

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA ANÁLISE DE
EXATIDÃO E REPETITIVIDADE EM ROBÔS INDUSTRIAIS**

por

Guilherme Henrique Weidlich

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Novembro de 2006.

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA ANÁLISE DE
EXATIDÃO E REPETITIVIDADE EM ROBÔS INDUSTRIAIS**

por

Guilherme Henrique Weidlich
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Flávio José Lorini

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. José Esmério Mazzaferro

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Dr. André Cervieri

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Dedico este trabalho à Cristiane,
minha esposa e Maria Eduarda,
minha filha querida.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Cristiane, pelo incentivo e apoio nesta etapa de minha vida.

Ao professor Lorini, pela orientação, paciência e ensinamentos neste trabalho.

À UFRGS e a toda equipe do Laboratório de Usinagem e Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica, por viabilizar o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Sr. Miguel Juarez Kunzler, representante da empresa Mitutoyo na região Sul, pelo empréstimo dos equipamentos utilizados nos testes experimentais.

RESUMO

A competitividade no mercado atual, aliado a uma demanda por qualidade e produtividade dos produtos, tem gerado um aumento significativo no emprego de robôs nos processos produtivos das indústrias. Entretanto, estes equipamentos estão sujeitos a apresentar problemas, mais especificamente, erros de exatidão e repetitividade em suas operações. Nesse contexto, a proposta deste trabalho consiste em aperfeiçoar o entendimento da metodologia existente para avaliação de desempenho de robôs industriais, apresentada pela norma ISO 9283, “*Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods*”, de modo a viabilizar sua aplicabilidade em testes instrumentalizados para robôs industriais.

O dispositivo de avaliação de desempenho elaborado consiste num sistema conhecido como cubo-berço, projetado, construído e aplicado em um robô industrial, pertencente ao laboratório de usinagem e robótica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. As características de exatidão e repetitividade unidirecionais de posicionamento foram mensuradas experimentalmente com base nos critérios constantes na norma específica.

Os dados foram obtidos da medição dos erros tridimensionais entre as posições atingidas nos ensaios e as posições programadas no robô de teste, através de um sistema de medição prático e de baixo custo. O dispositivo de medição é constituído por três relógios digitais, montados ortogonalmente em cada eixo do sistema de coordenadas do robô, sob uma estrutura metálica rígida, e conectados a um sistema informatizado, para a coleta e registro dos dados.

Os resultados apresentados se mostraram satisfatórios, viabilizando o uso da metodologia apresentada na norma, assim como, do dispositivo de avaliação de desempenho projetado neste estudo.

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A PRECISION AND REPEATABILITY DEVICE ANALYSIS IN INDUSTRIAL ROBOTS

The competitiveness in the current market, ally to a demand for quality and productivity of the products, has generated a significant increase in the job of robots in the productive processes of the industries. However, these equipments can present some problems, more specifically, errors precision and repeatability errors in operations. The proposal of this paper consists of perfecting the agreement of the existing methodology for evaluation of industrial robots performance, presented for norm ISO 9283, “*Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods*”, to make possible its applicability in instrumentation tests for industrial robots.

The projected device consists of a known system as cube-cradle, projected, constructed and applied in an industrial robot installed on the robotics laboratory of the Rio Grande do Sul Federal University - UFRGS. The precision and repeatability characteristics of positioning had been experimentally measures on the constant criteria basis in the specific norm.

The data had been gotten of the three-dimensional measurement errors between the test positions reached and the robot programmed positions, through a practical measurement system and low cost. The measurement device is constituted by three digital gages, assembled in each axle of the robot coordinate basis system, under a metallic structure, and connected to a electronic system, for the data collection and registers.

The presented results had shown satisfactory, making possible the use of the methodology presented in the norm, as well, of the projected device of performance evaluation in this study.

Robot, Performance Evaluation, Cube-Cradle System, Precision and Repeatability of Positioning

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação do Trabalho.....	5
1.2. Objetivo do Trabalho.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Fontes de Erros em Robótica.....	8
2.2. Modelagem do Manipulador.....	10
2.3. Volume de Trabalho.....	16
2.4. Programação de Robôs.....	18
2.5. Desempenho e Calibração de Robôs.....	21
2.6. Metodologia e Condições para Testes de Desempenho.....	24
2.7. Métodos de Testes e Medição para Robôs Industriais.....	37
3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO CUBO-BERÇO.....	50
3.1. Características Técnicas.....	50
3.2. Concepção Lógica Operacional do Sistema.....	50
3.3. Modelagem Matemática Para o Cálculo de Posição do Cubo de Teste.....	51
3.4. Projeto do Sistema de Medição.....	57
4. APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS.....	61
4.1. Materiais e Métodos.....	61
4.2. Ensaios Experimentais.....	63
4.3. Fontes de Incerteza.....	66
5. ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	69
5.1. Resultados dos Ensaios.....	69
5.2. Considerações Finais.....	78
6. CONCLUSÕES.....	79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS.....	85
Anexo 1 – Características de Distância.....	85
Anexo 2 – Características de Trajetória.....	90
Anexo 3 – Programação dos Ensaios (Linguagem RAPID).....	94
Apêndice 4 - Projeto do Dispositivo de Medição.....	115

LISTA DE SÍMBOLOS

ABB	<i>Asea Brown Boveri Corporation</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacture</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
DH	<i>Denavit Hartenberg</i>
DMX	<i>Digital Multiplex</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
PI	<i>Proportional-Integral Controller</i>
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative Controller</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SCARA	<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>
TCP	<i>Tool Center Point</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Relação entre os modos de automação.....	1
Figura 1.2 - Componentes básicos que compõem um robô industrial.....	2
Figura 1.3 - Sistema de controle ponto a ponto.....	3
Figura 1.4 - Sistema de controle por trajetória contínua.....	3
Figura 1.5 - Sistema de controle por trajetória controlada.....	3
Figura 2.1 - Ilustração de exatidão e resolução de controle.....	7
Figura 2.2 - Ilustração da distribuição estatística de repetitividade.....	7
Figura 2.3 - Relação entre exatidão e repetitividade.....	8
Figura 2.4 - Modelagem do manipulador.....	11
Figura 2.5 - Relação entre a cinemática direta e cinemática inversa.....	12
Figura 2.6 - Representação da cadeia cinemática por <i>Denavit-Hartenberg</i>	13
Figura 2.7 - Sistemas de coordenadas do efetuador em relação ao sistema de coordenadas da base.....	15
Figura 2.8 - Sistema de controle de uma junta robótica.....	16
Figura 2.9 - Configuração cartesiana do espaço de trabalho.....	17
Figura 2.10 - Configuração cilíndrica do espaço de trabalho.....	17
Figura 2.11 - Configuração esférica do espaço de trabalho.....	17
Figura 2.12 - Configuração SCARA do espaço de trabalho.....	18
Figura 2.13 - Configuração antropomórfica do espaço de trabalho.....	18
Figura 2.14 - Tipos de abordagens para calibração de robôs.....	24
Figura 2.15 - Representação dos ângulos de orientação e sistema de coordenadas.....	25
Figura 2.16 - Cubo de teste no volume de trabalho do robô.....	27
Figura 2.17 - Planos de testes de posição inscritos no cubo em relação ao sistema base de coordenadas.....	28
Figura 2.18 - Posições de teste em relação ao sistema de coordenadas.....	29
Figura 2.19 - Planos de testes de trajetória inscritos no cubo.....	30
Figura 2.20 - Trajetórias de teste em relação ao sistema base de coordenadas.....	31
Figura 2.21 - Posturas de posição em relação ao sistema base de coordenadas.....	32
Figura 2.22 - Exatidão e repetitividade unidirecional de posicionamento.....	32

Figura 2.23 - Exatidão unidirecional de orientação.....	33
Figura 2.24 - Exemplos de seqüência dos ciclos de medição.....	35
Figura 2.25 - Sistema cubo-berço para medição de repetitividade de posição.....	37
Figura 2.26 - Sistema de comparação com guia mecânica.....	38
Figura 2.27 - Sistema de comparação com guia laser.....	38
Figura 2.28 - Princípio de trilateração tridimensional.....	39
Figura 2.29 - Interferômetro com multi-tracking laser.....	39
Figura 2.30 - Sistema de trilateração ultrassônica.....	40
Figura 2.31 - Sistema de trilateração com cabos mecânicos.....	40
Figura 2.32 - Princípio de medição tridimensional por coordenadas polares.....	41
Figura 2.33 - Sistema de medição com interferômetro laser.....	41
Figura 2.34 - Sistema de medição com o uso estação total.....	42
Figura 2.35 - Sistema de medição com o uso de escala linear.....	42
Figura 2.36 - Método de medição por triangulação.....	43
Figura 2.37 - Sistema de triangulação por rastreamento laser.....	43
Figura 2.38 - Sistema de triangulação com uso de detector laser.....	44
Figura 2.39 - Sistema de triangulação com uso de sensores CCD.....	44
Figura 2.40 - Sistema de triangulação com uso de teodolitos.....	45
Figura 2.41 - Sistema de triangulação com uso de câmeras.....	45
Figura 2.42 - Sistema de medição inercial.....	45
Figura 2.43 - Sistema de medição digital bidimensional (opção 1).....	46
Figura 2.44 - Sistema de medição digital bidimensional (opção 2).....	46
Figura 2.45 - Sistema de medição digital bidimensional (opção 3).....	47
Figura 2.46 - Sistema de medição com o uso de máquina de coordenadas.....	47
Figura 3.1 - Representação esquemática do sistema de teste cubo-berço.....	50
Figura 3.2 - Relação entre os sistemas de coordenadas.....	51
Figura 3.3 - Representação dos movimentos das juntas rotacionais de um robô antropomorfo....	52
Figura 3.4 - Representação esquemática de um manipulador antropomorfo.....	53
Figura 3.5 - Vista lateral do robô IRB1400 – ABB.....	54
Figura 3.6 - Vista de topo do robô IRB1400 – ABB.....	54
Figura 3.7 - Relógio comparador digital MITUTOYO 543-250B.....	57

Figura 3.8 - Desenho esquemático do flange de fixação do robô IRB 1400.....	58
Figura 3.9 - Blocos padrões utilizados nos ensaios de exatidão e repetitividade.....	59
Figura 3.10 - Influência dos erros de planicidade e ortogonalidade sobre as leituras.....	59
Figura 3.11 - Modelo do dispositivo de medição desenvolvido.....	60
Figura 4.1 - Plano de teste C ₁ -C ₂ -C ₇ -C ₈	61
Figura 4.2 - Vista lateral do cubo de teste no volume de trabalho do robô.....	62
Figura 4.3 - Vista de topo do cubo de teste no volume de trabalho do robô.....	62
Figura 4.4 - Estrutura de sustentação para dispositivo de medição.....	63
Figura 4.5 - Seqüência dos ciclos de medição nos ensaios.....	64
Figura 4.6 - Fotos ilustrativas do dispositivo de medição cubo-berço.....	65
Figura 4.7 - Fotos ilustrativas dos blocos e representação esquemática dos pontos medidos.....	67
Figura 5.1 - Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P ₁	69
Figura 5.2 - Gráficos de exatidão e repetitividade unidirecional em P ₁	70
Figura 5.3 - Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P ₂	71
Figura 5.4 - Gráficos de exatidão e repetitividade unidirecional em P ₂	72
Figura 5.5 - Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P ₃	73
Figura 5.6 - Gráficos de exatidão e repetitividade unidirecional em P ₃	74
Figura 5.7 - Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P ₄	74
Figura 5.8 - Gráficos de exatidão e repetitividade unidirecional em P ₄	76
Figura 5.9 - Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P ₅	76
Figura 5.10 - Gráficos de exatidão e repetitividade unidirecional em P ₅	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Relação entre as posições de teste e as características testadas.....	29
Tabela 2.2	Relação entre o número mínimo de ciclos e as características testadas.....	31
Tabela 2.3	Condições para os testes de exatidão e repetitividade unidirecional de posição.....	34
Tabela 2.4	Comparação de desempenho entre sistemas de medição.....	48
Tabela 2.5	Métodos de medição x características de desempenho.....	48
Tabela 3.1	Parâmetros de <i>Denavit-Hartenberg</i>	53
Tabela 3.2	Parâmetros de <i>Denavit-Hartenberg</i> do robô IRB1400 - ABB.....	54
Tabela 4.1	Variação dos parâmetros do ensaio para cada posição de teste.....	64
Tabela 5.1	Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P ₁	70
Tabela 5.2	Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P ₂	71
Tabela 5.3	Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P ₃	73
Tabela 5.4	Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P ₄	75
Tabela 5.5	Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P ₅	77

1. INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, as empresas de manufatura têm enfrentado diversos desafios, sejam eles relacionados ao mercado cada vez mais competitivo, ou impostos pelo aumento do desenvolvimento tecnológico. Em virtude disso, faz-se necessário uma constante mudança nos sistemas produtivos, objetivando o aumento da produtividade, a redução dos custos operacionais, a minimização dos níveis de estoques e, conseqüentemente, o aumento da competitividade. Dentro deste contexto, o desenvolvimento de máquinas e tecnologias que auxiliem na otimização dos processos produtivos, trazendo como vantagens imediatas e expressivas a possibilidade de executar operações em menor tempo e qualidade superior exige tanto uma necessária melhoria na gestão dos sistemas de fabricação quanto um crescente grau de automação para propiciar uma efetiva modernização da indústria.

A automação considerada em um enfoque industrial pode ser definida como uma tecnologia que se ocupa de sistemas mecânicos, eletrônicos bem como uma base de computadores e sistemas aplicados tanto na operação como no controle dos processos produtivos. Pode-se classificar a automação industrial em três classes: automação fixa, programável e flexível [Groover, 1987]. A relação destas modalidades de automação, em função da variedade de produtos e volume de produção, é ilustrada na Figura 1.1.

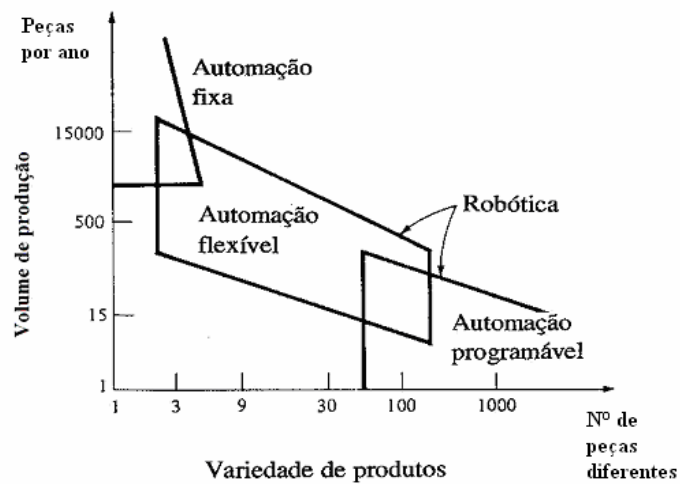


Figura 1.1 – Relação entre modos de automação [Groover, 1987].

Dos três tipos de automação, a tecnologia robótica está estritamente relacionada com os modos flexível e a programável, em função dos robôs serem equipamentos controlados através de comandos programáveis com facilidade de serem integrados em sistemas flexíveis de manufatura, implicando em significativo emprego na automação industrial. Um robô industrial é um equipamento para finalidades gerais, composto por uma estrutura mecânica, que consiste de uma seqüência de corpos rígidos (segmentos) conectados por meio de articulações (juntas) com

vários graus de liberdade, reprogramável, servo-controlado, que pode possuir características antropomórficas, ou similares às humanas.

A figura 1.2 ilustra os componentes básicos que constituem um robô industrial, e seus principais módulos [Lafratta, 1990]. Como parte do controlador (*C*), o programa de aplicação contém instruções para a movimentação e interação do robô industrial com o meio que o circunda. Através do sistema de medição (sensores) são conhecidos os posicionamentos, velocidades e acelerações dos módulos de movimentação a cada instante. A função do controlador é fazer com que o robô (*R*) cumpra as instruções contidas no programa de aplicação com base nas informações enviadas pelo sistema de medição. A interação entre estes dois módulos se faz através dos acionadores, que atuam sobre as juntas resultando no movimento do manipulador.

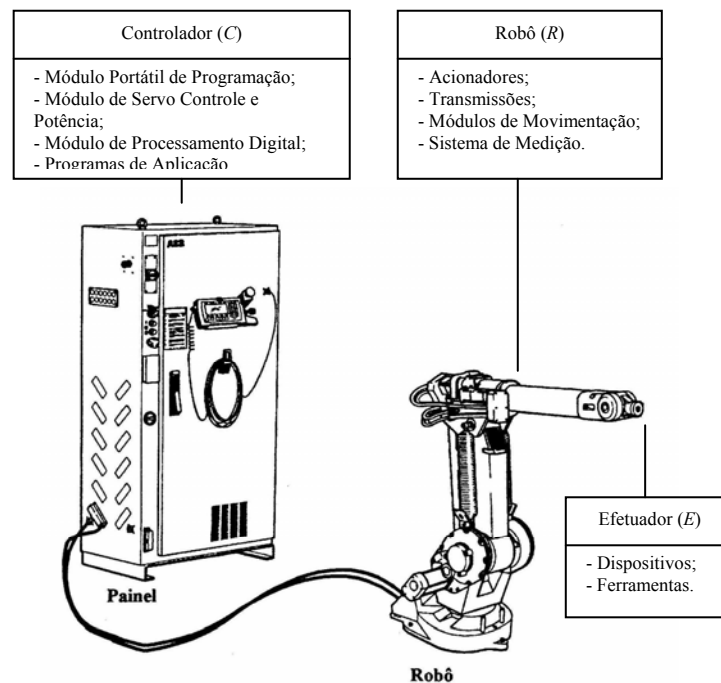


Figura 1.2 – Componentes básicos que compõem um robô industrial.

Os sistemas de controle dos movimentos, definidos no programa de aplicação, podem ser efetuados basicamente de três maneiras [Greenway, 2000]:

Controle ponto a ponto – a forma mais simples de controle, onde o robô é capaz de se deslocar de um ponto ao outro do seu volume de trabalho, com trajetória e não controlada ao longo desse movimento, conforme o esquema de controle ilustrado na figura 1.3.

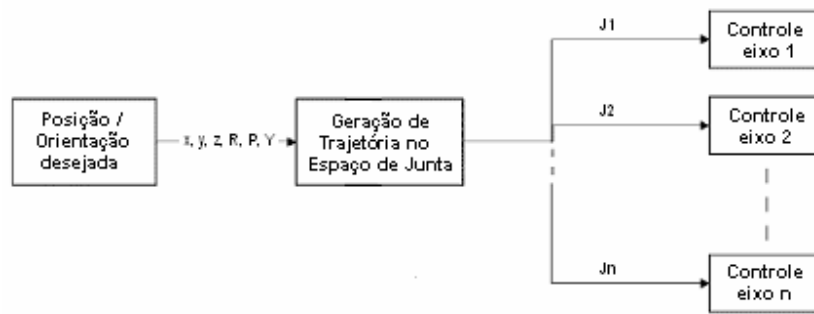


Figura 1.3 – Sistema de controle ponto a ponto [Greenway, 2000].

Controle por trajetória contínua – a trajetória é total ou parcialmente contínua, permitindo o controle do movimento e velocidade de cada eixo em simultâneo. O robô tem por finalidade deslocar o efetuador (E) até a posição-orientação que se deseja executar a tarefa definida. Este controle é baseado na cinemática inversa dos parâmetros de juntas dos segmentos do manipulador, conforme ilustrado no esquema de controle da figura 1.4.

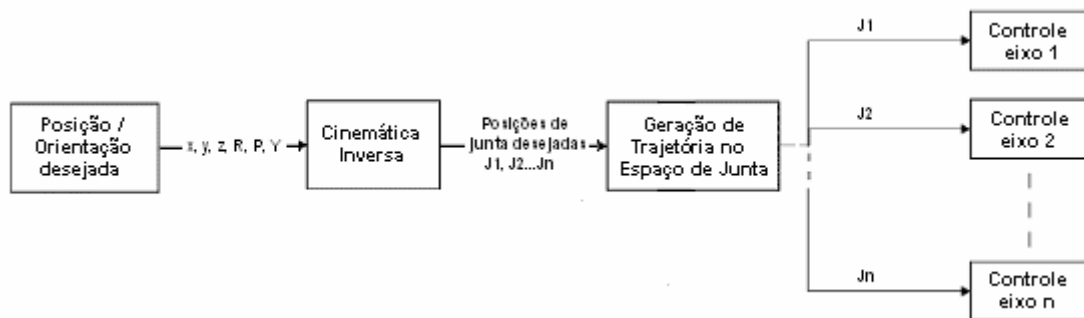


Figura 1.4 – Sistema de controle por trajetória contínua [Greenway, 2000].

Controle por trajetória controlada – neste tipo de controle, tem-se a possibilidade de gerar trajetórias com diferentes geometrias, onde é necessário apenas memorizar o ponto de início e final de trajetória. Neste caso é requerido um controle cinemático inverso para toda trajetória intermediária gerada ao longo do deslocamento, conforme ilustrado no esquema de controle da figura 1.5.

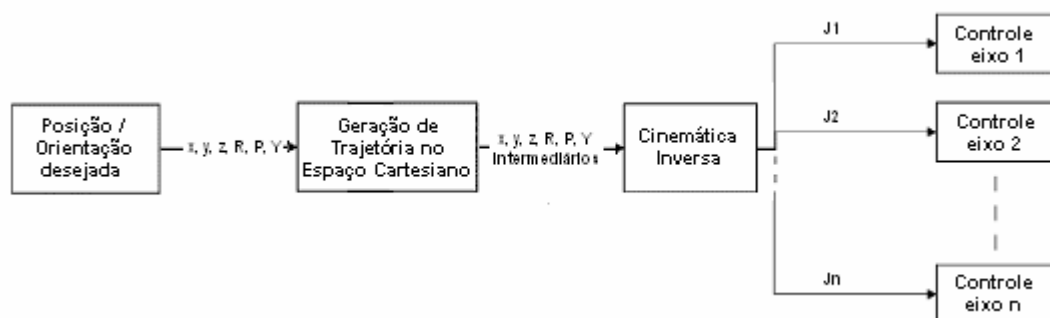


Figura 1.5 – Sistema de controle por trajetória controlada [Greenway, 2000].

As características de programação permitem que um robô seja aplicado nas mais diversas operações industriais: no manuseio de materiais ou peças, aplicações de processo (soldagem a arco elétrico, soldagem por ponto e pintura com pistola), operações de carga e descarga, e montagem de conjuntos e inspeção no processo produtivo [Groover et al., 1986].

Embora os próprios robôs sejam exemplos de automação programável, são constantemente aplicados em sistemas de automação flexível e até de automação fixa. Esses sistemas compõem-se de diversas máquinas e/ou robôs operando conjuntamente e são tipicamente controlados por um computador ou controlador programável. Uma linha de produção que realiza solda em carrocerias de automóveis é um exemplo desse tipo de sistema, que consiste de uma série de robôs que realizam centenas de soldagens em modelos distintos de carrocerias (por exemplo, sedãs, cupês ou camionetes), neste caso pode ser considerada um sistema de automação flexível de alta produção. Para desempenhar estas tarefas há uma grande necessidade de sensoriamento. O problema se resume em determinar a localização do objeto a ser manipulado, soldado ou pintado em relação ao efetuador do robô.

Os sensores internos do robô, geralmente instalados nas juntas, são aplicados para determinar a posição-orientação do efetuador em relação a um sistema de referência fixo. Os objetos/equipamentos que interagem com o robô normalmente são mantidos fixos em relação à referência ao menos durante o intervalo de tempo em que o robô trabalha com cada um. No caso de qualquer mudança de posição-orientação dos objetos, o controlador do robô deve ser informado, o que implica em alteração do programa.

Um dos principais obstáculos para a introdução de técnicas de programação automática de robôs para aplicação dos mesmos em sistemas de manufatura integrada por computador é a necessidade de alta exatidão para a execução das tarefas [Duelen e Schöer, 1998].

Uma solução é gerar a parte do programa responsável pela seqüência de instruções usando técnicas e ferramentas de programação *off-line* e, separadamente, programar, ou seja, gravar as posições (dados) usando algum tipo de dispositivo que comande a movimentação do robô. Como a repetitividade dos robôs em geral é satisfatória, da ordem de 0.1 mm [Chen e Chao, 1987], esta abordagem resolve o problema, mas apresenta limitações. Caso haja alteração da disposição dos equipamentos que interagem com o robô torna-se necessária a reprogramação das posições, o que pode vir a ser um grande trabalho, dependendo da variedade de peças que se produz. Seria conveniente se estivesse disponível um método para recalcular as posições já armazenadas, mas este método fatalmente esbarraria no problema da exatidão do robô.

Em princípio a exatidão deveria ser da mesma ordem de grandeza que a repetitividade, visto que ambas são prejudicadas pelos mesmos fatores [Laus, 1998]: erro na determinação da

posição angular das juntas, erro na medição da posição-orientação do efetuador, imprecisões mecânicas, variações térmicas, etc. Contudo, quando o controlador do robô determina o valor do vetor de variáveis de junta a ser aplicado para atingir uma determinada posição-orientação do efetuador o faz com base em diversas informações, que por simplificação podem ser desprezadas.

1.1. Motivação do Trabalho

Em virtude da grande variedade de modelos de robôs industriais disponíveis no mercado, muitas vezes torna-se uma tarefa difícil à escolha do equipamento mais adequado para uma dada aplicação. Dentre outros fatores a ser considerados, são necessários parâmetros de desempenho comparáveis para que se possam selecionar as máquinas corretamente. Os parâmetros disponibilizados por alguns fabricantes são incompletos, no sentido que muitos dos indicadores de desempenho não são fornecidos ou inconsistentes, devido à terminologia confusa e os métodos de teste não claramente especificados.

Nesse contexto, a principal motivação para o trabalho, consiste no propósito de aperfeiçoar o entendimento da metodologia para avaliação de desempenho de robôs industriais proposta pela ISO 9283, “*Manipulating Industrial Robots – Performance Criteria and Related Test Methods*” [ISO, 1995], de modo a viabilizar sua aplicação prática em testes instrumentalizados para robôs industriais, permitindo levantar dados relativos a seu desempenho, seja para identificar suas características ou mesmo diagnosticar seu estado, em função do tempo e condições de operação em que tenha sido submetido ao longo de suas aplicações.

1.2 Objetivo do Trabalho

O principal objetivo do trabalho consiste na concepção de um sistema experimental que permita, dentro das recomendações da norma correspondente, diagnosticar as condições de performance de um robô industrial, especificamente suas características de exatidão e repetitividade unidirecionais de posicionamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As aplicações em robótica têm aumentado consideravelmente desde a introdução dos primeiros robôs na indústria. Estas aplicações ainda incluem o uso tradicional em empresas de manufatura, mas mais recentemente, os robôs estão sendo empregados para os mais variados fins, inclusive dentro da comunidade médica, mais especificamente, em eventos cirúrgicos. Dentro deste novo contexto, os conceitos de resolução espacial, exatidão e repetitividade são fundamentais para garantir o perfeito funcionamento das máquinas.

A **resolução espacial** de um robô é o menor incremento de movimento em que o robô pode dividir seu volume de trabalho, está diretamente associada à resolução de controle do sistema e as imprecisões mecânicas da máquina [Groover et al., 1986]. A capacidade de dividir o deslocamento total de uma junta em incrementos depende da capacidade de armazenamento de bits na memória de controle, ou seja, para um número de N bits, o número de incrementos corresponde a 2^N .

Um robô com vários graus de liberdade teria uma resolução de controle para cada junta de movimento, e para obtenção da resolução espacial do equipamento, as resoluções componentes deveriam ser somadas vetorialmente. As imprecisões mecânicas têm grande influência sobre a resolução espacial, que resultam de flexão elástica nos elementos estruturais, folgas nas engrenagens, vazamentos de fluídos hidráulicos e outras falhas no sistema de transmissão mecânico. Os parâmetros importantes a serem considerados na avaliação do desempenho de um manipulador industrial são respectivamente a sua exatidão e repetitividade para posicionamento e orientação.

Pode-se definir o termo **exatidão**, no sentido particular empregado em robótica, como sendo o quão próximo se obtém a posição-orientação real do efetuador do valor predito pelo controlador do robô dentro do volume de trabalho [Goswani et al., 1993].

A exatidão pode ser definida em termos da resolução espacial, porque a capacidade de atingir um dado ponto depende do quão próximo o robô pode definir os incrementos de controle para cada um dos movimentos de suas juntas. Na pior condição, o ponto desejado se situaria entre os dois incrementos adjacentes, e não considerando as imprecisões mecânicas, seria definido como a metade da resolução de controle (Figura 2.1).

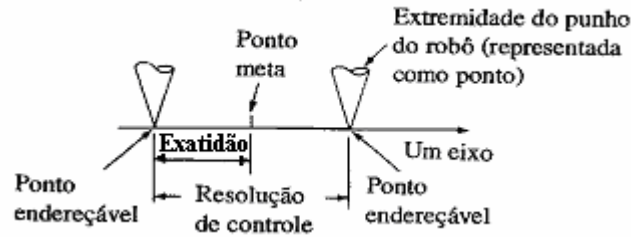


Figura 2.1 – Ilustração de exatidão e resolução de controle [Groover, 1987].

A **repetitividade** é definida como a capacidade do efetuador de retornar a uma posição-orientação que já havia sido atingida por repetidas vezes [Driels e Pathre, 1990] ou a medida da distribuição desses vários posicionamentos em torno do valor predito [Groover et al., 1986]. Erros de repetitividade formam uma variável aleatória e constituem uma distribuição estatística, tal como ilustrado na figura 2.2.

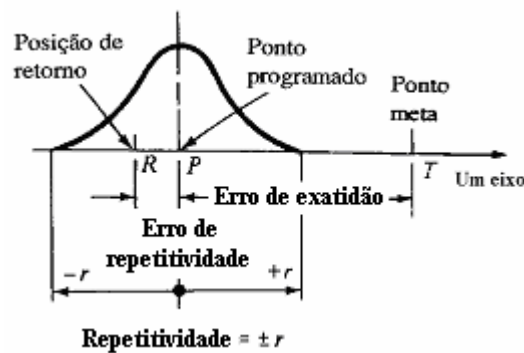


Figura 2.2 – Ilustração da distribuição estatística da repetitividade [Groover, 1987].

No espaço tridimensional os erros de repetitividade circundam o ponto programado (P), formando uma distribuição cujo limite externo pode ser conceituado como uma esfera. Um fabricante de robô cita tipicamente essa variável de seu manipulador como sendo o raio da esfera idealizada, geralmente exprimindo a especificação como mais ou menos um valor particular. O tamanho da esfera tenderá a ser maior nas regiões do volume de controle que estão mais afastadas do centro do robô. É provável que a forma da esfera não seja perfeitamente circular, sendo, em vez disso, alongada em certas direções, devido à complacência do braço do robô.

A Figura 2.3 ilustra a relação entre exatidão e repetitividade, apresentando de forma esquemática, diferentes situações de desempenhos de um robô industrial [Shiakolas et al., 2002].

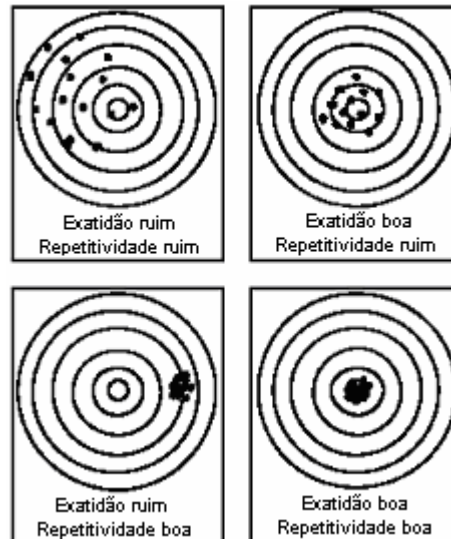


Figura 2.3 – Relação entre exatidão e repetitividade.

