°/s                    | 0°/-146°                  | 110°/s                    |
| 3     | +154°/-130°               | 156°/s                    | +155°/-119°               | 100°/s                    |
| 4     | $\pm 350^\circ$           | 330°/s                    | $\pm 350^\circ$           | 170°/s                    |
| 5     | $\pm 130^\circ$           | 330°/s                    | $\pm 125^\circ$           | 170°/s                    |
| 6     | $\pm 350^\circ$           | 615°/s                    | $\pm 350^\circ$           | 238°/s                    |

Utilizando os modelos tridimensionais dos manipuladores, foram calculados os parâmetros necessários para determinar suas cadeias cinemáticas. As Tabelas 3.3 e 3.4 mostram os parâmetros de DH dos dois manipuladores.

Tabela 3.3 – Parâmetros de DH para o modelo KR 16-2.

| Ligação, i | $\alpha_{i-1}$ | $a_{i-1}$ | $\theta_i$ | $d_i$  |
|------------|----------------|-----------|------------|--------|
| 1          | -90°           | 260 mm    | 180°       | 675 mm |
| 2          | 0°             | 680 mm    | 180°       | 0      |
| 3          | 90°            | 35 mm     | -90°       | 0      |
| 4          | -90°           | 0         | 0          | 670 mm |
| 5          | 90°            | 0         | 0          | 0      |
| 6          | 180°           | 0         | 360°       | 115 mm |

Tabela 3.4 – Parâmetros de DH para o modelo KR 150-2.

| Ligação, i | $\alpha_{i-1}$ | $a_{i-1}$ | $\theta_i$ | $d_i$   |
|------------|----------------|-----------|------------|---------|
| 1          | -90°           | 350 mm    | 180°       | 750 mm  |
| 2          | 0°             | 1250 mm   | 180°       | 0       |
| 3          | 90°            | 55 mm     | -90°       | 0       |
| 4          | -90°           | 0         | 0          | 1100 mm |
| 5          | 90°            | 0         | 0          | 0       |
| 6          | 180°           | 0         | 360°       | 230 mm  |

Para criar a trajetória comum para os manipuladores, utilizou-se o *Robotics Toolbox for Matlab*, um *toolbox* de robótica de distribuição gratuita, desenvolvido para Matlab pelo professor Peter I. Corke [30]. Este *toolbox* oferece uma grande quantidade de ferramentas para análise de robôs manipuladores, dentre as quais a criação de trajetórias entre dois pontos, tanto em coordenadas cartesianas quanto para no espaço de juntas.

As representações matemáticas das cadeias cinemáticas dos manipuladores foram criadas no MATLAB e o *toolbox* utilizado para determinar as coordenadas no espaço das juntas da trajetória comum das simulações cinemáticas e dinâmicas de corpos rígidos.

A trajetória comum – posições e tempos – desenvolvida possui 5 pontos *goal* que exigem que o manipulador atinja o limite de velocidade angular em pelo menos uma das juntas do conjunto de posicionamento e do conjunto de orientação – ambos parâmetros de acordo com dados do fabricante. A Tabela 3.5 mostra os pontos no espaço das juntas e a sequência da trajetória criada.

Tabela 3.5 – Pontos e sequência para a trajetória comum.

| Sequencia | Ponto Inicial   | Ponto final   |
|-----------|---|---|
| 1         | $P_{ini} (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$      | $P_1 (120^\circ, 90^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$         |
| 2         | $P_1 (120^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$       | $P_2 (0^\circ, 90^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$                    |
| 3         | $P_2 (0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$         | $P_{ini} (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$          |
| 4         | $P_{ini} (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$      | $P_3 (-120^\circ, 90, -90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$              |
| 5         | $P_3 (-120^\circ, 90, -90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$          | $P_2 (0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$             |
| 6         | $P_2 (0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$         | $P_{ini} (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$          |
| 7         | $P_{ini} (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$      | $P_4 (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 350^\circ, 125^\circ, 350^\circ)$        |
| 8         | $P_4 (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 350^\circ, 125^\circ, 350^\circ)$    | $P_5 (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, -350^\circ, -125^\circ, -350^\circ)$     |
| 9         | $P_5 (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, -350^\circ, -125^\circ, -350^\circ)$ | $P_{ini} (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, -350^\circ, -125^\circ, -350^\circ)$ |

Apesar de se tratar de apenas uma trajetória comum para ambos os manipuladores, os pontos *goal* no espaço cartesiano são diferentes para cada manipulador, conforme mostra a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Coordenadas cartesianas dos pontos a trajetória comum.

| Ponto     | Coordenadas cartesianas     |                             |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
|           | KR 16-2                     | KR 150-2                    |
| $P_{ini}$ | $1045i + 1320k$             | $1680i + 1945k$             |
| $P_1$     | $- 862,5i + 1493,9j + 640k$ | $- 1465i + 2537,4j + 695k$  |
| $P_2$     | $1725i + 640k$              | $2930i + 695k$              |
| $P_3$     | $- 862,4i - 1493,9j + 640k$ | $- 1465i - 2537,4j + 695k$  |
| $P_4$     | $864i - 16,4j + 1227,2k$    | $1318i - 32,8j + 1759,5k$   |
| $P_5$     | $864i - 16,4j + 1412,8k$    | $1318,1i - 32,8j + 2130,5k$ |

Para obter uma melhor visualização da trajetória criada, a Figura 3.2 mostra a uma representação gráfica no plano XY de cada ponto da trajetória dos manipuladores e a sequência de execução.

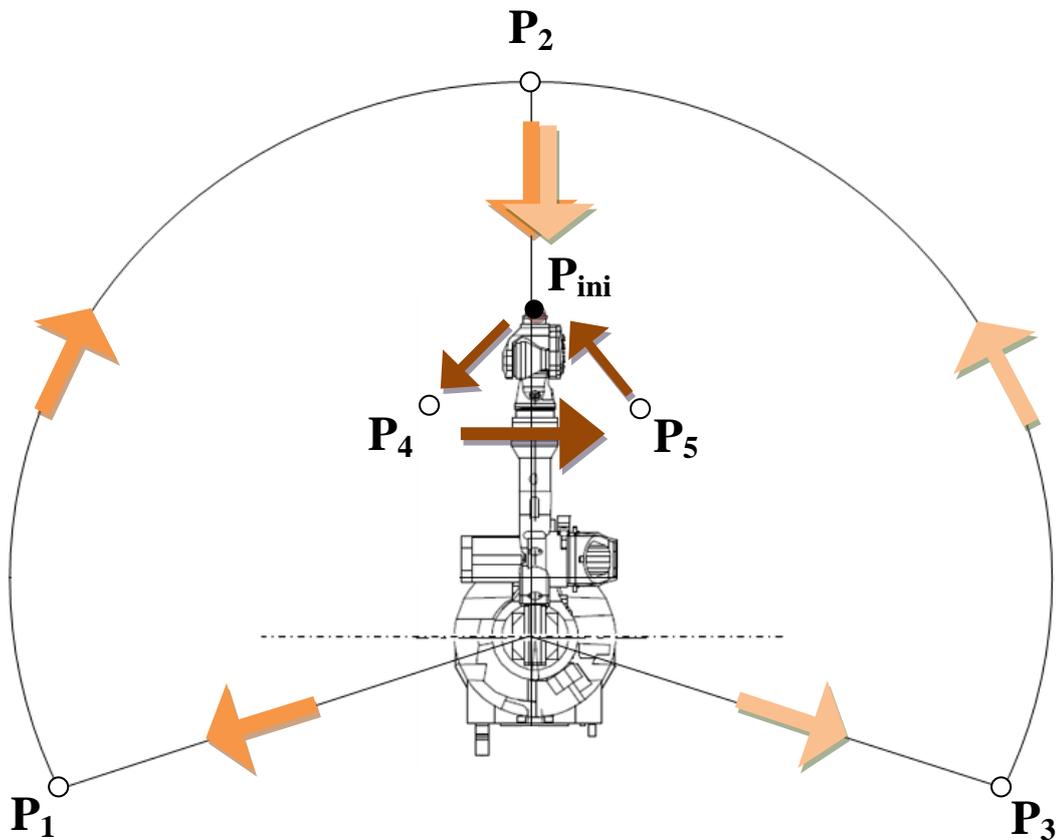


Figura 3.2 – Representação gráfica no plano XY da trajetória comum – fora de escala.

O tempo da trajetória foi ajustado para cada manipulador através de um processo iterativo – tentativa e erro – até que os resultados fossem de acordo com os desejados para a velocidade máxima, conforme supra citado. Os tempos foram ajustados com acréscimo ou decréscimo único de  $\pm 0.1s$ , para que os ganhos de velocidade fossem significativos. A Tabela 3.7 mostra os tempos de execução de cada trecho e de toda a trajetória para os dois manipuladores.

Tabela 3.7 – Sequências e tempos da trajetória comum.

| Modelo          | Sequência |      |      |      |      |      |      |      |      | Total |
|-----------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                 | 1         | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |       |
| <b>KR 16-2</b>  | 1,5s      | 1,5s | 1,1s | 1,5s | 1,5s | 1,1s | 2,0  | 4,0  | 2,0  | 16,2s |
| <b>KR 150-2</b> | 2,1 s     | 2,1s | 1,7s | 2,1s | 2,1s | 1,7s | 3,9s | 7,8s | 3,9s | 27,4s |

Esses valores de execução permitem que cada junta dos manipuladores seja capaz de atingir no mínimo 71% da sua velocidade angular máxima, durante algum momento na trajetória, As Figuras 3.3 e 3.4 mostram as curvas de posição – Theta - e velocidade – Omega – em função do tempo, durante a trajetória comum, para cada uma das juntas dos manipuladores, respectivamente, KR 16-2 e KR 150-2.

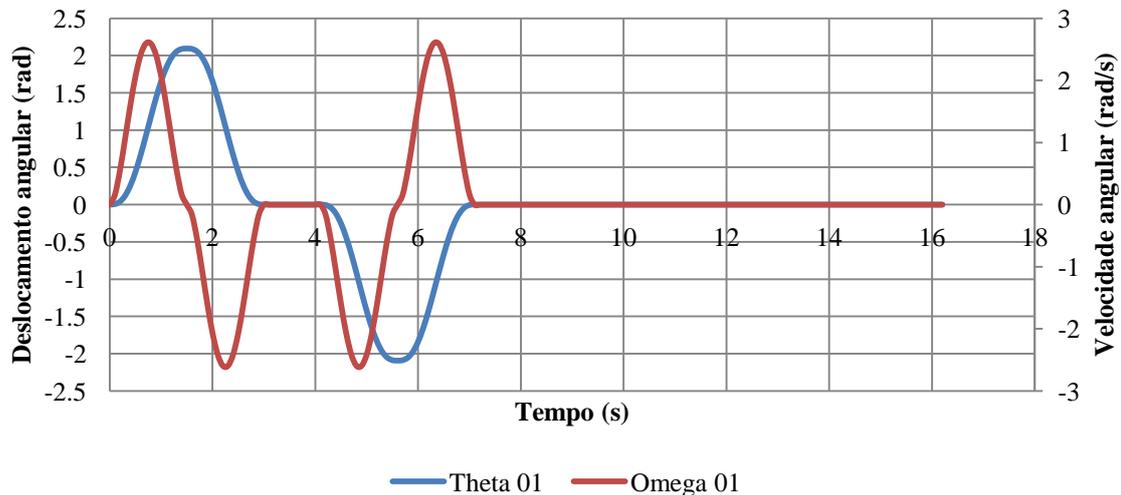


Figura 3.3 (a) – Velocidade e aceleração angular da junta 01 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.

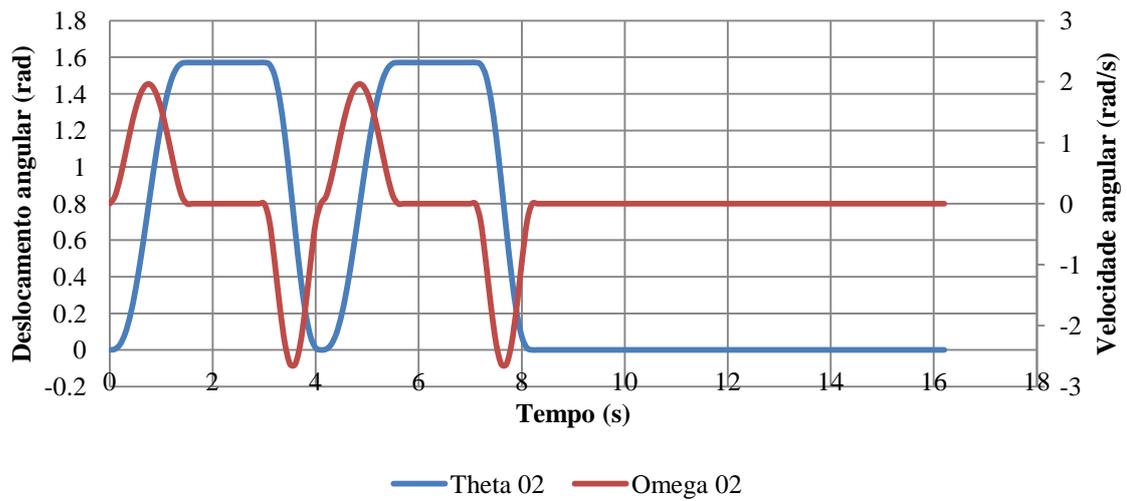


Figura 3.3 (b) – Velocidade e aceleração angular da junta 02 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.

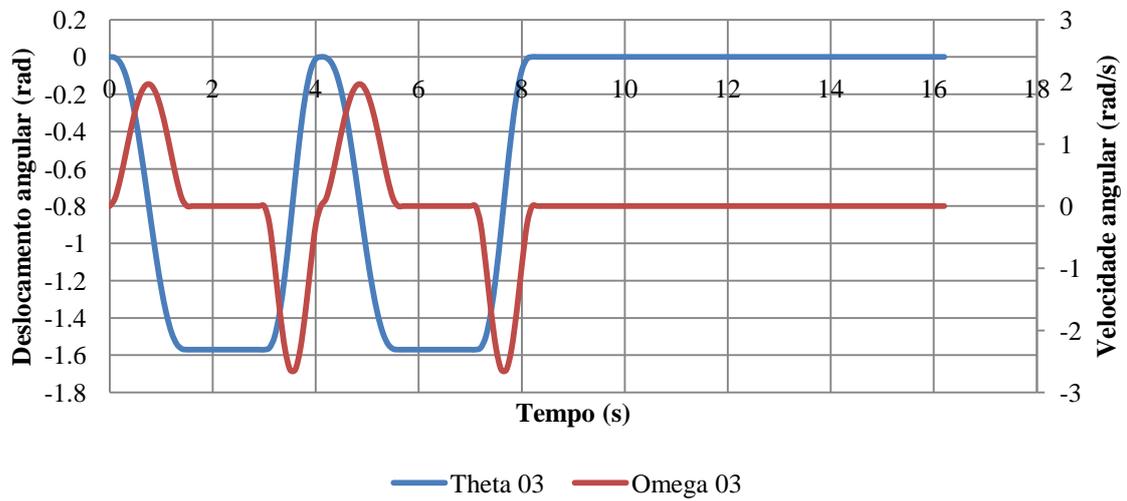


Figura 3.3 (c) – Velocidade e aceleração angular da junta 03 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.

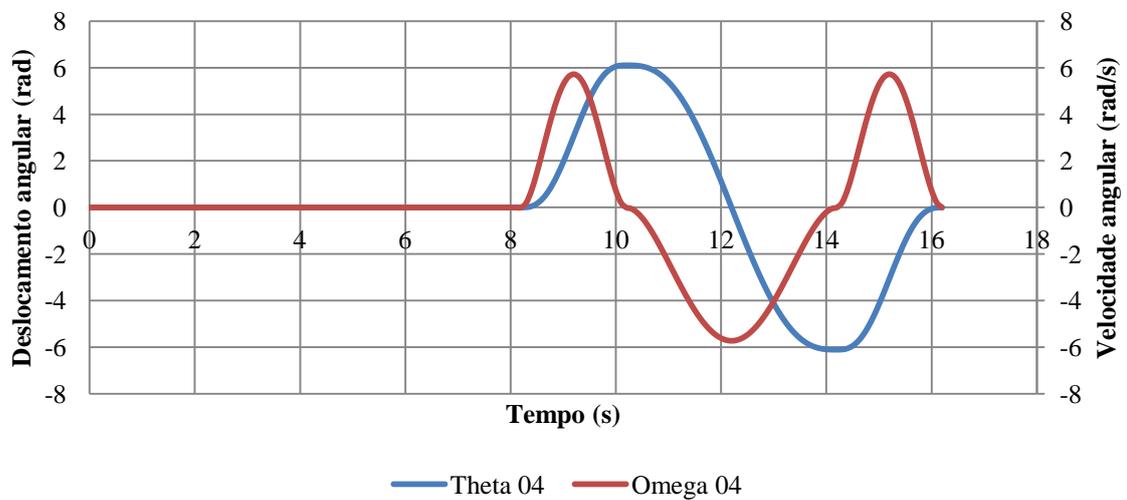


Figura 3.3 (d) – Velocidade e aceleração angular da junta 04 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.

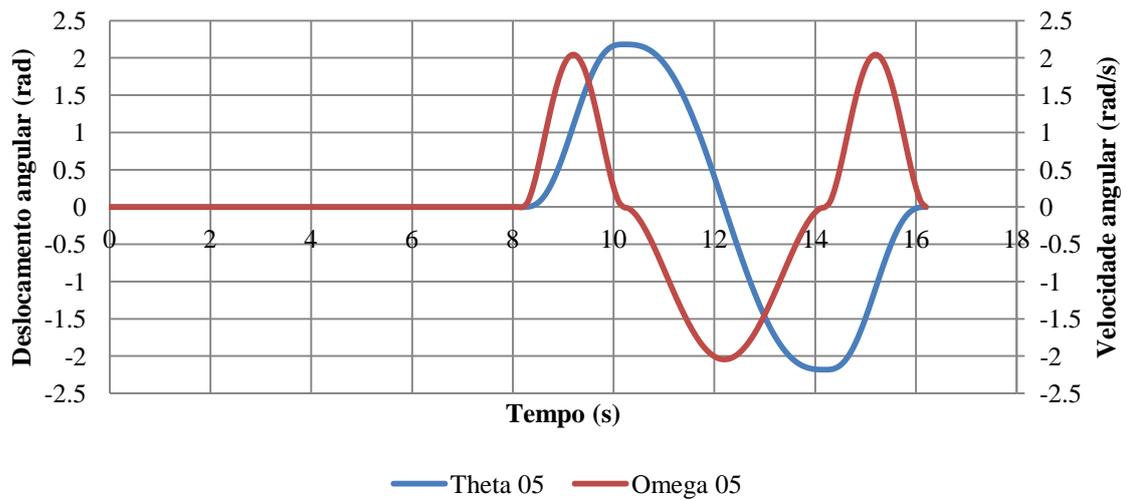


Figura 3.3 (e) – Velocidade e aceleração angular da junta 05 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.

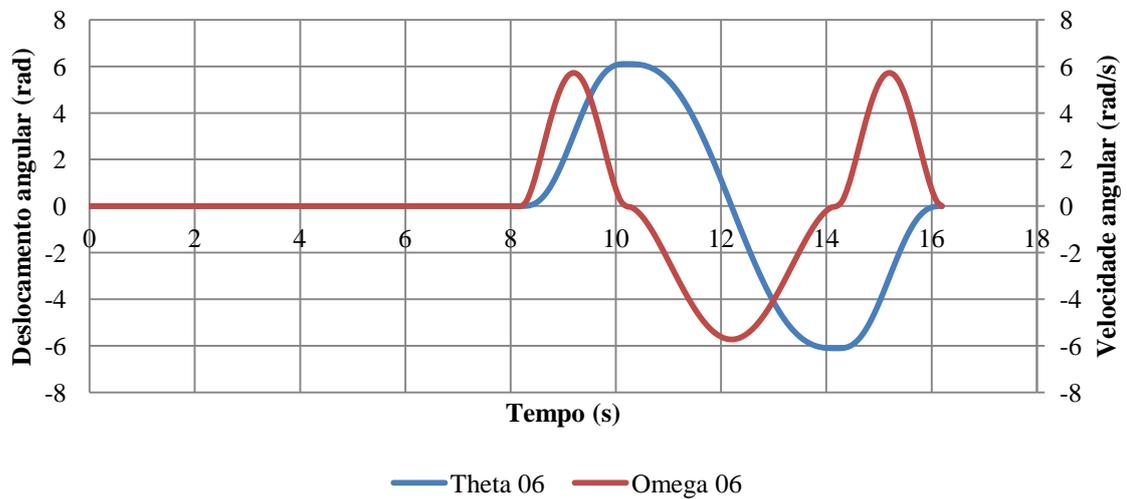


Figura 3.3 (f) – Velocidade e aceleração angular da junta 06 do modelo KR 16-2 durante a trajetória comum.