2.1 Fontes de erro em Robótica

As fontes de erro em robôs industriais podem ser divididas em quatro principais categorias: geométricas, dinâmicas, térmicas e de sistema [Greenway, 2000]. Em cada categoria existem causas distintas, que podem ser reduzidas ou eliminadas através de estudos e desenvolvimento de ferramentas corretivas, como um procedimento de calibração.

2.1.1 Erros Geométricos

Em virtude das falhas de tolerância na fabricação dos componentes do robô, erros geométricos são inevitáveis. Estes erros podem aparecer na forma de erros translacionais, rotacionais, de ortogonalidade e de paralelismo. Raramente estes erros são incluídos nas equações cinemáticas que descrevem o mecanismo do robô. Isto resulta em cálculos cinemáticos próximos, mas não perfeitos. Os tipos de erros geométricos mais críticos são aqueles que criam um erro angular (ortogonalidade e paralelismo). A distância entre o vértice do ângulo e do ponto de interesse, geralmente a junção seguinte, amplifica esses erros angulares.

2.1.2 Erros Dinâmicos

Como os robôs são projetados para executar movimentos, conseqüentemente ocorrem cargas dinâmicas associadas com estes movimentos. Os erros dinâmicos resultarão do carregamento inercial e de ressonância estrutural excitados pelo movimento. Estes são, provavelmente, os tipos de erros mais difíceis de compensar, pois a modelagem dos seus efeitos é complexa computacionalmente. Na maioria dos estudos em robótica, estes erros são ignorados, porque ocorrem ao longo da trajetória do movimento e não nos pontos da extremidade do

manipulador. Entretanto, se o interesse do estudo for o controle baseado na trajetória, os erros dinâmicos podem tornar-se significativos e devem ser modelados.

2.1.3 Erros Térmicos

Por causa das diferenças de propriedades dos materiais usados na fabricação dos componentes do robô, erros térmicos ocorrem. Estes erros são raramente lineares e assim não podem ser compensados usando um fator de escala simples. As fontes de calor que causam estes erros podem ser várias e incluem os motores, os rolamentos, os mecanismos de movimentação, os componentes eletrônicos e também as mudanças ambientais. As mudanças ambientais têm tipicamente um efeito mais uniforme porque a fonte de calor não é localizada. Estes erros também podem ser classificados como geométricos, enquanto alterações na temperatura mudem a geometria dos corpos.

2.1.4 Erros de Sistema

Os erros nesta categoria incluem aqueles causados pela calibração imprópria, a inexatidão dos sensores, folgas dos mecanismos de movimentação e ajuste deficiente dos servo-motores. Estes erros podem ser administrados, uma vez que são identificados. O problema, entretanto, existe em identificar estes erros ou separá-los de todas as fontes de erro restantes. A calibração imprópria do robô, uma fonte de erro comum e significativa, pode ser dividida em uma variedade de formas. As inexatidões em sensores são geralmente insignificantes devido às avançadas técnicas de fabricação que caracterizam os *encoders* como componentes robustos confiáveis. Quando há um problema com um sensor, têm-se tipicamente resultados completamente catastróficos sendo imediatamente identificado. A folga num mecanismo de movimentação é uma questão que não tem parcialidade com algum sentido determinado, como é o caso dos esforços da gravidade sobre os eixos dos segmentos do manipulador. Dependendo da carga manipulada, a folga pode ser medida e compensada automaticamente. Problemas de ajuste com servo-motores, podem ser mapeados com o auxílio de softwares, que podem identificar as variações sistemas, erros de estado estacionário, oscilações, etc. A maioria dos robôs comerciais tem seus servomecanismos ajustados de fábrica para as condições de não carregamento e carga nominal. Uma situação substancialmente diferente de carregamento pré-estabelecido pode implicar em um necessário ajuste nos servo-motores.

2.2 Modelagem do Manipulador

Modelo é um sistema que tem o comportamento aproximado de um sistema real e o perfeito resultado prático desta aproximação depende da estrutura do modelo e dos valores das constantes (parâmetros). O modelo cinemático de um robô visa estabelecer uma descrição da posição-orientação do efetuador como uma função de variáveis de junta, o que é normalmente conhecido como cinemática direta [Craig, 1986]. Uma extensão natural deste conceito é considerar que essa função depende também da configuração e da carga, já que o manipulador não é constituído de corpos absolutamente rígidos.

Dependendo da exatidão que se pretende, isto é, de quão próximo os valores preditos pelo modelo devam estar do valor real da posição-orientação do efetuador, a complexidade do modelo deve ser maior ou menor. Normalmente, a grande preocupação num processo de calibração de um robô, está em modelar corretamente as principais fontes de erro. Assim, verifica-se que os deslocamentos (*offsets*) de junta são responsáveis por cerca de 90% do erro médio quadrático (RMS – *Root Mean Square*) de posição, variações nos parâmetros que definem as relações geométricas entre os segmentos são responsáveis por cerca de 5% e as transmissões por 1% [Judd e Knasisniki, 1990]. A maioria dos algoritmos de identificação encontrados na literatura foi formulada como um problema de regressão. O problema pode ser visto como encontrar a melhor adaptação de uma função matemática que relaciona posição angular das juntas e posição-orientação do efetuador, o que é válido mesmo se o algoritmo incluir a modelagem de erros ditos não-geométricos [Everett e Hsu, 1988]. Considera-se assim, uma divisão dos tipos de parâmetros conforme o que se pretende modelar: parâmetros geométricos, que modelam as relações puramente geométricas dos segmentos e juntas do manipulador (comprimentos dos segmentos, ângulos de torção entre eixos, *offsets* das juntas); e parâmetros não-geométricos, como: deformações permanentes, flexibilidade, carga, atrito, folga, excentricidade da transmissão, erro no valor da taxa de redução da transmissão e acoplamento.

A partir dos conceitos considerados, um modelo proposto para o manipulador é ilustrado na figura 2.4, para parâmetros não-geométricos no *Modelo Mecânico* e no *Modelo de Transmissão*, bem como, os parâmetros geométricos no *Modelo Cinemático* para descrever a posição-orientação do efetuador ou do ponto central da ferramenta (TCP – *Tool Center Point*). [Duelen e Schöer, 1998].

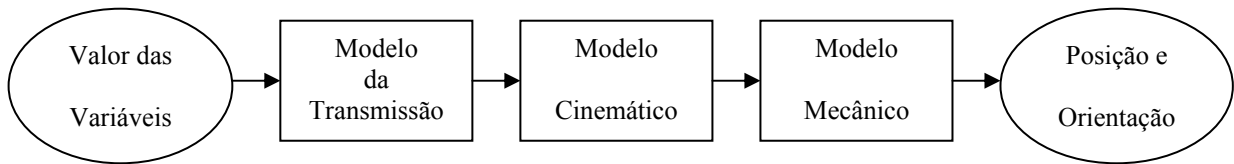


Figura 2.4 – Modelagem do manipulador.

2.2.1 Modelo Cinemático do Manipulador

Para fins de análise cinemática, pode-se considerar o robô como uma **cadeia cinemática**, ou seja, um conjunto de segmentos rígidos conectados entre si por juntas. Esta modelagem cinemática se faz necessária, independente do fato do movimento ser causado pelos atuadores pertencentes ao dispositivo (manipulador) ou do movimento ser provocado por esforços externos aplicados ao dispositivo. A cinemática não estuda as massas, forças e/ou momentos que provocam o movimento, e sim, a representação da geometria do movimento de um dispositivo mecânico com uma ou mais juntas e ligações. A cinemática do manipulador só diz respeito aos parâmetros das juntas que definem a estrutura geométrica das ligações e os ângulos das juntas, onde descreve o deslocamento espacial do atuador do robô em relação a um sistema fixo de referência de coordenadas, que é geralmente denominado por sistema de coordenadas da base. Em robótica, tais juntas podem ser descritas como: rotativas (R) ou prismáticas (P), as quais permitem apenas um grau de liberdade. Assim, a ação de cada junta pode ser descrita por uma só variável: o ângulo de rotação (juntas R) ou o deslocamento linear (juntas P).

A modelagem cinemática do robô pode ser realizada de duas formas, através da **cinemática direta**, que calcula para uns dados valores dos ângulos das juntas e parâmetros das ligações, a posição-orientação do efetuador, ou pela **cinemática inversa**, que fornece as variáveis das juntas para um dado conjunto de parâmetros de ligações e para uma posição do efetuador [Silva, 1996]. A solução simbólica do problema da cinemática direta pode ser encontrada facilmente, enquanto que a computação da solução simbólica do problema da cinemática inversa é mais complexa e, por vezes, mesmo impossível. A relação entre a cinemática direta e a inversa está representada na figura 2.5.

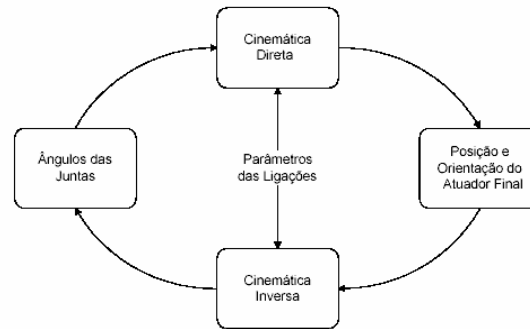


Figura 2.5 – Relação entre a cinemática direta e a cinemática inversa

A cadeia cinemática representativa de um robô pode ser **aberta**, na qual existe apenas uma junta conectando dois segmentos consecutivos, ou **fechada**, quando se pode ter mais de uma junta conectando dois segmentos consecutivos.

A técnica geralmente utilizada para determinar e descrever a cinemática de um robô baseia-se na notação de *Denavit-Hartenberg*, que é um método sistemático que usa o mínimo número de parâmetros para descrever completamente a relação cinemática direta entre os segmentos do robô. Esta técnica consiste de uma aproximação generalizada utilizando matrizes de transformação homogêneas, onde cada matriz descreve as relações espaciais ou as transformações entre dois segmentos adjacentes. A aplicação sucessiva destas transformações a todos os segmentos do braço do robô leva a uma matriz de transformação equivalente, que descreve o posicionamento espacial do atuador relativamente ao sistema de coordenadas da base do braço manipulador. A notação *Denavit-Hartenberg* (DH), ilustrada na Figura 2.6, é definida conforme os seguintes passos [Sciavicco, 1995]:

- ✓ Define-se o eixo z_{i-1} coincidente ao eixo da junta $i+1$;
- ✓ Coloca-se a origem θ_i na intersecção do eixo z_i com a normal comum aos eixos z_{i-1} e z_i . Também coloque θ_{i-1} na intersecção da normal comum com o eixo z_{i-1} ;
- ✓ Escolhe-se o eixo x_i ao longo da normal comum aos eixos z_{i-1} e z_i , com direção da junta i para a junta $i+1$;
- ✓ Escolhe-se o eixo y_i conforme a regra da mão direita.
- ✓ Esta notação deixa de ser única nos seguintes casos:
 - ✓ Para o primeiro segmento apenas a direção do eixo z_0 é especificada, θ_0 e x_0 pode ser escolhida arbitrariamente;
 - ✓ No ultimo segmento (segmento n) apenas a escolha do eixo x_n é definida, portanto z_n pode ser arbitrariamente definida;
 - ✓ Quando uma junta é prismática, apenas a direção z_{i-1} é definida.

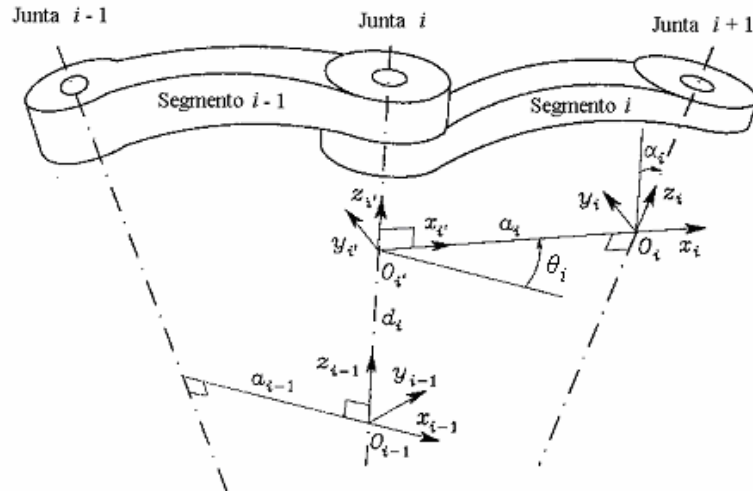


Figura 2.6 – Representação da cadeia cinemática por *Denavit-Hartenberg*.

Uma vez que os sistemas de coordenadas de cada segmento sejam determinados, a posição do sistema de coordenadas i , em relação ao sistema de coordenadas $i-1$, pode ser completamente especificado com os seguintes parâmetros:

- ✓ a_i : distância entre θ_i e θ_{i-1} ;
- ✓ d_i : coordenada de θ_i ao longo de z_{i-1} ;
- ✓ α_i : ângulo entre o eixo z_{i-1} e z_i sobre o eixo x_i , positivo quando a rotação for no sentido anti-horário;
- ✓ θ_i : ângulo entre o eixo x_{i-1} e x_i sobre o eixo z_{i-1} , positivo quando a rotação for no sentido anti-horário.

Na notação de *Denavit-Hartenberg*, dois dos parâmetros (a_i e α_i) são sempre constantes e dependentes apenas da geometria do segmento i entre duas juntas. Dos outros dois parâmetros restantes, apenas um é variável, dependendo do tipo de junta entre o segmento $i-1$ e o segmento i . Assim, se a junta i for de revolução (R), θ_i é variável e d_i é constante, e se for prismática (P), d_i é variável e θ_i é constante. Como cada junta tem apenas um grau de liberdade, a matriz A_{i-1}^i é função apenas da variável da junta q_i :

$$A_{i-1}^i = A_{i-1}^i(q_i) \quad (2.2)$$

A matriz A_{i-1}^i não é constante, mas varia à medida que muda a configuração do manipulador no espaço, durante o seu movimento, sendo, na notação DH, cada matriz A_{i-1}^i representada pelo produto de quatro transformações básicas:

$$A_{i-1}^i = R_{z,\theta} T_{z,d} T_{x,a} R_{x,\alpha} \quad (2.3)$$

Onde, os termos representam respectivamente:

$R_{z,\theta}$ a rotação θ em torno do eixo z (sinal positivo dado pela regra da mão direita);

$T_{z,d}$ a translação d ao longo do eixo z (sinal positivo quando a translação concorda com o sentido do eixo);

$T_{x,a}$ a translação a ao longo do eixo x (sinal positivo quando a translação concorda com o sentido do eixo);

$R_{x,\alpha}$ a rotação α em torno do eixo x (sinal positivo dado pela regra da mão direita).

Do desenvolvimento da equação 2.3, obtém-se:

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i & 0 & 0 \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\text{sen} \alpha_i & 0 \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ou

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen} \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \text{sen} \theta_i \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Nota-se que a matriz de transformação é função apenas da variável da junta i , que é θ_i para junta de revolução e d_i para junta prismática. A notação DH permite construir uma função da cinemática direta pela composição das transformações dos sistemas de coordenadas de cada junta, expressa pela Equação 2.5, em uma única matriz de transformação homogênea. Assim a posição e orientação do sistema de coordenadas n em relação ao sistema de coordenadas da base, conforme a figura 2.7, é dada por [Sciavicco, 1995]:

$$T_n^0(q) = A_1^0(q_1) A_2^0(q_2) \dots A_n^{n-1}(q_n) \quad (2.5)$$

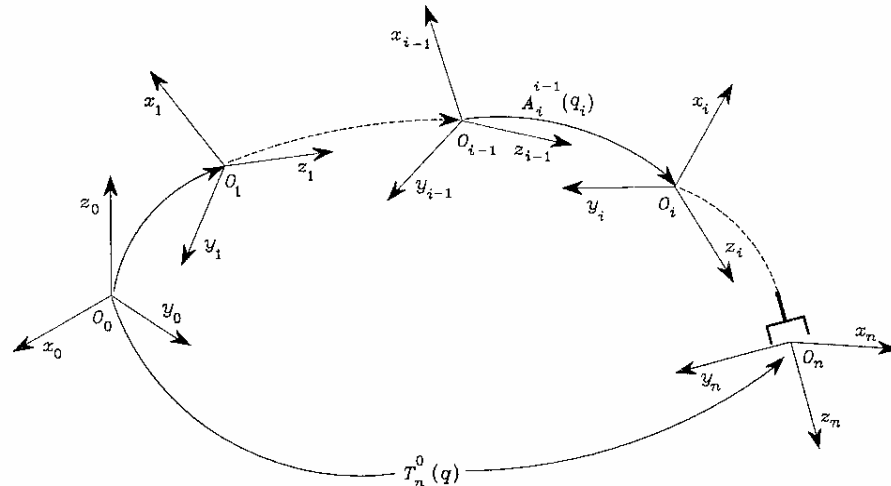


Figura 2.7 – Sistema de coordenadas do efetuador em relação ao sistema de coordenadas da base.

A posição do efetuador também pode ser determinada utilizando o menor número de coordenadas, respeitando a geometria da estrutura. A orientação pode ser determinada em termos da mínima representação descrevendo a rotação do sistema de coordenadas do efetuador em relação ao sistema de coordenadas da base. Considerando-se p a posição do efetuador e Φ a sua orientação, pode-se descrever resumidamente a posição-orientação do efetuador na forma:

$$x = \begin{bmatrix} p \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

O vetor x é definido no volume de trabalho do robô, e este volume é normalmente chamado de espaço operacional.

De outra maneira, considerando-se $q_i = \theta_i$ para junta de revolução ou d_i para prismática o espaço de junta pode ser definido como:

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Considerando a dependência da posição e orientação em relação às variáveis de junta, a equação 2.6 pode ser escrita de outra forma:

$$x = k(q) \quad (2.8)$$

Esta equação permite conhecer as variáveis do espaço operacional a partir das variáveis de junta.

2.2.2 Modelo da Transmissão

Para o controle dos sistemas robóticos os valores de entrada são aqueles dos *encoders*. Na maioria dos robôs, os *encoders* não são montados diretamente nos eixos dos segmentos, mas nos eixos dos servos-motores, conforme indicado no modelamento do sistema de controle ilustrado na figura 2.8 [Greenway, 2000].

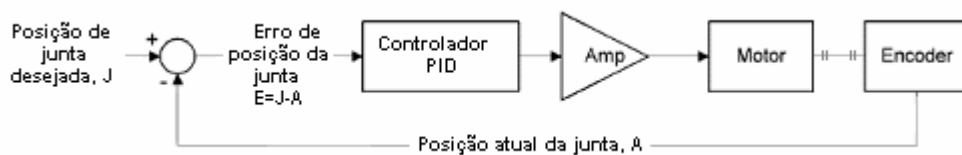


Figura 2.8 – Sistema de controle de uma junta robótica.

Em geral, existe uma grande taxa de redução entre o motor e a junta, conseqüentemente, as propriedades de transmissão e os erros entre as posições angulares dos motores e das juntas são causas importantes dos desvios de posição-orientação do efetuador e devem ser modelados e identificados [Duelen e Schöer, 1998].

2.2.3 Modelo Mecânico

A finalidade do modelo mecânico é incluir a elasticidade dos segmentos, onde os mesmos são modelados como vigas com massas concentradas nos extremos distais [Duelen e Schöer, 1998]. As deformações causadas pela flexão e torção de uma viga são modeladas, e em ambos os casos supõem-se que o coeficiente de elasticidade seja linear.

2.3 Volume de Trabalho

O volume ou espaço de trabalho de um robô corresponde à região dentro da qual o manipulador pode movimentar e/ou posicionar o efetuador, tendo sua forma e dimensões determinadas pelo número, tipo e limite de movimentação das juntas utilizadas na configuração do sistema robótico [Meneghello, 2003]. A forma e as dimensões do volume de trabalho dependem da estrutura construtiva e limitações que são impostas pelas juntas. No caso de um sistema robótico, de acordo com as dimensões dos segmentos e tipos de juntas, definem-se as

diversas formas geométricas para os volumes de trabalho. Dentre as configurações de estrutura convencionais, as seguintes podem ser destacadas [Lorini, 2002]:

- a) **Cartesiana** – seqüência de três juntas prismáticas com eixos ortogonais entre si. Define um espaço de trabalho na forma de um paralelepípedo.

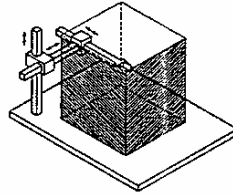


Figura 2.9 – Configuração cartesiana do espaço de trabalho.

- b) **Cilíndrica** – duas juntas prismáticas e uma rotacional. A junta rotacional da base determina um espaço de trabalho na forma de um setor cilíndrico.

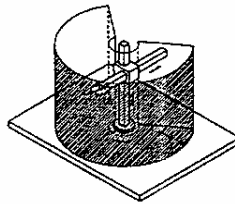


Figura 2.10 – Configuração cilíndrica do espaço de trabalho.

- c) **Esférica** – uma junta prismática e duas rotacionais. A configuração de duas juntas rotacionais define um espaço de trabalho na forma de uma porção de esfera.

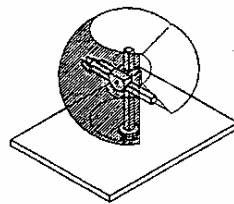


Figura 2.11 – Configuração esférica do espaço de trabalho.

- d) **Articulada Horizontal** ou **SCARA** – duas juntas rotacionais paralelas e uma prismática com eixos de movimentação paralelos entre si. O espaço de trabalho é ilustrado na figura 2.12.

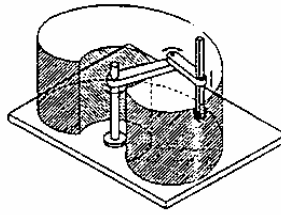


Figura 2.12 – Configuração SCARA do espaço de trabalho.

e) **Antropomórfica** – três juntas rotacionais com eixo de rotação da base, ortogonal em relação aos outros dois eixos que por sua vez são paralelos entre si. O espaço de trabalho tem uma forma complexa e variada, conforme ilustrado na figura 2.13.

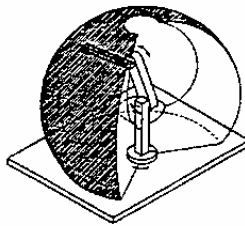


Figura 2.13 – Configuração antropomórfica do espaço de trabalho.

2.4 Programação de Robôs

Num contexto de sistemas flexíveis de manufatura, onde se busca aperfeiçoar sistemas produtivos de forma a obter alta produtividade com uma variedade de produtos, os sistemas robóticos têm destacada participação [Meneghello, 2003]. Os robôs são caracterizados como equipamentos para uma vasta gama de aplicações na automação industrial. Essa flexibilidade operacional é proporcionada pela capacidade de serem programados para as mais diversas tarefas.

Como qualquer outra máquina programável, o objetivo de um sistema de programação de robôs é a geração de um programa para controle desse equipamento de uma forma simples e amigável. No entanto, quando comparada com a programação de outros equipamentos controlados numericamente, a programação de robôs apresenta certas particularidades [Bernhardt et al., 1992]:

- ✓ diz respeito à geração de movimentos, na maioria das vezes bastante complexos;
- ✓ os dados geométricos do ambiente real apresentam desvios significativos dos dados usados no seu modelo para programação *off-line*;
- ✓ os robôs devem ser sincronizados com dispositivos periféricos, tais como: sensores, efetadores, alimentadores, fixações, etc.

Estas particularidades implicam em requisitos consideráveis para um sistema de programação de robôs. O processo de programação envolve a especificação de pontos a serem atingidos e a definição de trajetórias e parâmetros de operação como velocidade e controle de sinais de sensores externos quando utilizados.

Os métodos manuais de programação podem ser satisfatórios onde a proporção entre o tempo de programação e de produção é pequeno e também quando a complexidade da aplicação não é tão exigida. Sistemas para programação mais complexos e automatizados são necessários para aplicações complexas que devem ser realizadas fora do ambiente operacional. Em termos gerais a programação pode ser gerada ou alterada de duas formas: *on-line e off-line*.

2.4.1 Programação *On-Line*

A programação *on-line* envolve diretamente o robô, ou seja, consiste na movimentação do robô para memorização de posições e orientações no espaço de trabalho, e principalmente para definição de trajetórias complexas. Os comandos são realizados pelo programador através do controle manual (*teach-pendant*) do equipamento. Neste modo de programação, a principal função é a definição destas trajetórias e seqüências de posições para os segmentos mecânicos. Ao processo de programação associam-se parâmetros de velocidade a cada localização no espaço e define-se o tipo de movimentação para o efetuador. A metodologia de programação com a utilização direta do robô pode ser dividida da seguinte forma [Groover, 1987]:

- ✓ programação manual;
- ✓ programação por condução (*walkthrough programming*);
- ✓ programação com a utilização da interface homem-máquina (*leadthrough programming*).

A programação manual pode ser definida como procedimentos de setup utilizados para a programação de robôs de baixa tecnologia para realização de tarefas simples de movimentação de peças entre pontos definidos. Na programação por condução o objetivo é a definição da correta seqüência de trajetórias, através da movimentação dos segmentos mecânicos do robô às posições desejadas para posterior reprodução em operações de processo onde os parâmetros de velocidade podem ser controlados independentemente. O método de programação por interface homem-máquina utiliza-se do *teach pendant* para comandar os movimentos do robô através de um dispositivo de interação como um *joy-stick*. Cada seqüência de movimentação pode ser memorizada para a programação do ciclo de trabalho.

A vantagem do método de programação *on-line* está na simplicidade de realização e na agilidade para definição de determinada tarefa. A principal desvantagem decorre do fato de exigir a disponibilidade do robô no momento da programação, ou seja, implica em parada da

célula de trabalho onde se encontra o equipamento, gerando uma perda de produtividade além de não permite lógicas mais complexas e cálculos de programação.

2.4.2 Programação *Off-Line*

Com o intuito de minimizar os inconvenientes da programação *on-line*, especialmente, a perda de produtividade na célula de trabalho, tem-se evoluído para a programação *off-line*, que consiste na possibilidade de programar o robô sem a utilização do mesmo, através da construção de um texto de programação na linguagem da máquina. Por ser gerado fora do controlador do robô, através de sistemas computacionais, estes viabilizam um conjunto de ferramentas de auxílio a programação, desde simples editores de texto até complexos sistemas de simulação em três dimensões. Os avanços em tecnologia de robôs, tanto em hardware quanto em software, têm proporcionado o crescimento na utilização deste método, especialmente em aplicações complexas que exigem tempos longos de desenvolvimento de programas. Através do uso de ferramentas de simulação e animação, rotinas de consistência de sintaxe e colisões, algumas “vantagens” podem ser notadas em relação aos outros métodos, tais como [Meneghello, 2003]:

- ✓ reutilização dos dados gerados em sistemas CAD, proporcionando uma programação rápida e a simulação de ambientes reais de operação;
- ✓ verificação e correção de erros de programação, evitando danos e paradas no processo produtivo e redução de tempos de teste;
- ✓ redução de tempos de parada nos robôs devido à possibilidade de programação de diferentes tarefas enquanto o robô permanece ativo na linha de produção;
- ✓ possibilidade de programação de mais de um tipo de robô sem a necessidade de conhecimento de suas diferentes características de sintaxe e operação;
- ✓ integração com sistemas CAD/CAM, possibilitando a interação entre bancos de dados;

As “desvantagens” do método *off-line* encontram-se na dificuldade, em alguns casos, de compatibilidade entre tipos de sistemas de programação e características de diferentes fabricantes de robôs, além da complexidade de minimizar os efeitos dos erros e imprecisões entre modelos reais e idealizados. Considerando-se que a programação *off-line* geralmente está associada a sistemas gráficos, onde as células robotizadas podem ser simuladas, torna-se essencial conhecer as características reais de desempenho do manipulador para que as simulações e conseqüente geração de códigos de instruções em ambiente virtual sejam adequadamente calibradas para as situações reais de operação.

2.5 Desempenho e Calibração de Robôs

Nesta seção do trabalho será abordada a diferença entre os conceitos de **calibração** e **avaliação de desempenho** de robôs industriais. Embora o objetivo deste trabalho não seja a calibração, e sim a avaliação de desempenho de um robô industrial através de metodologia baseada na norma ISO 9283 [ISO, 1995], é inegável a relação estreita entre os dois conceitos. Esta revisão pretende tratar o assunto de calibração de forma introdutória, concentrando os esforços na descrição da metodologia de avaliação dos parâmetros de desempenho dos robôs industriais e dos diferentes sistemas para execução desta avaliação.

2.5.1 Avaliação de Desempenho

A avaliação de desempenho de um robô industrial é uma verificação da sua capacidade na realização das funções para as quais foi construído [Guenther e Pieri, 2000]. De uma forma geral as funções de um robô industrial são aquelas relativas a manipulação de objetos e ferramentas, notadamente a movimentação de materiais, peças, ferramentas de processo ou dispositivos. Desta forma, a avaliação de desempenho resulta em uma medida da eficácia do robô na realização desses movimentos.

A avaliação de desempenho pode auxiliar ainda na escolha entre robôs de diferentes fabricantes, sempre que seja possível comparar as características informadas pelos fabricantes. Avaliar o desempenho de um robô industrial é importante também na sua aceitação em um ambiente industrial. Definido a partir das exigências da tarefa e das especificações do fabricante é fundamental que no recebimento do equipamento essas especificações sejam avaliadas. Deve-se considerar ainda que, durante o funcionamento do robô podem ocorrer desgastes que alteram suas características. Assim, avaliações de desempenho ao longo do tempo podem assegurar que o funcionamento do robô continue adequado para a realização de uma determinada tarefa, além de que, dificuldades verificadas na avaliação de desempenho podem indicar necessidade e facilitar na manutenção do equipamento.

2.5.2 Calibração

Em robótica, a calibração cinemática está relacionada com os erros (ou exatidão) em posição e orientação, conseqüentemente, velocidade, aceleração e suas derivadas em relação ao tempo, podendo considerar-se dois tipos distintos: a calibração direta e a inversa. A calibração direta trata de prever a posição-orientação corrente do efetuador para um dado vetor de variáveis de junta. A calibração inversa consiste em definir um vetor de variáveis de junta capaz de produzir a posição-orientação desejada do efetuador. Os termos calibração direta e inversa

são análogos à cinemática direta e inversa. A diferença entre os conceitos é que a calibração faz a predição com base em dados estimados e tem um compromisso com a realidade normalmente maior que a cinemática. Esta se compromete muito mais com a velocidade de realização dos cálculos, negligenciando a exatidão, e tendo, portanto, um caráter teórico que permite grandes simplificações, geralmente obtidas pelo uso de distâncias nulas e ângulos de 0° , $\pm 90^\circ$ e 180° no projeto do manipulador que resultam em senos e co-senos de valores nulos ou unitários. Outro fator importante é a desconsideração de inúmeros efeitos físicos do mecanismo, como folgas, flexibilidade, desgaste, deformações, erros dimensionais de fabricação, etc. As escolhas apropriadas do projetista junto com as simplificações do modelo físico do robô têm o efeito final de produzir equações relativamente simples. Estas equações constituem a cinemática (direta e inversa) nominal porque não refletem as particularidades de um dado robô e sim de uma série de robôs de um mesmo modelo ou tipo. A importância da calibração vem da impossibilidade prática de se obter um robô real que reflita durante toda a sua vida útil exatamente o modelo idealizado no projeto.

Alguns trabalhos abordam estudos no sentido de melhorar a exatidão e repetitividade dos manipuladores, minimizando os efeitos das possíveis fontes de erro. A primeira divisão que se observa entre as diversas abordagens vem do fato de alguns autores recorrerem a um modelo matemático com base em um estudo mecânico do robô, enquanto outros preferem um modelo abstrato que não está intrinsecamente relacionado com a mecânica [Laus, 1998]. A primeira forma é conhecida como abordagem paramétrica e o erro posição-orientação está relacionado com um conjunto de parâmetros que refletem a geometria e possivelmente outras características mecânicas. A segunda forma é nomeada de abordagem não-paramétrica, apesar de algumas vezes conter parâmetros como, por exemplo, os coeficientes do polinômio da equação cinemática do robô. A abordagem paramétrica pode ser dividida conforme o tipo de modelo usado. Na abordagem paramétrica de modelo cinemático, pode-se modelar a posição e a orientação, ou apenas a posição, em função dos parâmetros do modelo, das variáveis de junta e possivelmente da carga. Na abordagem paramétrica de modelo de erro, pode-se, também, modelar o erro de posição-orientação, ou apenas o erro de posição.

A abordagem por modelo de erro tem a vantagem de eliminar sistematicamente os parâmetros redundantes, isto é, parâmetros que são funcionalmente dependentes dos demais [Zhuang et al., 1995]. Contudo, sua implementação é bastante difícil porque é necessário que se deduza o modelo de erro localmente linearizado na forma de uma matriz de transformação diferencial, para tal, é necessário que os parâmetros sejam funções contínuas dos elementos da matriz de transformação homogênea que define o acoplamento entre os segmentos.

A abordagem por modelo cinemático tem a desvantagem de necessitar que os parâmetros redundantes sejam eliminados antes do processo de estimação. Tal eliminação, contudo, pode ser feita algoritmicamente, o que torna esta desvantagem pequena em relação à dificuldade de se deduzir o modelo de erro [Chen e Chao, 1987]. Não há necessidade de que os parâmetros sejam funções contínuas dos elementos da matriz de transformação homogênea que define o acoplamento entre os segmentos. A interpretação é direta, o que permite que esta abordagem seja usada para diagnóstico e correção de falhas do mecanismo ocorridas durante a operação, de erros de fabricação (permitindo isolar os defeitos nos equipamentos empregados na fabricação de cada componente do robô) e de erros de implementação do controlador. O conjunto de parâmetros identificados pode ser usado diretamente na construção de um modelo dinâmico que permita o projeto de controladores sofisticados ou a sintonização de controladores do tipo PID e PI.

A abordagem paramétrica é ainda dividida em [Duelen e Schöer, 1998]: geométrica, onde um subconjunto de parâmetros relacionados a uma única junta ou segmento é identificado a cada vez; e sistêmica, onde todo o conjunto de parâmetros é identificado simultaneamente. A abordagem sistêmica tem as vantagens de permitir a identificação de parâmetros ditos não-geométricos (elasticidade, folga da transmissão, flexibilidade dos segmentos, etc.), não necessitar de movimentos que dependem de relações geométricas e requerer um número menor de medições.

Outra divisão possível, que só tem sido aplicada à abordagem sistêmica [Bennett e Hollerbach, 1991], consiste de uma nova técnica que permite eliminar a necessidade de um meio externo de localização do efetuador, simplesmente fechando cadeia cinemática. Para isto o robô deve possuir uma cadeia cinemática fechada, ou pode-se usar uma restrição passiva que permite ou não os movimentos parciais do efetuador, ou ainda fechar artificialmente a cadeia, usando, por exemplo, um segundo robô. Assim, pode-se dividir a abordagem paramétrica em cadeia aberta ou fechada.

A abordagem geométrica, que só tem sido aplicada em cadeia aberta, pode ser dividida em métodos de ponto e métodos de pose [Shih et al., 1998]. No método de ponto é escolhido um ponto de medição em cada segmento móvel do manipulador. No método de pose, o ponto de medição está no efetuador. Ambos os métodos tem a limitação de exigir que apenas uma junta se mova de cada vez (característica da abordagem geométrica) o que é uma dificuldade para sua aplicação em robôs que possuem um acoplamento mecânico do movimento de duas juntas, pois é complicado evitar o movimento involuntário de certas juntas.

A forma como são determinados os parâmetros representa uma última divisão. Podem-se usar métodos iterativos que maximizam a verossimilhança do modelo ou minimizam o quadrado

do erro cometido, ou ainda, no caso da abordagem geométrica, calcular-se diretamente os parâmetros através de fórmulas fechadas, ou seja, métodos diretos.

Na figura 2.14 é ilustrado resumidamente as diferentes abordagens que podem ser encontradas na literatura para calibração de robôs [Laus, 1998].

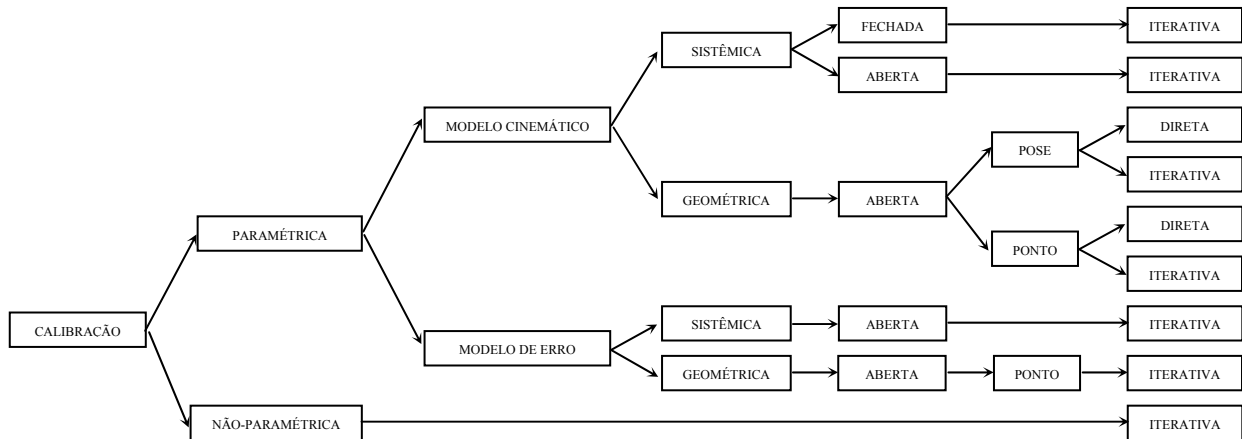


Figura 2.14 – Tipos de abordagens para calibração de robôs

De forma geral, o procedimento de calibração de robôs pode ser dividido em quatro etapas [Elatta et al., 2004]:

1. Modelagem do robô e de seus erros;
2. Medição de diversas posturas do robô;
3. Identificação dos parâmetros do modelo do robô e de seus erros;
4. Correção do modelo do robô utilizado pelo controlador.

3. METODOLGIA E CONDIÇÕES PARA TESTES DE DESEMPENHO

A metodologia e condições para os testes de desempenho, propostos e executados dentro dos objetivos deste trabalho, seguem as recomendações da norma ISO 9283 [ISO, 1995], documento que faz parte de uma série de normas internacionais que se aplicam aos robôs industriais de manipulação. A referida norma é adotada pelos fabricantes para avaliar as características de exatidão e repetitividade de seus produtos, definidos pelos respectivos critérios e métodos de teste aplicados, especificados no seu contexto. A principal finalidade desta norma é facilitar o entendimento entre usuários e fabricantes de sistemas robotizados, definido as principais características de desempenho, a descrição de como são especificadas, além das recomendações gerais para testes experimentais necessários como critério de avaliação.

As características que devem ser testadas e os parâmetros que afetam significativamente o desempenho do robô não são rígidas, permitem que o usuário defina aquelas mais pertinentes, ou seja, que têm maior influência no desempenho do equipamento para uma dada aplicação.

3.1 Notações Utilizadas

Os parâmetros de avaliação de desempenho dinâmico de um robô são definidos a partir da interface mecânica existente na extremidade do equipamento (TCP), onde é fixado o efetuador (ferramenta e/ou dispositivo) empregado na execução das tarefas. A posição da interface é dada em termos de três coordenadas cartesianas e sua orientação através de três ângulos. Conforme descrito por Guenther [Guenther e Pieri, 2000], de acordo com a norma ISO 9787, a representação da orientação da extremidade do robô é dada através dos ângulos a , b e c , respectivamente em torno dos eixos x , y e z , cujo sentido positivo é ilustrado na figura 3.1 (a), assim como a representação do sistema de coordenadas fixada na base do robô (x_0 , y_0 e z_0) e na interface mecânica (x_m , y_m e z_m), ilustrados na figura 3.1 (b).

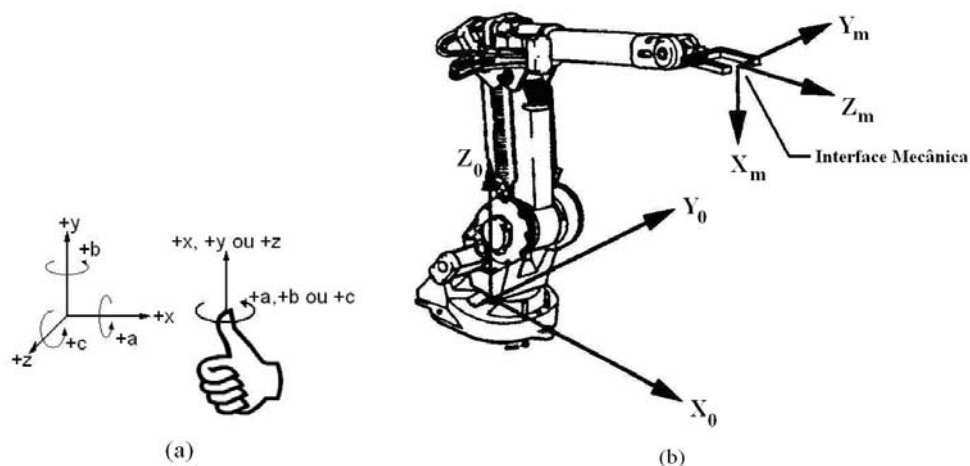


Figura 3.1 – Representação dos ângulos de orientação (a) e sistemas de coordenadas (b).

3.2 Condições Gerais de Desempenho

São descritas a seguir as principais recomendações, indicadas em norma, para guiar o levantamento das características do equipamento através de testes experimentais.

3.2.1 Montagem do Robô

Para efeito da realização de testes, segundo recomendações da norma, a montagem do robô deve ser feito de acordo com as instruções do fabricante, devendo estar operacionalmente completo, corretamente alinhado e com os testes funcionais completamente satisfatórios. Os movimentos do robô são restringidos àqueles necessários para ajustar os instrumentos de medição. Os testes devem ser precedidos por um pré-aquecimento, especificado pelo fabricante, à exceção do teste de desvio de posição. Quaisquer tipos de ajustes que possam influenciar nos resultados das avaliações devem ser mantidos constantes durante cada teste e especificados no relatório.

3.2.2 Condições de Operação

As características de desempenho, conforme especificado pelo fabricante e determinado pelos métodos relacionados na norma, são válidas somente sob o ambiente de operação estipulado pelo mesmo. As condições normais de operação usadas no teste devem ser declaradas conforme fabricante, mas não restritas para: exigências elétricas, energia hidráulica e pneumática, energia flutuante, perturbações e máxima segurança de limites operacionais.

A temperatura do ambiente (θ) onde os testes são realizados deve ser mantida na faixa ($\theta \pm 2$) °C. Idealmente a temperatura deve ser 20°C, caso em que a temperatura média difere, esta deve ser explicitada no relatório. O robô e os instrumentos de medição devem ser mantidos em ambiente estável antes dos testes, protegidos de correntes de ar e radiação térmica externa.

3.2.3 Sistemas de Coordenadas

Os dados de posição e orientação medidos devem ser expressos em um sistema de coordenadas, onde os eixos sejam paralelos ao sistema de coordenadas da base do robô ou no sistema de coordenadas definido pelo dispositivo de medição. Caso o sistema de coordenadas definido seja outro, uma relação deve ser estabelecida, para que os resultados sejam expressos num sistema de coordenadas comum [Pinto, 2001].

3.2.4 Instrumentação

Os sistemas de medição usados nos testes devem ser calibrados, e suas incertezas de medição descritas no relatório. Para medições dinâmicas, a taxa de aquisição dos dados deve ser alta o suficiente para assegurar que a representação das características adquiridas seja adequada. A menos que especificado de outro modo, a medição deve ser feita depois de alcançada a posição estabilizada. O erro máximo do sistema de medição não deve ser superior a 25% da amplitude da característica a ser quantificada.

3.2.5 Carga dos Testes

Todos os testes são executados em até 100% das condições de carga, ou seja, massa, posição do centro de gravidade e momentos de inércia de acordo com as especificações do fabricante. Para caracterizar robôs com as performances dependentes das cargas, os testes opcionais podem ser feitos com outros valores de massa. Quando uma parte da instrumentação é unida ao robô, sua massa e posição são consideradas como parte da carga teste.

3.2.6 Velocidade dos Testes

Todas as características de posição devem ser testadas na máxima velocidade executável entre as posições especificadas, testes adicionais podem ser feitos com 50% e 10% desta velocidade. Para as características de trajetória, os testes são conduzidos em 100%, 50% e 10% da classificação da velocidade de trajetória especificada pelo fabricante. A velocidade máxima para cada teste depende do formato e extensão do percurso, devendo ser atingida em pelo menos 50% do percurso.

3.2.7 Definição das Posições e Trajetórias de Teste

Para efeito de levantamento dos dados de teste a norma descreve como as posições medidas são situadas em um plano inscrito em um cubo dentro do espaço de trabalho do robô. Para verificação de movimento maior em um dos eixos em relação aos demais se substitui o cubo por um paralelepípedo. A norma também descreve o trajeto do teste a ser seguido, definindo alguns pontos conforme ilustrado no cubo de teste inscrito no espaço de trabalho indicado na 3.2.

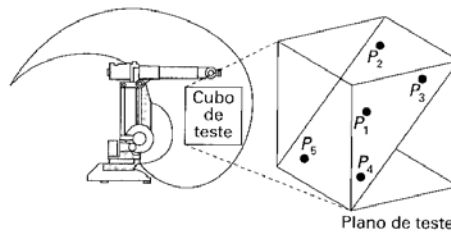


Figura 3.2 - Cubo de teste no volume de trabalho do robô.

3.2.7.1 Posição do Cubo de Teste no Espaço de Trabalho

O cubo de teste é alocado no volume de trabalho, cujos vértices são designados de $C1$ a $C8$ e possui quatro possíveis planos de testes, conforme ilustrado na figura 3.3, devendo satisfazer as seguintes exigências: o cubo deve estar localizado no volume de maior utilização e ser o maior possível, com as bordas paralelas ao sistema base de coordenadas. A posição do cubo no volume de trabalho, assim como o plano de teste escolhido e as dimensões devem ser registradas e ilustradas no relatório dos testes.

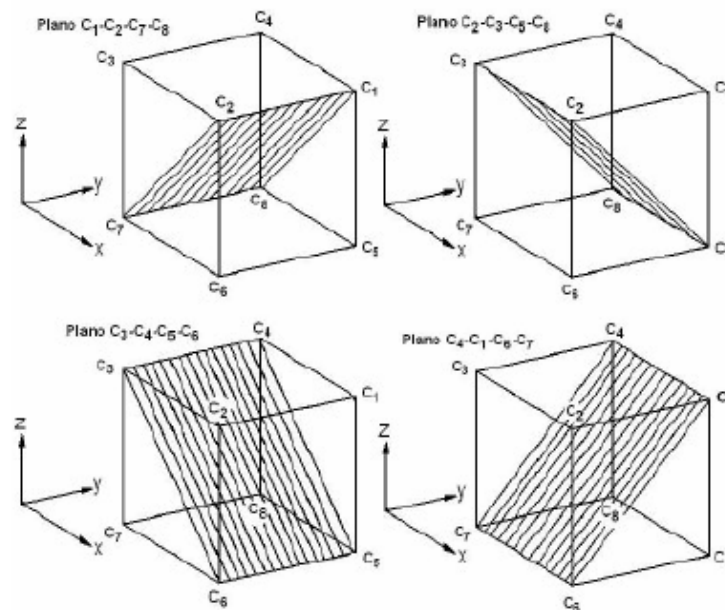


Figura 3.3 – Planos de testes de posição inscritos no cubo em relação ao sistema base de coordenadas [ISO, 1995].

3.2.7.2 Posições de Teste

Cinco pontos localizados nas diagonais do plano selecionado (P_1 a P_5) são utilizados nos testes de posição. Estes pontos, junto com as orientações especificadas pelo fabricante, constituem as posições testes à qual o centro do último eixo. As posições de teste deveram ser especificadas na base de coordenadas do robô ou na base de coordenadas da junta, conforme ilustrado na figura 3.4.

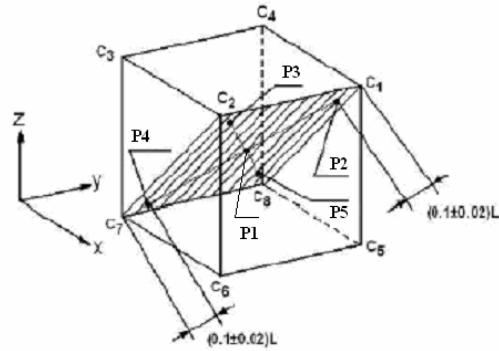


Figura 3.4 – Posições de teste em relação ao sistema base de coordenadas [ISO, 1995].

Na ilustração do cubo o ponto P_1 corresponde a intersecção das diagonais do plano de teste, e conseqüentemente, o centro do cubo. As posições P_2 à P_5 estão localizadas a uma distância de $(10 \pm 2) \%$ do comprimento da diagonal (L) medida a partir das arestas do cubo.

As posições de teste aplicadas para as diferentes características de posição são as relacionadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Relação entre as posições de teste e as características testadas [ISO, 1995].

<i>CARACTERÍSTICAS TESTADAS</i>	<i>POSIÇÕES DE TESTE</i>				
	P1	P2	P3	P4	P5
Precisão e repetibilidade unidirecional de posição	X	X	X	X	X
Varição multidirecional de precisão de posição	X	X	-	X	-
Precisão e repetibilidade de distância	-	X	-	X	-
Tempo de estabilização de posição	X	X	X	X	X
Sobrepasso	X	X	X	X	X
Varição nas características de posição	X	-	-	-	-

3.2.7.3 Trajetórias de Teste

As trajetórias para os testes devem estar localizadas em um dos planos ilustrados na figura 3.5.

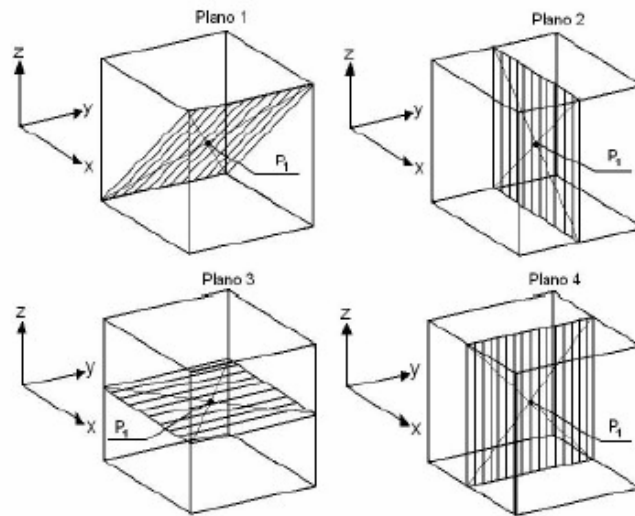


Figura 3.5 - Planos de testes de trajetória inscritos no cubo [ISO, 1995].

As trajetórias devem possuir forma linear ou circular, exceto quando haja outra definição pelo fabricante, e neste caso deve estar especificada no relatório dos testes. Para uma trajetória linear, o comprimento pode ser definido como 85% da distância entre os vértices opostos do plano selecionado, como por exemplo, a distância entre os pontos P_2 e P_4 ilustrada na figura 3.6.

Nos testes com trajetórias circulares, devem ser testados dois círculos distintos, onde o diâmetro do círculo maior deve ser igual a 80% da dimensão da lateral do cubo, com centro em P_1 (figura 3.6). O círculo menor também deve ser centrado na posição P_1 e seu diâmetro é 10% do diâmetro do círculo maior.

Nas trajetórias retangulares, as arestas são denominadas $E1$, $E2$, $E3$ e $E4$, cada qual localizada a uma distância igual a $10 \pm 2\%$ do comprimento da diagonal do plano, conforme ilustrado na figura 3.6.

Num estudo comparativo entre características de desempenho de robôs distintos, os seguintes parâmetros devem ser idênticos: dimensões do cubo de teste, carga, velocidade, trajetória, ciclos de medição e condições ambientais [Pinto, 2001].

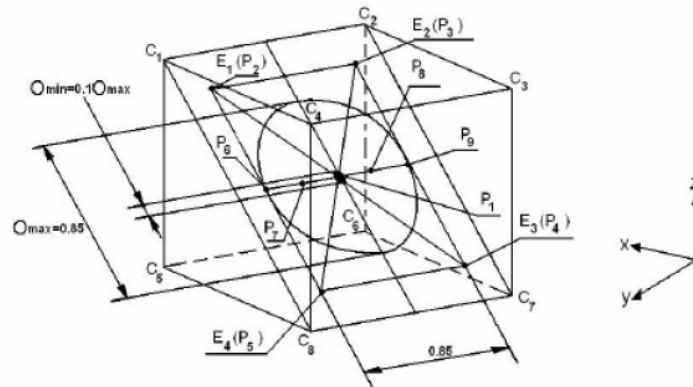


Figura 3.6 – Trajetórias de teste em relação ao sistema base de coordenadas [ISO, 1995].

3.2.8 Número de Ciclos de Medição

O número mínimo de ciclos de medição a serem realizados em cada característica é definido conforme a tabela 3.2, sendo que na medida em que um número maior de ciclos for realizado, a confiabilidade dos testes torna-se mais elevada.

Tabela 3.2 – Relação entre o número mínimo de ciclos e as características testadas [ISO, 1995].

<i>CARACTERÍSTICAS TESTADAS</i>	<i>Nº MÍNIMO DE CICLOS</i>
Precisão e repetibilidade unidirecional de posição	30
Varição multidirecional de precisão de posição	30
Precisão e repetibilidade de distância	30
Tempo de estabilização de posição	3
Sobrepasso	3
Varição nas características de posição	Repetição contínua por 8 horas
Precisão e repetibilidade de trajetória	10
Desvios de canto	3
Características de velocidade de trajetória	10
Tempo mínimo de posicionamento	3

3.3 Características de Posição

As características de exatidão e repetitividade de posição como definidas na norma, quantificam os desvios que ocorrem entre uma posição comandada, uma posição alcançada e a flutuação na posição alcançada em uma série de repetidas visitas à posição comandada.

A posição comandada é definida como a posição especificada manualmente através do *teach pendant* ou programada *off-line* através do computador na linguagem do robô em consideração. O modo de programação das posições de teste deve ser explicitado no relatório dos testes. A posição alcançada é a real posição atingida pelo robô sob modo automático. Estas definições estão ilustradas na figura 3.7.

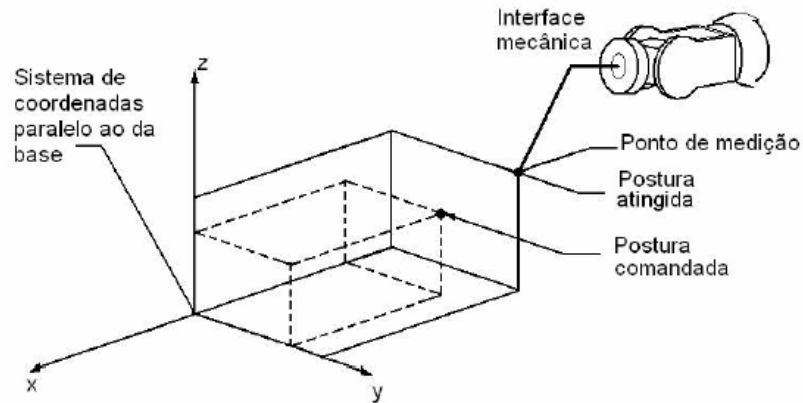


Figura 3.7 – Posturas de posição em relação ao sistema base de coordenadas [Guenther e Pieri, 2000].

3.3.1 Exatidão Unidirecional de Posição (AP)

A exatidão da posição unidirecional expressa o desvio entre a posição comandada e a média das posições alcançadas quando aproximadas desta posição comandada pela mesma direção. Pode ser dividida de duas formas: de posicionamento e de orientação.

a) **Exatidão unidirecional de posicionamento (AP_p)**; que corresponde a diferença entre a posição comandada e o baricentro do conjunto de pontos alcançados, conforme ilustrado na figura 3.8.

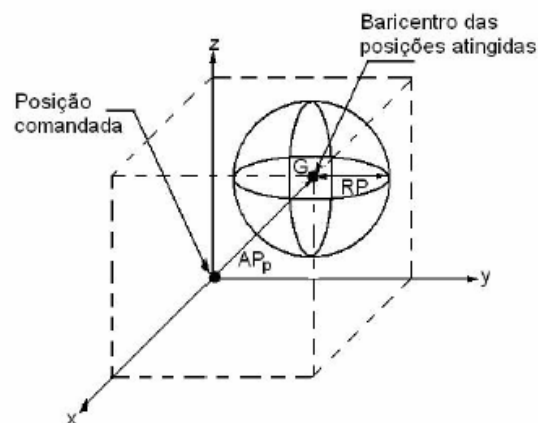


Figura 3.8 – Exatidão unidirecional de posicionamento [ISO, 1995].

A exatidão unidirecional de posicionamento é calculada da seguinte forma:

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (2.19)$$

$$AP_{px} = (\bar{x} - x_c) \quad (2.20)$$

$$AP_{py} = (\bar{y} - y_c) \quad (2.21)$$

$$AP_{pz} = (\bar{z} - z_c) \quad (2.22)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (2.23)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (2.24)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (2.25)$$

onde,

\bar{x} , \bar{y} e \bar{z} são as coordenadas do baricentro dos conjuntos de pontos alcançados com repetidas visitas pela mesma direção;

x_c , y_c e z_c são as coordenadas da posição comandada;

x_j , y_j e z_j são as coordenadas das j -ésimas posições alcançadas.

b) Exatidão unidirecional de orientação (AP_a , AP_b , AP_c), correspondente a diferença entre a orientação angular comandada e a média das orientações angulares alcançadas nos testes.

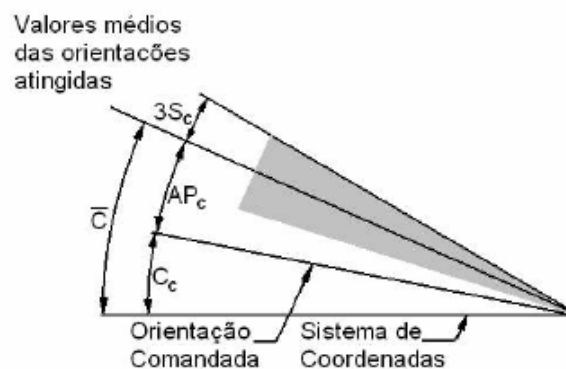


Figura 3.9 – Exatidão unidirecional de orientação [ISO, 1995].

A exatidão unidirecional de orientação é calculada da seguinte forma:

$$AP_a = (\bar{a} - a_c) \quad (2.26)$$

$$AP_b = (\bar{b} - b_c) \quad (2.27)$$

$$AP_c = (\bar{c} - c_c) \quad (2.28)$$

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j \quad (2.29)$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j \quad (2.30)$$

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j \quad (2.31)$$

onde,

\bar{a} , \bar{b} e \bar{c} são as médias dos valores dos ângulos obtidos da mesma posição com repetidos testes;

a_c , b_c e c_c são os ângulos da posição comandada;

a_j , b_j e c_j são os ângulos das j-ésimas posições alcançadas.

A tabela 3.3 apresenta um sumário sobre as condições para os testes de exatidão unidirecional da posição, descrevendo a relação entre carga, velocidade, posições de teste e quantidade mínima necessária de ciclos, de acordo com especificações de norma.

Tabela 3.3 – Condições para os testes de exatidão e repetitividade unidirecional de posição [ISO, 1995].

CARGA	VELOCIDADE	POSIÇÕES	Nº DE CICLOS
100% do valor nominal máximo (obrigatório)	100% do valor nominal máximo (obrigatório)	P1-P2-P3-P4-P5	30
	50% do valor nominal máximo (opcional)		
	10% do valor nominal máximo (opcional)		
50% do valor nominal máximo (opcional)	100% do valor nominal máximo (obrigatório)		
	50% do valor nominal máximo (opcional)		
	10% do valor nominal máximo (opcional)		

A figura 3.10 ilustra dois exemplos de seqüência dos ciclos de medição, onde o último segmento do robô (TCP) deve executar a tarefa através de uma aproximação unidirecional. Para cada posição alcançada, todas as características de posição podem ser calculadas.

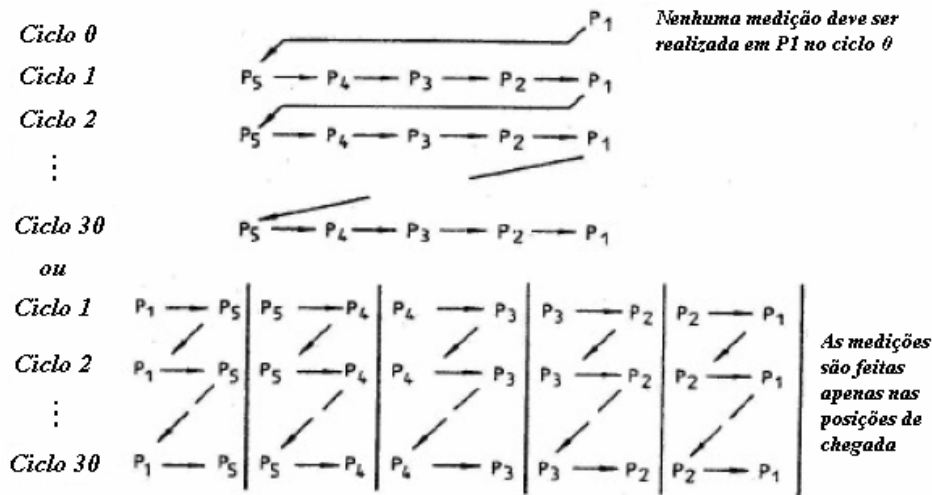


Figura 3.10 – Exemplos de seqüência dos ciclos de medição [ISO 9283, 1995].

3.3.2 Repetitividade Unidirecional de Posição (Rp)

A repetitividade da posição unidirecional expressa a dispersão das posições e orientações alcançadas depois de repetidas visitas à mesma posição comandada na mesma direção. Pode ser dividida de duas formas:

a) Repetitividade unidirecional de posicionamento (RP_p): que corresponde ao raio da esfera centrada no baricentro do conjunto de posições alcançadas, conforme ilustrado na figura 3.8, sendo calculada da seguinte forma:

$$RP_p = \bar{l} + 3S_l \tag{2.32}$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \tag{2.33}$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \tag{2.34}$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \tag{2.35}$$

onde,

\bar{x} , \bar{y} e \bar{z} são as coordenadas do baricentro dos conjuntos de pontos alcançados após repetidas visitas pela mesma direção;

x_j , y_j e z_j são as coordenadas das j-ésimas posições alcançadas.

b) Repetitividade unidirecional de orientação (RP_a , RP_b , RP_c): é a faixa de três desvios padrão das medidas angulares em torno dos valores médios dos ângulos de orientação, conforme ilustrado na figura 3.9.

A repetitividade unidirecional de orientação é calculada da seguinte forma:

$$RP_a = \pm 3S_a = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}} \quad (2.32)$$

$$RP_b = \pm 3S_b = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}} \quad (2.33)$$

$$RP_c = \pm 3S_c = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n-1}} \quad (2.34)$$

onde,

\bar{a} , \bar{b} e \bar{c} são as coordenadas do baricentro dos conjuntos de pontos alcançados após repetidas visitas pela mesma direção;

a_j , b_j e c_j são as coordenadas das j -ésimas posições alcançadas.