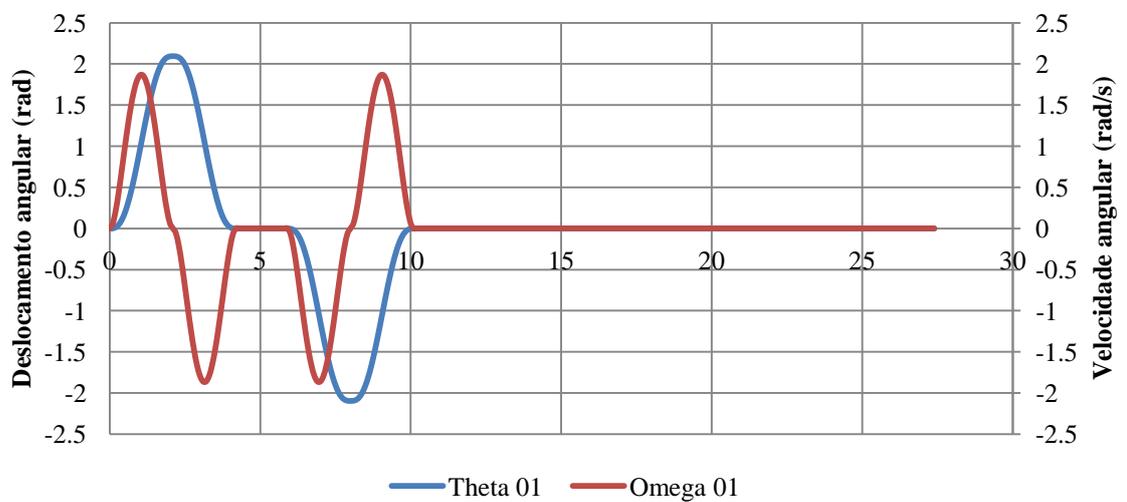


Figura 3.4 (a) – Velocidade e aceleração angular da junta 01 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.

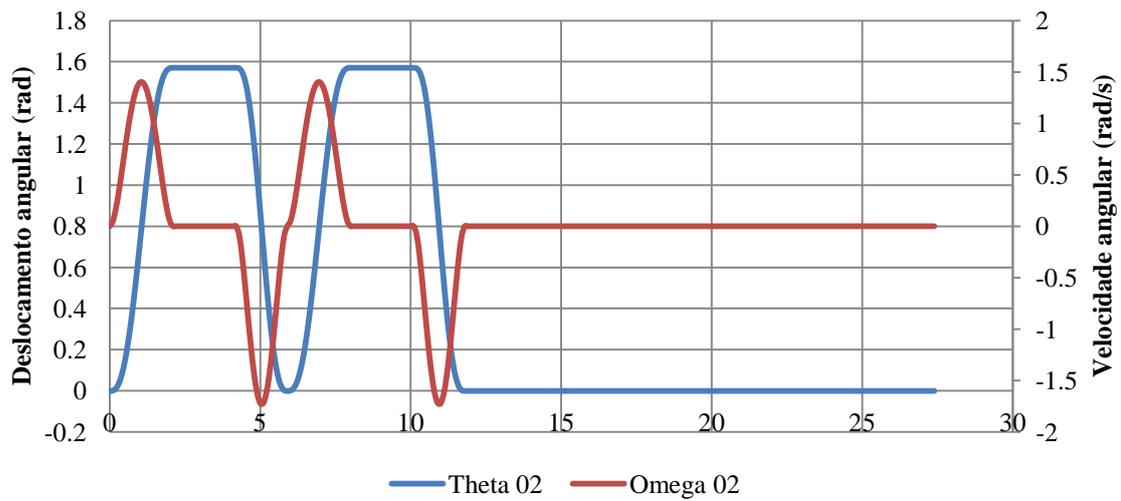


Figura 3.4 (b) – Velocidade e aceleração angular da junta 02 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.

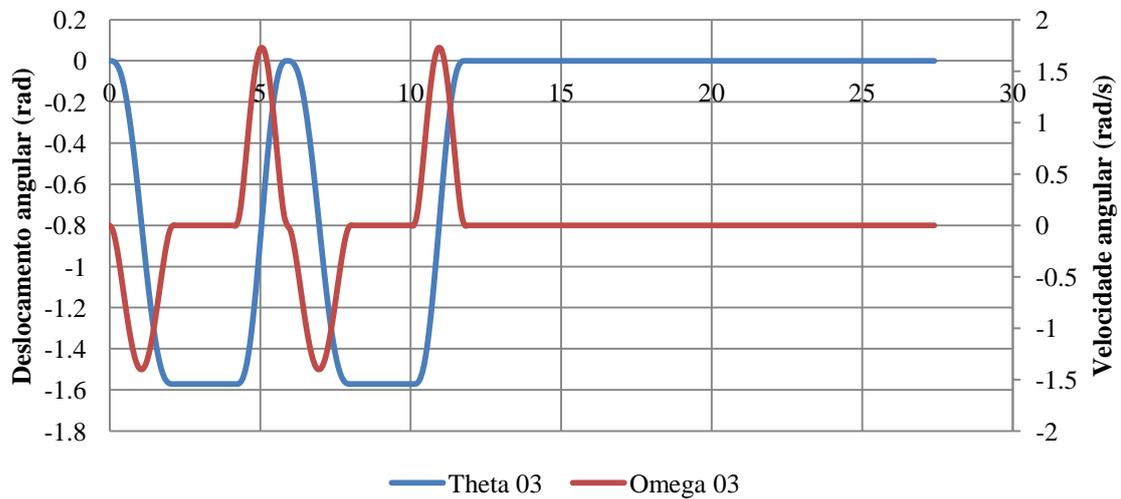


Figura 3.4 (c) – Velocidade e aceleração angular da junta 03 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.

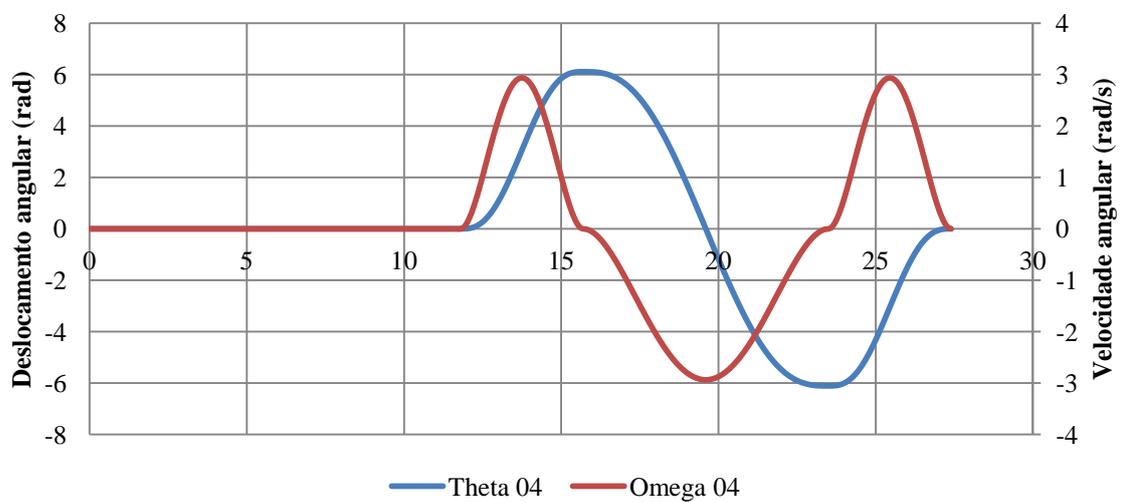


Figura 3.4 (d) – Velocidade e aceleração angular da junta 04 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.

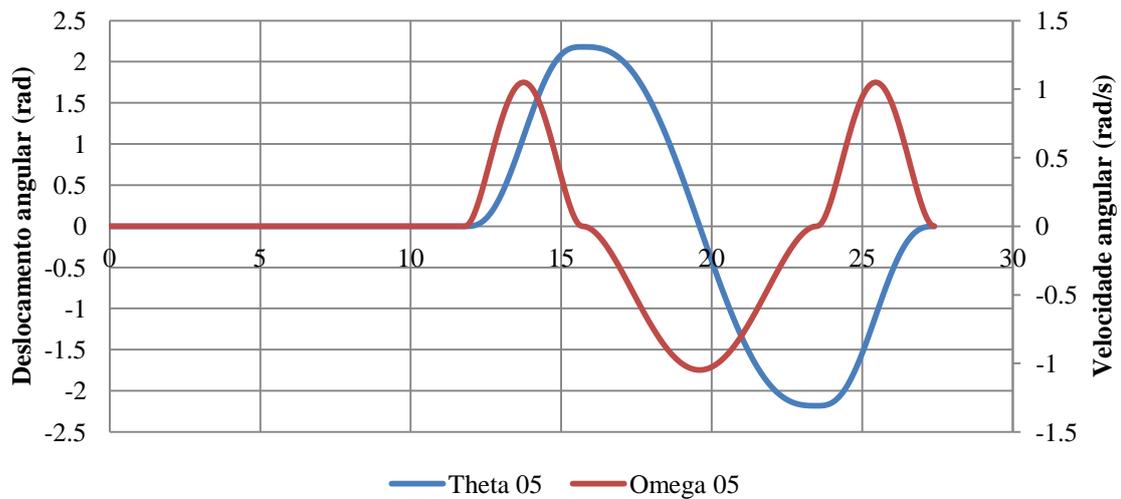


Figura 3.4 (e) – Velocidade e aceleração angular da junta 05 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.

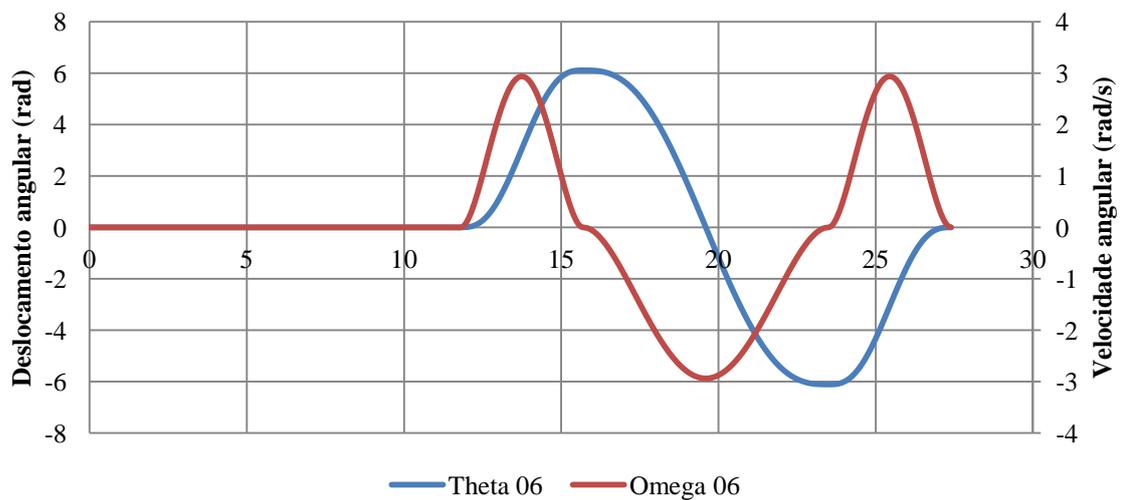


Figura 3.4 (f) – Velocidade e aceleração angular da junta 05 do modelo KR 150-2 durante a trajetória comum.

Com a trajetória determinada para cada manipulador, foram criados, dentro da biblioteca de materiais do UG NX 5.0, os três materiais desejados para avaliação: A356, AZ91 e AS4/3501-6. A Tabela 3.8 mostra algumas das propriedades dos materiais retiradas de [31] [32] [33].

Tabela 3.8 – Principais propriedades dos materiais estudados.

| Material          | Densidade<br>(kg/mm <sup>3</sup> ) | Módulo<br>elasticidade<br>(GPa) | Módulo<br>cisalhamento<br>(GPa) | Coefficiente<br>de Poisson | Tensão<br>Escoamento<br>(MPa) | Tensão<br>Máxima<br>(MPa)    |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| <b>A356</b>       | 2,67.10 <sup>-6</sup>              | 70                              | -                               | 0.35                       | 229                           | 263                          |
| <b>AZ91</b>       | 1,74.10 <sup>-6</sup>              | 45                              | -                               | 0.33                       | 142                           | 318                          |
| <b>AS4/3501-6</b> | 1,52.10 <sup>-6</sup>              | $E_1 = 148$<br>$E_2 = 10,5$     | $G_{12} = 5,61$                 | $\nu_{12} = 0.3$           | -                             | $X^t = 2137$<br>$Y^t = 53,4$ |

Outra propriedade de interesse para esse trabalho é a medida de rigidez específica,  $E_1/\rho g$ , que relaciona o módulo de elasticidade de cada material com o “peso” do mesmo. Para os materiais apresentados tem-se: 2,621, 2,58 e 9,74, respectivamente para A356, AZ91 e AS4/3501-6.

De posse dos modelos tridimensionais dos manipuladores, fez-se necessária a “quebra” do modelo tridimensional completo em seis modelos separados correspondentes a cada ligação móvel do manipulador. As Figuras 3.5 e 3.6, retiradas do material fornecido pelo fabricante, mostram a numeração utilizada para as ligações (L1,L2,L3,L4,L5 e L6) e juntas (J1,J2,J3,J4,J5 e J8) dos manipuladores KR 16-2 e KR 150-2, respectivamente, assim como os eixos de rotação das cadeias cinemáticas.

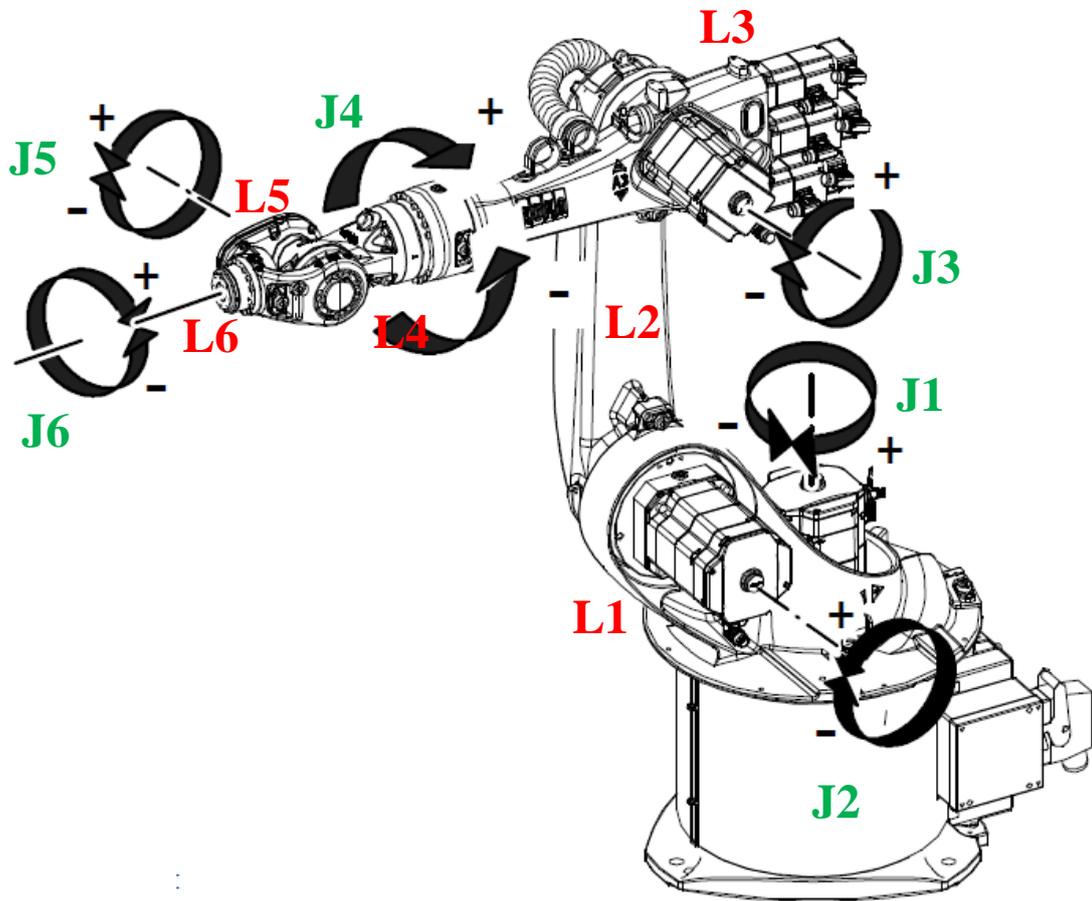


Figura 3.5 – Modelos tridimensionais do KR 6-2 com a numeração das juntas, eixos de rotação e ligações.

Adaptado de [30].

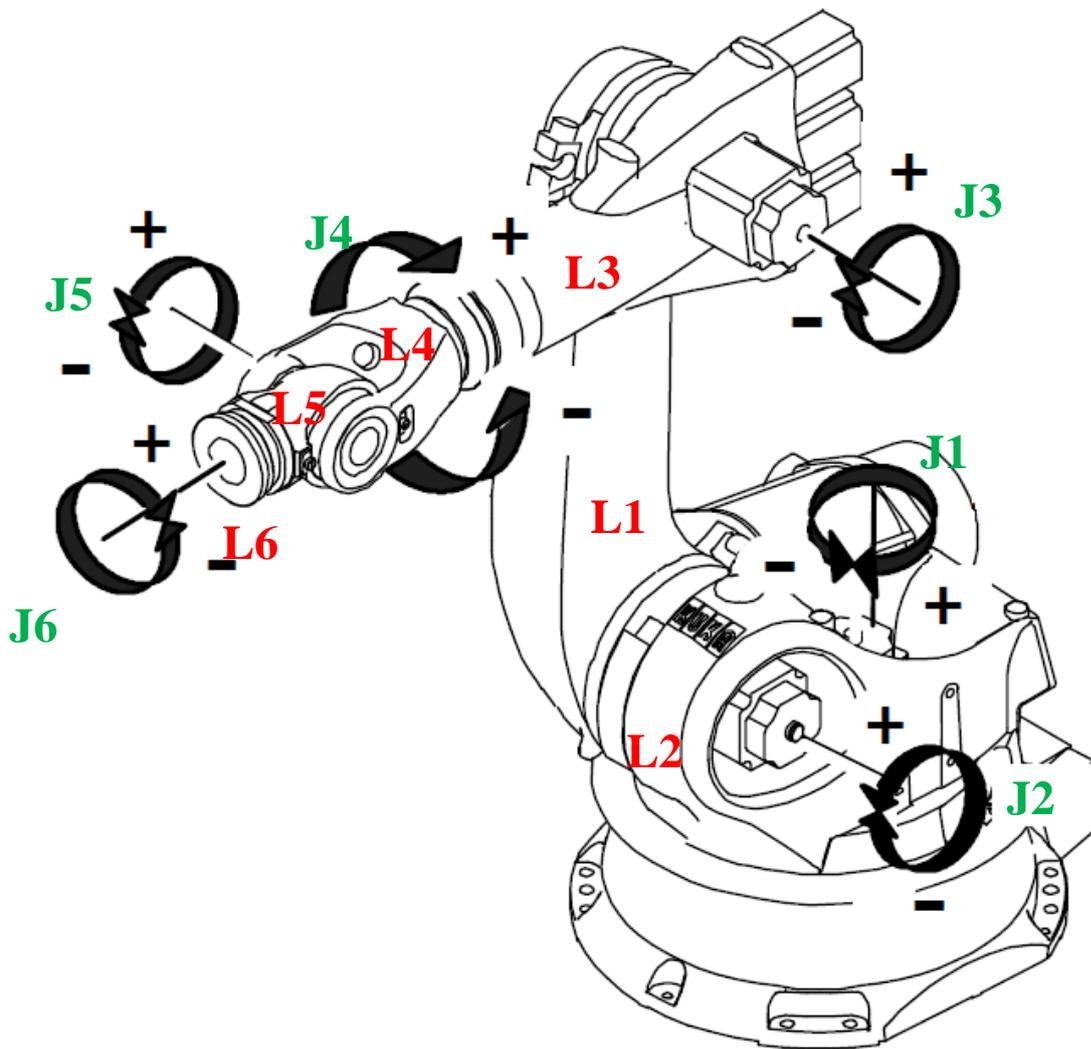


Figura 3.6 – Modelos tridimensionais do KR 150-2 com a numeração das juntas, eixos de rotação e ligações.  
Adaptado de [30].