As condições para os testes de repetitividade unidirecional de posição são as mesmas descritas na tabela 3.3 para a característica de exatidão unidirecional de posição.

3.4 Características de Distância

As características de exatidão e repetitividade de distância como definido na norma, quantificam, respectivamente, o erro na distância entre duas posições comandadas e as médias das posições alcançadas, e a flutuação na distância e orientação para uma série de movimentos repetidos entre duas posições. O desenvolvimento deste tópico está no anexo 1.

3.5 Características de Trajetória

As características de trajetória definem a habilidade do robô mover a sua interface mecânica ao longo de um percurso na mesma direção por repetidas vezes. Este parâmetro quantifica os erros entre uma trajetória comandada, especificada na programação do robô, e a respectiva trajetória percorrida, em resposta ao funcionamento do robô em modo automático. Este tópico também está desenvolvido no anexo 2.

4. MÉTODOS DE TESTES E MEDIÇÃO PARA ROBÔS INDUSTRIAIS

De acordo com a proposta do trabalho, neste capítulo é apresentada uma breve descrição da norma ISO TR 13309 [ISO TR, 1995], que trata de técnicas e sistemas de medição para avaliação de desempenho e calibração de robôs industriais. Este documento descreve os princípios de funcionamento de diversos sistemas de avaliação, assim como, as características a serem mensuradas. Alguns sistemas apresentados têm a capacidade de medir as características de posição e trajetória, enquanto outros têm limitações de recursos.

4.1 Métodos de Sensores de Posicionamento

As características de posição podem ser mensuradas através de um dispositivo que contenha um número suficiente de transdutores ou sensores de proximidade adaptado na extremidade do robô. Existem diversos tipos de sensores que podem ser empregados neste método, a figura 4.1 ilustra um dispositivo típico, conhecido como sistema cubo-berço. Processando os dados dos sensores, pode-se localizar a interface mecânica do robô (TCP) através dos graus de liberdade em relação ao sistema base de coordenadas [Edan, 1998] [Lafratta, 1990] [Liégeois, 1984] [Park et al., 2002] [Pinto e Cavaco, 2003] [Riemer e Edan, 2000].

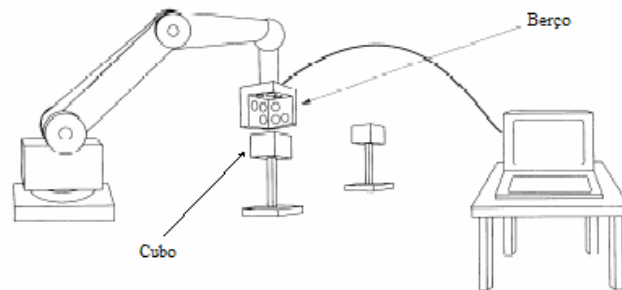


Figura 4.1 – Sistema cubo-berço para medição de repetitividade de posição [ISO TR, 1995].

4.2 Métodos de Comparação de Trajetória

4.2.1 Comparação com Guia Mecânica

Este método baseia-se na comparação entre a trajetória comandada e a trajetória programada, onde se faz necessário o uso de uma guia mecânica de exatidão, linear ou circular. A figura 4.2 ilustra o sistema, onde sensores de proximidade são posicionados no dispositivo de medição acoplado no braço do robô. Este dispositivo capta os desvios ocorridos ao longo da trajetória, e pode avaliar a exatidão e repetitividade deste robô. Dependendo do número de

sensores instalados, pode-se mensurar também a posição e orientação da interface mecânica do robô em relação ao sistema base de coordenadas [Liégeois, 1984] [Silva, 1996].

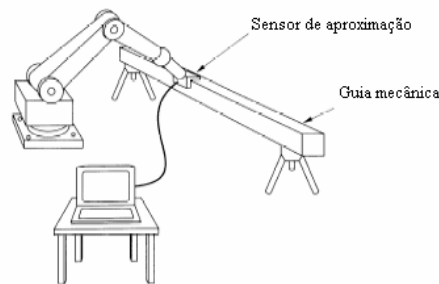


Figura 4.2 – Sistema de comparação com guia mecânica [ISO TR, 1995].

4.2.2 Comparação com Guia Laser

As características de exatidão e repetitividade de trajetória podem ser mensuradas com o uso de um sistema de comparação com guia laser através de transdutores fotossensíveis que possuem a capacidade de detectar o erro de posicionamento do laser em relação ao seu centro (figura 4.3).

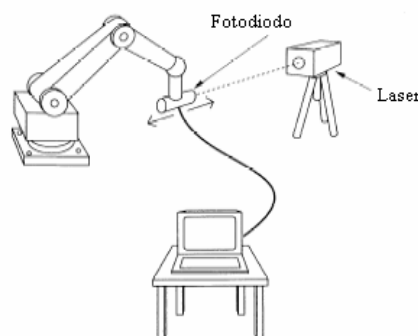


Figura 4.3 – Sistema de comparação com guia laser [ISO TR, 1995].

4.3 Métodos de Trilateração

O método consiste em um procedimento para determinação de coordenadas cartesianas (x , y , z) de um ponto (P) no espaço tridimensional, tomando como base os valores de distância de três pontos de observação ($L1$, $L2$ e $L3$) e as distâncias entre estes pontos ($LB1$, $LB2$ e $LB3$). A figura 4.4 ilustra o princípio da trilateração representado no espaço tridimensional.

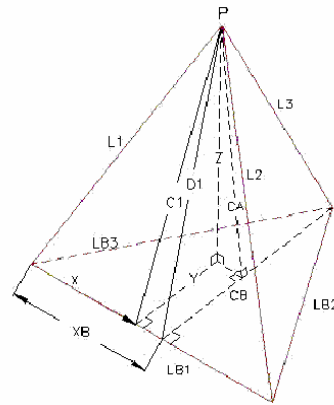


Figura 4.4 – Princípio de trilateração (representação tridimensional) [Shih et al., 1998].

4.3.1 Rastreamento Com Interferômetro Multi-Laser

Este método baseia-se o uso de três interferômetros laser com dois eixos servo controlados, que apontam para um dispositivo retro-refletor localizado na extremidade do robô. As características de posição no espaço tridimensional podem ser mensuradas com os dados de distância obtidos dos três interferômetros, e as características de orientação de posição, podem ser medidas, com o uso de seis interferômetros e três dispositivos retro-refletores, um para cada eixo de coordenadas do espaço tridimensional, conforme ilustrado na figura 4.5.

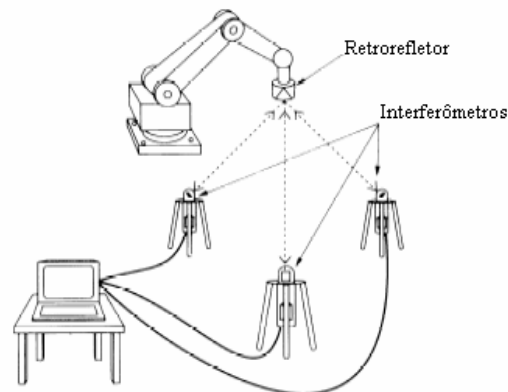


Figura 4.5 – Interferômetro com *multi-laser tracking* [ISO TR, 1995].

4.3.2 Trilateração Ultrassônica

As características de posição do robô no espaço tridimensional podem ser calculadas com os dados de distância de três microfones ultrassônicos, recebendo pulsos transmitidos de uma fonte sonora montada na extremidade do robô, conforme ilustrado na figura 2.6. As características de orientação podem ser calculadas através do uso de três fontes sonoras independentes, cada uma com um microfone ultrassônico.

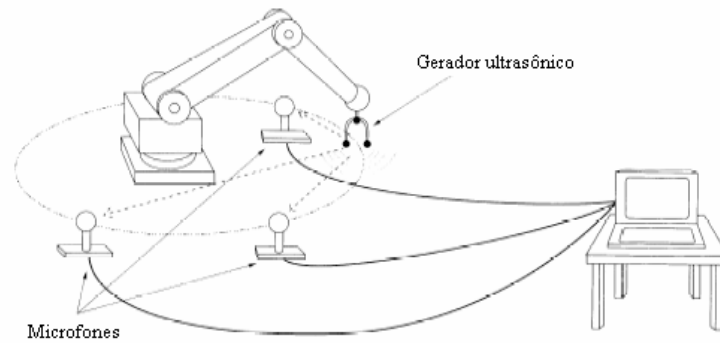


Figura 4.6 – Sistema de trilateração ultrassônica [ISO TR, 1995].

4.3.3 Trilateração com Cabos Mecânicos

O método baseia-se no cálculo da distância de três cabos fixados a um dispositivo na extremidade do robô, originados a partir de três estações independentes, conforme ilustrado na figura 4.7. Conhecendo-se a distância entre estas estações fixas e o comprimento dos cabos, têm-se como mensurar a posição da interface mecânica do robô. Os três cabos são tensionados com o mesmo valor, e os dados do comprimento dos mesmos são gerados através da leitura de *encoders* adaptados a estas estações [Hatayma et al., 2002] [Jeong et al., 1998] [Saramago, 1993]. Uma variação do método pode ser o emprego de componentes rígidos ao invés de cabos, mantidos dados de posição através de *encoders* [Calafiore et al., 2001] [Takamasu et al., 2002].

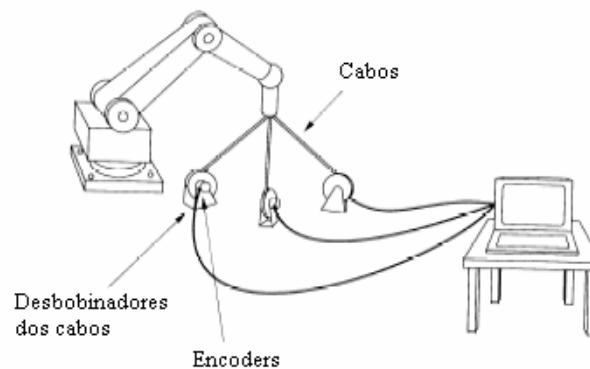


Figura 4.7 – Sistema de trilateração com cabos mecânicos [ISO TR 13309, 1995].

4.4 Métodos de Medição por Coordenadas Polares

Os métodos de medição por coordenadas polares podem ser usados para se definir as coordenadas cartesianas de um determinado ponto (P), desde que se consiga mensurar os valores de distância (D), azimute (α) e ângulo de elevação (β), conforme ilustrado na figura 4.8.

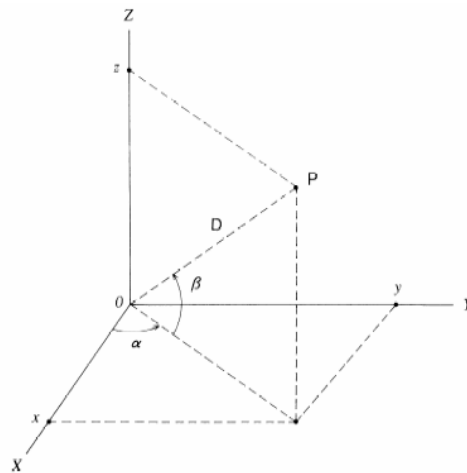


Figura 4.8 – Princípio de medição tridimensional por coordenadas polares.

4.4.1 Rastreamento com Interferômetro Laser Simples

As características de posição e orientação da interface mecânica do robô podem ser medidas através do método com interferômetro *laser tracking*, como o sistema ilustrado na figura 4.9 onde a posição do robô pode ser calculada com os dados de distância e de elevação e azimute do interferômetro laser, obtidos através do retro-refletor posicionado na extremidade do robô [Shirizandeh, 1998].

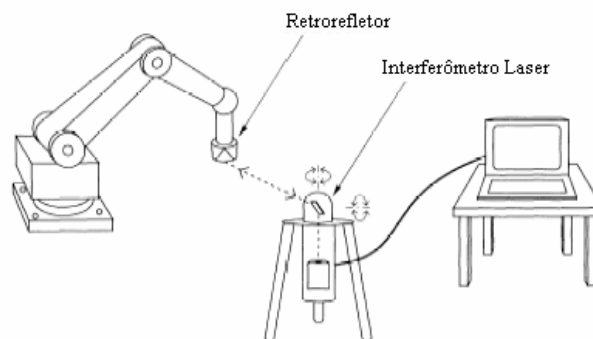


Figura 4.9 – Sistema de medição com interferômetro laser [ISO TR, 1995].

4.4.2 Medição com uso de Estação Total

Este método baseia-se no uso de um equipamento óptico conhecido como estação total, capaz de medir a distância, o azimute e elevação ponto a ponto. As características de posição ou trajetória podem ser mensuradas através da visualização do dispositivo posicionado na interface mecânica do robô, conforme ilustrado na figura 4.10.

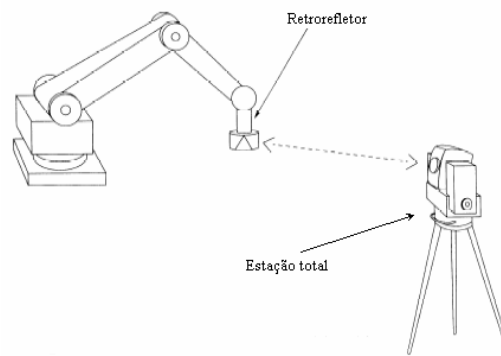


Figura 4.10 – Sistema de medição com uso de estação total [ISO TR, 1995].

4.4.2 Medição com uso de Escala Linear

As características de posição podem ser mensuradas como uma função do tempo com os dados de distância, azimute e elevação de uma escala linear. Este método, conforme ilustrado na figura 4.11, baseia-se na conexão de uma escala linear à extremidade do robô, onde os dados são registrados no computador através de dois *encoders* (movimentos horizontais e verticais).

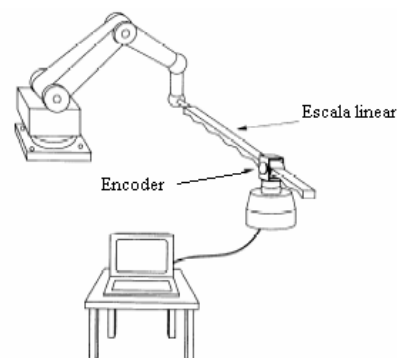


Figura 4.11 – Sistema de medição com o uso de escala linear [ISO TR, 1995].

4.5 Métodos de Medição por Triangulação

Métodos de triangulação são utilizados na determinação de posição de um ponto num espaço. Na triangulação bidimensional, as coordenadas cartesianas (x , y) do ponto P , podem ser determinadas pela distância da base (B_1B_2), e pelos azimutes α_1 e α_2 , conforme ilustrado na figura 4.12.

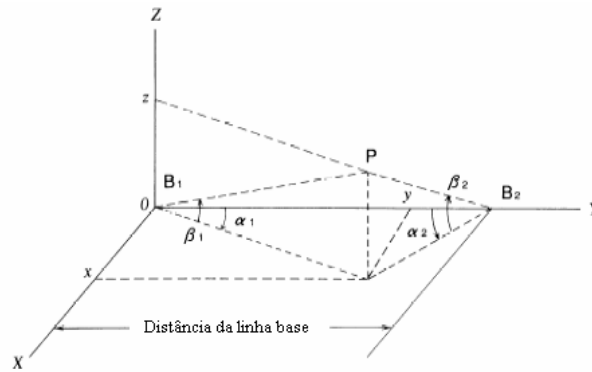


Figura 4.12 – Método de medição por triangulação [ISO TR, 1995].

4.5.1 Rastreamento por Triangulação Óptica

Nesses métodos, que podem ser utilizados para medições estáticas e dinâmicas, as características de posição podem ser determinadas como uma função do tempo, através de um sistema de rastreamento óptico com dois eixos, que fornece dois conjuntos de dados de azimuth e elevação. As figuras 4.13, 4.14 e 4.15, ilustram sistemas típicos que utilizam este princípio por triangulação óptica. No sistema de rastreamento da figura 4.13, dois feixes de laser são continuamente apontados para um retro-refletor fixado na extremidade do robô.

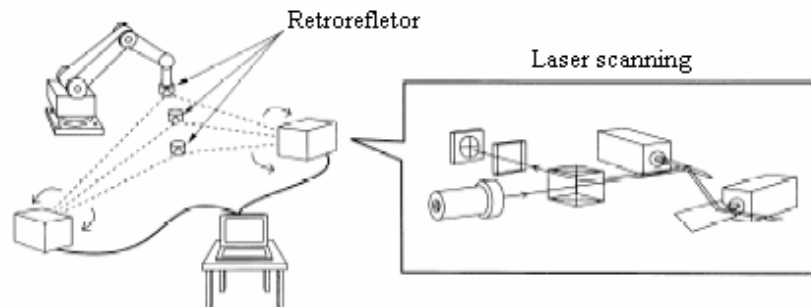


Figura 4.13 – Sistema de triangulação por rastreamento laser [ISO TR, 1995].

O sistema de triangulação ilustrado na figura 4.14 é baseado na incidência de luz sobre um detector laser montado na interface mecânica do robô. A luz é proveniente de três scanners laser que emitem um plano de luz cada, onde dois emitem um plano vertical e o outro um plano horizontal.

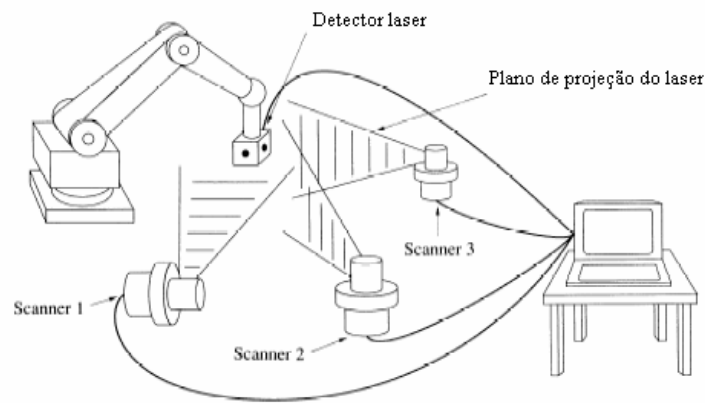


Figura 4.14 – Sistema de triangulação com uso de detector laser [ISO TR, 1995].

A orientação da interface mecânica pode ser determinada através da incidência de dois feixes de laser sobre um dispositivo cúbico equipado com dois sensores CCD em posições adjacentes deste dispositivo, como ilustrado na figura 4.15.

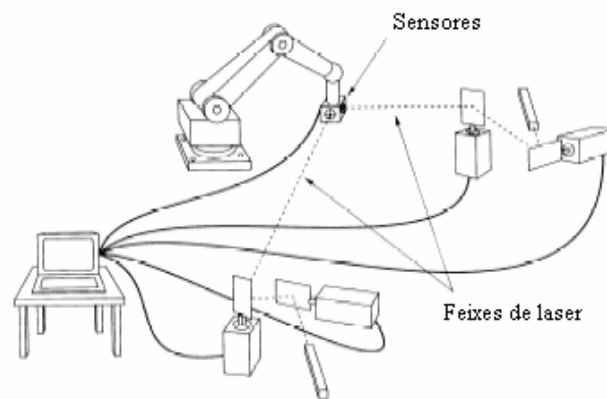


Figura 4.15 – Sistema de triangulação com uso de sensores CCD [ISO TR, 1995].

4.5.2 Medição com Teodolitos

As características de posição do robô podem ser determinadas através de dois conjuntos de dados de azimute e elevação, utilizando dois, ou mais, teodolitos estacionários apontados para um dispositivo de referência fixado na extremidade do robô, conforme ilustrado na figura 4.16. Para o cálculo das características de orientação, faz-se necessário o uso de mais dois dispositivos de referência na interface mecânica do robô [Judd e Knasinski, 1990].

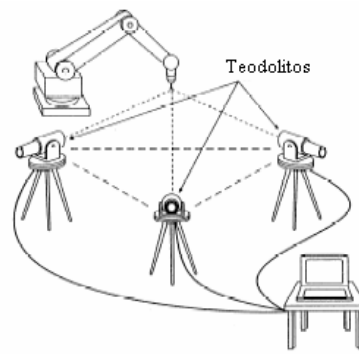


Figura 4.16 – Sistema de medição com uso de teodolitos [ISO TR, 1995].

4.5.3 Medição com Câmeras

As características de posição podem ser definidas como uma função do tempo através da captura de imagens com duas câmeras. Estes equipamentos captam a posição de uma fonte luminosa fixada na interface mecânica do robô (figura 4.17). As distâncias e os ângulos entre as câmeras devem ser conhecidos, para que se possam determinar as características de posição da interface mecânica com base neste sistema de coordenadas de referência.

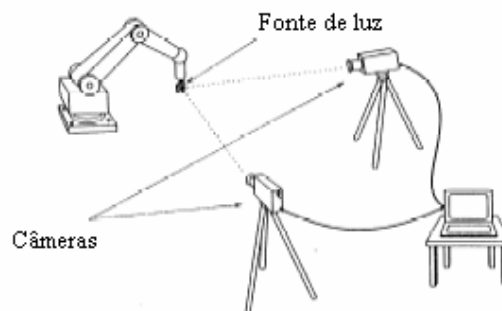


Figura 4.17 – Sistema de medição com uso de câmeras [ISO TR, 1995].

4.6 Medição Inercial

Neste método de medição, as características de posição e trajetória podem ser determinadas no espaço tridimensional, através do uso de três acelerômetros e três giroscópios fixados na interface mecânica do robô (figura 4.18), não sendo necessário o emprego de nenhum outro dispositivo externo, desde que a condição inicial do robô seja conhecida.

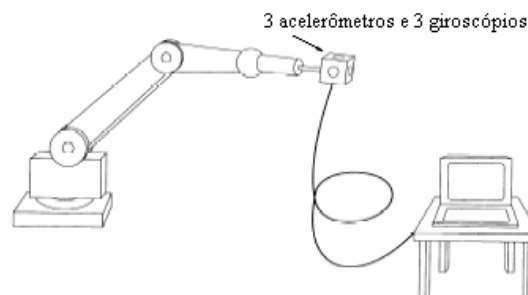


Figura 4.18 – Sistema de medição inercial [ISO TR, 1995].

4.7 Métodos de Medição por Coordenadas Cartesianas

Estes métodos baseiam-se na quantificação direta da posição no espaço do sistema de coordenadas cartesiano.

4.7.1 Medição Digital Bidimensional

A posição do robô pode ser determinada em plano bidimensional, utilizando-se uma câmera digital de alta resolução fixada na sua extremidade. A câmera identifica e realiza uma contagem das linhas de uma determinada escala de exatidão montada sobre o plano de teste [Mass, 1997] [Motta et al., 2001] [Shih et al., 1998] [Zhuang et al., 1995] [Zhuang e Meng, 2001], conforme ilustrado na figura 4.19.

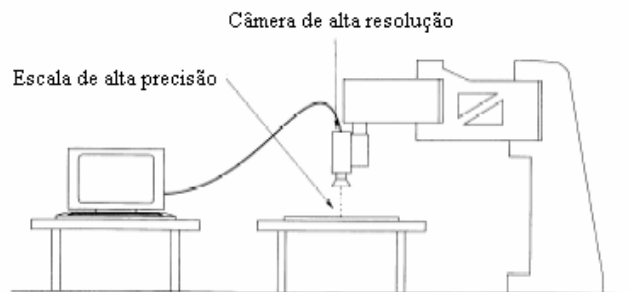


Figura 4.19 – Sistema de medição digital bidimensional (opção 1) [ISO TR, 1995].

As características de posição no plano de teste, também podem ser medidas através do uso de um scanner que realiza a leitura de uma rede de pontos cruzados, onde o espaçamento e o tamanho destes pontos são conhecidos. Esta segunda opção de sistema está ilustrada na figura 4.20.

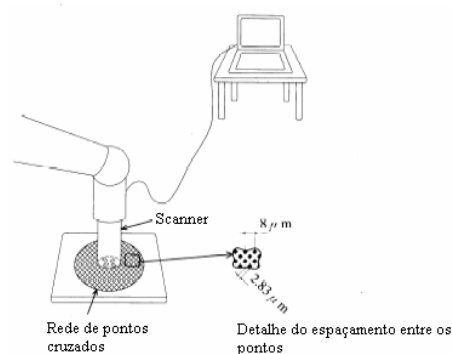


Figura 4.20 – Sistema de medição digital bidimensional (opção 2) [ISO TR, 1995].

Existe ainda uma terceira opção para este sistema de digitalização, que neste caso, realiza a medição das características de posição e trajetória. O sistema baseia-se no uso de uma caneta

digital fixada na extremidade do robô sobre um quadro eletrônico (plano de teste) conectado a um computador (figura 4.21) [Liégeois, 1984].

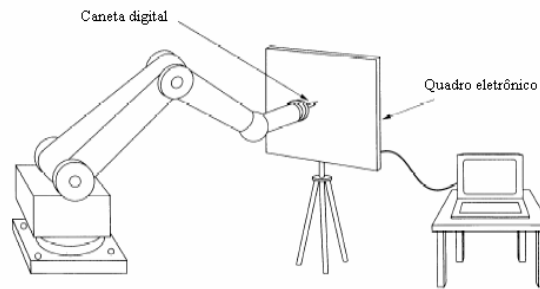


Figura 4.21 – Sistema de medição digital bidimensional (opção 3) [ISO TR, 1995].

4.7.2 Medição por Máquina de Coordenadas

As características de posição da interface mecânica do robô podem ser determinadas através do uso de uma máquina de medir por coordenadas e um dispositivo de dimensões conhecidas fixado na extremidade do robô, conforme ilustrado na figura 4.22. Se três ou mais posições forem medidas em um cubo fixo nesta interface mecânica, as características de orientação também podem ser calculadas. Uma outra opção para este método é o emprego de um braço de medição portátil para execução da tarefa [Chen et al., 2001] [Pinto e Cavaco, 2003].



Figura 4.22 – Sistema de medição com uso de máquina de coordenadas [ISO TR, 1995].

4.8 Comparativo entre Métodos de Medição

A norma ISO TR 13309 [ISO TR 13309, 1995], apresenta um comparativo entre os métodos de medição, onde indica de forma resumida o erro máximo, assim como outras características de medição e algumas características de desempenho utilizadas para avaliação de robôs industriais. Cabe ressaltar, que cada um dos sistemas de medição tem suas vantagens e limitações a determinadas características medidas.

A tabela 4.1 apresenta um comparativo entre os sistemas mais comumente utilizados, onde os valores ilustrados são típicos de catálogos de fabricantes, portanto, pode-se encontrar no mercado sistemas de medição com valores diferentes dos apresentados nesta tabela. A maioria

dos sistemas não quantifica os erros em seis graus de liberdade, fazendo-se necessário à aquisição de dispositivos extras [Pinto, 2001].

Tabela 4.1 – Comparação de desempenho entre sistemas de medição.

<i>SISTEMAS DE MEDIÇÃO</i>	Erro máx. (mm)	Tipo de medição	Velocidade máx. (m/s)	Período de aquisição (ms)	Nº graus de liberdade
Posicionamento de sensor	0,03	Estática			3 a 6
Comparação com guia mecânica	0,3	Dinâmica			3 a 6
Comparação com guia laser	0,04	Dinâmica	10	0,01	2 a 3
Rastreamento com interferômetro multi-laser	0,01	Dinâmica	6	10 a 100	3 a 6
Trilateração ultrassônica	4	Dinâmica		100 a 1000	3 a 6
Trilateração com cabos mecânicos	0,3	Dinâmica	5	0,5	3
Rastreamento com interferômetro laser simples	0,07	Dinâmica	6	0,01 a 500	3
Medição com uso de estação total	3	Dinâmica	1	500 a 3000	3
Medição com uso de escala linear	1,1	Dinâmica			3
Rastreamento por triangulação óptica	0,15	Dinâmica	2 a 10	1	3
Medição com uso de teodolitos	1	Estática			3 a 6
Medição com uso de câmeras	0,3	Dinâmica	10	0,2 a 4	3 a 6
Medição inercial	0,04	Dinâmica	5	3	3
Medição digital bidimensional	0,7	Dinâmica	0,5 a 3	10 a 100	2
Medição com uso de máquina de coordenadas	0,01	Estática			3 a 6

A tabela 4.2 ilustra a relação entre métodos de medição e características de desempenho avaliadas, ilustrando as relativas a posição, distância e trajetórias citadas na norma ISO 9283.

Tabela 4.2 – Métodos de medição x características de desempenho [ISO, 1995].

<i>MÉTODOS DE MEDIÇÃO</i>		<i>CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO</i>					
		Precisão unidirecional de posição	Repetibilidade unidirecional de posição	Precisão de distância	Repetibilidade de distância	Precisão de trajetória	Repetibilidade de trajetória
Métodos de sensores de posicionamento	Dispositivo cúbico	■	●	▲	●	-	-
	Dispositivo esférico	▲	▲	▲	▲	-	-
Métodos de comparação de trajetória	Comparação com guia mecânica	▲	▲	-	-	▲	▲
	Comparação com guia laser	▲	▲	●	●	▲	▲
Métodos de trilateração	Rastreamento com interferômetro multi-laser	⊗	●	●	●	⊗	●
	Trilateração ultrassônica	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	Trilateração com cabos mecânicos	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Métodos de medição por coordenadas polares	Rastreamento com interferômetro laser simples	⊗	●	●	●	⊗	●
	Medição com uso de estação total	⊗	●	●	●	-	-
	Medição com uso de escala linear	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Métodos de medição por triangulação	Rastreamento por triangulação óptica	⊗	●	●	●	⊗	●
	Medição com uso de teodolitos	⊗	●	●	●	-	-
	Medição com uso de câmeras	⊗	●	●	●	⊗	●
Medição inercial	■	●	●	●	■	●	
Métodos de medição por coordenadas cartesianas	Medição digital bidimensional	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	Medição com uso de máquina de coordenadas	-	-	▲	▲	-	-

A legenda utilizada na tabela é definida da seguinte forma:

☐: Estes sistemas de medição possuem a capacidade de realizar uma auto-calibração, assim como também, do sistema de coordenadas da base do robô. Neste caso, significa que estes sistemas podem medir as precisões de posição e trajetória absolutas e relativas;

■: Estes sistemas podem medir somente as precisões de posição e trajetória relativas;

●: Os robôs com desempenho médio podem ser testados com estes sistemas;

▲: Nestes sistemas, as características de desempenho podem ser mensuradas com algumas limitações, por exemplo: apenas as características de posição ou orientação podem ser quantificadas; as características de trajetória são medidas apenas em percursos limitados; frequência de aquisição muito baixa; limitação em virtude do número de graus de liberdade do equipamento de teste;

-: Sistemas não aptos para medir estas características de desempenho.

Um aspecto importante a ser observado é a diferença de custo entre os sistemas citados, muitas vezes, os resultados são similares, porém, os preços são muito distintos. Atualmente, os sistemas de custos mais elevados são os que utilizam o rastreamento *laser*.

5. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO CUBO-BERÇO

O desenvolvimento do sistema de medição cubo-berço consiste no dimensionamento dos cubos de referência, seleção e definição dos dispositivos medidores, e conseqüentemente, da estrutura do berço e sua disposição no *layout* da área de teste.

As características metrológicas do sistema também são consideradas, em função dos erros geométricos dos cubos de referência, exatidão dos dispositivos medidores e outros elementos inerentes à cadeia de medição.

5.1 Características Técnicas

Um sistema com propósito de servir de instrumento de medição de equipamentos deve ser concebido com características de simplicidade construtiva, praticidade no uso e confiabilidade operacional. Algumas características técnicas ideais ou necessárias para um sistema de medição de repetitividade de posicionamento, devem ser consideradas como [Lafretta, 1990]:

- ✓ *Instalação do sistema*: deve ser rápida, tanto em campo como em laboratório, que permita uma boa mobilidade dentro do volume de trabalho;
- ✓ *Obtenção dos resultados*: efetuada de forma eletrônica, através de planilhas e gráficos, onde sejam apontados os resultados da característica de desempenho avaliada;
- ✓ *Exigências metrológicas e operacionais*: deve medir as componentes dos erros em seis graus de liberdade com uma incerteza de medição menor que 25% do valor do erro da característica avaliada [ISO, 1995], e também, permitir que o robô possa ser ensaiado utilizando-se velocidades, acelerações e cargas variáveis, inclusive as máximas.

5.2 Concepção Lógica Operacional do Sistema

O sistema de teste cubo-berço proposto consiste basicamente de três relógios comparadores digitais, um cubo de referência, um dispositivo para fixação dos relógios (berço de medição) e um sistema computacional representado na figura 5.1.

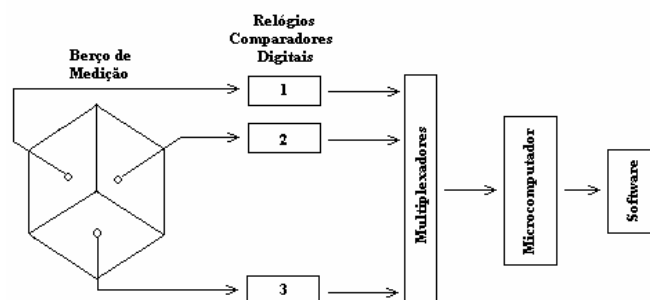


Figura 5.1 – Representação esquemática do sistema de teste cubo-berço.

O funcionamento do sistema de teste cubo-berço consiste em localizar e vincular o sistema de coordenadas do ensaio, situado junto ao dispositivo do berço de medição com o sistema de coordenadas do efetuador, através do cubo de referência. Por se tratar de ensaios de exatidão e repetitividade unidirecional de posição, os valores do teste nas três coordenadas são fornecidos através da diferença computada nos relógios comparadores, isto é, efetua-se a zeragem dos mesmos nas posições de referência e registram-se as variações nas medições para um definido número de repetições de um mesmo movimento de contato. O processo de registro dos dados pode ser manual ou através de transmissão direta dos relógios para um computador. No caso de coleta automática, essa ocorre através de cabos conectados individualmente em cada medidor e multiplexadores, que convertem o sinal para um algoritmo binário na porta de entrada serial RS-232, que pode ser interpretado e editado em uma planilha matemática ou outro software específico para tratamento de dados.

5.3 Modelagem Matemática para o Cálculo da posição do Cubo de Teste

A localização de um corpo rígido pode ser completamente descrita pela sua posição e orientação no espaço através de seis graus de liberdade. A posição da interface mecânica do robô, onde objetos podem ser fixados através de ferramenta de trabalho, tem associado um sistema de referência móvel. A orientação do objeto é dada através de três ângulos, que definem a relação desse sistema com o sistema de referência de base do equipamento ao qual é definida a sua posição. A figura 5.2 ilustra os sistemas para coordenadas de ferramenta (móvel) e da base (fixo). No caso dos ensaios propostos, faz-se necessário relacionar o sistema de coordenadas do cubo de referência, localizado na extremidade do robô, com o sistema de coordenadas da base.

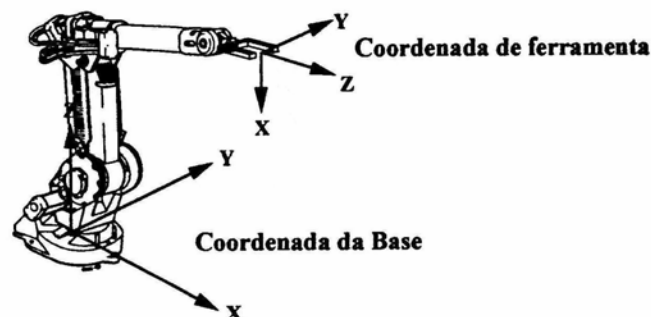


Figura 5.2 – Relação entre os sistemas de coordenadas [ABB, 1993].

O manipulador industrial adotado como equipamento para teste e validação do trabalho corresponde a um robô articulado com seis graus de liberdade.

Por se tratar de um robô antropomorfo, ou seja, onde todas as juntas são rotacionais e cada junta tem apenas um grau de liberdade, conforme ilustrado na figura 5.3, a matriz A_{i-1}^i , para o modelo cinemático, é função apenas da variável de junta q_i (ângulo).

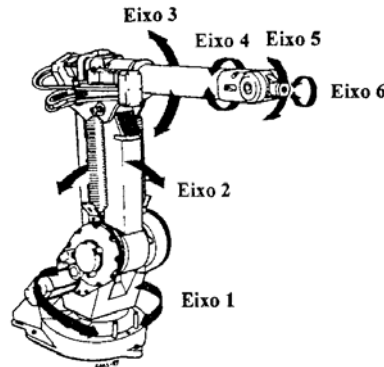


Figura 5.3 – Representação dos movimentos das juntas rotacionais de um robô antropomorfo [ABB, 2004].

Conforme descrito no capítulo 2, a matriz A_{i-1}^i não é constante, varia à medida que muda a configuração do manipulador no espaço no movimento, sendo a matriz de transformação para cada junta rotacional em questão dada pela equação 5.1.

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen} \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \text{sen} \theta_i \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

A notação de *Denavit-Hartenberg* permite construir a função da cinemática direta pela composição das transformações dos sistemas de coordenadas de cada junta, através de uma única matriz de transformação homogênea. Assim a posição e orientação do sistema de coordenadas n em relação ao sistema de coordenadas da base, são determinadas pela equação 5.2.

$$T_n^0(q) = A_1^0(q_1)A_2^1(q_2)\dots A_n^{n-1}(q_n) \quad (5.2)$$

No caso específico do robô empregado no teste, um manipulador com seis graus de liberdade, a matriz de transformação considera a relação de suas seis juntas rotacionais (θ_i), com o sistema de coordenadas do robô, representado esquematicamente na figura 5.4.

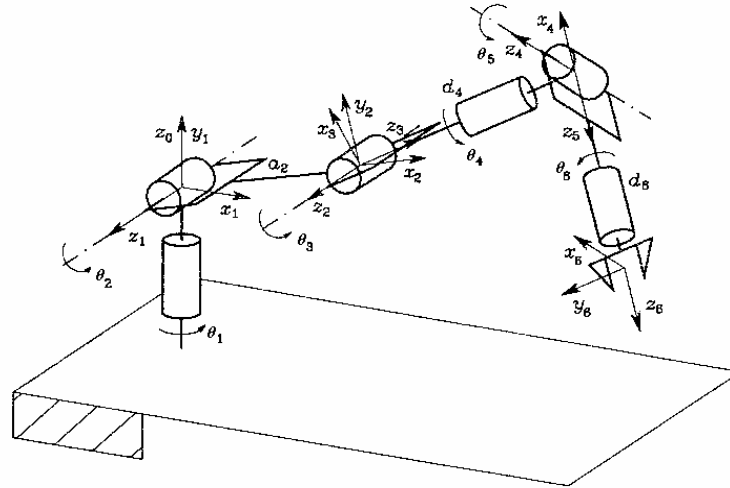


Figura 5.4 – Representação esquemática de um manipulador antropomorfo [Sciavicco, 1995].

A matriz de transformação total (T) para definição da posição e orientação deste manipulador no espaço é dada pela equação 5.3 [Conrad et al., 2000].

$$T_6^0(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = A_6^0 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \cdot A_4^3 \cdot A_5^4 \cdot A_6^5 \quad (5.3)$$

Baseado no método de *Denavit-Hartenberg (DH)*, os parâmetros necessários para a descrição completa da relação cinemática direta entre os segmentos de um manipulador robótico antropomorfo, estão definidos na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros de *Denavit-Hartenberg*.

Junta	θ_i	α_i	d_i	a_i
1	θ_1	α_1	d_1	a_1
2	θ_2	α_2	d_2	a_2
3	θ_3	α_3	d_3	a_3
4	θ_4	α_4	d_4	a_4
5	θ_5	α_5	d_5	a_5
6	θ_6	α_6	d_6	a_6

Para definição dos parâmetros de DH específicos do manipulador do teste, um robô da marca ABB, modelo IRB1400, faz-se necessário analisar os seus segmentos individualmente, suas dimensões e sua disposição no conjunto, conforme ilustrado na figuras 5.5 e 5.6.

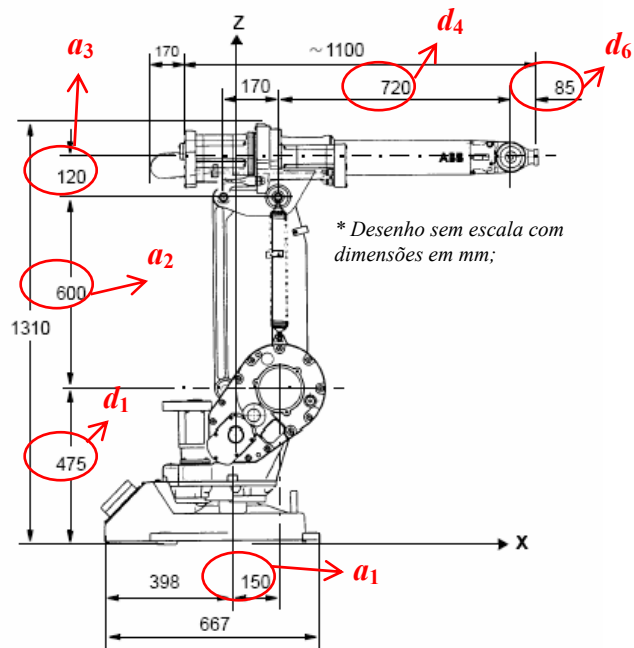


Figura 5.5 – Vista lateral do robô IRB1400 – ABB [ABB, 2004].

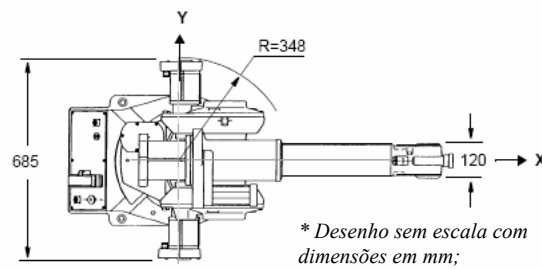


Figura 5.6 – Vista de topo do robô IRB1400 – ABB [ABB, 2004].

Na tabela 5.2, são definidos os parâmetros de DH para o robô ensaiado e com os respectivos valores utilizados nas matrizes de transformação para definição da posição e orientação da extremidade deste manipulador no seu volume de trabalho.

Tabela 5.2 – Parâmetros de *Denavit-Hartenberg* do robô IRB1400 - ABB.

Junta	θ_i	α_i (graus)	d_i (mm)	a_i (mm)
1	θ_1	-90	475	150
2	θ_2	0	0	600
3	θ_3	90	0	120
4	θ_4	-90	720	0
5	θ_5	90	0	0
6	θ_6	0	85	0

Baseado na matriz de transformação total, representada pela equação 5.3 e nos parâmetros de DH descritos na tabela 5.2, faz-se necessário definir as matrizes A_{i-1}^i para cada uma das 6 juntas rotacionais do manipulador. As matrizes A_{i-1}^i para o robô em consideração podem ser descritas na forma:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\text{sen}\theta_1 & a_1 \cos\theta_1 \\ \text{sen}\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & a_1 \text{sen}\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\text{sen}\theta_2 & 0 & a_2 \cos\theta_2 \\ \text{sen}\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2 \text{sen}\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & \text{sen}\theta_3 & a_3 \cos\theta_3 \\ \text{sen}\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 & a_3 \text{sen}\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\text{sen}\theta_4 & 0 \\ \text{sen}\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & \text{sen}\theta_5 & 0 \\ \text{sen}\theta_5 & 0 & -\cos\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$A_6^5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\text{sen}\theta_6 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

A matriz de transformação total A_6^0 é expressa na forma matricial com a seguinte configuração [Saramago, 1993]:

$$A_6^0 = \left[\begin{array}{ccc|c} \bar{n} & \bar{s} & \bar{a} & \bar{p} \\ \hline & 0 & & 1 \end{array} \right] \quad (5.11)$$

onde:

a matriz $[\bar{n} \ \bar{s} \ \bar{a}]$ representa a orientação e o vetor \bar{p} a posição da extremidade do manipulador no interior do seu volume de trabalho.

A operação de multiplicação dessas matrizes fornece as seguintes expressões para os vetores de posição e orientação do efetuador do robô em relação ao sistema de coordenadas da base, onde C_i e S_i representam de forma resumida $\cos \theta_i$ e $\sin \theta_i$, respectivamente.

Expressões do vetor orientação:

$$\mathbf{n}_x = \{[C_1 C_2 C_3 C_4 - C_1 C_4 S_2 S_3].C_5 - [C_1 C_2 S_3 S_5 - C_1 C_3 S_2 S_5]\}.C_6 + \{[(-C_1 C_2 C_3 S_4 + S_2 S_3 S_4) + S_1 C_4]\}.S_6$$

$$\mathbf{n}_y = \{[(S_1 C_2 C_3 C_4 - S_1 S_2 S_3 C_4) + C_1 S_4].C_5 + [-S_1 C_2 S_3 S_5 - S_2 C_3 S_5]\}.C_6 + \{[(-S_1 C_2 C_3 S_4 - S_1 S_2 S_3 S_4) + C_1 C_4]\}.S_6$$

$$\mathbf{n}_z = \{[(-S_2 C_3 C_4 - C_2 S_3 C_4).C_5 + (S_2 S_3 S_5 - C_2 C_3 S_5)].C_6 - [-S_2 C_3 S_4 - C_2 S_3 S_4]\}.S_6$$

$$\mathbf{s}_x = -\{[(C_1 C_2 C_3 C_4 - C_1 S_2 S_3 C_4) - S_1 S_4].C_5 + [-C_1 C_2 S_3 - C_1 S_2 C_3].S_5\}.S_6 + \{-[(-C_1 S_2 S_3 S_4 - C_1 S_2 S_3 S_4) - S_1 C_4]\}.C_6$$

$$\mathbf{s}_y = -\{[(S_1 C_2 C_3 C_4 - S_1 S_2 S_3 C_4) - C_1 S_4].C_5 + [-S_1 C_2 S_3 - S_1 S_2 C_3].S_5\}.S_6 + \{-[(-S_1 C_2 C_3 S_4 - S_1 S_2 S_3 S_4) + C_1 C_4]\}.C_6$$

$$\mathbf{s}_z = -\{[-S_2 C_3 C_4 - C_2 S_3 C_4].C_5 + [S_2 S_3 S_5 - C_2 C_3 S_5]\}.S_6 - \{-[-S_2 C_3 S_4 - C_2 S_3 S_4]\}.C_6$$

$$\mathbf{a}_x = \{[(C_1 C_2 C_3 C_4 - C_1 S_2 S_3 C_4) - S_1 S_4]\}.S_5 - \{[-C_1 C_2 S_3 - C_1 S_2 C_3]\}.C_5$$

$$\mathbf{a}_y = \{[(S_1 C_2 C_3 C_4 - S_1 S_2 S_3 C_4) + C_1 S_4]\}.S_5 - \{[-S_1 C_2 S_3 - S_1 S_2 C_3]\}.C_5$$

$$\mathbf{a}_z = \{[-S_2 C_3 C_4 - C_2 S_3 C_4]\}.S_5 - \{[S_2 S_3 - C_2 C_3]\}.C_5$$

Expressões do vetor posição:

$$\mathbf{p}_x = \{[(C_1 C_2 C_3 C_4 - C_1 S_2 S_3 C_4) - S_1 S_4].S_5 - [-C_1 C_2 S_3 - C_1 S_2 C_3].C_5\}.d_6 + \{[(C_1 C_2 S_3 - C_1 S_2 S_3 S_4).d_4 + (C_1 C_2 a_3 C_3 - C_1 S_2 a_3 S_3 + a_2 C_2 + a_1 C_1)]\}$$

$$\mathbf{p}_y = \{[(S_1 C_2 C_3 C_4 - S_1 S_2 S_3 C_4) + C_1 S_4].S_5 - [-S_1 C_2 S_3 - S_1 S_2 C_3].C_5\}.d_6 + \{[(S_1 C_2 S_3 + S_1 S_2 C_3).d_4 + (S_1 C_2 a_3 C_3 - S_1 S_2 a_3 S_3 + S_1 a_2 C_2 + a_1 S_1)]\}$$

$$\mathbf{p}_z = \{[-S_2 C_3 C_4 - C_2 S_3 C_4].S_5 - [S_2 S_3 C_5 - C_2 C_3 C_5]\}.d_6 + \{[(-S_2 S_3 + C_2 C_3).d_4 - (S_2 a_3 C_3 - C_2 a_3 S_3 - a_2 S_2 + d_1)]\}$$

5.4 Projeto do Sistema de Medição

O sistema de medição projetado para avaliação de desempenho estático de robôs industriais, considera em primeiro plano as necessárias características técnicas, mas essencialmente a concepção de um dispositivo projetado para fácil construção e praticidade operacional para execução dos testes propostos.

5.4.1 Seleção dos Medidores

Dentre os vários dispositivos e sistemas possíveis de serem utilizados para as medições e verificação dos deslocamentos dos robôs, em relação a uma posição definida, optou-se pela aplicação de relógios comparadores digitais. Os instrumentos selecionados correspondem a comparadores da marca MITUTOYO, modelo 543-250B [MITUTOYO, 2004], ilustrado na figura 5.4, tendo como principais características:

- ✓ resolução de 0,001 mm;
- ✓ exatidão de leitura de $\pm 0,003$ mm;
- ✓ incerteza de medição menor ou igual a 0,0008 mm;
- ✓ faixa de operação na ordem de 12 mm;
- ✓ investimento de baixo custo;
- ✓ sistema portátil;
- ✓ possibilidade de automatizar a leitura.

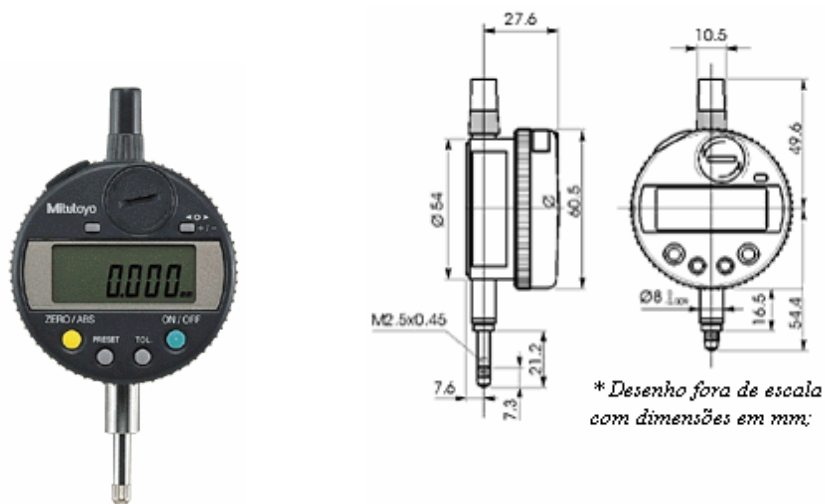


Figura 5.4 – Relógio comparador digital MITUTOYO 543-250B [MITUTOYO, 2004].

5.4.2 Dimensionamento dos Blocos de Referência

A definição e dimensionamento dos blocos de referência atendem a necessidade de três cargas distintas para os ensaios de exatidão e repetitividade conforme descrito na norma ISO 9283 [ISO, 1995], onde se define que o robô deve ser ensaiado com 10%, 50% e 100% de sua capacidade de carga nominal. No caso específico, para aplicação no equipamento a ser testado fez-se necessário à construção de três volumes com massas de 0.5 kg, 2.5 kg e 5.0 kg, para atender as especificações exigidas. Em virtude do dimensional e de algumas limitações do sistema de fixação do flange posicionado na extremidade do robô, conforme desenho esquemático ilustrado na figura 5.5, optou-se por construir os cubos de referência com apenas três furos passantes e rebaixamento para a cabeça dos parafusos, no intuito de aumentar a área de medição dos relógios comparadores sobre a superfície dos mesmos.

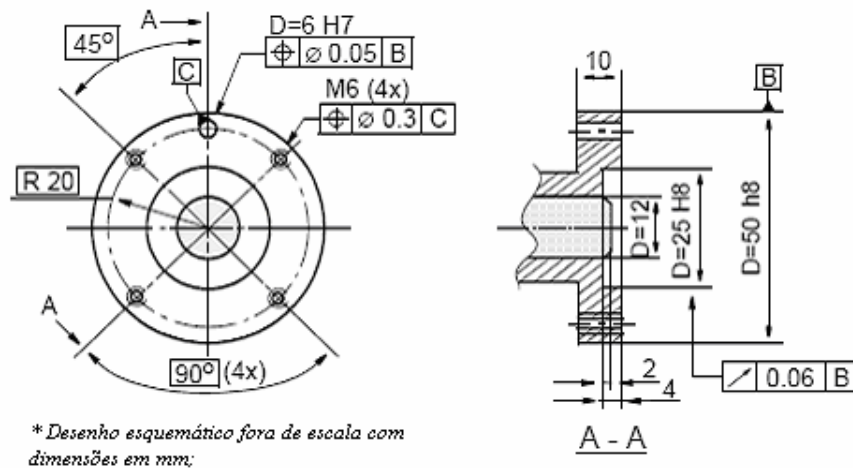


Figura 5.5 – Desenho esquemático do flange de fixação do robô IRB 1400 [ABB, 1993].

Para facilitar a fabricação dos blocos de medição e do dispositivo de fixação dos relógios, além de garantir um sistema compacto, optou-se por construir os blocos com uma seção quadrada de 50 mm. A figura 5.6 ilustra a configuração dos blocos de referência utilizados com suas respectivas massas. O bloco identificado com o n°1 possui a forma de um cubo, enquanto que o bloco n°2 possui a mesma seção, porém, com maior altura. Os blocos identificados com o n°3 são adicionados aos demais aplicados unicamente para complemento de carga não tendo contato com os relógios comparadores no momento da medição.

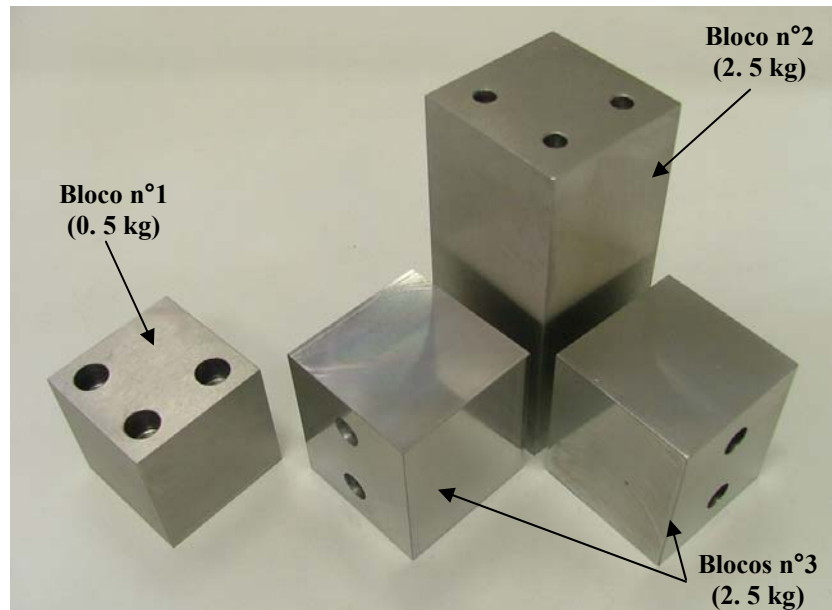


Figura 5.6 – Blocos padrões utilizados nos ensaios de exatidão e repetitividade.

Para obtenção de uma incerteza de medição que permita utilizar este sistema de teste em ensaios de posicionamento de robôs industriais, deve-se ter uma especial atenção às tolerâncias construtivas dos blocos padrões, em função dos erros dimensionais, sobre as leituras dos medidores, além do acabamento superficial destas peças. A figura 5.7 ilustra um exemplo de erros de planicidade e ortogonalidade na representação esquemática de um ensaio de repetitividade executado por dois transdutores de deslocamento em cada um dos eixos de coordenadas [Lafratta, 1990].

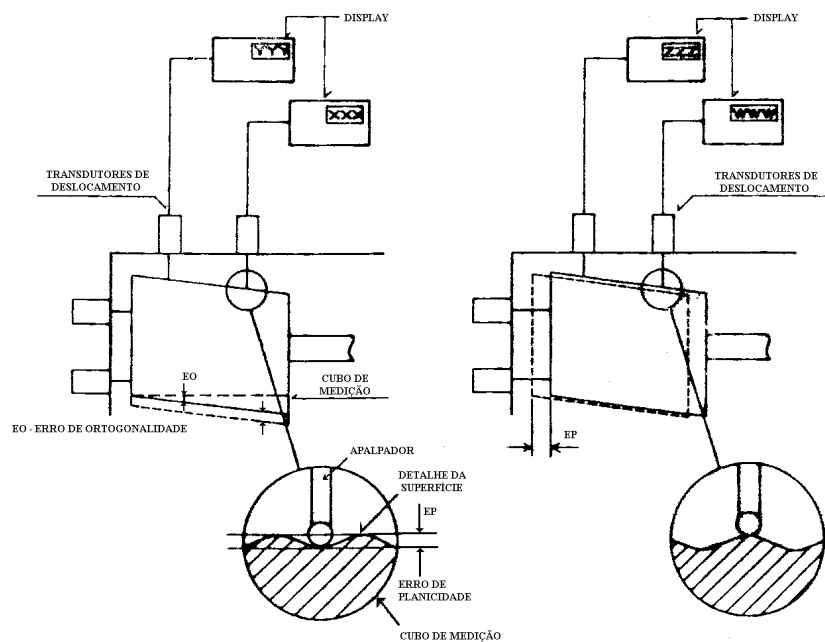


Figura 5.7 – Influência dos erros de planicidade e ortogonalidade sobre as leituras [Lafratta, 1990].

O estabelecimento de uma tolerância dimensional nas faces dos blocos de referência para os erros descritos é de difícil obtenção. A solução adotada consiste em fabricar os blocos padrões com os melhores recursos de usinagem e mensurar estes erros após o processo de fabricação. Para construção das peças, optou-se por utilizar um aço com ligas de cromo-vanádio (VC-131), por apresentar boas características mecânicas e excelente usinabilidade.

5.4.3 Dimensionamento do Dispositivo de Medição

O dimensionamento do dispositivo de medição está vinculado à necessidade de montagem dos três relógios comparadores digitais nos três eixos de coordenadas e a medição dos blocos padrões fixados na extremidade do robô. Na concepção do projeto do dispositivo, os principais pontos considerados correspondem a:

- ✓ rigidez mecânica suficiente para fixar os medidores digitais, sem risco de danos ou gerar interferência na leitura dos mesmos;
- ✓ ortogonalidade entre os três eixos de coordenadas;
- ✓ dimensões adequadas para o uso das diferentes configurações de blocos padrões;
- ✓ facilidade de montagem; peças de formas simples fixadas por uniões parafusadas e opção por materiais com estas características;

Buscando atender as características descritas, optou-se por construir o dispositivo em alumínio, de boa usinabilidade, pelas características do material, além da opção de montagem com peças de geometrias simples unidas através de parafusos. Em virtude da necessidade de ortogonalidade tridimensional, os três relógios foram posicionados da mesma maneira e perpendiculares entre si. A fixação dos mesmos foi realizada através do aperto no corpo dos relógios, permitindo uma boa rigidez do sistema e nenhum tipo de obstrução ou interferência nas medições. A figura 5.8 ilustra o modelo do dispositivo (desenhos construtivos no Apêndice 4), projetado inicialmente no ambiente virtual indicando o encaixe dos relógios montados nas direções de eixos ortogonais.

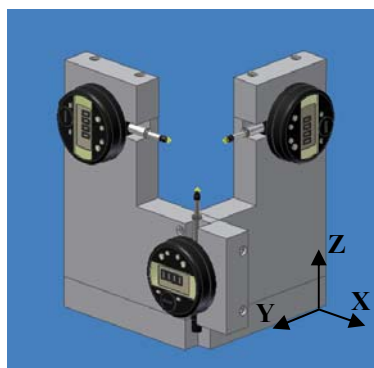


Figura 5.8 – Modelo do Dispositivo de medição desenvolvido.

6. APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentadas as características gerais dos ensaios, o desenvolvimento dos mesmos baseados na metodologia de avaliação de desempenho constante na norma ISO 9283 [ISO, 1995], assim como são apontadas as principais fontes de incerteza que podem afetar os resultados obtidos. Especificamente, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de exatidão e repetitividade unidirecional de posição do estudo de caso realizado com um robô industrial.

As aplicações experimentais desenvolvidas no laboratório de Usinagem e Robótica da UFRGS serviram como base para a validação da metodologia de avaliação de desempenho de robôs industriais e elaboração do projeto cubo-berço, apresentados respectivamente nos capítulos 3 e 5. No caso dos ensaios, são citados os parâmetros utilizados, bem como, os critérios definidos para validação do projeto proposto como ferramenta de avaliação de desempenho de robôs industriais.

6.1 Materiais e Métodos

Conforme especificação da norma, para efeito de testes, deve-se buscar otimizar o volume do ensaio dentro do espaço de trabalho do manipulador robótico. Para os testes experimentais realizados, definiram-se as dimensões do cubo virtual de teste, isto é, a posição dos 5 pontos de medição no plano de teste C_1 - C_2 - C_7 - C_8 (figura 6.1), próximo dos limites do mesmo. Em relação aos pontos de medição, o ponto P_1 localiza-se no centro do cubo em questão e os pontos P_2 e P_3 , assim como, P_4 e P_5 são simétricos e igualmente equidistantes uns aos outros.

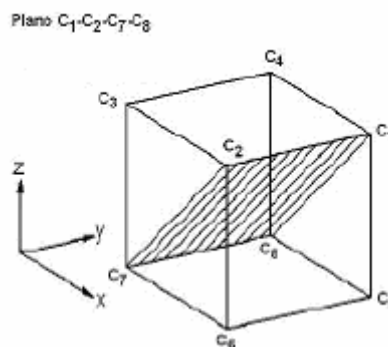


Figura 6.1 – Plano de teste C_1 - C_2 - C_7 - C_8 [ISO, 1995].

A representação do espaço de trabalho do robô e a posição dos pontos de medição do ensaio estão ilustradas nas figuras 6.2 e 6.3. O manipulador robótico ilustrado corresponde ao modelo IRB 1400 – ABB.

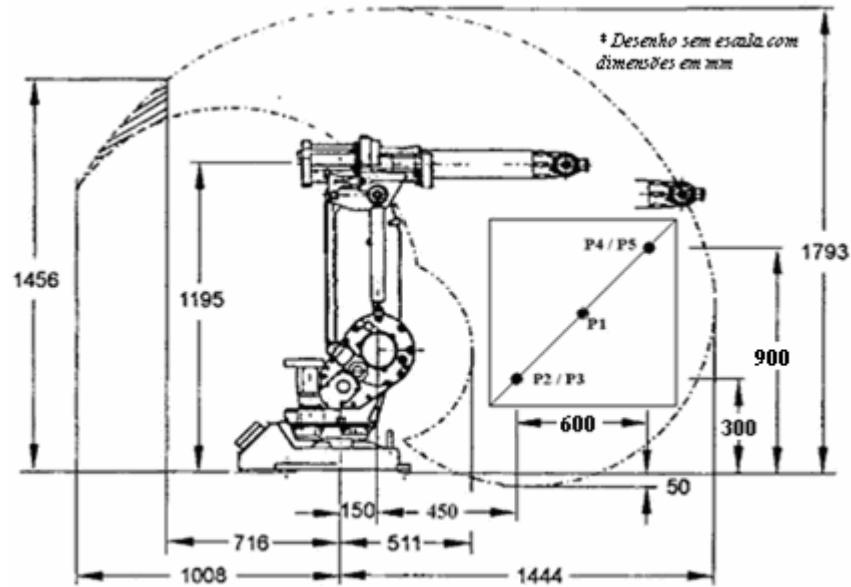


Figura 6.2 – Vista lateral do cubo de teste no volume de trabalho do robô [ABB, 2004].