As ligações separadas em diferentes modelos CAD individuais foram posicionadas de maneira a coincidir a aquela orientação do ponto inicial ( $P_{ini}$ ) da junta na cadeia cinemática, com a do eixo mundo do software CAD, como mostram as Figuras 3.7 e 3.8 - para as ligações 01 e 02 do manipulador KR 16-2 e KR 150-2, respectivamente.

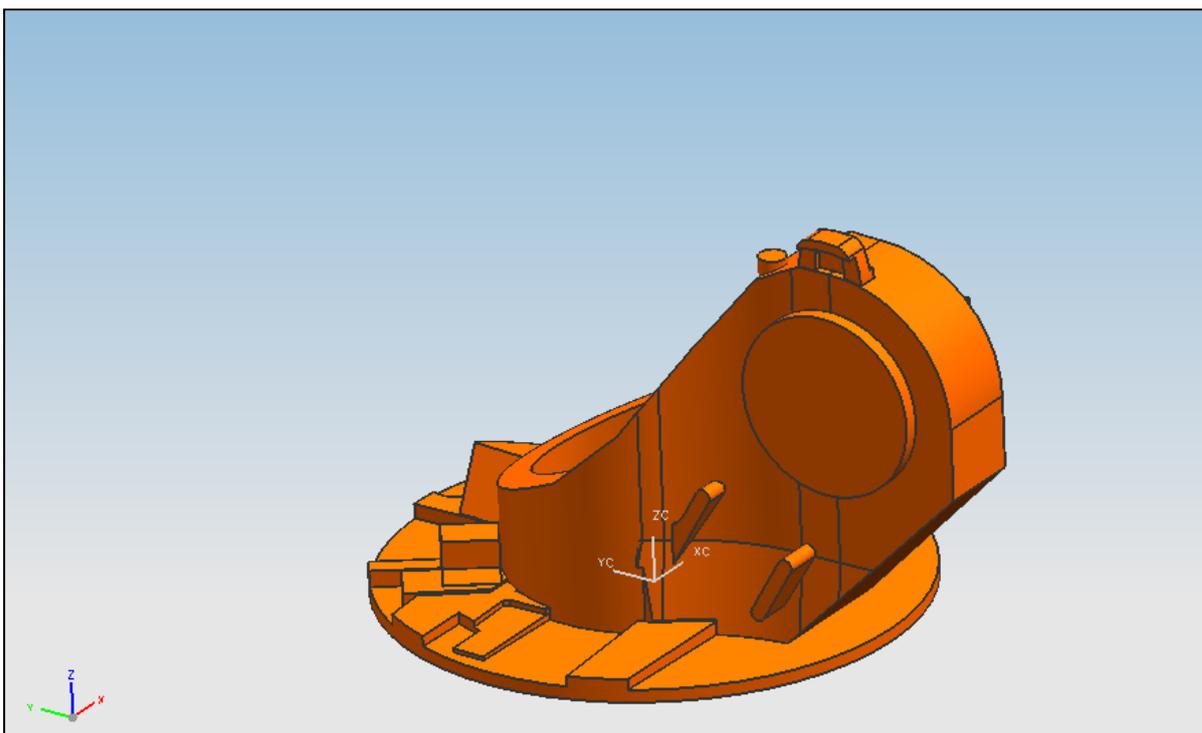
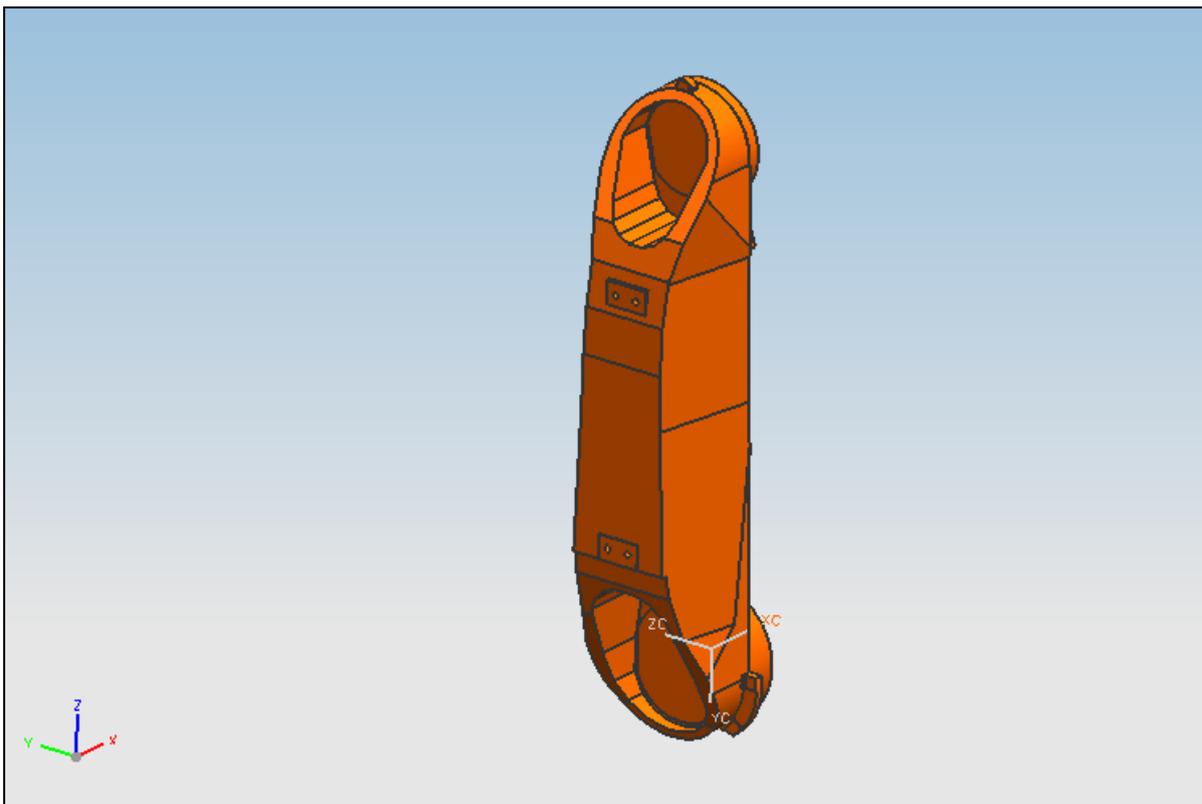


Figura 3.7 – Modelos CAD das ligações 01 e 02 dos manipuladores KR 16-2.

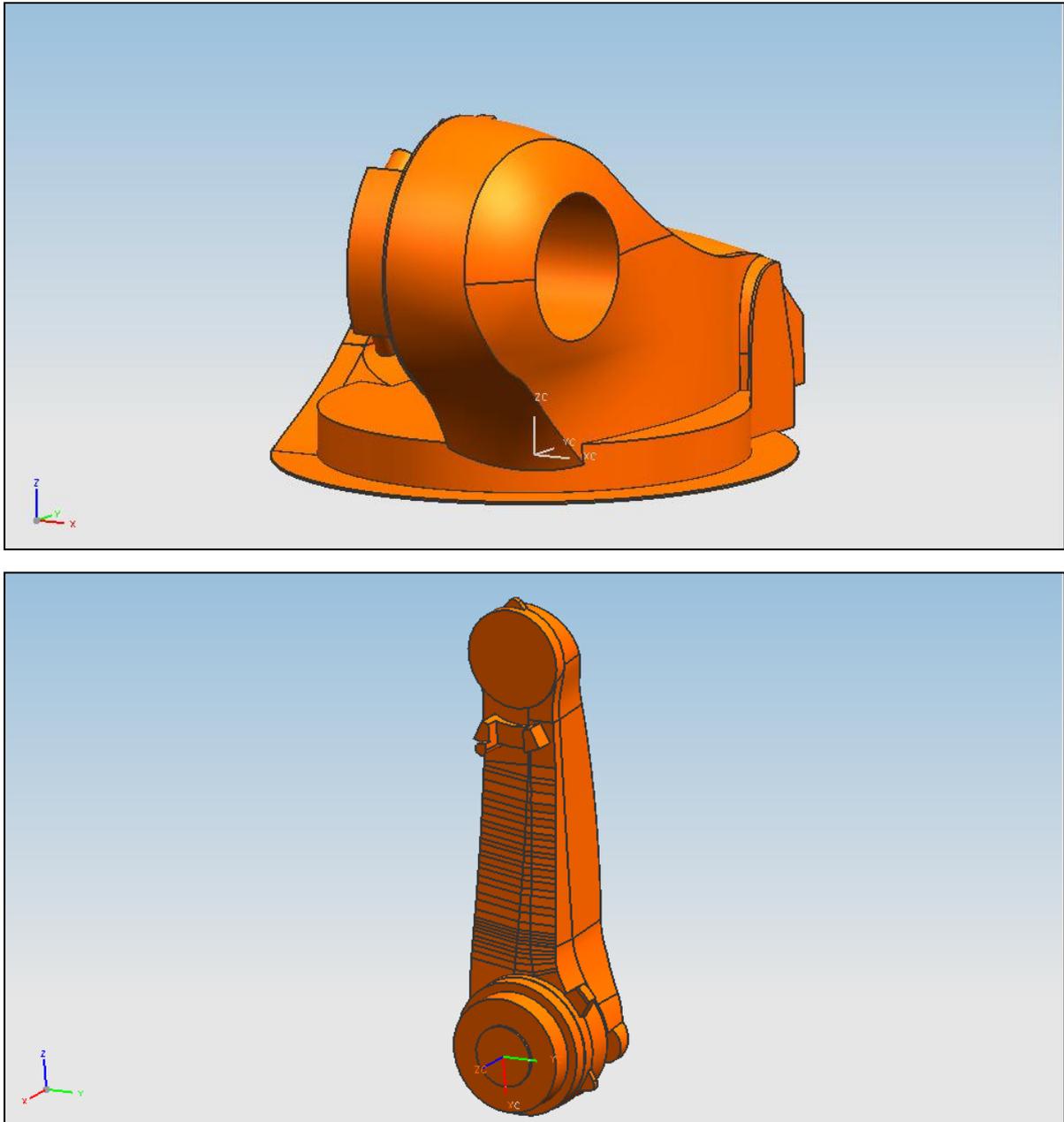


Figura 3.8 – Modelos CAD das ligações 01 e 02 dos manipuladores KR 150-2.

Após o posicionamento individual no CAD, foram determinadas as características inerciais de cada ligação, através do uso de uma aplicação do próprio software CAD que permite a criação de um relatório detalhado dessas características, a partir da designação de um material para o modelo tridimensional. É importante frisar que a base do robô, por não se tratar de uma parte móvel e, portanto, não demandar nenhuma análise, foi empregado apenas o material A356 – já que se trata do mais barato.

Determinadas as características inerciais de cada ligação, utilizou-se o software de simulação de dinâmica de corpos rígidos MD ADAMS para simular as trajetórias de cada manipulador. Dentro do ambiente de simulação do MD ADAMS, foi necessário “montar” o modelo tridimensional dos manipuladores, a partir dos modelos individuais das ligações, e inserir as propriedades inércias de cada uma destas. Além disso, também foi necessário criar cada junta de revolução no local exato determinado pelo modelo cinemático e com a relação exata de transmissão de movimento. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram os modelos virtuais criados no MD ADAMS.

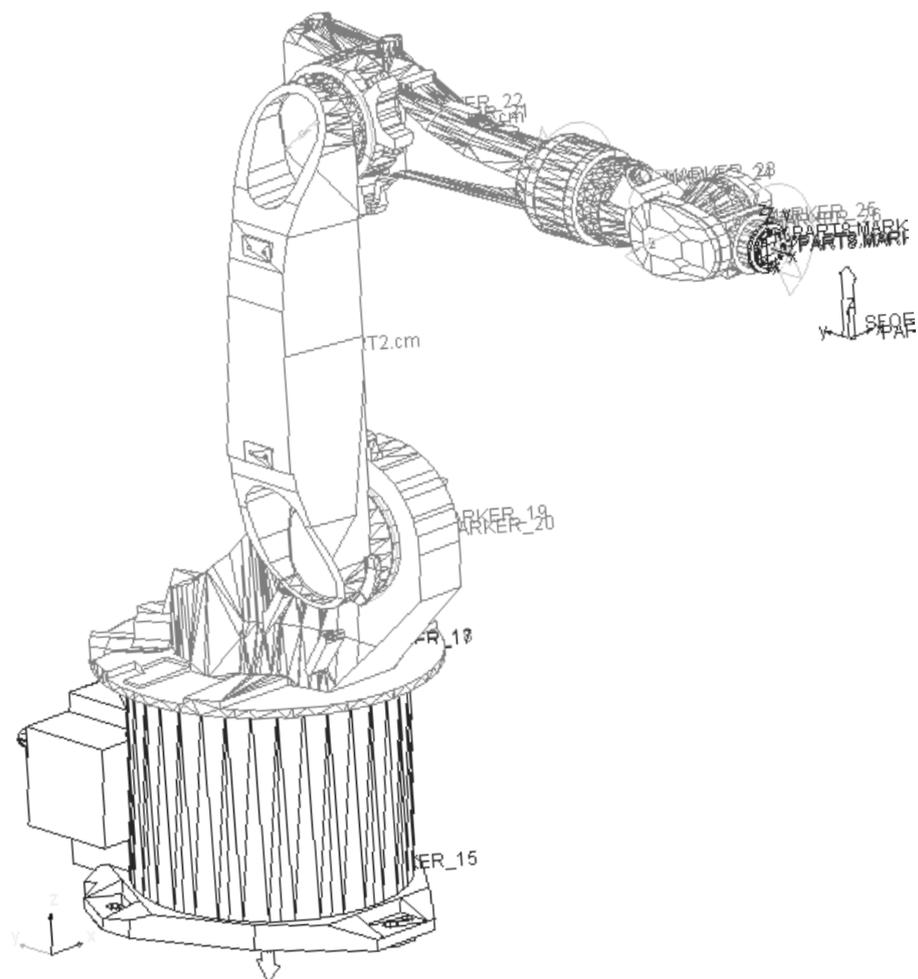


Figura 3.9 – Modelo tridimensional cinemático KR 16-2 - MD ADAMS.

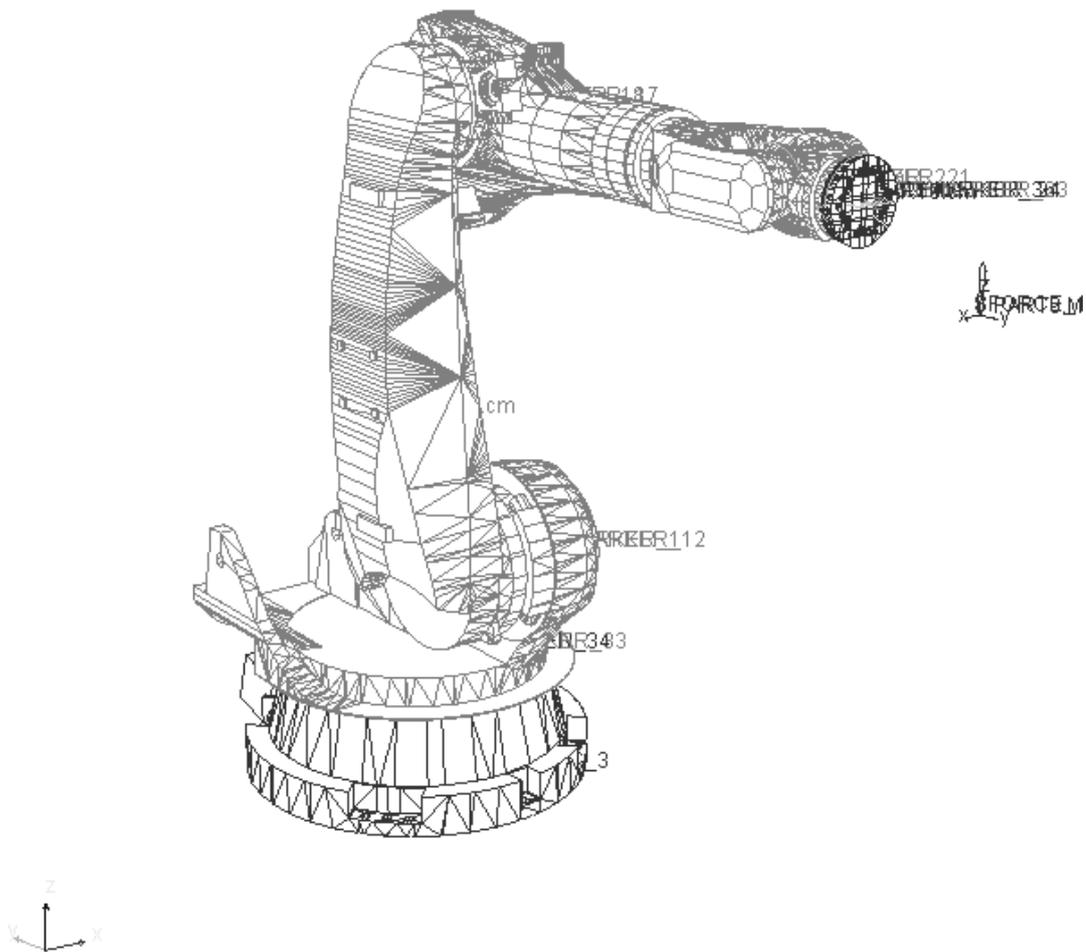


Figura 3.10 – Modelo tridimensional cinemático KR 150-2 - MD ADAMS.

Para que os robôs pudessem executar virtualmente as trajetórias desejadas, as curvas de movimentação – trajetória no espaço das juntas – calculadas no Matlab - foram inseridas, modeladas e aplicadas a cada uma das juntas virtuais no ambiente do MD ADAMS. Além disso, como mostra a Figura 3.11, também foi adicionado no ambiente MD ADAMS a aceleração gravitacional e as cargas de trabalho correspondentes - posicionadas nas coordenadas máximas permitidas de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, mostrados na Figura 3.11, sendo  $L_{xy} = 270 \text{ mm}$  e  $L_z = 240 \text{ mm}$ , para o KR 16-2, e  $L_{xy} = 270 \text{ mm}$  e  $L_z = 240 \text{ mm}$ , para o KR 150-2.

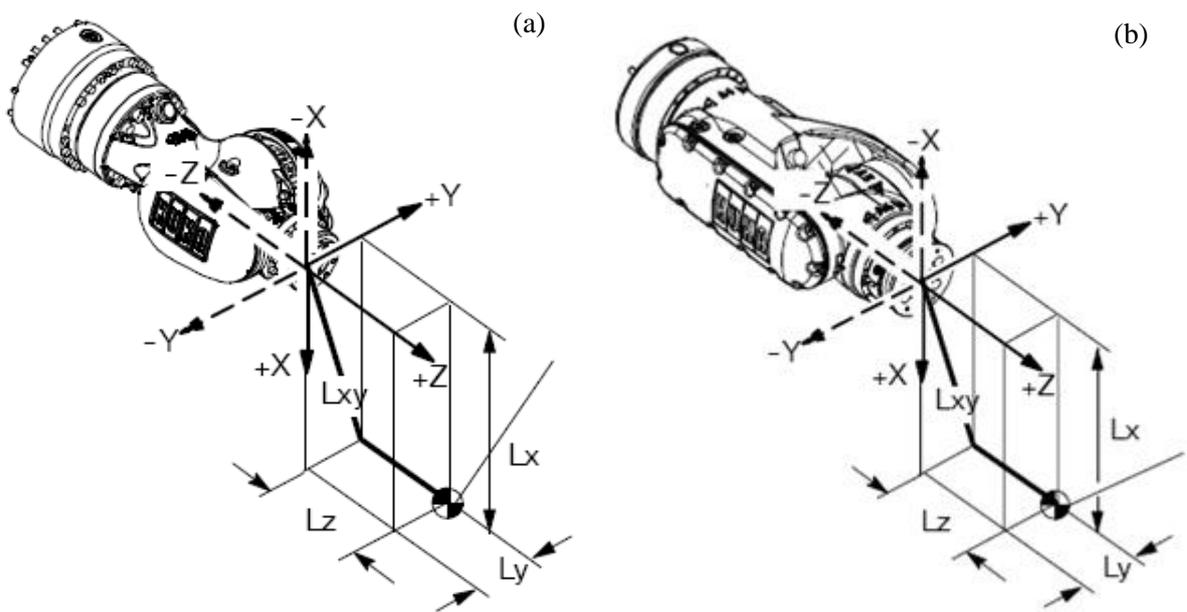


Figura 3.11 – Localização limite da carga de trabalho para (a) KR 16-2 e (b) KR 150-2. Adaptado de [33].

Após a simulação de cada trajetória, o pós-processador do MD ADAMS foi utilizado para visualizar e obter as curvas dos torques necessários para realização das movimentações impostas, das forças atuantes em cada junta - calculados pelo software durante as movimentações, e das potências empregadas por cada junta – derivadas temporais das curvas de torque de cada movimentação.

A Figura 3.12 mostra os gráficos da magnitude dos torques e potências durante a trajetória comum, em função do tempo, nas juntas número três (J3) dos manipuladores, respectivamente KR 150-2 e KR 16-2, para cada um dos materiais.

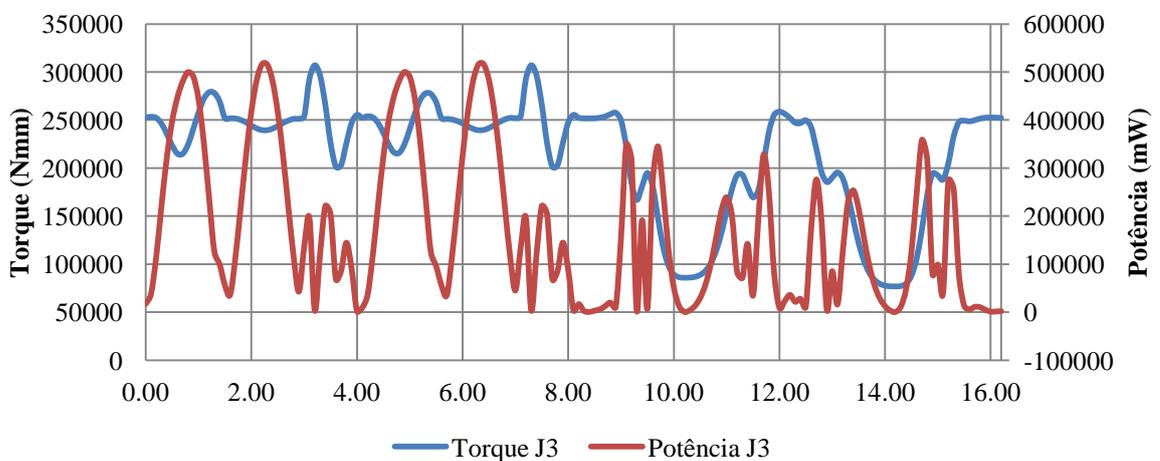


Figura 3.12(a) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR16-2/A356.

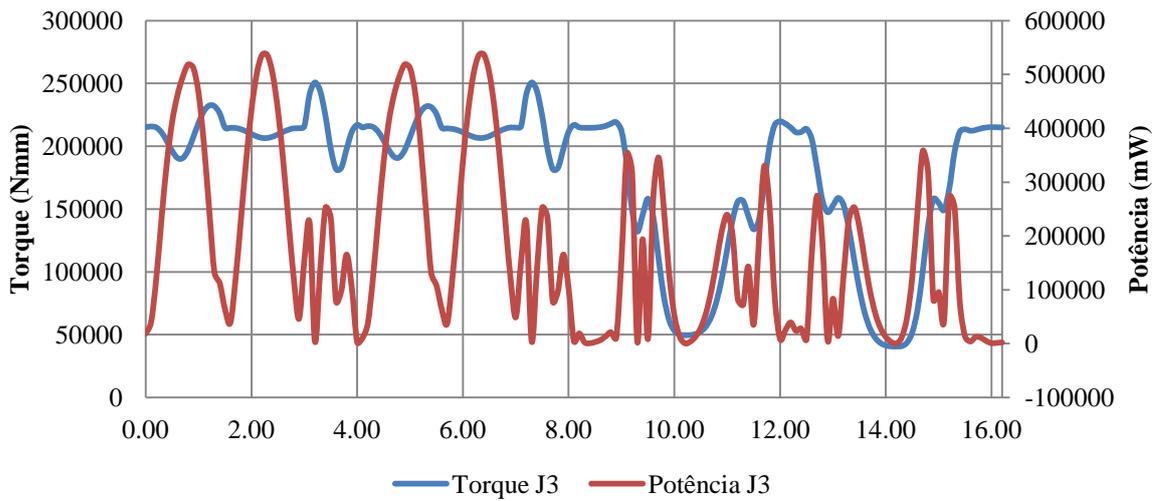


Figura 3.12(b) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR16-2/AZ91.

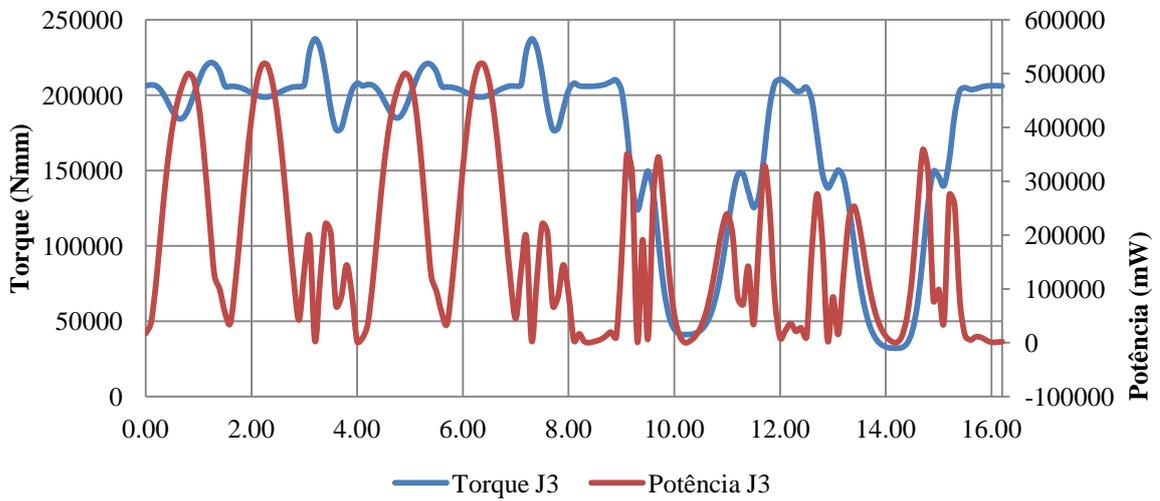


Figura 3.12(c) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR16-2/AS4/3501-6.

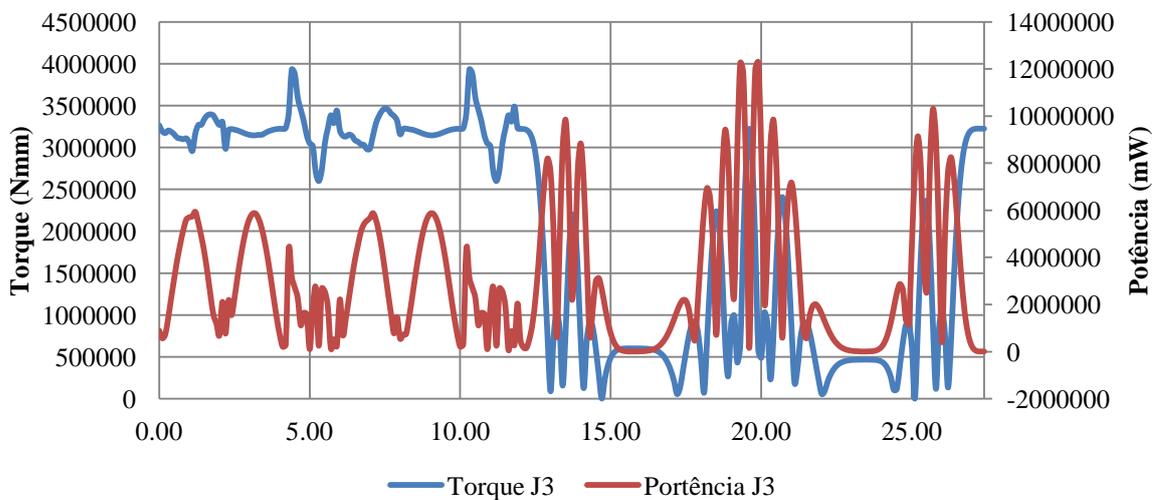


Figura 3.12(d) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR150-2/A356.

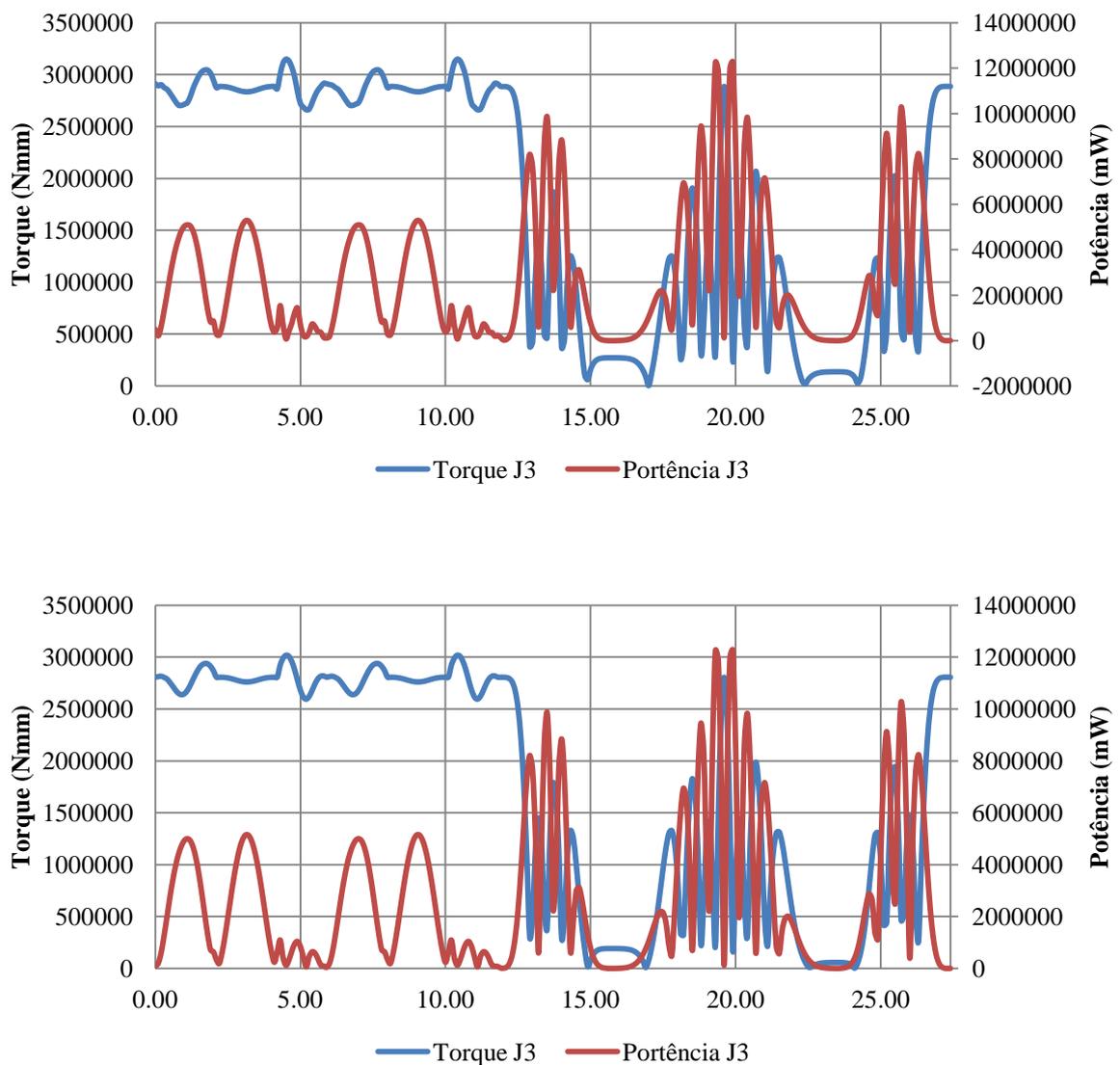


Figura 3.12(f) – Curvas de torque e potência para J3 do conjunto KR150-2/AS4/3501-6.

Os valores de potência RMS e torque máximo, encontrados para a estrutura composta pelo A356, foram utilizados como parâmetros de otimização para a diminuição do tempo de trajetória para as estruturas compostas pelo AZ19 e AS4/3501-6. Novamente de maneira iterativa – tentativa e erro – com acréscimo ou decréscimo único de  $\pm 0.1s$ , um novo tempo de trajetória foi encontrado e o mesmo processo citado acima foi desenvolvido para simulação e coleta de resultados através do MD ADAMS, para essa trajetória otimizada.

### 3.1.2. Análise de corpos flexíveis

A simulação de corpos flexíveis utilizada neste trabalho visa comparar os deslocamentos máximos das estruturas, a capacidade, ou não, de suportarem as solicitações máximas a que as ligações foram submetidas na simulação de corpos rígidos e as primeiras frequências naturais das estruturas das ligações.

Para determinar os carregamentos máximos atingidos durante as movimentações, foram tratados e analisados os dados de forças e momentos nas juntas virtuais determinados nas simulações realizadas no MD ADAMS.

Com o objetivo de simplificar o modelo da simulação, calculou-se uma força singular em cada direção cartesiana –XYZ – que correspondente às solicitações máximas – momentos e forças - que ocorrem também em cada direção durante a trajetória comum. Apesar destes carregamentos normalizados não ocorrerem simultaneamente durante a trajetória comum, por serem as máximas encontradas para cada direção durante aquela, estas foram calculadas, e utilizadas, porque simulam uma situação extrema de carregamento para cada ligação.

Após calcular os carregamentos normalizados, para cada modelo e cada material que foram simulados, utilizou-se o pacote de simulação avançada do software UG NX 5.0 para criar as malhas de elementos finitos e todas as outras entradas do modelo de simulação - restrições e forças atuantes de cada ligação dos manipuladores. Todas as ligações foram simuladas separadamente, tratadas como corpos com todos os graus de liberdade restringidos pela junta de atuação da própria ligação e com carregamento estático – carregamento normalizado - atuante sobre todo o corpo de conexão com junta de atuação da ligação posterior. É importante citar que o ângulo de posicionamento escolhido para a simulação de corpos flexíveis foi aquele em as ligações sofrem o maior valor de carregamento normalizado, em qualquer direção.

As malhas foram criadas com tamanho mínimo de elemento de 10,2 mm – ligação número 06 do KR 16-2 - e máximo de 25,4 mm – ligação número 01 do KR 150-2. A Figura 3.13 mostra a malha criada para a ligação número quatro (L4) dos manipuladores, KR 150-2 e KR 16-2, respectivamente.

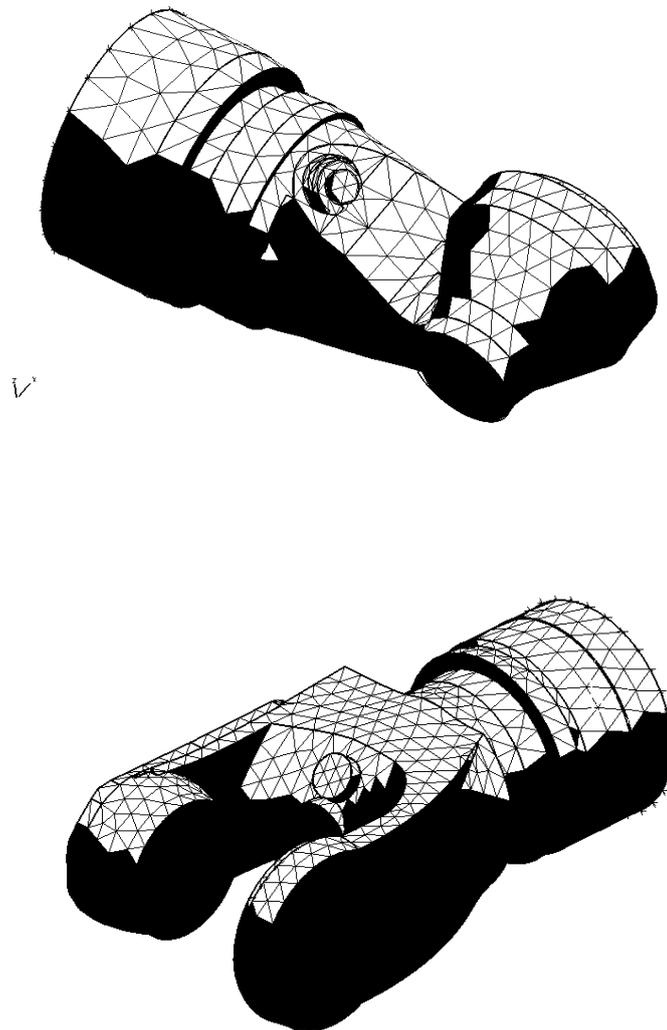


Figura 3.13 – Malhas criadas para as ligações número quatro, respectivamente para KR 16-2 e KR 150-2.

O pacote de simulação avançada do UG NX 5.0 não é uma ferramenta CAE completa, de maneira que possui apenas a capacidade de criar os arquivos de entrada para a solução em outro ambiente CAE. Desta forma, outro software foi utilizado para solução das simulações modeladas no UG NX 5.0. Devido a facilidade de troca de informações com o UG NX 5.0, a utilização em trabalhos semelhantes [25][26] e o alto prestígio de mercado, o software ANSYS foi escolhido como solucionador para as simulações.

Este trabalho pretende utilizar o método dos elementos finitos apenas como ferramenta de comparação entre as estruturas compostas pelos diferentes materiais, e não discutir com profundidade os potenciais erros inerentes ao mesmo, tão pouco a acurácia de sua solução.

Dentro do ambiente do ANSYS para simplificação das simulações estáticas, foi escolhida uma análise linear com tolerância de  $10^{-8}$  para a solução e temperatura constante de 20° C.

Para a composição das malhas, o SOLID72 - mostrado na Figura 3.14 – foi escolhido como elemento de composição para todos os materiais, uma vez que os modelos tridimensionais obtidos são todos sólidos e não cascas ou lâminas. Dentre os elementos sólidos disponíveis o SOLID72 foi escolhido porque possui seis graus de liberdade e baixo custo computacional, características ideais para o propósito deste estudo.

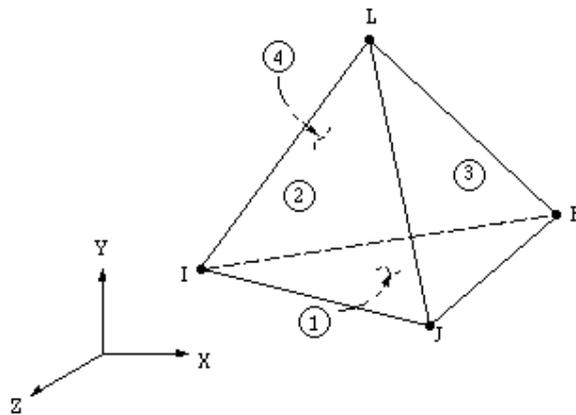


Figura 3.14 – Elemento SOLID72 do ANSYS.