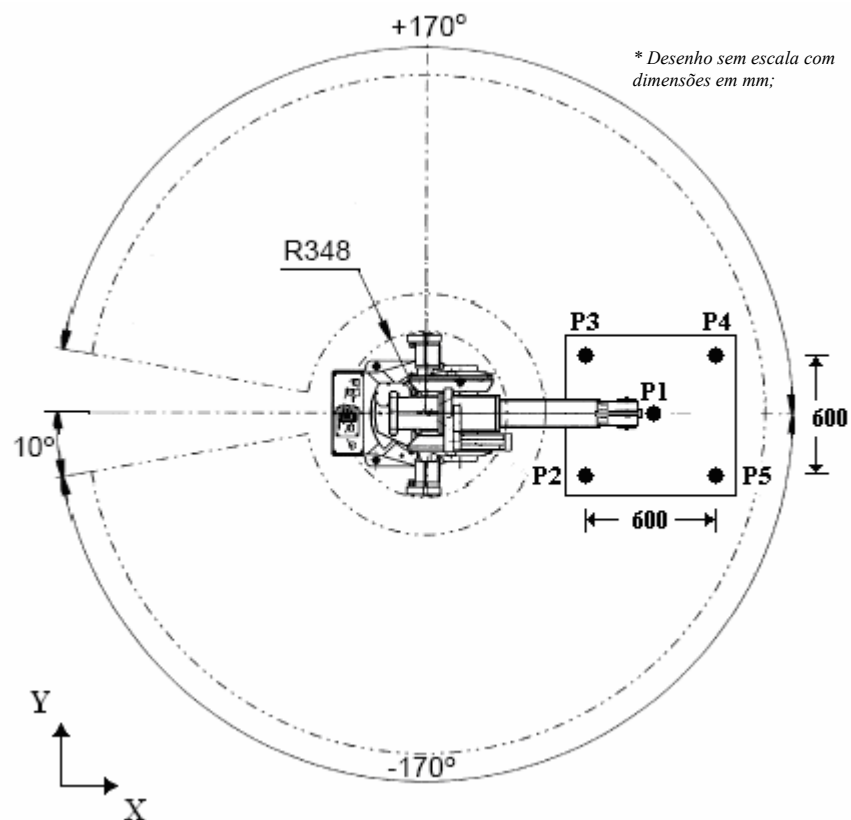


Figura 6.3 – Vista de topo do cubo de teste no volume de trabalho do robô [ABB, 2004].

As características de exatidão e repetitividade de posicionamento mensuradas nos ensaios buscam quantificar os desvios que ocorrem entre uma posição comandada, uma posição alcançada e a flutuação na posição alcançada em uma série de repetidas visitas à posição comandada. Neste caso, uma posição comandada é programada *off-line* através do computador

na linguagem do robô, e os pontos alcançados, são as posições reais obtidas após 30 repetidos ciclos do robô sob modo automático.

O dispositivo de medição cubo-berço concebido foi montado sobre uma estrutura de alumínio extrudado, que permite a regulagem do mesmo no eixo de coordenadas Z (figura 6.4). As leituras dos medidores digitais (ref. 523-250B) foram realizadas através de cabos analógicos de comunicação (ref. digimatic 90540) e multiplexadores DMX (ref. digimatic 011216 e 011189), todos da marca MITUTOYO [MITUTOYO, 2004], porém, as sincronizações entre as tarefas de leitura e movimentação do robô efetuadas pelo operador do ensaio, e os dados armazenados no computador em uma planilha matemática para posterior análise.



Figura 6.4 – Estrutura de sustentação para dispositivo de medição.

A estrutura de alumínio foi fixada sobre uma base de aço, proporcionando uma excelente rigidez ao sistema e também, uma boa mobilidade no momento de troca de posição nos eixos de coordenadas X e Y .

6.2 Ensaio Experimentais

Definidas as posições de teste, desenvolveu-se o programa na linguagem RAPID, específica para robôs da marca ABB, que neste caso deveria contemplar o deslocamento de uma posição inicial ou de repouso, para execução dos ciclos de medição em cada um dos pontos contidos no cubo virtual de teste, executando as seqüências de ciclos estabelecidos na norma.

No caso dos ensaios para características de posição, especificamente, exatidão e repetitividade unidirecional, o número mínimo de ciclos exigidos e executados corresponde a 30 para cada ponto. As seqüências de medições realizadas nos ensaios estão ilustradas na figura 6.5,

onde as posições mensuradas na chegada, repetindo-se até o término do n° de ciclos estabelecido.

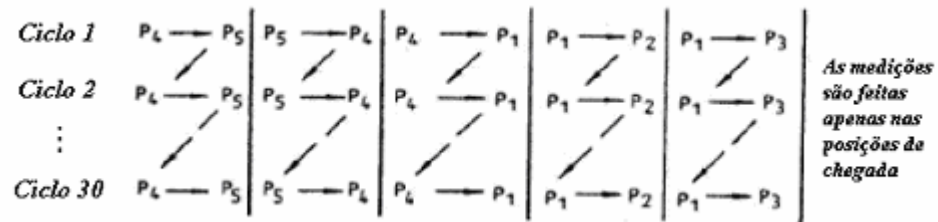


Figura 6.5 – Seqüência dos ciclos de medições nos ensaios.

Em ambas as características de posicionamento avaliadas, os ciclos de testes repetem-se para velocidades respectivamente de 10%, 50% e 100% da velocidade máxima do equipamento, que no caso do manipulador analisado é de 7,0 m/s. Considera-se também os mesmos percentuais para as cargas aplicadas, em relação à capacidade nominal, que no modelo testado é de 5,0 Kg.

Para cada uma das cinco posições de teste, as variações de velocidade e carga são idênticas, conforme descritas na tabela a seguir.

Tabela 6.1 – Variação dos parâmetros do ensaio para cada posição de teste.

Ensaio n°	Velocidade [%]	Carga [%]
1	10	10
2	50	
3	100	
4	10	50
5	50	
6	100	
7	10	100
8	50	
9	100	

Para cada uma das posições medidas, foram coletados 270 dados, que considerando-se a seqüência de todos os pontos, totalizam 1350 registros.

Em virtude das características dimensionais do sistema projetado (figura 6.6), os programas de testes puderam ser realizados, permitindo a variação dos parâmetros do ensaio de forma prática, isto é, onde os parâmetros de velocidade para cada ponto medido se alteravam ao final de 30 ciclos automaticamente, e os parâmetros de carga, adequados ao final de 90 ciclos através de um tempo desenvolvido no programa para *setup* dos blocos padrões.

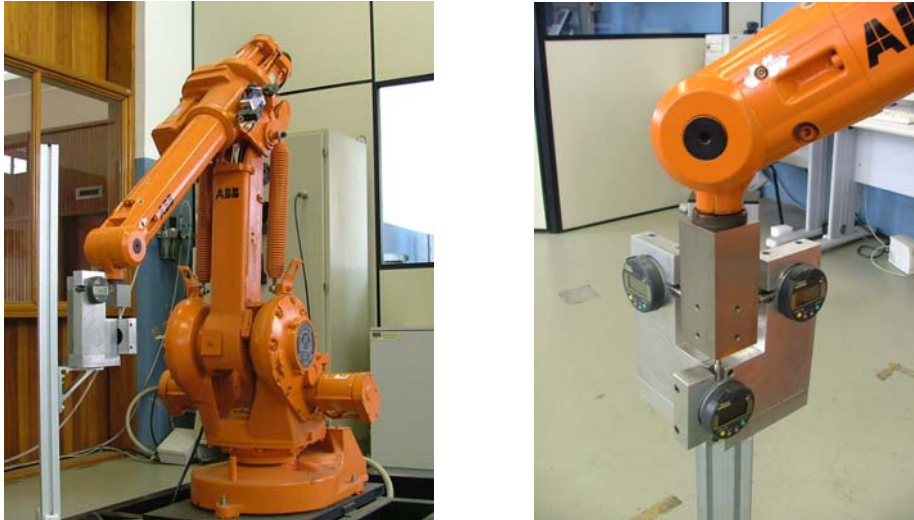


Figura 6.6 - Fotos ilustrativas do dispositivo de medição cubo-berço.

Os testes foram realizados seguindo uma seqüência lógica, repetida para todos os pontos de medição no volume de trabalho do robô. Pode-se descrever o procedimento de teste para avaliação de desempenho do robô em questão na seguinte seqüência:

1. Acionamento do equipamento;
2. Inserção do programa de teste contido em um disquete no quadro de comando do robô;
3. Carregamento do programa através do *teachpendant*;
4. Fixação do bloco padrão na extremidade do robô;
5. Execução do programa sob modo de segurança para verificar possíveis falhas;
6. Posicionamento do robô no ponto de medição específico;
7. Posicionamento do sistema de medição em contato com o bloco padrão;
8. Realização da zeragem dos medidores digitais;
9. Posicionamento do robô na posição de repouso;
10. Execução do programa sob modo automático;
11. Coleta dos dados no computador a cada ciclo de medição;

Para os cálculos de exatidão e repetitividade unidirecional utilizaram-se todos os dados coletados, onde o tratamento destas informações ocorreu em planilhas matemáticas, com formulações específicas para cada uma das características de desempenho avaliadas.

Os testes realizaram-se em condições de operação do robô consideradas estáveis, com equipamento protegido de correntes de ar e radiação térmica, assim como a temperatura e umidade de acordo com os valores explicitados na norma.

6.3 Fontes de Incerteza

Em relação ao dispositivo de medição proposto, pode-se citar as seguintes variáveis como fontes de erro ou de incerteza do sistema em questão:

Nos blocos padrões:

- ✓ Rugosidade superficial;
- ✓ Planicidade das faces;
- ✓ Ortogonalidade entre as faces;
- ✓ Deformações térmicas.

Nos elementos mecânicos do dispositivo:

- ✓ Rigidez insuficiente na fixação dos componentes;
- ✓ Erros na zeragem dos medidores;
- ✓ Deformações térmicas.

Aquisição e armazenagem dos dados:

- ✓ Aquisição incorreta;
- ✓ Erros de arredondamento;
- ✓ Erros de tratamento matemático.

Para obtenção da incerteza de medição (I_m) total do sistema, as fontes de erro mais significativas são: planicidade das faces e incerteza dos medidores de deslocamento. As demais fontes de erro são tidas como desprezíveis, onde os erros sistêmicos do dispositivo proposto podem ser eliminados, uma vez que as medições são diferenciais. Os erros de ortogonalidade também podem ser desconsiderados, em virtude do sistema utilizar somente um medidor de deslocamento em cada eixo. Para o cálculo da incerteza global do sistema cubo-berço projetado, fez-se necessário a medição tridimensional dos blocos padrões, assim como, a avaliação dos medidores digitais. Cabe ressaltar, que estas análises foram realizadas em equipamentos credenciados junto à rede metrológica.

No caso dos relógios digitais, todos foram avaliados em equipamento específico, e o resultado obtido foi uma $I_m = \pm 0,0008$ mm.

Os erros de planicidade e ortogonalidade das faces dos blocos padrões usinados foram mensurados através de análise de uma máquina de medir por coordenadas, neste caso específico, da marca Mitutoyo, modelo QM-353, cuja incerteza de medição calculada em μm , está representada na equação 6.1.

$$I_m = \pm \left(1,2 + 1,7x \frac{L}{1000} \right) \quad (6.1)$$

onde,

L é a maior dimensão da peça em mm.

Os ensaios foram realizados nas faces (A, B, C e D) de dois blocos padrões, de 0,5 kg e 2,5 kg, conforme ilustrado na figura 6.7 (a), já que os outros blocos de 2,5 kg são fixados ao anterior, logo, as áreas de contato para os relógios são idênticas, mesmo após a adição destas massas. Ambos os blocos avaliados possuem a mesma seção transversal, a diferença está no comprimento dos blocos. Para efeito de medição, foram definidos nove pontos em cada uma das faces de contato, conforme representação esquemática da figura 6.7 (b).

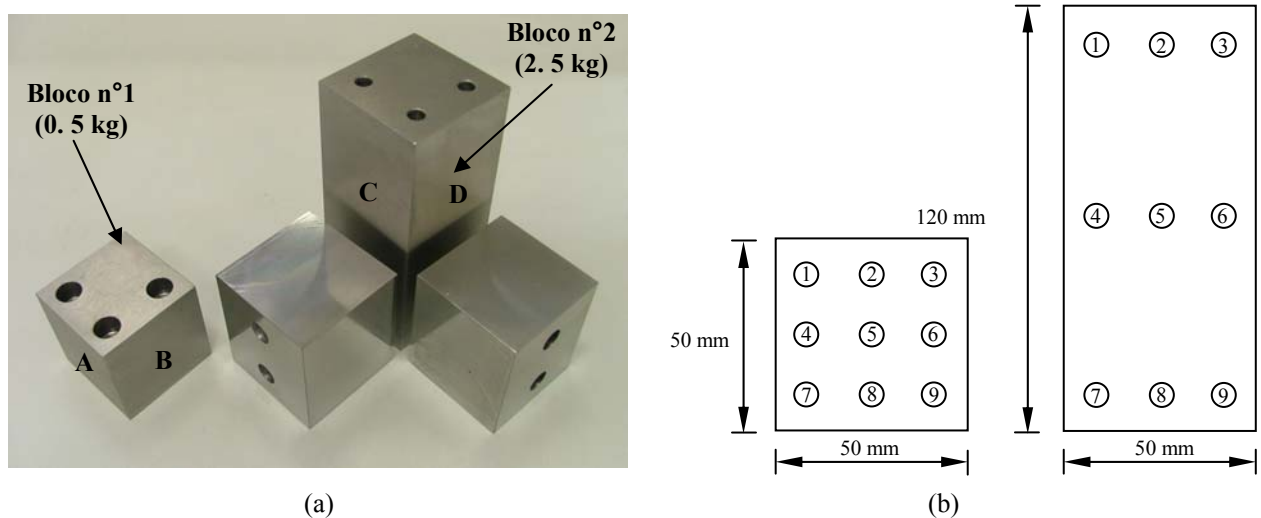


Figura 6.7 - Fotos ilustrativas dos blocos analisados (a) e representação esquemática dos pontos medidos (b).

Os resultados obtidos para os erros máximos de planicidade em cada uma das quatro faces medidas correspondem respectivamente a:

Bloco nº1

✓ Face A - $1,0 \mu\text{m} = 0,0010 \text{ mm}$;

✓ Face B - $1,5 \mu\text{m} = 0,0015 \text{ mm}$;

Bloco nº2

✓ Face C - $2,5 \mu\text{m} = 0,0025 \text{ mm}$;

✓ Face D - $2,0 \mu\text{m} = 0,0020 \text{ mm}$.

Para efeito de cálculo da incerteza combinada, considera-se o pior resultado obtido, onde se tem o valor de 0,0025 mm para erro de planicidade na face C. Este valor somado a incerteza calculada da máquina de medir por coordenadas, obtém-se uma $I_m = 3,9 \mu\text{m}$ ou 0,0039 mm.

Para os cálculos da incerteza de medição total (I_{mT}) do sistema, deve-se considerar também os valores calculados para os relógios comparadores, obtendo-se assim, um valor para a $I_{mT} = 4,7 \mu\text{m}$ ou 0,0047 mm.

Conforme descrito na norma ISO 9283 [ISO, 1995], os sistemas de avaliação de desempenho não devem possuir uma incerteza de medição maior que 25% do valor da característica que está sendo ensaiada, logo, de acordo com as especificações do fabricante [ABB, 2004], o valor para repetitividade unidirecional de posição é 0,05 mm, considerando-se 25% deste valor, tem-se o máximo de 0,0125 mm para a incerteza de medição do sistema de avaliação de desempenho.

Com os valores levantados, pode-se constatar que o sistema de medição proposto neste trabalho, cumpre com as solicitações da norma, e apresenta uma incerteza total bem abaixo do valor máximo permitido.

7. ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados, onde os dados estão caracterizados individualmente e as observações pertinentes a cada uma das posições de teste estão descritas a seguir.

7.1 Resultados dos Ensaio

Os dados coletados foram tratados em planilhas matemáticas, e os valores dos erros de exatidão e repetitividade unidirecionais definidos em tabelas e gráficos para os pontos considerados nos testes experimentais.

Para visualização das dispersões das medidas, essas são tratadas no software MATLAB®, e representados graficamente em forma tridimensional, onde os pontos plotados ilustram os pontos atingidos em cada uma das posições de teste. Para tal, optou-se em representar os melhores e piores resultados em cada um dos cinco pontos avaliados, e conforme o exemplo da figura 7.1, pode-se visualizar a distribuição dos erros de posicionamento no espaço tridimensional do ponto P₁.

Observa-se neste caso, que os resultados ensaiados foram satisfatórios, pois os raios dos baricentros das posições alcançadas após 30 repetidas visitas são pequenos em ambos os casos, e seus centros estão bastante alinhados com a intersecção dos três eixos de coordenadas. Porém, observa-se que em virtude do aumento de velocidade e carga, a dispersão foi um pouco maior e levemente deslocada no gráfico da direita.

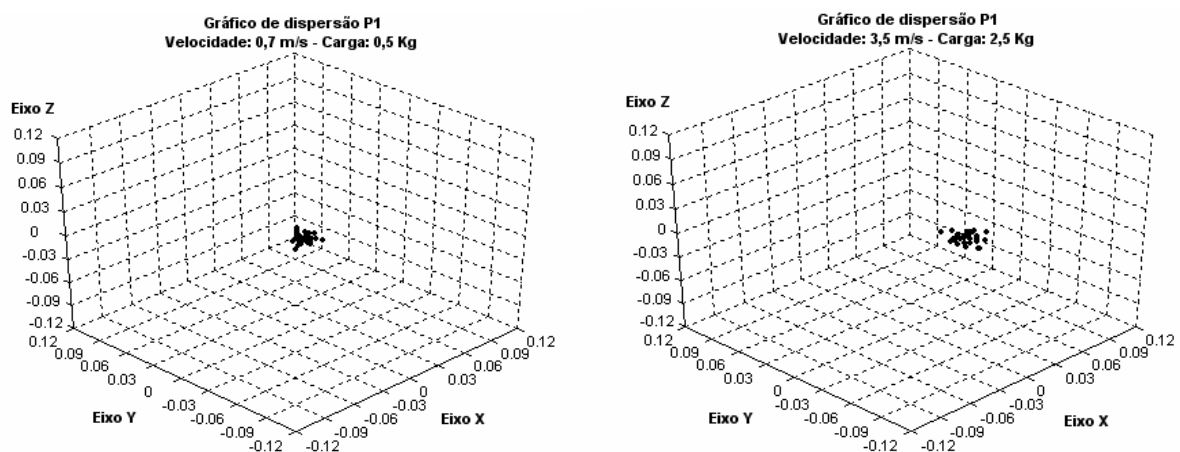


Figura 7.1 – Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P₁ [mm].

Pode-se observar na tabela 7.1, os resultados finais das características de posicionamento dos ensaios realizados na posição P₁, ponto localizado no centro do cubo virtual de teste, onde

estão definidos os valores dos erros de exatidão (A_p), repetitividade (R_p) e desvio padrão (S_i), para os diferentes parâmetros testados.

Tabela 7.1 – Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P_1 .

Parâmetros do Ensaio P_1		AP_p (mm)	RP_p (mm)	S_i (mm)
1	Vel.0,7 m/s - Carga 0,5 kg	0,0102	0,0209	0,0043
2	Vel.3,5 m/s - Carga 0,5 kg	0,0115	0,0217	0,0045
3	Vel.7,0 m/s - Carga 0,5 kg	0,0124	0,0181	0,0034
4	Vel.0,7 m/s - Carga 2,5 kg	0,0398	0,0212	0,0039
5	Vel.3,5 m/s - Carga 2,5 kg	0,0497	0,0274	0,0053
6	Vel.7,0 m/s - Carga 2,5 kg	0,0449	0,0247	0,0049
7	Vel.0,7 m/s - Carga 5,0 kg	0,0265	0,0226	0,0043
8	Vel.3,5 m/s - Carga 5,0 kg	0,0419	0,0280	0,0060
9	Vel.7,0 m/s - Carga 5,0 kg	0,0485	0,0295	0,0043

Da mesma forma, para os valores finais plotados (figura 7.2), observa-se um comportamento específico quando da variação de velocidade e carga, isto é, os resultados pioraram em virtude do aumento de velocidade e carga, e em relação a este segundo parâmetro, com impacto bastante significativo já com 50% da capacidade nominal do robô.

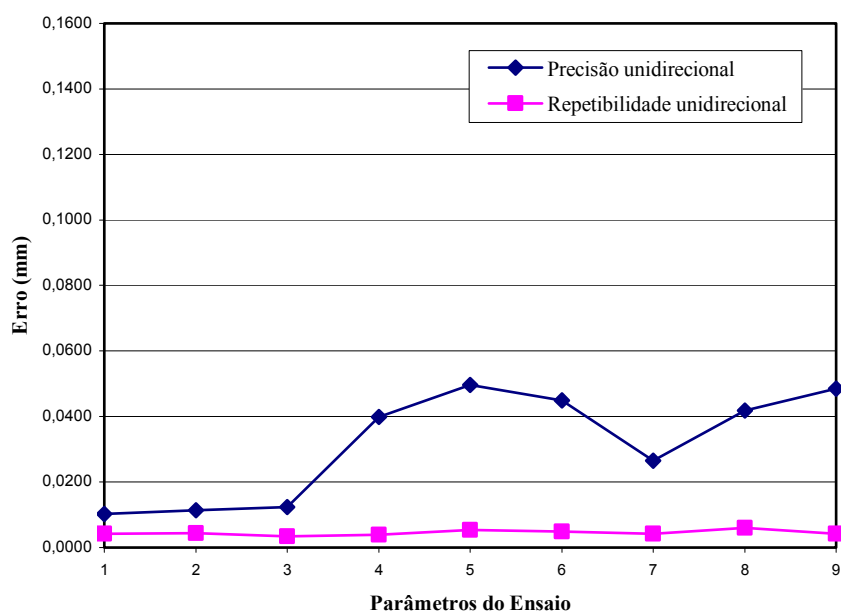


Figura 7.2 – Gráfico de exatidão e repetitividade unidirecional em P_1 .

Na seqüência numérica dos pontos ensaiados, a figura 7.3 ilustra os gráficos de dispersão do ponto P₂. Verifica-se neste caso, um melhor desempenho obtido com 10% da velocidade máxima e o mesmo percentual sobre a capacidade de carga nominal. Em contrapartida, nos ensaios com máxima velocidade e carga, as posições alcançadas se mostram mais dispersas, onde o raio do baricentro é maior e bastante deslocado em relação à intersecção dos eixos de coordenadas.

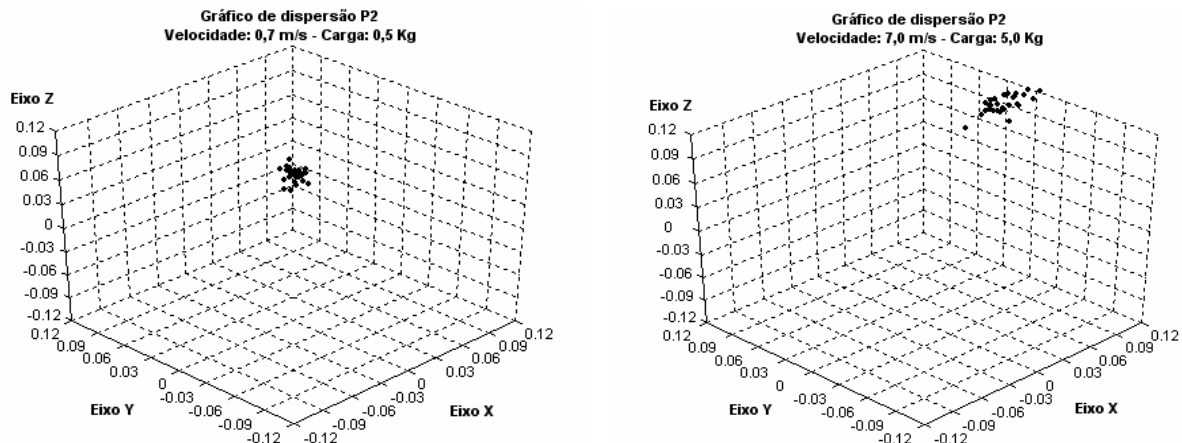


Figura 7.3 – Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P₂.

Em relação aos resultados finais das características de posicionamento dos ensaios realizados na posição P₂, ponto localizado na extremidade inferior direita do cubo virtual de teste, tem-se os seguintes resultados, descritos na tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P₂.

Parâmetros do Ensaio P ₂		AP_p (mm)	RP_p (mm)	S_i (mm)
1	<i>Vel.0,7 m/s - Carga 0,5 kg</i>	0,0617	0,0270	0,0053
2	<i>Vel.3,5 m/s - Carga 0,5 kg</i>	0,0764	0,0366	0,0076
3	<i>Vel.7,0 m/s - Carga 0,5 kg</i>	0,0808	0,0242	0,0047
4	<i>Vel.0,7 m/s - Carga 2,5 kg</i>	0,0470	0,0383	0,0075
5	<i>Vel.3,5 m/s - Carga 2,5 kg</i>	0,0654	0,0321	0,0065
6	<i>Vel.7,0 m/s - Carga 2,5 kg</i>	0,0674	0,0296	0,0061
7	<i>Vel.0,7 m/s - Carga 5,0 kg</i>	0,1319	0,0356	0,0075
8	<i>Vel.3,5 m/s - Carga 5,0 kg</i>	0,1510	0,0323	0,0067
9	<i>Vel.7,0 m/s - Carga 5,0 kg</i>	0,1465	0,0383	0,0077

Da análise da figura 7.4, percebe-se uma grande variação na característica de exatidão do robô com os aumentos de velocidade e carga, o que não ocorre com a característica de repetitividade unidirecional. Consta-se que com velocidades e cargas intermediárias, o desempenho mostra-se melhor, e os valores obtidos satisfatórios. O desempenho inferior neste ponto pode ser atribuído a uma maior necessidade de giro das juntas do robô, neste caso específico, exigindo a movimentação de todas as seis juntas dos segmentos para alcançar a posição comandada, gerando, neste caso, um maior erro combinado.

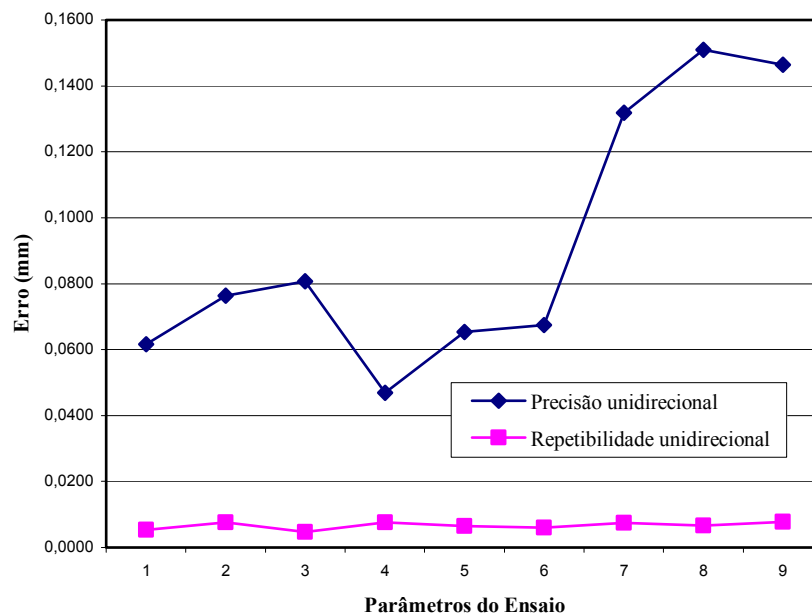


Figura 7.4 – Gráfico de exatidão e repetitividade unidirecional em P_2 .

A figura 7.5 ilustra os gráficos de dispersão do ponto P_3 . Verifica-se neste caso, que o melhor desempenho é obtido com 10% da velocidade máxima e o 50% da capacidade de carga nominal. Similarmente a posição P_2 , nos ensaios com máxima velocidade e carga, as posições alcançadas mostram-se mais dispersas, e o raio do baricentro também é maior e está bastante deslocado em relação à intersecção dos eixos de coordenadas.

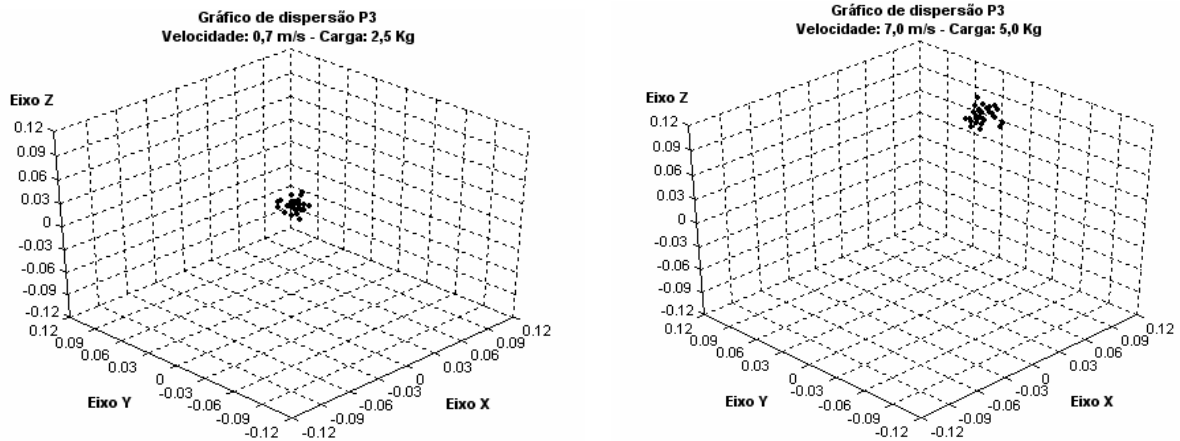


Figura 7.5 – Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P₃.

Os resultados finais das características de posicionamento dos ensaios realizados na posição P₃, ponto localizado na extremidade inferior esquerda do cubo virtual de teste, indicam valores similares aos descritos no ponto anterior. A tabela 7.3 ilustra as variações obtidas nos ensaios realizados.

Tabela 7.3 – Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P₃.

	Parâmetros do Ensaio P ₃	AP_p (mm)	RP_p (mm)	S_i (mm)
1	Vel.0,7 m/s - Carga 0,5 kg	0,0451	0,0199	0,0039
2	Vel.3,5 m/s - Carga 0,5 kg	0,0685	0,0343	0,0073
3	Vel.7,0 m/s - Carga 0,5 kg	0,0782	0,0248	0,0051
4	Vel.0,7 m/s - Carga 2,5 kg	0,0244	0,0244	0,0050
5	Vel.3,5 m/s - Carga 2,5 kg	0,0394	0,0254	0,0055
6	Vel.7,0 m/s - Carga 2,5 kg	0,0281	0,0245	0,0049
7	Vel.0,7 m/s - Carga 5,0 kg	0,1285	0,0276	0,0059
8	Vel.3,5 m/s - Carga 5,0 kg	0,1335	0,0260	0,0049
9	Vel.7,0 m/s - Carga 5,0 kg	0,1349	0,0286	0,0057

Na figura 7.6 ilustra-se o desempenho do robô em função das variações de velocidade e carga desenvolvidas. Assim como em P₂, que é simétrico à P₃, o comportamento é similar, mas os resultados finais se mostraram melhores e bastante satisfatórios se comparados com as especificações do fabricante. A maior dispersão ocorre na variação da carga para a inclusão dos blocos padrões de 5,0 Kg, quando a exatidão da máquina atinge valores maiores, na ordem de 0,1 mm.