Por se tratar de um elemento sólido, este não é o elemento ideal para a simulação do comportamento do AS4/3501-6, porém é mais do que suficiente para o objetivo deste trabalho, já que se trata de uma comparação entre materiais, e a quantidade de simulações propostas. Além disso, uma vez que não é possível realizar a orientação das fibras do material - primordial para materiais compósitos – utilizando este elemento, calculou-se as propriedades transformadas para os eixos XYZ, a partir das equações 2.60, 2.61, 2.62, 2.63 e 2.64, e se inseriu as propriedades transformadas do AS4/3501-6 para cada simulação, de acordo com o ângulo de inclinação escolhido.

É importante frisar que o AS4/3501-6 foi considerado transversalmente isotrópico e que a direção 1 do material é sempre aquela perpendicular à direção de maior carregamento para cada ligação, uma vez que essa é sempre a direção que sofre os maiores esforços.

A estratégia adotada para encontrar a orientação ótima das fibras do compósito foi realizar a simulação estática no ANSYS, com os carregamentos da trajetória comum, das ligações do manipulador KR 15-2 – por serem aquelas menos computacionalmente custosas -, alterando-se o ângulo de orientação no intervalo de 0° até 45° - uma vez que se deseja manter a maior rigidez na direção principal - com acréscimos de 5°, até se encontrar a orientação que possibilita a melhor resposta estática (menor deslocamento absoluto). A Tabela 3.9 mostra as características transformadas do AS4/3501-6 para o ângulo de orientação ótimo de cada ligação, o eixo mundo coincidente a direção principal das fibras do material e as propriedades transformadas do material

Tabela 3.9 – Orientação das fibras, direção principal e propriedades mecânicas transformadas para o AS4/3501-6.

| <b>Ligação</b> | <b>Orientação</b>    | <b>Direção 1</b> | <b><math>E_x</math> (GPa)</b> | <b><math>E_y</math> (GPa)</b> | <b><math>G_{xy}</math> (GPa)</b> | <b><math>\nu_{xy}</math></b> |
|----------------|----------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| <b>L1</b>      | [0,0] <sub>NS</sub>  | Z                | 148                           | 10,5                          | 56,1                             | 0,30                         |
| <b>L2</b>      | [0,25] <sub>NS</sub> | Z                | 104                           | 15,0                          | 14,4                             | 0,46                         |
| <b>L3</b>      | [0,25] <sub>NS</sub> | Y                | 104                           | 15,0                          | 14,4                             | 0,46                         |
| <b>L4</b>      | [0,0] <sub>NS</sub>  | Z                | 148                           | 10,5                          | 56,1                             | 0,30                         |
| <b>L5</b>      | [0,25] <sub>NS</sub> | Y                | 104                           | 15,0                          | 14,4                             | 0,46                         |
| <b>L6</b>      | [0,30] <sub>NS</sub> | Z                | 81,1                          | 17,7                          | 11,9                             | 0,48                         |

Para o AZ91 e o AS4/3501-6, além das simulações lineares estáticas com os carregamentos da trajetória comum, com tempo de execução idêntico para cada estrutura, também foram simulados os carregamentos resultantes das trajetórias otimizadas com aumento de velocidade – desenvolvidas conforme o item 3.1.1.

As primeiras frequências naturais foram encontradas utilizando-se a mesma estratégia da simulação linear estática, porém para uma simulação modal. As mesmas malhas, materiais e restrições – excluem-se as forças - criadas a priori no ambiente UG NX 5.0 foram utilizadas para a solução do ANSYS. Os intervalos de 0 a 10000 Hz, para as juntas J1, J2, J3, J4 e J5, e 0 a 1000000 Hz para a J6, foram utilizado como parâmetros para a análise modal, com tolerância de  $10^{-8}$  para a solução.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Potência e Torque

As grandezas principais de saída da análise corpos rígidos são os torque e potências desenvolvidas durante a trajetória, para que seja possível comparar os trabalhos realizados por cada junta das diferentes estruturas propostas. As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram os resultados para torques máximos e potência RMS encontrados nas simulações de corpos rígidos, para a trajetória comum aos três materiais, para respectivamente os manipuladores KR 16-2 e KR 150-2.

Tabela 4.1 – Torques máximos e potências RMS – Trajetória comum – KR 16-2.

| Junta | Torque Máximo (Nm) |      |            | Potência RMS (kW) |      |            |
|-------|--------------------|------|------------|-------------------|------|------------|
|       | A356               | AZ91 | AS4/3501-6 | A356              | AZ91 | AS4/3501-6 |
| J1    | 473                | 308  | 269        | 1,32              | 0,86 | 0,75       |
| J2    | 1015               | 750  | 687        | 1,35              | 0,96 | 0,87       |
| J3    | 307                | 250  | 237        | 0,33              | 0,27 | 0,25       |
| J4    | 39                 | 38   | 38         | 0,07              | 0,07 | 0,07       |
| J5    | 41                 | 40   | 40         | 0,14              | 0,14 | 0,14       |
| J6    | 13                 | 13   | 13         | 0,04              | 0,04 | 0,04       |

Tabela 4.2 – Torques máximos e potências RMS – Trajetória comum - KR 150-2.

| Junta | Torque Máximo (Nm) |      |            | Potência RMS (kW) |      |            |
|-------|--------------------|------|------------|-------------------|------|------------|
|       | A356               | AZ91 | AS4/3501-6 | A356              | AZ91 | AS4/3501-6 |
| J1    | 3796               | 2634 | 2634       | 8,40              | 5,04 | 4,78       |
| J2    | 12036              | 8881 | 8627       | 10,85             | 7,75 | 7,43       |
| J3    | 3926               | 3147 | 3017       | 3,12              | 2,50 | 2,41       |
| J4    | 623                | 628  | 629        | 0,68              | 0,68 | 0,69       |
| J5    | 626                | 618  | 620        | 1,14              | 1,14 | 1,13       |
| J6    | 287                | 287  | 286        | 0,45              | 0,45 | 0,45       |

Os resultados mostram que para as juntas três, quatro e cinco (J3, J4 e J5) praticamente não existe diferença de potência e torque exercido para realizar o movimento para as estruturas compostas dos diferentes materiais. Isso ocorre porque a carga de trabalho é a responsável principal pelo torque e energia realizados por essas juntas. Para comprovar essa hipótese, foram realizadas simulações dos modelos criados, porém sem a carga de trabalho. Os

resultados dessas simulações comprovam a hipótese admitida, sendo que, como era esperado o AS4/3501-6 é aquele que apresenta menores valores para torques máximos e potência RMS.

Por outro lado, como existe uma diferença significativa de valores para as outras três juntas, quando comparou-se o A356 com o AZ91 e o AS4/3501-6, foi realizado o processo descrito no item 3.1.1 para otimização do tempo da trajetória comum.

Os tempos ótimos encontrados para o KR 16-2 foram de 1,5s para as sequências 1, 2, 4 e 5, e 1,1s para as sequências 3 e 6. Uma diminuição de 1,2s no tempo total de execução da trajetória. Esses tempos geraram uma velocidade angular máxima de 171°/s para J1, 128°/s para J2 e 193°/s para J3. Um aumento de ~ 15% para J1 e J2, e ~ 21% para J3, em relação às velocidades atingidas na trajetória comum.

No caso do KR 150-2, foram determinados os valores de 1,7s para as sequências 1, 2, 4 e 5 e de 1,4s para as sequências 3 e 6. Uma redução de 2,2s no tempo total de execução da trajetória. As velocidades angulares máximas atingidas foram de 131°/s para J1, 98°/s para J2 e 120°/s para J3. Um aumento de ~ 23% para J1 e J2, e de ~ 22% para J3.

As sequências 7, 8 e 9, não foram consideradas para na trajetória otimizada, uma vez que os torques das juntas três, quatro e cinco, necessários para manter a estrutura em uma posição constantes são inferiores aqueles necessários para realizar sua movimentação. As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram os resultados de torque máximo e potência RMS obtido para as juntas, respectivamente para KR 16-2 e KR 150-2.

Tabela 4.3 – Torques máximos e potências RMS – Trajetória otimizada – KR 16-2.

| Junta     | Torque Máximo (Nm) |            | Potência RMS (kW) |            |
|-----------|--------------------|------------|-------------------|------------|
|           | AZ91               | AS4/3501-6 | AZ91              | AS4/3501-6 |
| <b>J1</b> | 408                | 356        | 1,31              | 1,14       |
| <b>J2</b> | 831                | 758        | 1,32              | 1,19       |
| <b>J3</b> | 267                | 251        | 0,34              | 0,32       |

Tabela 4.4 – Torques máximos e potências RMS – Trajetória otimizada - KR 150-2.

| Junta     | Torque Máximo (Nm) |            | Potência RMS (kW) |            |
|-----------|--------------------|------------|-------------------|------------|
|           | AZ91               | AS4/3501-6 | AZ91              | AS4/3501-6 |
| <b>J1</b> | 3645               | 3185       | 9,43              | 8,24       |
| <b>J2</b> | 9541               | 8776       | 10,68             | 9,69       |
| <b>J3</b> | 3280               | 3116       | 3,12              | 2,99       |

Os resultados apontam que utilizando a mesma energia fornecida para movimentar a estrutura composta pelo A356, para ambos os manipuladores avaliados, as estruturas compostas pelo AZ91 e AS4/3501-6 conseguem atingir velocidades significativamente maiores, principalmente no caso do KR 150-2. O AS4/3501-6 ainda consegue manter os valores dos torques máximos necessários para a execução da tarefa abaixo daqueles necessários para o A356, a uma velocidade menor, e o AZ91, para a mesma velocidade. O que comprova uma das hipóteses levantada por esse trabalho: os mesmos motores utilizados em manipuladores compostos por materiais convencionais, se empregados na mesma estrutura, porém composta por um material compósito, com características semelhantes ao AS4/3501-6, darão ao manipulador a capacidade de realizar tarefas com velocidades significativamente maiores.

## 4.2.Estrutura

Em relação aos resultados estruturais, a primeira grandeza comparada entre as estruturas composta pelos diferentes materiais é a massa, e por consequencia a relação carga paga/massa total. As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram os valores de massa total e de cada ligação dos dois manipuladores analisados.

Tabela 4.5 – Massa das ligações – Unidade: kg - KR 16-2.

| Ligação      | Material      |              |              |
|--------------|---------------|--------------|--------------|
|              | A356          | AZ91         | AS4/3501-6   |
| L1           | 46,73         | 30,45        | 26,60        |
| L2           | 36,09         | 23,52        | 20,54        |
| L3           | 28,73         | 18,72        | 16,35        |
| L4           | 10,26         | 6,68         | 5,84         |
| L5           | 4,76          | 3,10         | 2,71         |
| L6           | 0,12          | 0,07         | 0,06         |
| <b>Total</b> | <b>126,69</b> | <b>82,54</b> | <b>72,10</b> |

Tabela 4.6 – Massa das ligações – Unidade: kg - KR 150-2

| Ligação      | Material      |               |               |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
|              | A356          | AZ91          | AS4/3501-6    |
| L1           | 303,80        | 197,98        | 172,95        |
| L2           | 343,16        | 223,22        | 195,00        |
| L3           | 147,55        | 96,15         | 84,00         |
| L4           | 59,84         | 39,00         | 34,07         |
| L5           | 24,86         | 16,20         | 14,15         |
| L6           | 2,17          | 1,41          | 1,23          |
| <b>Total</b> | <b>881,38</b> | <b>573,96</b> | <b>501,40</b> |

A diferença significativa de massa entre a estruturas de AS4/3501-6 e A356, ~ 43%, AZ91 e A356, ~ 35%, e AS4/3501-6 e AZ91, ~ 14%, já era esperada e refletem com exatidão a diferença percentual entre as densidades dos materiais. A relação carga paga/massa total – aqui calculada novamente excluindo-se a massa da base - também obtêm os resultados esperado, sendo para o KR 16-2: ~ 0,22 para AS4/3501-6, ~ 0,19 para AZ91 e ~ 0,12 para A356. E para o KR 150 -2: ~ 0,30 para AS4/3501-6, ~ 0,26 para AZ91 e ~ 0,17 para A356.

Outra grandeza alterada com a mudança de materiais são os momentos principais de inércia - ligados diretamente a massa das ligações. Como mostram as Tabelas 4.7 e 4.8, para as diferentes composições das estruturas, diferenças significativas são apresentadas.

Tabela 4.7 – Momentos principais de inércia - Unidade: kg/mm<sup>2</sup> - KR 16-2.

| Ligação | Material |          |          |          |          |          |            |          |          |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|
|         | A356     |          |          | AZ91     |          |          | AS4/3501-6 |          |          |
|         | Ixx      | Iyy      | Izz      | Ixx      | Iyy      | Izz      | Ixx        | Iyy      | Izz      |
| L1      | 1,87E+06 | 1,79E+06 | 5,97E+05 | 1,22E+06 | 1,17E+06 | 3,89E+05 | 1,07E+06   | 1,02E+06 | 3,40E+05 |
| L2      | 1,59E+06 | 1,59E+06 | 1,55E+05 | 1,04E+06 | 1,04E+06 | 1,01E+05 | 9,06E+05   | 9,05E+05 | 8,80E+04 |
| L3      | 7,75E+05 | 7,32E+05 | 1,38E+05 | 5,05E+05 | 4,77E+05 | 8,98E+04 | 4,41E+05   | 4,17E+05 | 7,84E+04 |
| L4      | 1,03E+05 | 1,02E+05 | 2,28E+04 | 6,70E+04 | 6,64E+04 | 1,49E+04 | 5,85E+04   | 5,80E+04 | 1,30E+04 |
| L5      | 3,25E+04 | 2,30E+04 | 1,66E+04 | 2,12E+04 | 1,50E+04 | 1,08E+04 | 1,85E+04   | 1,31E+04 | 9,43E+03 |
| L6      | 7,85E+01 | 4,07E+01 | 4,07E+01 | 5,11E+01 | 2,65E+01 | 2,65E+01 | 4,47E+01   | 2,31E+01 | 2,31E+01 |

Tabela 4.8 – Momentos principais de inércia – Unidade: kg/mm<sup>2</sup> - KR 150-2.

| Ligação   | Material |          |          |          |          |          |            |          |          |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|
|           | A356     |          |          | AZ91     |          |          | AS4/3501-6 |          |          |
|           | Ixx      | Iyy      | Izz      | Ixx      | Iyy      | Izz      | Ixx        | Iyy      | Izz      |
| <b>L1</b> | 3,91E+07 | 3,56E+07 | 1,56E+07 | 2,55E+07 | 2,32E+07 | 1,02E+07 | 2,23E+07   | 2,03E+07 | 8,87E+06 |
| <b>L2</b> | 6,60E+07 | 6,55E+07 | 6,42E+06 | 4,29E+07 | 4,25E+07 | 4,18E+06 | 3,74E+07   | 3,71E+07 | 3,65E+06 |
| <b>L3</b> | 8,02E+06 | 7,03E+06 | 2,35E+06 | 5,23E+06 | 4,58E+06 | 1,53E+06 | 4,57E+06   | 4,00E+06 | 1,34E+06 |
| <b>L4</b> | 2,19E+06 | 1,90E+06 | 6,17E+05 | 1,43E+06 | 1,24E+06 | 4,02E+05 | 1,25E+06   | 1,08E+06 | 3,51E+05 |
| <b>L5</b> | 2,45E+05 | 2,32E+05 | 1,28E+05 | 1,60E+05 | 1,51E+05 | 8,33E+04 | 1,40E+05   | 1,32E+05 | 7,28E+04 |
| <b>L6</b> | 1,09E+04 | 5,76E+03 | 5,75E+03 | 7,13E+03 | 3,75E+03 | 3,75E+03 | 6,23E+03   | 3,28E+03 | 3,27E+03 |

Seguindo a tendência da massa das ligações, como também já esperado, os valores dos momentos de inércias principais calculados são mínimos para o AS4/3501-6, seguido pelo AZ91 e A356.

Como resultado da diferença entre as massas e momentos principais de inércia das estruturas, os valores dos carregamentos máximos nas juntas das mesmas também sofrem alterações consideráveis, principalmente para o KR 150-2. As Tabelas 4.9 e 4.10 mostram os valores dos carregamentos normalizados máximos – utilizados nas simulações estáticas lineares –  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ , em coordenadas globais, para cada ligação dos manipuladores, exercidos durante a trajetória comum.

Tabela 4.9 – Carregamentos normalizados máximos na trajetória comum - Unidade: N - KR  
16-2.

| Ligação   | Material       |                |                |                |                |                |                |                |                |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|           | A356           |                |                | AZ91           |                |                | AS4/3501-6     |                |                |
|           | F <sub>x</sub> | F <sub>y</sub> | F <sub>z</sub> | F <sub>x</sub> | F <sub>y</sub> | F <sub>z</sub> | F <sub>x</sub> | F <sub>y</sub> | F <sub>z</sub> |
| <b>L1</b> | 546,75         | 626,71         | -1269,53       | 355,23         | 408,68         | -883,66        | -326,13        | 357,11         | -792,38        |
| <b>L2</b> | 401,90         | 427,03         | -825,07        | 260,22         | -278,55        | -594,12        | 226,70         | -243,43        | -539,48        |
| <b>L3</b> | -168,49        | 172,88         | -391,18        | -112,28        | -147,64        | -311,37        | 111,84         | -147,64        | -292,49        |
| <b>L4</b> | -114,53        | -150,02        | -239,76        | -114,29        | -150,01        | -213,59        | -114,23        | -150,01        | -207,40        |
| <b>L5</b> | 113,62         | 149,65         | -166,12        | 113,61         | 149,65         | 165,47         | 113,60         | 149,65         | -165,32        |
| <b>L6</b> | -110,63        | -145,76        | -160,00        | -110,63        | -145,76        | -160,00        | -110,63        | -145,76        | -160,00        |

Tabela 4.10 – Carregamentos normalizados máximos na trajetória comum - Unidade: N - KR  
150-2.

| Ligação   | Material       |                |                |                |                |                |                |                |                |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|           | A356           |                |                | AZ91           |                |                | AS4/3501-6     |                |                |
|           | F <sub>x</sub> | F <sub>y</sub> | F <sub>z</sub> | F <sub>x</sub> | F <sub>y</sub> | F <sub>z</sub> | F <sub>x</sub> | F <sub>y</sub> | F <sub>z</sub> |
| <b>L1</b> | -2947,32       | 3291,74        | -4179,14       | -1919,59       | 2143,85        | -6124,79       | -1677,27       | 5521,81        | -5521,81       |
| <b>L2</b> | -1822,47       | 2002,09        | -4762,58       | -1461,60       | 1377,21        | -3629,46       | -1461,32       | 1377,21        | -3342,34       |
| <b>L3</b> | 1465,85        | -1380,10       | -2735,56       | 1464,65        | -1380,08       | -2309,58       | 1464,37        | -1380,08       | -2193,14       |
| <b>L4</b> | 1474,24        | -1386,29       | -1903,51       | 1472,40        | -1386,28       | -1769,71       | 1471,97        | -1386,27       | -1731,95       |
| <b>L5</b> | 1466,93        | -1383,60       | -1547,22       | 1466,66        | -1383,60       | -1536,42       | 1466,60        | -1383,60       | -1533,32       |
| <b>L6</b> | -1450,69       | -1368,79       | -1500,00       | -1450,69       | -1368,79       | -1500,00       | -1450,69       | -1368,79       | -1500,00       |

Nota-se que para as ligações quatro, cinco e seis, em todos os casos avaliados, não há diferença significativa de carregamento entre as estruturas compostas de diferentes materiais. Isso ocorre porque a força e o momento gerados pela carga de trabalho são bem superiores àqueles gerados pela inércia da estrutura - como foi comprovado na análise de torque na seção 4.1.-. Sendo então a carga de trabalho a responsável quase exclusivamente pelos

carregamentos exercidos nestas ligações. Nota-se que essa tendência começa a ocorrer a partir da ligação L3, mas somente para as forças  $F_x$  e  $F_y$ .

O resultado da simulação em elementos finitos mostrou que as tensões atingidas, tanto de cisalhamento quanto de tração e compressão, para todos os modelos e materiais, são muito abaixo - cerca de 100 vezes - das tensões máximas suportadas por todos os materiais para ambos os modelos de manipuladores. Sendo assim, todos os materiais podem ser utilizados para a aplicação definida sem risco de ruptura ou trinca da estrutura, o que torna o deslocamento da estrutura o parâmetro crítico a ser verificado.

As Tabelas 4.11 e 4.12 mostram os valores de deslocamento absolutos máximos lineares ( $\delta$ ) e angulares ( $\alpha$ ) para, respectivamente, KR 16-2 e KR 150-2.

Tabela 4.11 – Deslocamentos absolutos lineares e angulares máximos na trajetória comum –  
Unidades: mm e radianos – KR 16-2.

| Ligação   | Material             |                      |                      |                      |                      |                       |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|           | A356                 |                      | AZ91                 |                      | AS4/3501-6           |                       |
|           | $\delta$             | $\alpha$             | $\delta$             | $\alpha$             | $\delta$             | $\alpha$              |
| <b>L1</b> | $0,52 \cdot 10^{-2}$ | $0,36 \cdot 10^{-4}$ | $0,67 \cdot 10^{-2}$ | $0,46 \cdot 10^{-4}$ | $0,41 \cdot 10^{-2}$ | $0,45 \cdot 10^{-4}$  |
| <b>L2</b> | $0,61 \cdot 10^{-1}$ | $0,34 \cdot 10^{-3}$ | $0,66 \cdot 10^{-1}$ | $0,38 \cdot 10^{-4}$ | $0,37 \cdot 10^{-1}$ | $0,34 \cdot 10^{-3}$  |
| <b>L3</b> | $0,1 \cdot 10^{-1}$  | $0,68 \cdot 10^{-4}$ | $0,12 \cdot 10^{-1}$ | $0,78 \cdot 10^{-4}$ | $0,74 \cdot 10^{-2}$ | $0,464 \cdot 10^{-4}$ |
| <b>L4</b> | $0,34 \cdot 10^{-2}$ | $0,42 \cdot 10^{-4}$ | $0,44 \cdot 10^{-2}$ | $0,59 \cdot 10^{-4}$ | $0,27 \cdot 10^{-2}$ | $0,62 \cdot 10^{-4}$  |
| <b>L5</b> | $0,83 \cdot 10^{-3}$ | $0,15 \cdot 10^{-4}$ | $0,13 \cdot 10^{-2}$ | $0,22 \cdot 10^{-4}$ | $0,71 \cdot 10^{-3}$ | $0,16 \cdot 10^{-4}$  |
| <b>L6</b> | $0,56 \cdot 10^{-3}$ | $0,12 \cdot 10^{-4}$ | $0,85 \cdot 10^{-3}$ | $0,17 \cdot 10^{-4}$ | $0,55 \cdot 10^{-3}$ | $0,18 \cdot 10^{-4}$  |

Tabela 4.12 – Deslocamentos absolutos lineares e angulares máximos na trajetória comum -  
 Unidades: mm e radianos – KR 150-2.

| Ligação   | Material       |                |                |                |                |                |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|           | A356           |                | AZ91           |                | AS4/3501-6     |                |
|           | $\delta$       | $\alpha$       | $\delta$       | $\alpha$       | $\delta$       | $\alpha$       |
| <b>L1</b> | $0,73.10^{-2}$ | $0,33.10^{-4}$ | $0,76.10^{-2}$ | $0,31.10^{-4}$ | $0,44.10^{-2}$ | $0,22.10^{-4}$ |
| <b>L2</b> | $1,67.10^{-1}$ | $0,48.10^{-3}$ | $1,31.10^{-1}$ | $0,37.10^{-3}$ | $1,23.10^{-1}$ | $0,35.10^{-3}$ |
| <b>L3</b> | $0,77.10^{-2}$ | $0,57.10^{-4}$ | $0,10.10^{-1}$ | $0,68.10^{-4}$ | $0,66.10^{-2}$ | $0,42.10^{-4}$ |
| <b>L4</b> | $0,40.10^{-1}$ | $0,22.10^{-3}$ | $0,58.10^{-1}$ | $0,32.10^{-3}$ | $0,39.10^{-1}$ | $0,25.10^{-3}$ |
| <b>L5</b> | $0,17.10^{-2}$ | $0,29.10^{-4}$ | $0,27.10^{-2}$ | $0,42.10^{-4}$ | $0,17.10^{-2}$ | $0,67.10^{-4}$ |
| <b>L6</b> | $0,22.10^{-2}$ | $0,12.10^{-3}$ | $0,34.10^{-2}$ | $0,18.10^{-3}$ | $0,19.10^{-2}$ | $0,12.10^{-3}$ |

Os resultados mostram que a estrutura composta pelo AS4/3501-6 possui quase sempre um deslocamento linear inferior em comparação as outras estruturas compostas pelos outros materiais. Isso é recorrente para ambos os manipuladores. Apesar de apresentar alguns deslocamentos angulares maiores do que o A356, os valores são muito pequenos quando comparados aos deslocamentos lineares, assim como as diferenças de valores. Nota-se que para o KR 150-2, devido a alto carregamento da estrutura em A356, esta é a que tem pior resultado de deslocamento total – soma de todos os deslocamentos -, diferente do caso do KR 16-2, que por não possui carregamentos tão grandes, mesmo que significativamente diferentes para cada material, tem os piores resultados com o AZ91. A título de exemplo, as Figuras 4.1 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 mostram os resultados de deslocamento linear absoluto de forma visual, para a ligação L2 para ambos os manipuladores, respectivamente KR 16-2 e KR 150-2, e os três materiais, respectivamente, A356, AZ91 e AS4/3501-6.

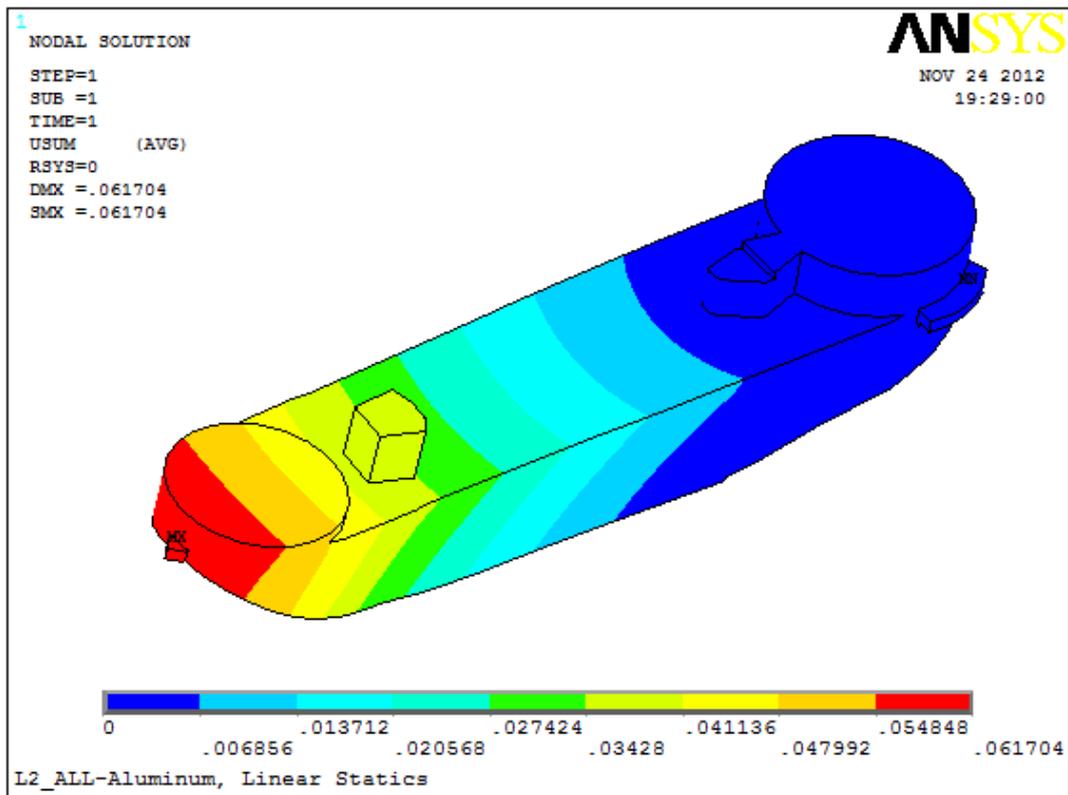


Figura 4.1 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 16-2 – Material:A356. Visualização ANSYS.

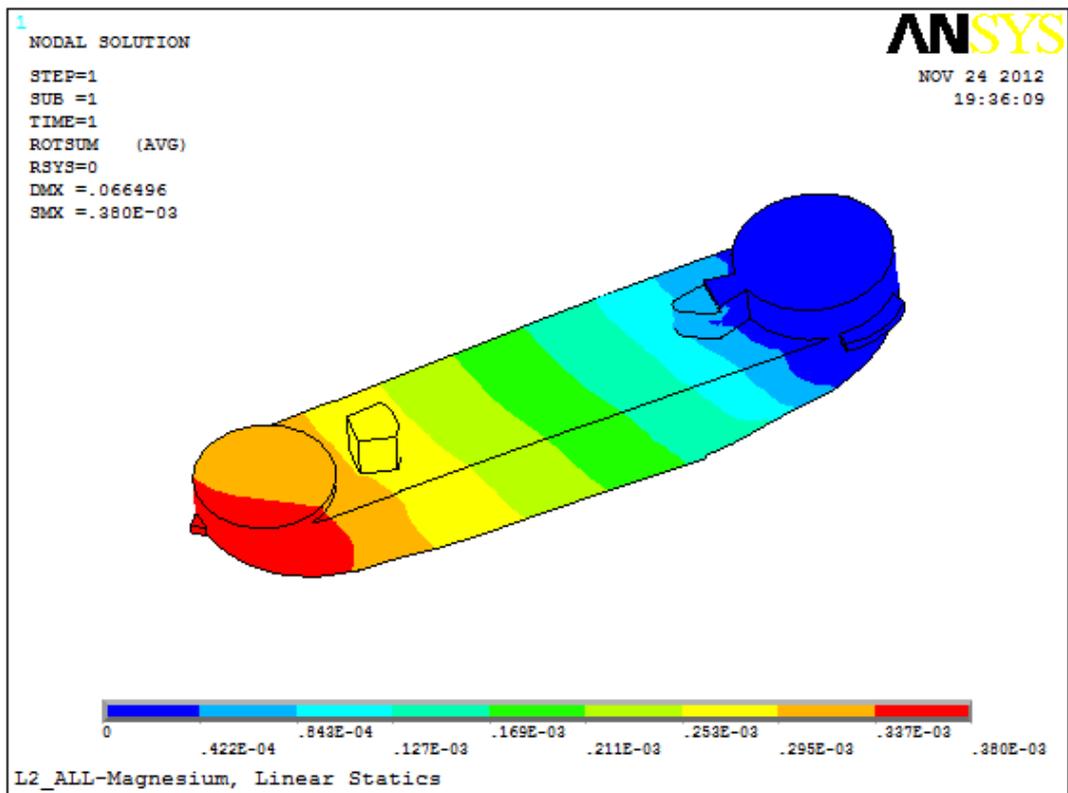


Figura 4.2 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 16-2. Material:AZ91. Visualização ANSYS.

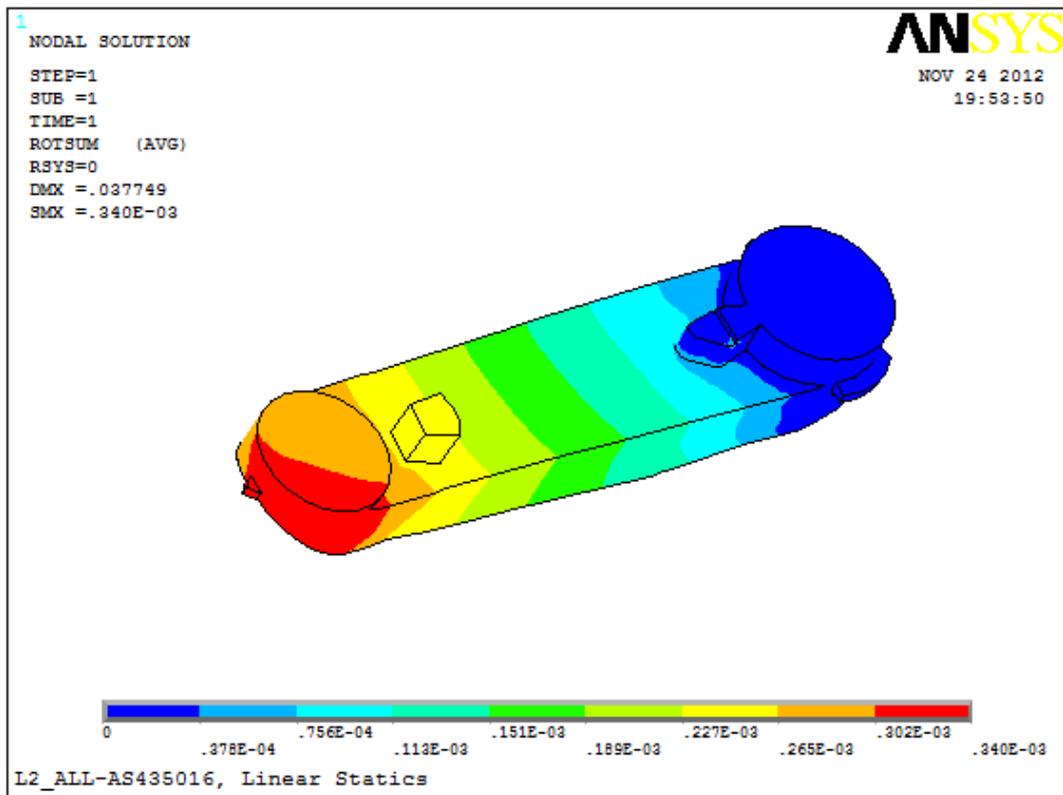


Figura 4.3 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 16-2. Material: AS4/3501-6. Visualização ANSYS.

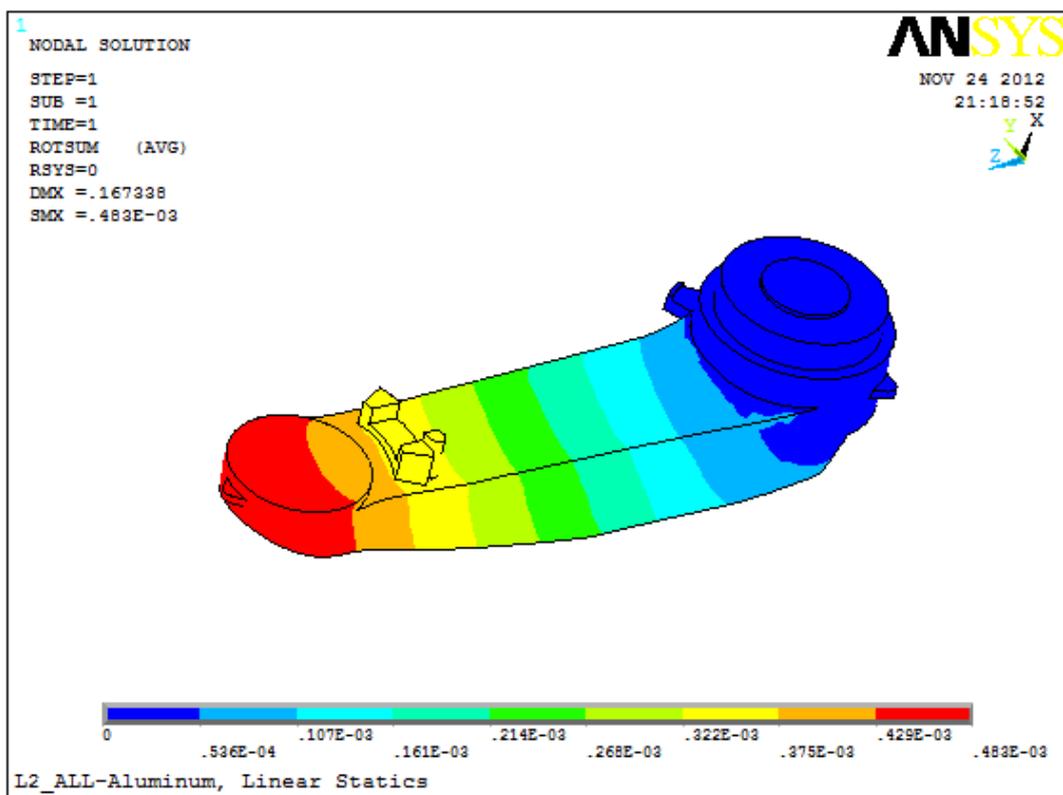


Figura 4.4 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 150-2. Material:A356. Visualização ANSYS.

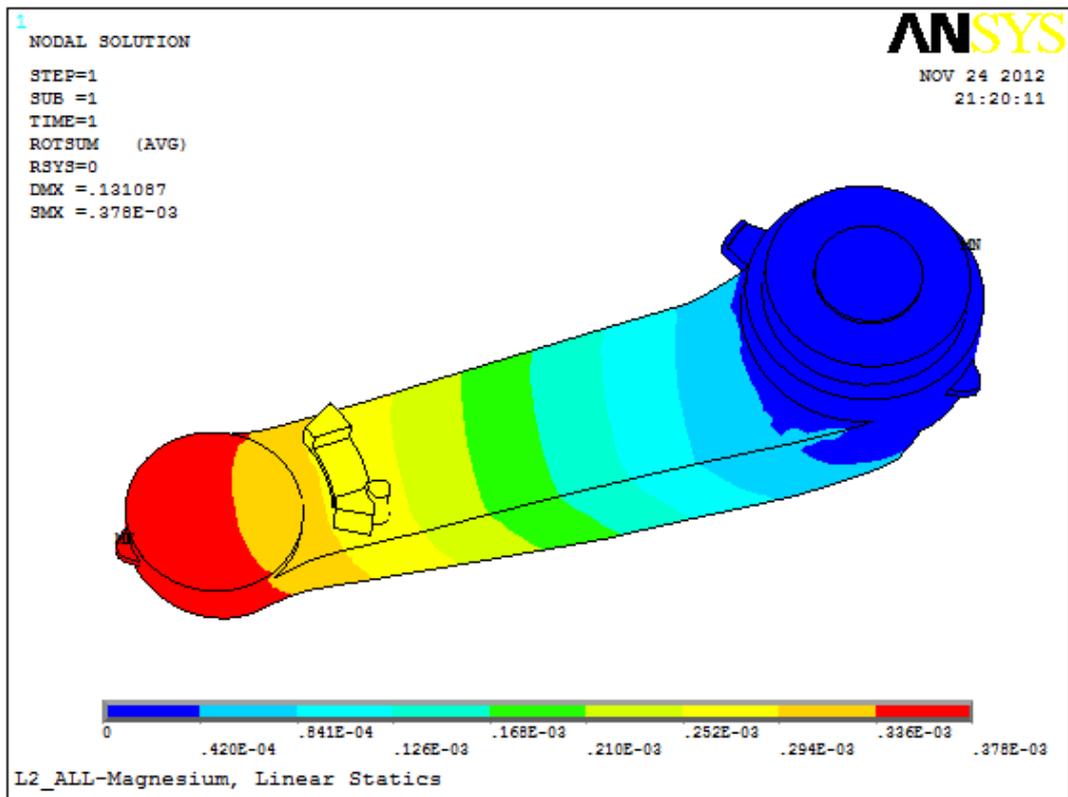


Figura 4.5 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 150-2. Material:AZ91. Visualização ANSYS.