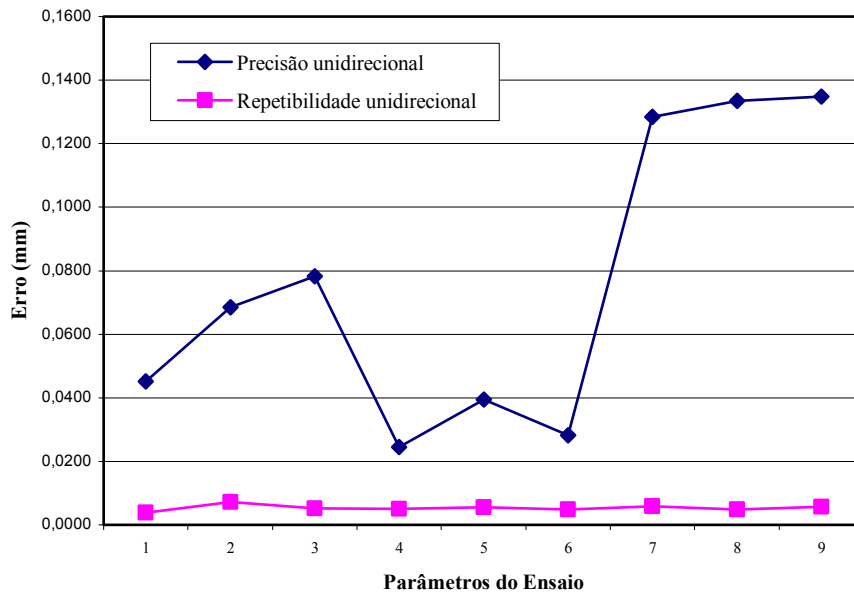


Figura 7.6 – Gráfico de exatidão e repetibilidade unidirecional em P₃.

Os valores de desempenho obtidos, no ponto de medição P₄, posicionado na extremidade superior direita do cubo virtual de teste, mostram que mesmo para velocidades e cargas baixas, a dispersão é maior que os outros pontos avaliados, em virtude do maior raio do baricentro das posições alcançadas. No caso de exigências máximas de velocidade e carga, os resultados não diferem muito em relação aos parâmetros anteriores, porém, visualiza-se uma leve ovalização e deslocamento lateral neste agrupamento de pontos.

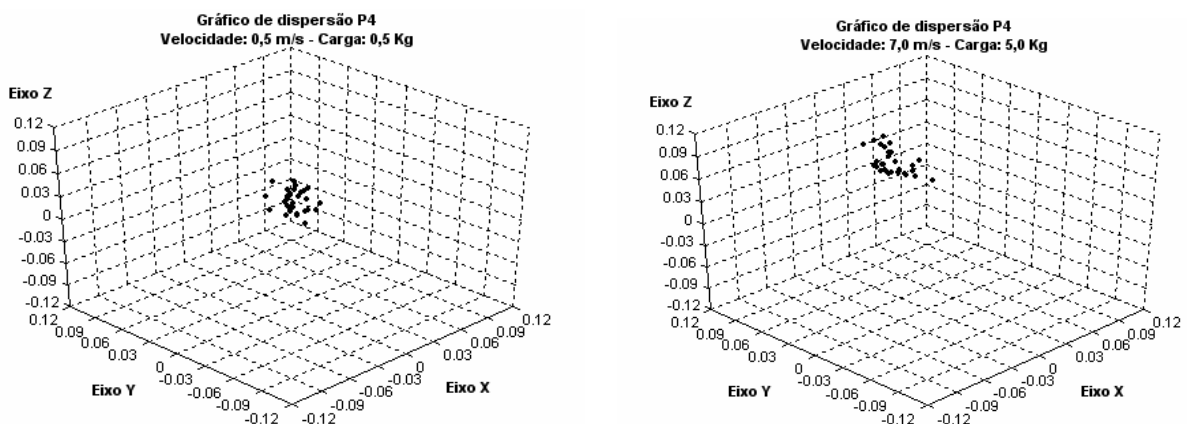


Figura 7.7 – Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P₄.

A tabela 7.4 apresenta os resultados finais obtidos na avaliação de desempenho no ponto de medição P₄, onde se destacam erros de exatidão com 50% da capacidade de carga nominal.

Tabela 7.4 – Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P₄.

Parâmetros do Ensaio P ₄		AP_p (mm)	RP_p (mm)	S_i (mm)
1	<i>Vel.0,7 m/s - Carga 0,5 kg</i>	0,0339	0,0357	0,0067
2	<i>Vel.3,5 m/s - Carga 0,5 kg</i>	0,0555	0,0435	0,0091
3	<i>Vel.7,0 m/s - Carga 0,5 kg</i>	0,0639	0,0308	0,0052
4	<i>Vel.0,7 m/s - Carga 2,5 kg</i>	0,0520	0,0422	0,0083
5	<i>Vel.3,5 m/s - Carga 2,5 kg</i>	0,1022	0,0380	0,0082
6	<i>Vel.7,0 m/s - Carga 2,5 kg</i>	0,1119	0,0278	0,0056
7	<i>Vel.0,7 m/s - Carga 5,0 kg</i>	0,0727	0,0389	0,0072
8	<i>Vel.3,5 m/s - Carga 5,0 kg</i>	0,1260	0,0480	0,0085
9	<i>Vel.7,0 m/s - Carga 5,0 kg</i>	0,1259	0,0531	0,0106

Dos dados ilustrados na figura 7.8, destaca-se a grande variação na característica de exatidão do robô com aumentos de velocidade e carga, o que é bem menos perceptível com a característica de repetitividade unidirecional. O desempenho inferior nesta posição avaliada pode ser atribuído a um maior estiramento dos segmentos de robô, onde, neste caso, a exigência de carga se soma ao peso do próprio braço robótico, aliado a um maior momento de inércia, já que a extremidade está bastante afastada do centro de gravidade do equipamento.

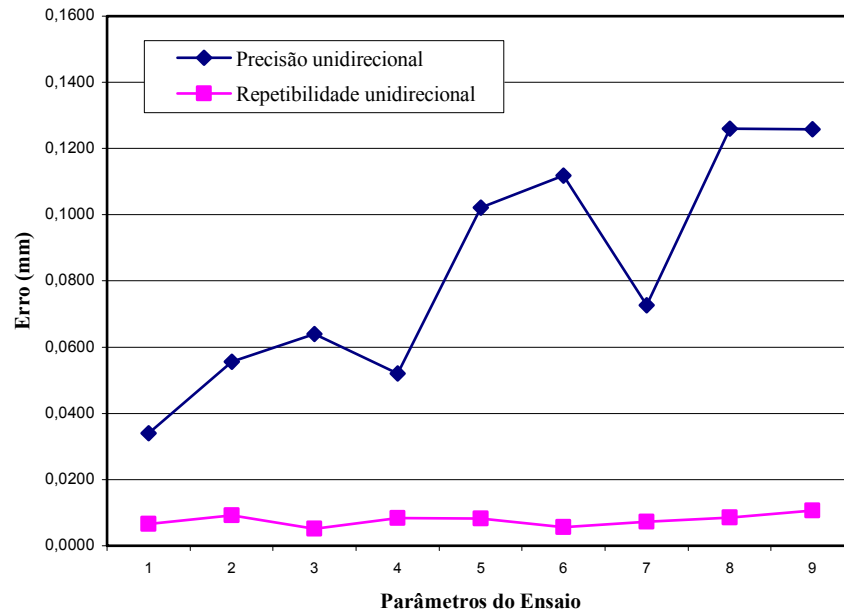


Figura 7.8 – Gráfico de exatidão e repetitividade unidirecional em P_4 .

O último ponto avaliado corresponde a P_5 , posicionado na extremidade superior direita do cubo de teste. Esta posição é simétrica a P_4 e ambas estão igualmente afastadas umas das outras. Em relação aos gráficos apresentados na figura 7.9, pode-se visualizar uma maior dispersão nestes ensaios realizados, onde assim como P_4 , as posições alcançadas apresentam-se levemente distorcidas e deslocadas em relação à intersecção dos eixos das coordenadas.

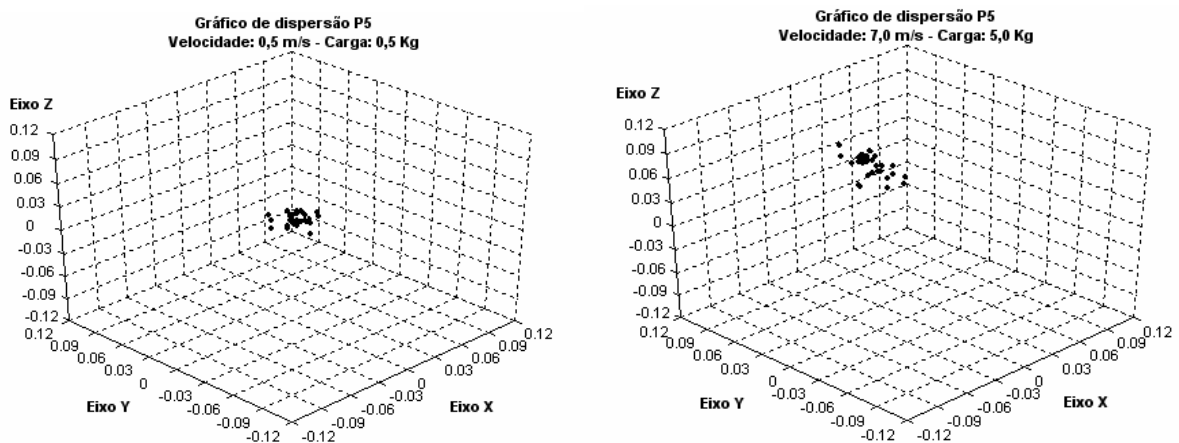


Figura 7.9 – Gráficos de dispersão tridimensional do ensaio em P_5 .

A tabela 7.5 apresenta os resultados finais obtidos da avaliação de desempenho no ponto de medição P_5 , onde se tem erros maiores de exatidão com velocidades de 50% e 100% em relação à máxima e cargas de 100% da capacidade nominal. Neste ponto específico, percebe-se

uma redução significativa nos erros de posicionamento com uma velocidade baixa e carga alta, apresentando valores bastante razoáveis se comparados com as especificações do fabricante.

Tabela 7.5 – Resultados dos ensaios de exatidão e repetitividade em P₅.

Parâmetros do Ensaio P ₅		AP _p (mm)	RP _p (mm)	S _i (mm)
1	Vel.0,7 m/s - Carga 0,5 kg	0,0261	0,0297	0,0057
2	Vel.3,5 m/s - Carga 0,5 kg	0,0498	0,0343	0,0070
3	Vel.7,0 m/s - Carga 0,5 kg	0,0590	0,0265	0,0047
4	Vel.0,7 m/s - Carga 2,5 kg	0,0607	0,0357	0,0072
5	Vel.3,5 m/s - Carga 2,5 kg	0,1099	0,0319	0,0072
6	Vel.7,0 m/s - Carga 2,5 kg	0,1193	0,0239	0,0046
7	Vel.0,7 m/s - Carga 5,0 kg	0,0401	0,0380	0,0075
8	Vel.3,5 m/s - Carga 5,0 kg	0,1120	0,0366	0,0072
9	Vel.7,0 m/s - Carga 5,0 kg	0,1160	0,0417	0,0084

A figura 7.10 apresenta a variação de desempenho do ponto em questão, e com exceção dos testes realizados com carga máxima e velocidade mínima, o gráfico apresenta uma tendência positiva.

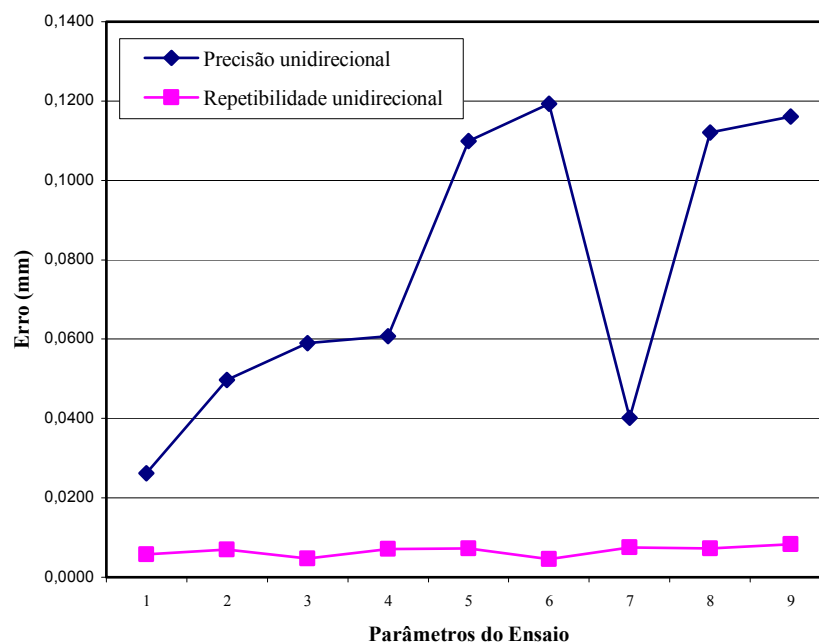


Figura 7.10 – Gráfico de exatidão e repetitividade unidirecional em P₅.

7.2 Considerações Finais

Em virtude dos resultados apresentados neste capítulo pode-se constatar a eficiência do sistema projetado na avaliação de desempenho do robô testado. Os cinco pontos avaliados apresentaram valores distintos, porém, próximos uns aos outros e também, dos valores especificados pelo fabricante.

No que diz respeito à avaliação de desempenho de robôs industriais, o dispositivo proposto atende os requisitos ao qual foi projetado, pois aliado a praticidade, mobilidade e baixo custo, apresenta-se como uma ferramenta importante para definir a aplicabilidade destes equipamentos robóticos em determinados processos produtivos, visto que para determinados parâmetros de processo, as exigências dimensionais são bem maiores.

Diversas são as características que fazem deste dispositivo de medição, utilizado segundo a metodologia da norma ISO 9283 [ISO 9283, 1995], um sistema interessante para ser empregado industrialmente em avaliação de desempenho de robôs. Contudo, existem limitações que podem torná-lo ineficiente em certas aplicações.

As principais vantagens de utilizar o sistema de medição proposto são:

- ✓ Sistema portátil, manuseado por um único operador;
- ✓ Facilidade de montagem;
- ✓ Equipamentos comerciais e de baixo custo;
- ✓ Boa interface com o usuário;
- ✓ Excelente mobilidade no espaço de trabalho do robô;
- ✓ Automatização das leituras para planilhas matemáticas;
- ✓ Medições absolutas;
- ✓ Incerteza de medição compatível com um grande n° de equipamentos robóticos;
- ✓ Não necessita de pré-calibração no local dos ensaios;

Como desvantagens principais deste projeto, pode-se citar as seguintes:

- ✓ Medições com contato;
- ✓ Necessidade de um tempo mínimo para estabilização das leituras dos medidores;
- ✓ Utilizado somente para medições estáticas;
- ✓ Limitações de velocidade e percurso nas medições;
- ✓ Necessidade de sincronização das leituras pelo operador;

8. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho cumprem com o principal objetivo estabelecido em sua parte inicial, ou seja, conceber um dispositivo de medição, que baseado nas metodologias de avaliação de desempenho descritas na norma ISO 9283 [ISO, 1995], permite mensurar as características de exatidão e repetitividade unidirecionais de posicionamento de um robô industrial.

Visando a melhoria dos ensaios para avaliação de desempenho em robôs industriais, recomenda-se para trabalhos futuros o emprego de sistemas ópticos ou sem contato, que permitam a obtenção das componentes dos erros em seis graus de liberdade dentro do volume de trabalho do robô industrial. O desenvolvimento de um software dedicado à avaliação de desempenho de robôs é outro aspecto importante, de modo a executar a aquisição das leituras e proceder os tratamentos matemáticos dos dados, onde os relatórios podem ser gerados ainda durante as realizações dos ensaios. Outra oportunidade seria o desenvolvimento de metodologias para análises e avaliações das características de distância e trajetória em robôs industriais, assim como, outras possibilidades descritas na norma.

Com o desenvolvimento e implementação do sistema proposto foram atingidos os resultados esperados, uma vez que o dispositivo alcança todas as posições de teste e a incerteza de medição total na quantificação das características de desempenho de robôs encontra-se dentro dos parâmetros especificados, suficiente para avaliação do robô ensaiado na validação do trabalho proposto.

Um aspecto interessante do dispositivo proposto é que a sua característica de portabilidade abre espaço para a prestação de serviços de avaliação de desempenho em robôs de diversos tipos, ou pelo menos, faz com que este tipo de equipamento possa ser empregado dentro de indústrias, na avaliação dos processos produtivos em que estas máquinas estão inseridas.

Por fim, espera-se com a realização desta dissertação, ter dado uma maior contribuição no desenvolvimento deste assunto, e também, no melhor entendimento da norma em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB ROBOTICS PRODUCTS AB, Product Manual IRB 1400 M94A/REV1T, Sweden, 1993.

ABB ROBOTICS AB, Product Specification, Articulated Robot, IRB 1400, IRB 1400-CR, IRB 1400-H, M2004/M2000, Rev.5, Sweden, 2004.

BENNETT, D. J.; HOLLERBACH, J. M., “Autonomous calibration of single-loop closed kinematics chains formed by manipulators with passive endpoint constraints”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, v.7, n.5, 1991.

BERNHARDT, R.; DILLMAN, R.; HORMANN, K.; TIERNEY, K., “Integration of robots into CIM”, Chapman & Hall, 1992.

CALAFIORE, G.; INDRI, M.; BONA, B., “Robot Dynamic Calibration: Optimal Excitation Trajectories and Experimental Parameter Estimation”, Journal of Robotic Systems, v.18, n.2, 2001.

CHEN, I-Ming; YANG, G.; TAN, C. T.; YEO, S. H., “Local POE model for robot kinematic calibration”, Mechanism and machine Theory, v.36, 2001.

CHEN, J.; CHAO, Lih-Ming, “Positioning error analysis for robot manipulators with all rotary joints”, IEEE Journal on Robotics and Automation, v.RA-3, n.6, 1987.

CRAIG, J.J., “Introduction to Robotics - Mechanics & Control”, Addison-Wesley Publishing Company, Second Edition, 1986.

CONRAD, K. L.; SHIAKOLAS, P. S.; YIH, T. C., “Robotic Calibration Issues: accuracy, repeatability and calibration”, Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Control & Automation, Greece, 2000.

DRIELS, M. R. , PATHRE, U. S. – “Significance of Observation Strategy on the Design of Robots Calibration Experiments”, Journal of Robotic Systems, v. 7, n. 2, 1990.

DUELEN, G.; SCHÖER, K., “Robot calibration: method and results”, *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*, Great Britain, v.8, n.4, 1991.

EDAN, Y.; FRIEDMAN, L.; MEHREZ, A.; SLUTSKI, L., “A three-dimensional statistical framework for performance measurement of robotic systems”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v.14, 1998.

ELATTA, A. Y.; GEN, Li Pei; ZHI, F. L.; DAOYUAN, Yu; FEI, Luo, “An Overview of Robot Calibration”, *Information Technology Journal*, v.3, n.1, 2004.

EVERETT, L. J.; HSU, Tsing-Wong, “The theory of kinematic parameter identification for industrial robots”, *Transaction of the ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, US, v.110, 1988.

GONZALEZ, R. C.; FU, K. S.; LEE, C. S., “Robotics: control, sensing, vision and intelligence”, New York, 1987.

GOSWANI, A., QUAID, A., PESHKIN, M. – “Complete Parameter Identification of a Robot from Partial Pose Information”, *IEEE International Conference on Robotics and automation*, 1993.

GREENWAY, B. – “Robot accuracy”, *Industrial Robot: An International Journal*, v. 27, n. 4, MCB University Press, 2000.

GROOVER, M. P., “Automation, Product Systems and Computer Integrated Manufacturing”, Prentice-Hall International, USA, 1987.

GROOVER, M. P; WEISS, M.; NAGEL, R. N.; ODREY, N.G., “Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications, McGraw-Hill International, Singapore, 1986.

GUENTHER, R. , PIERI, E. R. – “Avaliação de desempenho de robôs industriais”, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

HATAYAMA, C. H.; WERLANG, R. C.; OLIVEIRA, A. A., “An Experimental System for Measuring Robot Path”, II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2002.

ISO 9283, “Robot industriali di manipolazione – Criteri prestazionali e relative metodi di prova”, International Organization for Standardization, Maggio, 1995.

ISO TR 13309, “Manipulating industrial robots – Informative guide on test equipment and metrology methods of operation for robot performance evaluation in accordance with ISO 9283, International Organization for Standardization, Switzerland, 1995.

JEONG, J. W.; KIM, S. H.; KWAK, Y. K.; SMITH, C. C., “Development of a parallel wire mechanism for measuring position and orientation of a robot end-effector”, *Mechatronics*, v.8, 1998.

JUDD, R. P.; KNASISNKI, A. B., “A technique to calibrate industrial robots with experimental verification”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.6, n.1, 1990.

LAFRATTA, F. H., “Metodologia e instrumentação para qualificação de robôs industriais – Ensaio de repetitividade”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1990.

LIÉGEOIS, A., “Performance and Computer-Aided Design”, Prentice-Hall, v.7, 1984.

LAUS, L. P., “Identificação da Cinemática de Robôs Industriais”, Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 1998.

LORINI, F. J., “Fundamentos de Robótica Industrial”, Notas de Aulas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

MASS, Hans-Gerd, “Dynamic Photogrammetric Calibration of Industrial Robots”, *SPIE Proceedings Series*, v.3174, San Diego, 1997.

MAYER, J. R. R. , PARKER, G. A. – “A Portable Instrument for 3D Dynamic Robot Measurements Using Triangulation and Laser Tracking”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, V. 10, N. 4, 1994.

MENEGHELLO, G. P., “Aplicação de um Sistema Robótico Utilizando Recursos de Sistemas CAD/CAM para o Processo de Fresamento”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

MITUTOYO, Catálogo Geral de Produtos PG405, p.114, 2004.

MOTTA, J. M. S. T.; CARVALHO, G. C.; McMASTER, R. S., “Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera”, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, v.17, 2001.

PARK, E. J.; WEIHUA, Xu; MILLS, J. L., “Calibration-based absolute localization of parts for multi-robot”, Robotica, v.20, 2002.

PINTO, T. L. F. C.; CAVACO, M. A. M., “Avaliação do desempenho estático de robôs industriais utilizando um braço de medição portátil”, Congresso de Metrologia, Sociedade Brasileira de Metrologia, 2003.

PINTO, T. L. F. C, “Avaliação de Desempenho de Robôs Industriais Utilizando um Braço de Medição Portátil”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

RIEMER, R.; EDAN, Y., “Evaluation of influence of target location on robot repeatability”, Robotica, v.18, 2000.

ROMANO, V. F., “Robótica Industrial – Aplicações na Indústria de Manufatura e de Processos”, Edgard Blucher, 2002.

SARAMAGO, M. A. P. – “Projeto e desenvolvimento de um Sistema de Calibração e Medida de Exatidão para Robôs Industriais”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1993.

SCIAVICCO, L. , SICILIANO, B. – “Robotica Industriale – modellistica e controllo di manipolatori”, McGraw Hill, Milano, 1995.

SHIAKOLAS, P. S.; CONRAD, K. L.; YIH, T. C., “On The Accuracy, Repeatability, and Degree of Influence of Kinematics Parameters for Industrial Robots”, International Journal of Modelling and Simulation, v.22, n.3, 2002.

SHIH, Sheng-Wen; HUNG, Yi-Ping; LIN, Wei-Song, “New Closed-Form Solution for Kinematic Parameter Identification of a Binocular Head Using Point Measurements”, IEEE Transactionson Systems, Man, And Cybernetics, v.28, n.2, 1998.

SHIRINZADEH, B., “Laser interferometry based tracking for dynamic measurements”, Industrial Robot: An International Journal, v.25, n.1, 1998.

SILVA, M. F. S., “Simulação e Programação Off-line de Robôs de Montagem”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1996.

SIQUEIRA, M. L.; FILHO, A. P.; MOTTA, J. M. S. T., “Avaliação da exatidão na posição de robôs industriais utilizados para soldagem em trajetórias retilíneas através de programação off-line”, I Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2001.

TAKAMASU, K.; MURUI, I.; SATO, O.; OLEA, G.; FURUTANI, R., “Calibration of three dimensional mechanism – novel calibration for 3 DOF parallel mechanism”, IEEE International Conference on Industry Technology, Thailand, 2002.

ZHUANG, H.; WANG, K., ROTH, Z. S., “Simultaneous calibration of a robot and hand-mounted camera”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, v.11, n.5, 1995.

ZHUANG, H.; MENG, Y., “Self-Calibration of Camera-Equipped Robot Manipulators”, The International Journal of Robotics Research, v.20, n.11, 2001.

ANEXOS

Anexo 1 - Características de Distância

As características de precisão e repetibilidade de distância como definido na norma, quantificam, respectivamente, o erro na distância entre duas posições comandadas e as médias das posições alcançadas, e a flutuação na distância e orientação para uma série de movimentos repetidos entre duas posições.

Essas características dizem respeito apenas a robôs que têm entrada de dados manual ou que podem ser programados *off-line*. Dependendo do procedimento adotado para programação das posições, podem ocorrer diferenças nos resultados dos testes, sendo assim, se faz necessário explicitar no relatório o método utilizado.

1.1 Precisão de Distância (AD)

A precisão de distância expressa o erro na posição e orientação entre a distância comandada e a média das distâncias alcançadas. A precisão de posicionamento é representada pela equação A.1, onde a distância comandada (D_c) é definida pela diferença das posições comandadas P_{c1} e P_{c2} e a distância de resposta média (\bar{D}) pela diferença das posições alcançadas P_{1j} e P_{2j} , conforme ilustrado na figura A.1.

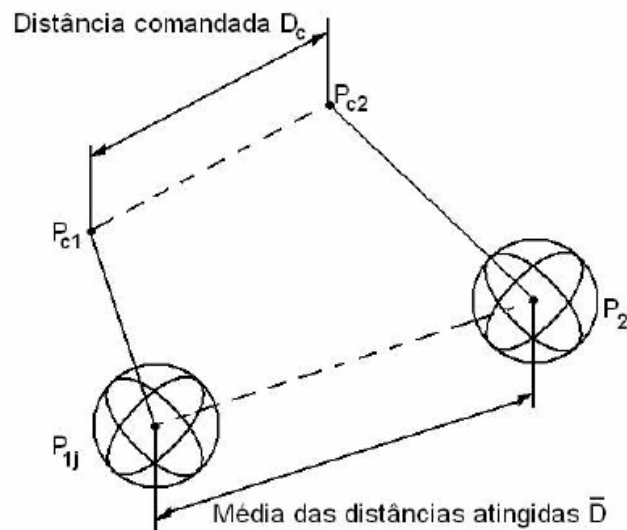


Figura 1 – Precisão de distância [22].

A precisão de distância é calculada da seguinte forma:

$$AD = D_c - \bar{D} \quad (1.1)$$

$$D_c = |P_{c1} - P_{c2}| = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2} \quad (1.2)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j \quad (1.3)$$

$$D_j = |P_{1j} - P_{2j}| = \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2} \quad (1.4)$$

onde,

x_{c1} , y_{c1} e z_{c1} são as coordenadas de P_{c1} disponíveis no computador do robô;

x_{c2} , y_{c2} e z_{c2} são as coordenadas de P_{c2} disponíveis no computador do robô;

x_{1j} , y_{1j} e z_{1j} são as coordenadas de P_{1j} ;

x_{2j} , y_{2j} e z_{2j} são as coordenadas de P_{2j} ;

n é o número de repetições.

A precisão de posicionamento de distância também pode ser calculada individualmente para cada um dos eixos do sistema base de coordenadas, onde as equações estão descritas abaixo.

$$AD_x = D_{cx} - \bar{D}_x \quad (1.5)$$

$$AD_y = D_{cy} - \bar{D}_y \quad (1.6)$$

$$AD_z = D_{cz} - \bar{D}_z \quad (1.7)$$

$$D_{cx} = |x_{c1} - x_{c2}| \quad (1.8)$$

$$D_{cy} = |y_{c1} - y_{c2}| \quad (1.9)$$

$$D_{cz} = |z_{c1} - z_{c2}| \quad (1.10)$$

$$\bar{D}_x = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{xj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |x_{1j} - x_{2j}| \quad (1.11)$$

$$\bar{D}_y = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{yj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_{1j} - y_{2j}| \quad (1.12)$$

$$\bar{D}_z = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{zj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |z_{1j} - z_{2j}| \quad (1.13)$$

A precisão de orientação é calculada igualmente para cada eixo escolhido na precisão de distância (AD), e pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$AD_a = D_{ca} - \bar{D}_a \quad (1.14)$$

$$AD_b = D_{cb} - \bar{D}_b \quad (1.15)$$

$$AD_c = D_{cc} - \bar{D}_c \quad (1.16)$$

$$D_{ca} = |a_{c1} - a_{c2}| \quad (1.17)$$

$$D_{cb} = |b_{c1} - b_{c2}| \quad (1.18)$$

$$D_{cc} = |c_{c1} - c_{c2}| \quad (1.19)$$

$$\bar{D}_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |a_{1j} - a_{2j}| \quad (1.20)$$

$$\bar{D}_b = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_b = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |b_{1j} - b_{2j}| \quad (1.21)$$

$$\bar{D}_c = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_c = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |c_{1j} - c_{2j}| \quad (1.22)$$

onde,

a_{c1} , b_{c1} e c_{c1} são as orientações de P_{c1} disponíveis no computador do robô;

a_{c2} , b_{c2} e c_{c2} são as orientações de P_{c2} disponíveis no computador do robô;

a_{1j} , b_{1j} e c_{1j} são as orientações de P_{1j} ;

a_{2j} , b_{2j} e c_{2j} são as orientações de P_{2j} ;

n é o número de repetições.

A tabela 1 apresenta um sumário sobre as condições para os testes de precisão de distância, onde é descrita a relação entre carga, velocidade, posições de teste e quantidade mínima necessária de ciclos.

Tabela 1 - Condições para os testes de precisão e repetibilidade de distância [22].

CARGA	VELOCIDADE	POSIÇÕES	Nº DE CICLOS
100% do valor nominal máximo (obrigatório)	100% do valor nominal máximo (obrigatório)	P2-P4	30
	50% do valor nominal máximo (opcional)		
	10% do valor nominal máximo (opcional)		

A figura 2 ilustra a seqüência dos ciclos de medição, onde o robô é programado para mover seus segmentos sucessivamente para as posições P_2 e P_4 . As medidas realizadas no teste devem ser realizadas unidirecionalmente.

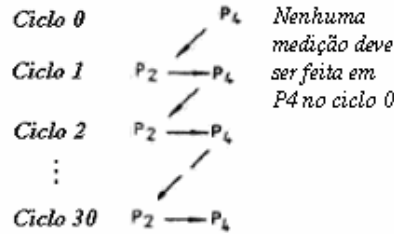


Figura 2 – Seqüência do ciclo de medição [22].

1.2 Repetibilidade de Distância (RD)

A repetibilidade de distância quantifica a proximidade entre as diversas distâncias alcançadas para uma distância comandada por repetidas vezes na mesma direção. A repetibilidade de posicionamento de distância é calculada pelas equações abaixo, onde os três eixos de coordenadas podem ser mensurados, analogamente, ao cálculo de precisão de distância (AD).

$$RD = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (1.23)$$

$$RD_x = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{xj} - \bar{D}_x)^2}{n-1}} \quad (1.24)$$

$$RD_y = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{yj} - \bar{D}_y)^2}{n-1}} \quad (1.25)$$

$$RD_z = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{zj} - \bar{D}_z)^2}{n-1}} \quad (1.26)$$

A repetibilidade de orientação é calculada igualmente para cada eixo escolhido na repetibilidade de posicionamento de distância (RD), e pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$RD_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{aj} - \bar{D}_a)^2}{n-1}} \quad (1.27)$$

$$RD_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{bj} - \bar{D}_b)^2}{n-1}} \quad (1.28)$$

$$RD_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{cj} - \bar{D}_c)^2}{n-1}} \quad (1.29)$$

As condições para os testes de repetibilidade de distância são as mesmas descritas na tabela 1 para a característica de precisão de distância, assim como, as seqüências dos ciclos de medição ilustrados na figura 2.