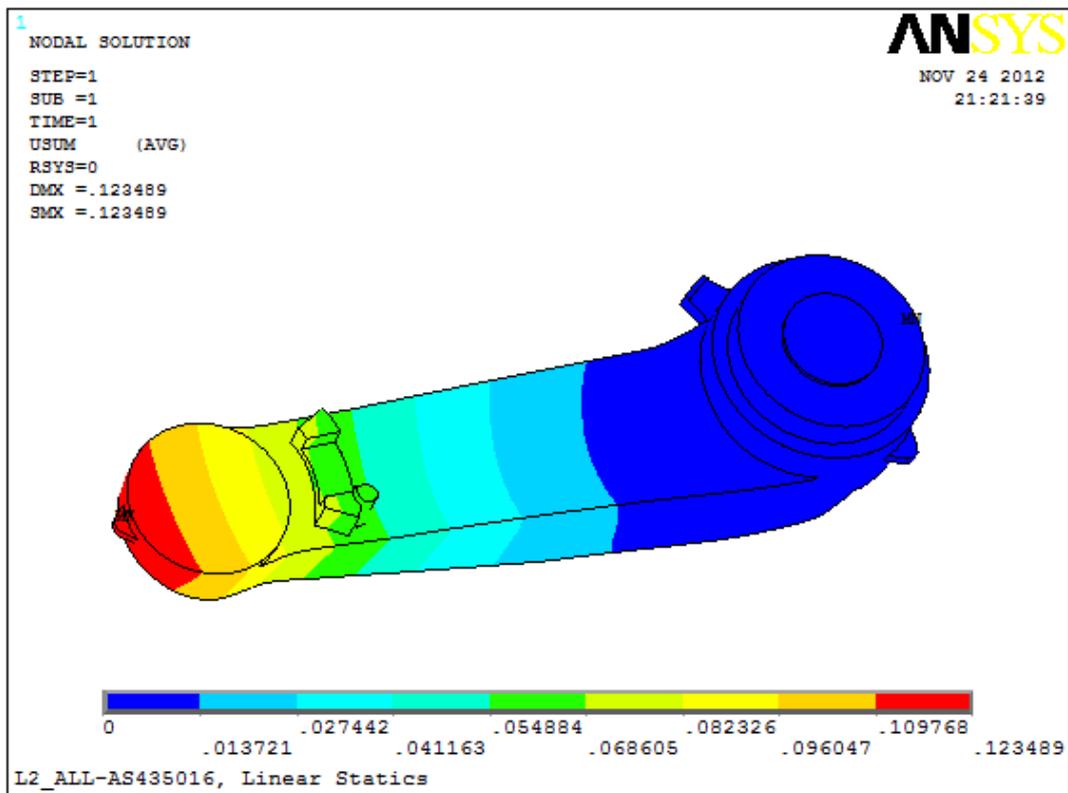


Figura 4.6 – Deslocamento linear absoluto da ligação L2 – KR 150-2. Material:AS4/3501-6. Visualização ANSYS.

Após a otimização da trajetória – apresentada no item 4.1 – para as juntas 1,2 e 3 de ambos os manipuladores e para os materiais AZ91 e AS4/3501-6, foi realizada a mesma análise descrita anteriormente nesta seção. As Tabelas 4.13 e 4.14 mostram os carregamentos normalizados máximos durante a trajetória otimizada.

Tabela 4.13 – Carregamentos normalizados máximos na trajetória otimizada  
– Unidade: N - KR 16-2.

| Ligação   | Material |         |         |            |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|------------|---------|---------|
|           | AZ91     |         |         | AS4/3501-6 |         |         |
|           | $F_x$    | $F_y$   | $F_z$   | $F_x$      | $F_y$   | $F_z$   |
| <b>L1</b> | -492,22  | 545,87  | 983,63  | 296,40     | -325,79 | -602,42 |
| <b>L2</b> | -492,22  | 545,87  | 399,84  | -429,36    | 476,94  | -879,71 |
| <b>L3</b> | -336,98  | -372,84 | -666,16 | -122,95    | -132,99 | -314,14 |

Tabela 4.14 – Carregamentos normalizados máximos na trajetória otimizada  
- Unidade: N - KR 150-2.

| Ligação   | Material |         |          |            |         |          |
|-----------|----------|---------|----------|------------|---------|----------|
|           | AZ91     |         |          | AS4/3501-6 |         |          |
|           | $F_x$    | $F_y$   | $F_z$    | $F_x$      | $F_y$   | $F_z$    |
| <b>L1</b> | -2953,48 | 3271,80 | -6584,90 | -2578,48   | 2859,56 | -5905,38 |
| <b>L2</b> | -1856,00 | 1993,51 | -3939,21 | -1619,76   | 1742,90 | -3594,52 |
| <b>L3</b> | -834,12  | -843,51 | -2434,09 | -728,00    | -737,47 | -2286,80 |

Mais uma vez, apesar do aumento dos carregamentos devido ao aumento da aceleração durante a trajetória otimizada, os resultados das simulações em elementos finitos mostraram que tensões atingidas, tanto de cisalhamento quanto de tração e compressão, estão muito abaixo, cerca de 100 vezes, das tensões máximas suportadas por estes materiais. Sendo assim, ambos são capazes de operar nessas velocidades sem risco de ruptura ou trinca da estrutura, o que torna novamente o deslocamento da estrutura o parâmetro crítico a ser verificado.

As deslocamentos lineares ( $\delta$ ) e angulares ( $\alpha$ ), causados pelos carregamentos máximos que ocorrem durante trajetória otimizada são mostrados nas Tabelas 4.15 e 4.16.

Tabela 4.15 – Deslocamentos lineares e angulares máximos na trajetória otimizada -  
Unidades: mm e radianos - KR 16-2.

| Ligação   | Material       |                |                |                |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|           | AZ91           |                | AS4/3501-6     |                |
|           | $\delta$       | $\alpha$       | $\delta$       | $\alpha$       |
| <b>L1</b> | $0,67.10^{-2}$ | $0,45.10^{-4}$ | $0,53.10^{-2}$ | $0,59.10^{-4}$ |
| <b>L2</b> | $0,77.10^{-1}$ | $0,42.10^{-3}$ | $0,42.10^{-1}$ | $0,34.10^{-3}$ |
| <b>L3</b> | $0,14.10^{-1}$ | $0,87.10^{-4}$ | $0,79.10^{-2}$ | $0,50.10^{-4}$ |

Tabela 4.16 – Deslocamentos lineares e angulares máximos na trajetória otimizada –  
Unidades: mm e radianos - KR 150-2.

| Ligação   | Material       |                |                |                |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|           | AZ91           |                | AS4/3501-6     |                |
|           | $\delta$       | $\alpha$       | $\delta$       | $\alpha$       |
| <b>L1</b> | $0,10.10^{-1}$ | $0,57.10^{-4}$ | $0,66.10^{-2}$ | $0,31.10^{-4}$ |
| <b>L2</b> | $1,46.10^{-1}$ | $0,41.10^{-3}$ | $1,33.10^{-1}$ | $0,38.10^{-3}$ |
| <b>L3</b> | $0,99.10^{-2}$ | $0,71.10^{-4}$ | $0,55.10^{-2}$ | $0,41.10^{-3}$ |

Conforme esperado, os carregamentos da trajetória otimizada impõe um deslocamento maior à estrutura. Ainda assim, o AS4/3501-6 tem um resultado superior ao AZ91 e melhor ou igual até que o do A356 durante a trajetória comum. Enquanto isso, o AZ91, que antes já apresentava os piores valores para deslocamento para o KR 16-2, agora continua a apresentar valores de deformação acima dos outros materiais. A título de exemplo, as Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 mostram os resultados visuais de deslocamento para a ligação L3 de ambos os manipuladores, para ambos os materiais. Importante destacar que a diminuição dos deslocamentos para a ligação L3 na trajetória otimizada, mostra o quanto a movimentação das juntas próximas à carga de trabalho influenciam nos carregamentos máximos desta ligação,

uma vez que a movimentação destas foi excluída da trajetória otimizada – conforme descrito no item 4.1 -.

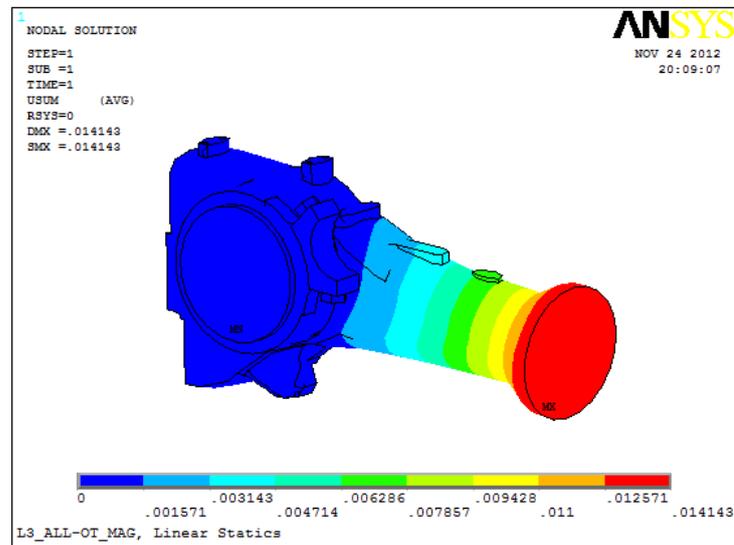


Figura 4.7 – Deformação linear na ligação L3 com carregamentos da trajetória otimizada – KR 16-2.  
Material: AZ91. Visualização ANSYS.

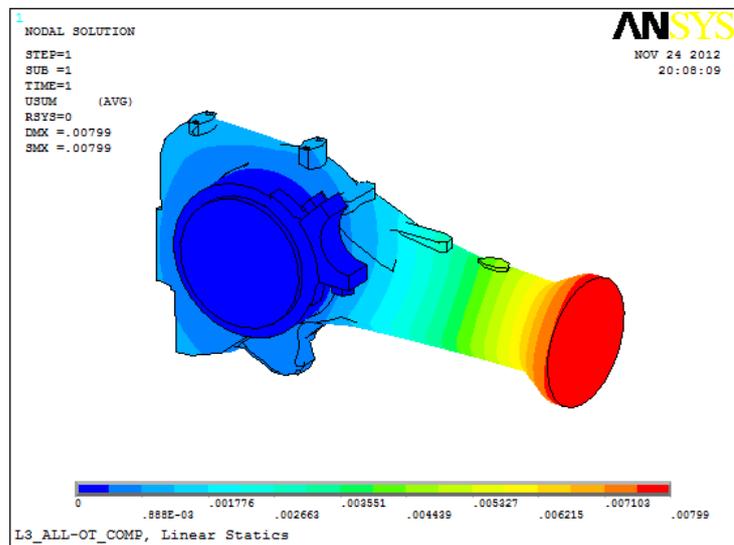


Figura 4.8 – Deformação linear na ligação L3 com carregamentos da trajetória otimizada – KR 16-2.  
Material: AS4/3501-6. Visualização ANSYS.

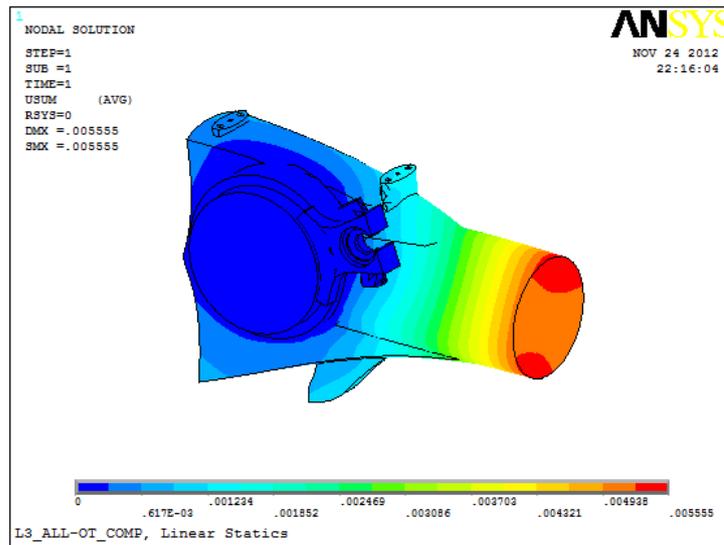


Figura 4.9 – Deformação linear na ligação L3 com carregamentos da trajetória otimizada – KR 150-2.  
 Material:AZ91. Visualização ANSYS.

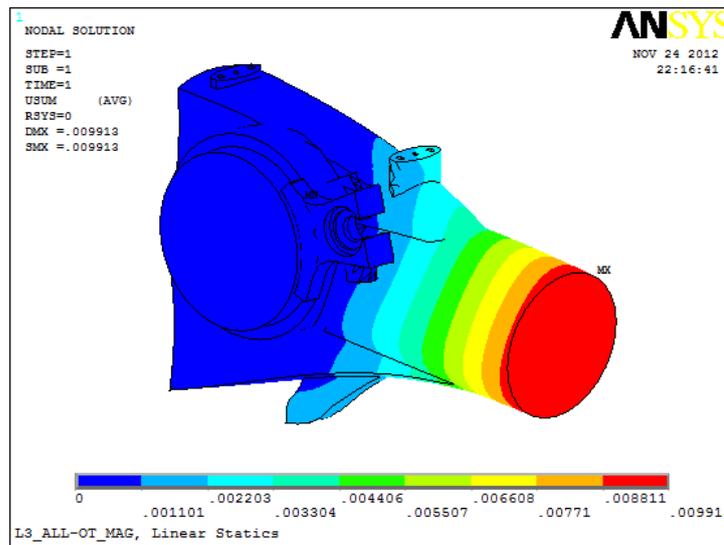


Figura 4.10 – Deformação linear na ligação L3 com carregamentos da trajetória otimizada – KR 150-2.  
 Material: AS4/3501-6. Visualização ANSYS.

A última grandeza estudada com auxílio das simulações foi a resposta dinâmica das estruturas. A Tabela 4.17 mostra o resultado do primeiro modo ou da primeira frequência natural de cada ligação para os diferentes materiais e modelos de manipulador.

Tabela 4.17 – Primeiras frequências naturais das ligações dos manipuladores - Unidade: Hz.

| Ligação   | Modelo  |         |            |          |         |            |
|-----------|---------|---------|------------|----------|---------|------------|
|           | KR 16-2 |         |            | KR 150-2 |         |            |
|           | A356    | AZ91    | AS4/3501-6 | A356     | AZ91    | AS4/3501-6 |
| <b>L1</b> | 647,3   | 645,35  | 721,98     | 370,65   | 370,86  | 392,565    |
| <b>L2</b> | 223,18  | 222,36  | 247,33     | 159,418  | 159,418 | 159,418    |
| <b>L3</b> | 507,93  | 506,46  | 508,86     | 672,734  | 670,923 | 698,998    |
| <b>L4</b> | 1003,31 | 1000,75 | 1326,4     | 381,326  | 381,013 | 458,516    |
| <b>L5</b> | 2806,95 | 2784,63 | 3141,36    | 2832,27  | 2804,33 | 2929,68    |
| <b>L6</b> | 70418   | 69560   | 128870     | 5306,06  | 5343,33 | 5351,74    |

A estrutura composta pelo AS4/3501-5 apresenta os maiores valores de frequência natural para todas as ligações, com exceção da L2 do modelo KR 150-2, o que comprova a melhor resposta dinâmica deste material para essas geometrias e restrições. Não existe diferença significativa entre os resultados para o A356 e AZ91, porém percebe-se claramente o contrário para o AS4/3501-6.

Os valores se diferenciam mais entre si para as ligações de menor inércia, principalmente a L4 e L6 do KR 16-2. Diferenças percentuais de aproximadamente 32% entre AS4/3501-6 e A356 e AZ91, para a ligação L4, e aproximadamente 84% para a ligação L6. Isso significa que existe uma vantagem significativa para a estrutura composta pelo AS4/3501-6, uma vez que esse manipulador possui valores mais altos de velocidade e aceleração.

Para o KR 150-2, a maior diferença percentual entre o AS4/3501-6 e os demais, aproximadamente 20%, ocorre para a ligação L4, seguida da ligação L1, com aproximadamente 6%. Isso indica que para o modelo de maior massa as diferenças entre as frequências naturais não são muitas altas como no modelo de menor massa.

## 5. DISCUSSÃO

As simulações realizadas comprovaram as premissas básicas deste trabalho: a estrutura feita de material compósito possui características estruturais e dinâmicas superiores do que aquela com materiais convencionais de baixa densidade: menor deslocamento total e maior frequência natural das ligações. As potências necessárias para realizar as movimentações das juntas dos manipuladores são menores para o material compósito. Existe um ganho real no aumento de velocidade máxima dos manipuladores feitos em material compósito ao se utilizar a mesma potência necessária para movimentar os manipuladores feitos de um material convencional. Dessa maneira, esse capítulo discute as formas de se medir como os ganhos demonstrados afetam o investimento e o retorno financeiro do robô.

Os primeiros dados necessários são os preços das materiais aqui avaliados. De acordo com pesquisa realizadas em [34], [35], [36], [37], o preço médio encontrado do quilograma de A356 é de \$2,00, enquanto de AZ91 é \$3,00 e de AS4/3501-6 \$35,00. Isso leva a uma relação custo/densidade de 0,93, 1,72 e 23,02, respectivamente. Fica claro que o preço do compósito é muito superior ao dos outros materiais e que acarreta em um valor mais elevado para a estrutura.

Para mitigar esse essa diferença, a primeira discussão levantada é o dimensionamento dos servomotores para as estruturas. De acordo com pesquisas realizadas em [37], [38], os preços dos servomotores variam desde \$500,00 até \$12.000,00, porém os dados não permitem encontrar uma função linear que relacione a potência e o valor do produto. Porém, é possível estimar faixas de valores máximos de acordo com a potência dos servomotores:  $\leq 0,5$  kW – 1000,00,  $\leq 1,0$  kW - \$2500,00,  $\leq 2,5$  kW - \$3000,00,  $\leq 5,0$  kW – 4500,00,  $\leq 10,0$  kW – \$6500,00 e  $> 10,0$  kW – \$8000,00.

Os valores definidos foram utilizados para mensurar uma estimativa de custo total de matéria prima – apenas para as partes móveis dos manipuladores - mais servomotores para cada estrutura simulada. Essas estimativas não consideram os custos de fabricação de cada material, e para tentar mitigar essa exclusão, foram acrescidos 80% ao valor mássico de cada estrutura. A Tabela 5.1 mostra os resultados da comparação.

Tabela 5.1 – Custos das estruturas e servomotores, em dólares.

| Material          | KR 16-2         |              |             | KR 150-2        |              |             |
|-------------------|-----------------|--------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|
|                   | Custo Estrutura | Custo Servos | Custo Total | Custo Estrutura | Custo Servos | Custo Total |
| <b>A356</b>       | 456,14          | 9000,00      | 9456,14     | 3173,07         | 25000,00     | 28173,07    |
| <b>AZ91</b>       | 447,40          | 6000,00      | 6447,40     | 3099,54         | 20000,00     | 23099,54    |
| <b>AS4/3501-6</b> | 4544,38         | 6000,00      | 10544,38    | 31589,20        | 20000,00     | 51589,20    |

Os custos totais para o AS4/3501-6, apesar da utilização de servomotores de menor potência, ainda são muito superiores em comparação aos outros materiais. No caso do KR 16-2: aproximadamente 11% mais caro que o A356 e 63% a mais que o AZ91, sendo o custo total para o AZ91 46% mais barato que para o A356. Para o manipulador de maior massa, KR 150-2, essas diferenças percentuais aumentam mais ainda: aproximadamente 83% mais caro que o A356 e 123% a mais que o AZ91, sendo o custo total para o AZ91 aproximadamente 21% mais barato que para o A356. Estes resultados refletem de maneira correta os benefícios de cada material para as respostas dinâmicas e estáticas da estrutura. A Tabela 5.2 mostra a comparação entre essas grandezas e o custo total do manipulador.

Tabela 5.2 – Comparação entre custo total, respostas dinâmicas e estáticas.

| Material          | KR 16-2          |   |                               | KR 150-2         |   |                                |
|-------------------|------------------|---|-------------------------------|------------------|---|--------------------------------|
|                   | Custo Total (\$) | Deslocamento Total Linear ( $10^{-2}$ mm) | Menor Frequencia Natural (Hz) | Custo Total (\$) | Deslocamento Total Linear ( $10^{-2}$ mm) | Menor Frequencia Natural* (Hz) |
| <b>A356</b>       | 9456,14          | 0,81                                      | 223,18                        | 28173,07         | 0,22                                      | 370,65                         |
| <b>AZ91</b>       | 6447,40          | 0,91                                      | 222,36                        | 23099,54         | 0,21                                      | 370,86                         |
| <b>AS4/3501-6</b> | 10544,38         | 0,52                                      | 247,33                        | 51589,20         | 0,17                                      | 393,00                         |

\*Exclui-se aquele para L2, por ser igual para todos os materiais.

Considerando-se novamente os dados de potência, o modelo KR 16-2, quando o mesmo é composto pelo material AS4/3501-6, necessita de uma potência total 2,07 kW em suas juntas para realizar a trajetória comum, um valor aproximadamente 36% menor do que aquele necessário para a estrutura composta pelo A356, 3,26 kW, e também aproximadamente 12% menor do que aquele necessário para a estrutura composta pelo AZ91, 2,35 kW.