Anexo 2 - Características de Trajetória

As características de trajetória definem a habilidade de o robô mover a sua interface mecânica ao longo de um percurso na mesma direção por repetidas vezes. Este parâmetro quantifica os erros entre uma trajetória comandada, especificada na programação do robô, e a respectiva trajetória percorrida, em resposta ao funcionamento do robô em modo automático.

2.1 Precisão de Trajetória (AT)

A precisão de trajetória é determinada de duas formas: precisão de posição e de orientação.

a) Precisão de posição de trajetória (AT_p): que é definida como a diferença entre as posições do percurso comandado e a linha do baricentro (G_j) do conjunto das posições dos percursos percorridos após n visitas para cada número de pontos medidos, representa a máxima distância ao longo da trajetória comandada, conforme ilustrado na figura 3. As equações para os cálculos da precisão de posicionamento da trajetória definida no eixo Z estão descritas abaixo.

$$AT_p = \underset{i=1}{\overset{m}{\text{máx}}} \sqrt{(x_{ci} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ci} - \bar{y}_i)^2} \quad (2.1)$$

$$AT_x = \underset{i=1}{\overset{m}{\text{máx}}} |x_{ci} - \bar{x}_i| \quad (2.2)$$

$$AT_y = \underset{i=1}{\overset{m}{\text{máx}}} |y_{ci} - \bar{y}_i| \quad (2.3)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (2.4)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2.5)$$

onde,

x_{ci}, y_{ci} são as coordenadas da trajetória comandada ao ponto z_i ;

x_{ij}, y_{ij} são as coordenadas da trajetória comandada correspondente ao ponto z_i para j -ésimas respostas.

b) Precisão de orientação de trajetória (AT_a, AT_b e AT_c): que são definidas como a diferença entre as orientações comandadas e a média das orientações percorridas, representa o máximo desvio angular ao longo do percurso comandado, e são expressas da seguinte forma:

$$AT_a = \underset{i=1}{\overset{m}{\text{máx}}}|(a_{ci} - \bar{a}_i)| \quad (2.6)$$

$$AT_b = \underset{i=1}{\overset{m}{\text{máx}}}|(b_{ci} - \bar{b}_i)| \quad (2.7)$$

$$AT_c = \underset{i=1}{\overset{m}{\text{máx}}}|(c_{ci} - \bar{c}_i)| \quad (2.8)$$

$$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2.9)$$

$$\bar{b}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (2.10)$$

$$\bar{c}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad (2.11)$$

onde,

a_{ci} , b_{ci} e c_{ci} são as orientações comandadas medidas no ponto z_i ;

a_{ij} , b_{ij} e c_{ij} são as orientações alcançadas medidas no ponto z_i para j-ésimas respostas.

A tabela 2 ilustra as condições para os testes de precisão de distância, onde está descrito a relação entre carga, velocidade, posições de teste e quantidade mínima necessária de ciclos.

Tabela 2 – Condições para os testes de precisão e repetibilidade de trajetória [22].

CARGA	VELOCIDADE	POSIÇÕES	Nº DE CICLOS
100% do valor nominal máximo (obrigatório)	100% do valor nominal máximo (obrigatório)	Trajetória linear E1-E3 e E3-E1	10
	50% do valor nominal máximo (opcional)		
	10% do valor nominal máximo (opcional)		
50% do valor nominal máximo (opcional)	100% do valor nominal máximo (obrigatório)		
	50% do valor nominal máximo (opcional)		
	10% do valor nominal máximo (opcional)		

No caso onde as flutuações de velocidade são significantes ao longo do percurso percorrido, as repetidas medidas são como uma função de tempo e devem ser referidas aos mesmos pontos no espaço junto com a trajetória comandada.

O ponto inicial encontrar-se-á na parte externa do plano de teste escolhido. Além disso, os testes devem ser bidirecionais e os resultados devem ser determinados para no mínimo uma das condições, seja de carga ou velocidade.

2.2 Repetibilidade de Trajetória (RT)

A repetibilidade de trajetória expressa a proximidade entre os percursos percorridos para o mesmo percurso comandado, isto é, a variação da posição e orientação da trajetória após repetidas visitas. Pode ser dividida de duas formas: de posicionamento e de orientação da trajetória.

a) Repetibilidade de posicionamento da trajetória (RT_p): que é definida pelo raio máximo das circunferências no plano normal com o centro na linha de baricentros, conforme ilustrado na figura 3.

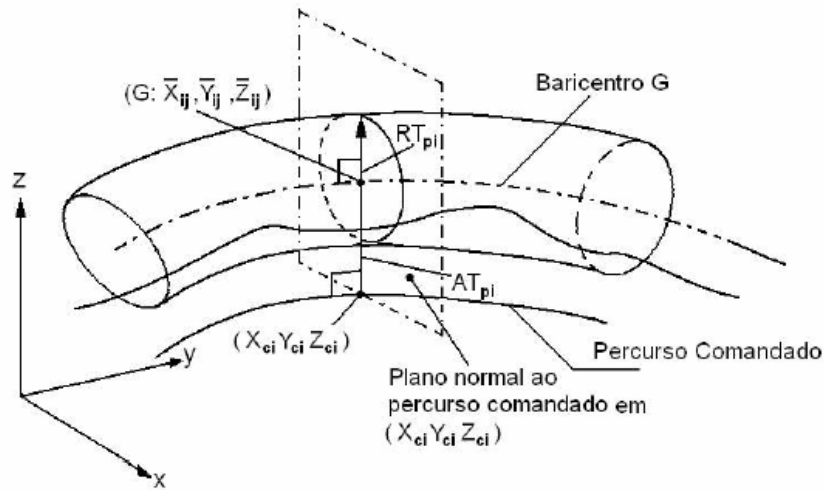


Figura 3 – Precisão e repetibilidade de trajetória [22].

As equações para os cálculos da repetibilidade de posicionamento da trajetória definida no eixo Z estão descritas abaixo.

$$RT_p = \max_{i=1}^m [\bar{l}_i + 3S_{li}] \quad (2.12)$$

$$\bar{l}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij} \quad (2.13)$$

$$S_{li} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n-1}} \quad (2.14)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2} \quad (2.15)$$

Onde, as variáveis das equações são as mesmas descritas no parâmetro de precisão de trajetória.

b) Repetibilidade de orientação da trajetória (RT_a , RT_b e RT_c): que são definidas como o máximo desvio entre o valor médio dos ângulos percorridos, e são expressas da seguinte forma:

$$RT_a = \max_{i=1}^m \left[3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_i)^2}{n-1}} \right] \quad (2.16)$$

$$RT_b = \max_{i=1}^m \left[3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_{ij} - \bar{b}_i)^2}{n-1}} \right] \quad (2.17)$$

$$RT_c = \max_{i=1}^m \left[3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - \bar{c}_i)^2}{n-1}} \right] \quad (2.18)$$

Onde, as variáveis das equações são as mesmas descritas no parâmetro de precisão de trajetória. Para realização dos testes, deve-se seguir o mesmo sumário descrito no parâmetro de precisão de trajetória.

Anexo 3 – Programação dos Ensaios (Linguagem RAPID)

3.1 Programa da Posição de Teste P₁

```
%%%  
VERSION:1  
LANGUAGE:ENGLISH  
%%%  
MODULE UFRGS  
  
! Declaração de variáveis  
  
! Declaração dos pontos  
CONST robtarget prepouso:=[[342.3,-3.18,810.59],[0.001182,0.382848,-  
0.923811,-0.00051],[-1,0,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
CONST robtarget pteste2:=[[417.62,-314.19,302.02],[0.001652,-0.016286,-  
0.999866,-0.000315],[-1,-1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
  
VAR speeddata vteste:=[250,500,5000,1000];  
  
! Inicia procedimento inicial  
PROC main ()  
  
    ! Carga de 500 gramas  
    mov1;  
  
    waittime 30;  
  
    ! Carga de 2500 gramas  
    mov2;  
  
    waittime 30;  
  
    ! Carga de 5000 gramas  
    mov3;  
  
EXIT;  
ENDPROC  
  
proc mov1 ()  
  
MoveL offs(prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;  
  
for j from 1 to 3 do  
for i from 1 to 30 do  
  
    if j=1 then  
        vteste:=[700,500,5000,1000];  
    endif  
  
    if j=2 then  
        vteste:=[3500,500,5000,1000];  
    endif  
  
    if j=3 then  
        vteste:=[7000,500,5000,1000];  
    endif  
  
MoveL offs(prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;  
MoveL offs(pteste2,600,600,600),vteste,fine,tool0;  
MoveL offs(pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;  
waittime 3;  
MoveL offs(pteste2,600,600,600),vteste,fine,tool0;
```

```

        MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

proc mov2 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,600,600),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,600,600,600),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

proc mov3 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,600,600),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,600,600,600),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

```

```
endfor
endfor

ENDPROC

ENDMODULE
```

3.2 Programa da Posição de Teste P₂

```
%%%
VERSION:1
LANGUAGE:ENGLISH
%%%
MODULE UFRGS

! Declaração de variáveis

! Declaração dos pontos
CONST robtarget prepouso:=[[342.3,-3.18,810.59],[0.001182,0.382848,-
0.923811,-0.00051],[-1,0,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget pteste2:=[[417.62,-314.19,302.02],[0.001652,-0.016286,-
0.999866,-0.000315],[-1,-1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR speeddata vteste:=[250,500,5000,1000];

! Inicia procedimento inicial
PROC main ()

    ! Carga de 500 gramas
    mov1;

    waittime 30;

    ! Carga de 2500 gramas
    mov2;

    waittime 30;

    ! Carga de 5000 gramas
    mov3;

EXIT;
ENDPROC

proc mov1 ()

MoveL offs(prepuoso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif
enddo
enddo
```

```

endif

MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
MoveL offs (pteste2,0,0,0),vteste,fine,tool0;
waittime 3;
MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

proc mov2 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

proc mov3 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

```

```

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

ENDMODULE

```

3.3 Programa da Posição de Teste P₃

```

%%%
VERSION:1
LANGUAGE:ENGLISH
%%%
MODULE UFRGS

! Declaração de variáveis

! Declaração dos pontos
CONST robtarget prepouso:=[[342.3,-3.18,810.59],[0.001182,0.382848,-
0.923811,-0.00051],[-1,0,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget pteste2:=[[417.62,-314.19,302.02],[0.001652,-0.016286,-
0.999866,-0.000315],[-1,-1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR speeddata vteste:=[250,500,5000,1000];

! Inicia procedimento inicial
PROC main ()

    ! Carga de 500 gramas
    mov1;

    waittime 30;

    ! Carga de 2500 gramas
    mov2;

    waittime 30;

    ! Carga de 5000 gramas
    mov3;

EXIT;
ENDPROC

proc mov1 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

```

```

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,0,600,0),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

proc mov2 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,0,600,0),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

proc mov3 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

```



```

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,0,600,0),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,300,300,300),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

ENDMODULE

```

3.4 Programa da Posição de Teste P₄

```

%%%
VERSION:1
LANGUAGE:ENGLISH
%%%
MODULE UFRGS

! Declaração de variáveis

! Declaração dos pontos
CONST robtarget prepouso:=[342.3,-3.18,810.59],[0.001182,0.382848,-
0.923811,-0.00051],[-1,0,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09];
CONST robtarget pteste2:=[417.62,-314.19,302.02],[0.001652,-0.016286,-
0.999866,-0.000315],[-1,-1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09];

VAR speeddata vteste:=[250,500,5000,1000];

! Inicia procedimento inicial
PROC main ()

    ! Carga de 500 gramas
    mov1;

    waittime 30;

    ! Carga de 2500 gramas
    mov2;

    waittime 30;

    ! Carga de 5000 gramas
    mov3;

EXIT;
ENDPROC

proc mov1 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

```

```

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,0,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,600,600),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,600,0,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

```

ENDPROC

```
proc mov2 ()
```

```

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,0,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,600,600),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,600,0,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

```

ENDPROC

```
proc mov3 ()
```

```

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

```

```

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,0,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,600,600),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,600,0,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

ENDMODULE

```

3.5 Programa da Posição de Teste P₅

```

%%%
VERSION:1
LANGUAGE:ENGLISH
%%%
MODULE UFRGS

! Declaração de variáveis

! Declaração dos pontos
CONST robtarget prepouso:=[[342.3,-3.18,810.59],[0.001182,0.382848,-
0.923811,-0.00051],[-1,0,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget pteste2:=[[417.62,-314.19,302.02],[0.001652,-0.016286,-
0.999866,-0.000315],[-1,-1,-1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

VAR speeddata vteste:=[250,500,5000,1000];

! Inicia procedimento inicial
PROC main ()

    ! Carga de 500 gramas
    mov1;

    waittime 30;

    ! Carga de 2500 gramas
    mov2;

    waittime 30;

    ! Carga de 5000 gramas
    mov3;

```

```

EXIT;
ENDPROC

proc mov1 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,600,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,0,600),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,600,0,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

ENDPROC

proc mov2 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

    if j=1 then
        vteste:=[700,500,5000,1000];
    endif

    if j=2 then
        vteste:=[3500,500,5000,1000];
    endif

    if j=3 then
        vteste:=[7000,500,5000,1000];
    endif

    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,600,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (pteste2,600,0,600),vteste,fine,tool0;
    waittime 3;
    MoveL offs (pteste2,600,0,800),vteste,fine,tool0;
    MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

```

ENDPROC

proc mov3 ()

MoveL offs (prepouso,0,0,0),v50,fine,tool0;

for j from 1 to 3 do
for i from 1 to 30 do

if j=1 then
 vteste:=[700,500,5000,1000];
endif

if j=2 then
 vteste:=[3500,500,5000,1000];
endif

if j=3 then
 vteste:=[7000,500,5000,1000];
endif

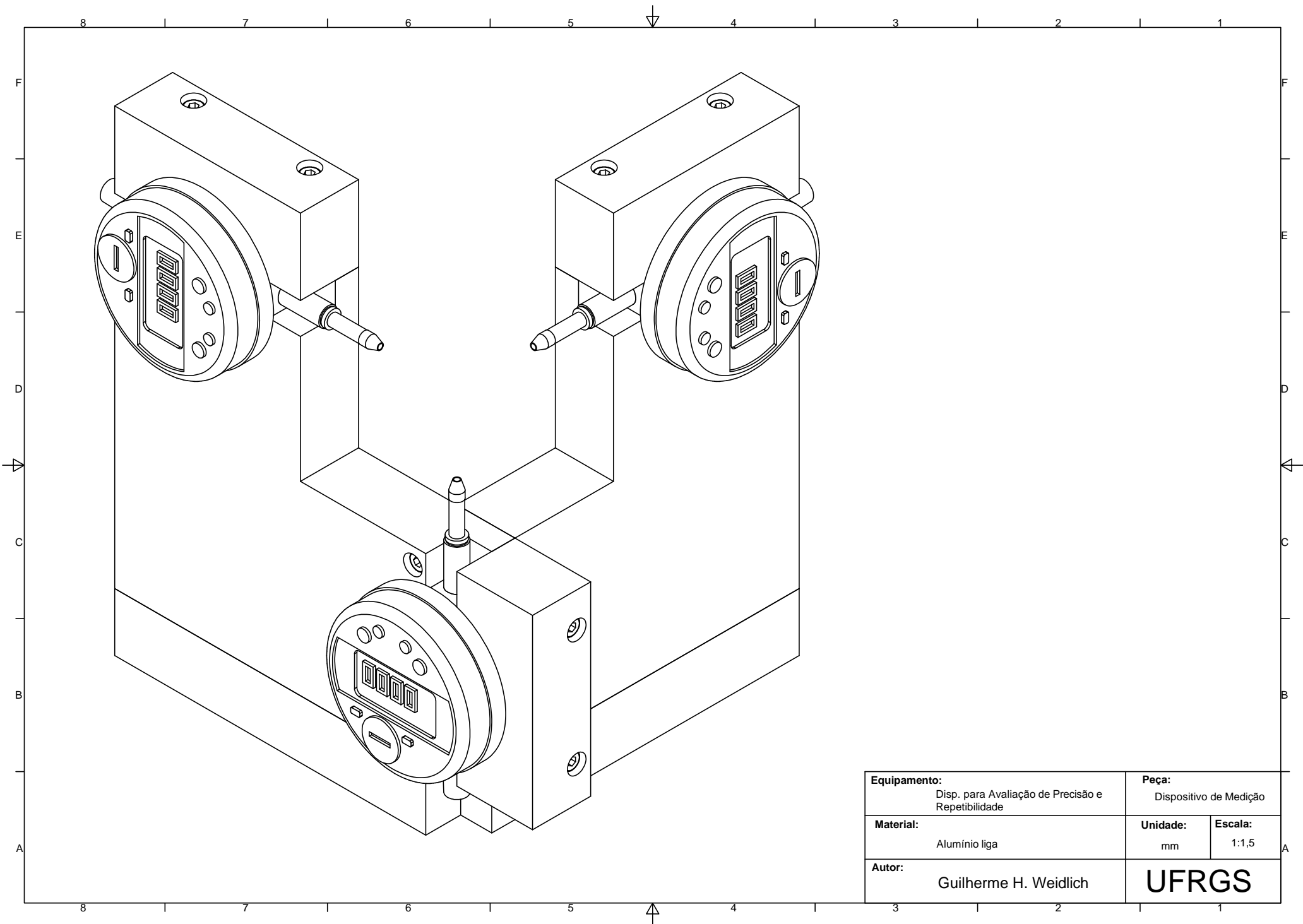
MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;
MoveL offs (pteste2,600,600,800),vteste,fine,tool0;
MoveL offs (pteste2,600,0,600),vteste,fine,tool0;
waittime 3;
MoveL offs (pteste2,600,0,800),vteste,fine,tool0;
MoveL offs (prepouso,0,0,0),vteste,fine,tool0;

endfor
endfor

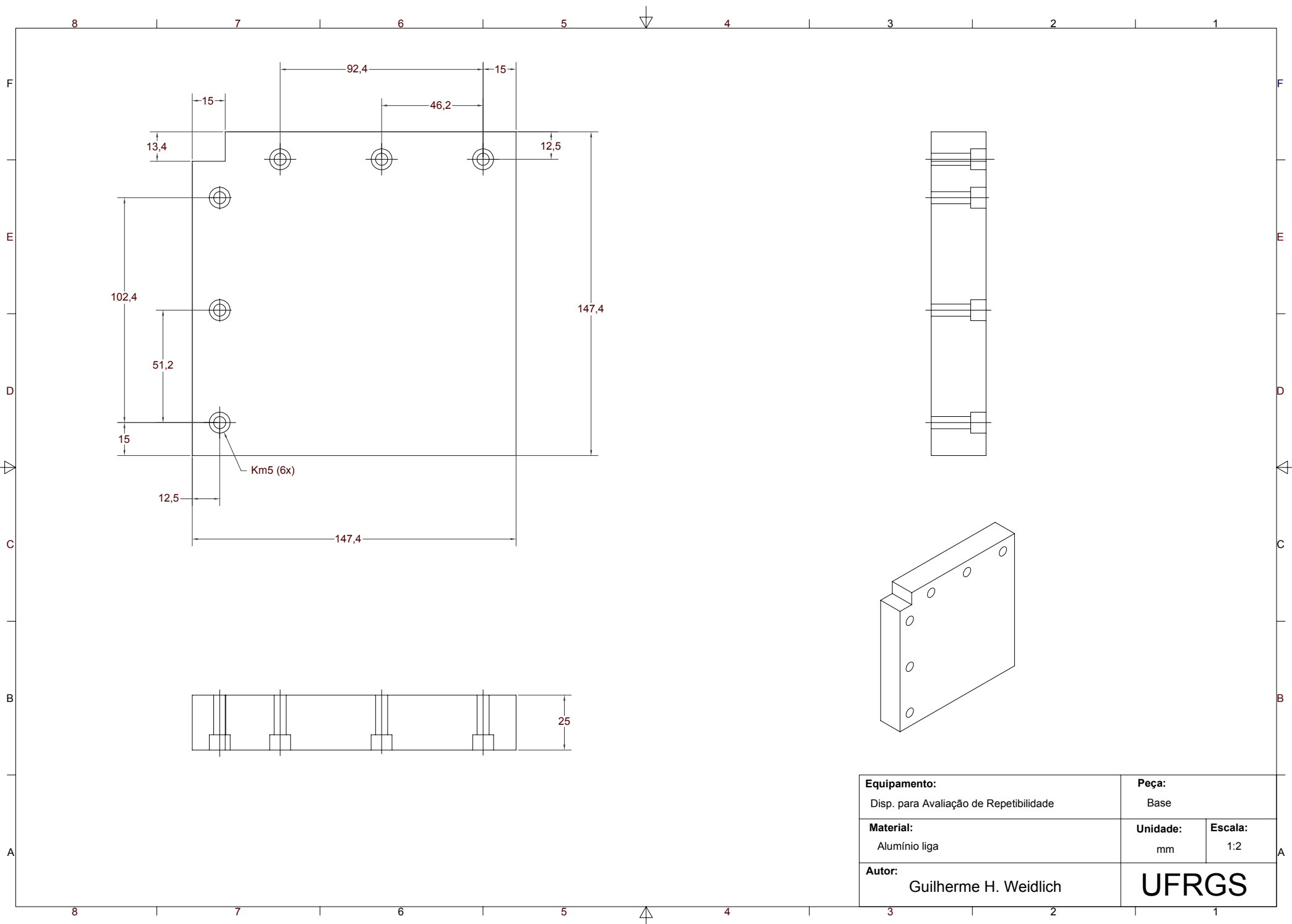
ENDPROC

ENDMODULE

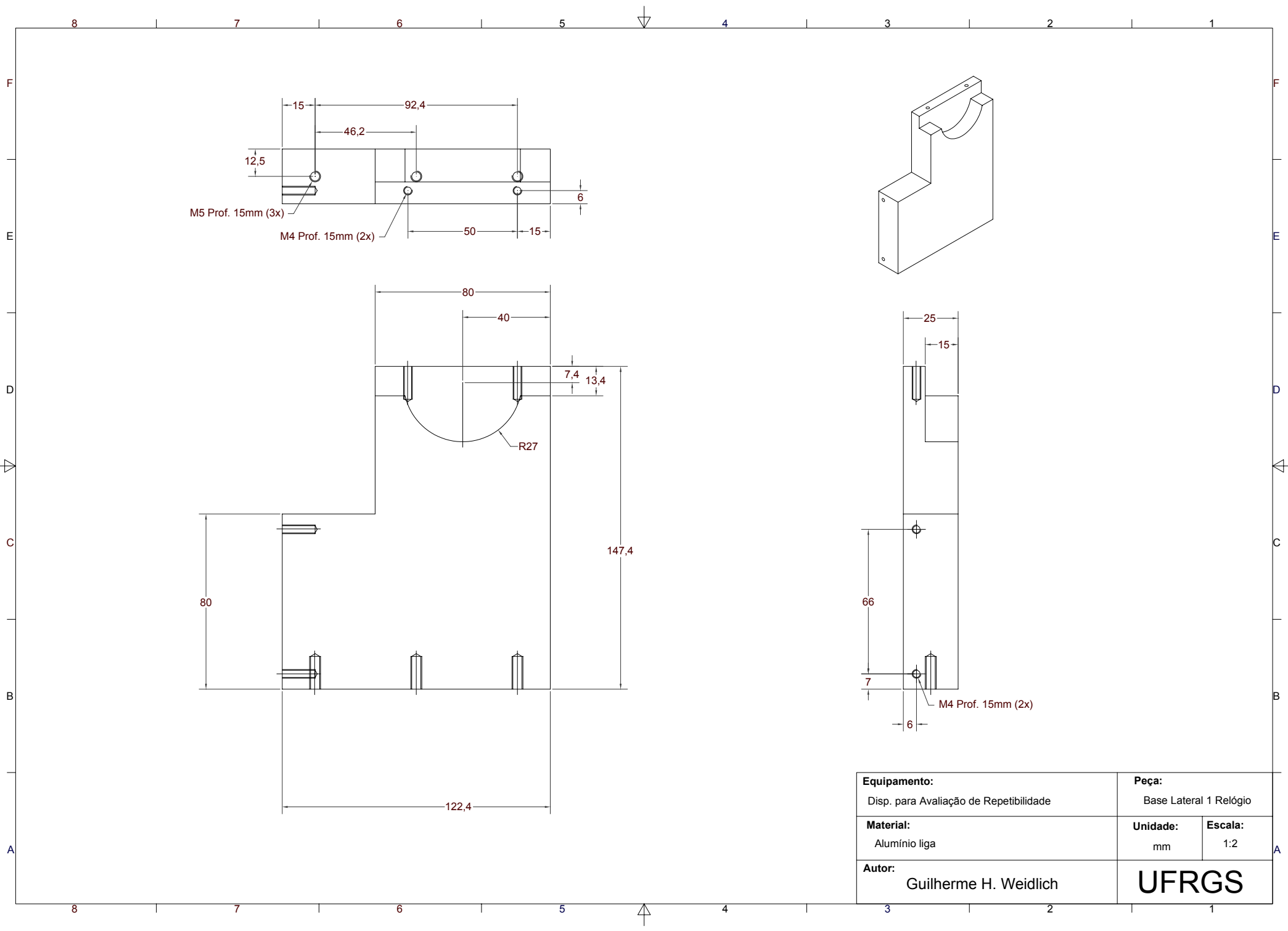
Apêndice 4 – Projeto do Dispositivo de Avaliação de Desempenho



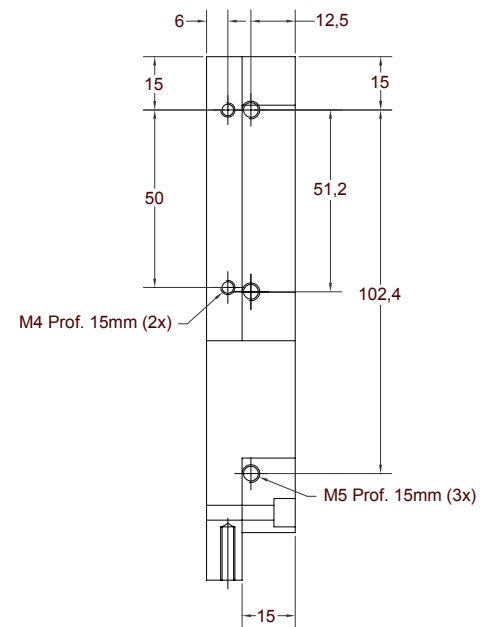
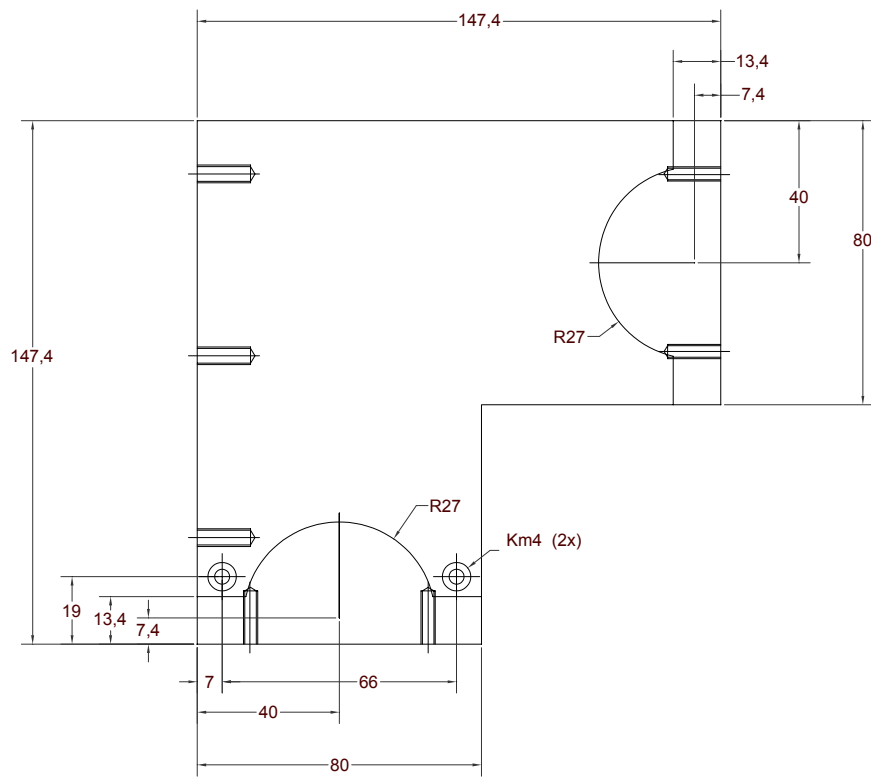
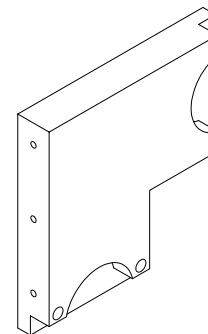
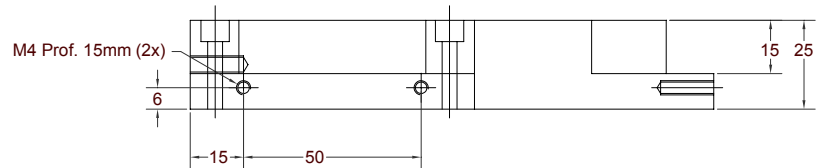
Equipamento: Disp. para Avaliação de Precisão e Repetibilidade		Peça: Dispositivo de Medição	
Material: Alumínio liga	Unidade: mm	Escala: 1:1,5	
Autor: Guilherme H. Weidlich		UFRGS	



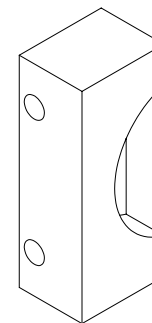
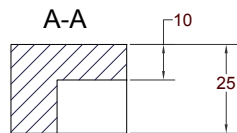
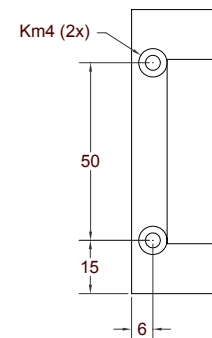
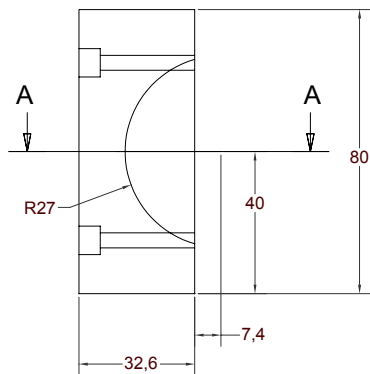
Equipamento: Disp. para Avaliação de Repetibilidade		Peça: Base	
Material: Alumínio liga		Unidade: mm	Escala: 1:2
Autor: Guilherme H. Weidlich		UFRGS	



Equipamento: Disp. para Avaliação de Repetibilidade	Peça: Base Lateral 1 Relógio	
Material: Alumínio liga	Unidade: mm	Escala: 1:2
Autor: Guilherme H. Weidlich	UFRGS	



Equipamento: Disp. para Avaliação de Repetibilidade	Peça: Base Lateral 2 Relógios	
Material: Alumínio liga	Unidade: mm	Escala: 1:2
Autor: Guilherme H. Weidlich	UFRGS	



Equipamento: Disp. para Avaliação de Repetibilidade	Peça: Trava	
Material: Alumínio liga	Unidade: mm	Escala: 1:1
Autor: Guilherme H. Weidlich	UFRGS	