No caso do KR 150-2, a variação no valor de potência entre o AS4/3501-6 e o A356 é ainda maior. Enquanto para o AS4/3501-6, o manipulador precisa de 16,9 kW, para o A356 ele precisa de 24,6 kW, aproximadamente 31% a mais de energia. Em contra partida, ao se

comparar com o AS4/3501-6 com o AZ91, 17,5 kW, esse diferença cai para somente, aproximados, 4%.

Estes valores globais de energia podem ser utilizados para uma estimativa de consumo energético do manipulador ao longo do tempo de operação. Considerando o custo total de operação em função do consumo de energia elétrica como  $CO = CE * t_{TO} + CT$ , calculado pela multiplicação do consumo de energia pelo tempo total de operação somado ao custo total do manipulador, e  $CE = T_{EE} * POT * t_{OD}$ , como o consumo de energia elétrica diário, dado pela tarifa de energia elétrica multiplicada pela potência do manipulador e pelo tempo de operação diário, considerando-se um dia igual ao tempo de operação diário, chega-se a uma relação de tempo total de operação, em dias de operação, para um mesmo valor de CO (motores iguais) para dois materiais, conforme a equação BB.

$$t_{TO}(dias) = \frac{(CT_a - CT_b)}{T_{EE} * (POT_b - POT_a)} \quad (5.1)$$

Substituindo-se as incógnitas pelos valores dos materiais analisados, tem-se para o KR 16-2 e KR 150-2, as quatro curvas de tempo total de operação em função da tarifa de energia elétrica, mostradas pela Figura 5.1, comparando-se o AS4-3501-6 com os outros materiais de menor custo.

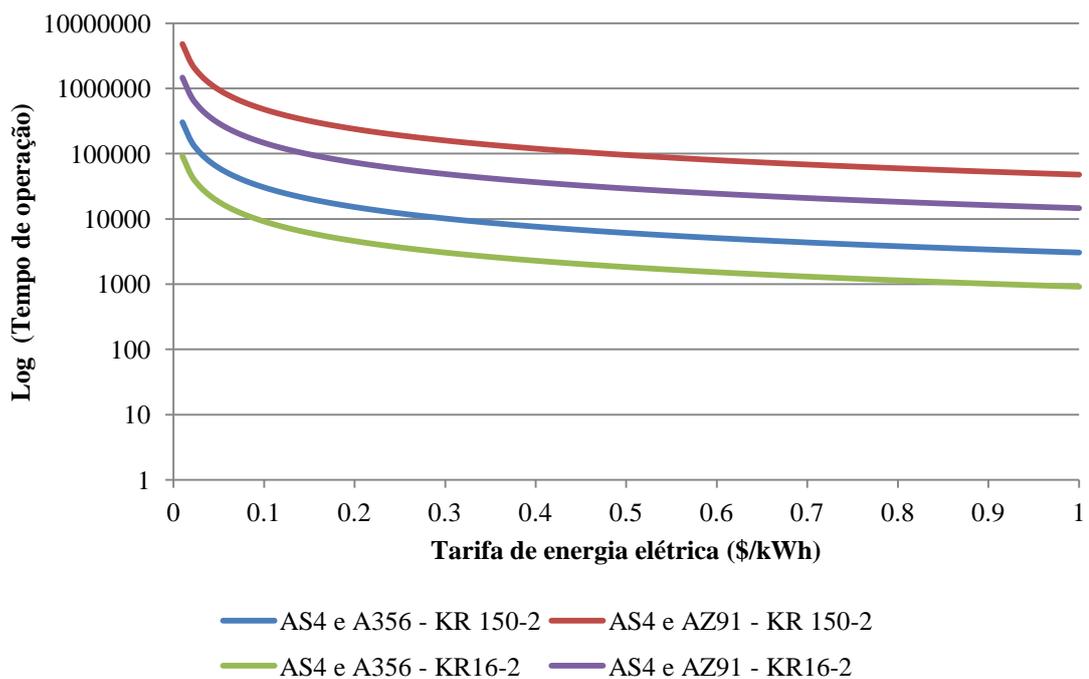


Figura 5.1 – Tempo de operação em função da tarifa de energia.

Considerando-se o custo atual de energia elétrica no mundo [39] \$0,10 kWh, o tempo total de operação para o custo de operação total do AS4/3501-6 se igualar ao A356 é de 9144 e 30410 dias, para, respectivamente, KR 16-2 e KR 150-2. E para o AZ91, 146320 e 474827 dias, para, respectivamente, KR 16-2 e KR 150-2. Sendo assim, não existe um tempo viável de “abatimento” do valor gasto a mais na estrutura em AS4/3501-6, quando se analisa a economia no consumo de energia elétrica. Mesmo que o valor do kWh aumente substancialmente nos próximos anos, os valores necessários para um tempo de “abatimento” viável (menos de seis meses) devem ser mais de 10000 vezes maiores que os atuais, o que anula completamente qualquer possibilidade de mitigação dos gastos ao se analisar as diferentes potências empregadas nas juntas.

Outro critério que vale a pena ser investigado é o tempo de execução, ou o aumento na velocidade de trabalho dos manipuladores. O KR 15-2 obteve na trajetória otimizada um aumento de aproximadamente 6%, enquanto o KR 150-2 obteve um aumento de aproximadamente 8%. Considerando o custo total de operação como  $CTP = CO + CP * t_{TP} + CT$ , sendo CO o custo de operação em função da energia elétrica consumida, CP o custo total de produção,  $t_{TP}$  o tempo total de produção e CT o custo do manipulador, sendo  $CP = CS * ND * t_{TD}$ , onde CS é o custo singular de cada tarefa, ND é o número de tarefas diárias e  $t_{TD}$  o tempo gasto em cada tarefa, chega-se a uma relação de tempo total de operação, em dias de operação, para um mesmo valor de CTP para dois materiais, como a equação 5.2:

$$t_{TP} = \frac{CT_b - CT_a}{CS * ND * t_{ND_a} * (\beta - 1)} \quad (5.2)$$

Onde,  $\beta$  é a razão, ou ganho, de tempos entres os dois materiais.

De acordo com a Equação 5.2, existe uma relação inversa entre a quantidade de tarefa que se executa, o custo singular e o tempo para execução, e o tempo de operação necessário para “abater” o custo superior do material compósito. Sendo  $PO = CS * ND * t_{ND_a}$ , a variável dos parâmetros do processo, reescreve-se a Equação 5.3 da seguinte forma:

$$t_{TP} = \frac{CT_b - CT_a}{PO * (\beta - 1)} \quad (5.3)$$

Dessa forma, substituindo-se as incógnitas pelos valores dos materiais analisados, tem-se para o KR 16-2 e KR 150-2, as quatro curvas de tempo total de produção em função do parâmetro de processo, PO, mostradas pela Figura 5.2, ao se comparar o AS4-3501-6 e o AZ91 com o A356.

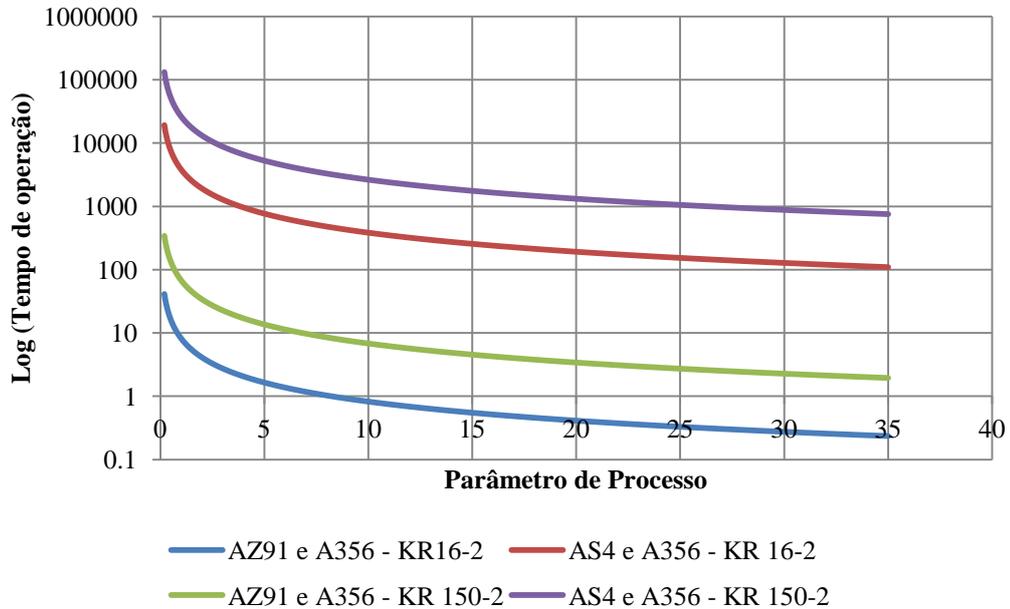


Figura 5.2 – Tempo de produção em função do parâmetro de processo.

De acordo com as curvas apresentadas, para o KR 16-2, a partir de  $PO > 21,5$ , o tempo de retorno é menor que seis meses, na comparação AS4 e A356. Para o KR 150-2, o mesmo tempo de retorno é encontrado a partir de  $PO > 146$ .

Esses valores demonstram que quanto maior for o tempo de operação, e/ou a custo da operação, e/ou a quantidade de operações realizadas em um dia, maior é o tempo de mitigação do compósito em relação ao alumínio. Por exemplo: 500 execuções ao dia, cada uma com tempo de 30s, a um custo singular de \$14,50, em uma jornada de 16 horas de trabalho, resultam em  $PO = 226,56$ , e um tempo de retorno para o KR 16-2 de 17 dias e para o KR 150-2 de 116 dias, em relação ao A356.

É importante notar que depois do tempo de operação calculado, o número de operações realizadas inclui um ganho linear diário, de maneira que, no exemplo citado, a partir do 17º dia de utilização do KR 16-2 ele aumenta a produtividade sem nenhum custo adicional.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivos demonstrar todos os possíveis ganhos na utilização de um material compósito comercial na fabricação de robôs manipuladores industriais. A partir de simulações de corpos rígidos e flexíveis, foram comprovadas todas as melhorias das características das estruturas, conforme se esperava para este material.

Porém, ficou claro a partir da análise financeira que a viabilidade ou não do uso destes materiais em manipuladores robóticos não depende apenas das características dinâmicas e estáticas das estruturas e nem dos ganhos de tempo e velocidade calculados. É preciso relacionar o tipo de tarefa a ser realizadas e suas características para entender se existe uma relação de benefício ou não para o emprego desses materiais.

Devido ao seu valor elevado, somente após uma redução drástica de preço – para cerca de \$5 por quilograma – o material poderá concorrer com seus concorrentes convencionais. Com o crescente aumento do interesse nos materiais compósitos, tudo indica ser uma questão de tempo até que o preço seja equivalente ao de commodities, o que alteraria mais ainda as curvas de abono de investimento e justificaria ainda mais o uso geral do mesmo para a aplicação estudada.

As vantagens estruturais e dinâmicas, ainda que desejadas em qualquer projeto mecânico, no caso de manipuladores, podem não ser tão relevantes. O tipo de tarefa que se deseja realizar é o que conduz essa avaliação para o material.

O material compósito é a escolha ideal para aplicações que demandam alta repetibilidade, precisão, baixas cargas e velocidade de execução. Preferencialmente se envolverem ainda um alto custo de produção. Para tarefas nestas condições, apesar do alto valor da estrutura, em um tempo muito curto, ocorre um abono do investimento empregado e um aumento significativo de produtividade.

A liga de magnésio parece ser a escolha ideal para altas cargas e baixas velocidades e repetibilidade. Apesar de apresentar resultados dinâmicos abaixo do alumínio e do compósito, o magnésio suporta os esforços a que a estrutura é submetida e tem deslocamento total menor

do que o alumínio, seu concorrente direto devido ao preço, para cargas elevadas de trabalho. Apesar de mais caro que o alumínio, o tempo de mitigação de investimento para o magnésio é baixíssimo, principalmente para altas cargas. O grande problema do magnésio é para o caso de alta repetibilidade e precisão, uma vez que ele tem resultados de deslocamento absoluto e frequências naturais significativamente inferiores em relação ao compósito.

A liga alumínio passa a ser uma escolha secundária, para aquelas aplicações de baixa repetibilidade e cargas médias, e alta precisão, nas quais a liga de magnésio não é a solução mais eficiente, devido à pior resposta estática, e tão pouco o compósito, devido ao longo tempo para abono do investimento.

Existe ainda outra possibilidade, não avaliada neste estudo, de alterar as geometrias de cada ligação do manipulador. Esta possibilidade deve acarretar em grandes ganhos para o compósito. Uma vez reduzido o volume da estrutura, devido à alta rigidez que o material possui, ele será o único, dentre aqueles avaliados, capaz de manter um baixo deslocamento absoluto linear e angular. E devido a essa redução de volume, e por consequência, massa, podem-se encontrar outras curvas de tempo para abono de investimento.

Em suma, devido ao alto valor do investimento nesse tipo de material, as estratégias de mitigação propostas neste trabalho não foram capazes de justificar completamente o seu uso para as estruturas de manipuladores robóticos. É necessária uma avaliação do tipo de tarefa e as características que se deseja para o manipulador, antes de tomar a decisão na direção de um material, cujo investimento é consideravelmente mais alto do que os de seus concorrentes.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KUKA Robotics, *Site oficial da KUKA Robotics*, Disponível em <<http://www.kuka.com>>. Acesso em 20/06/2011.
2. AZOM, *World's first Carbon Fiber Composite Robot – The KUKA Palletizing Robot*, Disponível em <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2736>>. Acesso em 20/06/2011.
3. HEXCEL Corporation, *Site oficial da HEXCEL Corporation*, Disponível em <<http://www.hexcel.com>>. Acessado em 09/05/2011.
4. Gwyne, Bruce; Lyon, Paul, *Magnesium Alloys in Aerospace Applications, Past Concerns, Current Solutions*, Disponível em <[http://www.fire.tc.faa.gov/2007\\_conference/files/Materials\\_Fire\\_Safety/WedAM/GwynneMagnesium/GwynneMagnesiumPres.pdf](http://www.fire.tc.faa.gov/2007_conference/files/Materials_Fire_Safety/WedAM/GwynneMagnesium/GwynneMagnesiumPres.pdf)>. Acessado em 14/05/2012.
5. Craig, John J., *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 2.ed., 1989.
6. Rosário, João Maurício, *Princípios de Mecatrônica*, 1.ed., 2005.
7. EHOW, *Site oficial EHOW*, Disponível em <[http://www.ehow.com/about\\_5149655\\_uses-composite-materials.html](http://www.ehow.com/about_5149655_uses-composite-materials.html)>. Acessado em 20/06/2011.
8. Calister Jr., William D, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 5.ed., 2001.
9. Lee, Dai Gil; Suh, Nam Pyo, *Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures: Applications in Robots, Machine tools and Automobiles*, 1.ed., Oxford University Press, 2006.
10. Taranu, Nicaolar, *Fiber reinforced polymer composites as internal and external reinforcements for building elements*, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași Tomul LIV (LVIII), Fasc. 1, 2008
11. Voyiadjis, George Z.; Kattan, Peter I., *Mechanics of Composite Materials with MATLAB*, 1.ed, 2005.
12. Hanlon, M., Site oficial GIZMOD, *World's Fastest Robotic Case Packer - Carbon Fiber reduces weight increases throughput*, Disponível em <<http://www.gizmag.com/go/4136/>>. Acessado em 15/08/2011.
13. Collins, Wes, *Carbon Fiber In Robotics*, Disponível em <<http://ezinearticles.com/?Carbon-Fiber-In-Robotics&id=5521611>>. Acessado em 15/08/2011.
14. Kim, K.S.; Kim, J.W.; Lee, D.G., *Development of the composite third arm of the six-axis articulated robot manipulator*, Composite Structures, Vol.35 (1996), p.331-342.

15. Lee, C.S.; Lee, D.G., *Manufacturing of composite sandwich robot structures using core bonding method*, Composite Structures, Vol. 65 (2004), p. 307-318.
16. Lee, D.G.; Kim, K.S.; Kwak, Y.K.; Kim, J.W., *Novel applications of composites structures to robots, machine tools and automobiles*, Composite Structures, Vol.66 (2004), p.17-39.
17. D.G. Lee, K.S. Jeong, K.S. Kim, Y.K. Kwak, *Development of the anthropomorphic robot with carbon fiber epoxy composite materials*, Composite Structures, Vol.25 (1993), p.313-324.
18. Lee, D.G.; Kim, K.S.; Kwak, Y.K., *Manufacturing of a Scara Type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Material*, Robotica, Vol.9 (1991), p.219-229.
19. Ghazavi, A.; Gordaninejad, F., *A comparison of the control of a flexible robot arm constructed from graphite/epoxy versus aluminum*, Computers and Structures, Vol.54 (1995), p.621-632.
20. Thompson, B.S.; Choi, S.B.; Gandhi, M.V., *A theoretical experimental investigation on the control of a single-link flexible robotic manipulator fabricated from composite laminates*, Machinery Elastodynamics Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Michigan State University.
21. Caprino, G.; Langella, A., *Optimization of robotics arms made of composite materials for maximum fundamental frequency*, Composite Structures, Vol.31 (1995), p.1-8.
22. Gola, M.M., Soma, A., *Design of a Carbon Fiber Robot: Architectural choices and design balancing*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 187 (1993), p. 273-284.
23. Ramachandran, S.; Srinivasulu, B., *Dynamic studies of closed-loop manipulators constructed from composites – and FEM approach*, Finite Element Analysis and Design (1994), p.53-70.
24. Liao, D.X; Sung, C.K.; Thompson, B.S., *The design of flexile robotic arms with optimal geometries fabricated from composite laminates with optimal properties*, The International Journal of Robotics Research, Vol.6 (1987), p.116-130.
25. Chalhoub, N.G.; Gordaninejad, F.; Lin, Q.; Ghazavi, A., *Dynamic modeling of a laminated composite-material flexible robot arm made of short beams*, The International Journal of Robotics Research, Vol.10 (1991), p.560-569.
26. Gordaninejad, F.; Ghazavi, A.; Chaulhoub, N.G., *Dynamic analysis of a composite-material flexible robot arm*, Computers and Structures, Vol.49 (1993), p.315-327.
27. Silva, Samuel, *Introdução ao método dos elementos finitos*, UNIOESTE, 2009.
28. Ribeiro, Fernando L.B., *Introdução ao método dos elementos finitos*, COPPE/UFRJ, 2004.

29. KUKA Robotics, *Robotics DataSheets: KR 16-2/KR 150-2*, Disponível em < <http://www.kuka-robotics.com/en/downloads> >. Acessado em 30/04/2011.
30. Corke, Peter I., *A Robotics Toolbox for MATLAB*, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 3 (1996), p.24-32.
31. Zhang, Z.T et al., Mechanical Properties of cast A356 alloy, solidified at cooling rates enhanced by phase transition of a cooling medium, *Materials Science and Engineering*, Vol.448 (2007), p.361-365.
32. Greger, M., Mechanical properties of magnesium alloy AZ91 at elevated temperatures, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol.18 (2006), p.203-206.
33. HEXCEL Composites, Product Data, 3501-6 Epoxy Matrix, 1998.
34. Metal Prices, Site oficial Metal Prices, Disponível em <<http://www.metalprices.com>>, Acessado em 22/10/2012.
35. Alibada, Site oficial Alibada, Disponível em <<http://www.alibada.com>>, Acessado em 22/10/2012.
36. US National Information Service, *Advanced Materials by Design – New Structures Materials Technologies – Case Study: The advanced composites industry*, 1998.
37. Boyer, John R., *Compilation of a materials cost database for web-based composites cost estimator*, Trabalho de conclusão de curso, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
38. TrendRobotics, Site oficial TrendRobotics, Disponível em <<http://www.trendrobotics.com>>, Acessado em 22/10/2012.
39. Sistema Firjan, *Tarifa de energia para indústria brasileira está 50% acima da média mundial*, Disponível em <<http://www.firjan.org.br/data/pages/2C908CEC30E85C950131B3B6A4A069BE.htm>>, Acessado em 18/11/2012.